

MISCELLANEA

INGV

Monitoraggio elettromagnetico
in banda VLF.
Una guida introduttiva



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

68

Direttore Responsabile

Valeria DE PAOLA

Editorial Board

Luigi CUCCI - Editor in Chief (luigi.cucci@ingv.it)
Raffaele AZZARO (raffaele.azzaro@ingv.it)
Christian BIGNAMI (christian.bignami@ingv.it)
Viviana CASTELLI (viviana.castelli@ingv.it)
Rosa Anna CORSARO (rosanna.corsaro@ingv.it)
Domenico DI MAURO (domenico.dimauro@ingv.it)
Mauro DI VITO (mauro.divito@ingv.it)
Marcello LIOTTA (marcello.liotta@ingv.it)
Mario MATTIA (mario.mattia@ingv.it)
Milena MORETTI (milena.moretti@ingv.it)
Nicola PAGLIUCA (nicola.pagliuca@ingv.it)
Umberto SCIACCA (umberto.sciacca@ingv.it)
Alessandro SETTIMI (alessandro.settimi1@istruzione.it)
Andrea TERTULLIANI (andrea.tertulliani@ingv.it)

Segreteria di Redazione

Francesca DI STEFANO - Coordinatore
Rossella CELI
Robert MIGLIAZZA
Barbara ANGIONI
Massimiliano CASCONI
Patrizia PANTANI
Tel. +39 06 51860068
redazione@ingv.it

REGISTRAZIONE AL TRIBUNALE DI ROMA N.174 | 2014, 23 LUGLIO

© 2014 INGV Istituto Nazionale
di Geofisica e Vulcanologia
Rappresentante legale: Carlo DOGLIONI
Sede: Via di Vigna Murata, 605 | Roma



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

MISCELLANEA

INGV

Monitoraggio elettromagnetico in banda VLF. Una guida introduttiva

Adriano Nardi

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Sismologia e Tettonofisica

Accettato 17 luglio 2021 | Accepted 17 July 2021

Come citare | How to cite A. Nardi, (2022). Monitoraggio elettromagnetico in banda VLF. Una guida introduttiva. Misc. INGV, 68: 1-142,
<https://doi.org/10.13127/misc/68>

In copertina Segnale complesso composto dalla somma di due sinusoidi pure | Cover Complex signal composed of the sum of two pure sinusoids

68

INDICE

Riassunto	7
<i>Abstract</i>	7
Introduzione	7
1. Precursori elettromagnetici del terremoto	8
1.1 Le motivazioni della ricerca di segnali EM in ambito sismologico	8
1.2 Storia di un precursore non ancora nato e di un fenomeno mai scoperto	9
1.3 Un precursore della rottura della roccia	29
1.3.1 Osservazioni in laboratorio	29
1.3.2 Osservazioni in cava	36
1.4 Osservazioni di segnali di possibile origine crostale	36
1.5 Ipotesi sulla sorgente EM	38
2. Monitoraggio elettromagnetico a bassa frequenza	42
2.1 Le bande radio a bassa frequenza	45
2.2 Tecniche, strumentazione e software	48
2.3 Importanza dell'analisi spettrale	56
2.4 Strategie adottate nella rete sperimentale dell'INGV	58
3. Introduzione all'analisi numerica dei segnali	62
3.1 Conversione AD	62
3.2 Aliasing	63
3.3 Risoluzione del segnale digitale	65
3.4 Analisi spettrale	68
3.5 Frequenze armoniche	69
3.6 Scala logaritmica contro risoluzione matematica	69
3.7 Esempi di applicazione pratica	72
4. Acquisizione e analisi dati con Spectrum Lab	75
4.1 Impostazione dei parametri di analisi spettrale HiRes	76
4.2 Salvataggio automatico e personalizzato degli spettrogrammi HiRes	79
4.3 Impostazioni di analisi e salvataggio degli spettrogrammi LoRes	83
4.4 Personalizzazione e blocco delle finestre di lavoro	86
4.5 Calibrazione delle misure	87
4.6 Scelta della scala cromatica	90
5. Controllo remoto con Apache Server	91
5.1 Installazione di Apache	91
5.2 Installazione dell'interprete PHP	91
5.3 Interfaccia WEB di controllo remoto	93
6. Interpretazione degli spettrogrammi VLF	94
6.1 Segnali di origine naturale	96
6.2 Segnali prodotti dall'attività umana	98

7. Appendice	100
7.1 Intensità e Magnitudo del terremoto	100
7.2 Analogie nella propagazione di onde sismiche ed EM	104
7.3 Energia, ampiezza, intensità, potenza e attenuazione di un'onda	105
7.4 Legge di Ohm	107
7.5 Decibel	107
7.6 Calcoli rapidi con i dB senza usare i logaritmi	108
7.7 Formulario di analisi dei segnali	109
7.8 Script di salvataggio dati per Spectrum Lab	109
7.9 Modifica del file di configurazione di Apache Server	110
7.10 Codice dell'interfaccia WEB di controllo remoto delle stazioni VLF	110
7.11 Consigli per approfondire lo studio	129
Disclaimer	130
Ringraziamenti	130
Bibliografia	131
Riferimenti bibliografici della Tabella 1	135
Sitografia	138
Riferimenti al Software	138

Riassunto

Questo testo vuole essere un'introduzione alle problematiche del monitoraggio elettromagnetico a bassa frequenza, con particolare approfondimento sulla banda VLF. Vengono affrontate tutte le tematiche correlate, dall'analisi storica all'analisi numerica, dalla sismologia alla geotecnica, all'elettronica, all'informatica. L'impostazione è divulgativa e didattica. L'approccio interdisciplinare non porrà al lettore un problema di competenze, anzi l'obiettivo è quello di completare ogni specifico bagaglio culturale. La geofisica è già un argomento in cui convergono percorsi formativi diversi, solitamente di impostazione geologica o fisica. In questo caso, in cui si affronta anche un aspetto tecnico, non è proprio possibile indirizzare una guida a una specifica figura professionale. Per questo motivo, mentre alcuni argomenti risulteranno nuovi, altri inevitabilmente appariranno scontati o forse affrontati superficialmente. La realtà è che ogni tematica, per quanto possibile, è stata affrontata allo stesso livello. All'occorrenza, un'appendice offrirà di volta in volta ulteriori approfondimenti specifici.

Abstract

This text is an introduction to the problem of low frequency electromagnetic monitoring, with particular emphasis on VLF band. All related issues have been addressed: from historical outlook to numerical analysis, from seismology to geotechnics, electronics, information technology. The approach is informative and didactic. This interdisciplinary approach does not imply a problem of skills to the reader, and my goal has been to complete each specific cultural background. Geophysics is a topic where different training paths converge, usually geological or physical. In this case, addressing also technical aspects, it is not really possible to setup a guide for a specific professional figure. For this reason, while some topics will be new, others instead will inevitably seem trivial or superficially addressed. The reality is that every topic, as far as possible, has been treated on the same level. When necessary, an appendix to the text will offer further specific insights from time to time.

Keywords Monitoraggio elettromagnetico; Precursori; Terremoto | Electromagnetic monitoring; Earthquake precursors; VLF band.

1. Introduzione

Questo testo divulgativo ha lo scopo di promuovere il monitoraggio elettromagnetico delle basse frequenze radio alla ricerca di potenziali precursori sismici. Il lettore non deve lasciarsi impressionare da queste parole. L'esistenza di un fenomeno così detto "precursore" del terremoto e perfino la sua occasionale osservazione non implicano, purtroppo, una capacità operativa di prevedere il terremoto. Questo per tutta una complessa serie di motivi già ampiamente discussi in una precedente pubblicazione [Nardi & Piersanti, 2021]¹ che rappresenta la premessa e lo studio propedeutico a qualunque ipotesi di monitoraggio EM. Inoltre non c'è ancora sufficiente documentazione scientifica per poter affermare che il precursore

¹ L'eBook "Il ruolo dei precursori sismici e l'importanza di un precursore elettromagnetico", Quaderno di Geofisica n.174, è scaricabile gratuitamente.

elettromagnetico “della rottura della roccia”, già osservato più volte in laboratorio, sia sistematicamente rilevabile anche in natura, attraverso la crosta terrestre, in associazione al terremoto. È importante possedere questa consapevolezza per affrontare la ricerca *cum grano salis*, senza cadere in errori fin troppo facili che ne invaliderebbero i risultati².

La peculiarità di un precursore elettromagnetico ne rende il monitoraggio un'attività particolarmente affine a quella dei radioamatori. In astronomia, non di rado importanti scoperte si devono agli astrofili, specie in quelle attività di “monitoraggio” del cielo che portano alla scoperta di nuove comete, asteroidi o supernovae. Tuttavia questi sono eventi che si accolgono con gioia e (normalmente) non implicano di dover affrontare una calamità naturale. Per cui il primo che vede qualcosa può gridare: “Tana!”, anche se poi non c'era niente. Al contrario invece, nel caso di un'epidemia mortale, un minimo errore di valutazione ma anche solo di gestione dell'emergenza, implicherebbe gravi perdite di vite umane. Nel caso esclusivo del terremoto poi, perfino un falso positivo può costituire un danno paragonabile al terremoto. Ecco perché nel panorama scientifico esistono gli astrofili ma non esistono “virolofili”, “nuclearofili” ma soprattutto “sismopronosticofili”. Non è così che funziona. Nemmeno le autorità scientifiche, per ora, azzardano previsioni, in quanto perfino gli unici mezzi disponibili per ipotizzare una previsione deterministica (i *precursori*) sono oggi legati a fenomenologie non ancora sufficientemente studiate e sistematizzate. Detto ciò, non è da escludere che anche un'attività di monitoraggio radioamatoriale, così come l'osservazione di stelle variabili o delle macchie solari per gli astrofili, non possa fornire un importante supporto alla conoscenza del fenomeno precursore in sé. Per la verità questo processo è già in atto per quanto riguarda i segnali elettromagnetici associati a fenomeni crostali. Negli ultimi venti anni infatti, in Italia si sono avvicendate diverse iniziative amatoriali tese al monitoraggio di possibili segnali precursori, fino ad arrivare ad un convegno nazionale dell'Associazione Radioamatori Italiani sul tema dei precursori EM (Portici, 2019).

Proprio da questi sviluppi scaturisce un compito anche istituzionale dell'INGV di divulgare una guida introduttiva alle problematiche e alle reali prospettive di questa particolare attività di ricerca. Essendo un geologo ma anche un radioamatore, sono consapevole che se da un lato un radioamatore non è necessariamente un geologo, dall'altro le conoscenze tecniche necessarie al monitoraggio elettromagnetico non fanno parte del percorso formativo dei geologi. Questa trattazione sarà quindi interdisciplinare e didattica, il più possibile adatta a tutti. Inoltre la differenza più marcata tra la ricerca accademica e quella amatoriale sta forse nei presupposti e nelle finalità di chi la persegue, che è proprio ciò che si intende divulgare e indirizzare attraverso queste due guide sui precursori EM. Si raccomanda quindi ancora una volta la lettura propedeutica della già citata introduzione ai precursori¹ e con questa seconda guida divulgativa, rivolta alle nuove generazioni di ricercatori ma anche ai radioamatori più intraprendenti, si completerà un percorso per introdurre allo studio di questo argomento non nuovo ma ancora pressoché sconosciuto.

1. Precursori elettromagnetici del terremoto

1.1 Le motivazioni della ricerca di segnali EM in ambito sismologico

Il terremoto in sé, come fenomeno fisico, non è altro che il passaggio attraverso la crosta

² Un consiglio prima di iniziare: se ci si rende conto di non poter usare l'espressione “precursore EM” senza pensare o indurre a pensare alla necessità di un allarme mortale, allora è meglio sostituirla per sempre con il termine “radiosorgente tettonica” e considerarne il monitoraggio come l'equivalente geologico della radioastronomia. Qui si dirà precursore perché questo è il nome tecnico. Il significato di precursore è spiegato esaurientemente nel volumetto di cui alla nota 1.

terrestre di una radiazione meccanica della durata variabile da pochi secondi a qualche minuto. Qualcosa di simile a un suono che attraversa l'aria, anche se il terremoto si propaga nella roccia su frequenze (in massima parte) più basse di quelle dei suoni. Tuttavia l'irraggiamento di quest'onda elastica è soltanto uno degli elementi di un bilancio energetico che coinvolge un fenomeno globale più esteso, sia nel tempo che nello spazio. Si tratta della *tettonica*³.

Il terremoto è la conseguenza della fratturazione della roccia a causa dall'accumulo di energia elastica nella crosta. La linea della *faglia sismogenetica* è il prodotto finito (e idealizzato) della nucleazione e propagazione della fratturazione lungo una superficie (anch'essa idealizzata) che attraversa la crosta terrestre. Questo prodotto macroscopico però non è che il risultato finale di un processo che parte da fasi iniziali di nucleazione e organizzazione di *microfratture*.

Questo complesso processo di "preparazione" del sisma porta alla liberazione dell'energia elastica accumulata nella crosta e lo fa certamente attraverso la stessa onda elastica del terremoto ma non soltanto in questo modo. Gran parte dell'energia si dissipa nella propagazione della frattura e la dislocazione di blocchi di roccia l'uno rispetto all'altro. Tutto ciò implica la liberazione di calore per mero attrito meccanico ma anche altri processi di trasformazione fisico-chimica della roccia attraverso i quali si libera energia sotto altre forme, tra cui le onde elettromagnetiche (radio, infrarosso termico, luce). Le onde radio in particolare sono associate proprio alla microfratturazione che genererà la rottura [es. Nardi et Caputo, 2009; Eftaxias, 2003]. Lo studio delle emissioni radio può aiutare ad investigare processi non direttamente accessibili in natura e può contribuire a comprendere meglio i processi fisico-chimici che controllano la generazione dei terremoti.

I fenomeni *precursori* dei terremoti sono tali perché risultano geneticamente legati al terremoto e sembrano trovare un legame comune proprio nella *microfratturazione*. Malgrado la grande eterogeneità esistente tra i tipi di precursore, la microfratturazione, storicamente nota come *dilatanza*, risulta una costante tra le varie possibili ipotesi sulla loro origine [Nardi & Piersanti, 2021]. Ma ancora oggi i precursori non sono in grado di supportare una previsione deterministica perché la loro occorrenza non è sistematica e necessaria rispetto al sisma. Queste due caratteristiche sembrano invece coesistere per quanto riguarda l'emissione elettromagnetica associata alla microfratturazione, almeno nelle osservazioni in laboratorio [Nardi & Caputo, 2009]. Se quindi fosse possibile rilevare anche in natura, in superficie, l'emissione EM prodotta dalla microfratturazione della crosta nel volume focale, questo potrebbe rappresentare un precursore particolarmente utile e promettente.

1.2 Storia di un precursore non ancora nato e di un fenomeno mai scoperto

Sono molti e di diversa natura i precursori sismici noti in letteratura. Tra questi, i fenomeni elettromagnetici sembrano avere il duplice primato di essere i più antichi e i più recenti allo stesso tempo. Sono certamente i più antichi perché le *luci sismiche* o EQL (dall'inglese *earthquake lights*) sono state il precursore più suggestivo e direttamente percepibile fin dalla notte dei tempi. Sono però anche tra i più recenti perché soltanto da pochi anni la soggettività dei fenomeni luminosi è stata superata da osservazioni dirette di emissioni EM associate alla fratturazione della roccia [es. Nardi & Caputo, 2009] e da prove fotografiche di fenomeni luminosi in superficie [es. Yasui, 1968].

³ La mobilità della crosta terrestre è un fenomeno latente, lentissimo ma con conseguenze parossistiche disastrose come sismicità e vulcanismo. "Disastrose" per l'uomo, e pure, proprio in una visione antropocentrica, la tettonica è il sintomo di "buona salute" di un pianeta di tipo terrestre: essa produce l'ambiente migliore per la vita che conosciamo. Oltre alla distanza dal Sole, infatti, è la complessità tettonica a rendere la Terra "unica" rispetto a pianeti simili, come Venere e Marte.

Per quanto riguarda i segnali radio in particolare, l'esistenza di emissioni EM naturali associate al terremoto resta ancora oggi da dimostrare in modo definitivo. Le numerose osservazioni di fenomeni associabili ad eventi sismici di solito riguardano terremoti di notevole (e quindi rara) intensità, sono molto eterogenee per quanto riguarda bande radio e tecnologia impiegata e sono per lo più occasionali, non frutto di un monitoraggio sistematico, diffuso e duraturo. Ciò rende questo fenomeno un "potenziale" precursore, posto sotto esame dall'associazione internazionale IASPEI, ma non ancora ufficialmente riconosciuto come tale. Inoltre c'è da considerare che non è conosciuta una vera e propria "scoperta" del precursore EM, né (ufficialmente) fu mai teorizzata a priori un'associazione tra terremoto e segnali radio, che del resto anche oggi, malgrado l'evidenza sperimentale, non è facile da giustificare.

Lo stato dei fatti è che oggi abbiamo un'ampia ma eterogenea letteratura scientifica su presunte osservazioni di precursori EM ma apparentemente senza uno scopritore ufficiale del fenomeno né alcun motivo chiaro per cui il fenomeno sia stato cercato. Ritengo quindi opportuno partire da uno studio epistemologico che ricostruisca per quanto possibile una storia della fenomenologia.

Dalla mia personale ricostruzione sembrerebbe che nel corso della storia i precursori EM nello spettro radio siano stati forse osservati senza essere riconosciuti, in un primo tempo, forse anche più volte scoperti e poi dimenticati e in fine riconosciuti senza essere mai stati "scoperti". La chiave di questo paradosso si trova forse in una o più lacune storiche dovute a diversi fattori che ora esamineremo. In ogni caso sembrerebbe che il progresso della ricerca scientifica in questo campo sia legato al nostro Paese in più riprese fin dalla notte dei tempi e che spesso, proprio nel nostro Paese, sia stato stimolato dall'iniziativa di radioamatori. Ecco di seguito una cronistoria delle tappe più significative, per quanto mi è stato possibile di ricostruire:

- Nel trattato naturalistico "Naturalis historia" [79 d.C.] Plinio il Vecchio racconta di un evento luminoso osservato durante un terremoto avvenuto presso Modena. In realtà si riferisce non alla sua epoca ma al 91 a.C., ovvero 169 anni prima. Egli avrebbe rinvenuto alcuni documenti etruschi che ne parlavano. Questa è la prima testimonianza di cui ho notizia ed evidentemente è anche la prima in territorio italiano. Fino alla fine del medioevo si resterà nell'epoca in cui gli unici precursori EM osservabili sono quelli luminosi.

Non mi risulta alcuna testimonianza specifica in epoca medioevale, quando del resto i fenomeni luminosi non mancavano nella leggenda popolare ma erano comunemente attribuiti all'ambito religioso⁴.

- Nel rinascimento italiano, un autore ignoto descrive su carta alcuni fenomeni luminosi osservati durante e dopo alcuni terremoti emiliani accaduti nel 1570 e 1571. Oggi questo documento è scomparso ma resta menzionato dal critico letterario e bibliotecario Angelo Solerti nella sua cronaca "I terremoti di Ferrara" [Solerti, 1889].
- Nel 1758 Giovanbattista Beccaria, professore di fisica sperimentale alla Regia Università di Torino, nella raccolta "Elettricismo atmosferico", riporta la testimonianza diffusa che i terremoti più forti siano preceduti, accompagnati o seguiti da lampi, tuoni e fulmini. Va detto che a quel tempo era radicata una teoria "elettricista" secondo la quale, in sostanza, i terremoti sarebbero causati da uno "*sbilanciamento di fuoco elettrico*" tra la terra e l'atmosfera, eventualmente coadiuvato dall'innesco di fuochi di zolfo nel sottosuolo.

⁴ Ad esempio alcuni testi che non conosco direttamente narrano di "fiamme" osservate nei cieli di Gerusalemme e Costantinopoli in occasione dei terremoti del 369 e 396 rispettivamente (lo riporta Baratta [1891]). Però, trattandosi di due città strettamente legate alle religioni, sulla soglia del medioevo, personalmente ho qualche scrupolo a considerare queste testimonianze come oggettive e letterali, prive di significati simbolici o metaforici, senza averne studiato le fonti primarie, che non sono nemmeno quelle citate dal Baratta.

Beccaria sembra smentire questa seconda ipotesi ma non la prima⁵. Qualche anno prima, nel “Dell’elettricità artificiale e naturale” [1753] così scriveva il Beccaria: *“La qualità degli effetti, che si producono pe’ tremuoti non è diversa dalla qualità degli effetti, che si producono per l’elettricità artificiale, ovvero per l’elettricità delle nuvole, che abbiam veduto non differire dall’artificiale, che nell’intensità. Ne’ tremuoti si sente d’ordinario un romore sordo, che assai ampiamente s’estende, ed esso talora è accompagnato da orrendi scoppi. (...) In verità pare, che talora ne’ tremuoti siasi visibilmente manifesto il vapor elettrico. (...) Talora pare, che certa specie di vere folgori abbia cagionati veri tremuoti”*.

- Fine ‘700. Dopo che negli Stati Uniti Benjamin Franklin inventò il parafulmine (1759) in Europa la teoria elettricista era ormai talmente radicata che a fine secolo si iniziarono a progettare dei “para tremuoti” che avrebbero dovuto salvare le città scaricando in aria le correnti foriere del terremoto prima che potessero accumularsi al punto da scatenare il sisma. Ne resta numerosa documentazione scritta, dalla prima idea francese di Pierre Bertholon nel 1779 alla più raffinata idea italiana dell’arciprete don Giuseppe Vannucci [Vannucci, 1787, pag. 96] ripresa anche dal cav. Giovanni Vivenzio [Vivenzio, 1788, pag. 61], medico del Re delle Due Sicilie.
- 1789. Si legge nell’Annuario della Società dei Naturalisti di Modena [1870] che in occasione del terremoto che la colpì nel 1789, la città fu illuminata da una luce vivissima. E inoltre: *“La maniera in cui avvennero le detonazioni, l’immenso bagliore che istantaneamente illuminò, la città e il territorio, e le indicazioni del galvanometro, confermano ampiamente l’idea già altre volte accennata, cioè che i tremuoti siano effetto di una subitanea ricomposizione del fluido elettrico tra la terra e l’atmosfera”*. Il galvanometro è un dispositivo che traduce una corrente elettrica in un momento magnetico e qui lo vediamo impiegato come strumento di misura o di rilevazione di queste correnti.

Nel ‘700 si passa dunque, in modo a volte anche ambiguo, da fenomeni puramente luminosi a fenomeni di natura elettrica, talvolta simili ai fulmini e talvolta con essi identificati. Talvolta considerati conseguenza del terremoto e talvolta la causa. I fenomeni elettrici iniziano quindi ad essere misurati e questo li renderà presto indipendenti dai fulmini. Della teoria elettricista resterà un importante retaggio: quello delle *correnti telluriche* come precursore del terremoto, da cui in epoca moderna nascerà il *metodo VAN*⁶.

⁵ Chiariamo che la questione sottintende la presunta analogia tra eventi sismici e vulcanici, talvolta concomitanti (*“I tremuoti hanno una connessione manifesta con i vulcani”* [Beccaria, 1753]). Le eruzioni vulcaniche sono spesso accompagnate da fulmini che scaturiscono dalla nuvola di ceneri ed oggi sappiamo che ciò è dovuto al fatto che queste particelle si caricano di elettricità statica. Invece l’idea dell’epoca era questa: se i fulmini accompagnavano anche i terremoti, probabilmente i fulmini causavano il vulcanismo accendendo esplosioni nello zolfo sotterraneo e così potevano generare anche il terremoto. Il Beccaria invece distingue i due casi associando i “fuochi di zolfo” ai vulcani e i “fuochi elettrici” al terremoto. Il fuoco elettrico, o “vapor elettrico” era al tempo considerato l’essenza dell’elettricità: fenomeno noto sperimentalmente ma sconosciuto nella sua natura fisica.

⁶ VAN è un acronimo composto dal nome dei tre ricercatori greci (Varostos, Alexopulos e Nomicos) che negli anni ‘80 proposero questo metodo di previsione deterministica che è forse ormai il più vivacemente e lungamente dibattuto al mondo. Qui non si entrerà nel merito della discussione anche perché eminenti specialisti in tutto il mondo si sono apertamente schierati sia a favore che contro. Ciò che ci interessa è che il *metodo VAN* si basa sul monitoraggio di “Segnali Elettro-Sismici” (SES) attraverso picchetti metallici infissi nel terreno. Si tratta fondamentalmente di correnti telluriche, anche se col tempo vi è stata riconosciuta un’importanza della caratterizzazione in frequenza della variazione del potenziale elettrico. Queste frequenze possono arrivare ad essere molto alte, equivalenti a lunghezze d’onda anche metriche. A questo punto il fenomeno si sovrappone a quello dei precursori elettromagnetici intesi come segnale che si propaga per onda EM. Alcune critiche anzi si basano proprio sulla capacità di discriminare disturbi indotti da segnali radio naturali (meteo) o artificiali. Non si prenderà qui una parte nella disputa ma mi permetto di concludere con una simpatica provocazione: se è vero che storicamente dei fulmini sono associabili ai forti terremoti, allora il metodo VAN dovrà pur averlo un minimo riscontro e fondamento fisico, perfino malgrado sé stesso.

- Nell'800 l'invenzione del telegrafo cambierà il mondo e in un certo modo anche la ricerca geofisica. Nel 1837 nasce il telegrafo elettrico Morse e a partire dal 1844⁷ in ogni continente iniziano a diffondersi servizi regolari di comunicazione tra le grandi città grazie a uffici telegrafici intermedi (*relais*) sparsi fin nei luoghi più remoti. A questo punto iniziano ad essere osservati disturbi elettrici sulle linee di comunicazione in concomitanza e talvolta anche in anticipo rispetto ai terremoti. Qui entra nella scena internazionale il lavoro di padre Alessandro Serpieri: religioso, scienziato, insegnante e divulgatore che molto si interessò allo studio dei precursori sismici. Nel 1873 Serpieri riuscirà ad attuare la sua idea di una collaborazione con la direzione dei Telegrafi Italiani affinché si studiasse il fenomeno delle correnti telluriche e al contempo si trasmettessero immediatamente le informazioni relative al sisma. Prima di ciò le *correnti telluriche* erano fantomatiche scosse elettriche, talvolta avvertite alle gambe dalla popolazione. Ora si tratta di vere scosse elettriche osservate spesso dai galvanometri e che talvolta colpiscono violentemente alle mani gli operatori del telegrafo. Vale la pena riportarne un curioso episodio: *“Alcune osservazioni su questo interessante argomento⁸ sono state fatte da F.P. Crescimanno⁹ a Corleone, in Sicilia, nel 1876. (...) Furono usati due galvanometri. Uno fu posto in un circuito telegrafico (...). Il 9 luglio 1876, alle 20:35, si verificò una scossa¹⁰ durante la trasmissione di un messaggio verso Palermo. La trasmissione fu allora interrotta per avvisare: «Terremoto! Terremoto! Terremoto!». L'altro operatore, non avendo capito il messaggio, rispose: «Sollevare il tasto¹¹, la corrente è troppo forte». Il tasto fu sollevato ma la corrente era ancora troppo forte. (...) Si suppone che una corrente positiva abbia improvvisamente colpito la linea”* [Milne, 1890]. Grazie all'attività di monitoraggio svolta da padre Serpieri con la rete telegrafica italiana, in quest'epoca nel mondo intero molte pubblicazioni scientifiche, come questo rapporto pubblicato in Giappone in lingua inglese, si riferiranno a fatti osservati prevalentemente in Italia e pubblicati originariamente in italiano.
- Nel 1890 l'inglese John Milne pubblica un rapporto [Milne, 1890] sui fenomeni “magnetici ed elettrici” osservati in coincidenza di terremoti. È quello da cui abbiamo appena letto l'episodio del telegrafo. Questa pubblicazione segna una data importante. Rikitake [1968] lo considera probabilmente la prima testimonianza storica su questa fenomenologia. Questo già di per sè non sarebbe del tutto corretto (se consideriamo i testi italiani visti fin ora) ma adesso dovrò anche sfatare un'affascinante leggenda nata soltanto di recente. Questo lavoro di Milne si trova talvolta citato nei siti WEB, in articoli scientifici recenti [Hobara & Parrot, 2005; Parrot et al., 2006; Nemeč et al., 2009; Freund et al., 2018] e in almeno un libro, come la prima pubblicazione scientifica in assoluto a descrivere una serie di “fenomeni elettromagnetici” associati al terremoto. Purtroppo questo non risulta vero. Dopo aver reperito il raro testo originale e studiato a fondo il caso ho pubblicato una traduzione commentata dell'opera di Milne [Nardi, 2021] con la quale credo di poter dimostrare che il testo non parla mai esplicitamente di fenomeni elettromagnetici (nel

⁷ Il 24 maggio 1844 Samuel Morse, inventore statunitense del telegrafo a filo singolo e dell'omonimo codice, invia il primo messaggio sulla linea Washington - Baltimora, trasmettendo la citazione biblica: “What hath God wrought!”.

⁸ Si parlava poco prima di una scossa elettrica che colpì la mano di un operatore del telegrafo in occasione del terremoto del 1875 a Fort de France, in Martinica.

⁹ Era il capo dell'Ufficio Telegrafico di Corleone. Per chi fosse interessato a questo specifico episodio siciliano, esso è riportato integralmente e commentato in [Nardi, 2020].

¹⁰ Si intende questa volta una scossa di terremoto, non elettrica, lo si legge chiaramente in italiano nel testo originale di Crescimanno.

¹¹ È interessante notare che nel testo inglese l'autore riporta in corsivo la parola italiana “tasto”. Forse qualcosa non gli era chiara. Immagino che l'interruttore in questione fosse non propriamente il tasto telegrafico (tecnicamente il *manipolatore* telegrafico) ma forse la levetta di derivazione (*shunt*) della telegrafia terrestre a corrente continua, che nel sistema telegrafico italiano aveva una particolare configurazione automatica sul manipolatore stesso.

senso moderno della parola) ma riporta solo fenomeni magnetici o elettrici, questi ultimi per lo più legati alle linee telegrafiche. Non si evidenzia nessuna scoperta e forse nemmeno un'inconsapevole osservazione di fenomeni elettromagnetici associati al terremoto. Tuttavia "Milne, 1890" rimane un interessante spunto per la ricerca dei primi fenomeni potenzialmente sospetti.

Riporto come esempio un caso particolarmente ambiguo: "Padre Serpieri cita l'interessante osservazione del professor Domenico Ragona, che ha scoperto che al momento di un terremoto c'era una corrente dalla terra che passava attraverso un galvanometro e un conduttore simile a un parafulmine nell'atmosfera" [Milne, 1890]. Questa notizia è davvero suggestiva perché non solo ci riporta in dietro di altri 16 anni rispetto alla pubblicazione di Milne ma la descrizione dell'apparato di Ragona può ricordare il simbolo raffigurato nel logo dell'A.R.I. (Figura 1) come di altre associazioni radioamatoriali nel mondo: la stilizzazione di un'antenna.



Figura 1 Il logo dell'ARI: Associazione Radioamatori Italiani. Il professor Domenico Ragona "Ha scoperto che al momento di un terremoto c'era una corrente dalla terra che passava attraverso un galvanometro e un conduttore simile a un parafulmine nell'atmosfera". Così scriveva Milne [1890] citando Serpieri (1874) che a sua volta citava Ragona (1887). Il galvanometro è uno strumento di misura in cui un ago magnetico, non diverso da una bussola, si muove attratto dal campo indotto da una bobina. La descrizione del dispositivo ricorda il logo dell'ARI, che raffigura un'antenna. Ma all'epoca dei fatti si parlava di correnti telluriche e di fulmini. Le onde elettromagnetiche erano soltanto delle equazioni matematiche formulate da Maxwell. Furono sperimentate da Hertz nel 1888. Marconi sperimentò poi la radio e l'antenna soltanto nel 1895. All'epoca di Milne ancora non si poteva ipotizzare un precursore elettromagnetico e, probabilmente, il fenomeno osservato da Ragona nemmeno lo era.

Ma nel 1874 l'antenna non era stata ancora inventata e le onde elettromagnetiche erano pura matematica formulata da Maxwell. Soltanto 14 anni dopo, nel 1888, Hertz sperimenterà - senza l'uso di antenne - l'esistenza delle onde elettromagnetiche e 21 anni dopo, nel 1895, Marconi sperimenterà la sua radio, questa volta dotata di antenna. Si potrebbe ipotizzare che l'elettricità misurata dal galvanometro di Ragona potesse essere indotta sul suo parafulmine-antenna da un precursore EM, ma lo immaginiamo noi, soltanto perché oggi conosciamo l'elettromagnetismo e perché sospettiamo a priori l'esistenza di precursori EM. In realtà Milne prosegue immediatamente il discorso concludendolo in questo modo: "Per osservare queste correnti, il professor Ragona suggerisce l'uso di un opportuno apparecchio, in cui la corrente passa con un filo dalla terra attraverso un galvanometro fino alla fiamma di una lampada ad olio o petrolio, la cui base è isolata da terra" [Milne, 1890]. A cosa servisse la lampada ad olio non viene spiegato. Possiamo però immaginare che la fiamma producesse elettricità sul conduttore per l'effetto Seebeck e che la scossa sismica sulla lampada producesse una fluttuazione della fiamma che modulava questo effetto "al momento del terremoto", come afferma appunto Ragona. Questa proprietà termoelettrica era stata osservata già nel 1787 da Alessandro Volta e fu studiata in modo più approfondito dal fisico estone Thomas Johann Seebeck nel 1821. Era quindi nota al tempo di questi fatti. Dunque nessun fenomeno di induzione EM. Inoltre un'esperienza simile, ma più in odore di fenomeno elettromagnetico, fu fatta ancor prima da padre Raffaele Del Verme, nel 1851 [Nardi, 2021]. Quel che è certo però è che nessun precursore EM fu a quel tempo riconosciuto o anche soltanto ipotizzato, neppure da Milne sedici anni dopo l'esperienza di Ragona, che fu invece ispiratrice al Serpieri per l'idea delle

correnti telluriche dai telegrafi. Nel 1890 non abbiamo ancora una scoperta scientifica dichiarata (né riconoscibile a posteriori con certezza) riguardo i precursori EM nello spettro radio [Nardi, 2021].¹²

- Sempre nel 1890 il meteorologo austriaco Wilhelm Trabert scoprirà che il telefono installato in un rifugio alpino (quota 3095) era in grado di predire i temporali grazie a un misterioso crepitio che poteva udirsi nella linea e che nell'arco di una giornata aumentava di persistenza e intensità man mano che si avvicinava il temporale, fino al punto che talvolta poteva far squillare il campanello ["Die Gartenlaube", 1890, pag. 31]. Di questo farà menzione lo stesso Milne [1890] e anche da ciò, forse, è nato l'equivoco. Quasi certamente si trattava di segnali EM naturali (*Spherics*) in banda VLF captati dalla lunga linea telefonica, ma in questa circostanza non furono associati al terremoto, nemmeno da Milne. Egli aggiunse questa notizia in chiusura del lavoro, presentandola come una curiosità geofisica legata ai temporali [Nardi, 2021]. Questo è stato, probabilmente, il primo caso di "radioascolto" di segnali VLF, anche se involontario e precedente all'invenzione della radio.
- 1891. Il geografo Mario Baratta, per l'Italia considerato il fondatore della sismologia storica¹³, è invece il nostro Milne. Soltanto un anno dopo quest'ultimo, Baratta pubblica in italiano il "Catalogo dei fenomeni elettrici e magnetici apparsi durante i principali terremoti", con questo incipit molto significativo: *"Intorno ai fenomeni elettrici e magnetici precedenti, concomitanti e susseguenti i terremoti molto si è discusso e molto si discute tuttora: di essi da taluno fu esagerata la importanza facendo dell'elettricità la causa efficiente¹⁴ ai terremoti stessi, sia direttamente (...) sia indirettamente (...); da altri invece di questi fenomeni fu negata perfino l'esistenza. (...) Per rimettere le cose al loro giusto posto, ho pensato bene di compilare il presente catalogo"* [Baratta, 1891]. Ho omesso alcune parti per brevità ma il discorso sintetizza perfettamente la situazione fino al suo tempo. In generale il quadro rappresentato da Baratta non comprende precursori elettromagnetici¹⁵. Riporta molti più casi di Milne, anche perché la maggior parte sono italiani e di nuovo legati alla telegrafia (emergono ancora le conseguenze dell'attività del Serpieri). Baratta riporta anche l'episodio di Ragona ma quella che nella lettura di Milne avevamo ipoteticamente chiamato "parafulmini-antenna" qui in modo chiaro ed esplicito risulta aver rivelato *"poderose correnti elettriche dalla terra all'atmosfera"*. Tra l'altro gli scritti di padre Serpieri citati dal Baratta [Serpieri, 1888] specificano anche che il galvanometro di Ragona attestava la *direzione* di queste correnti, evidentemente continue.

Tirando le somme, attraversando il 700 e l'800 siamo passati da fenomeni precursori puramente luminosi alla luce di fulmini, essi stessi precursori o responsabili del terremoto, e ancora da questi alle correnti elettriche puramente telluriche, con l'aggiunta di fenomeni magnetici transitori, che potrebbero ipoteticamente rappresentare l'altra componente del campo EM, pur non essendo stato mai riconosciuto un precursore EM. Nel 1895 avremo ufficialmente l'invenzione della radio e da qui una rapida diffusione sia del mezzo tecnico che della fisica dell'elettromagnetismo in ogni possibile applicazione. Ricordiamo che l'idea di radar risale già al 1904 e che nel 1933 nasce

¹² Tuttavia esistono altri casi, tra cui quello di padre Raffaele Del Verme (1851), non completamente documentati ma apparentemente più vicini a un precursore EM genuino [Nardi, 2021].

¹³ La sua opera più nota "I terremoti d'Italia" (1901) raccoglieva la descrizione dettagliata di 1364 eventi che accaddero negli ultimi 2000 anni.

¹⁴ Un modo aristotelico per intendere l'agente stesso del terremoto. Ciò che lo ha prodotto.

¹⁵ A parte alcuni fenomeni luminosi che al tempo erano comunque associati al "fuoco elettrico". Del resto all'epoca si ignorava anche la natura elettromagnetica della luce.

ufficialmente anche la radioastronomia¹⁶. I tempi iniziano ad essere maturi per un ipotetico precursore elettromagnetico ma i due mondi, quello delle onde sismiche e delle onde radio, al di là delle comuni leggi della propagazione ondulatoria, sono per natura fisica totalmente estranei l'uno all'altro. A livello teorico manca un motivo per associarli e all'atto pratico... non danno scosse alle mani. In questo scenario una scoperta potrebbe avvenire soltanto per caso.

- A cavallo tra '800 e '900 in Italia ci sarà un grande fermento intorno al *coherer* e finalmente ai precursori EM del terremoto. Questo sensore meccanico delle “onde hertziane”, che consentì a Marconi di realizzare il primo collegamento radio nel 1895, fu riproposto da diversi sperimentatori come sensore di precursori sismici, ma sotto diverse forme. Temistocle Calzecchi Onesti, che lo aveva inventato nel 1884, lo ripropose già nel 1886 come sensore della vibrazione meccanica del terremoto, di fatto un *tromometro* piuttosto sensibile per l'epoca [Nardi, 2021]. Ma altri sperimentatori sembrano usarlo proprio per rilevare onde elettromagnetiche associate al terremoto. È proprio in questo periodo che la comunità scientifica, almeno in Italia, inizia ad esigere una distinzione netta tra fenomeni puramente elettrici o magnetici e fenomeni *elettromagnetici*, anche perché nascono dispositivi “ibridi” e molte controversie tra gli stessi ricercatori [Nardi, 2021]. Ma in questo caos spicca qualcosa di rilevante...
- 1901. Il prof. Tommaso Tommasina fu un grande studioso del fenomeno della *coesione* delle polveri nel *coherer* e inventò detectors più semplici ed efficienti persino di quello di Marconi. Realizzò anche un *coherer* a polvere di carbone estremamente piccolo ed ebbe l'idea (brevettata nel 1902) di inserirlo in un atoparlante telefonico in modo tale da poter udire come suoni quei segnali EM naturali che fino ad allora avevano fatto soltanto suonare i campanelli elettrici [Tommasina, 1901]. Realizzò così un *elettro-radiofono* per ascoltare i temporali. Si tratta probabilmente del primo ricevitore VLF della storia.
- 1909. È l'anno in cui a Guglielmo Marconi venne conferito il premio Nobel per la fisica, ma nel frattempo, a Siena, un frate francescano sperimentava il primo dispositivo messo a punto appositamente per rilevare precursori elettromagnetici del terremoto. Questa volta sembra davvero un primato, ed è italiano. Il motivo che portò padre Atto Maccioni a questa sperimentazione, guardato con gli occhi di oggi, ci appare forse un po' “naiv”: parte dall'ipotesi *elettricista* sulla natura dei terremoti per ipotizzare che queste correnti, se oscillanti, potrebbero emettere nell'aria *onde elettriche*¹⁷ che a loro volta possono indurre stimoli elettrici sul sistema nervoso «*Al pari delle correnti d'induzione*»

¹⁶ Del 1904 è il brevetto del “telemobiloscope”, del tedesco Christian Hülsmeier, capace di rivelare la presenza di una nave resa invisibile dalla nebbia ma non la sua distanza. Uno strumento in grado di misurare direzione e distanza era il “radiotelemetro” che Marconi ipotizzò nel 1922 in base alle sue esperienze di riflessione EM sugli oggetti metallici. Nel 1935 Marconi presentò un prototipo di “radioecometro” alla Regia Marina Italiana, che però non ne comprese l'importanza. Fu così che il primo sistema funzionante fu prodotto nel 1936 in Ungheria da un progetto del fisico Zoltán Bay, che subito lo impiegò in ambito radioastronomico, nella telemetria della Luna. Nel 1940 la marina degli Stati Uniti diede a questa strumentazione il nome di RADAR e nel 1941 la Royal Navy lo impiegò ufficialmente nella battaglia navale notturna di Capo Matapanla (Grecia), dove ottenne uno straordinario successo proprio contro la Marina Italiana, che ne era del tutto priva. Intanto nel 1933, prima ancora del radar lunare di Bay, nasceva ufficialmente la radioastronomia con l'articolo *Electrical disturbances of extraterrestrial origin* di Karl Guthe Jansky, ingegnere della Bell, incaricato di individuare le origini di alcuni radiodisturbi tipici della banda HF. Jansky dovette constatare che una delle sorgenti era indubbiamente la Via Lattea. Del resto la velocità della luce, e quindi adesso delle onde EM, fu misurata proprio da un astronomo, già nel 1676. Il danese Ole Rømer, valutando il ritardo delle occultazioni del satellite Io di Giove rispetto ai calcoli matematici, dedusse il tempo che la luce doveva impiegare a percorrere la distanza che ci separa. Questa breve panoramica è per dimostrare che gli sviluppi dell'elettromagnetismo, nei campi più disparati come la guerra e l'astronomia, furono immediati, interconnessi e inesorabili. Come scopriremo tra poco, si riallacciano anche al terremoto.

¹⁷ “Onde elettriche”, “onde hertziane” e “onde elettro-magnetiche” erano nomi che si usavano all'epoca per indicare le onde *elettromagnetiche*.

[Maccioni, 1909]. Ciò avrebbe potuto spiegare il presentimento degli animali tanto studiato e discusso all'epoca. Per verificare questa ipotesi dovette sviluppare un particolare tipo di *coherer* diverso da quello di Marconi (col quale fallì i suoi primi tentativi) ma infine ottenne il risultato sperato. L'esperienza di Maccioni è tutt'altro che accidentale e presenta, forse per la prima volta nella storia, tutti gli aspetti necessari per poter assegnare un primato:

1. La consapevolezza che il terremoto sia l'effetto finale di un processo già in atto e che un "avvisatore" debba aspirare a rilevare non tanto il sisma più lieve quanto un sintomo del processo preparatorio del sisma: «*Mi parve, cioè, ragionevole ritenere che il terremoto come è ordinariamente avvertito e registrato dagli ordinari sismografi non sia che l'ultima fase, l'ultima espressione, dirò così, del grandioso e complesso fenomeno; e che il periodo di formazione sia invece costituito da una serie di altri fenomeni dai quali non potrebbe andare disgiunta la produzione di scariche oscillatorie*» [Maccioni, 1909].
2. Uno strumento appositamente realizzato per rilevare precursori elettromagnetici: «*Se in precedenza alla manifestazione meccanica di un terremoto si ha sviluppo di elettricità a carattere oscillatorio, questa dovrà necessariamente farsi manifesta adottando l'uso di uno strumento atto a rimmetterla in luce (...) Ebbene, fu di un semplicissimo coherer che io mi servii*» [Maccioni, 1909].
3. Dei riscontri sperimentali su eventi sismici noti anche in letteratura. Ecco la sua prima esperienza: «*Finalmente la mattina dell'11 Aprile scorso, due modesti terremoti vollero fare la gradita sorpresa di preavvisarci del loro arrivo, inviando quattro minuti prima della scossa le sospettate onde elettro-magnetiche a impressionare il mio nuovo avvisatore. Non nascondo che al primo annunzio non mi fu possibile credere a me stesso, per non dire all'apparecchio, ma alla ripetizione delle ore 5,59 m. in cui proprio sotto gli occhi miei e del mio assistente si ebbe nuovamente l'annunzio dall'avvisatore ugualmente quattro minuti prima della scossa meccanica, qui dovemmo necessariamente inchinarci davanti all'opprimente forza della realtà!*» [Maccioni, 1909].

Si tratta probabilmente della prima consapevole scoperta di un precursore EM [Nardi et al., 2021 e 2021b]. Del resto prima del *coherer* e di Marconi non sarebbe stato nemmeno possibile. A differenza di alcuni suoi contemporanei, padre Maccioni sembrava sinceramente interessato alla ricerca e non alla competizione. All'epoca la stampa italiana ed estera si occupò del caso con articoli che talvolta Maccioni stesso definisce sensazionalistici e non focalizzati su ciò che era realmente importante, cioè il fenomeno EM associato al sisma e non il suo "avvisatore". Tuttavia la scoperta andrà presto dimenticata. Gli stralci qui riportati non sono che un discorso: gli atti di una conferenza che tenne presso l'Accademia delle Scienze di Siena, detta dei "Fisiocritici". Maccioni scriverà dell'argomento sulla rivista francescana "Luce e Amore" e pubblicherà forse soltanto un paio di articoli su una vera rivista scientifica (la "Rivista di Fisica, Matematica e Scienze Naturali" edita a Pavia). Ma soprattutto, la sua opera non è mai stata pubblicata in inglese prima del 2021 [Nardi et al. 2021]. In realtà negli anni immediatamente successivi ci furono molti riscontri da parte di altri osservatori geofisici indipendenti che testarono lo strumento del frate. Malgrado ciò non si ebbe un seguito. I motivi furono molti e molto diversi: a seguito di una circostanza troppo "mondana", nel 1916 Maccioni dovette abbandonare la tonaca [Bramanti, 2001] e l'Ordine stesso volle dimenticarsi di lui. A tutt'oggi non se ne trova una biografia completa. Su ciò che restava del suo lavoro, già dal 1914 agì una sorta di "reset" culturale causato dallo scoppio della Prima guerra mondiale. Non ultimo c'è da considerare che proprio negli stessi anni degli esperimenti di Maccioni la radio aveva iniziato a seguire la strada della fonia, dei rivelatori a cristallo e dei circuiti risonanti, abbandonando

l'ormai "vecchia" tecnologia telegrafica dei *coherer*¹⁸. Fatto sta che la storia si dimenticherà di Maccioni e del suo strumento. Nel dopoguerra seguì per Maccioni un periodo di malattia fino alla morte, avvenuta in una data imprecisata degli anni '20. Nella letteratura moderna del suo lavoro si trovano poche tracce e soltanto nel panorama italiano [es. Martinelli, 1997, p. 200; Fidani, 2006; Nardi et al. 2021 e 2021b].

- 1910. Considerando che tutto l'episodio italiano culminante nel caso Maccioni verrà presto dimenticato e quindi gli unici fenomeni sicuramente EM resteranno ancora soltanto quelli luminosi, segnaliamo nel 1910 un nuovo elenco sistematico di fenomeni luminosi associati al terremoto che viene pubblicato in Italia ad opera di Ignazio Galli. Contiene 148 eventi e tra questi i più frequenti risultano: bagliori apparsi durante il terremoto, nubi luminescenti e luci diffuse prima durante e dopo il terremoto [Galli, 1910].
- 1960. La scoperta di un possibile precursore EM accadrà nuovamente nel corso del 900 ma la prima osservazione ufficialmente riconosciuta sembra avvenuta davvero per caso e non scaturisce dal cuore dello spettro "geologia/geofisica/fisica", bensì da un campo specifico: la radioastronomia¹⁹. Stando ai fatti di cui sono a conoscenza fino a questo momento, la prima ipotesi di associazione tra terremoto e segnali radio si deve probabilmente all'intuizione del radioastronomo James Warwick, il quale, non sapendo che altra spiegazione trovare, mise in relazione la serie di forti terremoti (fino a M 9.5) che devastò vaste aree del Cile a partire dal 21 maggio 1960 con un insolito evento elettromagnetico che, cinque giorni prima, era stato rilevato nello stesso modo da quattro radiorecettori molto distanti tra loro e dall'epicentro²⁰. L'anomalia viene pubblicata nel 1963 ma passeranno ancora 22 anni prima che questa coincidenza venga esposta in modo convincente [Warwick, 1982] dopo aver eseguito anche esperimenti su rocce che rilevarono dal granito segnali di campo elettrico e magnetico nella gamma 0,5 – 250 MHz (fig.5). Essendo in odore di primato, vale la pena di entrare più nel dettaglio di questa vicenda.

Cito testualmente Warwick: «*Sembrava improbabile che l'emissione fosse prodotta da una fonte solare o planetaria molto lontana dalla Terra. In Warwick [1963] si proponeva l'ipotesi che l'emissione fosse stata prodotta da una sorgente che circonda la Terra o almeno sospesa come una nuvola sopra le stazioni di osservazione. Ma anche se questa spiegazione soddisfa i requisiti non è certamente l'unica. Nel frattempo, si sono verificati tre eventi che hanno indotto Warwick stesso a rivalutare l'analisi precedente. In primo luogo, Derr [1973] ha esaminato le sempre crescenti prove di fenomeni luminosi associati ai terremoti, o luci sismiche (EQL). La sua pubblicazione comprendeva una serie di fotografie raccolte da Yasui [1968] e relative a fenomeni luminosi osservati durante lo sciame sismico di Matsushiro, in Giappone, nel periodo*

¹⁸ La prima chiara trasmissione della voce umana sembrerebbe essere avvenuta già nel 1906 ad opera del canadese Reginald Aubrey Fessenden, l'inventore stesso della *Modulazione di Ampiezza* (AM) sulle onde continue. Fu improvvisato un programma musicale a beneficio esclusivo dei marconisti di alcune navi mercantili e dei radioamatori che si trovarono alla portata. I primi servizi sperimentali di "radiodiffusione circolare" (oggi *broadcasting*) inizieranno in Europa già nell'immediato dopoguerra. Nel 1922 nascerà la BBC inglese e nel 1924 l'italiana URI, divenuta poi EIAR e in fine RAI.

¹⁹ È curioso ricordare che negli stessi anni, sempre a un radiotelescopio e sempre per caso, si deve la "scoperta" degli aerei spia statunitensi U2. Parliamo del famoso segnale "Wow" captato nel 1977 dal radiotelescopio Big Ear (Università dell'Ohio, progetto SETI). Un segnale evidentemente artificiale ma inizialmente ritenuto extraterrestre. Il motivo di queste scoperte casuali non è casuale: in quegli anni i radiotelescopi erano le prime ed uniche antenne "sempre in ascolto" in ambito scientifico.

²⁰ Questi radiotelescopi studiavano proprio quella radiazione di sincrotrone della Via Lattea che aveva casualmente scoperto Jansky nelle HF. Lavoravano tutti sulla frequenza di 18 MHz con una banda larga 100 kHz. Warwick sostiene che non potevano rilevare trasmissioni a banda stretta o impulsive ma tuttavia una sorgente di soli 100 W a banda larga dal Cile avrebbe potuto produrre quel segnale sui radiotelescopi.

1965-1967. Alcune delle caratteristiche generali degli EQL, definite da Yasui in base ai casi studiati, suggerivano che si trattasse di un fenomeno elettrico atmosferico. Due caratteristiche in particolare sono rilevanti in questo contesto: (1) la luminescenza tende a verificarsi non nell'epicentro del terremoto, ma piuttosto sulle cime delle montagne costituite da quarzodiorite fratturata, e (2) alla luminescenza sono di norma associati degli "spherics" che risultano più intensi nella gamma da 10 a 20 kHz» [Warwick, 1982].

Abbiamo dunque un'esplicita ipotesi di associazione tra il terremoto e i segnali radio che trova supporto da uno studio su fenomeni luminosi. È soltanto un'ipotesi, ma il cerchio sembra chiudersi con la nascita di un nuovo filone di ricerca che prende spunto proprio dalla banda VLF. Ma qui siamo già nel 1982, nel frattempo invece...

- 1975. La rivista sovietica "Геомагнетизм и Аэрномия" (Geomagnetismo e Aeronomia) pubblica un articolo che in apparenza parla esplicitamente di "precursori elettromagnetici" [Zubkov et al. 1975]. Inoltre il titolo "О времени возникновения электромагнитных предвестников землетрясений", ovvero "Riguardo il momento in cui si verificano i precursori elettromagnetici dei terremoti", sembra lasciare intendere che il fenomeno non sia stato presentato per la prima volta con questa pubblicazione. In realtà, come è accaduto con Milne [1890], nel raro documento si può scoprire che tratta solo di variazioni di campo magnetico e disturbi pulsati del campo elettrico atmosferico, presumibilmente derivanti da correnti telluriche. Questo studio infatti conferma l'esistenza di una relazione tra l'energia del terremoto e il tempo di comparsa di questi precursori di diversa natura che, nel loro insieme, vengono definiti "elettromagnetici", nel senso antico della parola. Si mette in luce inoltre che la scala temporale di questa relazione differisce per ciascun tipo di precursore. Questo lavoro sarà tuttavia di ispirazione alle successive ricerche di Gokhberg.
- 1978. In Daghestan (URSS) una rete di apparecchiature radio sintonizzate su tre frequenze campione tra le onde Lunghe e le Medie (LF e MF) rileva delle anomalie nel rumore di fondo il cui livello è aumentato gradualmente raggiungendo un massimo alcuni minuti prima di un forte terremoto (M 7.4) avvenuto in Iran, a 1200 km di distanza [Gokhberg et al., 1979]. Abbiamo finalmente la consapevole osservazione di un precursore EM. Tuttavia queste osservazioni sono pubblicate in URSS, in russo, in un periodo di guerra fredda, quando internet non esisteva ancora come rete mondiale. Perfino oggi non è stato facile esaminarne una copia (in bibliografia si troverà un link). Inoltre il lavoro è descritto in modo "brusco", senza il formalismo che prevede un'introduzione sullo *stato dell'arte*²¹. In definitiva non si capisce perché sia stata allestita una rete per cercare questo fenomeno, dettaglio fondamentale per riconoscere un primato.
- 1980-81. Nell'ambito di un programma di scambio tra URSS e Giappone, e proprio a seguito di quelle recenti osservazioni in URSS, fu realizzato un accordo tra Istituto di Fisica della Terra e Accademia delle Scienze dell'URSS da una parte e l'Osservatorio sulle onde radio di Sugadaira (Giappone) dall'altro. Fu così che nel periodo 1980-81 anche in Giappone furono registrate anomalie nel rumore di fondo su singole frequenze VLF e LF associate a tre eventi sismici di magnitudo compresa tra 5,3 e 7.0 [Gokhberg et al, 1982]. La caratterizzazione del fenomeno sembra coerente anche con le attuali osservazioni sperimentali sui campioni di roccia: «Le radiazioni elettromagnetiche associate ai terremoti appaiono impulsivamente, il che suggerisce che queste onde elettromagnetiche siano irradiate

²¹ Fa solo riferimento a qualche lavoro su campi elettrici come ad esempio "Vorobyev A., Samokhvalov M. and Ibragimov R. (1975). *Search of effects due to existence of high local electric fields in the lithosphere*. Seismology of Uzbekistan, Tashkent, 213-221" in lingua russa, che non mi è stato possibile reperire.

su una vasta gamma di frequenze radio. (...) L'intensità della radiazione elettromagnetica è diversa per i diversi terremoti, con valori che variano da decine o centinaia di microvolt per metro fino a decine di centinaia di volt per metro» [Gokhberg et al, 1982]. È interessante notare che per la prima volta viene evidenziato il problema tipico del monitoraggio EM a bassa frequenza: «Uno dei problemi più importanti per lo studio della radiazione elettromagnetica come precursore dei terremoti è la scelta del sito di osservazione. È auspicabile posizionare lo strumento lontano dalle aree industriali» [Gokhberg et al, 1982]. Questo studio rappresenta una presa di coscienza molto importante nei confronti dei precursori EM. Si inizia infatti a preoccuparsi di tutte le conseguenze: il meccanismo di emissione, la relazione tra le caratteristiche del segnale EM e quelle del sisma atteso, la propagazione dell'onda radio e la stima dell'energia irradiata dal sisma. Inoltre questa volta il lavoro verrà pubblicato in inglese sul *Journal of Geophysical Research* e il destino vuole che uscirà proprio nel 1982 insieme al lavoro di Warwick.

- 1982. È finalmente l'anno in cui viene pubblicato l'articolo risolutivo riguardo l'evento cileno del 1960 (di cui abbiamo già parlato). Soltanto adesso infatti il radioastronomo Warwick prende coscienza di una possibile scoperta. La sua ipotesi però è un po' debole. Non cita le osservazioni sovietiche che avrebbero dato forte supporto all'origine tettonica del fenomeno, ma probabilmente non ne era a conoscenza a causa della lingua russa. Tuttavia, come abbiamo visto, nello stesso anno uscirà anche il primo lavoro in inglese di Gokhberg.

Tirando le somme, nella seconda metà del '900, dobbiamo considerare come l'assoluta eccezionalità dell'evento cileno ($M=9.5$) potrebbe aver reso possibile la sua osservazione per così dire "accidentale" da parte dei radioastronomi, determinando la prematura scoperta di un precursore EM nel 1960. Studi specifici sovietici ci sono stati forse anche prima del 1978 ma non se ne trova documentazione. Tuttavia la pubblicazione contemporanea dei lavori di Warwick e Gokhberg sembra aver dato il via a una vera e propria "caccia" al precursore EM. D'ora in avanti però non esaminerò più singolarmente le osservazioni successive perché è più significativo osservare lo sviluppo di questo filone di ricerca nel suo insieme. Per questo motivo ho compilato una lista di episodi (Tabella 1) basata su quella già presentata nella mia tesi di laurea (2001) ma più completa e dettagliata.

Il limite simbolico sull'anno 2000 è stato mantenuto anche in questa lista per praticità, perché ora lo scopo è quello di studiare l'evoluzione della ricerca del precursore EM da una sua ipotetica nascita. Da questa tabella si può trarre tutta la bibliografia²² e le seguenti osservazioni:

1. Le bande radio interessate si trovano prevalentemente al di sotto delle HF e raramente sopra. Questo fatto potrebbe essere legato alla natura del fenomeno ma può anche essere dovuto a un'indagine selettiva.
2. Come già osservato nella vecchia lista [Nardi & Caputo, 2009] sembra esistere una soglia molto alta per la magnitudo che il terremoto deve avere affinché venga generato un segnale EM oppure affinché questo possa permeare la crosta fino a raggiungere l'atmosfera. Nella nuova lista risulta un valore minimo di 4.0 su una media di 6.3.
3. Si osserva un vero e proprio boom delle osservazioni a partire dal 1988. Fino al 2000 viene rilevato almeno un fenomeno all'anno con una media di 1,9 per anno.

²² La bibliografia della Tabella 1 è numerata ed è stata ordinata in una lista a parte rispetto a quella del testo (p. 135).

Anno	Banda	Campo	Evento associato	M	Bibliografia
1960	HF	EM	Chile, 22/05/60	9.5	[01]
1978	LF, MF	EM	Iran, 16/09/78	7,4	[02]
1980	VLF-LF	EM	Kyoto, Japan, 31/03/80	7.0	[03]
1980	VLF-LF	EM	Tokyo, Japan, 25/09/80	5.3	[03]
1981	VLF-LF	EM	Tokyo, Japan, 28/01/81	5.5	[03]
1988	ULF	M	Spitak, Armenia, 07/12/88	6.9	[04], [05]
1989	ULF	M	Loma Prieta, California, 18/11/89	7.1	[04]
1989	ELF-LF	M + EM	Loma Prieta, California, 19/11/89	7.1	[06]
1989	ELF-LF (satellite)	E + M	Spitak, Armenia, 23/01/89	6.9	[07]
1990	ELF-ULF (militari)	M	Upland, California, 17/04/90	4.3	[08]
1990	VLF (satellite)	E	Western Iran, 20/06/90	7.5	[09]
1991	ELF-ULF	M	Watsonville, California, 23/03/91	4.3	[08]
1992	ELF-ULF (militari)	M	Coalinga, California, 15/01/92	4.0	[08]
1993	ULF	M	Guam, Japan, 08/08/93	8.0	[10], [11], [11b], [12]
1994	VLF	E	Hokkaido-Toho-Oki, Japn, 04/10/94	8.1	[13]
1995	ELF-VHF(FM)	M+EM	Kobe, Japan, 17/01/95	7.2	[14], [15]
1995	VLF, HF, VHF	EM	Kozani-Grevena, Greece, 13/05/95	6.6	[16], [17], [18], [19]
1996	HF	EM	Nairiku-nanbu, Japan, 11/08/96	5.9	[20]
1996	HF	EM	Toho-oki, Japan, 11/09/96	6.6	[20]
1996	VLF	M	Sea of Japan, 5/10/96	4.4	[21]
1997	VLF	M	Kumamoto, Japan, 26/03/97	6.3	[21]
1998	UHF	M	S.Juan Bautista, California, 12/08/98	5.1	[22], [23]
1999	VLF	M	Kumamoto, Japan, 09/03/99	4.5	[21]
1999	VLF	M	Shonan, Japan, 22/05/99	4.1	[21]
1999	VLF, LF, HF	EM	Athens, Greece, 07/09/99	5,9	[16], [17]
1999	ULF-ELF	M	Chi-Chi, Taiwan, 21/09/99	7.6	[24], [25]
1999	ULF	EM	Hector Mine, California, 16/10/99	7.1	[26]
2000	ULF	M	Izu, Giappone, 27/06/2000	6.4	[27]

Tabella 1 Cronologia delle osservazioni di presunti precursori EM fino al 2000. Questa tabella riporta tutti i casi di anomalie elettromagnetiche o anomalie di campo elettrico o magnetico non statici (captati con antenne) che ho potuto raccogliere dalla letteratura scientifica fino all'anno 2000. Il limite simbolico del 2000 è stato imposto per praticità. Lo scopo è quello di studiare l'evoluzione del fenomeno nella storia della ricerca scientifica. Osserviamo che su 28 casi, la magnitudo minima è 4.0 e la media è di 6.3. Il fenomeno sembra associato solo a terremoti di rilevante e quindi rara intensità. Le bande radio interessate sono prevalentemente al di sotto delle HF e raramente sopra. Tutto ciò può essere legato alla natura del fenomeno ma anche il frutto di una indagine selettiva. La chiave numerica della bibliografia di questi eventi è riportata in chiusura di testo, dopo la bibliografia ordinaria (p. 135).

Se dalla Tabella 1 si trae un semplice grafico anno/evento (Figura 2) notiamo dopo il caso cileno altri quattro casi, tutti riferibili ai monitoraggi di Gokhberg in URSS e Giappone. Sia Warwick che Gokhberg pubblicheranno i loro lavori nel 1982 e proprio dopo questo orizzonte sembra partire una sequenza di segnalazioni quasi senza interruzioni. Con l'aiuto dei grafici si possono fare due ulteriori osservazioni:

4. Se si considera la distribuzione delle magnitudo degli eventi elencati nella Tabella 1, si osserva un confinamento della distribuzione degli eventi al di sopra di una soglia di magnitudo 4 (Figura 3) e una distribuzione quasi uniforme al di sopra della soglia. Ciò è in contrasto con la legge di Gutenberg-Richter (vedi in appendice, al paragrafo 7.1) che vorrebbe per gli eventi sismici un'incidenza che si riduce drasticamente al crescere della magnitudo. Questo grafico mostra chiaramente che l'occorrenza del precursore elettromagnetico sembra esercitare una selezione sugli eventi di alta magnitudo, come già

accennato al punto 2. Per logica è probabilmente l'evento stesso a subire una selezione in funzione dell'energia irradiata alla sorgente, dovuta forse all'attenuazione EM nella crosta o forse a un limite del meccanismo genetico.

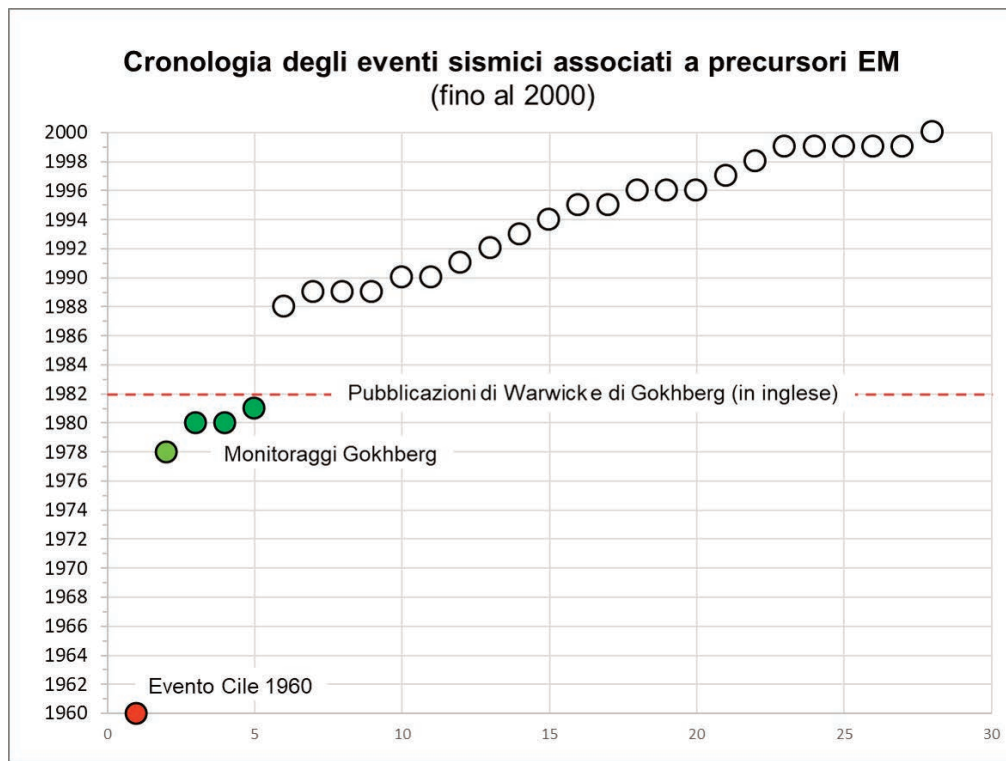


Figura 2 Distribuzione cronologica degli eventi tratti dalla Tabella 1. L'evento cileno del 1960 (punto rosso) è il primo sisma del quale in letteratura si trova un'associazione con precursori EM ma l'ipotesi fu pubblicata da Warwick soltanto nel 1982 (linea rossa). Le osservazioni evidenziate in verde sono tutte riferibili al gruppo di Gokhberg. L'evento in verde chiaro fu pubblicato in russo l'anno seguente. Nel 1982 pubblicherà in inglese gli altri eventi. Proprio dopo questo orizzonte (tratteggio rosso) ha inizio la variegata serie di osservazioni che arriva fino ai nostri giorni, qui riportata solo fino al 2000.

- Raggruppando gli eventi per classe di magnitudo (Figura 4) appare particolarmente evidente il contrasto con la G-R. In accordo con essa abbiamo un solo evento per ciascuna delle classi M.8 e M.9, dove rispettivamente sarebbero attesi 1 episodio all'anno e ancor meno. Tuttavia tutti gli episodi sono distribuiti quasi equamente (semmai incrementandosi lievemente) tra le classi M.4 e M.7. Se consideriamo che statisticamente in questo range gli eventi sismici dovrebbero essere pochi e al di sopra quasi non dovrebbero esistere, questa evidenza lascia almeno sperare nella possibilità di una corrispondenza pressoché sistematica.

Mi rendo conto che è poco ortodosso trattare la bibliografia quasi come una serie temporale di dati scientifici, inoltre la mia tabella potrebbe essere incompleta²³. Tuttavia, tornando al decorso storico, il grafico della Figura 2 riesce a rappresentare una situazione storica sensata: vuoi per una scoperta casuale di Warwick, vuoi per una oscura scoperta sovietica, sta di fatto che dopo

²³ A sostegno si fa notare che un'altra lista, molto più dettagliata ed estesa nel tempo, si può trovare in [Petraki et al. 2015], dove i dati fino al 2000 risultano coerenti con gli eventi della Tabella 1. Tuttavia questa tabella, limitatamente all'anno 2000, è più completa e forse più accurata di quella in Petraki.

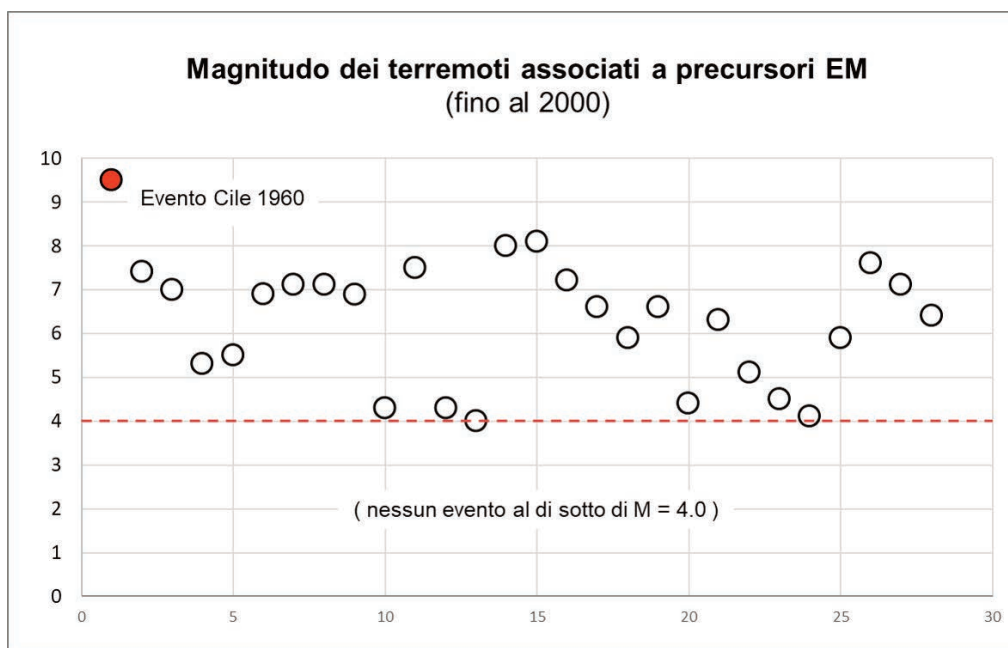


Figura 3 Distribuzione delle magnitudo degli eventi riportati nella Tabella 1. Gli eventi sono distribuiti sull'asse X in ordine cronologico. L'evento cileno del 1960 (punto rosso) è quello dalla magnitudo più alta (M=9.5). Appare evidente che i terremoti associati a precursori EM sono confinati su un'alta fascia di magnitudo in contrasto con la distribuzione di G-R. Su 28 possibili casi di associazione osservati in 40 anni non c'è un sisma di magnitudo inferiore a 4.0.

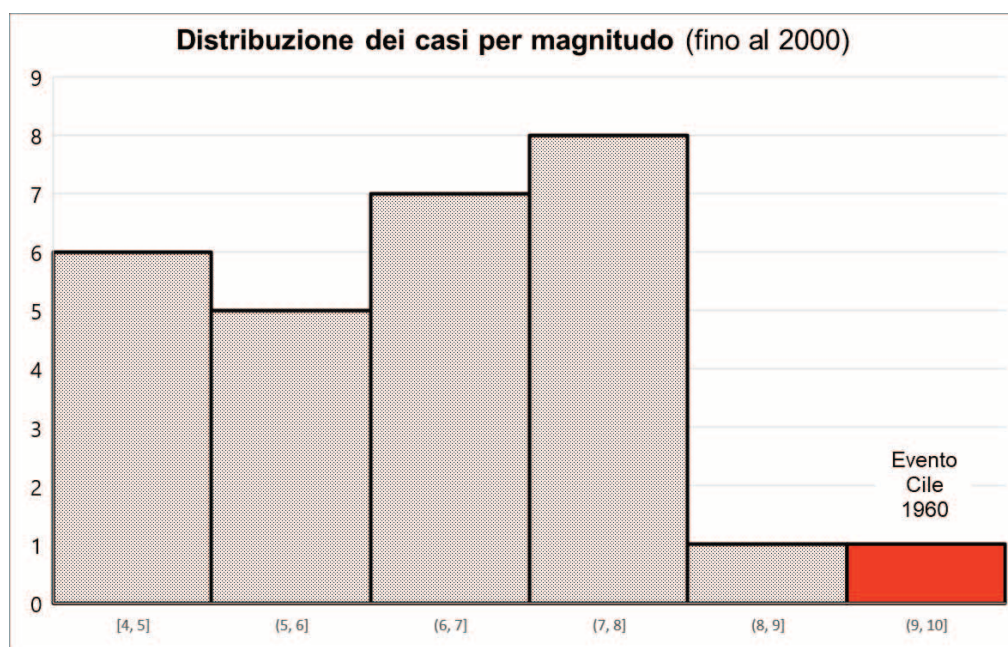


Figura 4 Distribuzione per classe di magnitudo (x) del numero di casi (y) della Tabella 1. In contrasto con la legge di G-R (vedi paragrafo 7.1) tra M.4 e M.8 i casi si distribuiscono in modo abbastanza equilibrato intorno a una media di 6,5. Nella classe [9-10] è incluso il solo caso del Cile (barra rossa). Considerando che la media annua dei terremoti è di 10000 (M4), 1000 (M5), 130 (M6), 15 (M7), 1 (M8) e 0 (M9), la distribuzione osservata fa immaginare che l'associazione con i segnali EM possa tendere ad essere sistematica per alte magnitudo.

l'orizzonte del 1982, quando tutti hanno potuto conoscere questi fatti, qualcosa nel mondo è cambiato. In definitiva abbiamo quasi un paradosso. Un'improvvisa serie di osservazioni di presunti precursori EM prosegue fino ai nostri giorni e il fenomeno è ormai supportato da sperimentazioni in laboratorio ma non abbiamo una vera e propria scoperta del precursore EM, se non la tardiva ipotesi di Warwick. Se c'è stata una vera scoperta essa deve essere avvenuta nella prima metà del XX secolo, tra il 1900 e il 1978, forse in URSS ma forse, ancor prima, in Italia. Nel riquadro che seguirà si riporta fuori testo un'ulteriore ipotesi, questa volta un po' fantasiosa, che tuttavia può dar spunto a un'interessante sfida bibliografica.

Un'ipotesi più romanzesca sulla scoperta dei precursori EM

Più che una scoperta vera e propria, forse la scintilla che a fine '900 ha scatenato in tutto il mondo la caccia al precursore EM può essere stata una sorta di diffuso sospetto. Questi sospetti - faccio un'ipotesi - potrebbero essere stati alimentati da una "fonte oscura" che li ha mantenuti a lungo allo stato latente. Mi riferisco ai radioamatori. Non ci sono dubbi che i più assidui e sistematici "osservatori" dello spettro radio (se escludiamo oggi i militari) siano stati da sempre i radioamatori, seguiti dai radioastronomi che però studiano di solito frequenze troppo alte per poter penetrare la crosta terrestre (e inoltre hanno il vizio di puntare antenne direttive nella direzione sbagliata). Scherzi a parte, vorrei proporre a questo punto, approfittando anche della forma divulgativa di questo trattatino, un'ipotesi forse un po' audace ma che potrebbe aiutare a risolvere il paradosso della "non scoperta" dei precursori EM.

Come è noto, la Seconda guerra mondiale produsse una moltitudine di piloti d'aviazione, molti dei quali dopo il conflitto divennero piloti civili. Non tutti realizzano che allo stesso modo ha prodotto nel mondo una moltitudine di "marconisti", cioè dei radiofonisti specializzati nelle comunicazioni aeronautiche, marittime e terrestri e nelle intercettazioni nemiche di tutte queste. Più facilmente che per i piloti, molti radiofonisti tornati alla vita civile sono rimasti radioamatori e la ripresa economica del dopoguerra ha favorito in tutto il mondo un vero e proprio boom della passione "radiantistica", passata poi di padre in figlio, tanto da sfociare nel fenomeno della "pirateria" radio, forzando l'esigenza di una regolamentazione internazionale.

Ma torniamo al punto: dal dopoguerra lo spettro radio ha avuto improvvisamente una quantità di ascoltatori senza precedenti, che non si limitavano più ad accendere e ascoltare, come gli abbonati EIAR-RAI²⁴, ma sperimentavano apparecchiature e antenne, spesso fatte in casa, su tutte le bande radiofoniche. Soprattutto poi si incaponivano ad evitare, o a cercare la sorgente, di ogni maledetto disturbo (perché alla fine è questo quello che facciamo!) In questo scenario non è improbabile che molti radioamatori nel mondo abbiano potuto associare un radiodisturbo sconosciuto con un evento sismico talmente rilevante da aver fatto notizia (cosa che, come abbiamo visto in Figura 3, è esattamente ciò che sembra fare un precursore EM). Se così fosse, il fatto stesso che non il mondo della ricerca ma degli esperti di radiotecnica, estranei e indifferenti alla sismologia, possano aver associato le due cose, potrebbe suggerire che il fenomeno sia stato ancor più evidente di quanto non lo sia nella letteratura scientifica e che la sua occorrenza sia tendenzialmente sistematica. In effetti questa "leggenda" esiste da molto tempo e ovunque nel mondo²⁵. Addirittura, lo vedremo tra poco con il caso Eleuteri, in Italia questa ipotesi si è potuta

²⁴ Essendo questa guida rivolta ad un pubblico giovane, forse devo spiegare che nel primo dopoguerra L'EIAR, o Ente Italiano per le Audizioni Radiofoniche, era il titolare della concessione in esclusiva delle trasmissioni radiofoniche circolari sul territorio italiano. Fu la madre di "mamma RAI". Da questo punto di vista ci è nonna.

²⁵ Per quanto poco ciò possa valere, va precisato che questa leggenda esiste da molto tempo prima che la diffusione di Internet rendesse irrilevante il fatto che una notizia non documentata possa mantenersi in circolazione.

concretizzare in diversi filoni della ricerca scientifica. Ancora oggi molto spesso nei forum di tutto il mondo si trovano discussioni in cui “off topic” qualcuno accenna al fatto che il padre o il nonno sosteneva di saper riconoscere nel QRN (il rumore di fondo naturale) dei particolari rumori che annunciavano i grandi terremoti. Di solito sono descritti come “scariche” o come “rumore simile a pioggia”, a una cascata o al “cellophane accartocciato”. Del resto ciò corrisponde al modo in cui l’inevitabile demodulazione prodotta dai ricevitori radio tradurrebbe acusticamente il fenomeno che più avanti vedremo in dettaglio: una successione impulsiva continua o clusterizzata.

In conclusione, anche se la mia è solamente un’ipotesi, nella speranza che grazie alle diffusissime riviste specializzate per radioamatori uno studio storico possa portare a qualche inaspettata testimonianza bibliografica, lancerei ai radioamatori stessi la sfida a trovare una traccia scritta di questo ipotetico anello mancante. Ben inteso: niente che faccia riferimento ad internet ma solo a carta stampata prima degli anni ‘80. Il risultato di questa ricerca, anche se pubblicato esso stesso da una rivista radioamatoriale, sarebbe un contributo bibliografico davvero importante. A.N. (izOrii)

Assunto che un precursore EM in qualche modo sia stato scoperto e che sia stato poi ripetutamente osservato, la nostra storia proseguirà ora in dettaglio nel panorama italiano, dove la ricerca scientifica si evolve realmente in una direzione sempre più intrecciata con l’ambiente radioamatoriale.

- All’inizio degli anni ‘90 un gruppo misto di ricercatori della Sapienza di Roma (dipartimenti di Fisica e Scienze della Terra) sta conducendo ricerche multiparametriche nell’Appennino centrale. Vengono evidenziate anomalie presismiche nei segnali elettrici, magnetici, sismoacustici e deformazioni del suolo. Per quanto bizzarro possa sembrare, in due grotte del centro Italia ci saranno anche dei ricevitori sintonizzati su stazioni BC in Onda Lunga. Tutto nasce proprio da quelle anomalie EM a bassa frequenza osservate da Gokhberg. Per ricercarle in un luogo “pulito” dal punto di vista del rumore di fondo EM, il team italiano si avventurò nelle profondità di una grotta carsica per installare un’apparecchiatura a larga banda (100 Hz - 300 kHz) con la convinzione che in quell’ambiente i segnali radio artificiali non potessero penetrare. Fu osservata invece la presenza di un segnale regolare e apparentemente modulato. Quando nello stesso ambiente fu provato un normale radiorecettore Sony, si scoprì che si trattava della trasmissione BC di Radio Monte Carlo (trasmettitore da 1400 kW su 216 kHz, banda LF) [da comunicazione privata del prof. Biagi]. Come è noto, le trasmissioni radio su questa banda si propagano prevalentemente per onda di terra e secondariamente (in particolare di giorno) anche in onda riflessa. L’illuminazione dell’onda riflessa si sposta sulla superficie in funzione delle variazioni di quota dello strato ionosferico riflettente (siamo in LF ma si veda come riferimento sommario lo schema HF della Figura 65). Fatto sta che alcuni giorni prima del terremoto del 04/06/93 fu misurata un’attenuazione di 20 dB nella trasmissione di R. Montecarlo [Bella, Biagi et al., 1995 e 1998]. A questo punto dai “precursori EM”, intesi come segnali radio naturali, nasce un nuovo filone di ricerca su quello che si potrebbe chiamare un “precursore radio”. Con apparecchiature appositamente realizzate, seguirono studi più approfonditi sulle variazioni di intensità dei segnali radio delle stazioni in onde lunghe di R. Montecarlo, Rai2 Caltanissetta e Radio Praga [Biagi, 2001]. Ne risulta che i segnali notturni possono essere notevolmente attenuati mentre di giorno possono risultare anche accentuati a causa dell’onda di cielo. Questo studio intrapreso da Biagi sulle anomalie nella variazione di intensità dei segnali radio BC in area sismica si è rivelato un filone molto promettente che viene studiato ancora oggi.

- Il 12 maggio del 1997 in Umbria si manifestò un terremoto di Mw 4.7 con epicentro a Massa Martana. Qualche giorno prima, a meno di 10 km dall'epicentro, il radioamatore di Todi Marco Eleuteri (ik0vsv)²⁶ osservava con curiosità un anomalo disturbo radio: *“Simile al rumore che si fa accartocciando la plastica delle uova di Pasqua o dei cestini natalizi”*²⁷. Col passare del tempo Eleuteri seguì questo disturbo mentre si estendeva nello spettro radio interessando frequenze via via sempre più alte per scomparire soltanto al sopraggiungere del terremoto (che peraltro causò danni anche alla sua casa). Il risultato di queste osservazioni venne allora sottoposto a un altro radioamatore, il fisico prof. Ezio Mognaschi (iw2goo) che insegnava elettronica all'università di Pavia. Egli pose in evidenza che i valori osservati nel tempo come limite superiore di banda, man mano che essa si estendeva attraverso le HF fino alle VHF, tendevano ad allinearsi se rappresentati su un diagramma semilogaritmico (Figura 6). Questo fatto non è trascurabile. Sebbene in questo caso si tratti di pochi punti (forse 4) quando i dati sperimentali tendono ad allinearsi c'è il sentore che seguano una legge fisica. Lo stesso Mognaschi ne trasse infatti una formula empirica e diede divulgazione alla notizia pubblicandola già nel '97 sulla rivista “Radioonde” da lui curata [Mognaschi, 1997 e 1998].
- Nel 2000 ancora il prof. Mognaschi (iw2goo) insieme al geologo prof. Zezza (sempre Università di Pavia) pubblicano il risultato di una serie di esperimenti di laboratorio condotti sulle rocce per verificare il fenomeno dell'emissione elettromagnetica. Rompono per compressione uniassiale campioni di *gneiss* (una roccia metamorfica diffusa nelle Alpi) monitorando con un'antenna ferromagnetica la banda delle Onde Medie. Registrano effettivamente impulsi elettromagnetici (Figura 7) in corrispondenza e talvolta in anticipo rispetto alla rottura della roccia [Mognaschi et Zezza, 2000]. Da queste esperienze derivano alcune ipotesi sull'origine e la propagazione della radiazione elettromagnetica presismica [Mognaschi, 2002].
- Sempre nel 2000 viene discussa la tesi di laurea di Adriano Nardi (lo scrivente) alias izOrii e aspirante geologo. I miei esperimenti partirono in totale autonomia. Scoprii in seguito che ricalcavano in parte quelli di Mognaschi (e di Warwick). Con un lungo lavoro svolto in laboratorio e in cava, iniziato ben 4 anni prima e pubblicato soltanto 9 anni dopo [Nardi & Caputo, 2009], in questa tesi si confermava la presenza saltuaria di emissioni EM sulle bande MF, HF e perfino VHF che, come in Mognaschi, erano in corrispondenza e talvolta anche in anticipo sulla rottura della roccia. Però si evidenzia anche la presenza sistematica di emissioni ELF-VLF, per quasi tutto il processo di compressione fino alla rottura (Figura 8). Gli stessi segnali furono osservati anche nella fratturazione dovuta all'assestamento di versanti di roccia dopo l'abbattimento di fronti di cava (vedremo tutto in dettaglio, rispettivamente nei paragrafi 1.3.1 e 1.3.2).
- Con la tesi del dottorato in Geofisica (2005) l'ormai geologo izOrii presenterà, a seguito di ulteriori esperimenti, la caratterizzazione di due tipi di segnale VLF, l'evidenza di una

²⁶ Questa sigla è un nominativo internazionale di stazione radioamatoriale. La “i” sta per Italia mentre il numero indica l'area di appartenenza (in questo caso lo “0” è l'Umbria, ma poteva essere anche il Lazio). D'ora in poi indicherò sempre il nominativo radio ogni volta che si parla di un radioamatore, anche per sottolineare come in questo campo non è stata solo la ricerca accademica a portare progressi, anzi, anche quando si parlerà di Università, in realtà ci sarà sempre dietro la passione di un radioamatore.

²⁷ Questa è la descrizione esatta fattami dallo stesso Eleuteri. È compatibile con il suono che la demodulazione in ampiezza di un ricevitore radio riproduce in presenza di emissioni impulsive come quelle che ho rilevato sperimentalmente, anche con normali radioricevitori sintonizzati, durante la microfratturazione di rocce in laboratorio (vedi paragrafo 1.3.1). Altre testimonianze di radioamatori descrivono suoni compatibili, tipo un rumore “simile alla pioggia”.

relazione tra questi e la microfratturazione della roccia e l'osservazione "on air" di tre eventi compatibili con le emissioni osservate in laboratorio e tutti seguiti a distanza di 3-4 giorni da terremoti di magnitudo uguale o maggiore di 4.5 [Nardi et al. 2007; Nardi et Caputo, 2009] (anche in questo caso vedremo tutto in dettaglio nei paragrafi 1.3, 1.4 e 1.5).

Le stesse esperienze vengono ripercorse anche in Grecia. Ad osservazioni di fenomeni associati a terremoti greci fanno seguito esperimenti su campioni di roccia. Si studiano singole frequenze campione ma sparse su una vasta gamma dello spettro: da ELF a VHF. Anche in questo caso si conclude che: «L'evoluzione temporale di queste sequenze elettromagnetiche rivela sorprendenti somiglianze con quelle osservate nelle emissioni acustiche ed elettromagnetiche di laboratorio durante le diverse fasi del processo di preparazione della rottura del campione di roccia. Pertanto, può essere accettato il concetto secondo cui le EMA ("Electromagnetic Anomalies") rilevate vengono emesse durante i processi di microfratturazione. Se consideriamo che la stessa dinamica governa i terremoti su larga scala e la struttura reologica del campione su scala microscopica, i risultati di questa analisi suggeriscono anche che le EMA registrate potrebbero riflettere la fase di nucleazione del terremoto imminente ad esse associato» [Eftaxias et al., 2003].

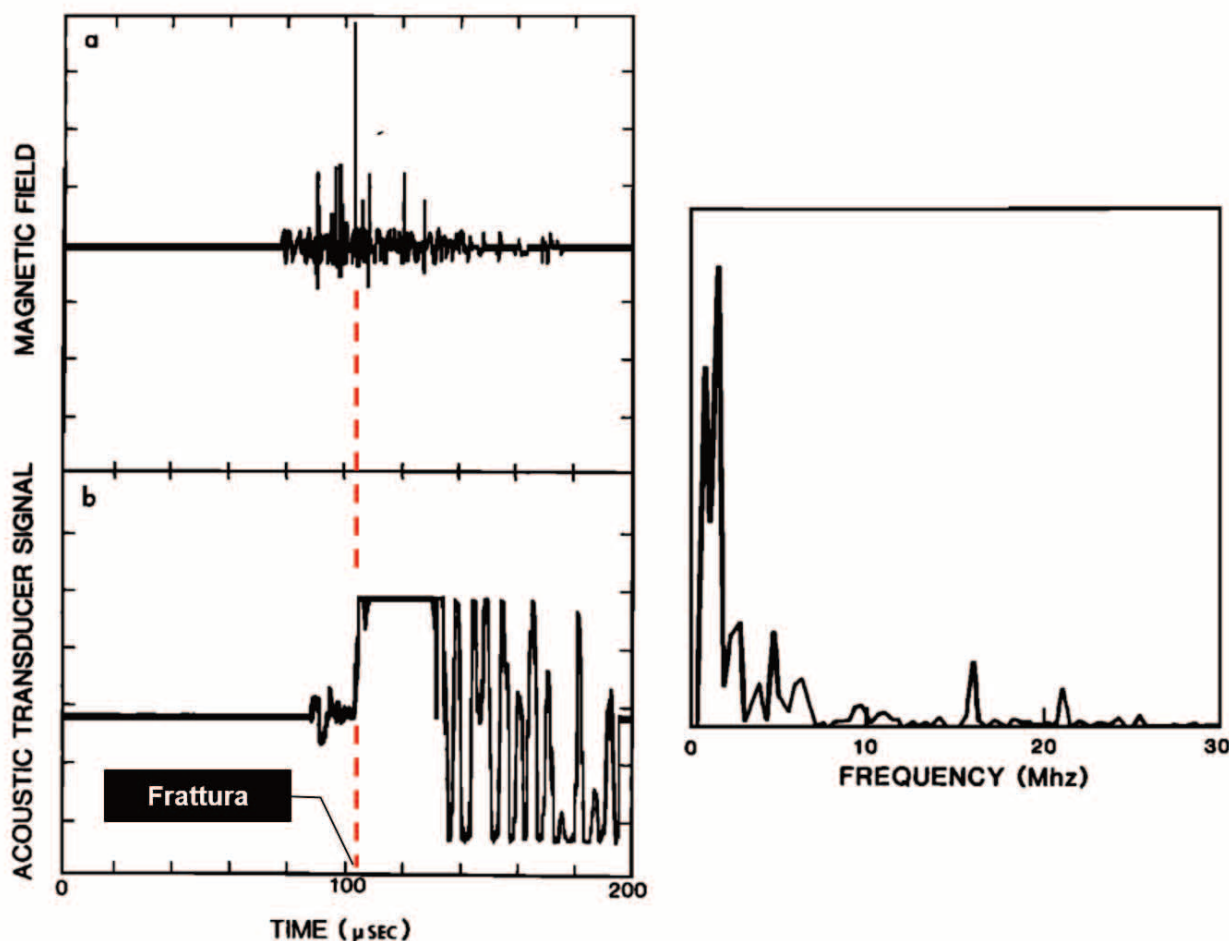


Figura 5 L'esperienza di Warwick (1982). Il grafico a sinistra mostra il confronto tra il segnale di campo magnetico (a) e l'emissione acustica (b) in corrispondenza della rottura di una carota di granito (modificato con etichettatura da [Warwick, 1982]). A destra lo spettro dell'emissione magnetica. La strumentazione limitava la misura alla banda 0,5 - 300 MHz.

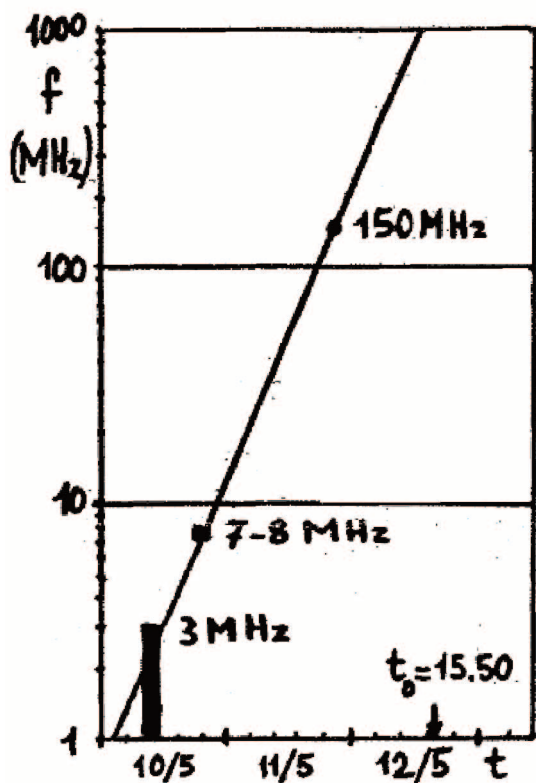


Figura 6 Mognaschi-Eleuteri 1997. Il grafico di Mognaschi, iw2goo, costruito in base al disturbo radio rilevato da Eleuteri ik0vsv. L'asse X esprime il tempo (t_0 è il terremoto) su scala lineare e l'asse Y la frequenza in MHz espressa su scala logaritmica. In questa rappresentazione semilogaritmica i dati sembrano allinearsi e questo suggerisce l'esistenza di una legge che lega la frequenza al tempo.

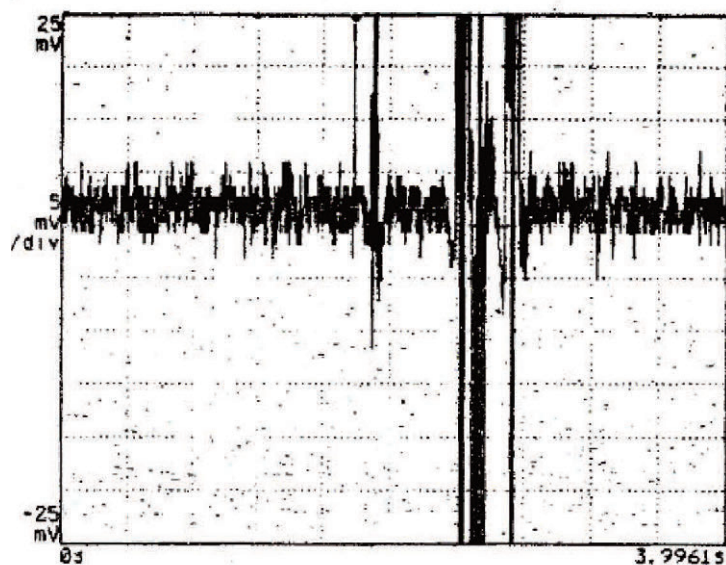


Figura 7 Mognaschi-Zezza 2000. Gli esperimenti di Mognaschi, iw2goo: oscillogramma del segnale ricevuto in onda media durante la rottura di un campione di roccia. A destra, molto fuori scala, il segnale alla rottura. Poco a sinistra un segnale anticipatore.

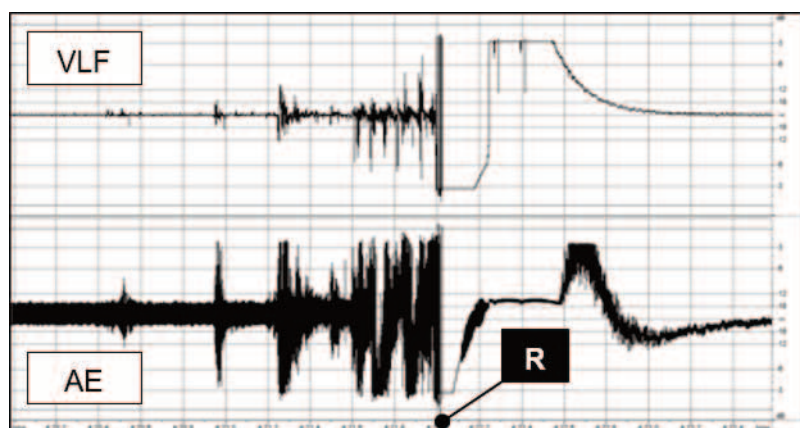


Figura 8 Nardi 2000. Gli esperimenti di Nardi, iz0rii: oscillogramma del segnale ricevuto in banda VLF (in alto) a confronto con il segnale acustico (AE, in basso). Regrazioni simultanee in prossimità della rottura (R) di un campione di roccia. Ogni tipo di roccia testata ha mostrato un segnale EM associato alla microfratturazione.

Riguardo i segnali naturali in bassa frequenza radio, ci sono oggi diverse reti di monitoraggio terrestre e perfino studi da satellite. Apprendo dal prof. Biagi che in Giappone la società privata “Hayakawa Institute of Seismo Electromagnetics, Co. Ltd” formula previsioni sui terremoti locali basate prevalentemente su una rete VLF. Addirittura fornisce ogni giorno un bollettino telefonico per gli abbonati e sembra che alcune previsioni siano risultate corrette²⁸. Da quanto sono a conoscenza, con la rete INFREP (International Network for Frontier Research on Earthquake Precursors) proseguono tuttora le ricerche del prof. Biagi (oggi in pensione) sulle anomalie nella propagazione dell’onda di terra delle stazioni radio BC (gli studi che iniziarono con la radio nella grotta). Moltissimi lavori si trovano oggi sull’argomento. Questo fenomeno riguarda un altro tipo di precursore EM che non verrà trattato in questa guida. Questo “precursore radio” rappresenta tuttavia un aspetto estremamente importante, forse ancora correlato alle emissioni EM naturali, che richiederebbe anch’esso un monitoraggio continuo e diffuso. Va sottolineato che questo tipo di monitoraggio, se pur con diversa finalità, fa già parte della normale attività radioamatoriale. Si tratta di un lavoro comunque in corso che, a mio avviso, potrebbe essere valorizzato con un’iniziativa analoga al *progetto SETI@home*²⁹. Ricordo infine, poiché ci siamo laureati alla Sapienza nello stesso periodo, che le possibili cause sismiche di questo fenomeno di attenuazione furono studiate dott. Rodolfo Manno nella sua tesi di laurea in fisica (2001) alla quale seguì un articolo incentrato proprio sul fenomeno in banda LF [Manno, 2003].

Esiste inoltre tutta una serie di precursori, diciamo così “di ultimissima generazione”, dovuti all’interazione della litosfera con l’atmosfera o la ionosfera [es. De Santis, 2015 e 2019] che spesso hanno direttamente o indirettamente una natura elettromagnetica e che oggi si studiano anche da satellite. Ricerche su anomalie originate da segnali VLF sono state fatte da satellite in URSS per la prima volta. Successivamente in Europa, grazie al satellite francese Demeter, sono stati monitorati i segnali dei potenti trasmettitori VLF terrestri rilevando un decadimento del segnale radio in associazione con forti terremoti [es. Molchanov et al., 2006; Boudjada et al., 2017] analogamente a quanto emerso dagli studi di Biagi et al. in banda LF. Per concludere la panoramica ci sarebbe poi un tipo di *precursore radio* diciamo... “per via contraria”. I sistemi GNSS (Global Navigation Satellite Systems, ovvero il comune GPS) sono esposti ai disturbi causati dalle mutevoli condizioni della ionosfera e i segnali trasmessi dai satelliti, attraversando l’intera ionosfera, portano memoria delle caratteristiche del mezzo attraversato. Se dunque dei segnali EM di origine tettonica interferissero con i fenomeni ionosferici (ipotesi proposta già da tempo) oggi l’analisi statistica dei disturbi osservati dalle stazioni GPS a terra può evidenziare i così detti *precursori ionosferici*. Queste anomalie ionosferiche vengono studiate anche attraverso i dati dei magnetometri vettoriali dei satelliti europei Swarm nell’ambito del progetto SAFE (Swarm for earthquake study, finanziato dall’ESA) che vede impegnato anche l’INGV, così come nel progetto Limadou (collaborazione tra le Agenzie Spaziali Italiana e Cinese) che studia invece dei dati del satellite cinese CSES.

²⁸ L’Europa però è molto lontana dalla realtà Giapponese ed estremamente più cauta. Del resto, a mio avviso, è il modo giapponese di recepire questa informazione e di reagire ad essa che, culturalmente, è diverso dal nostro e forse lo è ancor di più rispetto a quello statunitense.

²⁹ Search for Extra-Terrestrial Intelligence (SETI) è la nota organizzazione scientifica privata che si dedica alla ricerca della vita intelligente extraterrestre attraverso il monitoraggio di segnali radio provenienti dal cosmo. “SETI at home” è un progetto di calcolo distribuito basato sulla partecipazione volontaria attraverso PC interconnessi via internet. Software Defined Radio (SDR) è invece una recente tecnologia, ancora in via di sviluppo, con la quale segnali radio campionati vengono processati (es. modulazione e demodulazione) totalmente via software e senza la presenza “materiale” di pannelli di comando. Questo tipo di ricevitore può essere continuamente riconfigurato per qualsiasi impiego specifico. Possiamo quindi ipotizzare che attraverso questa tecnologia, ben nota ai radioamatori, le stazioni private SWL (cioè di radioascolto), quando non in uso, potrebbero monitorare automaticamente l’intensità di segnali in onda di terra di stazioni BC (MF e LF) per depositare automaticamente i dati in un archivio comune. Un simile progetto rappresenterebbe senza spesa uno strumento per studiare a posteriori l’occorrenza del precursore radio su scala mondiale!

È probabile che in futuro la Cina lancerà altri satelliti dedicati³⁰.

Ma ritorniamo ora con i piedi per terra. Abbiamo visto la storia della sperimentazione italiana sui precursori elettromagnetici in senso stretto (segnali radio naturali) almeno fino all'inizio del nuovo millennio. Dopo il 2000 nascono in Italia diverse iniziative di monitoraggio di potenziali precursori EM, sia in ambito scientifico che privato³¹. Dopo il mio arrivo all'INGV (2005) fu attivata una "rete sperimentale VLF" che riassorbiva quella avviata con la tesi di laurea. Al di fuori dell'INGV, le realtà con cui ho avuto contatti diretti sono state due: la CIEN, *Central Italy Electromagnetic Network*³² e la collaborazione ARI-FESN nel progetto SDT, *Segnali dalla Terra*³³. In quest'ultimo progetto ho collaborato a vario titolo, sia nella divulgazione scientifica che nella messa a punto di uno standard di acquisizione comune nelle stazioni che hanno voluto adottarlo. Si trattava della stessa configurazione di acquisizione, analisi e controllo remoto di una stazione VLF che verrà descritta dettagliatamente in questa guida.

1.3 Osservazioni di segnali VLF emessi dalla roccia

Come esempio di segnali elettromagnetici emessi dalla roccia in condizioni di stress meccanico viene ora presentata una sintesi dei risultati di studi condotti per circa 8 anni nell'ambito della mia tesi di laurea (2001) e di dottorato (2005). Si tratta di simulazioni dello stress tettonico a piccola scala, eseguite in laboratorio su campioni di roccia, e a media scala, eseguite sui versanti rocciosi di una cava. Seguono alcune osservazioni di segnali compatibili emersi da un monitoraggio EM condotto "on air" con la stessa sensoristica. Senza alcuna selezione, essi presentano effettivamente una possibile associazione con la sismicità regionale. Per concludere si presentano alcune evidenze e ipotesi riguardo la sorgente dei segnali.

1.3.1 Esperimenti in laboratorio

In questi esperimenti, pubblicati in [Nardi & Caputo, 2009], dei campioni lapidei appartenenti a molte e differenti categorie litologiche³⁴ sono stati sottoposti a *compressione uniassiale* fino alla rottura. Uniassiale significa che la sollecitazione è stata impressa su un solo asse della terna spaziale X,Y,Z e nel caso specifico una pressa idraulica poteva esercitare sull'asse verticale del campione uno sforzo con incremento costante fino a una forza massima di 500 tonnellate. I campioni di roccia sono stati tagliati nelle dimensioni standard di 8x8x10 o 10x10x10 cm. Nel primo caso, l'asse verticale è da considerare lungo la dimensione maggiore del parallelepipedo. Nella preparazione dei campioni è stato curato in modo particolare il

³⁰ Proseguendo su questa strada... chi sa se un giorno, al contrario, non si potranno usare le perturbazioni ionosferiche per scoprire attività sismica su altri pianeti dotati di ionosfera senza nemmeno averne mai toccato il suolo?

³¹ È spesso difficile distinguere nettamente tra ricerca scientifica e amatoriale e spesso nemmeno vale la pena farlo, se non è il metodo scientifico ad essere in discussione. Talvolta anzi si tratta addirittura di ricerca "privata" entrata in ambito "istituzionale" e/o istituzionale, proseguita poi privatamente, e ancora così anche per diversi cicli successivi. Ciò trova spiegazione in antitetici fenomeni italiani noti come *precaricato* e *pensionamento*. Gran parte della ricerca di frontiera in Italia si svolge negli antipodi della stabilità lavorativa, dove ciò che paga è solo la passione per la scienza.

³² Coordinatore: Cristiano Fidani, vedi [Fidani, 2016] e il sito [CIEN].

³³ Coordinatore: Riccardo Rossi (iv3nqs) [STD, FESN]; ARI: *Associazione Radioamatori Italiani* (www.ari.it); FESN: *Friuli Experimental Seismic Network* (www.fesn.org).

³⁴ *Calcicare Massiccio*, *calcicare Corniola*, calcicare marnoso *Scaglia Variegata* di varietà bianca, arenaria argillosa, porfido, marmo (calcicare metamorfico), calcicare marnoso, calcicare cristallino, calcicare micritico, calcicare spatitico, metamorfite, peridotite, granito, calcestruzzo con scheletro a breccia, calcestruzzo con scheletro a ghiaia, calcestruzzo "graniglia" (scheletro eterogeneo sia morfologicamente che litologicamente).

parallelismo e la lucidatura delle due facce opposte sulle quali è stata esercitata la pressione. Durante la prova di carico sono stati monitorati i seguenti parametri:

- Deformazione verticale del campione
- Emissione acustica della microfratturazione
- Emissione EM su bande radio convenzionali (HF, UHF)
- Emissione EM (componente E) nelle basse bande radio (SLF-ULF-VLF)

L'esperimento ha avuto lo scopo di simulare le condizioni reologiche di "preparazione" del terremoto, ovvero di riprodurre nella roccia quel processo di compressione, microfratturazione e rottura della massa lapidea che è la causa materiale del terremoto. Le condizioni di compressione uniassiale simulano una *faglia diretta*, sia pure a temperatura ambiente e in assenza di una pressione di confinamento, quindi non nelle condizioni reali presenti in profondità. Tuttavia, pur con questa limitazione, da un punto di vista *reologico* si mantiene la condizione di sforzo $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ che caratterizza la frattura di scorrimento con angolo di 60° del meccanismo tettonico di una faglia diretta. La vera variabile trascurata è la temperatura. Da un punto di vista meccanico la differenza è che nella prova uniassiale alla rottura della roccia non avverrà il terremoto ma l'esplosione del campione. La Figura 9 illustra quanto detto fin ora. Per un approfondire tutti questi aspetti, come i dettagli geotecnici di questo tipo di prova sperimentale o la relazione con i precursori il terremoto, vedi il capitolo sulla *dilatanza* in [Nardi & Piersanti, 2021].

Durante il processo di rottura uniassiale sono state effettivamente osservate delle emissioni elettromagnetiche. Nella prima serie di esperimenti (tesi di laurea, 2001) furono monitorate anche delle bande radiofoniche. In sintesi, queste sono le principali informazioni emerse:

- Bande radio convenzionali. Nelle bande radio HF e UHF, sulle frequenze campione di 3,9 MHz e 460 MHz, il segnale RF demodulato in ampiezza (AM) con normali apparecchiature radiofoniche, all'analisi acustica mostra un carattere impulsivo e la sonorità tipica delle scariche elettriche. Il segnale RF non si osserva con sistematicità ma solo saltuariamente e in concomitanza con la rottura del campione, nel caso di esplosioni particolarmente energetiche. Talvolta, ma con minore intensità, inizia a manifestarsi pochi istanti prima della rottura. Questo tipo di manifestazione risulta conforme a quanto riportato da [Mognaschi et Zezza, 2000]. Il segnale HF si osserva più spesso di quello UHF.
- Bande radio a bassa frequenza. Il monitoraggio della componente campo elettrico nello spettro di frequenza dei suoni udibili, quindi sull'estensione delle bande radio SLF, ULF e VLF senza alcuna demodulazione, ha evidenziato emissioni impulsive a largo spettro con occorrenza sistematica durante quasi tutto il processo di compressione fino alla rottura. Nei limiti della risoluzione ottenuta, lo spettro sembra estendersi verso il basso nell'intera banda SLF e forse oltre. Il parossismo dell'emissione avviene alla rottura del campione.
- Relazione con la litologia. L'occorrenza dell'emissione EM a bassa frequenza è stata sistematica su qualunque tipo di roccia. Nel secondo ciclo di esperimenti (tesi di dottorato, 2005) 14 differenti litologie hanno manifestato tutte l'emissione EM con la medesima evoluzione generale. Tra queste c'erano calcari di vario tipo, lave, graniti, metamorfiti e perfino del calcestruzzo. Ciò che ha differenziato la "reattività" dei provini sembra essere la diversità delle caratteristiche meccaniche del materiale, ovvero lo stile di deformazione e la disomogeneità strutturale più che la composizione mineralogica, anche se questa ovviamente può condizionare le prime due. Questo aspetto è illustrato nella Figura 10.
- Sorgente. Si osserva una correlazione tra l'emissione EM e quella acustica non rappresentata da una precisa sincronia nei singoli picchi di segnale ma da una sistematica anche se univoca corrispondenza tra i clusters EM e quelli acustici (Figura 11). Tutti i clusters EM corrispondono a clusters acustici ma non il contrario. Non tutta l'emissione acustica (che del resto è associata anche alla caduta e al rimbalzo di schegge) ha

corrispondenza EM. Questa sistematica correlazione tra i due segnali, la dipendenza della reattività EM dallo stile di deformazione e il risultato di varie prove fatte in saturazione d'acqua (si vedrà più avanti, al paragrafo 1.5) sono tutti indizi che convergono nell'individuare la sorgente EM nella fratturazione del materiale, probabilmente già a livello di reticolo cristallino. Non sembra necessaria l'esistenza di proprietà piezoelettrica nei minerali costituenti.

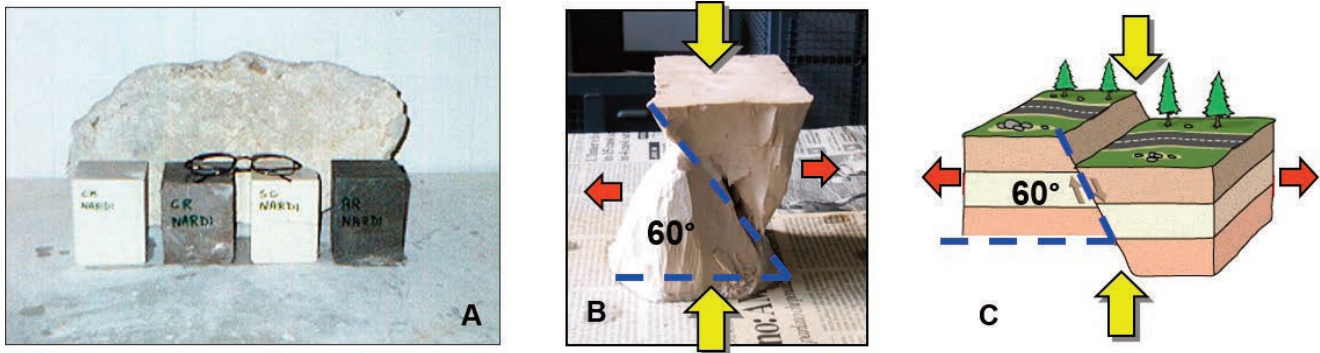


Figura 9 Simulazione in laboratorio della faglia sismogenetica. Da blocchi di roccia compatta (A, in secondo piano) sono stati tagliati campioni di dimensioni uniformi: 8x8x10 cm. In primo piano vediamo quattro esempi di litologie testate da sinistra: Calcare Massiccio, Calcare Corniola, Scaglia Variegata (calcare marnoso bianco) e Arenaria. Mediante una pressa idraulica da 500 tonnellate di spinta, i campioni sono stati sottoposti a compressione uniassiale fino alla rottura (B). Questa condizione di stress, in cui la spinta verticale (freccie gialle = σ_1) è preponderante rispetto alle componenti che giacciono sul piano orizzontale, è quella tipica di una faglia diretta (C). In queste condizioni sia un campione (B) che la crosta (C) al superano del limite di rottura del materiale producono una frattura di scivolamento distensivo (freccie rosse) con angolo tipico di 60°. Fino a questo punto l'accumulo di energia elastica e il processo di "preparazione" della frattura è stato il medesimo. Nella faglia sismogenetica la roccia rilascia l'energia accumulata attraverso un'onda elastica che si propaga nella crosta stessa (il terremoto). Nel campione invece, che non è confinato lateralmente, con la rottura si avrà uno sbriciolamento esplosivo della maggior parte della massa attraversata dal piano orizzontale mediano. Resta un residuo coerente a cui le direzioni preferenziali di cedimento e la forma geometrica originaria del campione conferiscono la caratteristica forma "a clessidra" (B). L'energia liberata con l'esplosione del campione è proprio quell'energia che, in condizioni crostali, si sarebbe irradiata in modo elastico nella massa lapidea di confinamento causando il terremoto. Nella prova uniassiale quindi non può generarsi un terremoto. Tuttavia nel campione sarà stato simulato il medesimo meccanismo reologico che porta alla formazione di una faglia sismogenetica. Durante questo processo simulato in laboratorio la roccia ha emesso segnale elettromagnetico a largo spettro associato alla microfratturazione che ha consentito la formazione della superficie di scorrimento. È ragionevole aspettarsi che anche nella crosta una simile emissione venga prodotta nella fase di nucleazione delle microfratture, ovvero fino a quando si genera il terremoto. Per maggiori dettagli sulla prova uniassiale in relazione al processo di preparazione del sisma e ai precursori vedi [Nardi & Piersanti, 2021].

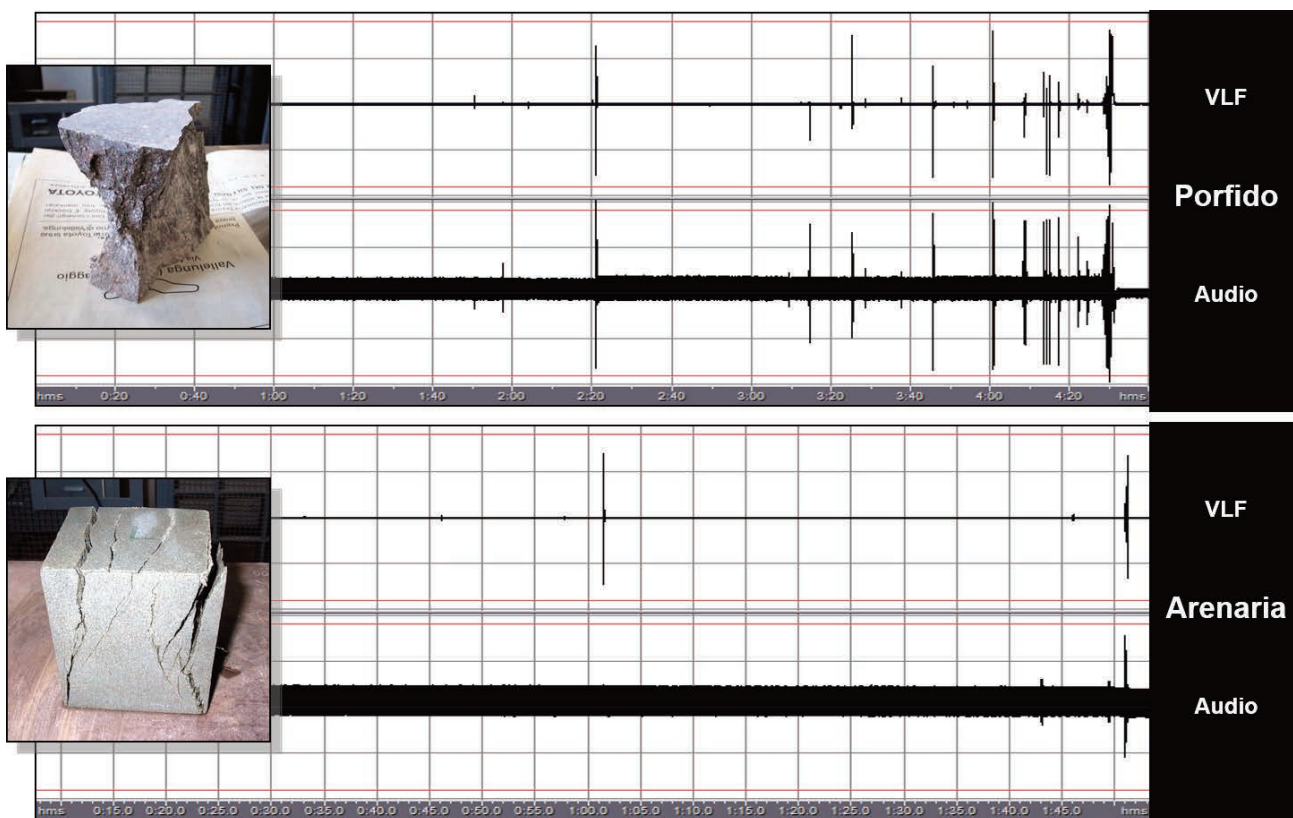


Figura 10 Stile di deformazione e reattività della roccia. Confronto tra i segnali registrati da due campioni molto diversi. Ciascuna registrazione è composta da due canali: VLF sopra e Audio sotto. In alto la registrazione ottenuta dalla rottura uniaassiale di un campione di Porfido (una lava acida fenocristallina spesso usata in edilizia come pietra decorativa). Questa roccia ha uno stile di deformazione “fragile”. Questo non significa che non sia dura, ma al contrario si oppone alla sollecitazione con poca deformazione plastica e accumulando energia elastica. Durante la prova di compressione subirà un’intensa fratturazione e libererà molta energia alla rottura. Nella traccia audio si vedono numerosi picchi (i cracks della microfratturazione) molti dei quali corrispondono a picchi di emissione VLF (in realtà in entrambi i casi si tratta di clusters non risolti con questa risoluzione grafica). In basso vediamo invece lo stesso test su un campione di Arenaria (sabbia cementata, spesso usata in edilizia per soglie e davanzali o per opere scolpite). Questa roccia sedimentaria contiene una matrice argillosa che le conferisce uno stile di deformazione “duatile”. Essa reagisce alla sollecitazione deformandosi plasticamente e producendo poche fratture, come si vede anche nella foto. Questo effetto si osserva nella registrazione acustica con la presenza di pochi cluster, per lo più prossimi alla rottura. Il tracciato VLF ricalca i cluster acustici (anche dove non si vede in questa grafica) riportando anch’esso meno segnali. La composizione mineralogica è completamente diversa ma entrambe le rocce hanno emesso segnale EM in funzione del tasso di fratturazione prodotta durante la sollecitazione. Campioni di Granito, che abbondano di cristalli di quarzo con proprietà piezoelettriche, non reagiscono diversamente da un Porfido o da una Metamorfite con lo stesso grado di fragilità e di disomogeneità strutturale. Anche l’omogeneità strutturale del materiale (quindi la sua granularità, la presenza di suture stilolitiche e la presenza di microfratture preesistenti) ha un ruolo molto significativo ai fini della “reattività elettromagnetica”. In accordo con la dinamica del processo di fratturazione, ogni discontinuità è infatti un punto di debolezza che diverrà facilmente un punto di nucleazione delle microfratture e di conseguenza potrà essere una potenziale sorgente di segnale EM.

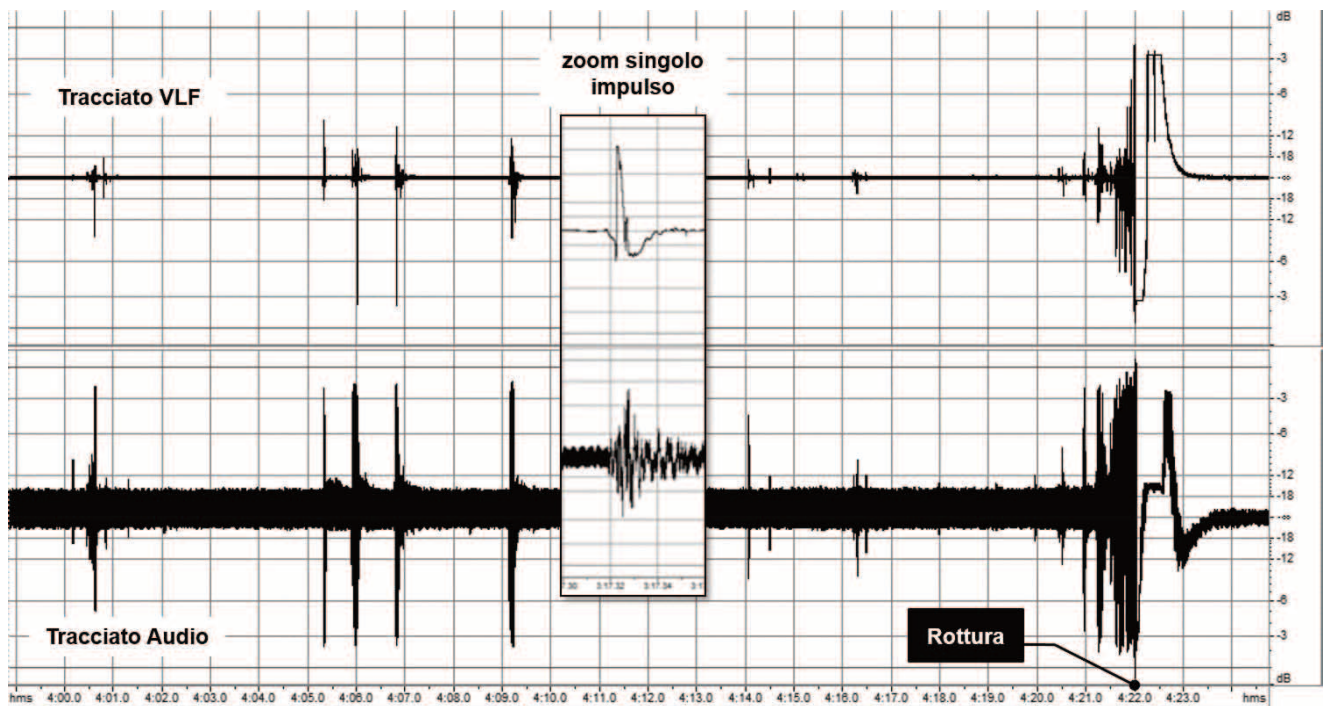


Figura 11 Corrispondenza tra onda meccanica e onda elettromagnetica durante la prova uniaassiale. Confronto sincrono tra canali di registrazione del segnale audio e del segnale VLF durante la parte finale di una prova uniaassiale durata 4 minuti e 22 secondi circa (istante della rottura del campione). I picchi del tracciato VLF corrispondono a quelli del tracciato Audio. In realtà uno zoom mostrerebbe che questi picchi sono clusters di impulsi e la sincronia tra le emissioni non avviene a livello di forma d'onda ma dei soli episodi di emissione, come del resto già si può evincere a questa risoluzione.

Il ruolo della fratturazione sembra dunque fondamentale nel meccanismo fisico dell'emissione EM, qualunque esso sia. Inoltre i segnali radio a bassa frequenza si sono manifestati con due modalità caratteristiche: *Successioni Impulsive Ordinate* (SIO) e *Successioni Impulsive Disordinate* (SID). Eccone una sintetica descrizione:

- **Emissione SIO.** È caratterizzata da microimpulsi ad “alta frequenza” (VLF) che si susseguono quasi identici a intervalli regolari, a formare treni di ugual numero di impulsi a loro volta separati da intervalli regolari (Figura 12). Da questo punto di vista possono apparire simili a un segnale artificiale, tuttavia questa “regolarità” non è da intendere in senso rigido ma prevede una minima variabilità nella ripetizione. In uno spettrogramma il pattern di un segnale SIO compone una banda uniforme centrata sulla frequenza media degli impulsi. La variabilità nel periodo degli impulsi determina una larghezza di banda che a seconda dei casi può essere di circa 3, 4 o 5 kHz. La ripetizione regolare nella successione dei treni determina l'uniformità dell'emissione che si interrompe in modo brusco là dove cessa la ripetizione dei treni. Prendendo come unità il tempo necessario a portare a rottura il campione con un incremento di sforzo costante, la SIO si manifesta più spesso nella prima metà di questo periodo e può sovrapporsi all'insorgere della SID ma non permane mai fino alla rottura. Questa emissione non è osservabile sistematicamente e non trova corrispondenza nella radiazione meccanica che può percepire un microfono acustico posto a breve distanza dal campione.
- **Emissione SID.** È presente nel 100% dei casi ed è sistematicamente correlabile con l'emissione acustica. Presenta inoltre la caratteristica di iniziare con l'insorgere della *dilatanza*, poco prima del 50% del tempo necessario per arrivare alla rottura, e di evolversi

in crescendo fino a culminare in corrispondenza della rottura. Si tratta dell'emissione che abbiamo già visto nelle Figure 10 e 11. È una sequenza di singoli impulsi composti da tre semifasi che mostrano all'analisi spettrale l'andamento dello spettro di armoniche della semifase centrale (quella di maggiore ampiezza) sommata a quella delle altre due componenti cromatiche. Solitamente ha inizio dopo o durante la SIO e si protrae fino alla rottura dove culmina con una manifestazione parossistica. Gli impulsi sono distribuiti nel tempo in modo vario e disordinato seppur con la tendenza a raggrupparsi in clusters.

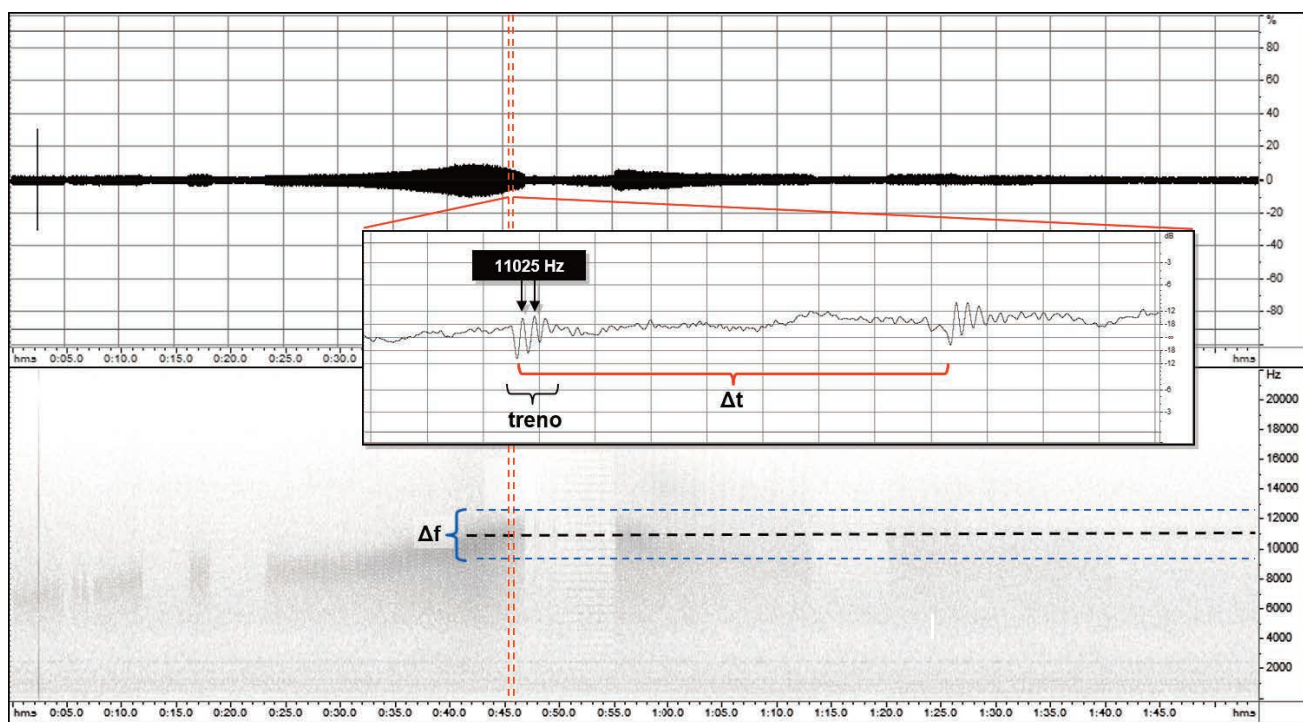


Figura 12 Emissione SIO. Oscillogramma (in alto) e spettrogramma (in basso) di una Successione Impulsiva Ordinata. Questo tipo di segnale è caratterizzato da una successione di un certo numero di impulsi della stessa frequenza e di ampiezza decrescente, che chiameremo “treno”. In questo caso (reale) il treno è composto da circa 4 impulsi (certamente di più ma si perdono nel rumore di fondo) dalla frequenza media di 11,025 kHz. Siamo in banda VLF. Lo zoom in primo piano mostra come questi treni di “n” impulsi si ripetano con un intervallo regolare, qui indicato come Δt . Questo intervallo non è risolto dallo spettrogramma che mostra una sorta di alone. Questo alone ha una certa estensione spettrale in cui la parte più densa è dovuta alla variabilità di ciascun impulso rispetto alla frequenza media di 11,025 kHz. In questo caso la larghezza di banda dei treni è di circa 3 kHz. Nella parte iniziale dello spettrogramma si vedono dei “vuoti” improvvisi che sono dovuti alla cessazione della ripetizione dei treni. Successivamente e fino all’istante ingrandito si osserva una lenta deriva* nella frequenza media che è anch’essa abbastanza tipica nell’emissione SIO. Osservando un breve intervallo di oscillazioni, come quello in primo piano, la regolarità di questo tipo di segnale potrebbe far pensare a un’origine artificiale. In realtà i treni di impulsi di un segnale SIO non sono mai sovrapponibili. Essi sono uguali tra loro come lo sono le foglie degli alberi: dalla forma particolare delle foglie si può riconoscere una specie arborea ma tuttavia, sovrapponendo due foglie prese dallo stesso albero, esse non risulteranno mai esattamente identiche. Questo aspetto è tipico in natura.

*In altri lavori, come [Mognaschi, 1997 e 1998] o [Eftaxias et al., 2007], una deriva nella frequenza dei segnali radio è stata osservata anche a grande scala di frequenza e di tempo. Può esserne questa la natura?

La corrispondenza con la radiazione acustica è sistematica e univoca e si manifesta solo a livello di clusters. Nel dettaglio ciascun impulso EM corrisponde ad una “scossa” meccanica. Non tutti gli eventi acustici trovano corrispondenza nel segnale EM. All’approssimarsi della rottura i cluster EM divengono più numerosi e intensi producendo una sequenza parossistica nell’imminenza della frattura con picchi massimi in corrispondenza della frattura stessa.

Nella seconda serie di esperimenti (tesi di dottorato, 2005) dei 42 campioni testati, 36 hanno manifestato emissioni EM con queste due modalità di emissione. I 6 campioni (circa il 14 %) che non hanno evidenziato segnali o non lo hanno fatto nel modo consueto furono in realtà prove tecnicamente mal riuscite per evidenti problemi pratici di varia natura³⁵. Dei 36 campioni positivi, il 100% ha manifestato l’emissione SID e solo il 50% anche l’emissione SIO, che però ha presentato sempre una intensità nettamente inferiore alla SID e spesso prossima al limite di visibilità. Nei casi negativi quindi non è da escludere che il fenomeno sia stato semplicemente perso. La Figura 13 schematizza l’insieme dell’emissione EM caratteristica di una prova di rottura uniassiale.

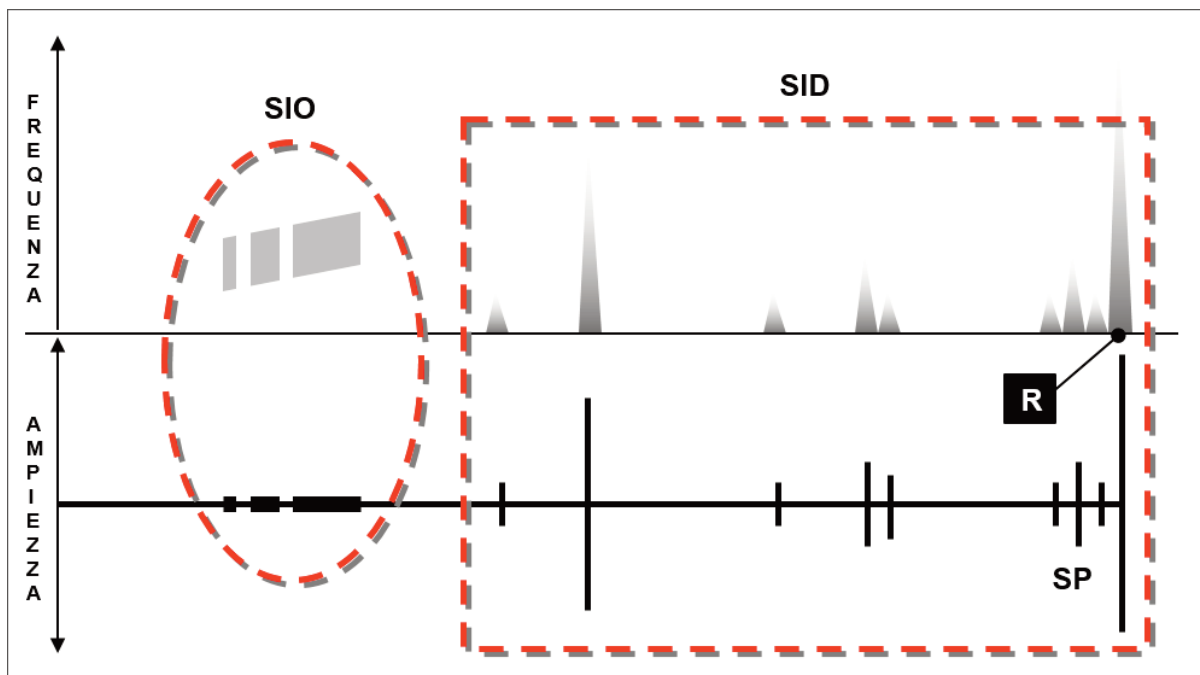


Figura 13 Rappresentazione schematica della dinamica dell’emissione VLF nelle prove uniassiali. Questo diagramma ideale confronta lo spettrogramma (in alto) e l’oscillogramma (in basso) di una tipica emissione EM nel corso di una prova uniassiale. Sull’asse X è rappresentato il tempo e sugli assi Y la frequenza (bande ULF-VLF) per lo spettrogramma e l’ampiezza per l’oscillogramma. La Successione Impulsiva Ordinata (SIO) si manifesta con bassissima intensità e una ristretta banda di frequenza nella prima metà della prova. Segue una Successione Impulsiva Disordinata (SID) che dura poco più della metà del tempo necessario per rompere il campione. Questa fase è concomitante con la dilatanza della roccia [vedi Nardi & Piersanti, 2021]. Gli impulsi SID, di differenti periodi e variamente distribuiti nel tempo, sono raggruppati in clusters (i picchi idealizzati nello schema). Un’emissione parossistica (SP) anticipa di poco la rottura (R).

³⁵ Es. difetto di parallelismo nelle facce su cui si applica la forza o fratturazione preesistente. Per lo più furono le prove tecniche eseguite su campioni mal tagliati per non sprecare i campioni buoni. Se la prova in qualche modo riusciva, pur applicando una sollecitazione “a morsa” anziché assiale, del segnale EM compariva comunque in corrispondenza delle fratture, pur senza seguire lo stile tipico della Figura 13.

1.3.2 Osservazioni in cava

Un monitoraggio del fenomeno su scala molto maggiore rispetto a quella in laboratorio si è potuto realizzare grazie all'attività estrattiva di una cava di *Calcare Massiccio* presso lo stabilimento Buzzi-Unicem di Guidonia (RM). L'abbattimento di un fronte mediante volate di mine produce sul versante lapideo l'effetto analogo all'asportazione istantanea di un muro di contenimento di dimensioni 30(l) x 10(h) x 4(p) metri. Questo evento induce la massa rocciosa rimasta in posto a trovare un nuovo stato di equilibrio tensionale. In laboratorio lo sforzo era compressivo, qui invece è distensivo ma produce ugualmente una microfratturazione fino al raggiungimento di un equilibrio attraverso macrofratture di assestamento. Anche in queste condizioni meccaniche si è potuta osservare un'emissione sistematica nelle basse frequenze radio (ULF-VLF, con la stessa sensoristica) legata a micro e macro fratturazione e con una modalità caratteristica analoga a quella osservata in laboratorio. Una sequenza di emissioni impulsive si è ripetuta con la stessa dinamica in tutte le 8 prove eseguite. In questa dinamica (Figura 14) si può sempre riconoscere un episodio caratterizzato da impulsi quasi identici ed equidistanziati seguito da un episodio di impulsi differenti, più intensi e distribuiti caoticamente.

1.4 Osservazioni di segnali di possibile origine crostale

Senza alcuna pretesa di voler definire qui la caratterizzazione di un ipotetico precursore EM ma solo a titolo di esempio di ciò che si può osservare nel monitoraggio in aria, verranno presentati ora alcuni segnali "sospetti" rilevati nella gamma ULF-VLF. I primi tre casi sono stati registrati nell'arco dei tre anni di esercizio di una prima piccola rete sperimentale di 3 stazioni [Nardi et al., 2007]. Nel periodo 2003-2005 sono stati gli unici episodi compatibili con i pattern osservati in laboratorio ed hanno rivelato tutti una vicinanza cronologica con terremoti regionali di magnitudo significativa (Tabella 2; Figure 15 e 16). Naturalmente tre episodi non costituiscono una casistica sufficiente a provare un legame rigoroso con il terremoto. Tuttavia è una circostanza degna di attenzione il fatto che in tutti i casi si abbia un riscontro positivo rispetto a un sisma di magnitudo non trascurabile e quindi statisticamente inattesa. Ciò tende anche a rafforzare l'ipotesi della soglia di magnitudo avanzata con il grafico della Figura 3. Inoltre va evidenziato che l'analisi a posteriori ha rilevato che alla sorgente del pattern c'erano effettivamente dei treni di impulsi. La Figura 17 evidenzia le analogie di scala tra questi treni e quelli dei segnali SIO osservati in laboratorio. Sembra esserci un'analogia a livello dei microimpulsi e un'analogia a scala maggiore nella durata dell'emissione.

In questa campagna fu impiegata un'antenna elettrica attiva del tipo che verrà mostrato nella Figura 28, il cui principio di funzionamento è analogo a quello che verrà descritto nel paragrafo 2.1. Malgrado le stazioni automatiche di allora fossero di livello tecnologico inferiore, si tratta dello stesso tipo di risultati che si possono ottenere con la configurazione hardware e software che viene descritta in questo manuale.

Di segnali simili ne sono stati poi osservati altri, ma in particolare è interessante esaminare il caso registrato a Serramazzone (Modena) che il 30.09.2012 anticipò di circa tre giorni il sisma di magnitudo 4.5 del 03.10.2012 presso Piacenza. In questo caso (Figura 18) sembra essersi manifestata una ricorrenza di treni su due diverse scale temporali, la più piccola delle quali è compatibile con i segnali SIO. Se si considera anche l'osservazione della Figura 17a, verrebbe da immaginare che questo tipo di emissione possa avere un carattere di ricorrenza di tipo quasi frattale. Osservazioni simili risultanti da studi indipendenti si trovano anche in letteratura: ad esempio [Asada et al., 2001] conferma anticipi di 1~4 gg. su sismi di Magnitudo 4~6 rilevati in banda (1÷10 kHz) dall'osservazione di anomalie impulsive. Tuttavia quelli qui esposti sono solo alcuni aspetti di ciò che si può osservare da un monitoraggio continuo. Non è da escludere che esistano

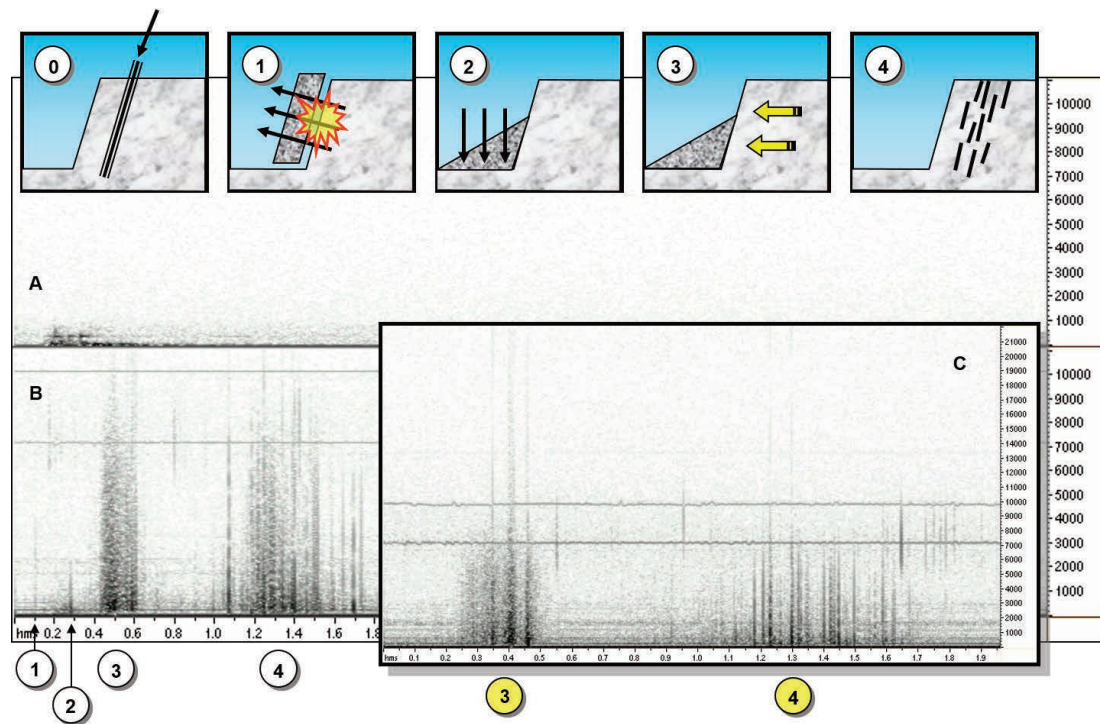


Figura 14 Segnale VLF in cava. Gli esperimenti condotti in cava di “calcare massiccio” sono relativi ad 8 episodi in ciascuno dei quali un fronte largo 30 m di una scarpata alta 10 m (nelle caselle in alto è visto di in sezione) è stato fatto crollare con il brillamento di mine in volata. La casella (0) mostra il profilo della scarpata e il primo di una fila di pozzi allineati parallelamente a 4 m di distanza dall’orlo della scarpata (che nella sezione si coprono a vicenda). L’abbattimento del fronte di cava avviene con il brillamento di microcariche “in volata”, ovvero in rapida successione. Un apposito sistema di ritardo tra le microcariche fa sì che la volata proceda linearmente all’interno di ciascun pozzo e successivamente di pozzo in pozzo. L’effetto che produce sul fronte lapideo è analogo all’affondamento della lama di un coltello, ottenendo la massima precisione con la minima energia (casella 1). Dal punto di vista geotecnico è come se la roccia rimasta in posto fosse stata liberata istantaneamente da un “muro di contenimento”. In questa condizione dovrà trovare un nuovo equilibrio tensionale in regime di sforzo distensivo. È in questa circostanza che abbiamo la naturale emissione elettromagnetica. Le sequenze di emissione impulsiva sono ancora una volta tutte simili tra loro. Ne vediamo un esempio nello schema di sfondo: lo spettrogramma (B) mostra il segnale EM che è stato confrontato con l’onda di pressione (A) registrata nell’aria. I tempi sono espressi in secondi e le frequenze in Hz. Le caselle sovrainpresse in alto mostrano la sequenza cinematica di abbattimento suddivisa in 5 fasi che possiamo correlare passo-passo all’evoluzione dell’emissione elettromagnetica marcata sugli spettrogrammi: (0) L’esplosivo è disposto in pozzi leggermente inclinati e perforati in fila seguendo l’andamento della scarpata. Le cariche esploderanno in successione (volata) dal basso verso l’alto e dal primo pozzo all’ultimo. L’immagine mostra la scarpata in sezione. (1) La volata brilla asportando un volume di roccia in modo pressoché istantaneo. L’emissione EM mostra un singolo impulso in corrispondenza dell’esplosione. Lo spettrogramma infatti non risolve la volata dal punto di vista EM (in basso) mentre il fronte dell’onda d’urto nell’aria (in alto) più lenta, giunge poco dopo e porta dietro di sé tutto il rumore del crollo. (2) Il volume di roccia già frammentato precipita al suolo. L’onda di pressione mostra una sequenza unica prodotta da esplosione e crollo. L’emissione EM è modesta o talvolta, come in questo caso, mostra un picco associabile ad eventuali grossi blocchi di roccia che si rompono ancora con lo schianto al suolo. (3) La roccia rimasta in posto cerca ora di recuperare un nuovo equilibrio statico ma è inizialmente in un uno stato tensionale distensivo che provoca microfratturazione diffusa. In questa fase non si registrano più onde di pressione ma si manifesta un’emissione EM caratterizzata da una fitta sequenza di impulsi piuttosto simili e regolari. (4) La massa rocciosa in posto trova un nuovo equilibrio attraverso la distensione. Di fatto l’assestamento avviene attraverso una macrofratturazione che sarà visibile anche in superficie. In questa fase si registra un’emissione EM caratterizzata da impulsi tutti differenti e variamente distribuiti nel tempo. Il riquadro (C) sovrainpresso in basso a destra evidenzia le ultime fasi (3) e (4) registrate nel corso di un altro episodio dello stesso tipo. Di fatto tutte le 8 prove hanno mostrato questa stessa dinamica.

altre caratteristiche osservabili su altre bande o con altri tipi di analisi. Per assolvere pienamente alla funzione didattica di questa guida va fatta ora una considerazione finale importantissima. Ogni singolo caso che abbiamo considerato in questo paragrafo, pur trovando corrispondenza nel terremoto, non è di per sé il precursore del terremoto. È la *casistica* a fare il precursore. Un'ampia e coerente casistica può caratterizzare una fenomenologia evidenziandola come "precursore" del terremoto. Ecco il perché della mia premessa. Ciò che bisogna imparare a fare è raccogliere e condividere osservazioni affinché l'intera comunità scientifica³⁶ possa di conseguenza riconoscere (oppure no) un precursore in quella casistica³⁷.

Epicentro	Data	Mg	Stazione ricevente	Distanza (Km)	Anticipo	
					hh	= gg
Appennino emiliano	14/09/03	5.0	Cascia (PG)	200	106	4,4
A largo costa calabro W	03/03/04	4.6	Frascati (RM)	270	62	2,6
Mare a largo di Anzio	22/08/05	4.5	Cascia (PG)	150	89	3,7

Tabella 2 Eventi sismici associabili a segnali SIO. I dati relativi al monitoraggio ULF-VLF di tre stazioni automatiche nel periodo tra agosto 2003 e settembre 2005 evidenziarono soltanto tre casi compatibili con i segnali SIO. Tutti risultano associabili a terremoti di magnitudo ≥ 4.5 manifestatisi a distanza di pochi giorni.

La media degli anticipi è stata di 86 ore, equivalenti a 3,6 giorni [Nardi et al., 2007].

1.5 Ipotesi sulla sorgente EM

Dalle prove di rottura è emerso che il ruolo della fratturazione sembra essere fondamentale nell'emissione elettromagnetica. La sorgente sembra risiedere nella pura e semplice microfratturazione più che nella varietà mineralogica che compone la roccia. Per sondare più profondamente questo aspetto alcuni esperimenti furono condotti su campioni mantenuti in stato di saturazione³⁸ di liquidi durante le prove di rottura con lo scopo scoprire qualcosa di più sulla sorgente studiando in che modo l'emissione EM poteva essere inibita [Nardi, tesi di dottorato, 2005; Nardi & Caputo, 2009]. In questa circostanza si è osservato che la saturazione in acqua dolce (normale acqua di rubinetto) produce una sensibile riduzione nella quantità di impulsi SID. La saturazione in acqua salata (soluzione di 1 kg di sale marino da cucina per 5 litri d'acqua) ha prodotto la quasi totale scomparsa di emissioni SID, tranne che nella sequenza parossistica dove al posto degli impulsi di maggiore intensità (rottura compresa) sono apparsi impulsi tendenzialmente monocromatici centrati su frequenze variabili da caso a caso intorno ai 2,4 kHz. Per quanto riguarda l'emissione SIO, la sua presenza non sembra essere influenzata dall'acqua

³⁶ Nel caso specifico la commissione internazionale IASPEI.

³⁷ Non è dunque il singolo ricercatore né la singola osservazione a proclamare l'esistenza di un precursore. Ancor meno l'osservazione di un fenomeno in prima analisi associato al sisma conferisce successivamente una "facoltà" di prevedere qualcosa. Né addirittura l'osservazione di un fenomeno precursore conclamato (es. legato al gas radon) conferisce un "diritto" o addirittura l'obbligo di proclamare una previsione, come molti pensano, ignorando il significato operativo di previsione e quello di precursore. Infatti anche nel caso di un precursore ufficiale (e nel nostro caso non lo è) un precursore di per sé è soltanto un "fenomeno associato al sisma", non una chiave di previsione. La "previsione" è qualcosa di ben definito che è molto lontano dal semplice concetto di precursore, come è ampiamente spiegato nel volumetto sui precursori [Nardi & Piersanti, 2021] di cui ancora una volta si consiglia la lettura prima di affrontare gli argomenti di questa guida.

³⁸ Un test in condizioni *sature* implica che i campioni siano stati tenuti in immersione nel fluido per almeno 24 ore per favorire la saturazione naturale delle fratture preesistenti (solitamente molto superficiale) e che la prova stessa sia effettuata mantenendo lo stato di immersione per favorire la permeazione del fluido all'interno del campione durante la fratturazione.

malgrado la sua intensità piuttosto bassa rispetto alla SID. In base al processo meccanico di fratturazione atteso nella rottura uniassiale (vedi paragrafo *Dilatanza* in [Nardi & Piersanti, 2021]) questo comportamento contrastante dell'influenza dell'acqua sull'emissione EM risulta coerente con una localizzazione della sorgente nella fratturazione. Ulteriori esperimenti sull'attenuazione di un segnale artificiale in questi fluidi e nelle condizioni sperimentali hanno verificato un'influenza dell'acqua coerente con le aspettative teoriche e trascurabile rispetto agli effetti osservati. Queste osservazioni rafforzano l'ipotesi che l'emissione possa avere origine dalle fratture e che sia associata alla microfratturazione indifferenziata per quanto riguarda la SIO (Figura 19) e all'evoluzione delle fratture fino alla rottura del campione (accrescimento e fusione) per la SID (Figura 20). Soltanto nel secondo caso infatti, grazie alla fusione di microfratture in strutture più grandi e articolate, l'acqua può penetrare all'interno del campione ed interagire con la sorgente. Tutto ciò è conforme alla teoria della *dilatanza* [Scholz, 1973] e in particolare si manifesta con modi e tempi compatibili con il modello di *dilatanza estesa* descritto in [Nardi & Piersanti, 2021]. Per il fenomeno fisico alla sorgente dell'emissione, per il momento non esiste una teoria consolidata. Avendo osservato che la sorgente sembra indipendente dalla composizione mineralogica, nella tesi di dottorato è stata ipotizzata l'oscillazione meccanica di cariche elettriche prodotte dalla rottura del reticolo cristallino (esoelettroni), come illustrato negli schemi delle Figure 19 e 20 in conformità a quanto osservato nelle prove uniassiali in saturazione.

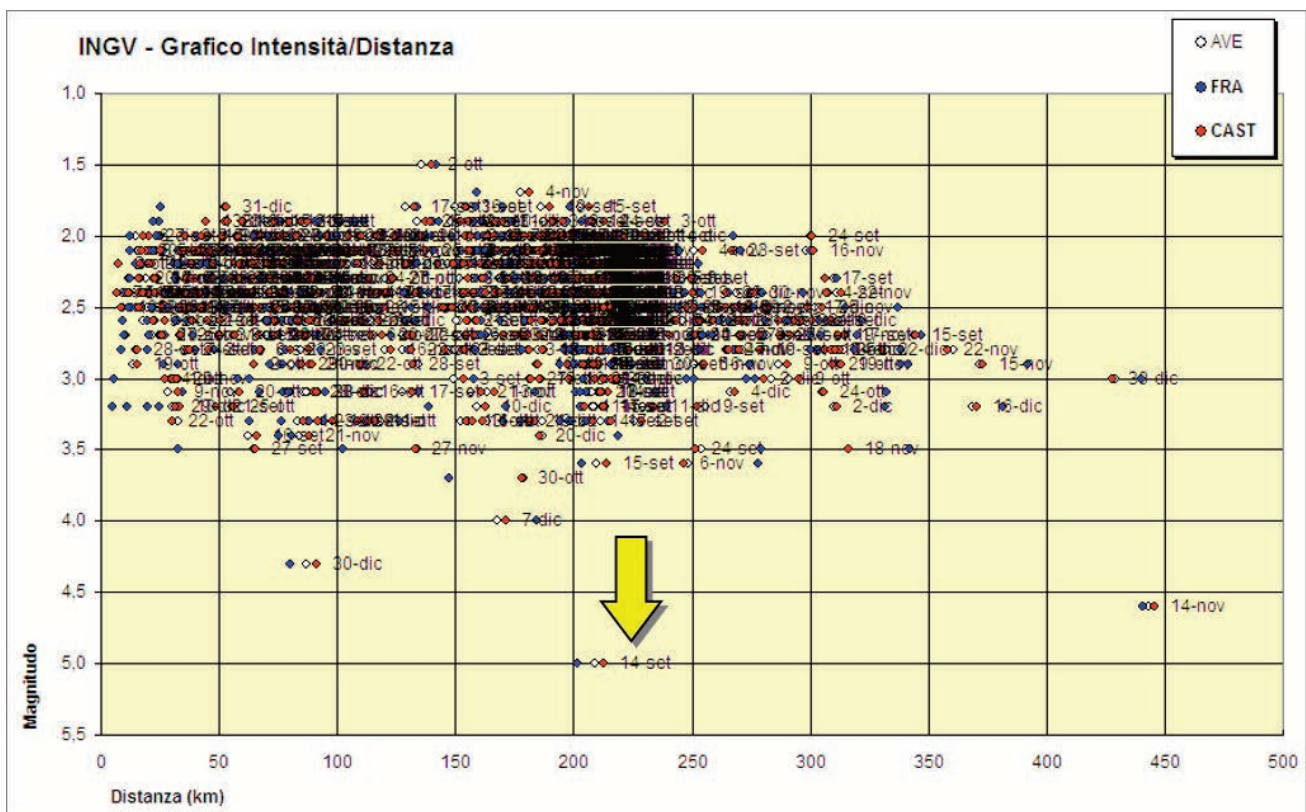


Figura 15 Evento del 14.09.2003. Questo grafico mostra gli eventi sismici che si sono manifestati nel 2003 (dati INGV) distribuiti per magnitudo e distanza dalle tre stazioni VLF allora in funzione. Ogni evento è localizzato da tre punti di differente colore per indicare le rispettive distanze dalle tre stazioni VLF. Per bassi valori di magnitudo, in accordo con la legge di G-R, la nuvola risulta più densa di eventi sismici. Appare invece nettamente isolato l'evento del 14 settembre 2003 (freccia), in relazione al quale fu osservato un segnale compatibile al modello SIO dalla stazione "AVE" (bianco). Non soltanto al segnale ha fatto seguito questo evento, ma l'evento è chiaramente il più energetico tra i più vicini, ovvero quello che ragionevolmente avrebbe avuto la migliore condizione per essere osservato.

Riguardo la generazione degli *esoelettroni* o altri possibili modelli di emissione, si rimanda al testo [Fidani, 2005].

Ricordiamo infine, in base ai dati raccolti in letteratura (Tabella 1), che nell'ambiente naturale i possibili casi di emissioni EM associate al terremoto sembrano riguardare soltanto eventi di magnitudo compresa tra 4 e 8 (Figure 3 e 4). Questa osservazione lascia supporre che il fenomeno di emissione EM sia caratterizzato in natura da una soglia minima di energia che il sisma deve avere affinché il segnale possa essere generato (o altrimenti di una soglia necessaria affinché possa raggiungere la superficie).

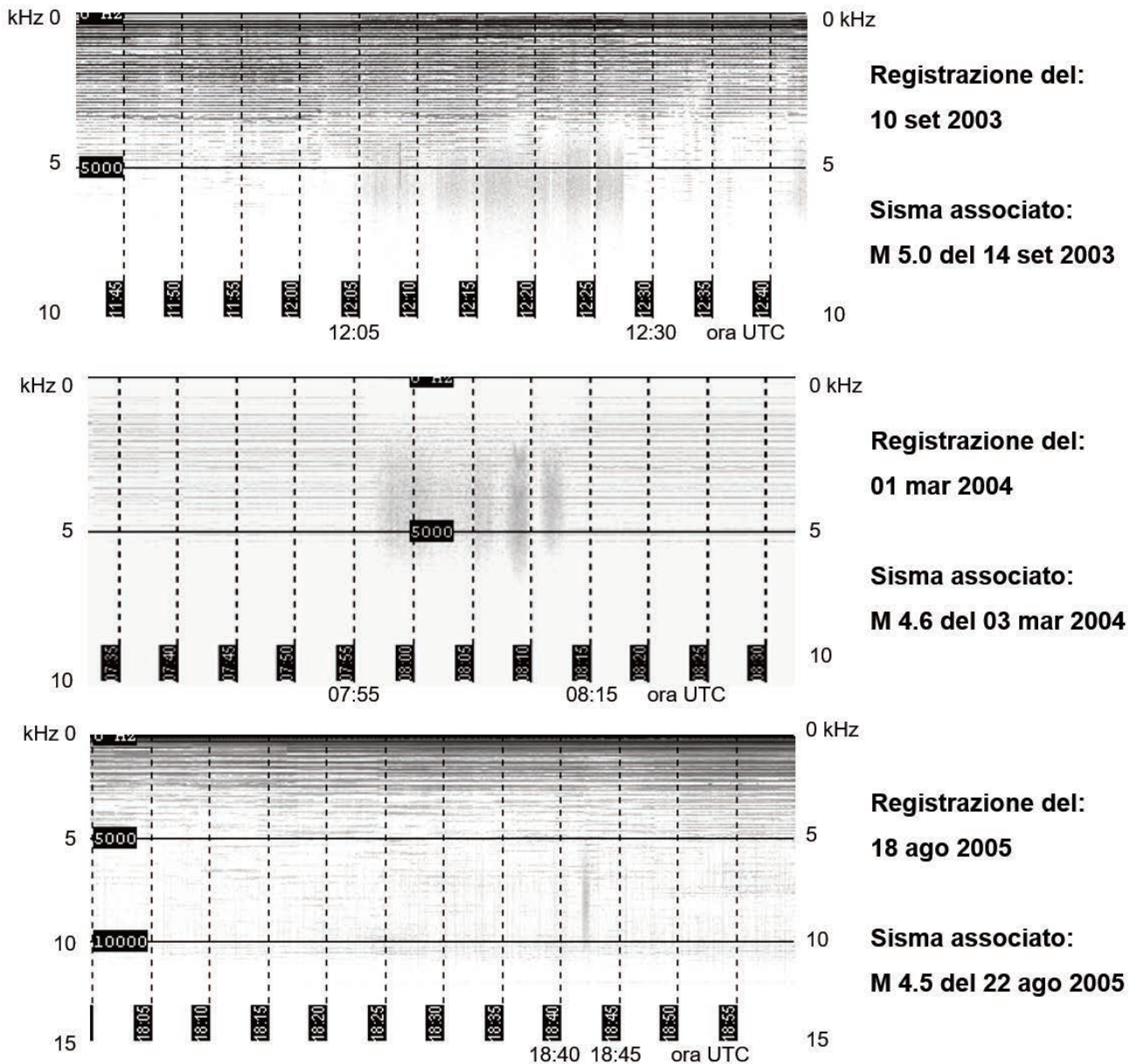


Figura 16 Pattern compatibili con i segnali SIO. Gli spettrogrammi registrati automaticamente dalle stazioni VLF relativi ai tre eventi della Tabella 2. Le scale delle frequenze sono invertite (zero in alto). Il setting dell'analisi automatica era configurato appositamente per evidenziare segnali di tipo SIO a scapito di eventi impulsivi come i fulmini e gli "spherics", che infatti non sono visibili negli spettrogrammi. Malgrado la forte presenza di rumore antropico, un filtraggio del rumore di fondo eseguito a posteriori rivelò la sola presenza del pattern di tipo SIO [Nardi et al., 2007].

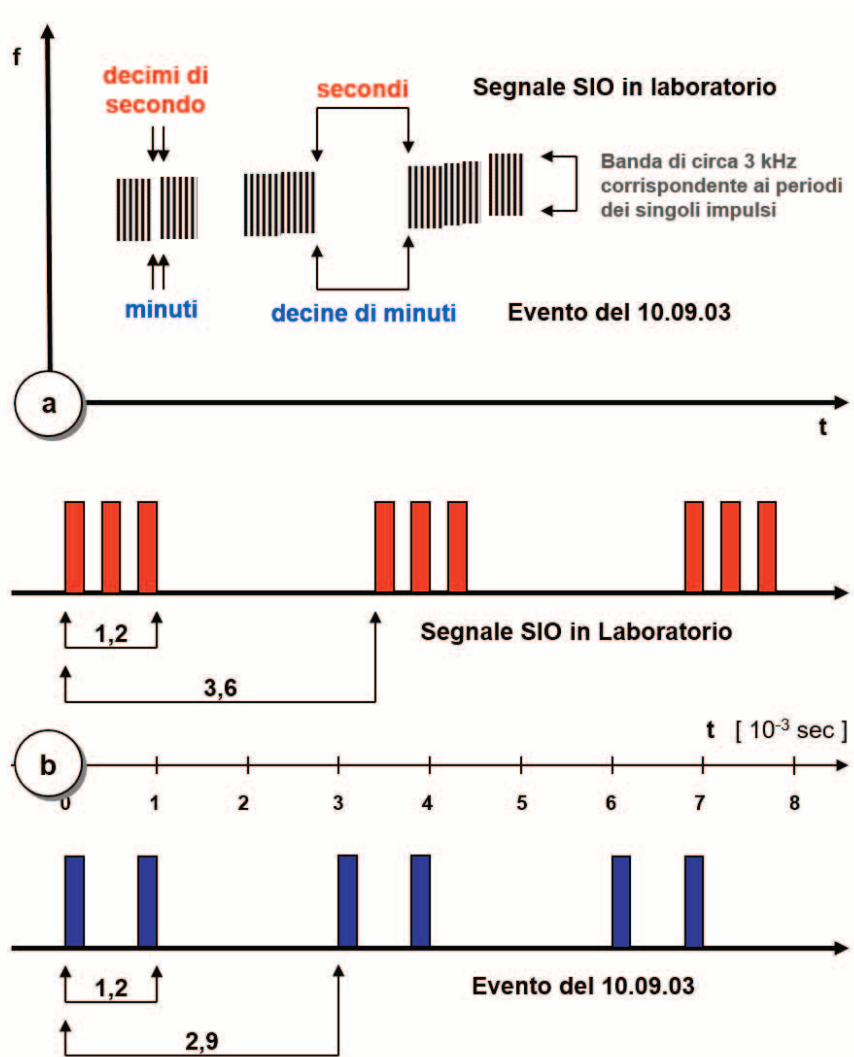


Figura 17 Confronto tra i treni di un segnale SIO e di un pattern “compatibile” associato al terremoto. (a) Schematizzazione della tipologia di un segnale SIO osservato dall’emissione di campioni di roccia in laboratorio (in alto) a confronto con il segnale registrato in aria il 10.09.2003. A grande scala, cioè osservando lo spettrogramma, senza entrare nei dettagli della forma d’onda che produce questa impronta, la differenza sembra essere nella scala temporale. Si ha un pattern a “banda” con larghezza di circa 3 kHz che può presentare alcune drastiche interruzioni e una lieve deriva. La durata dell’emissione e delle interruzioni è dell’ordine dei secondi nei segnali registrati in laboratorio (dove l’intera prova di rottura dura pochi minuti) e dell’ordine delle decine di minuti nei segnali registrati in atmosfera. In entrambi i casi le interruzioni più brevi possono scendere di un solo ordine di grandezza. (b) Osservando nel dettaglio il segnale che ha originato questo pattern, in entrambi i casi si tratta di treni di “n” impulsi separati da un tempo “t”. Confrontando un tipico segnale osservato in laboratorio con l’evento del 10.09.2003 si osserva che anche se cambia in numero degli impulsi, la durata e la separazione dei treni resta pressoché la stessa. Va ricordato che anche all’interno dello stesso fenomeno queste caratteristiche non sono realmente costanti ma subiscono nel tempo una lieve variabilità, tale da far sì che anche se ogni treno presenta sempre lo stesso numero di impulsi (quelli che si possono chiaramente contare al di sopra del rumore di fondo. Qui vediamo solo una schematizzazione) i treni non sono mai perfettamente sovrapponibili. A cambiare lievemente intorno a un valore medio è soprattutto il periodo del singolo impulso. Questa variazione sembra essere la causa della larghezza di banda nell’impronta spettrale e l’eventuale lenta variazione della frequenza media produce quelle derive che talvolta si osservano negli spettrogrammi. Come è stato già osservato (vedi Figura 11) i treni di impulsi di un segnale SIO non sono mai sovrapponibili ma si presentano simili allo stesso modo in cui possono esserlo le foglie di uno stesso albero. Inoltre il fenomeno sembra presentare similitudini con variazione di scala. Queste caratteristiche sono tipiche dei fenomeni della natura e potrebbero forse rappresentare una chiave di interpretazione per distinguere un segnale SIO da un segnale periodico di origine artificiale.

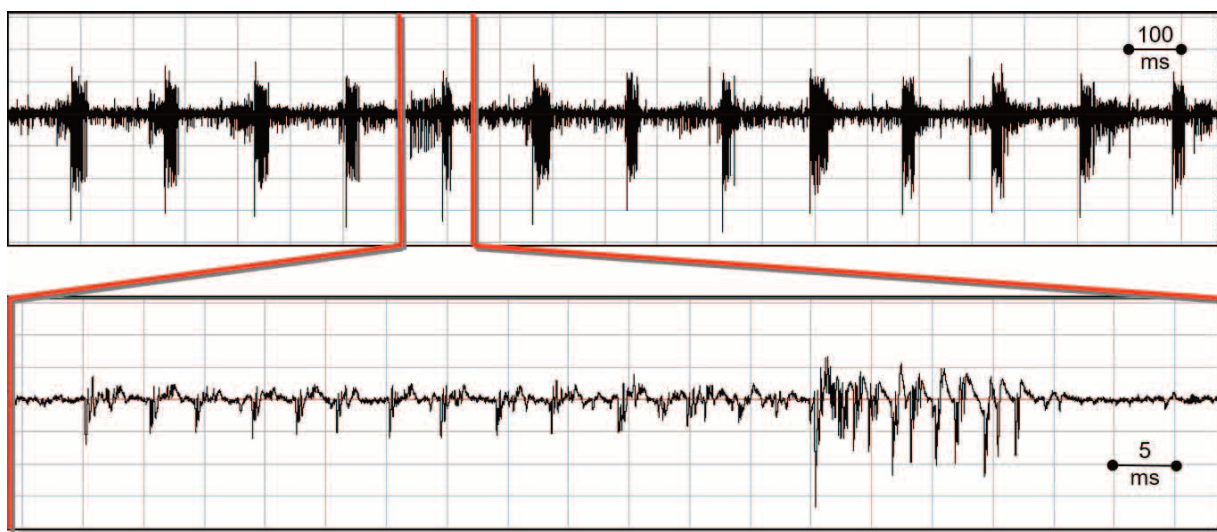


Figura 18 Segnale “di Serramazzone”. Questo segnale è stato registrato in provincia di Modena da una stazione INGV ospitata presso la stazione radioamatoriale iz4tvd di Carlo Torri. La figura mostra come una struttura a treni di impulsi si è presentata su due scale di grandezza differenti, la più piccola delle quali (zoom tra i bordi rossi) aveva un periodo di 4 ms, compatibilmente con i segnali SIO, sia pure presentando sistematicamente una variante al termine della sequenza. Questa variante tuttavia era la parte più consistente dei treni che si ripetevano alla scala maggiore. Questo fenomeno “sospetto” è stato osservato presso Modena il 30.09.2012 e il 03.10.2012 si manifestò presso Piacenza un terremoto di magnitudo 4.5. La distanza spaziale in questa ipotetica associazione è di circa 100 km, mentre la distanza temporale è stata di circa 3 giorni.

2.0 Monitoraggio elettromagnetico a bassa frequenza

Vorrei introdurre l'argomento con una divagazione storica. Nel 1895 Guglielmo Marconi compì quel famoso esperimento di trasmissione oltre la collina di Pontecchio che segnò la nascita della radio. Senza entrare nel merito della discussione sulla paternità della radio, possiamo serenamente considerare che l'idea di utilizzare come veicolo di comunicazione telegrafica le onde ipotizzate matematicamente da Maxwell nel 1864 e osservate sperimentalmente da Hertz nel 1888, in quel 1895 era già entrata nella testa di molti. Ciò che mancava era il modo di realizzarla concretamente. Marconi ebbe prima degli altri, se non l'idea, certamente l'equipaggiamento tecnico per riuscirci. Introdusse un terminale aereo in opposizione a un terminale a terra, sistema che chiamò *antenna*, e impiegò un ricevitore sufficientemente sensibile. L'elemento chiave del ricevitore di allora era il *coherer* del tipo perfezionato da Branly (1890). Marconi però ne realizzò una sua versione particolarmente sensibile, frutto della propria estenuante e caparbia sperimentazione. Fu questo determinare la riuscita del primo collegamento radio. Ma quale “sperimentazione” poteva aver fatto Marconi, visto che la radio non era stata ancora inventata? Ciò che Marconi ascoltava nelle sue prove di ricezione non era la radio ma un campanello elettrico che segnalava la reazione del coherer alla radiazione EM dei fulmini. Quella stessa radiazione naturale che costituisce il rumore di fondo della banda VLF. Il coherer a quel tempo era comunemente usato per monitorare l'avvicinamento dei temporali e quindi isolare in tempo le linee aeree telegrafiche o telefoniche. Sta di fatto che l'invenzione della radio - a chiunque la si voglia attribuire - nasce in quegli anni perché deriva dai primi sistematici monitoraggi EM ambientali in banda VLF.³⁹

³⁹ Va puntualizzato che il coherer è sensibile allo spettro radio senza una particolare preferenza. È la radiazione EM dei fulmini che deriva in massima parte dalle basse bande radio.

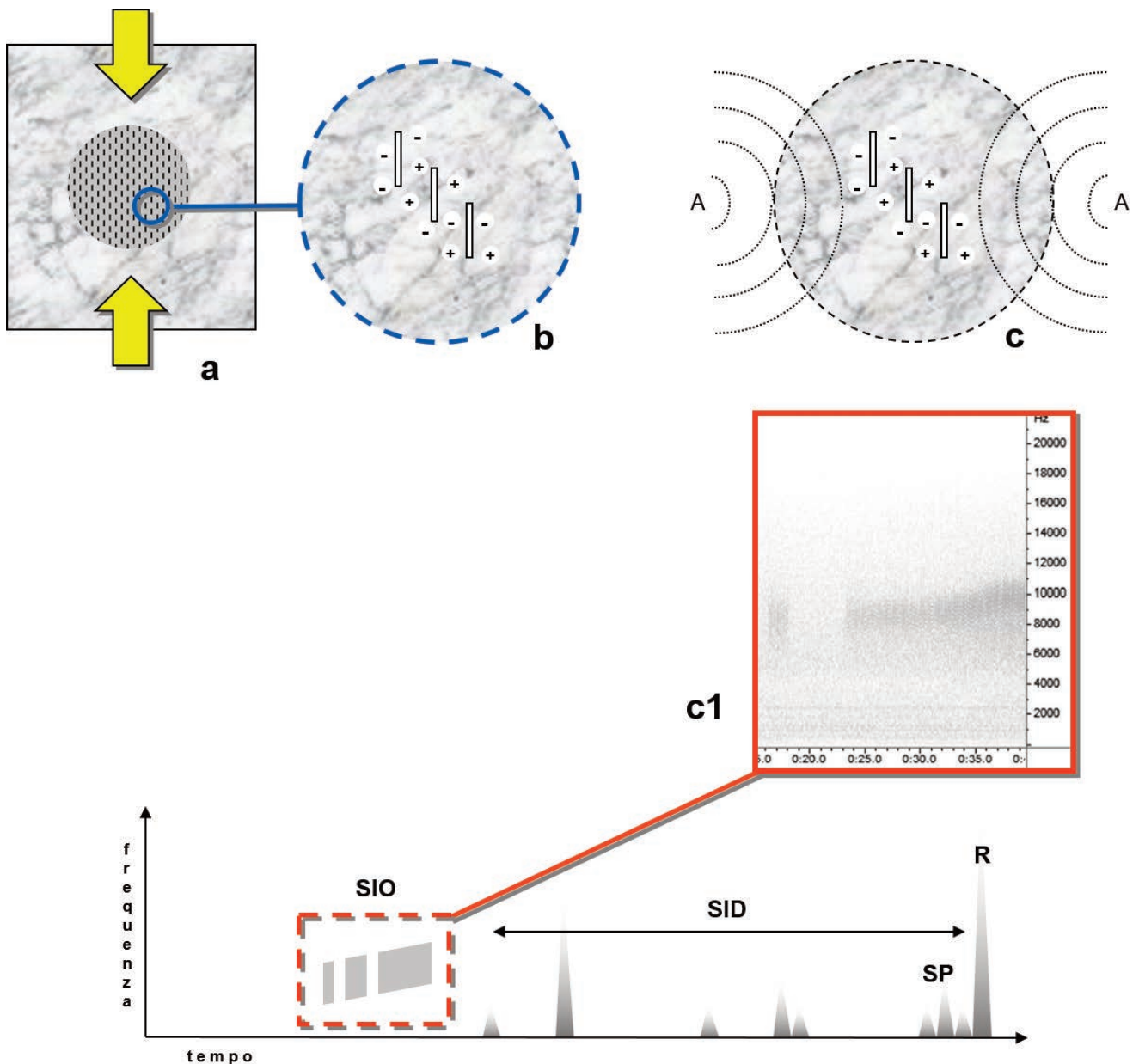


Figura 19 Ipotesi sulla localizzazione della sorgente SIO. Nelle prove uniaxiali in condizioni saturate l'emissione SIO sembra presentarsi in modo indisturbato, sia in acqua dolce che di acqua salata. L'emissione SIO si manifesta prevalentemente nella fase iniziale della prova di compressione (schema in basso, analogo alla Figura 12). In questa fase del processo di fratturazione della roccia (vedi il paragrafo "Dilatanza" in [Nardi & Piersanti, 2021]) ci si aspetta che nel campione si stia già generando una microfratturazione. Si tratta della nucleazione delle microfratture primordiali a diffusione isotropica (a) che solo successivamente si fonderanno a formare fratture più grandi organizzate in direzioni preferenziali. È quindi ragionevole aspettarsi che se l'emissione EM si genera dalle fratture in questa fase di porosità non permeabile essa non risentirà della presenza del liquido. Riguardo al meccanismo fisico di emissione dall'esperimento non emergono elementi risolutivi ma possiamo formulare un'ipotesi. Supponiamo che con la rottura del reticolo la dislocazione di cariche nella struttura cristallina abbia generato dei potenziali elettrici (esoelettroni) che restano intrappolati nella massa lapidea, in quanto materiale dielettrico (b). L'apertura continua delle numerose microfratture circostanti causa una radiazione acustica ad alta frequenza che investe le cariche disseminate tra le fratture stesse provocandone meccanicamente l'oscillazione. Potrebbe essere questa oscillazione a generare impulsi di radiazione EM in banda VLF con una regolarità dovuta alle dimensioni geometriche pressoché identiche delle microfratture primordiali e alla regolarità del tasso di fratturazione.

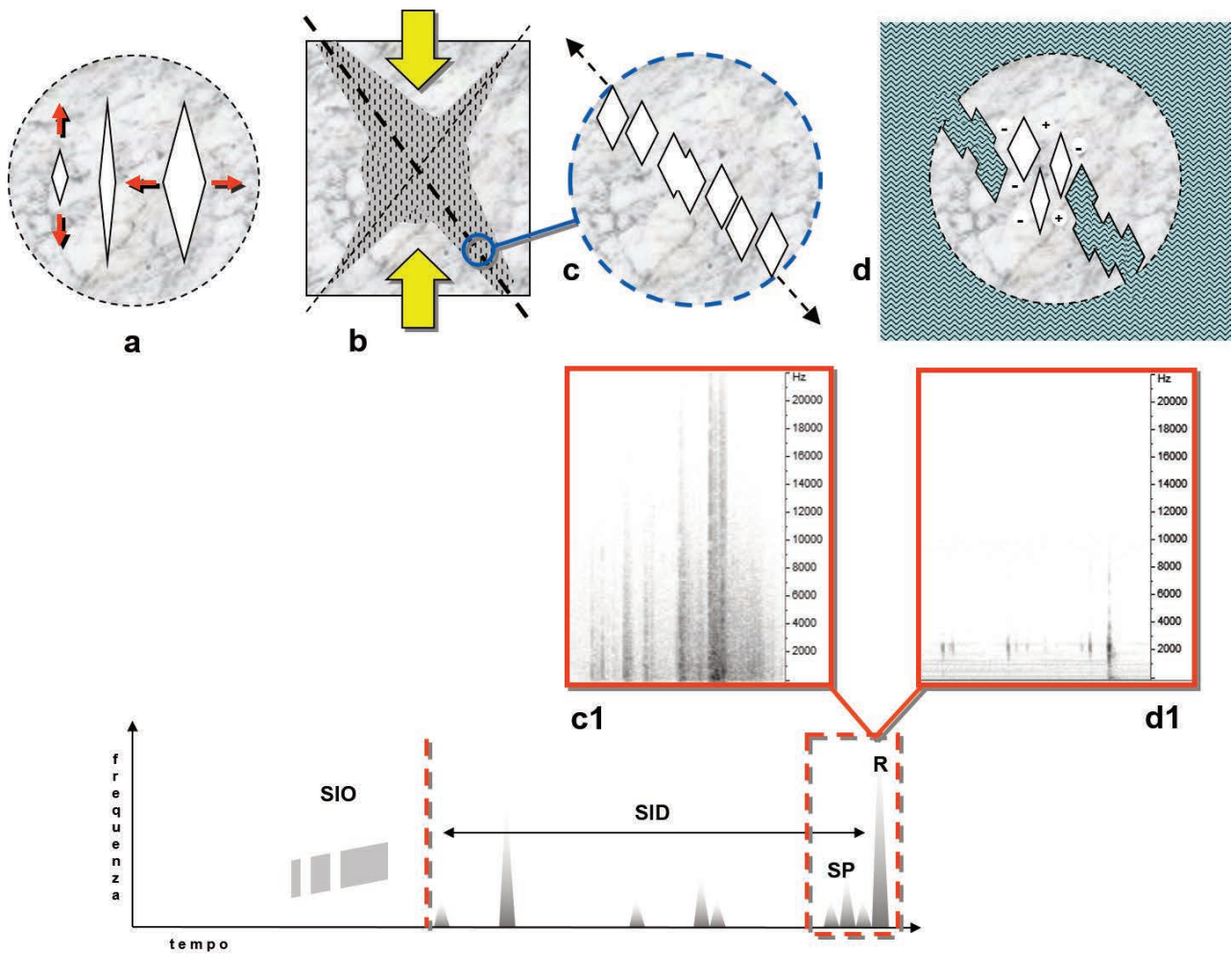


Figura 20 Ipotesi sulla localizzazione della sorgente SID. Sempre in base alla teoria legata alla meccanica della rottura uniassiale [Nardi & Piersanti, 2021] con l'avanzamento del processo di fratturazione, le microfrazture si accrescono allungandosi nella direzione di massimo sforzo e si allargandosi nella direzione perpendicolare formando dei vuoti (a). Questa fase di "dilatanza" del campione dura solitamente poco più del 50% del tempo necessario per portare il campione alla rottura (limiti rossi nello spettrogramma in basso) e corrisponde con l'insorgenza della radiazione SID, che risulta quindi localizzabile nelle fratture di accrescimento. L'accrescimento avviene anche per fusione delle fratture e ciò avvia un processo di ulteriore crescita ed "organizzazione" geometrica lungo una direzione preferenziale che dipende dalla geometria dello sforzo applicato. Nel caso uniassiale si avranno (in sezione) due direzioni preferenziali con angolo di 60° rispetto all'orizzonte (b). Lungo queste direttrici le fratture si fonderanno progressivamente fino a formare una superficie di scorrimento (c). Quest'ultimo processo è probabilmente ciò che osserviamo nell'emissione parossistica (c1). Nei campioni testati in saturazione la fusione delle fratture crea una porosità che richiama il liquido all'interno dei vuoti, in conformità con quanto previsto dalla "teoria della dilatanza" (vedere ancora teoria e bibliografia al paragrafo Dilatanza di [Nardi & Piersanti, 2021]). In saturazione di acqua dolce si è osservata una minore attività SID in proporzione all'emissione acustica. In saturazione di acqua salata invece l'emissione SID è quasi totalmente scomparsa o sostituita, nella fase parossistica, da un'emissione tendenzialmente monocromatica (d1). Questo sembra in accordo con l'ipotesi che la SID provenga dalla fase di accrescimento delle microfrazture e che la sorgente sia di natura elettrica, in quanto l'acqua salata può aver inibito l'emissione cortocircuitando le differenze di potenziale tra i lembi delle fratture (d). L'emissione monocromatica potrebbe essere generata dalle sole fratture non raggiunte dal liquido inibitore, cioè da fratture "primitive" lontane dalla regione che darà luogo allo scivolamento (un esempio al centro della Figura d). Questa ipotesi potrà essere verificata dai teorici in quanto il picco di 2,4 kHz che caratterizza questi segnali potrebbe essere riconducibile alla risonanza della dimensione primitiva dei crack.

Ma c'è anche un secondo preludio storico. Nella Prima guerra mondiale, terribile guerra di trincea, erano i telefoni da campo a diffondere gli ordini lungo tutta la "prima linea" di combattimento. Presto gli eserciti si accorsero che stendendo dei lunghissimi cavi (la propria linea telefonica) parallelamente alla linea di fuoco era talvolta possibile, per induzione elettromagnetica, captare gli ordini telefonici del nemico. Siamo evidentemente in banda VLF. Addirittura pare che gli inglesi nel 1915 dovettero sviluppare un particolare sistema di disturbo nella presa di terra dei telefoni da campo per impedire ai tedeschi di intercettarli con un sistema di amplificazione a valvole che avevano appositamente studiato⁴⁰. Ma a disturbare anche la normale ricezione della linea telefonica di servizio c'era già un fastidioso crepitio senza fine. Era ancora una volta il rumore di fondo naturale della banda VLF.

Da queste due storielle si possono già trarre gli obiettivi tecnici necessari al monitoraggio VLF: si tratta di captare via radio delle frequenze acustiche in uno scenario naturale dominato dai fulmini, applicando con continua e caparbia sperimentazione qualunque cosa la tecnologia ci possa offrire in questo momento.

2.1 Le bande radio a bassa frequenza

È necessaria una premessa sulla nomenclatura delle bande radio, perché spesso si fa confusione proprio tra quelle più basse, essendo poco usate e quasi dimenticate. Classicamente le bande radiofoniche hanno diverse denominazioni sovrapposte, poiché le più antiche nascono direttamente dalla lingua del paese di origine⁴¹ per poi evolversi verso classificazioni internazionali o puramente tecniche che sono a loro volta differenziate a seconda dello scopo di utilizzazione. Seguiremo qui la classificazione ITU-R della "International Telecommunication Union" (ex CCIR) perché è quella più completa e coerente sulle bande di bassissima frequenza. Tutte le bande radio al di sotto delle classiche Onde Medie ("AM" sulle radio commerciali ma "MF", ovvero *Medium Frequencies*, è la sigla ITU) sono caratterizzate dalle due lettere "LF" (*Low Frequencies*), eventualmente precedute da un aggettivo che ne indica progressivamente la qualità: *molto*, *ultra*, *super* o *estremamente* basse (rispettivamente V, U, S, E). Tutte le basse frequenze radio sono caratterizzate da onde di lunghezza tale da non poter più essere espressa direttamente in metri: dai 10 km iniziano le VLF e con 100'000 km terminano le ELF (Tabella 3). Questo implica seri problemi pratici nella realizzazione delle antenne, di cui discuteremo più avanti. Le bande da VLF a ELF hanno poi la particolarità unica di sovrapporsi, come ordine di grandezza della frequenza di oscillazione, con la gamma dei suoni umanamente udibili, che si estende da 20 Hz a 20 kHz (Figura 21). Questo implica che l'antenna, che è un semplice trasduttore da oscillazione EM a oscillazione elettrica, produrrà già un segnale elettroacustico, senza la necessità di operare la demodulazione che è indispensabile alla ricezione radiofonica⁴².

⁴⁰ "Spionaggio elettronico, la guerra segreta". Edizioni CD, 2005.

⁴¹ Tipicamente sulle radio d'epoca italiane troviamo la dicitura OL, OM, OC e OCC (onde Lunghe, Medie, Corte e Cortissime). Sulle radio tedesche le stesse bande sono etichettate LW, MW, KW e UKW (dove W = welle = onda). In entrambi i casi, l'ultima di queste bande identifica (in realtà la comprende soltanto) quella oggi denominata "FM". Si trattava infatti della 88-104 MHz delle prime radio libere. Negli anni '70 questa banda è stata legalizzata anche in Italia con l'estensione 88-108 MHz e già dalle prime radioline portatili transistorizzate si trovava tipicamente accoppiata alle sole Onde Medie. Poiché su queste due bande le trasmissioni vengono demodulate diversamente, rispettivamente in frequenza e in ampiezza, "AM/FM" divenne l'etichettatura tipica della scala parlante e ancora oggi viene confusa per il nome delle rispettive bande radio mentre tecnicamente è il *modo* e formalmente ne è divenuto il "soprannome". Qui faremo riferimento sempre alla classificazione internazionale ITU, dove le quattro bande di cui si parlava all'inizio si chiamano rispettivamente LF, MF, HF e VHF (qui, seguendo la nomenclatura inglese, F = frequency).

⁴² Le comunicazioni radiofoniche si basano sullo sfruttamento delle capacità propagative di un'onda radio detta *portante* per veicolare un segnale di frequenza acustica, quindi estremamente più bassa. L'oscillazione acustica viene per così dire "inserita" nella portante radio, deformandola in una delle sue caratteristiche altrimenti costanti, ovvero *modulandola* nell'ampiezza oppure nella frequenza. Esistono naturalmente altri *modi* ma questa è un'estrema semplificazione.

Del resto il nostro scopo è quello di studiare dei segnali naturali che sono essi stessi l'informazione che cerchiamo. Demodularli significherebbe alterarli senza ottenere un'informazione utile.

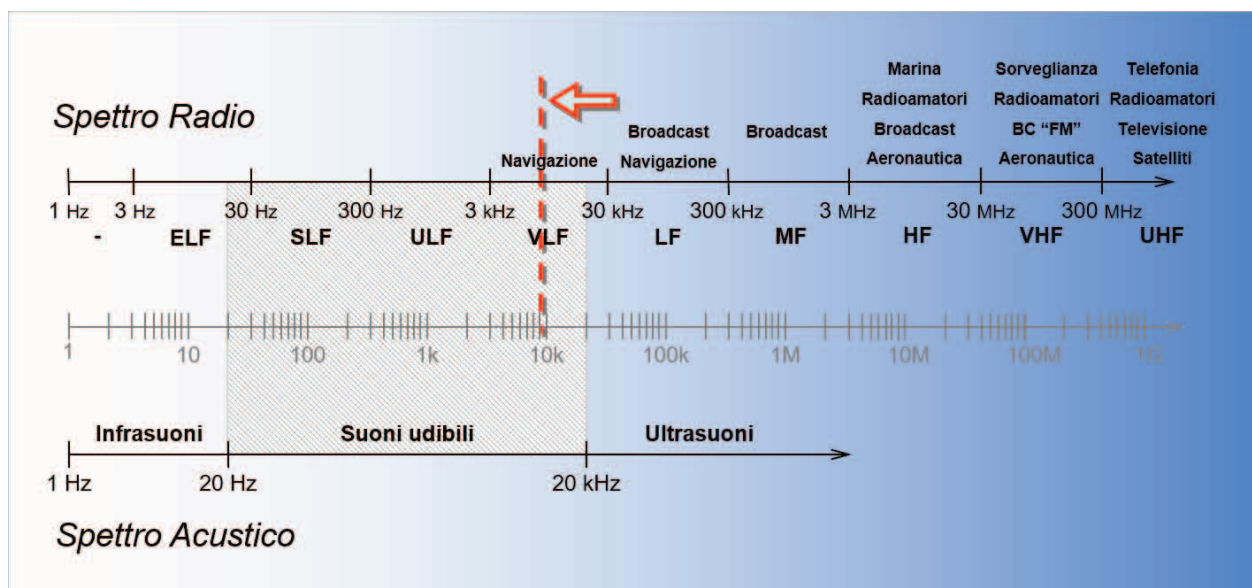


Figura 21 La banda VLF nello spettro radio. In questo diagramma sono rappresentati lo spettro radio (in alto) e lo spettro acustico (in basso) confrontati rispetto alla medesima misura della frequenza (al centro), espressa su scala logaritmica per risolvere meglio le basse frequenze. Le bande dello spettro radio seguono una suddivisione progressiva a base 3 e sono qui denominate seguendo la notazione internazionale ITU. Per ogni banda è stato indicato l'impiego più tipico in ambito internazionale. Si può osservare come le frequenze superiori a 3 MHz siano le più usate in ogni tipo di comunicazione radio. Al di sotto l'impiego radiofonico (broadcast) è sempre meno diffuso e l'uso delle onde radio tende ad essere strumentale. La linea rossa indicata dalla freccia è la soglia dei 9 kHz al di sotto della quale non esistono più (ufficialmente) trasmissioni radio. L'area in tratteggio evidenzia come la banda dei suoni udibili (in basso), coprendo una scala di frequenze estesa da 20 a 20000 Hz (al centro), si sovrapponga quasi per intero all'estensione delle bande radio da SLF a VLF. In questa fascia un segnale elettromagnetico può essere convertito in suono senza alcun processo di "demodulazione", perché la sua frequenza è già quella di un suono. Il semplice trasduttore del segnale EM in segnale elettrico (l'antenna) produrrà un suono nel circuito di amplificazione.

Tabella 3 Lunghezze d'onda delle bande radio a bassa frequenza. La lunghezza d'onda $\lambda = c/f$ aumenta al diminuire della frequenza (f) in funzione della velocità di propagazione (c) che per le onde elettromagnetiche è circa quella della luce. Classicamente la lunghezza delle onde radio è misurabile direttamente in metri ma sulle bande di frequenza così bassa si va dai chilometri alle migliaia di chilometri.

Banda radio	frequenza	lunghezza d'onda
-----	300 kHz	1 km
LF		
-----	30 kHz	10 km
VLF		
-----	3 kHz	100 km
ULF		
-----	300 Hz	1000 km
SLF		
-----	30 Hz	10000 km
ELF		
-----	3 Hz	100000 km

Sempre nella Figura 21, per ogni banda radio è indicato il suo impiego pratico più caratteristico. Si può osservare come le frequenze superiori a 3 MHz siano le più usate in ogni tipo di comunicazione radio. Al di sotto l'impiego radiofonico (broadcast) è sempre meno diffuso e l'uso delle onde radio tende ad essere soltanto strumentale. Per esempio, prima dell'avvento del sistema satellitare GPS (banda UHF), la radiolocalizzazione aeronautica e marittima si basava sulle "Onde Lunghe" (banda LF) con i *radiofari NDB* e il sistema *Loran-C* e sulle "Onde Ultra Lunghe" (VLF) con il sistema russo *Alpha*. Sempre in LF si trovano ancora oggi poche stazioni radiofoniche europee e le stazioni di tempo e frequenza campione che sincronizzano anche gli orologi domestici. In banda VLF invece, al di sotto dei 9 kHz, almeno ufficialmente non esistono più comunicazioni civili di qualsiasi tipo. Il motivo è che la banda dei suoni udibili lambisce il limite superiore della banda VLF ed è più estesa della stessa banda VLF. In questa banda radio quindi non può esistere nemmeno un singolo canale la cui trasmissione sia modulabile con lo spettro audio. Ancora nella Figura 21, grazie al confronto in isofrequenza tra spettro acustico ed EM, si può vedere come l'estensione dei suoni udibili (area tratteggiata) copra lo spettro radio a cavallo delle bande ELF, SLF, ULF e VLF. La regione EM al di sotto della soglia dei 9 kHz, evidenziata dalla linea rossa, è dominata da radiazione naturale prodotta per lo più da fenomeni ad alta energia che scaturiscono da interazioni fisiche spazio-Terra e atmosfera-terra. Questi fenomeni naturali producono suoni diversi e caratteristici, simili a ticchettio incostante (*Pops*), crepitio (*Spherics*), sibili (*Hiss*), fischi (*Wistlers*) e perfino al cinguettio di uccelli (*Hooks*)⁴³. È molto importante conoscere e saper identificare tutti questi fenomeni tipici per poter selezionare quelli di origine sconosciuta e approfondirne lo studio.

È indispensabile dunque saper riconoscere tutto ciò che sicuramente non è di origine crostale, compresi i fenomeni di origine antropica. In teoria questa regione dello spettro radio, inadatta alle comunicazioni, dovrebbe essere libera da interferenze umane e una sorta di "terra di nessuno" particolarmente adatta al monitoraggio scientifico. Questo nella realtà non è affatto vero. Quasi tutta la tecnologia elettrica ed elettronica produce segnali a bassa frequenza, dal PC alla lavatrice. Qualunque macchina non ne produca di suo può però essere alimentata da un *autotrasformatore*, che involontariamente "trasmette" nell'ambiente circostante la frequenza di 50 Hz della rete elettrica a 220 V o da un più moderno alimentatore *switching* che emette frequenze ancora più alte, a partire da 15 kHz. Questo significa "sporcare" una grossa porzione di banda con le *armoniche* di queste frequenze. Inoltre qualsiasi macchinario sia dotato di un motore elettrico a spazzole produce scintille che generano radiazione EM a largo spettro. Tutto ciò vale per distanze relativamente brevi ma viviamo letteralmente immersi in una moltitudine queste sorgenti, per chilometri intorno a noi. Senza nemmeno perdere tempo a sperimentare, basti immaginare i macchinari di un cantiere edile, la lavatrice o il frigorifero di casa, o semplicemente il trasformatore dell'oggetto tecnologico che inevitabilmente si sta usando per leggere queste righe (foss'anche una semplice lampadina a risparmio energetico) ed è già chiaro che in una città non è possibile attuare un monitoraggio EM a bassa frequenza di segnali naturali⁴⁴. Per ottenere il massimo rendimento da una

⁴³ Nel paragrafo 6.0 "Interpretazione degli spettrogrammi VLF" verrà mostrato come riconoscere i segnali più tipici dello scenario VLF ma per una conoscenza più ampia dei fenomeni naturali osservabili a bassa frequenza si consiglia la lettura di [Romero, 2006] e per un approfondimento sulla loro natura fisica si veda [Meloni et al., 2015].

⁴⁴ Anche l'assenza delle trasmissioni radio è soltanto una leggenda, peraltro smentita da altre leggende, perché le trasmissioni militari hanno la caratteristica di non esistere ufficialmente. Diciamo soltanto che è noto che il NORAD statunitense possiede ciclopiche antenne filari per le basse frequenze radio. Presumibilmente vengono usate per trasmettere gli ordini ai sottomarini nucleari. Dei sottomarini si sa che per non essere localizzati non devono mai trasmettere, tuttavia devono necessariamente ricevere ordini aggiornati. Non potendo mai emergere, pena l'individuazione satellitare, sono costretti a ricevere gli ordini in immersione. Le basse frequenze radio sono appunto quelle che assicurano la massima penetrazione (la minima attenuazione nel mezzo attraversato) ed è per questo motivo che anche noi confidiamo di poterle impiegare nel monitoraggio di segnali provenienti dal sottosuolo.

stazione VLF occorrerà installarla in un sito sufficientemente distante da qualunque tipo di urbanizzazione ma allo stesso tempo raggiunto dalla rete elettrica e magari anche da internet. Un paradosso che perseguiterà sempre chi lavora su una rete di monitoraggio EM a bassa frequenza.

2.2 Strumentazione e software

L'attività di monitoraggio richiede almeno la strumentazione minima per:

- Ricezione del segnale EM
- Registrazione del segnale elettrico
- Elaborazione numerica dei dati

Come abbiamo visto, il segnale sorgente ha già una frequenza acustica, quindi sarà possibile impiegare le comuni strumentazioni e software disponibili in ambito acustico e/o musicale. Per uno studio scientifico è opportuno campionare e processare numericamente il segnale. Questo si può fare con qualsiasi computer, anche usando una normale scheda sonora. Questa guida fornirà tutte le indicazioni teoriche e tecniche necessarie per acquisire, memorizzare, analizzare i dati localmente e recuperarli da remoto, secondo una strategia collaudata sulla rete VLF dell'INGV e basata su tecnologie non dedicate e largamente diffuse. Ciò che invece necessita di specifico è l'antenna.

Un'antenna è solitamente un elemento passivo: un trasduttore che trasforma in modo proporzionale il campo EM in cui è immersa in un segnale elettrico. Nel nostro caso invece si intende una "antenna attiva" ovvero qualcosa di più della sola antenna ma molto meno di un radoricevitore vero e proprio. In sostanza occorrerà un'antenna associata a un sistema di preamplificazione e filtraggio prima di immettere il segnale elettrico (che è già un suono) nella scheda sonora di un PC. Questo oggetto dovrà essere appositamente costruito oppure acquistato tra i pochi esemplari esistenti in commercio.

Un'antenna solitamente è un elemento risonante sulla stessa frequenza su cui è sintonizzato il ricevitore radio. Per i motivi appena visti, nel nostro caso la ricezione sarà a larga banda (anche se poi l'intera banda radio è larga quanto può esserlo la banda passante di un normale canale radio) e l'antenna non sarà necessariamente risonante. La lunghezza d'onda chilometrica legata a queste frequenze ci pone dei limiti pratici e le classiche dimensioni di $\frac{1}{2}$ onda e $\frac{1}{4}$ d'onda sono impensabili. Ci sarebbero diverse soluzioni ma sono tutte di compromesso. Vediamole brevemente e per gradi:

- Antenna risonante classica: tipo dipolo filare. Purtroppo non potrà mai risuonare su una piccola frazione della lunghezza d'onda e l'efficienza di un dipolo dipende proprio da questo. Tuttavia è stata impiegata con profitto in questo ambito (Fidani, 2006). Riguardo questa configurazione, possibili elementi sfavorevoli sono una lunghezza comunque notevole, la necessità di elementi di sostegno⁴⁵ e il rischio di un effetto "microfonico" del vento dovuto all'oscillazione del dipolo nel campo magnetico terrestre [Romero, VLF]. Il lato più positivo è che un'antenna filare offre certamente la massima portatilità.
- Antenna "loop": molti metri di filo avvolti su un telaio circolare o quadrato. Solitamente usate in banda HF, queste antenne consentono di ottenere in poco spazio la risonanza su frequenze molto basse. Un condensatore parallelo deve completare l'accordo

⁴⁵ L'amico Cristiano Fidani, un fisico da anni impegnato in questo campo, ha sviluppato tecniche quasi "acrobatiche" per usare anche gli alberi. Dunque non ci sono limitazioni, se c'è la volontà di riuscire.

direttamente sul loop. Il rendimento dipende dalla superficie circoscritta dal perimetro del loop, quindi maggiore è il diametro migliore sarà l'antenna. Per le nostre bande la risonanza richiederà antenne comunque troppo grandi, tuttavia ne sono stati realizzati con profitto dei modelli abbastanza piccoli da poter essere trasportabili sul tetto di un'auto. In Italia è abbastanza diffusa una particolare realizzazione di Marco Toni (ik4mzj) che è stata adottata ufficialmente dal già citato Progetto SDT [SDT, FESN] e forse è ancora reperibile in commercio [LPS-2510]. Un'altra realizzazione compatta è quella impiegata negli studi di Massimo Orsini (INFN) [Orsini, 2011]. Per contro c'è da considerare che questo tipo di antenna è sensibile alla sola componente magnetica del campo EM, la cui induzione ha un'efficienza che al diminuire della frequenza si riduce più rapidamente rispetto a quella del campo elettrico. Un lato positivo invece è il fatto che non richiede necessariamente di essere esposta all'esterno, anche se, come del resto ogni altra antenna, all'interno di un edificio può trovare facilmente sorgenti di disturbo. La sua non trascurabile direttività potrà essere, in diverse circostanze, un punto di favore o sfavore.

- Antenna “magnetica”: una grossa bobina di filo sottile avvolto su una barra di materiale ferromagnetico. Sensibile alla sola componente di campo magnetico, è la tipica antenna “a ferrite” delle radio a Onde Medie o Lunghe, che nel nostro caso andrebbe realizzata per frequenze ancora più basse. È certamente la soluzione più compatta e, se opportunamente sviluppata in lunghezza, può manifestare una decisa direttività (uno stretto angolo di minimo segnale). Sono al corrente di studi radioamatoriali attualmente in corso in Italia per la realizzazione di una “megabobina” su nucleo di ferro dolce, anche se non conosco ancora nessun caso di monitoraggio che ne abbia impiegata una. Un esempio in letteratura è il sistema orizzontale angolato a 90° impiegato in [Asada, 2001].
- Antenna “elettrica”: non è un'antenna risonante ma sostanzialmente una sonda di campo elettrico. Si potrebbe considerare come l'equivalente gigante delle così dette “Mini Whip”, solitamente impiegate sulle bande radio LF, MF e HF. Le miniwhip sono tipicamente delle “antenne attive”, di solito costituite da una placchetta di rame di dimensioni davvero esigue (spesso una decina di cm²) associata ad un preamplificatore ad alta impedenza. In rete si trovano progetti di circuiti VLF da impiegare su antenne lunghe anche meno di un metro, come ad es.: [McGreevy, BBB4; Romero, E202; INSPIRE, VLF-3]⁴⁶. Il vantaggio di questa antenna, o meglio di questo dispositivo, perché conterrà già tutta l'elettronica di preamplificazione e filtraggio, è quello di offrire la massima sensibilità nel minimo ingombro. Ciò lo rende la soluzione migliore se si vuole un ricevitore tascabile. Il lato negativo è che la sensibilità nel campo elettrico (anche per la maggiore efficienza induttiva in bassa frequenza rispetto al magnetico) è talmente alta da rendere questa soluzione meno tollerante delle altre ai disturbi di natura elettrica e soprattutto alle scintille. Inoltre un'antenna filare troppo sottile o una connessione non salda tra le sezioni telescopiche o un contatto non saldo con lo spinotto d'antenna sono tutte circostanze che potrebbero occasionalmente produrre un effetto microfonico indesiderato.

Non esprimerò alcun giudizio su quale possa essere l'antenna migliore semplicemente perché non c'è un protocollo predefinito e ciascuna soluzione rappresenta comunque un compromesso tecnico la cui riuscita dipende anche dalla specifica banda di basse frequenze che si intende monitorare. Il mio parere è che si dovrebbe sperimentare tutte queste soluzioni (e quante ancora

⁴⁶ Un tempo era anche possibile acquistare già assemblati tutti e tre i dispositivi. Attualmente, che io sappia, l'unico reperibile sul mercato è il Kit del progetto INSPIRE della NASA [INSPIRE, Kit].

se ne trovassero) e confrontarle tra loro mantenendo piuttosto uno standard almeno nei parametri di campionamento e nel formato dei dati salvati (più avanti lo vedremo in dettaglio). Sempre a mio parere, per mantenere una uniformità in questi parametri, andrebbero a loro volta suddivisi in due categorie standard dedicate al monitoraggio specifico della porzione di spettro radio estese prevalentemente sopra o sotto la frequenza di 1 kHz. Ma prima di affrontare le tematiche riguardanti l'acquisizione dei dati termineremo il discorso sull'antenna e l'elettronica di ricezione. Per il momento quindi definiamo soltanto una nomenclatura operativa che ci servirà per proseguire. Considerando come *finestra utile* la sola porzione di spettro in cui la risposta in frequenza del ricevitore risulta di livello uniforme o quantomeno prossimo a un livello di amplificazione nominale, definiamo:

- *Porzione Superiore* (P_{sup}) la banda indagata da una finestra utile estesa prevalentemente sopra a 1 kHz;
- *Porzione Inferiore* (P_{inf}) la banda indagata da una finestra utile estesa prevalentemente sotto a 1 kHz;

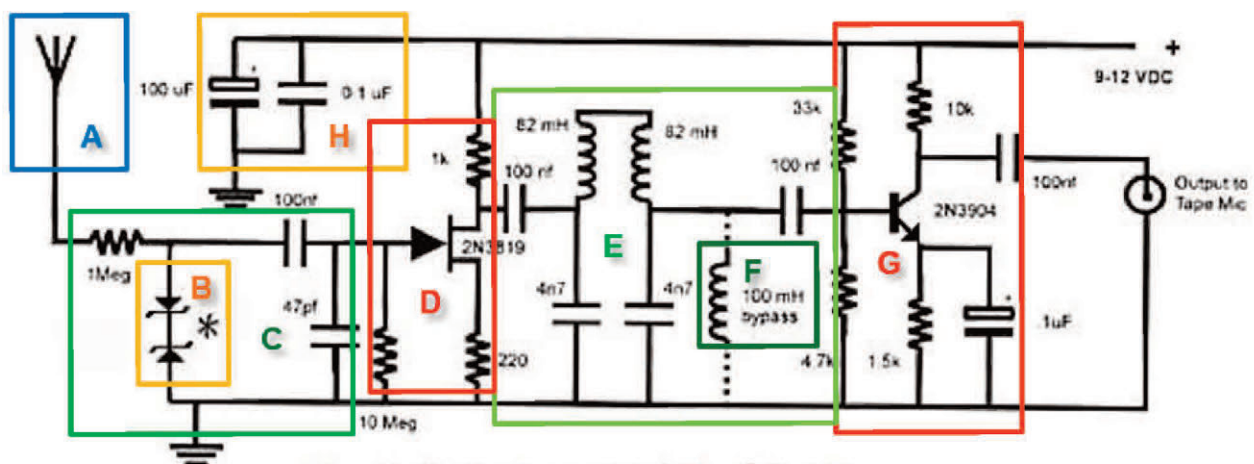
Ho iniziato i miei primi esperimenti con antenne ferromagnetiche, più che altro per comodità, ma ho poi scelto la strada dell'antenna elettrica, che ho trovato estremamente sensibile e versatile. Questa è la mia scelta personale che non deve influenzare nessuno, tuttavia procederò prendendo a modello un'antenna elettrica perché lo ritengo l'approccio più facile per iniziare. Nel nostro caso la differenza sostanzialmente tra "antenna attiva" e antenna + ricevitore sta nel fatto che l'antenna elettrica lavora ad altissima impedenza ed ha bisogno di essere direttamente collegata alla sua elettronica, non potendo impiegare cavi di collegamento (nemmeno le linee "a scaletta"). La Figura 22 mostra lo schema del famoso (e ormai storico) ricevitore di McGreevy [McGreevy, BBB4] che è una soluzione molto semplice e funzionale, didatticamente utile e forse il punto migliore da cui partire se non si possiede già un progetto proprio. Nella stessa figura ho evidenziato diversi blocchi che saranno descritti singolarmente. Prenderò spunto da questo progetto (che, ripetiamo, è parte integrante dell'antenna attiva e adatto solo all'antenna elettrica) per descrivere parallelamente anche i vari stadi dell'hardware che dovrebbe avere il "ricevitore" da impiegare con ogni altro tipo di antenna.

- a. Antenna. In questo circuito, progettato per antenne elettriche, è prevista un'antennina telescopica o un semplice filo elettrico di lunghezza compresa tra 40 cm e 1 m. Una lunghezza molto maggiore non darà risultati significativamente migliori (vedi Figura 23) e arrivando a una decina di metri l'impedenza dell'antenna sarà troppo bassa⁴⁷. Con la lunghezza di 40 cm si dovrebbe avere un'impedenza di 10 MΩ che è quella a cui si adatta il circuito che segue. Per evitare la possibilità di un effetto microfonico sull'antenna, la soluzione migliore è l'impiego di un'antenna rigida e saldata direttamente al circuito. Nel caso si intenda usare altri tipi di antenne, es. loop, l'impedenza d'antenna sarà molto bassa e in luogo del circuito che ora seguirà si possono usare comuni filtri e amplificatori audio per ricomporre lo stesso schema a blocchi (si potrebbero impiegare perfino equalizzatori e amplificatori HiFi).
- b. Sistema di sicurezza per scaricare a terra eventuali sovratensioni sull'antenna. Occorre avere un'antenna senza punte e completamente rivestita da isolante per non attirare i fulmini. Se cade un fulmine sull'antenna sarà comunque una disgrazia. Questo stadio ha il compito di limitare i danni di un'esposizione prossimale al punto di caduta di un fulmine, dove il campo elettrico risulterà comunque molto alto, cercando di proteggere da ciò

⁴⁷ Renato Romero (curatore del noto sito vlf.it) suggerisce che occasionalmente anche un albero è sfruttabile come antenna [Romero, E202].

l'elettronica a valle dell'antenna. Vediamo due diodi Zener disposti in opposizione: con qualunque polarità si accumulasse tra antenna e terra una tensione superiore alla soglia di Zener, questa verrebbe fatta circolare scaricandosi. Potrà capitare che lo spettrogramma del segnale non mostri valori per una frazione di secondo (una singola colonna bianca) in corrispondenza di un colpo di fulmine: questo indica che i diodi hanno fatto la loro parte. La configurazione in parallelo di due diodi collegati in serie tra loro è la più adatta a questo circuito ad alta impedenza, perché ne somma le rispettive resistenze. In alternativa si può usare una lampadina al neon in parallelo, che lascia il circuito aperto per le basse tensioni. Per l'impiego di un dipolo filare, in un circuito a più bassa impedenza, i due diodi si potranno montare anche in parallelo tra loro, sempre con il verso invertito. Con un'antenna loop o magnetica questo accorgimento non servirà perché l'antenna stessa chiude il circuito verso terra.

The McGreevy BBB-4 Rx



The * indicates two zener diodes 3-6 volts

This is the schema for the McGreevy 'Bare Bones Basic' ELF Rx. It is simple to build and excellent in performance. This is still one of the best receivers I have built and continues to be preferable in use. A good friend of mine, another Dave, has and is doing extensive testing of different Rx's for these frequencies and is coming up with some surprising results. By changing the values of the chokes, and the 4 nF caps one can change the Rx frequency coverage slightly and influence the filter values. Output goes to MIC input of a cassette rec, make sure the recorder has the wider bandwidth. Also make sure of a GOOD earth connection.

Figura 22 Schema del ricevitore VLF BBB4 di McGreevy. A: antenna lineare lunga da 40 cm a 1 m. B: protezione dalle sovratensioni provenienti dall'antenna. C: filtro passa-basso. D: preamplificatore. E: filtro di banda. F: filtro facoltativo passa-alto. G: amplificatore a livello MIC. H: filtro di alimentazione. Questo circuito e i valori dei suoi componenti sono stati progettati per lavorare su un'antenna elettrica. Per realizzare un ricevitore con uno qualsiasi degli altri tipi di antenna descritti in precedenza può essere utile seguire lo stesso schema a blocchi riproducendo nel modo opportuno tutti i blocchi descritti da B ad H. In fine va ricordato che questo progetto "BBB4" è pensato per lavorare come radio portatile a batteria ed ha bisogno di una presa di terra che è rappresentata semplicemente dalla mano dell'operatore che toccherà la scatola metallica non verniciata della radio stessa. Questo tipo di utilizzazione è molto pericoloso sotto un temporale e in ambiente montano o al mare può esserlo anche senza il temporale in corso. Per un uso fisso si deve aver cura di aggiungere una presa di terra e un'alimentazione molto pulita. Si declina ogni responsabilità in caso di fulminazione causata dall'uso proprio o improprio di questo od altri dispositivi descritti in questa guida. (Schema originale tratto da [McGreevy, BBB4] e modificato soltanto con la sovrapposizione dei rettangoli colorati).

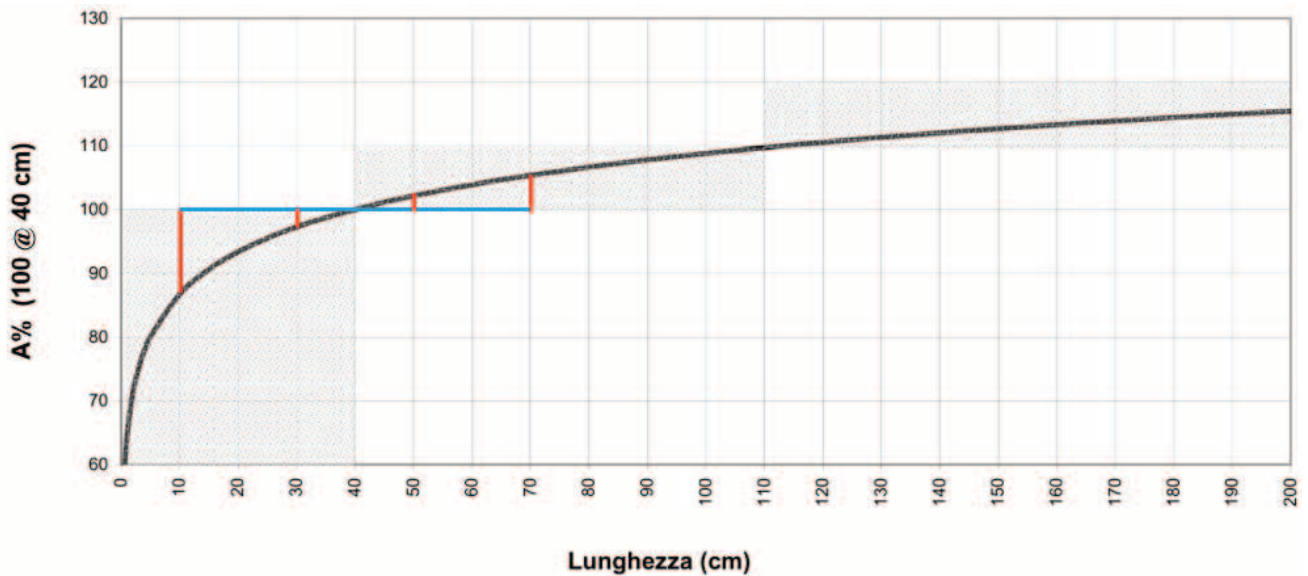


Figura 23 Prova empirica su antenna elettrica. Questa curva mostra come varia la ricezione di un'antenna elettrica filare al variare della sua lunghezza. La sorgente è mantenuta alla stessa distanza dall'antenna con un segnale costante sulla frequenza di 5 kHz. Sull'asse X è riportata la lunghezza dell'antenna in cm e sull'asse Y l'ampiezza del segnale espressa come % di quella misurata con l'antenna di 40 cm. L'antenna non è risonante ma riducendone la lunghezza di qualche decina di cm si ottiene in perdita un valore più alto di quanto si possa ottenere come guadagno aumentando la lunghezza degli stessi cm. Non conviene usare una lunghezza minore di 40 cm e non vale la pena di impiegare una misura molto maggiore.

c. Qui abbiamo un primo filtraggio in frequenza che in questo caso è un circuito RC, ad alta impedenza. È un filtro molto blando ma del resto quello che serve in questo stadio non è ancora la definizione della banda utile ma semplicemente eliminare i disturbi provenienti soprattutto dalle trasmissioni broadcast sulle normali bande radio, da frequenze molto più alte. Quello che serve quindi è almeno un passa-basso e anche se l'angolo di pendenza di un filtro RC risulterà molto basso, questo non è importante perché le bande radio sono comunque molto lontane (vedi Figura 21). Spesso mi viene detto che qui un filtro non serve e che anzi è meglio non filtrare prima di aver amplificato il segnale. La pratica però dimostra il contrario. Un blando filtro RC con la soglia tagliata fuori dalla *banda utile* non compromette la sensibilità del ricevitore ma ci salva dall'occasionale intrusione delle stazioni MF e perfino HF⁴⁸. Con le antenne risonanti, al posto di questo blocco occorrerà introdurre un condensatore in parallelo che completerà l'accordo dell'antenna sulla banda di lavoro o un circuito risonante LC accoppiato all'antenna.

d. Il preamplificatore. In questo caso lavora ad alta impedenza con un transistor di tipo JFET. In questo stadio abbiamo bisogno di alto guadagno e basso rumore. Si tratta della prima amplificazione del segnale, prima di operare un pesante filtraggio per "scolpire" la *banda utile*.

⁴⁸ Senza un prefiltraggio questo rischio può esistere. Dipende molto anche dalla propagazione e dal sito di ascolto. In particolare si può riscontrare quando l'antenna elettrica è troppo lunga. Talvolta a Roma, dal centro del parco di Villa Pamphili (il luogo più lontano possibile dalle case, pur dentro Roma) senza filtro d'ingresso è capitato di ascoltare perfino evanescenze di stazioni "FM", tanta è la saturazione dell'etere nella capitale! È un caso limite, ma non dimentichiamo che la trasmissione FM di Radio Vaticana a Roma entrò nei citofoni di una famosa strada. Per noi questi disturbi saranno facilmente riconoscibili sullo spettrogramma, ma sarà sempre antipatico doverli classificare. Inoltre queste rare voci evanescenti e spesso indistinte sono probabilmente ciò su cui si basa, con altre apparecchiature, la così detta "psicofonia". Non entrerà nell'argomento ma considerando i problemi veri che già si hanno nel monitoraggio VLF, è tassativo rendersi tecnicamente immuni da queste pur remote manifestazioni.

- e. Filtraggio passa-banda. Dal momento che useremo comuni tecnologie HiFi, il dispositivo di registrazione, analogico o digitale che sia, sarà pensato per lo spettro 20 Hz – 20 kHz e questo sarà il primo margine da rispettare. All'interno di questa banda definiremo ora la *finestra utile* del ricevitore. Il criterio di taglio viene imposto dal tipo di utilizzazione. In questo caso sarà per quella che avevamo chiamato *Porzione Superiore* (P_{sup}) dello spettro di basse frequenze. Per la curva passa-basso è la frequenza di campionamento a vincolare la soglia e la pendenza del filtro. Questo punto estremamente critico sarà discusso in dettaglio nel capitolo 3 sull'analisi numerica del segnale. Per il momento diciamo che tutta la curva di discesa del filtro deve restare rigorosamente al di sotto dei 22,5 kHz. Qui vediamo un filtro passa-basso "a pi greco" (dalla forma " π " che lo schema assume tra l'induttanza e i condensatori che la fiancheggiano in parallelo). In questo schema è interessante l'uso creativo di un trasformatore di bassa frequenza, di quelli che si usano nell'isolamento dei modem analogici (1:1) o prima degli altoparlanti, nei più vecchi radoricevitori. Usandone in serie le due bobine se ne può trarre una notevole induttanza⁴⁹. Però bisogna essere in grado di misurarne o calcolarne l'induttanza. In alternativa si può ricorrere alle induttanze commerciali miniaturizzate (es. Neosid), non facili da reperire, oppure all'autocostruzione (scelta di qualità ma molto laboriosa). In questo schema sono i due condensatori posti in serie prima e dopo il π a compiere il filtraggio passa-alto. Sempre la P_{sup} implica una soglia di passa-alto intorno a 1 kHz ma con una forte pendenza sopra ai 300 Hz, in modo tale da attenuare lo spettro delle armoniche dei 50 Hz della corrente di rete ma mantenere sufficientemente bassa l'estensione della finestra utile. Non è facile dare una forte pendenza su frequenze così basse, anche perché richiede induttanze estremamente grandi.
- f. In questo progetto è previsto l'uso opzionale di questo grosso induttore in parallelo che agisce per rafforzare il taglio passa-alto attenuando pesantemente eventuali disturbi causati della rete elettrica. Questo induttore potrebbe essere a sua volta ricavato dall'avvolgimento di un trasformatore per audiofrequenza.
- g. Amplificazione finale. In questo schema abbiamo un'amplificazione a livello microfonico. Per l'ingresso LINE di una scheda sonora e per l'ascolto in cuffia sarà necessaria una ulteriore amplificazione. Sulla scheda sonora del PC sarebbe da preferire l'ingresso LINE rispetto al MIC. L'ingresso MIC (microfonico) prevede infatti un livello più basso che viene fortemente amplificato dalla scheda stessa ma sotto l'azione di un *Controllo Automatico di Guadagno* (AGC) che amplifica o attenua all'occorrenza limitando grandi variazioni di ampiezza sul segnale. Questo è certamente utile per l'ascolto di una voce al microfono ma altera le caratteristiche del nostro segnale, che va studiato scientificamente. Nelle vecchie schede sonore l'AGC era escludibile solo sull'ingresso LINE, ecco perché sarebbe preferibile portare l'uscita a un livello di linea e usare questo ingresso. Un accorgimento di ripiego può essere fornire all'ingresso MIC (tipicamente 1/1000 del LINE) un livello basso a tal punto che l'AGC non potrà fare altro che amplificare. Le nuove schede sonore integrate hanno a volte un solo "jack input" per entrambi i livelli, ma regolano poi tutto via software. A volte però può capitare che non vi si trova il controllo dell'AGC. Ho il sospetto che questo possa dipendere dal "buon senso" del driver, piuttosto che dall'hardware, che spesso è sempre lo stesso chip della Realteck.
- h. Questi due condensatori servono a stabilizzare l'alimentazione. Se non si usa una batteria,

⁴⁹ Temo però che si debba fare molta attenzione al verso di avvolgimento prima di collegare i terminali, perché un senso opposto avvolto sullo stesso nucleo potrebbe annullarne gli effetti.

il filtro che si vede in questo schema potrebbe non essere sufficiente. Uno stadio per il filtraggio autonomo dell'alimentazione è consigliabile in qualsiasi realizzazione, perché tra le sorgenti antropiche a bassa frequenza che disturbano le antenne ci sono tipicamente gli alimentatori, sia lineari che switching. Far entrare questo segnale direttamente dall'alimentazione è il peggiore dei mali. Quando si usa una scheda sonora per registrare il segnale una buona soluzione può essere prelevare l'alimentazione direttamente dal PC, che di norma dovrebbe avere un alimentatore molto ben filtrato. Si può prelevare da una derivazione dell'alimentazione dei dischi, dove tipicamente i fili rossi portano +5 V, quelli gialli +12 V e i neri sono la terra. Malgrado ciò è sempre bene mantenere anche un filtraggio autonomo. Spesso disturbi a bassa frequenza provengono già dall'alimentazione di rete (a parte i classici 50 Hz) e i moderni switching filtrano più le alte frequenze da loro stessi prodotte che le frequenze più basse che hanno in ingresso, prodotte da altre apparecchiature alimentate con la stessa rete. L'ideale sarebbe un'alimentazione a batteria. Non è facile nemmeno usare pannelli solari perché il *regolatore* della tensione dei pannelli produce un tipico disturbo "martellante" che può venire irradiato dal telaio dei pannelli stessi e quindi captato dall'antenna anche oltre la distanza di una decina di metri.

Per lo sviluppo dei filtri di banda si possono usare delle applicazioni di calcolo. Personalmente ho trovato particolarmente utile la versione freeware di "Filter Design Software" [FilterFree]. Un altro software free sempre utile per i calcoli di radiotecnica è il "Radioutilitario" di i4jhg [RadioUt]. Una ricca serie di schemi di filtri già calcolati per queste bande si possono trovare in [Cataldi, 2019] insieme ad altri consigli per la costruzione dei ricevitori.

La Figura 24 è un esempio della curva di risposta in frequenza di un'antenna attiva simile a quella appena descritta. Si osserva che la banda è piuttosto estesa ma la finestra utile è quella al tetto della curva, dove la risposta si mantiene abbastanza costante e quindi i segnali saranno confrontabili. Si tratta di un taglio per quella che abbiamo precedentemente definito " P_{sup} ", che corrisponde in massima parte alla banda radio VLF. A sinistra la curva del filtro passa-alto lascia passare parzialmente la banda ULF ma abbatte la componente SLF che contiene la maggior parte dei disturbi di rete. A destra la curva del filtro passa-basso presenta un minimo in corrispondenza di 22 kHz. Nei paragrafi 3.1 e 3.2 si vedrà l'importanza di questa soglia. Il ramo che risale però è un problema tipico di un pesante filtraggio. Quando la curva di discesa è troppo ripida si possono generare delle "onde" di risalita con picchi via via sempre più attenuati. Curve con poca pendenza non generano risalite ma richiedono una banda più larga per abbattere il segnale allo stesso livello. Se si vuole allestire una rete di monitoraggio è necessario che ogni stazione presenti esattamente le stesse caratteristiche di misura (anche non assoluta) per fornire dati confrontabili. Per fare questo tipo di analisi dell'hardware è necessario disporre di un generatore di segnale acustico. Quando iniziai questa ricerca come radioamatore non avevo nessuna strumentazione di laboratorio ma la prima soluzione fu quella di allestire un PC (ricavato da parti di recupero) con tre schede sonore. Questo mi consentiva, a limite, di campionare segnali anche su 6 canali contemporaneamente, perfino con 3 frequenze di campionamento diverse sulle tre coppie stereo. Esistono moltissime soluzioni software (anche freeware) per generare e per analizzare segnale acustico. Così mentre una scheda sonora produceva il segnale che veniva introdotto nel ricevitore VLF, un'altra simultaneamente ne analizzava l'uscita. La prima cosa da fare quindi, meglio se con strumentazione da laboratorio, è l'analisi della curva di risposta del proprio ricevitore VLF (es. Figura 24). Questa sarà utile sia per avere una caratterizzazione dell'hardware, che consente di verificare se sono stati raggiunti gli obiettivi tecnici, sia per poter replicare della strumentazione standardizzata per una rete di monitoraggio.

Un'altra fase importante ma ancor più delicata è la *calibrazione* delle stazioni VLF. Questa va eseguita sempre con un generatore ma analizzando il segnale con la stessa applicazione e l'hardware con la quale si intende produrre la registrazione dei dati. Qualunque formato sia,

una tabella numerica o uno spettrogramma, è necessario che il file di dati fornisca una misura coerente e il più possibile vicina a quella assoluta. Questo dipende dall'interazione tra hardware e software, che comprende anche la scheda sonora. Una prima approssimazione si può ottenere inserendo nel ricevitore VLF un segnale di frequenza e ampiezza note e calibrando il software di acquisizione affinché registri su quella frequenza un segnale di quella stessa ampiezza. Questo deve ripetersi fedelmente almeno su tutta la *finestra utile*. Nel paragrafo 4.5 è indicata la procedura da seguire sulla diffusissima applicazione freeware [SpecLab]. Una volta eseguite la caratterizzazione del ricevitore e la calibrazione delle stazioni, una rete di monitoraggio dovrebbe impiegare sempre lo stesso tipo di stazione, ovvero quel tipo di antenna e ricevitore con quella scheda sonora e quel software. La sostituzione della scheda sonora richiederà una nuova calibrazione. La sostituzione del ricevitore, se la caratterizzazione non risulterà identica, richiederà una nuova calibrazione. Non ho affrontato la caratterizzazione dell'antenna perché abbiamo fatto l'esempio di un'antenna elettrica che in fondo è soltanto uno stiletto di metallo, ma è chiaro che anche l'antenna dovrà mantenere le stesse caratteristiche geometriche: lunghezza e diametro. Nel caso di antenne più elaborate (es. ferromagnetica) sarà necessaria una caratterizzazione anche dell'antenna affinché si possa ottenere in seguito una replicazione coerente.

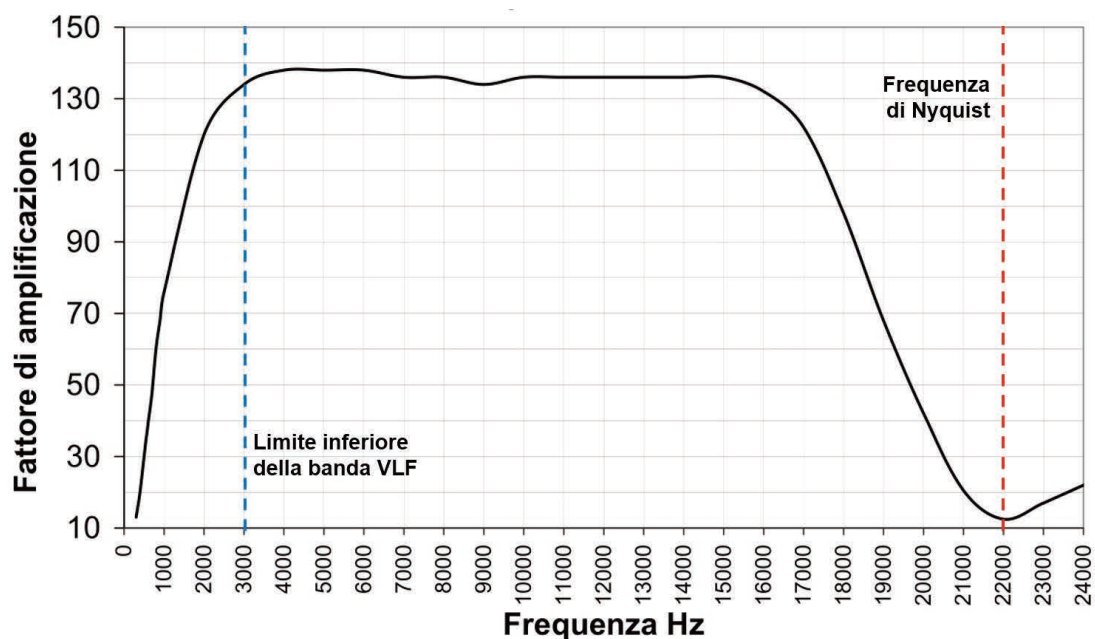


Figura 24 Esempio di curva di risposta del ricevitore. Questa è la risposta in frequenza di un'antenna attiva analoga a quella descritta. Sull'asse Y è espressa l'ampiezza del segnale misurato in uscita mentre all'ingresso del circuito veniva introdotto un segnale di ampiezza costante (20 mVp-p) ma variato in frequenza a intervalli regolari per tutta l'estensione della banda espressa sull'asse X. La "finestra utile" è la porzione di spettro attraversata dal tetto della curva. Questo taglio sulla " P_{sup} " corrisponde in massima parte alla banda radio VLF. A sinistra la discesa prodotta dal filtro passa-alto lascia passare parzialmente la banda ULF ma abbatte i disturbi in banda SLF. A destra la discesa prodotta dal filtro passa-basso raggiunge un minimo in corrispondenza dei 22 kHz, soglia necessaria al campionamento con la scheda sonora del PC (vedi paragrafo 3.2).

Naturalmente anche stazioni non calibrate o addirittura stazioni disomogenee come tipologia di antenna e ricevitore possono costituire una rete di monitoraggio, ma in quel caso l'obiettivo della rete sarebbe più orientato al confronto dell'hardware sullo stesso segnale (obiettivo

tecnico) che non alla caratterizzazione del fenomeno osservato (obiettivo scientifico). Proprio questo anzi potrebbe essere uno dei primi obiettivi di una rete radioamatoriale: definire la migliore configurazione hardware per l'osservazione di un determinato fenomeno. È qualcosa che può realizzarsi con più difficoltà in ambito scientifico ma scaturirebbe in modo quasi "fisiologico" da quello amatoriale (es. in ambito ARI). Per fare ciò, ma ancora di più nel caso di una rete omogenea, è necessario che siano omogenei almeno la configurazione di acquisizione dati e i parametri di analisi. Vedremo ora quali sono i vantaggi dell'analisi spettrale e, qualora possa servire come guida, quali soluzioni di acquisizione e analisi ha adottato la rete sperimentale dell'INGV.

2.3 Importanza dell'analisi spettrale

L'analisi spettrale è stata introdotta in sismologia già dagli anni '60, non appena la teoria del calcolo *FFT* ma soprattutto la potenza di calcolo dei processori ne hanno consentito l'applicazione pratica. Il classico tracciato grafico di un terremoto o l'immagine di un segnale elettrico sull'oscilloscopio rappresentano un *oscillogramma*, ovvero un grafico Tempo/Ampiezza che mostra come varia l'intensità del segnale nel tempo. È un'analisi nel *dominio dei tempi* che non rivela molto circa il contenuto del segnale (a meno che non sia un codice Morse). L'analisi spettrale è un processo matematico che consente di passare alla visione nel *dominio delle frequenze*, osservando, in un determinato breve arco di tempo, come l'ampiezza totale del segnale sia in realtà composta da frequenze diverse.

Già nell'800 il matematico francese Fourier dimostrò matematicamente che: "Qualunque funzione, per quanto irregolare si presenti, potrà sempre essere scomposta in una somma di funzioni sinusoidali aventi ciascuna una propria ampiezza e una propria frequenza". La *Trasformata di Fourier* è un operatore matematico che trasforma le informazioni nel dominio dei tempi (Tempo/Ampiezza) in informazioni nel dominio delle frequenze (Frequenza/Ampiezza). Eseguita per un certo breve periodo sulla funzione segnale, restituisce un grafico che mostra in che modo, durante quel periodo, l'energia totale di quel segnale irregolare fosse dovuta alla composizione di più segnali regolari ma di diversa frequenza. Questo grafico è lo *spettro* del segnale sul periodo T. Continuando a processare il segnale successivamente, di periodo in periodo, e componendo insieme gli spettri in un unico grafico si ottiene uno *spettrogramma*, ovvero un grafico in cui vediamo di nuovo anche il tempo che passa ma stavolta possiamo osservare come sta cambiando la distribuzione spettrale del segnale. Sui segnali audio questi grafici sono noti anche come *sonogrammi* e si usano per "osservare" i suoni. La Figura 25 mostra un esempio concreto dell'utilità che può avere l'analisi spettrale nello studio di un segnale VLF, quando cioè stiamo esplorando uno scenario in cui si manifestano fenomeni di natura completamente diversa e abbiamo bisogno di distinguerli l'uno dall'altro. Riconoscere un *pattern*, ovvero un'impronta spettrale caratteristica, ci consentirà di distinguere tra loro i segnali naturali e artificiali di cui abbiamo parlato in precedenza e capire, in prima analisi, ciò che NON è il segnale che cerchiamo. In seconda analisi si può tentare anche una ricerca mirata dei modelli di segnale osservati in laboratorio nella speranza che il fenomeno si manifesti anche in superficie con il medesimo pattern⁵⁰ o almeno con uno simile.

⁵⁰ Al momento è da considerare soltanto un'ipotesi.

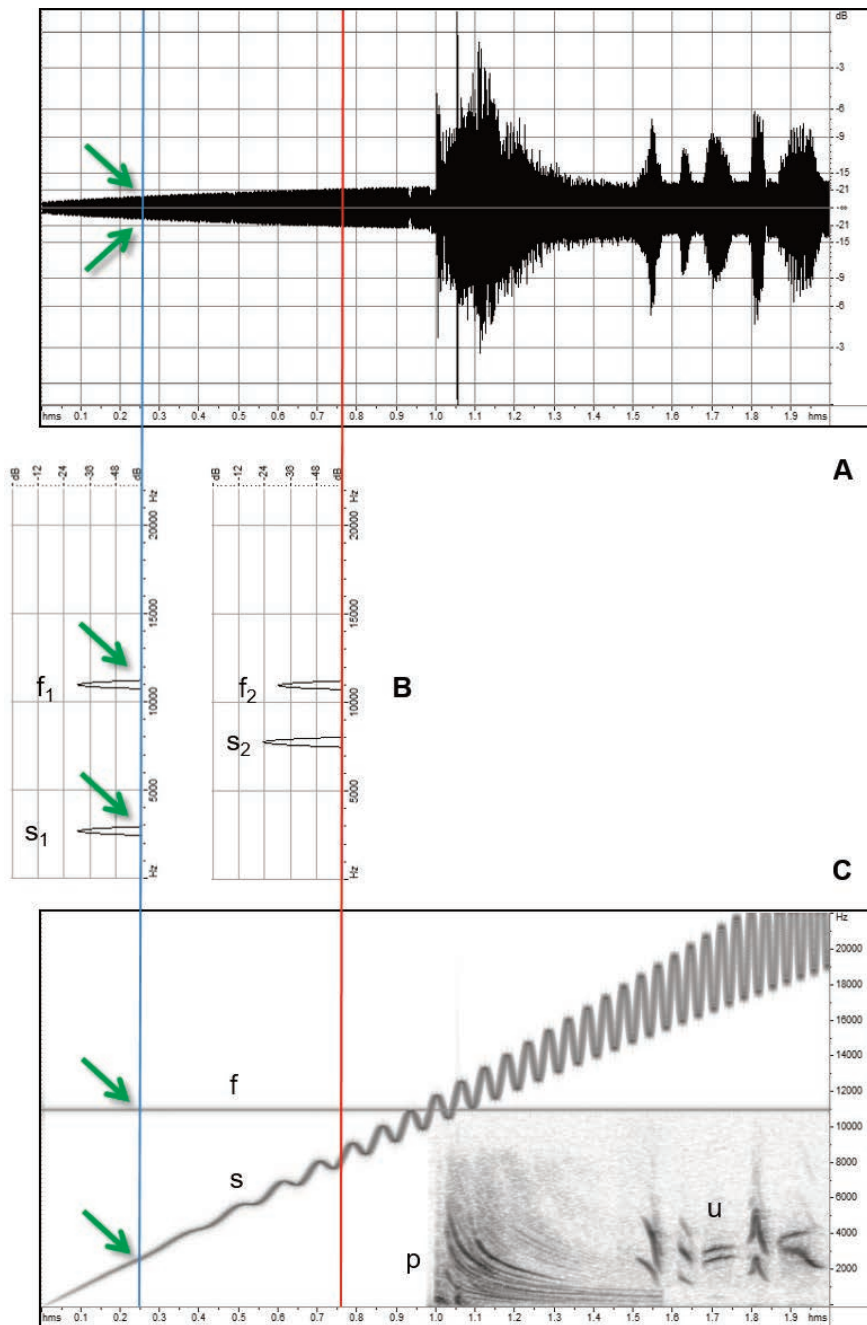


Figura 25 Utilità dello spettrogramma. Il grafico (A) è l'oscillogramma di un suono complesso sintetizzato a scopo dimostrativo. Ciò che si vede assomiglia vagamente a un segnale sismico. Appare evidente che cresce con una certa regolarità per poi assumere un aspetto più complesso ma non abbiamo nessuna informazione sulla natura di questo segnale. L'analisi spettrografica inizia a rivelare una certa complessità nel segnale. Il confronto (B) tra gli spettri processati in due istanti diversi (linee verticali blu e rossa) mostrano la presenza di due o più sorgenti e di una certa evoluzione: f_1 è un asorgente che sembra aver mantenuto a distanza di tempo la stessa frequenza e intensità (f_2); s_1 è una seconda sorgente; s_2 può essere la stessa sorgente s_1 mutata col tempo in ampiezza e frequenza oppure una terza sorgente indipendente dalle altre. In tal caso sarà scomparsa S_1 . Soltanto lo spettrogramma (C) rivela la vera natura del segnale, ovvero la composizione di quattro differenti sorgenti complesse: un fischio a frequenza costante (f), una sorgente a frequenza e ampiezza variabili, ovvero il suono di una sirena (s), un colpo di pistola (p) e il cinguettio di un uccello (u). Pur non potendo ascoltare il segnale in esame si riconosce chiaramente la divisione in almeno quattro classi principali e la loro dinamica nel tempo. Le frecce verdi indicano come gli spettri (B) rappresentavano, negli istanti indicati dalle linee blu e rossa, due sole sorgenti che erano indistinguibili nell'oscillogramma. Scale dei grafici: (A) asse X = tempo in secondi e asse Y = ampiezze in dB; (B) asse X = ampiezze in dB e asse Y = frequenze in Hz; (C) asse X = tempo in secondi e asse Y = ampiezze in dB.

2.4 Strategie adottate nella rete sperimentale dell'INGV

Verrà proposto ora un modello di acquisizione e analisi che non rappresenta “IL” modo di lavorare sui segnali EM a bassa frequenza⁵¹ ma una particolare strategia scelta in base alle esigenze peculiari di un monitoraggio continuo su quella banda spettrale che avevamo chiamato P_{sup} . Relativamente a questa porzione potrebbe essere adottato come standard per ottenere risultati confrontabili tra diverse stazioni o reti. Può altrimenti essere seguito come indirizzo per ottenere velocemente un risultato di riferimento e successivamente diversificare il sistema in base alle proprie esigenze di studio. Per agevolare entrambe le circostanze verrà proposto nel capitolo 3 anche un mini-corso di base sull'analisi numerica dei dati.

La prima decisione strategica è “cosa” cercare con un monitoraggio automatico e continuo, perché da questo dipendono a cascata una serie di problemi di configurazione dell'acquisizione, storage e trasmissione del flusso dati. Nella rete dell'INGV è stato scelto di basarsi sulla caratterizzazione del modello sperimentale esposto nel paragrafo 1.3. I segnali di tipo SID sono facilmente confondibili con gli *Spherics* naturali e richiedono quindi un'accurata analisi spettrale con risoluzione temporale estremamente alta (breve periodo di analisi FFT)⁵². I segnali SIO invece sono piuttosto particolari e immediatamente riconoscibili all'analisi spettrale, che richiede al contrario una risoluzione più accurata nella scala della frequenza (lungo periodo di analisi FFT). Ne emergono due elementi importantissimi:

1. è necessaria un'analisi spettrale per riconoscere il segnale “target” dal rumore di fondo VLF;
2. la configurazione di analisi necessaria per osservare il pattern spettrale di un segnale SIO non è compatibile con quella richiesta da un segnale SID.

Il pattern SIO in laboratorio è stato il precursore che maggiormente anticipa l'istante della rottura e da una prima analisi qualitativa eseguita direttamente sullo spettrogramma è quello che risulta più facilmente riconoscibile e caratteristico rispetto al rumore di fondo VLF. Per praticità quindi è stato scelto il modello SIO come obiettivo della ricerca. Il rovescio della medaglia è che, sempre in laboratorio, è risultato essere estremamente meno intenso del SID (e forse per questo non è apparso sistematicamente). Tuttavia, qualora apparisse da un monitoraggio “on air”, sarebbe un indizio abbastanza univoco per identificare una sorgente potenzialmente molto energetica. Quella di cercare il modello SIO è tuttavia soltanto una scelta iniziale. Se si desidera indirizzare lo studio sul modello SID si dovrà necessariamente distinguere il target dagli *Spherics* e gli episodi temporaleschi e questo si può fare ancora con l'analisi spettrale e/o garantendo un controllo sulla direzione del segnale (es. [Asada, 2001]). Va detto inoltre che alcuni lavori identificano dei precursori negli *Spherics* stessi [De, 2011].

La seconda decisione strategica riguarda la gestione dei dati. Ciò che è maggiormente vincolante nella P_{sup} è la prevalenza delle frequenze VLF. Questo richiede un'alta frequenza di campionamento, al limite delle possibilità di una scheda sonora. Un campionamento alto implica un grande flusso di dati e quindi si aggiunge un problema di storage. Allo stesso modo il collegamento remoto con la stazione richiederà una banda molto larga e un contatto costante. I dettagli tecnici si potranno desumere e calcolare dalle indicazioni del capitolo 3. Qui ci limiteremo a presentare la soluzione già ponderata e calcolata, con la sola raccomandazione di rispettare un segnale in ingresso filtrato al di sotto dei 22 kHz (vedi paragrafi 3.1 e 3.2).

La soluzione adottata nella rete sperimentale dell'INGV è stata quella di eseguire un monitoraggio continuo ma rinunciare alla trasmissione di un flusso continuo di dati, la maggior

⁵¹ A titolo di esempio ricordo che l'acquisizione potrebbe al contrario essere totalmente orientata allo studio nel dominio dei tempi e in questo caso un approccio strategico potrebbe essere l'acquisizione selettiva in termini di livello di trigger e/o come valori di *trigger/s* [es. Orsini, 2011].

⁵² Vedi paragrafo 3.4.

parte dei quali non sono utili. La stazione salva localmente tutti i dati segmentandoli a intervalli di 40 secondi. Il salvataggio cicla su un buffer di 31 giorni. Entro un mese dall'acquisizione sarà sempre possibile interrogare la stazione da remoto e reperire l'intervallo desiderato a pacchetti di 40s. Dopo 31 giorni il dato sorgente verrà perso. Tuttavia parallelamente al salvataggio la stazione produce autonomamente sui dati un'analisi preliminare standard suddivisa in due categorie di spettrogrammi: una serie di finestre temporali di un'ora, in cui l'operatore, da remoto, può velocemente individuare l'intervallo temporale in cui si manifesta un pattern ritenuto interessante e una serie di finestre temporali di 40 s, sincronizzate con i segmenti del segnale sorgente, che serve per zoomare sull'evento e verificare se è davvero interessante. In caso positivo l'operatore scaricherà da remoto soltanto i pacchetti di segnale sorgente corrispondenti all'intervallo temporale interessante. In questo modo il flusso di dati è ridottissimo e limitato all'indispensabile. Gli spettrogrammi sono immagini compresse in formato JPG. Non sono il massimo come prodotto ma in meno di 100 kB si può scaricare l'equivalente di un'ora di flusso dati (318 MB: lo spettrogramma ne "pesa" circa lo 0,03%). In questo modo si minimizza il trasferimento dei dati alla porzione audio strettamente necessaria. Da questo punto di vista l'analisi spettrale risolve anche un problema tecnico perché "riassume" visivamente l'informazione. È parametrizzata solo per dare il giusto risalto al panorama dei fenomeni VLF. Qualora si osservasse qualcosa di interessante, l'operatore remoto potrà eseguire direttamente sul segnale sorgente scaricato una propria analisi più mirata e raffinata.

La Figura 26 schematizza il funzionamento del sistema, ottenuto impostando l'applicazione Spectrum Lab [SpecLab] per lavorare secondo i parametri riportati nella Tabella 7. Lo schema seguente riepiloga il prodotto automatizzato delle stazioni:

- *spettrogramma panoramico "LoRes"*: permette di esaminare rapidamente, a spots di un'ora, l'intero spettro acustico.
- *Spettrogramma ad alta risoluzione "HiRes"*: permette di osservare nel dettaglio i fenomeni interessanti eventualmente individuati nei grafici "LoRes". Visualizza spots di 40 secondi analizzati con un'alta risoluzione temporale all'interno dello spettro utile.
- *Sorgente Audio*: download del segnale acustico in pacchetti di 40 s sincronizzati agli intervalli osservati negli spettrogrammi "HiRes". I files sono compressi con un sistema "lossless" e sono reperibili nel passato fino al 31° giorno precedente la data di interrogazione.

Per la compressione della sorgente audio è stato adottato il software Lossless Audio [La] che può ridurre la dimensione del file fino al 50% senza subire la perdita di informazioni che si avrebbe con il classico formato "mp3". Tutti i dati sono archiviati localmente in un webserver [Apache]. Questo sistema necessita di un'interfaccia software di comando e controllo che è stata realizzata con una pagina WEB sul server locale. In questo modo in ogni luogo si può interrogare la stazione e scaricare i dati. L'interfaccia WEB mostra immediatamente gli ultimi dati salvati in tempo reale ma consente anche di mostrare dall'archivio gli spettrogrammi orari desiderati, zoomare sui dettagli e scaricarne su richiesta la sorgente acustica (Figura 27). Il flusso dati per la navigazione sugli spettrogrammi è minimo e gli spettri si mantengono indefinitamente (in realtà l'autonomia del disco ne consente il mantenimento per 1-2 anni, poi vanno cancellati). Nei capitoli 4 e 5 verranno date le indicazioni dettagliate per la realizzazione di questo sistema e in appendice si troveranno i listati del software. Si tratta dello stesso metodo di acquisizione e analisi che ho installato in quelle stazioni del Progetto SDT [SDT, FESN] che me ne hanno fatto richiesta alcuni anni fa. Come esempio indicherò la stazione VLF dell'ARI di Fidenza [SDT, Fidenza]. Va sottolineato che questa stazione adotta il proprio ricevitore e la propria antenna (in questo caso una loop) mentre la rete sperimentale INGV aveva adottato un'antenna elettrica simile a quella descritta in questo capitolo. La strategia di acquisizione tuttavia è indipendente dall'antenna ma configurata per la P_{sup} dello spettro radio a bassa frequenza. Il sistema di ricezione deve soltanto rispettare un filtraggio passa-basso al di sotto dei 22 kHz.

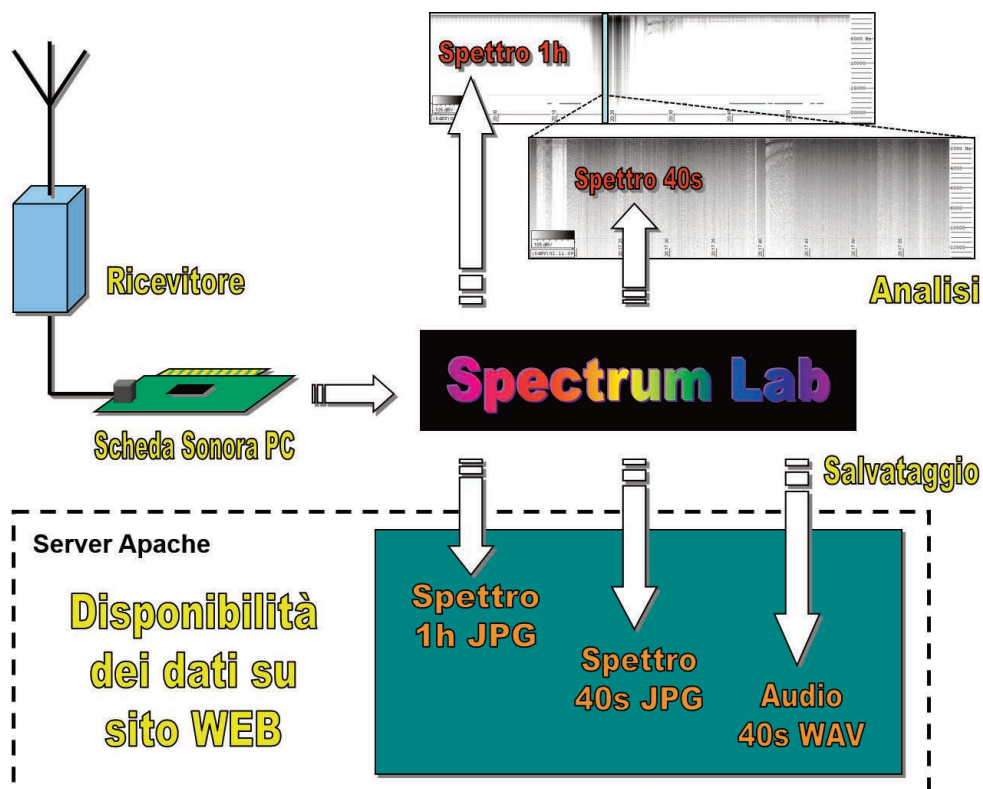


Figura 26 Schema del sistema di gestione dei dati condiviso con il progetto SDT. Il sistema è ottimizzato per il monitoraggio della “Porzione Superiore” delle basse frequenze radio. A monte abbiamo il dispositivo di ricezione VLF. Il segnale viene campionato dalla scheda sonora di un PC su cui lavora l’applicazione Spectrum Lab [SpecLab] configurata per effettuare un’analisi preliminare in due modalità: uno spettrogramma panoramico (HiRes, finestra di 1 ora) e uno spettrogramma di dettaglio (HiRes, finestra di 40 secondi). Le immagini (JPG) vengono salvate insieme al file audio (WAV) su un webserver locale. Un’apposita pagina WEB consente la consultazione da remoto della registrazione in tempo reale e di tutti i dati storici. Tutti i dati si possono scaricare. L’audio sorgente, porzionato ad intervalli di 40 s, è disponibile per 31 giorni dalla data di registrazione.

<p>Banda visualizzata = 0 - 22 kHz Periodo visualizzato = 1 h Scala ampiezze = -110 / -70 dB Risoluzione frequenza = 0,67 Hz Risoluzione tempo = 4,5 sec/col</p>	<p>1 Ricerca LoRes</p>	<p>formato: "AAMMGG" UTC (selezione)</p> <p>Data: 130306 Ora: 07</p> <p>Spettrogrammi panoramici Cerca</p>
<p>Banda visualizzata = 0 - 22 kHz Periodo visualizzato = 40 sec Scala ampiezze = -110 / -70 dB Risoluzione frequenza = 21,5 Hz Risoluzione tempo = 0,047 sec/col</p>	<p>2 Ricerca HiRes</p>	<p>formato: "AAMMGG" UTC 40 sec a partire da:</p> <p>Data: 130306 Ora: 07 min.sec: 20.00</p> <p>Spettrogrammi ad alta risoluzione Cerca</p>
<p>Campionamento = 44100 Hz Durata file = 40 sec Formato = mono 16 bit Compressione = <u>Lossless</u></p>	<p>3 Preleva Audio</p>	<p>formato: "GG" UTC 40 sec a partire da:</p> <p>Giorno: 06 Ora: 08 min.sec: 00.00</p> <p>Buffer sorgente audio (31 gg) Preleva</p>

Interfaccia di ricerca e download dei dati realizzata da INGV, Sez. Roma 2.

Figura 27 Interfaccia WEB. Esempio del form per l’interrogazione della stazione remota. Compilando la ricerca per data e ora, si visualizza lo spettrogramma nella risoluzione richiesta (HiRes o LoRes), si può scaricare lo spettrogramma stesso e il segmento audio corrispondente.

Per completezza d'informazione specifichiamo che l'antenna "Gaia-T" della rete INGV (Figura 28) è un'antenna attiva che sonda la componente campo elettrico della radiazione EM nello spettro compreso tra 1 e 16 kHz. Lo schema di funzionamento è analogo a quello dell'antenna elettrica che abbiamo analizzato come esempio. La finestra utile dello strumento è stata aperta intenzionalmente in un range di frequenze all'interno della P_{sup} sulla base delle osservazioni di rottura uniassiale presentate nei paragrafi 1.3.1 e 1.3.2. La lunghezza totale dell'antenna elettrica è di circa 1 m del quale 45 cm costituiscono l'elemento positivo. L'antenna è realizzata con un tubo di rame rigido saldato direttamente sul PCB della sua elettronica. In questo modo non si possono avere disturbi dovuti a vibrazioni. Il circuito è a sua volta inserito in un secondo tubo di rame collegato a terra che assicura la schermatura elettrica e costituisce un secondo elemento aereo a formare una sorta di "condensatore aperto". Il dipolo elettrico è totalmente isolato da un rivestimento in PVC. Questa configurazione è estremamente compatta, robusta e inalterabile. Dopo aver deciso "cosa" cercare e "come" cercarlo, l'ultimo problema pratico è quello di "dove" cercare: dove e come collocare l'antenna. Il principio fondamentale da rispettare è quello di trovare un sito il più possibile lontano dalla grande urbanizzazione ma al contempo dotato di rete elettrica e rete dati. Per quanto ciò non sia facile, questo requisito non è ancora sufficiente.

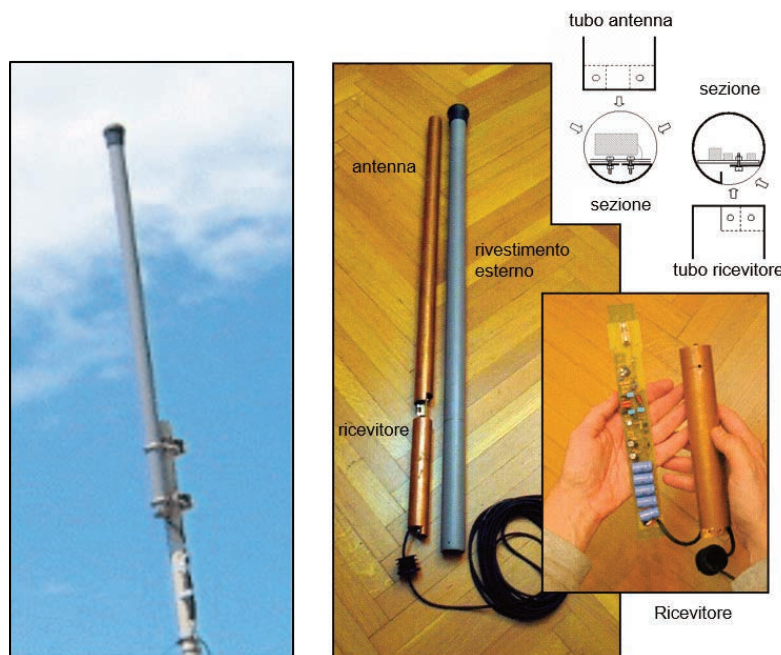


Figura 28 L'antenna elettrica della rete sperimentale dell'INGV. Si tratta di una soluzione tecnica molto compatta e robusta per un'antenna attiva in banda prevalentemente VLF. Come si può intuire dalla foto, è realizzata con materiali reperibili nei negozi di ferramenta e idraulica: comuni tubi di rame e PVC.

L'antenna dovrà essere esposta il più possibile in quota e con un campo aperto in ogni direzione azimutale. Ho avuto esperienza di installazioni fatte all'interno di casette, cantine o tunnel. Ciò non pregiudica il funzionamento di un'antenna elettrica a patto che gli edifici siano letteralmente privi di un impianto elettrico attivo e di elementi strutturali metallici (tipo le reti elettrosaldate di consolidazione antisismica). Anche una cavità naturale o un tunnel possono essere idonei se non sono sovrastati da vegetazione arborea. Un'altra regola empirica infatti è quella di mantenersi a distanza da alberi ed edifici. Gli alberi sono elementi conduttori a contatto col terreno e sotto un bosco la ricezione VLF risulta attenuata. Inoltre l'agitazione delle foglie può occasionalmente produrre elettricità statica. Qualora l'antenna fosse collocata in prossimità del

suolo, dovrà essere posta a un'adeguata distanza dagli edifici e dagli alberi, tale da rendere l'angolo di skyline il più basso possibile. La diffrazione a cui sono particolarmente soggette le basse frequenze è infatti in grado di colmare solo parzialmente eventuali zone d'ombra (o di attenuazione) causate da vicine barriere spigolose, così come dal profilo dei monti (Figura 29). Non dimentichiamo che la radiazione VLF viaggia quasi senza attenuazione soltanto nella guida d'onda atmosferica. Ultima pignoleria è trovare un clima poco umido, non soggetto a nebbie notturne o mattutine, perché la nebbia fitta riduce notevolmente la ricezione.

L'ultimo passo è l'elaborazione più fine dei dati raccolti, cioè dei segmenti audio scaricati dalle stazioni là dove l'analisi automatica aveva evidenziato dei pattern interessanti. Lo studio della forma d'onda e della distribuzione spettrale della sorgente audio si può affrontare anche con il software free disponibile per le applicazioni musicali. Per iniziare più facilmente si potrebbe impiegare una vecchia versione di Spectrogram [GRAM] di Richard Horne, per poi eventualmente provare i più impegnativi Audacity [Audacity] e Sonic [Sonic].

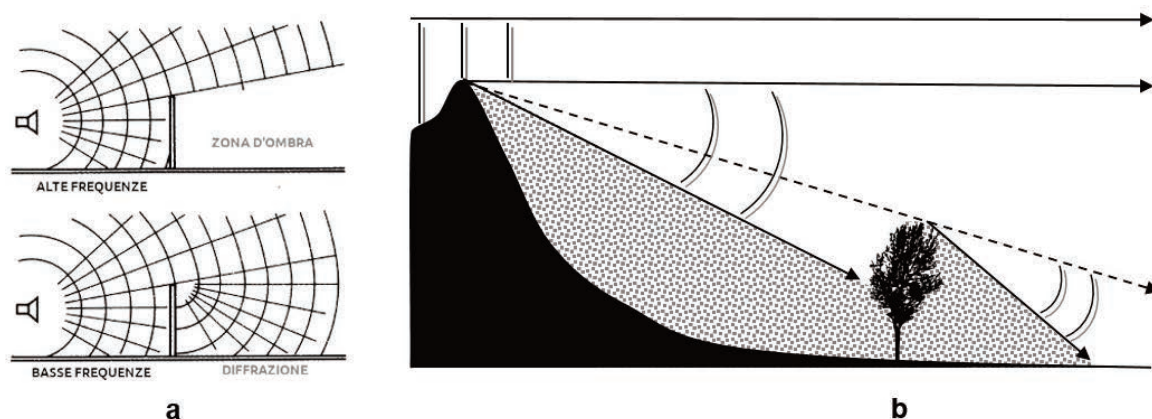


Figura 29 Diffrazione. a) Diffrazione acustica prodotta sulle basse frequenze da una “barriera sottile”. b) Analogamente, per l’onda EM a bassa frequenza, gli ostacoli spigolosi divengono una sorgente virtuale per la direzione di propagazione. Sussistono comunque zone d’ombra sotto i monti, vicino agli alberi o agli edifici. Questa onda di superficie subisce meno attenuazione dell’onda che attraversa la roccia.

3.0 Introduzione all’analisi numerica dei segnali

Un approccio scientifico allo studio di qualsiasi fenomeno richiede una conoscenza teorica di base della tecnica impiegata. D’ora in poi non si userà più un linguaggio narrativo. In questo paragrafo verranno esposti in modo estremamente sintetico e semplificato i concetti essenziali dell’analisi numerica applicata ai segnali VLF. Questa essenzialità implica che tutto ciò che viene ora esposto deve essere compreso se si vuole operare autonomamente sia il settaggio strumentale che la successiva interpretazione dei dati raccolti. In appendice si troverà una tabella riepilogativa di tutte le formule. Le didascalie delle figure forniranno esempi di applicazione pratica. Il paragrafo 3.7 fornisce alcuni esercizi di applicazione sui segnali VLF.

3.1 Conversione AD

Un segnale continuo nel tempo può essere trasformato in segnale discretizzato misurandone l’ampiezza a intervalli regolari (o *campioni*) di periodo T_c espresso in secondi (Figura 30).

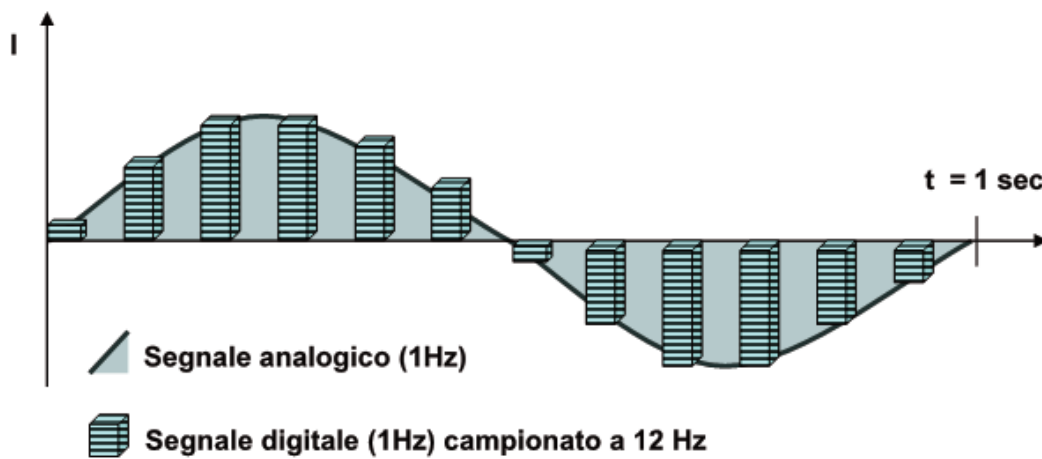


Figura 30 Segnale analogico e segnale digitale. Digitalizzare un segnale significa trasformarlo in numeri. In questo esempio un segnale che varia nel tempo in modo continuo (analogico) alla frequenza di 1 Hz viene “spezzato” in 12 campioni che lo rappresentano numericamente, poiché in ciascuno di essi viene misurata l’intensità del segnale in quel determinato istante. Questa raccolta di campioni è il “campionamento digitale” del segnale, che in questo caso si è svolto con la cadenza regolare di 12 campioni al secondo, ovvero alla “frequenza di campionamento” di 12 Hz. Si ottiene così la rappresentazione numerica del segnale analogico: una tabella costituita dalle coppie di numeri “Tempo” e “Intensità” che sono rappresentative del modo in cui il segnale stava variando nel tempo.

Questa operazione è detta *campionamento* del segnale analogico e si attua ripetutamente con una *Frequenza di Campionamento* $F_c = 1/T_c$. Questa trasformazione del segnale in una tabella numerica (T_n, A_n) è detta *conversione AD* (analogico-digitale).

Matematicamente il campionamento digitale è un filtraggio numerico che equivale al *prodotto convolutivo* della funzione segnale con una funzione “Pettine di Dirac” (PdD) di opportuna frequenza. Il PdD non è altro che un’onda quadra portata ad ampiezza infinita e frequenza pari a $\frac{1}{2}$ della Frequenza di Campionamento (F_c) desiderata. Il prodotto convolutivo produce sostanzialmente una sovrapposizione tra le due funzioni nella quale saranno presi in considerazione soltanto i valori selezionati dai denti del pettine.

Un segnale analogico con *larghezza di banda* B (cioè contenente informazioni spettrali da 0 a B Hz) può essere interamente ricostruito (Figura 31) mediante un campionamento alla frequenza $F_c = 2B$ (teorema di Shannon-Nyquist). Ne segue che la massima frequenza risolvibile dal campionamento digitale (*Frequenza di Nyquist*, F_n) corrisponde alla metà della frequenza di campionamento ($F_n = \frac{1}{2} F_c$). Poiché la F_c determina la massima frequenza risolvibile, di fatto può compromettere la visibilità delle informazioni originarie (difetto noto col termine di “aliasing”). La Tabella 4 riporta i valori di comune impiego nelle normali schede sonore per PC.

3.2 Aliasing

Un corretto campionamento deve tener conto della natura del segnale analogico da campionare. Per un dato valore di F_c , il segnale analogico deve essere filtrato passa-basso (PB) prima del campionamento con una soglia di PB $\ll F_n$ oppure viceversa, per un dato segnale con larghezza di banda B , il campionamento deve essere effettuato con $F_c \gg 2B$.

Al contrario, un sottocampionamento (campionamento a $F_c < 2B$), produrrà un segnale campionato di banda $B_1 < B$. In un certo senso questo avrà prodotto un filtraggio Passa-Basso, se non fosse che le componenti spettrali di frequenza maggiore di B , cioè quelle “non passate”,

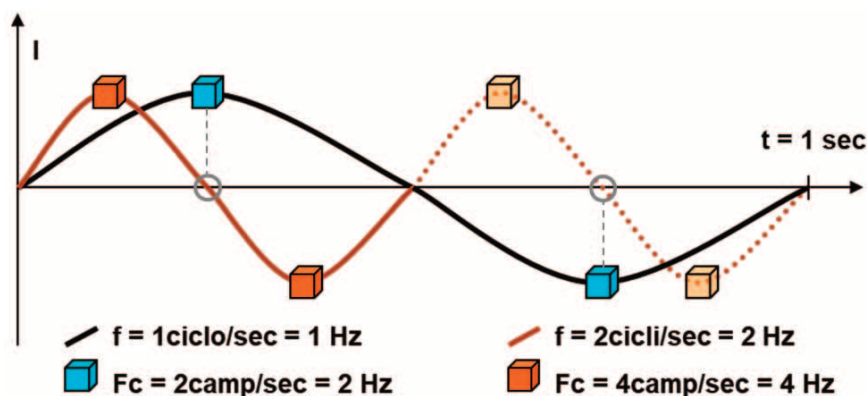


Figura 31 Frequenza di Nyquist. La curva nera è un segnale analogico alla frequenza di 1 Hz. La figura mostra che esso può essere ben rappresentato raccogliendo 2 campioni al secondo (blu), ovvero alla frequenza di campionamento di 2 Hz, perché rappresenta la distanza tra il massimo e il minimo dell'oscillazione. Conoscendo solo questi due campioni possiamo comunque prevedere l'intensità che il segnale potrà avere in futuro e in qualsiasi istante intermedio. Una frequenza di campionamento maggiore fornisce maggiori informazioni ma non è indispensabile per identificare un segnale che oscilla a 1 Hz. Consideriamo ora la curva rossa, che descrive un segnale analogico oscillante alla frequenza di 2 Hz. Lo stesso campionamento a 2 Hz (blu) ci fornisce stavolta un solo campione per ciclo e al ciclo successivo restituisce lo stesso identico valore (cerchi grigi, in questo caso addirittura ci darebbe valore zero). Ciò è insufficiente a descrivere l'oscillazione del segnale. Un campionamento a 4 Hz (rosso) restituisce la minima informazione utile perché di nuovo coglie la distanza tra un massimo e un minimo. Anche qualora i punti di campionamento fossero sfasati rispetto a Max e Min del segnale, essi forniscono comunque la distanza che separa una fase completa del segnale e ci consente di prevederne l'andamento sapendo che il suo ciclo è composto necessariamente da due fasi opposte. In questo modo abbiamo visualizzato come il doppio della frequenza del segnale sia la frequenza minima necessaria per poter descrivere quel segnale con un campionamento digitale. La minima frequenza utile per eseguire un corretto campionamento corrisponde al doppio della frequenza più alta tra quelle contenute nel segnale da campionare. Al contrario, data una frequenza di campionamento, la massima frequenza leggibile nel segnale campionato è detta "Frequenza di Nyquist" e corrisponde alla metà della frequenza di campionamento.

Set Scheda Sonora	F_c effettiva	$F_n = F_{max}$
5,5 k	5512,5 Hz	2756,25 Hz
11 k	11025 Hz	5512,5 Hz
22 k	22050 Hz	11025 Hz
44 k	44100 Hz	22050 Hz
88 k	88200 Hz	44100 Hz
96 k	96000 Hz	48000 Hz
192 k	192000 Hz	96000 Hz

Tabella 4 Impostazione della frequenza di campionamento nella scheda sonora dei PC. In questa tabella sono riportati i valori tipici indicati nei settaggi (ad es. sul software di sistema), la loro effettiva frequenza di campionamento (F_c) e la corrispondente frequenza di Nyquist (F_n), ovvero la banda utile (F_{max}). Le schede più moderne consentono un'ampia gamma di frequenze ma il classico campionamento di "qualità CD" è a 44,1 kHz (caratteristiche marcate in grassetto). Qualunque scheda può essere impostata via software per campionare a vari livelli più bassi, di frequenza progressivamente dimezzata. Se dunque si desidera campionare un singolo segnale di 3 kHz o una voce radiofonica il cui suono non supera la frequenza di 5 kHz, si deve impostare un campionamento uguale o maggiore a "11K", corrispondenti al campionamento reale di 11,025 kHz, che consentiranno di registrare una banda di frequenze fino a 5,512 kHz. Un campionamento più alto restituirà una banda audio più larga al prezzo di un maggiore "peso" digitale del file di dati acquisito. È evidente che per il monitoraggio della banda VLF il classico campionamento a "44k" è davvero il minimo indispensabile.

avevano come attributo una certa quantità di energia che contribuiva all'energia totale del segnale analogico. Ora questa energia è ancora presente nel segnale campionato ma risulterà sovrapposta ai valori di intensità (ampiezza) delle frequenze più basse di F_c contenute in B1. Ciò avviene in modo speculare rispetto alla F_n , ovvero contaminando frequenze via via sempre più basse tanto più la frequenza originaria sarà stata alta rispetto alla F_n . Questa contaminazione, rilevabile solo da un'analisi spettrale, è l'effetto materiale dell'Aliasing, fenomeno che deve essere scongiurato all'atto del campionamento (Figura 32).

Livelli di intensità (n)	Risoluzione [bit]	Dinamica [dB]	Qualità audio
2	1		
4	2		
16	4		
256	8 (=1Byte)	48	"Telefonia"
65536	16	96	"CD"
16777216	24	144	"DVD"

Tabella 5 Risoluzione del campionamento e sue conseguenze. La risoluzione del segnale digitale dipende dal numero di intervalli (n) in cui è stata suddivisa la scala di intensità all'atto del campionamento. Questo valore è tecnicamente incrementabile seguendo la potenza di 2 (colonna "Livelli di intensità"). La tabella evidenzia la risoluzione di 8 bit che corrisponde all'unità di misura della capacità di memoria (1 Byte). L'impostazione standard per il campionamento di un segnale audio sulla scheda sonora del PC (qualità CD) è alla risoluzione di 16 bit. Ciò significa che l'intensità del segnale di ogni campione è tipicamente misurata su una scala composta da 65536 intervalli e la sua memorizzazione incrementerà di 2 Byte la dimensione complessiva del file di dati. La risoluzione del campionamento determina anche l'intervallo dinamico ovvero il rapporto tra la massima intensità di segnale che il sistema può supportare senza saturarsi e il rumore di fondo (SNR). Questo valore si esprime in dB e tanto più sarà alto, tanto minore risulterà il rumore di fondo (indipendentemente da quello in ingresso) e tanto maggiore sarà la fedeltà audio della registrazione digitale.

3.3 Risoluzione del segnale digitale

Matematicamente il segnale digitalizzato è la sequenza numerica dei valori di intensità (A) di segnale rilevati rispettivamente nell'istante $t = 1/F_c \cdot n_c$, dove n_c è il numero del campione ovvero di quel valore ennesimo di A. La *risoluzione del campione* R rappresenta la quantità di informazione (bit, [b]) codificata in un singolo campione ed è legata al numero di intervalli discreti (n_i) in cui è stata suddivisa a priori la scala di ampiezza ($R = \log_2 n_i$). Esempi: 256 campioni = 8 b; 65536 = 16 b (Tabella 5).

Quando l'oscillazione elettrica viene campionata, ad ogni campione viene assegnato il valore di ampiezza più vicino all'ampiezza del segnale analogico in quell'istante. Maggiore è la risoluzione, più precisa è la misura. Esempi: su una scala di 5V, 8 bit equivalgono a $5/256 = 0,0195$ V per ogni intervallo di discretizzazione; ovvero a una precisione di lettura di quasi 20 mV. Un segnale di 5 mV non viene letto. Un segnale di 25 mV non viene distinto da uno di 20 mV perché il gradino superiore è 40 mV. Con una risoluzione di 16 bit la lettura dello stesso campione raggiunge una precisione di $5/65536 = 0.000076$ V, ovvero circa 80 μ V. Livelli di 5, 20, 25 e 40 mV vengono tutti distinti tra loro. Per un corretto campionamento, questo valore deve essere inferiore al limite di sensibilità dello strumento che ha fornito il segnale analogico.

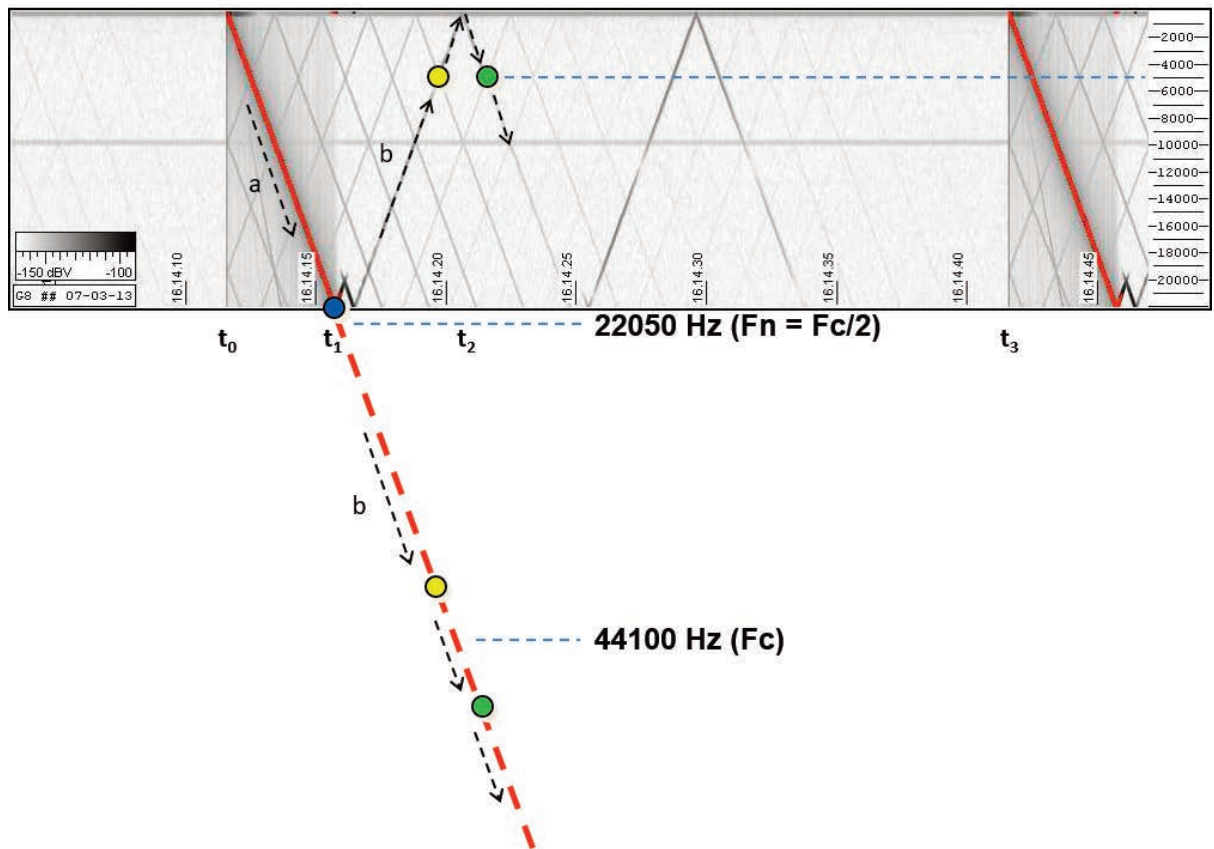


Figura 32 Aliasing. Facciamo una prova pratica usando una comune scheda sonora che campiona alla frequenza di 44100 Hz. Con un generatore esterno immettiamo all'ingresso un segnale con modalità "sweep" impostata per erogare un'intensità costante e una frequenza in crescita lineare. Avviamo sulla scheda sonora un software di analisi spettrale (per conformità è stato usato proprio Spectrum Lab impostato per l'acquisizione VLF, con frequenza crescente verso il basso) che mostrerà l'evoluzione nel tempo (asse X) della traccia di questo segnale mentre deriva in frequenza (asse Y; lo 0 è in alto). La scala delle frequenze è stata impostata su una banda di 22000 Hz, che è compatibile con l'analisi perché non supera la massima frequenza utile di 22050 Hz ($F_c/2$).

Che cosa accadrà quando il segnale in ingresso supererà questa frequenza? Al tempo t_0 il segnale viene immesso alla frequenza di 0 Hz. Con il passare del tempo, per tutto il tratto a, la frequenza cresce e la traccia del segnale si sposta verso il basso lungo la linea rossa continua. Le altre linee parallele e progressivamente sempre più chiare sono lo spettro delle armoniche di questo segnale. Al tempo t_1 la frequenza in ingresso raggiunge i 22000 Hz (punto blu). E l'ultima volta che osserviamo sullo spettrogramma un segnale reale. Se la

frequenza continua ad aumentare si troverà ad essere fuori scala ma ugualmente il segnale sarà stato campionato. Si trova però ad essere sottocampionato e non potrà essere risolto dall'analisi spettrale. Tuttavia la sua energia è stata acquisita ed andrà a "sporcare" i contributi in ampiezza delle altre frequenze dello spettro utile. Si osserva infatti che lungo il tratto b una traccia è rientrata nello spettrogramma percorrendolo in salita, virtualmente a partire dalla direzione della frequenza di 22050 Hz. Anche in questo caso le linee parallele e progressivamente sbiadite sono il suo spettro di armoniche. Questa traccia che rientra non è un segnale reale, ha un'intensità minore ma si somma ai segnali dello sfondo. All'istante t_2 la traccia fantasma tocca il limite inferiore dello spettro (che nel nostro caso è in alto) e da qui si "riflette" virtualmente verso il basso. Questo punto è speculare alla F_c rispetto alla linea della F_n (quindi, in questo caso, più o meno rispetto al limite di banda dello spettro). Il punto giallo ad esempio non è reale ma rappresenta l'analogo punto giallo fuori scala, speculare rispetto alla F_n . Una cosa da notare è che riscendendo, con sempre minore intensità, passa per il punto marcato in verde che, nello spettro, mostra di avere la stessa frequenza del punto giallo. In realtà il punto blu era l'ultimo oggetto reale che abbiamo osservato. I punti giallo e verde, avendo la stessa distanza dall'origine, si mostrano come due oggetti alla stessa frequenza (in questo caso 5000 Hz) in tempi diversi ma in realtà sono i "fantasmi" dei loro omologhi punti fuori scala, che sono speculari rispetto alla frequenza

di campionamento. Nell'esempio i cicli proseguono analogamente fino a t_3 , dove il ciclo di sweep del segnale in ingresso è stato fatto ripartire da 0 Hz. Analogamente a quanto osservato, se fosse entrato nella scheda sonora un segnale di frequenza fissa e pari a 44,1 + 5 kHz (punto verde) o 44,1 - 5 kHz (punto giallo), questo sarebbe comunque comparso nello spettrogramma alla frequenza fantasma di 5 kHz. Questo perché ha superato la metà della frequenza di campionamento, che è la massima osservabile senza equivoci. Da qui il termine aliasing o, in italiano, "equivocazione". Se però, prima dell'ingresso nella scheda sonora, il segnale sorgente fosse stato filtrato con un passa-basso adatto a non oltrepassare il limite dei 22050 Hz se non con un'esigua ampiezza, la quantità di segnale sottocampionato sarebbe stata talmente esigua da non produrre una falsa lettura. La regola generale e sempre valida è: "filtrare basso e campionare alto".

La *risoluzione del campionamento* R_c determina la quantità di informazioni codificate in un secondo [bit/s]. $R_c = F_c \cdot R = F_c \cdot \log_2 n$. Considerando che, per ogni campione, 8 bit pesano 1 Byte (B) sul supporto digitale, dal punto di vista informatico il "peso" del file dipenderà dalla quantità totale di informazione acquisita, ovvero dalla risoluzione R del campione in bit, dalla frequenza di campionamento F_c e dal tempo di registrazione t eseguito su un numero N di canali. Il file salvato occuperà Bytes = $(\text{bit}/8 \cdot F_c \cdot N \cdot t)$ sul supporto di memorizzazione.

Nc	F _c = 44100 Hz		F _c = 22050 Hz	
	Fr	Tr	Fr	Tr
64	689	0,001	345	0,003
128	345	0,003	172	0,006
256	172	0,006	86	0,012
512	86	0,012	43	0,023
1024	43	0,023	22	0,046
2048	22	0,046	11	0,093
	Hz	s	Hz	s

Tabella 6 Risoluzione dell'analisi spettrale. Le risoluzioni in frequenza e nel tempo sia dello spettro che dello spettrogramma dipendono da una stessa coppia di parametri. Quello fondamentale è la frequenza di campionamento (F_c), quindi una volta che il segnale è stato campionato si determina il primo vincolo. Il secondo parametro è il periodo di analisi (T_a), cioè l'intervallo di tempo rappresentato nello spettro o dalla singola colonna grafica dello spettrogramma. Solitamente l'input del software di analisi non è T_a ma il numero di campioni (N_c) su cui esegue il calcolo FFT, infatti $T_a = n \cdot F_c$. Ecco quindi che il primo parametro è appunto F_c e il secondo è teoricamente T_a ma tecnicamente n_c . L'analisi spettrale darà come risoluzione nel tempo proprio $T_r = T_a$ e per quella in frequenza il suo inverso: $F_r = 1/T_a$. Se si vuole risolvere eventi transienti, T_a deve durare molto meno del transiente e/o dell'intervallo tra i transienti. Tuttavia, essendo F_r il suo inverso, più alta è la risoluzione nel tempo e più bassa sarà la risoluzione in frequenza osservabile in quell'intervallo di tempo. La tabella mostra come all'aumentare di N_c (il software tipicamente incrementa al raddoppio) la risoluzione nel tempo si riduce mentre aumenta progressivamente la risoluzione in frequenza. Nella tabella si osserva anche che dimezzando la F_c , a parità di N_c , le coppie dei valori di risoluzione scalano di un livello. Se si mira ad avere la massima risoluzione nel tempo bisogna pensare subito ad eseguire sul segnale la massima frequenza di campionamento. Dove T_r non sia un problema si può risparmiare sulla F_c con il vantaggio di avere un flusso di dati meno pesante. In conclusione possiamo trarre la seguente regola generale: in base agli obiettivi che si perseguono, occorre saper valutare a priori il necessario equilibrio tra risoluzione nei tempi e nelle frequenze e di conseguenza, se si è ancora in fase di progetto, si deve preventivamente valutare la F_c , mentre su un segnale già campionato non resta che impostare opportunamente il parametro N_c dell'analisi spettrale. Questo nella teoria. Nella pratica con le schede sonore del PC, come abbiamo visto la F_c è appena sufficiente ad evitare aliasing sui segnali VLF, quindi va impostata al livello tipico di 44k (o superiore) e non resta che modulare il valore di N_c per adattarsi alla tipologia di segnale da discriminare.

3.4 Analisi spettrale

Qualunque funzione, per quanto irregolare si presenti, potrà sempre essere scomposta in una somma di funzioni sinusoidali aventi ciascuna una propria ampiezza e una propria frequenza (teorema di Fourier, valido per tutti i segnali fisici).

La *Trasformata di Fourier*, eseguita sul segnale per un certo periodo T_a , restituisce su una scala di frequenze la componente di intensità A con cui ciascuna frequenza F aveva contribuito al segnale iniziale (Figura 33). La *Trasformata Veloce di Fourier (FFT)* è un algoritmo ottimizzato per calcolare la *Trasformata Discreta di Fourier* sul segnale digitale. Si applica su una serie di campioni il cui numero (N_c) caratterizza il periodo dell'analisi: $T_a = N_c/F_c$ [s] ovvero la finestra temporale che viene analizzata. La FFT restituisce la scomposizione dei contributi di ampiezza che ciascuna frequenza ha fornito al valore complessivo di intensità che il segnale sorgente manifestava in quell'arco di tempo T_a . In questo caso l'inverso di questo periodo caratterizza la risoluzione in frequenza $F_r = 1/T_a$ della FFT, ovvero il valore in Hz della più bassa frequenza risolta e allo stesso tempo l'ampiezza di ciascun intervallo nella scala delle frequenze.

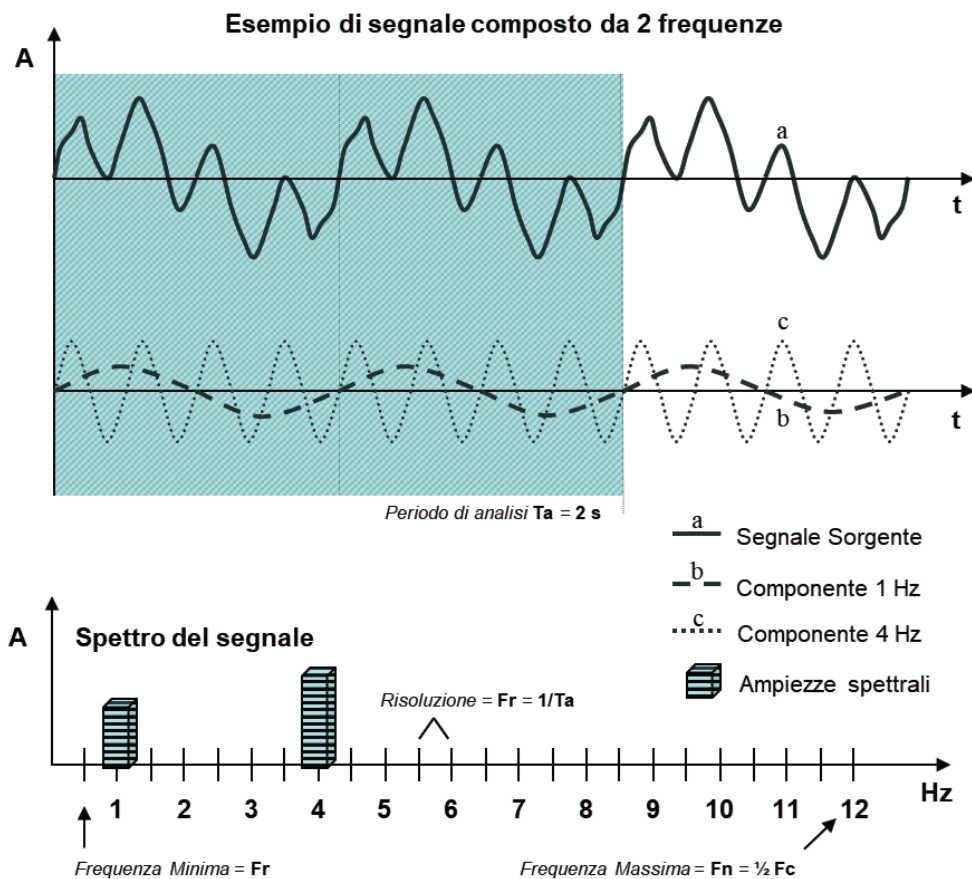


Figura 33 Spettro del segnale. Il segnale complesso (a) è composto dalla somma delle due sinusoidi pure (b) e (c).

Per il Teorema di Fourier qualunque segnale irregolare può essere scomposto in una somma di sinusoidi pure. Questa scomposizione si opera con la *Trasformata di Fourier* che a partire dalla sequenza numerica del segnale campionato (Tempo-Ampiezza) fornisce la sequenza numerica dello spettro del segnale (Frequenza-Ampiezza).

Per una discreta serie di campioni (Periodo dell'analisi) si passa così dal "dominio dei tempi" (grafico in alto) al "dominio delle frequenze" (grafico in basso). La frequenza più alta leggibile sullo spettro è quella di Nyquist, cioè la metà della frequenza di campionamento. La frequenza più bassa leggibile sullo spettro corrisponde all'intervallo che separa le graduazioni della scala, ovvero alla "Risoluzione in Frequenza" dello spettro stesso, che a sua volta è pari all'inverso del "Periodo di Analisi".

La più alta frequenza risolvibile è ovviamente la frequenza di Nyquist (caratterizzata dalla frequenza di campionamento e quindi dal periodo di ciascun campione: $F_n = F_c/2 = 2/T_c$). Ne segue che la scala delle frequenze va da F_r a F_n ed è suddivisa in un numero di intervalli pari a F_n/F_r , ad ognuno dei quali è attribuito il valore di intensità con cui quella frequenza ha contribuito all'intensità totale del segnale sorgente. Questo diagramma F rispetto ad A rappresenta lo "spettro" del segnale analizzato nel periodo T_a . L'analisi può essere ripetuta ciclicamente ogni periodo T_a per rappresentare, su un diagramma a tre assi detto "spettrogramma", la variazione nel tempo della distribuzione spettrale delle ampiezze. Per praticità questo si rappresenta solitamente come diagramma bidimensionale di F rispetto a T con i valori di ampiezza espresse in tonalità colore.

La risoluzione nel tempo dello spettrogramma è $T_r = T_a$ e la risoluzione in frequenza resta $F_r = 1/T_a$. In conclusione, i parametri di un diagramma di analisi spettrale sono condizionati in primo luogo dal periodo di campionamento del segnale (ovvero dalla frequenza di campionamento $F_c = 1/T_c$) e di conseguenza dal periodo di analisi T_a (Figura 34). La Tabella 6 mostra come impostare materialmente i parametri di analisi per la scheda sonora di un PC.

3.5 Frequenze armoniche

Un segnale a *onda quadra* è composto da un'alternanza regolare di due livelli di tensione⁵³. Il tempo di transizione dal livello basso a quello alto è detto *fronte di salita* e analogamente da quello alto a quello basso è detto *fronte di discesa*. Il *duty cycle* dell'onda (o *ciclo di lavoro*, D) è il rapporto tra la durata del segnale "alto" (τ) e il periodo totale del segnale (T). $D = \tau/T$, come raffigurato in Figura 35.

Un segnale impulsivo costituito da un singolo dente di onda quadra produce simultaneamente un numero infinito di frequenze *armoniche* la cui ampiezza diminuisce con la distanza dalla frequenza principale. Il valore di ogni frequenza armonica è un multiplo intero della *frequenza fondamentale*. Ad esempio la *seconda armonica* è di frequenza doppia, la *terza armonica* è di frequenza tripla. Questo vale per qualsiasi forma d'onda non perfettamente sinusoidale ma l'onda quadra è quella che produce lo *spettro di armoniche* più esteso (Figura 36). Nel caso particolare di un'onda quadra avente *duty cycle* del 50%, essa risulterà composta da una fondamentale sinusoidale della stessa frequenza e dalle sole armoniche di numero dispari (III; V; VII...). Queste armoniche avranno rispetto ad essa un'ampiezza pari alla frazione del loro numero: la terza armonica avrà ampiezza di $1/3$, la quinta armonica l'ampiezza di $1/5$ e così via. L'analisi spettrale di questo segnale darà esattamente questo risultato. Il teorema di Fourier afferma che qualunque oscillazione complessa può essere scomposta in una somma di segnali sinusoidali puri. Nel caso di un'oscillazione sinusoidale pura essa non ha bisogno di una somma di sinusoidi per assumere la forma sinusoidale, dunque nel suo caso non esiste una componente armonica.

3.6 Scala logaritmica contro risoluzione matematica.

Il pettine dei picchi di uno spettro di armoniche è un buon esempio per testare l'utilità di una scala logaritmica. In una scala logaritmica a base 10 i segni di graduazione principale sono equidistanti ma avanzano in ragione di potenze di 10, ad es. 1, 10, 100..., mentre i segni di graduazione secondaria (1,2,3... 10, 20, 30... 100, 200, 300...) non sono equidistanti (non è *lineare*, appunto). Una scala logaritmica può rappresentare solamente numeri reali positivi. Quando l'insieme dei valori da rappresentare su una scala numerica spazia su un intervallo molto

⁵³ È tipicamente il segnale elettrico utilizzato nei circuiti digitali dove i livelli corrispondono ai due stati logici 0 e 1.

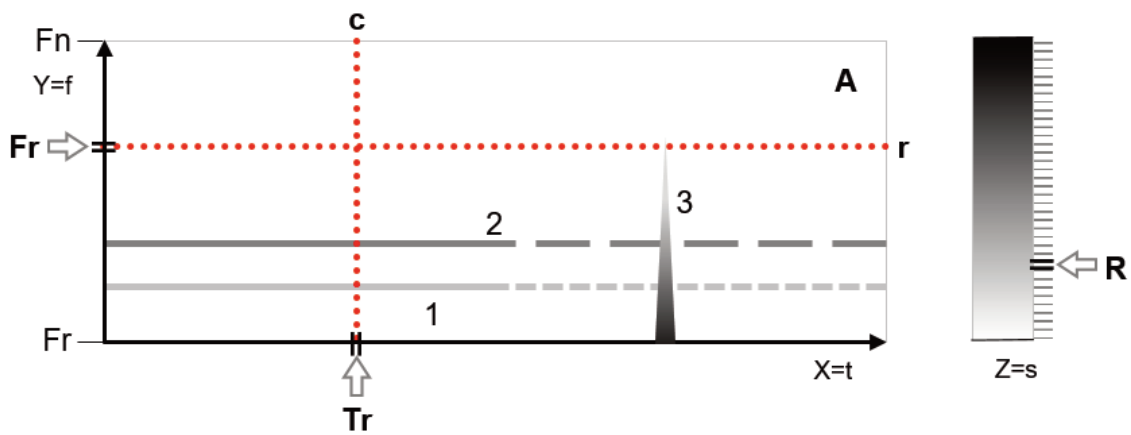


Figura 34 Spettrogramma del segnale. Assi: X = tempo; Y = frequenza; Z = intensità (s). Ogni colonna (c) dello spettrogramma rappresenta un singolo spettro con le ampiezze del segnale espresse in tonalità di grigio (a fianco la legenda della scala Z). Di conseguenza l'intera area dello spettrogramma rappresenta la variazione nel tempo della distribuzione spettrale delle ampiezze di un segnale analizzato ciclicamente con il medesimo periodo di analisi (T_a). Confrontare con la Figura 25c per avere anche un punto di vista "qualitativo". Questo schema è più tecnico ma pur essendo estremamente semplificato consente di osservare molte cose. Essendo composto da spettri FFT, la massima frequenza che si può visualizzare sulla scala dello spettrogramma sarà sempre la metà della frequenza di campionamento, cioè la "Frequenza di Nyquist" (F_n). La frequenza minima che comparirà sulla scala corrisponderà invece alla "Frequenza di risoluzione" (F_r). Essendo questa la risoluzione in frequenza, ogni riga (r) dello spettrogramma esprime una larghezza di banda F_r e di conseguenza ogni pixel di una singola colonna grafica (c) rappresenta un incremento in frequenza di " F_c " Hertz. La risoluzione nel tempo (T_r) dello spettrogramma equivale invece alla durata di un singolo spettro, ovvero al periodo di analisi (T_a) della FFT. Ogni colonna (c) dello spettrogramma ha quindi una durata T_a secondi e di conseguenza ogni pixel di una singola riga (r) ha la durata di T_a secondi. Oltre agli assi X (Hz) e Y (secondi) abbiamo un terzo asse Z che rappresenta l'intensità del segnale attraverso una scala di colore. In un certo senso è un diagramma 3D in cui la terza dimensione è il colore. L'intensità del segnale (s) può essere rappresentata in μV o in dB (espressione logaritmica che compatta la scala)**.

La risoluzione della scala di intensità è la risoluzione (R) con cui è stato campionato il segnale. In sostanza ogni singolo pixel, attraverso il suo colore, rappresenta la quantità di energia rilevata nel segnale in una determinata banda larga F_c Hertz in un determinato istante largo T_a secondi. Stiamo letteralmente "guardando" un suono. Il numero di colonne (n_c) contenute nello spettrogramma dipende dall'estensione "t" della finestra di osservazione ($n_c = t / T_a$). In realtà è la finestra temporale (t) monitorata dallo spettrogramma che è data dal numero di colonne, ovvero dal numero di spettri di durata T_a che andranno a comporre lo spettrogramma ($t = n_c \cdot T_a$). Ogni riga (r) dello spettrogramma rappresenta la variazione nel tempo dell'ampiezza del segnale su una determinata banda di frequenza. Lo "spessore grafico" di ogni riga equivale a una banda larga quanto la risoluzione in frequenza (F_r). Ne segue che il numero di righe (n_r) dello spettrogramma è dato dal numero di intervalli di discriminazione contenuti nella scala di frequenza ($n_r = F_n / F_r$). In questo grafico esemplificativo il segnale analizzato ha prodotto tre "pattern". Due tracce orizzontali (1 e 2) che raffigurano la scomposizione di due sorgenti distinte su frequenze diverse. I diversi toni di grigio indicano che i rispettivi segnali hanno intensità diverse: quello più scuro (2) è più forte di quello più chiaro (1). Il grafico mostra anche che dopo un certo tempo le due sorgenti monocromatiche da continue sono divenute discontinue (i tratteggi). Il segnale (1) sta mostrando una frequenza di pulsazione più alta del segnale (2). Sono segnali inventati ma potrebbero essere due stazioni radio. La traccia (3) invece è un segnale transiente caratterizzato da un breve impulso con una larga estensione spettrale la cui intensità è massima alle basse frequenze e si riduce all'aumentare della frequenza. Questo esempio è simile ai "Pops" del rumore di fondo VLF. Va ricordato in fine che l'algoritmo che compone gli spettri nello spettrogramma potrebbe anche elaborare una media di n spettri per ogni singola colonna grafica. In questo caso si avrebbe nel tempo una "risoluzione grafica" più bassa della "risoluzione matematica", mentre la risoluzione in frequenza resta invariata.

**Espressione logaritmica che compatta la scala, similmente alla magnitudo sismica. Vedi i paragrafi 7.1 e 7.5 in appendice.

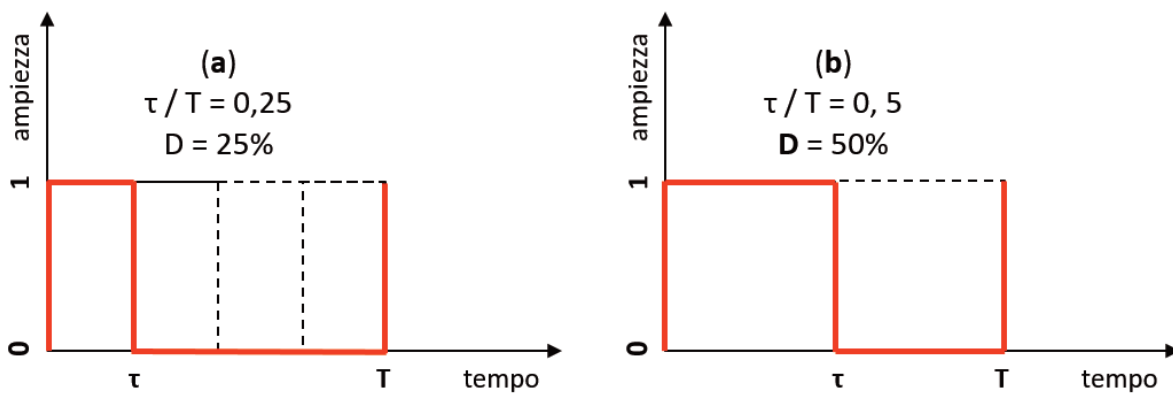


Figura 35 Duty cycle dell'onda rettangolare. (a) Un ciclo di lavoro D pari al 25% del ciclo di oscillazione. (b) Un'onda rettangolare con D = 50%.

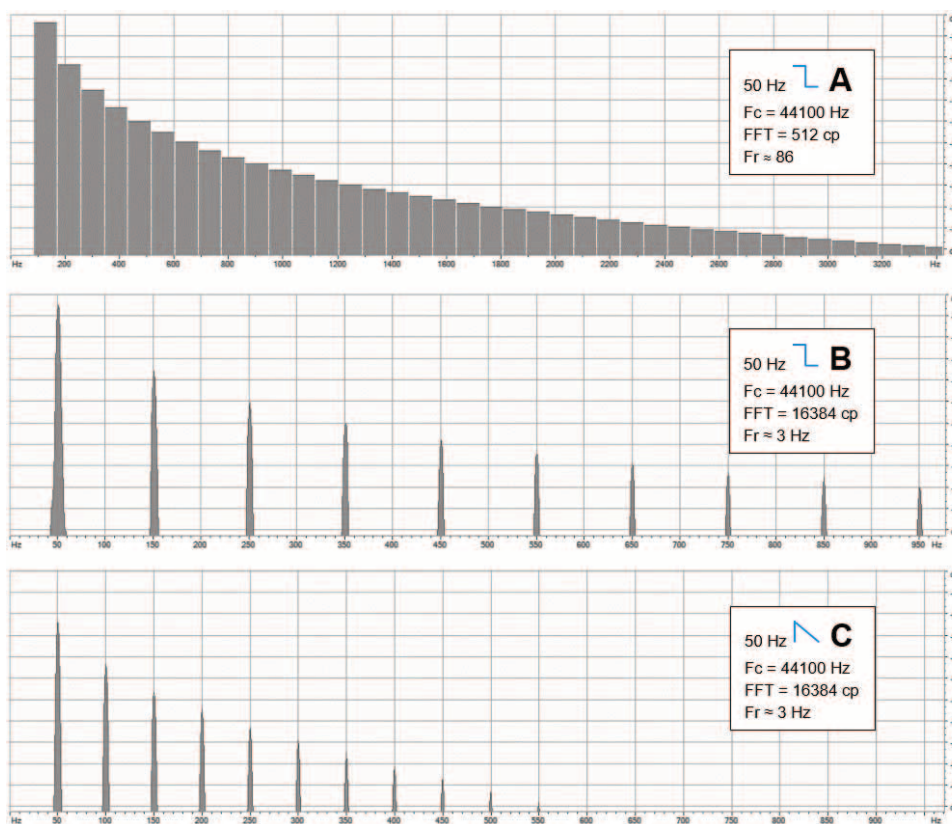


Figura 36 Spettri di armoniche. Il più tipico e fastidioso radiodisturbo di origine industriale captabile sulle basse frequenze radio è il segnale a 50 Hz emesso dalla rete elettrica. In queste figure dei segnali a 50 Hz sono stati generati sinteticamente con campionamento di 44,1 kHz. Lo spettro (A) è di un'onda quadra con duty cycle del 50%. L'analisi FFT è stata eseguita su 512 campioni e mostra quindi una risoluzione di circa 86 Hz ($Fr = Fc / Ncp$). Con questa risoluzione il picco fondamentale di 50 Hz non può essere risolto ma si osserva un esteso spettro di armoniche che tende ad attenuarsi al crescere della frequenza (qui è stata zoomata la porzione bassa della scala, che sarebbe arrivata a 22 kHz). Lo spettro (B) è stato ottenuto sullo stesso segnale con un'analisi su 16384 campioni, raggiungendo quindi la risoluzione di circa 3 Hz. Adesso si risolvono distintamente la fondamentale di 50 Hz e le sue armoniche e si osserva che ci sono soltanto le armoniche dispari: III = 150 Hz, V = 250 Hz, VII = 350 Hz e così via. Lo spettro (C) è un'onda triangolare processata ancora su 16384 campioni. Questa volta le armoniche sono tutte ma si attenuano più velocemente. Un segnale sinusoidale avrebbe mostrato soltanto la frequenza fondamentale. Per questi motivi anche un segnale "puro" nella forma e costante nella frequenza non è quasi mai monocromatico ma accompagnato da un "coro" di armoniche.

esteso, la rappresentazione logaritmica consente di confrontare valori distanti diversi ordini di grandezza. L'uso di questa rappresentazione può migliorare la risoluzione di lettura grafica nella parte più bassa di una scala di misura ma solamente se la risoluzione matematica consente realmente di risolvere quelle misure. La Figura 37 mostra un esempio pratico sulla scala delle frequenze per poter fare un confronto diretto con le armoniche della Figura 36 ma lo stesso discorso sarebbe stato valido anche sulla la scala dei tempi.

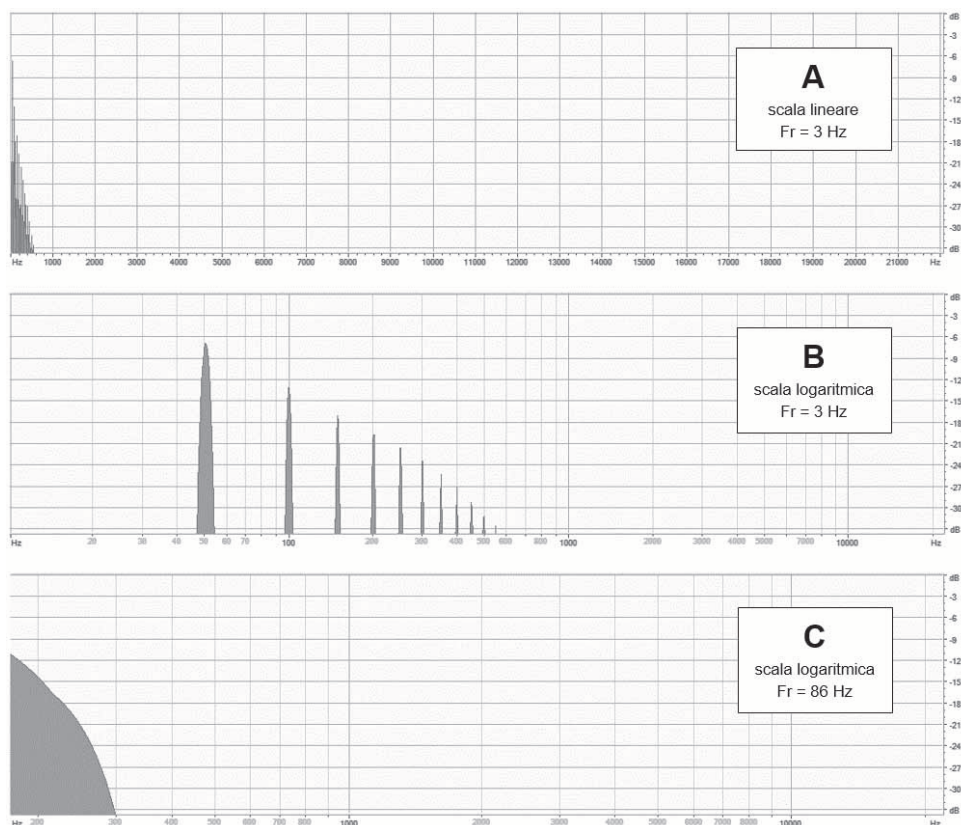


Figura 37 Relazione tra scala logaritmica e risoluzione matematica. In questi spettri si vede lo stesso segnale della Figura 35-C (onda triangolare a 50 Hz con risoluzione di 3 Hz) visto sull'intera estensione spettrale di 22,05 KHz che è consentita dal campionamento a 44,1 kHz. Nel grafico (A) lo spettro armonico dei 50 Hz, che si esaurisce nella regione al di sotto di 1 kHz, è visto piuttosto compresso. Nel grafico (B) la stessa estensione spettrale è rappresentata su scala logaritmica e in questo modo si possono distinguere le 11 armoniche che si vedevano nello zoom della Figura 35-C. In realtà la risoluzione matematica è sempre di 3 Hz ed è questo che ci ha consentito di osservare la fondamentale di 50 Hz. Con un'analisi su 512 campioni la risoluzione in frequenza è di 86 Hz: troppo bassa per risolvere il picco di 50 Hz e le sue armoniche, spaziate di 50 Hz l'una dall'altra. Il grafico (C) mostra che il risultato non migliorerebbe nemmeno su scala logaritmica.

3.7 Esempi di applicazione pratica

Calcoliamo il flusso di dati atteso dal monitoraggio della “Porzione Superiore” delle basse frequenze radio campionando con la scheda sonora di un PC. La frequenza di campionamento dovrà essere preferibilmente la massima consentita dalla scheda, quindi facciamo un esempio con il classico standard “qualità CD”, ovvero “44 kHz” a 16 bit.

Dati di partenza:

Frequenza di campionamento	$F_c = 44100$	Hz
Risoluzione del campione	$R = 16$	bit
Risoluzione del campionamento	$R_c = F_c \cdot R = 705.6$	kbit/s

Considerando che:

8 bit = 1 Byte
Secondi in 1 ora = 3600
Secondi in 1 giorno = 86400

Calcolo del flusso di dati:

Streaming	$R_c/8 = 88200$	B/s
Dati salvati in 1 ora	$88200 \cdot 3600 \approx 318$	MB
Dati salvati in 1 giorno	$88200 \cdot 86400 \approx 7.6$	GB
Dati salvati in 1 mese	$88200 \cdot 86400 \cdot 31 \approx 236.2$	GB

Conseguenze:

Questo flusso di dati non consente facilmente la trasmissione diretta da luoghi remoti ma anche l'archiviazione locale è critica, se non per un breve periodo di autonomia. Un modem analogico "56k" non è sufficiente alla trasmissione continua dei dati. Se l'hard-disk non è di ultima generazione potrà supportare l'archiviazione dei dati solo se ci si limita ad un buffer ciclico di un mese.

Osservazioni:

Ciò che ha inciso sul flusso dei dati sono gli alti valori di frequenza di campionamento e risoluzione del campione nella modalità di "Qualità CD". Accontentarsi di una risoluzione di 8 bit dimezzerebbe il flusso di dati. Questo però farà crollare il numero di potenziali colori nella gamma cromatica dello spettrogramma da 65536 a 256 (vedi tab. 5). Una frequenza di campionamento più bassa non è compatibile con la P_{sup} ma nel caso della P_{inf} si potrebbe anche scegliere questa soluzione per ridurre il flusso di dati fino a 16 volte pur mantenendo una $F_n < 1\text{kHz}$ (vedi tab. 4). Questo però determinerà (lo vedremo tra poco) una bassa risoluzione in frequenza nello spettrogramma che sarà compensabile soltanto con una perdita di risoluzione nel tempo.

Per questo stesso segnale calcoliamo ora le caratteristiche che avrà uno spettrogramma della durata di 1 ora ottenuto impostando un algoritmo FFT per un'analisi su 512 campioni.

Dati di partenza:

Frequenza di campionamento	$F_c = 44100$	Hz
Numero di campioni analizzati	$N_c = 512$	
Durata del processo	$d = 3600$	s

Considerando che:

Periodo di analisi	$T = n/F_c \approx 0,0116$	s
Frequenza di Nyquist	$F_n = F_c/2 = 22500$	Hz

Calcolo delle caratteristiche:

Frequenza massima (= F_n)	$F_n \approx 22$	kHz
Risoluzione (Frequenza minima)	$1/T \approx 86$	Hz
Risoluzione nel tempo (= T_r)	$T \approx 0,01$	s

Numero di righe
Numero di colonne

$$F_n/F_r = 22000/86 = 255$$
$$d/Tr = 3600/0,0116 = 310344$$

Conseguenze:

La scala delle frequenze sarà composta da 255 intervalli (quindi ugual numero di righe) a passi di 86 Hz (Fr). La frequenza massima sarà 22 kHz (Fn) e la minima 86 Hz (sempre Fr). Un grafico di oltre tremila colonne può contenere un'ora di analisi spettrale alla risoluzione temporale di 10 ms (Tr). In questo grafico non saranno distinguibili tra loro due sorgenti di frequenza diversa separate da meno di 86 Hz, non si potrà risolvere un picco di segnale⁵⁴ di durata molto inferiore a 10 ms e non si potranno distinguere due picchi separati da meno di 10 ms. In fine la scala delle ampiezze viene espressa in tonalità di colore con una risoluzione di 16 bit (quella con cui era stato campionato il segnale) che corrisponde a una quantità di informazioni pari a 65536 colori (vedi tab. 5).

Osservazioni:

La definizione che abbiamo dato alla P_{sup} prevede che non si intenda studiare nel dettaglio la regione inferiore a 1 kHz. In questo caso la risoluzione di 1/10 di kHz può essere sufficiente. In alternativa la riproduzione in scala logaritmica migliora la visibilità nella regione di frequenza più bassa, anche se la risoluzione matematica non cambia (Figura 37). Per avere una risoluzione realmente più alta occorre impostare l'algoritmo FFT su un maggiore periodo di analisi, ovvero l'analisi su un maggiore numero di campioni. Ciò riduce però la risoluzione nel tempo dello spettrogramma (vedere tab. 6). Il problema è evidenziato da questa espressione matematica delle risoluzioni: $Fr = Fc/Nc$ e $Tr = Nc/Fc$. I loro valori sono reciproci (l'uno l'inverso dell'altro) quindi matematicamente l'aumento dell'una implicherà sempre la riduzione dell'altra. Agendo sul campionamento (Fc) o sull'analisi FFT (Nc) esse cambieranno insieme mantenendo un rapporto di reciprocità. L'impostazione "ottimale" non esiste se non nel trovare quel giusto equilibrio tra le risoluzioni che consenta di dare il massimo risalto alle caratteristiche specifiche del fenomeno che si vuole studiare. Se il segnale in esame fosse stato quello della P_{inf} si sarebbe potuta usare una frequenza di campionamento più bassa. In quel caso la FFT sullo stesso numero di campioni avrebbe prodotto una risoluzione in frequenza più alta (vedi ad es. la seconda colonna della tab. 6) ma ugualmente si sarebbe persa risoluzione nel tempo. Il campionamento è dunque un processo vincolante. Se si conoscono già le caratteristiche del segnale da studiare, si può scegliere preventivamente la porzione di spettro da campionare e adeguare di conseguenza la frequenza di campionamento. Al contrario, per ottenere a posteriori la più ampia gamma di scelta delle risoluzioni, la cosa migliore sarà sempre quella di aver preventivamente campionato il segnale con la frequenza (Fc) più alta possibile, compatibilmente con i problemi di gestione del flusso di dati.

Anche per limitare l'aliasing, il campionamento dovrebbe avere una frequenza ben maggiore di due volte rispetto alla banda del segnale ($F_c \gg 2B$), anche 4 volte o più rispetto alla soglia di passabasso. Ciecamente, la più alta compatibile con la gestibilità del flusso di dati. La "regola Zen" che consiglio sempre, senza perdersi in spiegazioni, è la seguente: «Filtra basso e campiona alto».

⁵⁴ In gergo tecnico un fenomeno transiente aperiodico è un glitch. In ambito geologico si usa chiamare "spike" qualunque improvviso picco nei dati (di solito dovuto ad errori) ma questa parola deriva dalla terminologia elettrotecnica dove uno spike sarebbe più precisamente un "glitch periodico".

4.0 Acquisizione dati con Spectrum Lab

Per l'acquisizione dei dati e l'analisi spettrale si propone ora qualche esempio pratico con l'impiego di *Spectrum Lab*, un software gratuito molto popolare e in grado di svolgere da solo tutto il lavoro necessario⁵⁵. Questa applicazione è compatibile con Windows XP, 98, 2000, ME, 10. Con l'ausilio di WineHQ [Wine] può girare anche in Linux e MacOS. Non funziona invece con Windows Vista. Per il download aggiornato è consigliabile il sito originale [SpecLab] dove è disponibile anche un manuale nei formati WEB e PDF.

Ci limiteremo qui a descrivere i settaggi necessari per ottenere dalla stazione VLF il tipo di operatività esposto nel paragrafo 2.3 (*Strategie adottate nella rete sperimentale dell'INGV*). Può essere un punto di partenza per realizzare una propria strategia di acquisizione ma si raccomanda comunque di mantenere uno standard di acquisizione, coerentemente con quanto discusso nel paragrafo 2.1. Per comprendere meglio le impostazioni e le conseguenze che ne deriveranno ci si può aiutare consultando il formulario fornito nell'appendice 7.7 ("Formulario di analisi dei segnali").

Prima di configurare Spectrum Lab va predisposto il sistema (nell'esempio sarà Windows) per supportare questa modalità di acquisizione. Le operazioni preliminari sono tre:

- Creare direttamente nella partizione "C:" una cartella di nome "htdocs", dentro questa una nuova cartella di nome "VLF" e dentro questa altre tre nominate rispettivamente: "HiRes", "LoRes" e "Wav" (schema in Figura 38). Fare attenzione a rispettare maiuscole e minuscole, altrimenti qualcosa non funzionerà: le ultime tre saranno le cartelle dove Spectrum Lab salverà i dati; VLF sarà la cartella principale per reperire i dati; *htdocs* sarà la cartella che contiene il sito web locale attraverso il quale si potrà accedere da remoto ai dati.

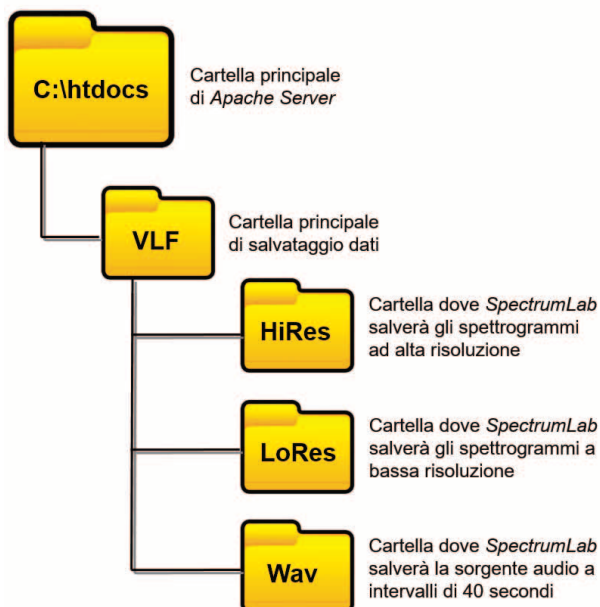


Figura 38 Le cartelle principali del nostro sistema di acquisizione e controllo remoto. Schema ad albero delle cartelle che devono essere create nel sistema per predisporlo alle impostazioni che stiamo per eseguire. La cartella principale è quella su cui lavorano il WEB server "Apache" e l'interprete PHP. Essa conterrà tutto il sito WEB con l'interfaccia interattiva per accedere ai dati da remoto. VLF è la cartella principale per lo storage dei dati. Contiene le tre sottocartelle su cui lavorerà Spectrum Lab nel suo salvataggio continuo di spettrogrammi e sorgente audio.

- Impostare l'orologio di Windows per non cambiare orario con l'ora legale. Immettere manualmente nell'orologio di sistema l'ora solare corrente. Se si è in inverno, l'ora solare

⁵⁵ Spectrum Lab (Audio Signal Analyser) di dl4yhf [https://www.qsl.net/dl4yhf/whoami.html], Copyright 2000 - 2010 Wolfgang Buescher, licenza: Freeware. "This program is free software; you can redistribute it under the terms of the GNU General Public License as published by the Free Software Foundation, version 2. This program is distributed in the hope that it will be useful, but WITHOUT ANY WARRANTY".

sarà quella corrente. Se si è in estate, con l'ora legale in corso, l'ora solare sarà l'ora corrente -1h. Questo serve ad eliminare le ambiguità sull'orario: il nostro sistema operativo lavorerà sempre e soltanto sull'ora solare (per tutto l'inverno visualizzerà la stessa ora dei nostri orologi. In estate saranno i nostri orologi a segnare un'ora "falsa", per nostra comodità). Spectrum Lab si baserà su questo orario fisso e, con le impostazioni che vedremo, si occuperà lui di correggere la marcatura degli spettrogrammi sull'ora UTC (la nostra ora solare -1h, ovvero l'ora legale -2h) che è l'orario universale per le misure scientifiche. In questo modo il tempo letto sugli spettrogrammi sarà lo stesso tempo standard su cui si basano i bollettini sismici di tutto il mondo.

- Installare Losless Audio [La], che servirà per la compressione audio.

4.1 Impostazione dei parametri di analisi spettrale HiRes

Per iniziare vediamo come impostare SpecLab per pilotare la *conversione AD* impiegando la scheda sonora del PC nel ruolo di *campionatore* del segnale (vedi paragrafo 3.1). Più in generale SpecLab svolgerà tutti i compiti di acquisizione dei dati con le modalità che ci siamo proposti nel paragrafo 2.3 (Figura 26). La prima cosa da fare è impostare la scheda sonora: dal menu "Options" alla voce "Audio settings, I/O device selection". Qui le impostazioni vanno eseguite come indicato nella Figura 39. Premere il tasto virtuale "Apply" per accettare subito le variazioni o "Close" per uscire impostando le variazioni o "X" per chiudere senza impostare le variazioni. D'ora in poi si abbrevieranno gli indirizzi dei pannelli di controllo di SpecLab e i relativi settaggi consigliati con uno schema come quello seguente:

Options > Audio settings... (Figura 39)

Audio Input Device: selezionare la scheda sonora.

Sound Sample Rate: impostare la frequenza di campionamento (F_c) = 44100 Hz.

bits/sample: impostare la risoluzione del campionamento (R_c) = 16 bit/s.

[Close]

La scheda sonora è ora impostata per lavorare secondo gli obiettivi prefissati al paragrafo "2.3 Strategie adottate nella rete sperimentale dell'INGV" in base alla teoria illustrata nel paragrafo "3.0 Introduzione all'analisi numerica dei segnali". È probabile che nel caso della scheda sonora siano già adatte le impostazioni di default di SpecLab, ma questo caso è servito da esempio. D'ora in poi proseguiamo più schematicamente sui settaggi essenziali.

Per ottenere le due modalità di analisi e salvataggio dei dati ad alta (HiRes) e bassa (LoRes) risoluzione occorrerà configurare due sessioni di SpecLab che dovranno essere lanciate automaticamente all'avvio del PC. Ciascuna sessione produce automaticamente, nella cartella di installazione di Spectrum Lab, due files di configurazione che assumono i nomi di "SETTING.INI" e "MCONFIG.INI" (per la prima sessione) e "SETTING2.INI" insieme a "MCONFIG2.INI" per la successiva sessione (e così via a seguire ogni ulteriore sessione lanciata contemporaneamente alle altre, alla chiusura salverà automaticamente un file di configurazione con una numerazione crescente).

Adesso vediamo come impostare SpecLab per svolgere il ruolo di "algoritmo FFT" (vedi paragrafo 3.4) per produrre gli spettrogrammi ad alta risoluzione, ovvero quelli con la finestra di 20 secondi, che abbiamo chiamato HiRes. Aprire una sola sessione di SpecLab e impostare i seguenti parametri:

Options > FFT settings (Figura 40)

FFT input size: impostare il periodo di analisi FFT (N_c) = 1024 campioni.

Effect of FFT settings: ne risulterà un periodo di analisi (T_a) = 0,023 s.
 [Close]

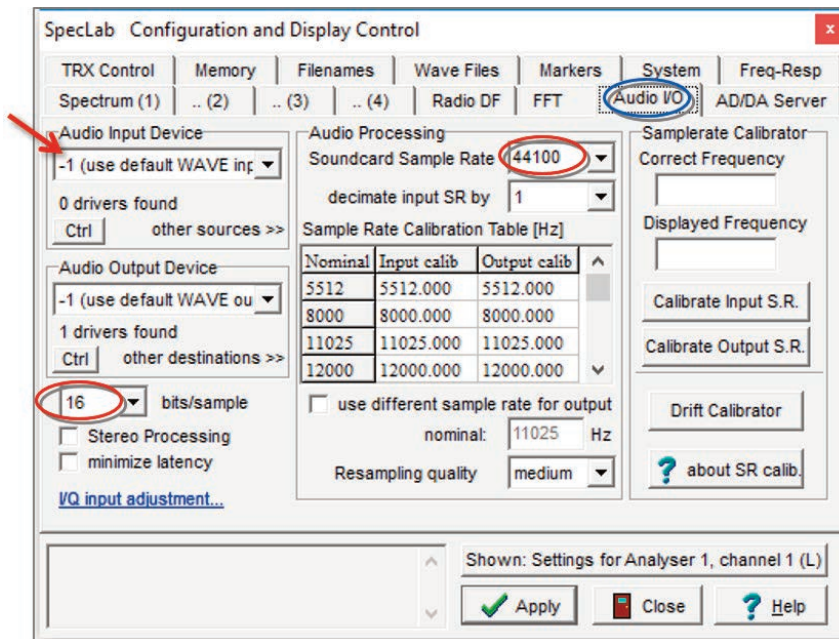


Figura 39 Pannello “Audio I/O” di SpecLab. È il pannello di controllo che gestisce la conversione A/D. Va configurato come evidenziato nella figura: selezionando una scheda sonora (si può averne installate anche più di una) e impostandovi la frequenza e la risoluzione del campionamento.

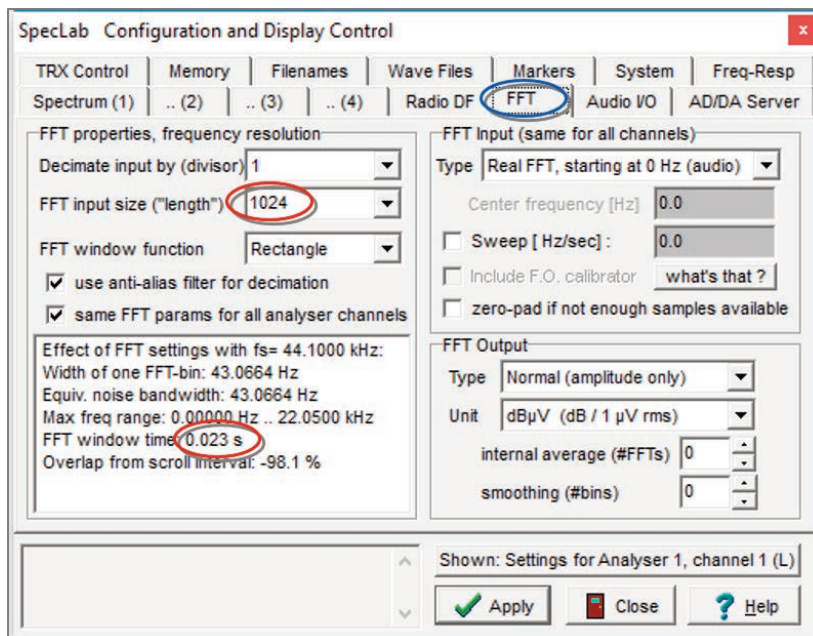


Figura 40 Pannello “FFT”. È il pannello di controllo che gestisce l’analisi numerica FFT che genera gli spettri. Per la sessione ad alta risoluzione l’analisi va eseguita su 1024 campioni, che alla F_c di 44.1 kHz corrisponde ad un periodo di analisi $T_a = 23$ ms. Questa è la risoluzione nel tempo (T_r) degli spettri generati, alla quale corrisponde la risoluzione in frequenza $F_r = 1/T_r = 43,5$ Hz circa. Notare che alla voce “FFT windows function” è impostata una finestra rettangolare. Questa è la “funzione finestra” delle classi spettrali. Può modificare la risposta grafica di una linea a frequenza costante. Può essere impostata a piacimento ma su “rettangolare” sarà più facile la calibrazione.

Options > Spectrum display settings (Figura 41)

Show: impostare "Waterfall only"

Waterfall scroll interval: impostare 46 ms.

Waterfall time grid: impostare 5 s.

Labels: impostare "hour:min.sec"

Devono essere abilitati: Vertical Frequency Axis
Optimum waterfall average
Peack detecting cursor
Watherfall time grid: "enabled"
[Close]

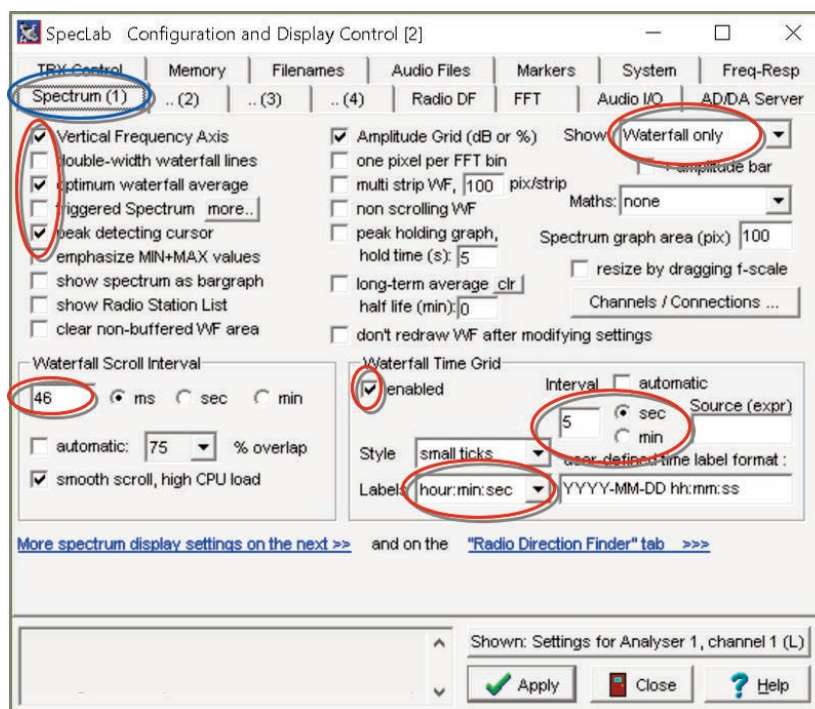


Figura 41 Pannello "Spectrum display settings". È il pannello che gestisce la composizione degli spettri per visualizzare uno spettrogramma. È stato impostato per visualizzare unicamente lo spettrogramma, rappresentando le frequenze sull'asse Y. Il grafico si svilupperà orizzontalmente, con la marcatura del tempo in ore, minuti e secondi, ogni 5 secondi. Ogni colonna rappresenterà gli spettri mediati su un intervallo di 46 ms.

Options > Spectrum display settings part 2 (Figura 42)

Amplitude Range: impostare da 0 a -45 dB μ V (ma questo dipende dalla dinamica del ricevitore)

Devono essere abilitati: Show grid in spectrum graph
Use dotted grid in waterfall
LSB mirror
Amplitude Bar: with scale
[Close]

A questo punto manca la delimitazione della banda spettrale che viene visualizzata nella finestra di lavoro. Con la frequenza di campionamento (F_c) impostata a 44100 Hz, avremo un segnale digitale con larghezza di banda 22050 Hz (F_n). Sarà inutile visualizzare sulla scala una banda più larga, perché dopo la digitalizzazione, oltre la F_n non esiste più segnale. Per ottenere una scala

delle frequenze corretta e ordinata imposteremo, come indicato nella Figura 43, una visualizzazione estesa da 0 a 22000 Hz:

Finestra principale > Freq (Figura 43)

Min: impostare 0.0

Max: impostare 22000.0

Nella Figura 43 viene illustrato in che modo i parametri di configurazione impostati hanno caratterizzato la visualizzazione dello spettrogramma. L'operazione però non si è ancora conclusa. Chiudendo la sessione di SpecLab l'applicazione sovrascriverà nella sua cartella di installazione il file "setting.ini" rendendo queste impostazioni disponibili per la prossima sessione di lavoro. D'ora in poi la prima sessione che verrà aperta sarà configurata automaticamente in questo modo.

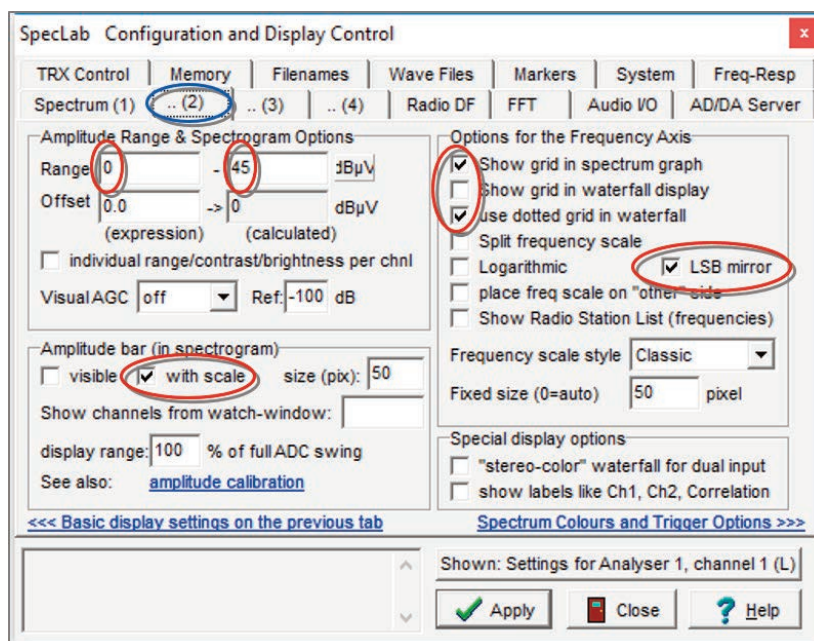
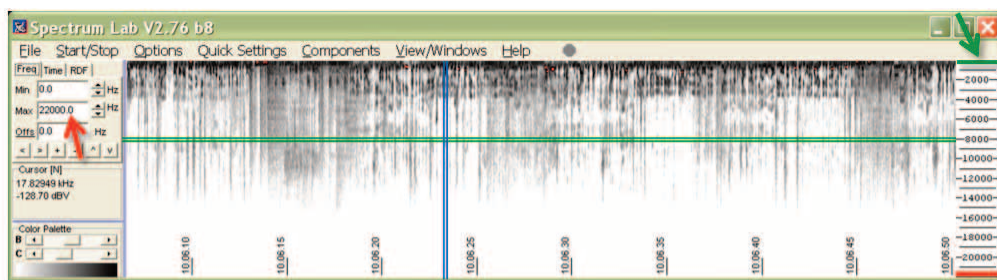


Figura 42 Pannello "Spectrum display settings, part 2". È il pannello che gestisce la visualizzazione delle scale di frequenza e ampiezza nello spettrogramma. È stato impostato per visualizzare le frequenze su una scala invertita (lo zero in alto) per far sì che le etichette del tempo non vadano a coprire la parte bassa dello spettro, bensì la parte alta, interessata dalla curva di discesa del filtro passa-basso. Inoltre verrà visualizzata nello spettrogramma una legenda graduata delle ampiezze in un range compreso tra 0 e -45 dB. Questo range tuttavia può essere variato per adattarsi al ricevitore e alla calibrazione del sistema antenna-ricevitore-analizzatore.

4.2 Salvataggio automatico e personalizzato degli spettrogrammi HiRes

Si procederà ora a settare SpecLab affinché salvi periodicamente lo spettrogramma e il relativo intervallo di segnale sorgente. L'obiettivo è quello di salvare segmenti audio della durata di 40 secondi sincronizzati con spettrogrammi prodotti con la stessa cadenza ma che rappresentino graficamente un intervallo di tempo leggermente superiore in modo tale da garantire una parziale sovrapposizione con i grafici precedenti. Una leggera sovrapposizione è sempre preferibile ma in questo caso ci consentirà anche di collocare nel grafico stesso la legenda della scala di ampiezza. La migliore ottimizzazione quindi è che la sovrapposizione sia ampia proprio quanto la legenda. Nella stessa sessione di SpecLab, impostare ora i seguenti parametri:



PARAMETRI IMPOSTATI:

B = banda del segnale = **22 kHz**

Fc = frequenza di campionamento = **44,1 kHz**

Nc = numero di campioni analizzati = **512**

Ta = periodo di analisi = $n/Fc = 0,012$ s

PARAMETRI GRAFICI:

numero di colonne grafiche: (durata dello spettrogramma) / Ta

numero di righe grafiche: $F_n/F_r = 256$ (o un multiplo)

PARAMETRI OTTENUTI:

massima frequenza risolvibile: $F_n = F_c/2 = 22$ kHz

minima frequenza risolvibile: $F_r = 1/Ta = 86$ Hz

risoluzione nel tempo: $Tr = 0,012$ s

Figura 43 Caratterizzazione dello spettrogramma. Vediamo ora come i parametri di configurazione impostati hanno caratterizzato lo spettrogramma prodotto da SpecLab. La frequenza di campionamento $F_c = 44,1$ kHz ha prodotto (teorema di Shannon-Nyquist) una banda larga 22,05 kHz. Il limite (grafico) di banda è stato quindi impostato su 22 kHz (indicazioni in rosso). Il numero di campioni per il ciclo di analisi FFT è stato impostato su 512 e questo ha prodotto una risoluzione nel tempo ($Tr=Ta$) di 12 ms (indicazioni in blu) che caratterizza la massima risoluzione (quella matematica) ottenibile graficamente come “spessore” di una singola colonna grafica. La conseguenza di questa risoluzione temporale è la risoluzione in frequenza di 86 Hz (indicazioni in verde) che rappresenta lo “spessore” di una singola riga grafica. Questo è anche il valore della prima riga grafica, che rappresenta un intervallo esteso 0-86 Hz. Il numero di righe grafiche, ovvero l'altezza in pixel dell'immagine prodotta è vincolata dai parametri di analisi che, in questo caso, produrranno 256 px. Il numero di colonne grafiche, ovvero la larghezza in pixel dell'immagine prodotta, è vincolata alla risoluzione temporale Ta ma dipende anche dall'estensione della finestra grafica (che non ha vincoli) e dalla durata del ciclo di salvataggio.

File > Periodic Actions (Figura 44)

Active: attivare l'opzione.

From: impostare “00:00:00”.

to: impostare “00:00:00”.

interval: impostare “00:00:40”.

Action Macro(s): copiare in questa finestra lo script “HiRes” che si trova in Appendice, alla voce “7.8 Script di salvataggio dati per Spectrum Lab”, eseguendo sul testo digitale un semplice “copia e incolla” da tastiera: “[Ctrl]+[C] e poi [Ctrl]+[V]”.

[Close]

Vediamo ora punto per punto il significato dello script in base ai marcatori (lettere e numeri) sovrainpressi nella Figura 44 (per praticità anche questo script è riportato in formato testo nell'Appendice, al paragrafo 7.8). Le 4 righe contrassegnate con le lettere devono essere modificate per personalizzare l'acquisizione sulla propria stazione di monitoraggio. Le modifiche devono interessare esclusivamente il testo scritto all'interno delle “virgolette”. Delle successive righe verrà spiegato brevemente il significato in 4 punti ma esse non devono subire alcuna modifica, pena il malfunzionamento dell'acquisizione.

a. Sostituire le tre lettere maiuscole con la sigla (possibilmente 3 o al massimo 4 lettere

- maiuscole) della propria stazione di monitoraggio.
- Indicare il path della directory di salvataggio degli spettrogrammi HiRes. Se sono state seguite scrupolosamente le istruzioni date fino a questo punto, il path sarà "C:\VLF\HiRes" (vedi Figura 38), altrimenti va adattato alla propria configurazione.
 - Indicare il path della directory di salvataggio della sorgente audio. Se sono state seguite scrupolosamente le istruzioni date fino a questo punto, il path sarà "C:\VLF\Wav" (vedi Figura 38), altrimenti va adattato alla propria configurazione.
 - Indicare la directory di installazione del programma Losless Audio. Di default dovrebbe essere: "C:\Programmi". Verificarne la correttezza prima di proseguire.



Figura 44 Salvataggio automatico personalizzato su Spectrum Lab. Per impostare un salvataggio automatico personalizzato aprire la finestra "Periodic Action" dal menu "File". Impostare un periodo di attività alla voce "From" (dalle 00:00 alle 00:00 è l'impostazione di default per lavorare h24) e impostare un intervallo di ripetizione alla voce "Interval". Questo sarà il ciclo di ripetizione dello script di salvataggio inserito nella finestra Action Macro(s). In questo esempio è impostato un intervallo di 00.00.40 (cerchio rosso) e ciò significa che lo script (freccia rossa) verrà ripetuto ogni 40 secondi per tutto l'arco della giornata. Questa azione programmata

- Salvataggio dello spettro composto a video nell'arco dell'intervallo di (40s) appena trascorso, sotto forma di immagine JPG con il seguente nome (questo formato è indispensabile per rintracciare l'immagine con l'interfaccia web): *nome della stazione + tipo di file + data del giorno rilevato in questo momento + specifica che l'orario è in UTC + ora rilevata al momento + estensione del file audio*. Esempio del nome che verrà composto dalla programmazione che si vede nell'esempio: "FID_Audio_23UTC1400.jpg".
- Inizio della registrazione del file audio (corrispondente allo spettro HiRes che verrà salvato al prossimo giro) con il seguente nome (anche questo in formato compatibile con l'interfaccia WEB): *nome della stazione + tipo di spettrogramma + anno, mese e giorno rilevati in questo momento + specifica che l'orario è in UTC + ora rilevata al momento in cui è iniziato l'intervallo di 40 s + estensione del file grafico*. Esempio del nome che verrà composto dalla programmazione che si vede nell'esempio: "FID_Audio_23UTC1440.jpg".

3. Esegue Losless Audio sul precedente file audio (TimeConvert = ora corrente -40s), ovvero lo comprime e lo salva con lo stesso nome ma nel formato “.la”.
4. Cancella il file audio originale che è stato appena compresso.

Spettrogrammi HiRes				Spettrogrammi LoRes			
Frequenza di	Fc	44100	Hz	Frequenza di	Fc	44100	Hz
Massima frequenza utile	Fn	22050	Hz	Massima frequenza utile	Fn	22050	Hz
Risoluzione del campione	R	16	bit	Risoluzione del campione	R	16	bit
Livelli di intensità risolti		65536		Livelli di intensità risolti		65536	
Analisi FFT su		1024	campioni	Analisi FFT su		512	campioni
Periodo di analisi FFT	Ta	0,023	s	Periodo di analisi FFT	Ta	0,012	s
Risoluzione matematica in t	Tr	0,023	s	Risoluzione matematica in t	Tr	0,012	s
Risoluzione matematica in f	Fr	43,5	Hz	Risoluzione matematica in f	Fr	86	Hz
Spettri mediati su		2	Ta FFT	Spettri mediati su		370	Ta FFT
Risoluzione grafica in t		0,046	s	Risoluzione grafica in t		4296	s
Risoluzione grafica in f		43,5	Hz	Risoluzione grafica in f		86	Hz
Banda visualizzata		0 - 22	kHz	Banda visualizzata		0 - 22	kHz
Durata spettrogramma		40	s	Durata spettrogramma		1	h

Tabella 7 Riepilogo delle caratteristiche degli spettrogrammi ottenuti. In questa tabella si mettono a confronto i parametri degli spettrogrammi per entrambe le sessioni di monitoraggio di SpecLab (alta e bassa risoluzione).

In grassetto sono indicati i parametri direttamente impostati. Tutti gli altri derivano matematicamente da quelle impostazioni. Questa configurazione è adatta per un monitoraggio generico in banda VLF ma è particolarmente indicata per i pattern di segnale SIO.

Qui si capisce come è stato possibile realizzare un sistema di controllo remoto dei dati senza creare anche un *database* ma sfruttando unicamente le possibilità di Spectrum Lab. Gli spettrogrammi e i relativi files acustici, anche se etichettati in tempi diversi, vengono prodotti a coppie e salvati nelle rispettive cartelle con una notazione specifica. La pagina WEB che interroga la stazione in base alle nostre richieste sa già come deve chiamarsi il file che stiamo cercando e dove deve trovarsi. I files audio, che sono i dati più pesanti, vengono salvati con la sola data del giorno, senza mese o anno, sicché ogni mese un nuovo file verrà sovrascritto al precedente. Questo consente di salvare spazio su disco e ci lascia un mese di tempo per reperire il file sorgente. Per risparmiare ancora spazio, ad ogni ciclo viene compresso ed eliminato il file audio precedente. Con l’algoritmo LA la compressione può arrivare al 50%. Se non si avesse bisogno della compressione, sarà sufficiente marcare con “REM” l’inizio delle righe 3 e 4 nello script di SpecLab e sostituire l’estensione “.wav” alla “.la” che si trova nel listato della pagina WEB “archivio.php” (paragrafo 7.10 in Appendice). Questa è l’unica modifica che si può fare senza compromettere il funzionamento globale. Per stimare quanta autonomia si avrà sul disco locale ci si può basare orientativamente sulla Tabella 8.

A questo punto manca solo di definire alcune caratteristiche grafiche degli spettrogrammi che verranno salvati. Per farlo occorre spostarsi nel pannello “Screen Capture”:

File > Screen Capture (Figura 45)

Color legend: attivare l'opzione.

File Format: attivare l'opzione "JPG".

Show Info: impostare "in a solid box"

pos: impostare "Left,Bottom"

stack: impostare "vertical".

Show Info: copiare nella finestra il seguente script: "ABC"+str("DD-MM-YY",now). Al posto di ABC andrà la sigla della stazione.

[Close]

Il tasto virtuale [Update preview] consente di visualizzare subito, nella stessa finestra, ciò che abbiamo appena impostato: in basso a sinistra viene visualizzata la legenda della scala delle ampiezze e, subito sotto, un'etichetta con il nome della stazione e la data. Poiché l'ora è già marcata nello spettrogramma, adesso ogni immagine che viene prodotta porterà con sé graficamente tutti i dati necessari per identificarla, anche se in futuro verrà rinominata con un nome diverso dallo standard che ci è servito per gestirne l'acquisizione.

File	Directory	Etichetta	Tipo
LoRes	C:\htdocs\VLF\LoRes	###_LoResT_aammggUTChhmm.jpg	Spettrogramma di 1 ora
HiRes	C:\htdocs\VLF\HiRes	###_HiResT_aammggUTChhmmss.jpg	Spettrogramma di 40 secondi
Wav	C:\htdocs\VLF\Wav	###_Audio_ggUTChhmmss.wav (.la)	Segmento audio di 40 secondi

Tabella 8 Prodotti del monitoraggio. Riepilogo dei file prodotti dal processo di analisi automatica e salvataggio locale delle stazioni VLF. L'acronimo del nome della stazione è qui indicato genericamente come "###".

4.3 Impostazioni di analisi e salvataggio degli spettrogrammi LoRes

Per eseguire contemporaneamente anche il monitoraggio panoramico "LoRes", a finestre da un'ora, occorre aprire una seconda sessione di Spectrum Lab (deve essere già aperta la prima) e configurarla analogamente alla precedente ma con parametri diversi. Per brevità si riporteranno ora solo le operazioni fondamentali dei settaggi LoRes e le relative figure di riferimento.

Options > Audio settings... (Figura 39)

Audio Input Device: selezionare la scheda sonora.

Sound Sample Rate: impostare la frequenza di campionamento (F_c) = 44100 Hz.

bits/sample: impostare la risoluzione del campionamento (R_c) = 16 bit/s.

[Close]

Options > FFT settings (Figura 46)

FFT input size: impostare il periodo di analisi FFT (N_c) = 1024 campioni.

Effect of FFT settings: ne risulterà un periodo di analisi (T_a) = 0,023 s.

[Close]

Options > Spectrum display settings (Figura 47)

Show: impostare "Waterfall only"

Waterfall scroll interval: impostare 4296 ms.

Waterfall time grid: impostare 10 min.

Labels: impostare "hour:min"

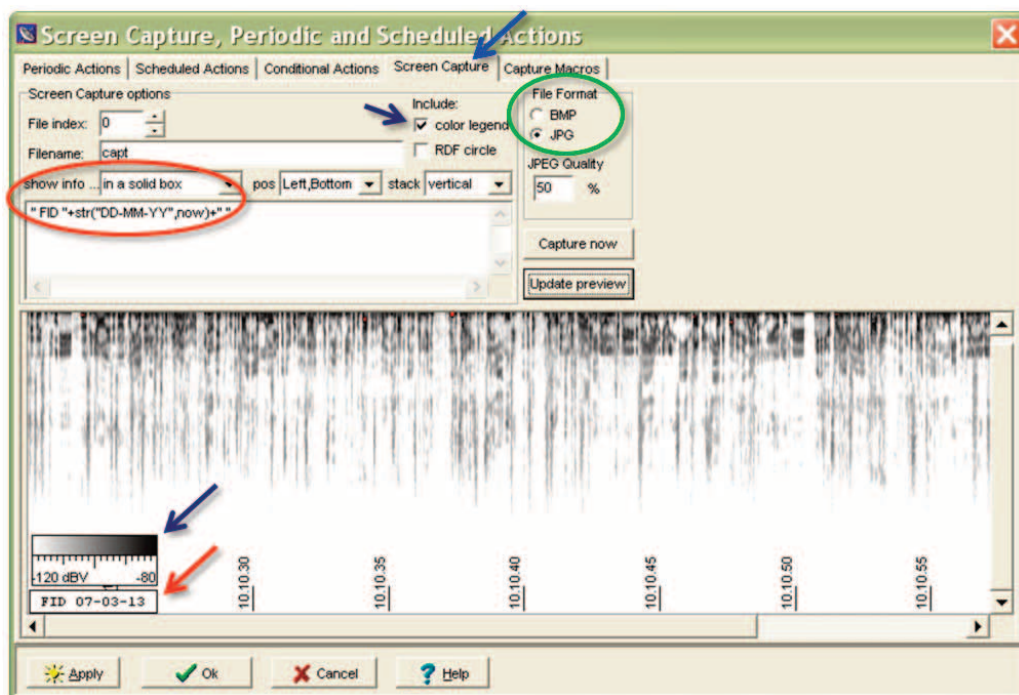


Figura 45 Personalizzazione dello spettrogramma salvato da Spectrum Lab. Le caratteristiche grafiche dello spettrogramma salvato da “Periodic Action” vengono impostate nella finestra “Screen Capture”. Il formato dell’immagine va selezionato nel riquadro “File Format” (ovale verde). È anche possibile immettere un altro script per marcare lo spettrogramma con un’etichetta personalizzata. In questo esempio nell’ovale rosso è stato richiesto di scrivere la sigla della stazione (FID) seguita dalla data odierna. Con il tasto [Update preview] è possibile osservarne l’anteprima della targhetta (frecche rosse). A questo punto l’immagine è completamente referenziata perché l’ora era già compresa nella scala dei tempi. La presenza di una legenda della scala cromatica è opzionale attraverso il flag “Color legend” (frecche blu scuro).

Devono essere abilitati: *Vertical Frequency Axis*
Optimum waterfall average
Peack detecting cursor
Watherfall time grid: “enabled”
 [Close]

Options > Spectrum display settings part 2 (Figura 42)

Amplitude Range: impostare da 0 a - 45 dB μ V (ma questo dipende dalla dinamica del ricevitore)

Devono essere abilitati: *Show grid in spectrum graph*
Use dotted grid in waterfall
LSB mirror
Amplitude Bar: with scale
 [Close]

Finestra principale > Freq (Figura 43)

Min: impostare 0.0

Max: impostare 22000.0

File > Periodic Actions

Active: attivare l’opzione.

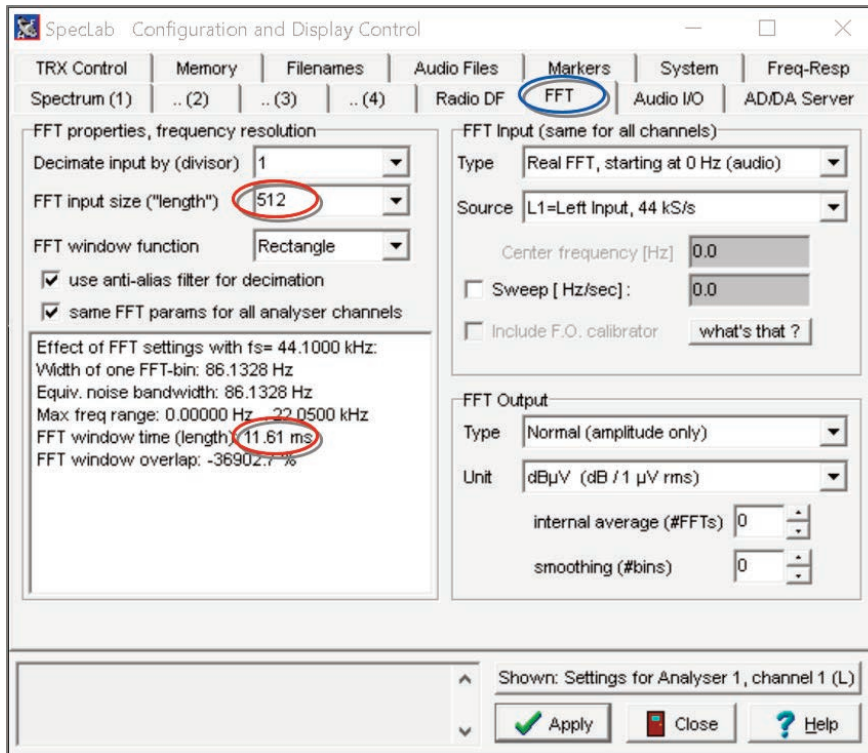


Figura 46 Pannello “FFT”. È il pannello di controllo che gestisce l’analisi numerica FFT che genera gli spettri. Per la sessione a bassa risoluzione l’analisi va eseguita su 512 campioni, che alla Fc di 44.1 kHz corrisponde ad un periodo di analisi $T_a = 11,61$ ms. Questa è la risoluzione nel tempo (T_r) degli spettri generati, alla quale corrisponde la risoluzione in frequenza $F_r = 1/T_r = 86$ Hz circa. Anche qui la finestra “rettangolare” alla voce “FFT windows function” è impostata solo per facilitare le operazioni di calibrazione ma potrà essere variata per esigenze diverse.

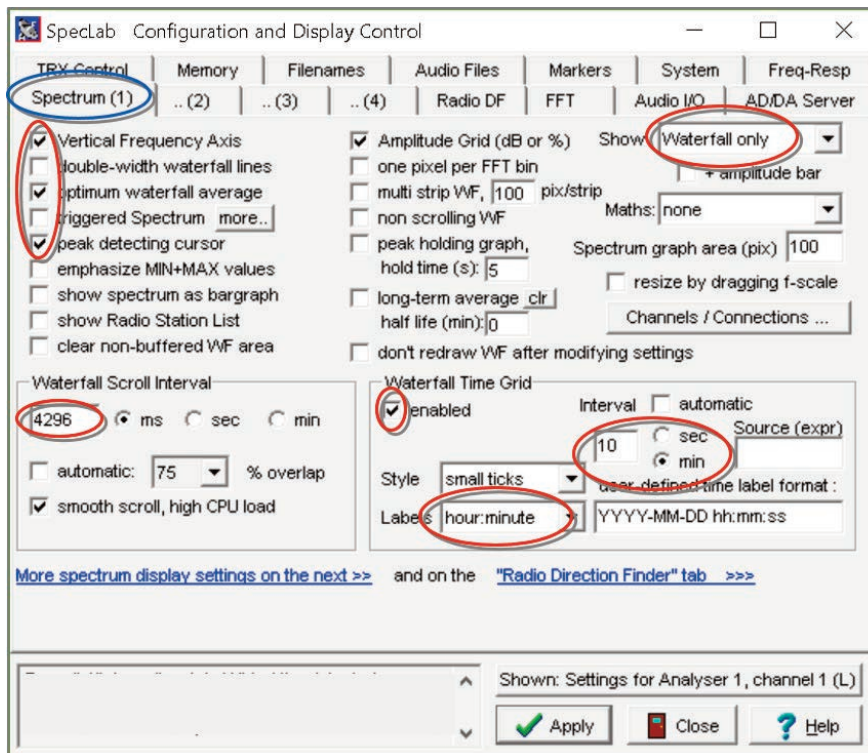


Figura 47 Pannello “Spectrum display settings”. Questa volta lo spettrogramma sarà marcato con ore e minuti ogni 10 minuti. Ogni colonna rappresenterà gli spettri mediati su un intervallo di 4296 ms. Questa sarà quindi la “risoluzione grafica” dello spettrogramma nella scala dei tempi.

From: impostare "00:00:00".

to: impostare "00:00:00".

interval: impostare "01:00:00".

Action Macro(s): copiare in questa finestra lo script "LoRes" che si trova in Appendice, alla voce "7.8 Script di salvataggio dati per Spectrum Lab", eseguendo un semplice "copia e incolla" da tastiera: "[Ctrl]+[C] e [Ctrl]+[V]".

[Close]

File > Screen Capture (Figura 45)

Color legend: attivare l'opzione.

File Format: attivare l'opzione "JPG".

Show Info: impostare "in a solid box"

pos: impostare "Left,Bottom"

stack: impostare "vertical".

Show Info: copiare nella finestra il seguente script: "ABC "+str("DD-MM-YY",now). Al posto di ABC andrà la sigla della stazione.

[Close]

A questo punto anche la seconda sessione è configurata. Si ricorda che una volta chiuse le due sessioni, esse salveranno la propria configurazione e alla successiva apertura la prima sessione risulterà configurata "HiRes" e la seconda "LoRes". Eventuali sessioni aperte successivamente avranno la consueta configurazione standard. In conclusione, la Tabella 7 riepiloga e confronta i parametri impostati e quelli risultanti. Si noti che a conseguenza del fatto che i cicli FFT sono stati mediati, risulterà una risoluzione matematica ed una grafica. Quest'ultima è quella risultante sullo spettrogramma. Per verificare che tutto sia a posto e pianificare lo storage, ci si può basare sulla Tabella 8 per i file prodotti e la Tabella 9 per lo spazio su disco (valori orientativi).

Spazio su disco	LoRes		HiRes		Wav		Totale	
Singolo file	100	kB	100	kB	1,57	MB	-	
1 Giorno	1,2	MB	216	MB	3,3912	GB	3,6084	GB
1 Mese	37,2	MB	6,696	GB	105,127	GB	111.86	GB
1 Anno	446,4	MB	80,352	GB	105,127	GB	185.93	GB

Tabella 9 Spazio su disco. Previsione orientativa dello spazio necessario su disco per lo storage locale dei dati. È attesa una richiesta di circa 105 GB fissi per il ciclo mensile del salvataggio audio (compressato) più 81 GB circa per ogni anno di autonomia nel salvataggio degli spettrogrammi.

4.4 Personalizzazione e blocco delle finestre di lavoro

Affinché gli spettrogrammi di SpecLab rappresentino davvero 40 secondi o 1 ora di registrazione, più la rispettiva quantità di sovrapposizione con i grafici adiacenti, occorre che le finestre di SpecLab siano "aperte" per una determinata larghezza. SpecLab infatti salva esattamente ciò che visualizza. Inoltre abbiamo visto dalla teoria dell'analisi numerica (paragrafo 3.4, "Analisi spettrale") nel che la risoluzione FFT e l'estensione della banda determinano il massimo numero di righe dello spettrogramma. La finestra di SpecLab dovrà avere quindi un'altezza definita pari al numero di righe dello spettro o a un suo multiplo. Per assicurare ciò è necessario imporre al programma una precisa dimensione delle finestre e che questa dimensione non sia modificabile dall'utente, nemmeno per errore. Questo si può fare velocemente e con precisione mettendo

mano ad uno dei file di configurazione automatica di cui abbiamo già parlato: "SETTING.INI" per la prima sessione (HiRes) e "SETTING2.INI" per la seconda (LoRes).

Il file di configurazione "SETTING#" di SpecLab è un formato ascii con estensione ".INI". Si può aprire con qualsiasi utility di sistema che gestisce le estensioni ".txt", come il "Blocco note" o il "Word Pad" di Windows ([leftMouse] > "Apri con" > ...). La modifica va fatta seguendo le indicazioni della Figura 48, sia sul file "SETTING.INI" (per la sessione HiRes) che su "SETTING2.INI" (per la sessione LoRes). Si dovrà modificare nei rispettivi listati soltanto le voci indicate in neretto, inserendo i valori numerici indicati. Con queste dimensioni delle finestre, a meno che non sia cambiato qualcosa nella versione di SpecLab, in base alle impostazioni qui impartite, il salvataggio dovrebbe tagliare perfettamente lo spettrogramma lasciando la scala laterale delle frequenze e un intervallo di sovrapposizione tra due intervalli adiacenti.

```
(...)  
  
[GENERAL]  
UseRelativePaths=1  
LockWindows=1  
EnableDDE=0  
DebugFlags=0  
PrefRxAudioCenterFreq=-1  
PrefTxAudioCenterFreq=-1  
FrequencyListFile=frequencies\default.txt  
UseMousewheelToZoomOrScroll=1  
UseOutputDebugString=0  
PlainFreqInputFields=0  
FreqInputFieldsMinMax=0  
FreqInputFieldsNumDecimalPlaces=0  
RigControlFlags=0  
CATMonitorFlags=0  
  
[MAIN_WINDOW]  
Left=-5  
Top=2  
Width=1066  
Height=309  
Visible=-1  
FormStyle=-1  
ShowWindowsInTaskBar=0  
MinimizeToSystemTray=0  
BottomCtrls=0  
LeftCtrls=1  
LeftCtrlWidth=128  
LeftCtrlVSplit=182  
ContrastSliderUsage=0  
HideBorderAndMenus=0  
  
(...)
```

Figura 48 SETTING.INI e SETTING2.INI.

La figura mostra solo una parte del listato di configurazione di SpecLab, indicando dove vanno apportate le modifiche. Si tratta semplicemente di inserire i valori numerici indicati al posto di quelli preesistenti.

Il valore 1 attribuito a "LockWindows" blocca la possibilità di variare manuale la dimensione della finestra di lavoro (0=sblocco).

I valori qui indicati circa la larghezza e altezza in pixel della finestra principale dovrebbero consentire di visualizzare l'intervallo temporale desiderato, più un opportuno periodo di sovrapposizione, più la dimensione della scala delle frequenze. Tuttavia qualcosa potrebbe cambiare in base alla versione di Spectrum Lab o alle impostazioni di sistema. Questi valori sono dunque orientativi. In questo caso la modifica è uguale su entrambi i files di configurazione, tuttavia, qualora fossero stati impostati parametri di analisi differenti da quelli fin ora indicati, le due sessioni avrebbero potuto mostrare finestre di diverse dimensioni e quindi avrebbero avuto bisogno di modifiche opportunamente differenziate.

4.5 Calibrazione delle misure

I valori misurati da Spectrum Lab, mediante l'hardware ad esso associato, riguardano tre parametri: *tempo*, *intensità* e *frequenza*. Se si dispone di una sola stazione di monitoraggio, la

calibrazione delle misure può anche non essere assoluta. La misura relativa, ovvero la differenza tra i diversi segnali ricevuti dalla stessa stazione, dovrebbe comunque rappresentare una misura esatta. Quando però si impiegano molte stazioni in una rete, il fatto che nelle stesse condizioni siano in grado di produrre tutte la stessa risposta è un requisito essenziale che consentirà di confrontare segnali tra stazioni diverse. Una parte importante di questo lavoro lo svolge già l'hardware impiegato, ovvero il ricevitore e la scheda sonora del PC che avranno presumibilmente una risposta proporzionale e lineare e un clock preciso e costante. Quello che occorre fare è regolare il software affinché legga esattamente i valori di input o almeno un valore abbastanza prossimo alla realtà ma uguale per tutte le stazioni. Si tratta quindi di calibrare attraverso Spectrum Lab la risposta di tutto il sistema hardware: ricevitore-PC. La misura migliore si ha con l'impiego di una sorgente campione che deve generare (eventualmente con un attenuatore altrettanto preciso) un segnale di pochi μV . Questo segnale deve essere applicato all'ingresso del ricevitore, al posto dell'antenna e deve essere variato in frequenza e intensità per verificare la correttezza delle letture, che per la banda VLF devono estendersi almeno in questi intervalli:

- Ampiezza: 3 - 300 μV
- Frequenza: 1 - 20 kHz

Nel pannello di controllo "Audio I/O" (Figura 39) alla voce "Samplerate Calibrator" è possibile correggere la lettura in frequenza immettendo il valore errato che è stato letto e quello corretto che si vorrebbe leggere. Questo tipo di calibrazione tuttavia quasi mai si rende necessario. Essenziale è invece la calibrazione dei livelli di intensità misurati da SpecLab.

Nel pannello di controllo "ADC input calib" (dal menu: **Options > System settings > Amplitude Calibration**) si aprirà una finestra dove è possibile calcolare il valore di "max ADC input" che produce una corretta lettura. Eseguire le istruzioni indicate nell didascalia della Figura 49. Verificare anche che il valore ottenuto soddisfi le estensioni di frequenza e ampiezza indicate. Una volta stabilito un valore ottimale, questo è da considerarsi il valore di calibrazione valido per quel sistema hardware. La chiusura della finestra salverà questo valore come impostazione predefinita di speclab per quella sessione di lavoro. Inoltre, finché l'hardware non cambierà, anche dopo una nuova installazione di Spectrum Lab si potrà riottenere la stessa calibrazione inserendovi direttamente questo valore di ADC input. Per verificare che tutto sia a posto ci si può basare sulla seguente Tabella 10 dei valori (orientativi) di intensità attesa per i più comuni segnali di fondo in banda VLF.

In alternativa al generatore di funzione si può usare come riferimento il segnale delle sorgenti radio VLF. Su tutte le stazioni di monitoraggio del progetto SDT (ARI-FESN) in cui ho installato questo sistema di acquisizione, il lavoro fu fatto sempre da remoto. In un solo caso ci fu a disposizione sul posto una sorgente campione collegata al ricevitore per consentirne la calibrazione. Negli altri casi mi basai su valori misurati sulle tracce radio, confrontandoli con quelli ricevuti da altre stazioni VLF il più possibile vicine a quella da calibrare. I risultati possono essere tutto sommato accettabili.

L'ultima considerazione riguarda il tempo, che è stato già impostato sul sistema operativo sulla nostra "ora solare" e con l'esplicita richiesta di non aggiornarsi all'ora legale. Nel pannello "Loc, Timezone, Time source" (Figura 50), con un semplice *flag*, SpecLab si adatterà all'ora di sistema per visualizzare l'ora UTC scalando un'ora all'orologio di sistema. Si potrebbe anche basare la scansione del tempo sul clock della scheda sonora, ma se il PC dovrà essere collegato in rete per il controllo remoto, allora tanto vale basarsi sull'ora di sistema che si aggiorna automaticamente in rete. Per verificare che tutto sia a posto ci si può basare sulla seguente tabella di riferimento:

	Estate	Inverno	tipo di ora
Orologio al polso	12:00	12:00	locale
Orologio di sistema	11:00	12:00	solare
Marcatura di SpecLab	10:00	11:00	UTC

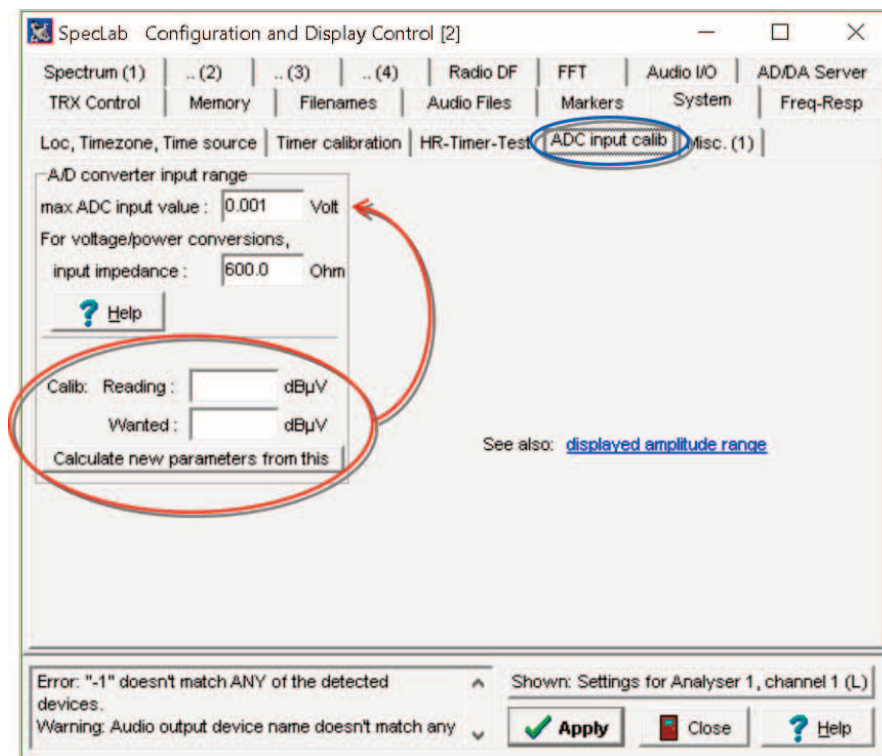


Figura 49 Amplitude Calibration. Questo è il pannello di controllo per la calibrazione delle letture di ampiezza del segnale. Se il valore rilevato dal cursore di SpecLab non corrisponderà a quella in ingresso, inserire negli appositi spazi indicati dal cerchio rosso il valore letto (reading) e quello desiderato (Wanted). Premere il tasto virtuale [Calculate...] e alla voce “max ADC input value comparirà il valore di riferimento per ottenere la corretta misura sull’impedenza indicata (qui 600 Ω, che è tipica dei segnali audio). Se l’hardware non cambierà, anche dopo una nuova installazione di Spectrum Lab si potrà riottenere la stessa calibrazione inserendo direttamente questo valore di ADC input.

Sorgente	-dBV	μV
Hum interno presso cavi	70	300
Hum interno	74	200
Hum	100	10
Fulmini	100	10
Spherics forti	108	4
α 11.3 kHz	107	4.5
α 12.65 kHz	108	4
Spherics deboli	112	2.5
α deboli	120	1

Tabella 10 Livelli specifici del rumore di fondo VLF. Valori orientativi attesi per i più comuni segnali che costituiscono il rumore di fondo VLF. La tabella è basata su esperienza empirica con antenne elettriche.

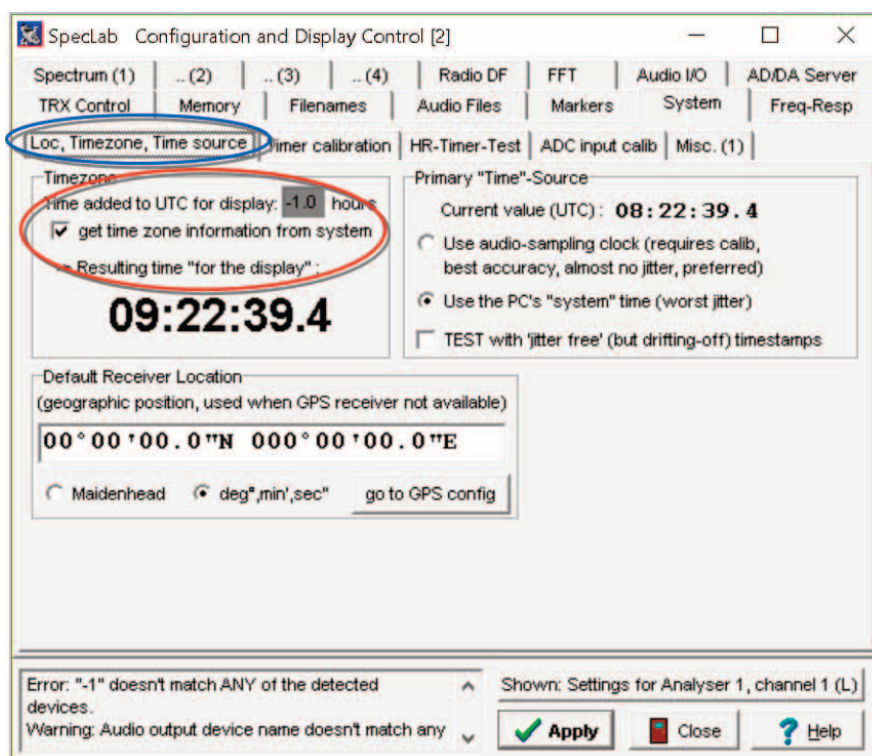


Figura 50 Tempo di riferimento. Il pannello “loc, Timezone, Time source” consente le impostazioni relative alla sorgente di riferimento per la marcatura del tempo. Impostando il flag come in figura, l’ora di SpecLab verrà visualizzata in UTC basandosi sulle impostazioni di sistema (che abbiamo già visto al punto 2 del paragrafo 4.0). Per convenzione internazionale, l’ora UTC è l’ora solare sul meridiano di Greenwich.

4.6 Scelta della scala cromatica

Spectrum Lab dispone di decine di scale cromatiche (o *palettes*) già preimpostate. Personalmente preferisco non usare una palette che sfuma tra colori diversi perché, soprattutto quando contiene molte scale tonali, si tende istintivamente a dare importanza alla “forma del colore” anziché alla vera geometria del pattern. Quando poi si deve sfogliare in velocità un gran numero di spettrogrammi, questo effetto è forviante sulla concentrazione. È anche vero che l’occhio reagisce meglio al colore che al B/N, per cui ritengo che il compromesso migliore sia una scala monocromatica, tipo il *viraggio seppia* che si usava un tempo per rendere più “viva” la fotografia in B/N. Lo stile di colore si può selezionare dal menu “File” alla voce “Waterfall Color Palette”. In realtà ogni tavolozza di Spectrum Lab è un file di testo con estensione “.PAL” che si trova nella cartella “palettes”. SpecLab dispone anche di una finestra per creare palettes personalizzate ma in realtà, essendo files in formato ascii, essi si possono aprire con i soliti “Blocco note” o “Wordpad” per essere modificati manualmente. Personalmente uso una variante della scala B/N pura, con il bianco al livello minimo e il nero al massimo (esiste anche l’inverso) ma con la sostituzione del rosso puro (FF0000) al posto del nero puro (000000). Questo fa sì che la scala resti sostanzialmente in B/N (psicologicamente “obiettiva”) ma qualunque valore ecceda il range di ampiezze impostato (Figura 42) questo verrà visualizzato in rosso, segnalando un livello “fuori scala” (vedi ad es. le Figure 57 e 58). È per questo motivo che nei miei spettrogrammi i fulmini si tingono spesso di rosso. Una regolazione manuale del contrasto e della luminosità della scala cromatica (qualunque sia la base impostata) si può operare con i cursori posti sulla finestra principale di SpecLab (in basso a sinistra) alla voce “Color Palette”, dove “B” indica il controllo di luminosità e “C” quello del contrasto. Prima di toccare i cursori è preferibile fare un backup dei files di configurazione, perché è probabile che manualmente non si potrà più ripristinare la posizione di default.

5.0 Controllo remoto con Apache Server

5.1 Installazione di Apache

Apache HTTP è un server WEB della *Apache Software Foundation* [Apache, foundation]. L'applicazione è gratuita e può lavorare su molti sistemi operativi, come UNIX/Linux, Microsoft Windows e OpenVMS. Installeremo questo software per poter dotare la stazione VLF di un sito WEB locale attraverso il quale essa potrà essere interrogata da remoto. Per far questo, oltre all'installazione di Apache, sarà necessario copiare nel server le pagine web predisposte per la visualizzazione dei dati ed installare l'interprete PHP per renderle eseguibili sul WEB server. La versione 2.2.9 è quella che usavo con Windows XP e che continuo ad usare su Windows 10 perché mi ha dato meno problemi delle versioni più recenti. Eseguire quindi il download e l'installazione di "Apache 2.2.9 installer" (o successiva) da [Apache]⁵⁶. La procedura di installazione prevede l'immissione dei seguenti dati:

- Network domain
- Server Name
- E.mail Administrator
- Porta 80
- Directory Webserver: **C:\htdocs**
- Typical Setup

Quello che conta davvero è impostare la porta 80 e che come directory principale del server venga definita, come di default, "C:\htdocs", cioè la stessa che abbiamo preimpostato per il sito web e il salvataggio dei dati (vedi paragrafo 4.0 e Figura 38). Altrimenti, se è stato predisposto in altro modo, anche qui andrà inserito il path prescelto per la cartella principale del sito WEB. Riavviare Windows a installazione completata. A questo punto occorre andare sulla configurazione del Firewall per sbloccare il server e la porta TCP 80 che esso impiega di default (oppure la 8080, se la 80 fosse già in uso sullo stesso sistema. Vedremo dopo come riconfigurare la porta sul server).

- Pannello di Controllo > Windows Firewall > Eccezioni > **Aggiungi porta:**
- Nome: **Apache**
- Numero porta: **80**
- (Riavvio di Windows)

5.2 Installazione dell'interprete PHP

Il PHP è un linguaggio di programmazione (è uno *scripting interpretato*) per pagine WEB dinamiche, ovvero per eseguire pagine che non si limitano a impaginate testi e immagini ma sono in grado di eseguire interattivamente delle funzioni. L'interprete PHP è un software gratuito. Un particolarità del PHP, rispetto al classico HTML, è che l'interprete non si trova "lato client" ma "lato server", cioè appunto nel webserver che abbiamo appena installato. Installeremo quindi l'interprete scaricandolo da [PHP]. Con l'*Apache 2.2.9* uso la versione "PHP 5.3.2 installer". La procedura di installazione prevede l'accettazione o modifica dei seguenti dati:

- Directory installazione PHP: C:\Program Files (x86)\Apache Software Foundation\PHP
- Directory configurazione Apache: C:\ Program Files (x86)\Apache Software Foundation\Apache2.2\conf

⁵⁶ Attenzione: qualora non fosse già presente, può essere necessario installare prima *Microsoft Visual C Redistributable*, scaricandolo da [MS Visual C].

Il primo indirizzo è quello di default dell'interprete PHP. Il secondo deve essere la cartella di Apache che contiene "httpd.conf", ovvero il file di configurazione di Apache (verificare ed eventualmente accettare). L'interprete PHP infatti deve interagire con Apache. Al termine dell'installazione del PHP occorrerà andare a modificare in Apache proprio questo file di configurazione, che dovrebbe trovarsi in questa posizione:

C:\Programmi\Apache Software Foundation\Apache2.2\conf\httpd.conf

Si tratta di un file ascii (formato testo) che sotto Windows si può aprire e modificare con "Blocco note" o con "Wordpad". Approfittiamo di questa operazione per verificare anche la corretta configurazione di Apache. In definitiva, aperto il testo "httpd.conf", occorrerà verificare la correttezza di alcune righe e aggiungerne delle altre. Modificare i punti indicati nella Figura 51, dove la directory principale di Apache, di nome "htdocs", dovrà risultare in "C:\\" (vedi paragrafo 4.0 e Figura 38), o comunque come preimpostato insieme al salvataggio di Spectrum Lab.

Nello stesso file, in coda, si troverà una modifica inserita dall'installazione dell'interprete PHP. Essa dovrebbe iniziare con: «#BEGIN PHP INSTALLER EDITS...» e terminare con: «#END PHP INSTALLER EDITS ...». Qui occorrerà cancellare tutto questo intervallo (ma è meglio "commentarlo", antepoendo "#" ad ogni riga) e sostituirlo (Taglia/Incolla) con il breve script riportato in Appendice al paragrafo "7.9 Modifica al file di configurazione di Apache Server". Anche in questo caso, verificare che gli indirizzi indicati corrispondano alla partizione in cui è stato effettivamente installato Apache. Al termine di queste operazioni salvare le modifiche e riavviare Windows. Per salvare sopra al vecchio file possono essere necessarie le credenziali di amministratore (dipende dal sistema operativo).

Figura 51 File di configurazione di Apache HTTP Server. Il file di configurazione di Apache si chiama "httpd.conf" ed è in formato testo (ascii). Stiamo vedendo due porzioni del listato, in corrispondenza delle quali si deve modificare il path della cartella principale del WEB server: "htdocs".

Dovrà essere la stessa impostata al paragrafo 4.0 (vedi Figura 38).

```
(...)  
#  
# DocumentRoot: The directory out of which you will serve your  
# documents. By default, all requests are taken from this directory, but  
# symbolic links and aliases may be used to point to other locations.  
#  
DocumentRoot "C:/htdocs" ←  
  
(...)  
#  
# This should be changed to whatever you set DocumentRoot to.  
#  
<Directory "C:/htdocs"> ←  
  
(...)
```

5.3 Interfaccia WEB di controllo remoto

La stazione VLF sarà contattabile dall'esterno grazie al sito locale installato nella cartella "htdocs". In questa cartella vi saranno 3 pagine WEB fondamentali e un file TXT. Le relazioni tra queste pagine sono illustrate nello schema di Figura 52. Fondamentalmente si ha una *Home Page* ("index.php") da cui si ha accesso a due pagine di servizio che sono il *display* dell'acquisizione in tempo reale ("realtime.php") e il *form* per la consultazione e il download dei dati archiviati ("archivio.php"). Queste pagine per funzionare hanno bisogno di informazioni specifiche sulla stazione (nome, IP, ecc.) che vengono lette sul file ascii "ID.txt". Questo è l'unico file che, ad ogni stazione installata, dovrà essere aperto e personalizzato immettendo i dati locali. I listati di queste pagine sono riportati in appendice (7.9) dove è possibile estrarli con un semplice copia/incolla. È possibile visualizzarne un esempio operativo sul sito di ARI Fidenza [SDT, Fidenza]. Qui l'interfaccia di controllo della stazione VLF è stata inserita nella locale pagina dedicata al progetto SDT. La stazione remota ad essa collegata è gestita dall'ARI e impiega la propria particolare apparecchiatura (in questo caso con un'antenna Loop).

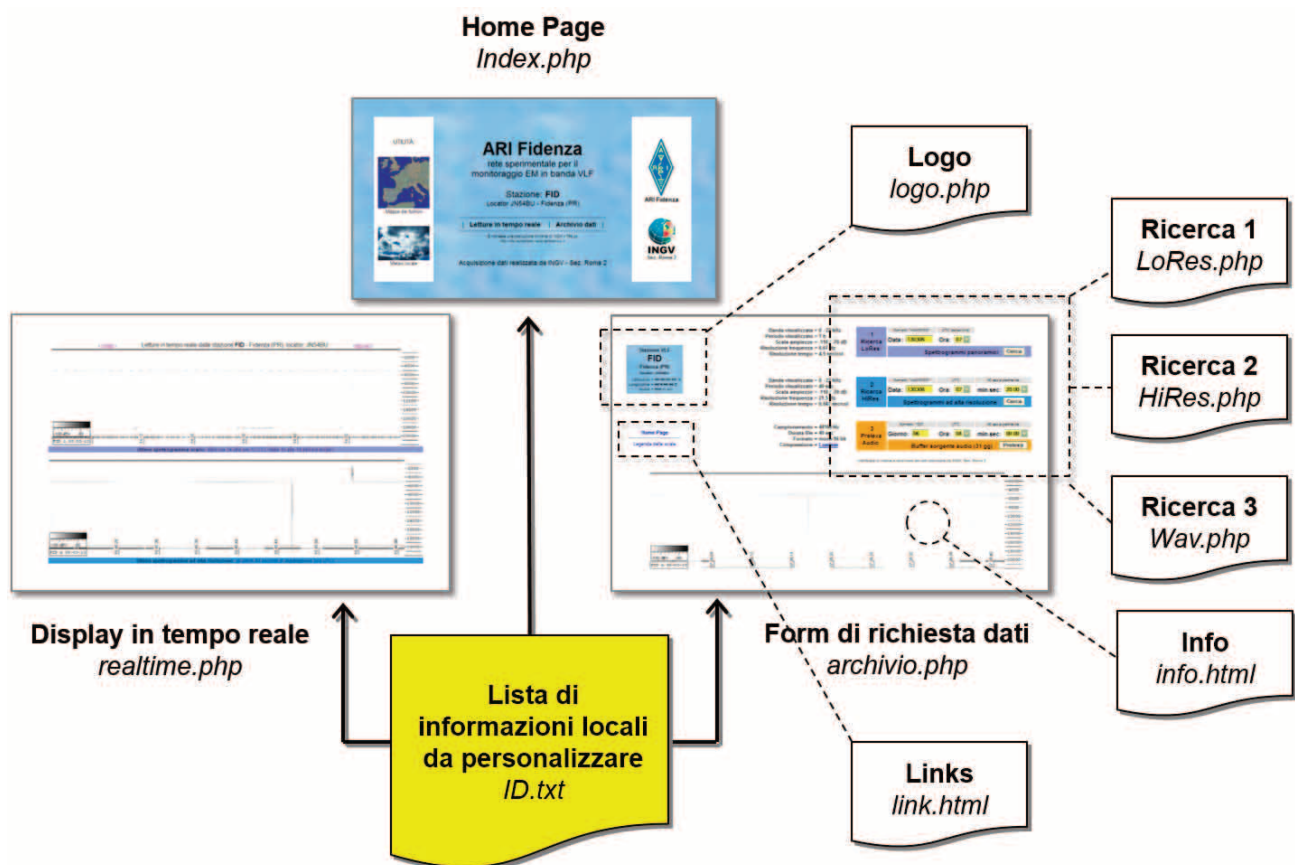


Figura 52 Schema dell'interfaccia WEB. La pagina principale riporterà i dati locali della stazione VLF che troverà indicati nel logfile "ID.txt". Dalla Home Page si può accedere alla visione degli spettrogrammi in tempo reale ("realtime.php") e alla visione dei dati archiviati ("archivio.php"). Quest'ultima pagina richiama i forms di ricerca progressiva 1, 2 e 3 (rispettivamente: "LoRes.php", "HiRes.php", "Wav.php), un logo che riempolgherà i dati della stazione ("logo.php") dei links di servizio ("link.html") e inoltre, di default, al posto del risultato della ricerca visualizzerà una pagina di informazioni generali ("info.html"). Tutte queste pagine sono automaticamente configurate dal logfile "ID.txt" che dovrà essere personalizzato ad ogni nuova installazione. Si ricorda che le pagine "php" si possono aprire con qualsiasi browser ma vengono visualizzate correttamente soltanto quando è attivo il server locale con l'interprete PHP.

L'acquisizione tuttavia segue le impostazioni e le modalità che sono state qui descritte, producendo un set di dati analoghi a quelli della rete INGV e delle altre stazioni SDT che hanno adottato lo stesso sistema.

Tornando alla nostra installazione, tenteremo ora la rocambolesca impresa di “scaricare” l'interfaccia WEB nel server PHP usando questo stesso libro come supporto del software. Naturalmente sarà necessaria la versione originaria digitale di questa guida. Con un semplice editor di testo (es. per Windows: il “Blocco note” o il Wordpad) occorre creare dei files direttamente nella cartella “htdocs” ma facendo attenzione a salvarli di volta in volta con l'estensione indicata (“.txt”, “.php” o “.html”). Dentro ciascun file andrà copiato (Copia/Incolla) di volta in volta uno dei codici pubblicati in appendice nel paragrafo: “7.10, Codice dell'interfaccia WEB di controllo remoto delle stazioni VLF”. Questa è la procedura:

- Copiare lo script “Home Page” e salvare come: “index.php”
- Copiare lo script “Display in tempo reale” e salvare come “realtime.php”
- Copiare lo script “Form di richiesta dati” e salvare come “archivio.php”
- Copiare lo script “Logo Stazione” e salvare come “logo.php”
- Copiare lo script “Ricerca 1” e salvare come “LoRes.php”
- Copiare lo script “Ricerca 2” e salvare come “HiRes.php”
- Copiare lo script “Ricerca 3” e salvare come “Vav.php”
- Copiare lo script “Links” e salvare come “link.html”
- Copiare lo script “Informazioni” e salvare come “info.html”
- Copiare lo script “Struttura” e salvare come “spazio.html”
- Copiare lo script “Lista info locali” e salvare come “ID.txt”
- Verificare che nomi ed estensioni di files siano scritti correttamente, lettere maiuscole comprese.

L'ultimo file è in formato testo (.txt) ed è l'unico che va personalizzato inserendo le informazioni del sito di monitoraggio come e dove indicato all'interno del file stesso⁵⁷. A questo punto si avrà nella cartella “htdocs” un sito che segue lo schema della Figura 52. Eventuali figure linkate nel sito (attraverso un manuale non posso fornire tutto) vanno inserite, con il nome richiesto dal link esistente, in una cartella di nome IMG da creare sempre in “htdocs”. Nella stessa cartella è possibile inserire un'immagine di nome “sfondo.jpg” che andrà a comporre la trama o la tinta per lo sfondo della pagina principale.

Questa interfaccia WEB funziona solo nella cartella del server (che per noi è “htdocs”) quando è installato un interprete PHP, ma se tutto è andato a buon fine, il sito sarà già visibile dall'interno della stazione stessa. Aprire un browser (es. Explorer) e, al posto di un indirizzo WEB, scrivere nell'URL la parola “localhost”, che indirizza al sito locale. Se il sito appare, è probabile che tutto stia funzionando correttamente. Se sono già avviate le due sessioni di SpacLab, al link “Lettura in tempo reale” si vedranno gli spettrogrammi. Si potrà invece accedere da un PC remoto immettendo nel browser l'indirizzo IP del router della stazione, eventualmente con l'indicazione della porta alternativa (se cambiata, es: “iprouter:8080”). Alcuni siti web, come [MyIP.com], possono aiutare a conoscere l'IP locale su cui il router è visto dall'esterno.

6. Interpretazione degli spettrogrammi VLF

In questo capitolo vengono riportati alcuni esempi dei più classici pattern spettrali. I primi due

⁵⁷ ATTENZIONE: il nome della stazione deve essere esattamente lo stesso che era stato impostato nello script delle “Periodic Actions” di SpecLab (vedi il riferimento “1” indicato al paragrafo 4.2 e nella Figura 44). Se non risulta uguale, i dati salvati non verranno trovati.

(Figura 53 e 54) saranno utili per verificare se una stazione sta lavorando correttamente. Gli altri esempi sono i fenomeni naturali e artificiali più comuni nella banda VLF. La presentazione sarà schematica e più che altro a scopo illustrativo, per fornire un “bestiario” tipico della popolazione. Per un ulteriore approfondimento si rimanda alla lettura di testi più specifici, come [Romero, 2006] e i siti WEB di Romero [Romero, VLF], INSPIRE [INSPIRE, Signals] e McGreevy [McGreevy, Audio]. I siti [INSPIRE, Signals] e [McGreevy, Listening] offrono anche dei campioni sonori. In fine, riguardo la fisica dei fenomeni, si raccomanda ancora una volta [Meloni et al., 2015].

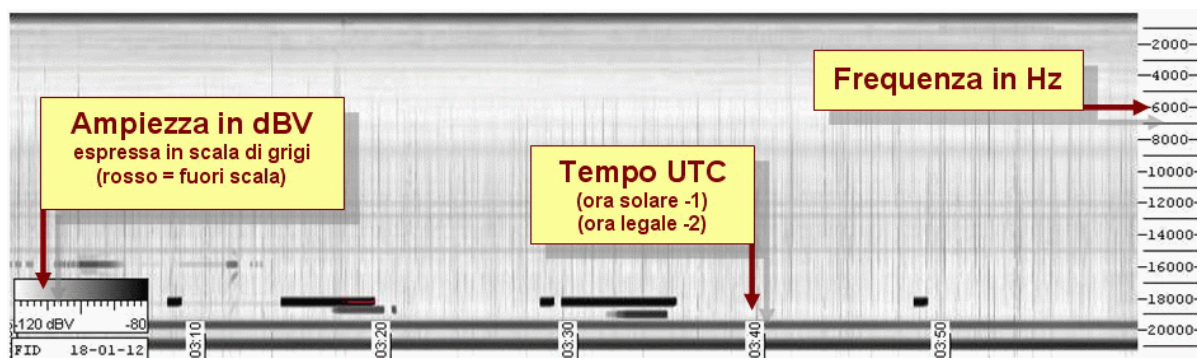


Figura 53 Legenda degli spettrogrammi. Questo è uno tipico spettrogramma prodotto da Spectrum Lab con la configurazione “LoRes”. La scala orizzontale indica il tempo UTC (tempo coordinato universale). A questo orario universale occorre togliere un’ora per avere l’ora solare italiana (la nostra ora invernale) e due ore per l’ora legale italiana (la nostra ora estiva). La scala verticale a destra indica le frequenze, da 0 a 22 kHz, con lo zero in alto. La scala delle ampiezze (esprese in tonalità di grigio) è riportata nella figura sovrainpressa in basso a sinistra. Sotto questa scala c’è un’etichetta che indica il nome della stazione e la data di salvataggio. Se le impostazioni di Spectrum Lab sono state inserite come descritto nella guida, questo è il grafico che si dovrà visualizzare.

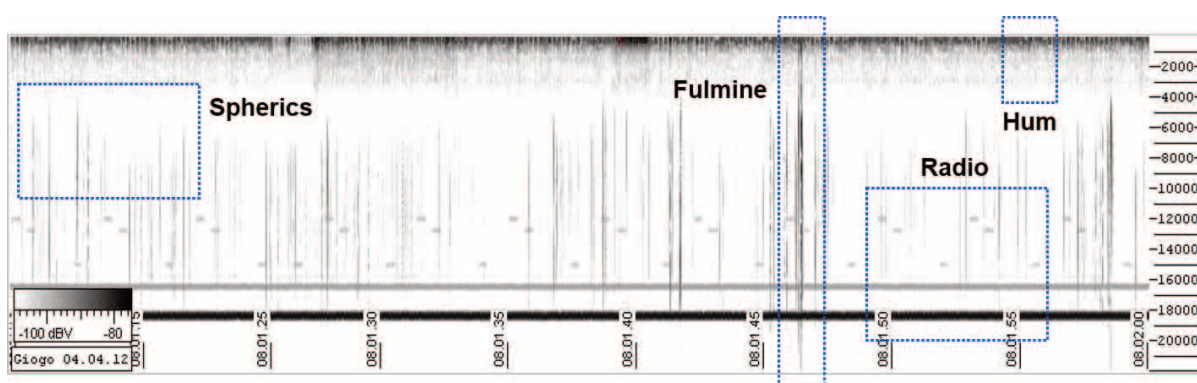


Figura 54 Rumore di fondo tipico della banda VLF. Questo spettrogramma riporta ciò che più comunemente si può osservare ed ascoltare in Italia nell’arco di tempo di 40 secondi (scala orizzontale) su una finestra di frequenze (scala verticale) compresa tra 0 (in alto) e 22 kHz (in basso). Nella figura si individuano diversi fenomeni, alcuni dei quali sono evidenziati dai rettangoli: “Hum” è il rumore antropico urbano generato per lo più dalla corrente di rete a 220V (spettro delle armoniche dei 50 Hz); “Spherics” è l’attività elettrica naturale dell’atmosfera (linee verticali tratteggiate o continue); “Fulmine” evidenzia un fulmine caduto relativamente vicino; “Radio” indica delle trasmissioni radio VLF sia intermittenti che continue (rispettivamente linee orizzontali tratteggiate e continue). Se si osserva questo tipo di panorama, significa che la stazione sta lavorando correttamente.

6.1 Segnali di origine naturale

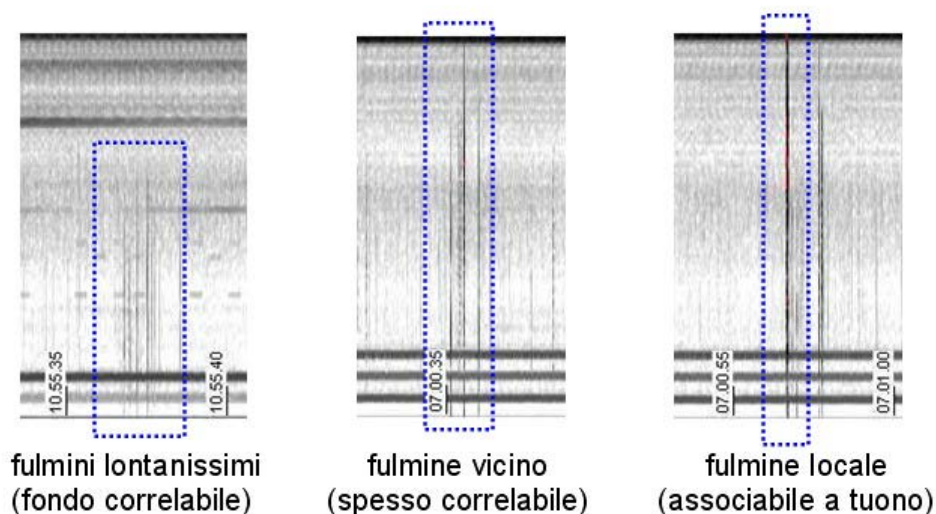


Figura 55 Fulmini. Questa serie di spettrogrammi mostra diversi aspetti dell'emissione primaria del fulmine. Il primo a sinistra è il classico "Spherics". Si tratta di fulmini molto distanti. Per il nostro paese provengono dallo stesso meridiano ma su latitudini australi e per questo sono più diffusi in estate, quando nel luogo di provenienza è inverno. Questo rumore di fondo sarà quindi spesso correlabile su diverse stazioni anche molto lontane. Il secondo a seguire è un fulmine caduto relativamente vicino alla stazione. Queste tracce sono spesso correlabili tra stazioni vicine. Il terzo è un fulmine caduto presso il sito della stazione. Questo tipo di manifestazione è localmente associabile alla luce e al tuono.

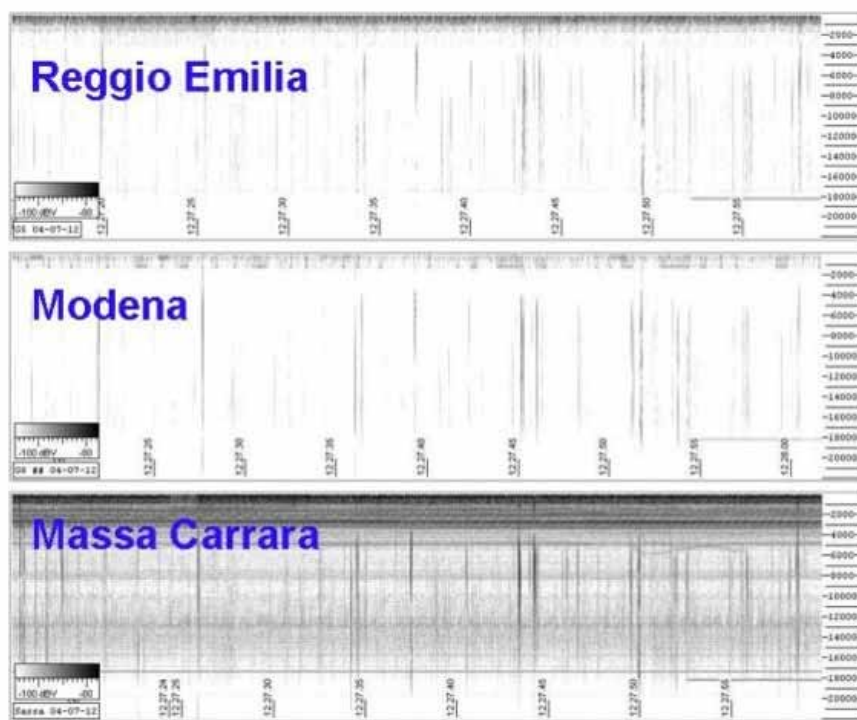


Figura 56 Correlazione tra gli Spherics. Qui vediamo lo stesso periodo di registrazione su tre stazioni nazionali, installate presso Reggio Emilia, Modena e Massa Carrara. Il rumore di fondo di origine antropica è differente ma si può notare come gli Spherics siano correlabili, allo stesso modo della stazione radio sui 18 kHz (la linea orizzontale in basso).

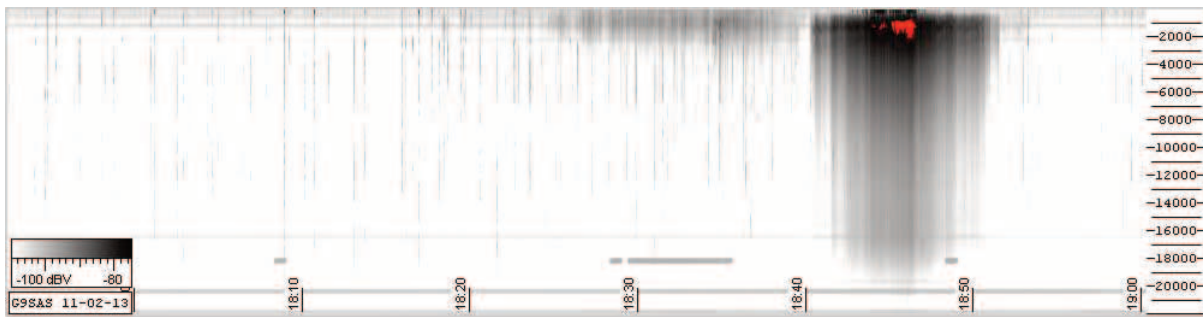


Figura 57 Temporale. Traccia a bassa risoluzione (LoRes) di un temporale locale. La tinta rossa indica tutte le intensità che si estendono al di fuori della scala rappresentata dalla legenda in basso a sinistra. Nel cuore della tempesta il campo elettrico è salito ben oltre il range che si osserva abitualmente.

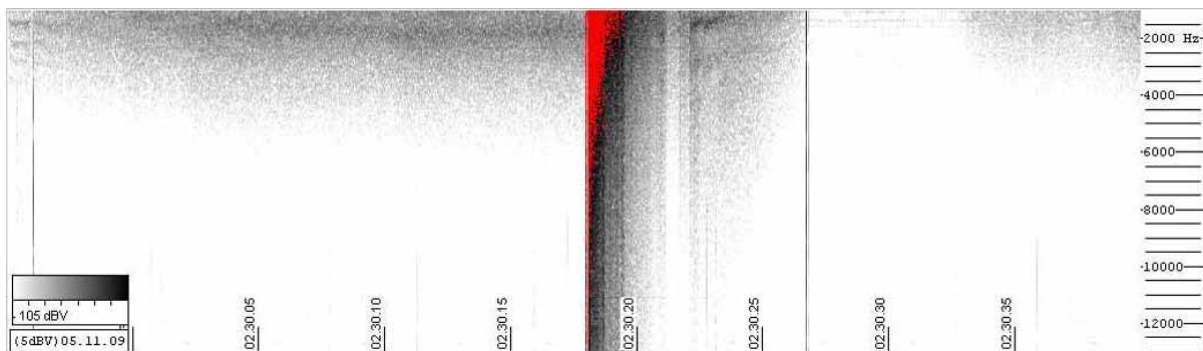


Figura 58 Fulmine caduto in sito. Questa è la traccia ad alta risoluzione (HiRes) di un fulmine caduto esattamente presso la stazione VLF. Fortunatamente non ha causato alcun danno alla stazione, che non ha nemmeno smesso di funzionare. Notare la dispersione della carica elettrica prima della scarica, prima cioè che l’arco voltaico avesse trovato una strada attraverso la ionizzazione dell’aria. Pochi istanti dopo inizia a prepararsi un’altra scarica. La scala delle intensità (le gradazioni di grigio) è tarata tra -110 -75 dBV e la marcatura rossa indica il segnale fuori scala. Registrazione effettuata nel 2009 sul Monte del Giogo (quota 1518), presso la sede del gruppo Troposcatter dell’ARI di Parma.

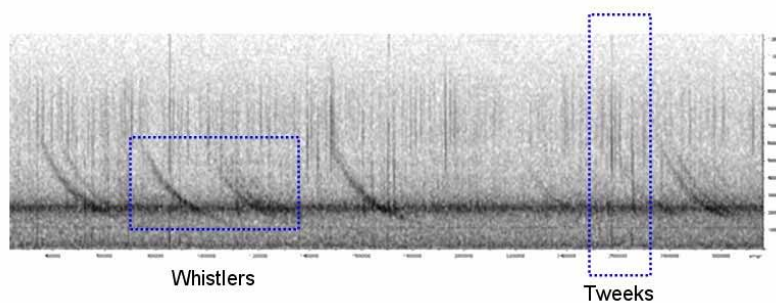


Figura. 59 Altri fenomeni legati ai fulmini. In questa rara registrazione eseguita in Italia (passo dell’Ospedalaccio, 1271 m, presso Sassalbo, Massa Carrara) vediamo una manifestazione secondaria dell’energia EM emessa dai fulmini. Si tratta dei “Whistlers” generati nella magnetosfera e dei “Tweeks” generati nella ionosfera. I Tweeks non sono tanto rari ma per ascoltare dei Whistlers solitamente bisogna avvicinarsi alla latitudine dei circoli polari.

6.2 Segnali prodotti dall'attività umana

Figura 60 Rete elettrica. Il primo dei disturbi di origine artificiale è il segnale emesso dalla stessa corrente che alimenta la stazione.

La distribuzione della corrente elettrica domestica avviene nel nostro paese su 220 V alternati a 50 Hz. Questa frequenza emette un segnale che tipicamente si vede nella prima riga dello spettrogramma VLF (P_{sup}), trovandosi poco al di sotto della risoluzione spettrale. Lo spettro delle armoniche dei 50 Hz crea invece una banda bruna che sfuma all'aumentare della frequenza, confondendosi con un'infinità di altri segnali e armoniche che vengono anch'essi prodotti dall'attività umana.

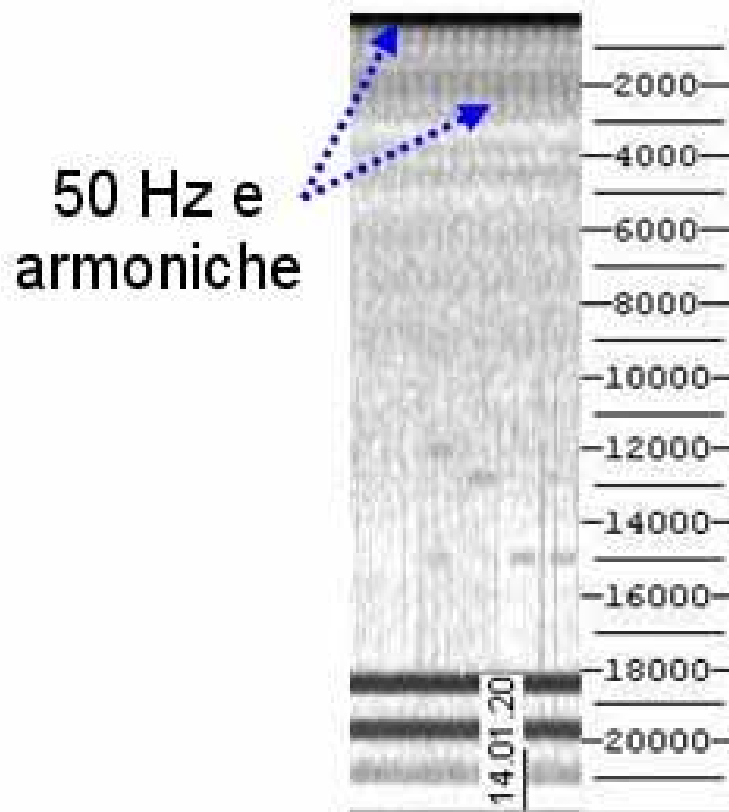
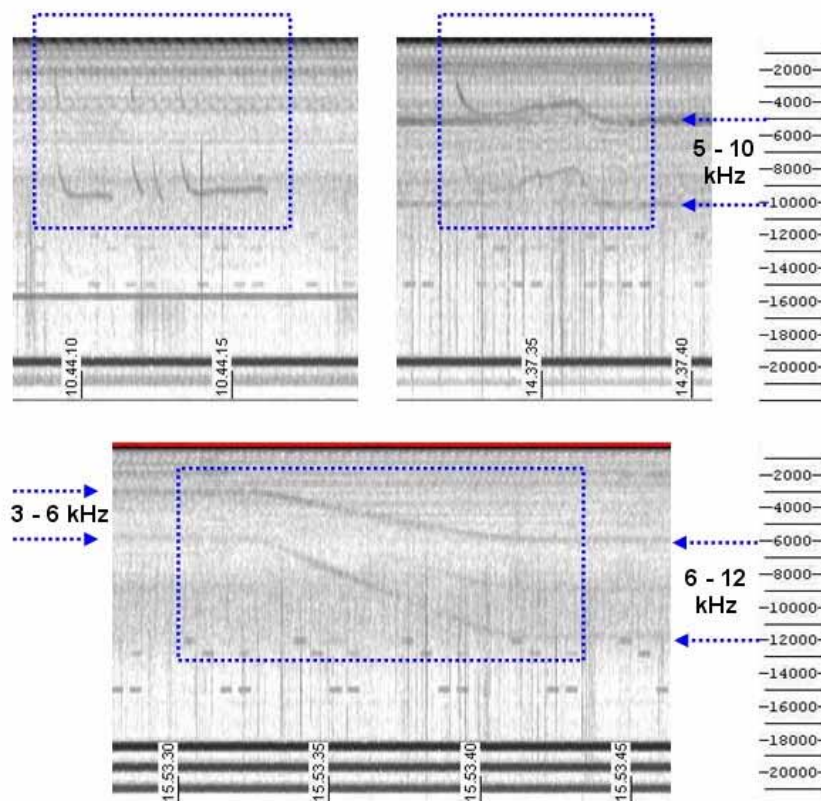


Figura 61 Motori elettrici. Tutti i motori elettrici a spazzole, siano essi elettrodomestici o macchinari da cantiere, producono ciclicamente delle scintille che generano segnali VLF. La frequenza oscilla con la variazione del numero dei giri, sia in fase di accelerazione che sotto sforzo, cosicché si avranno delle variazioni caratteristiche per lavatrici, autoclavi o utensili da cantiere. Notare nella figura in basso come la traccia della prima armonica aumenta proporzionalmente all'aumentare della frequenza fondamentale.



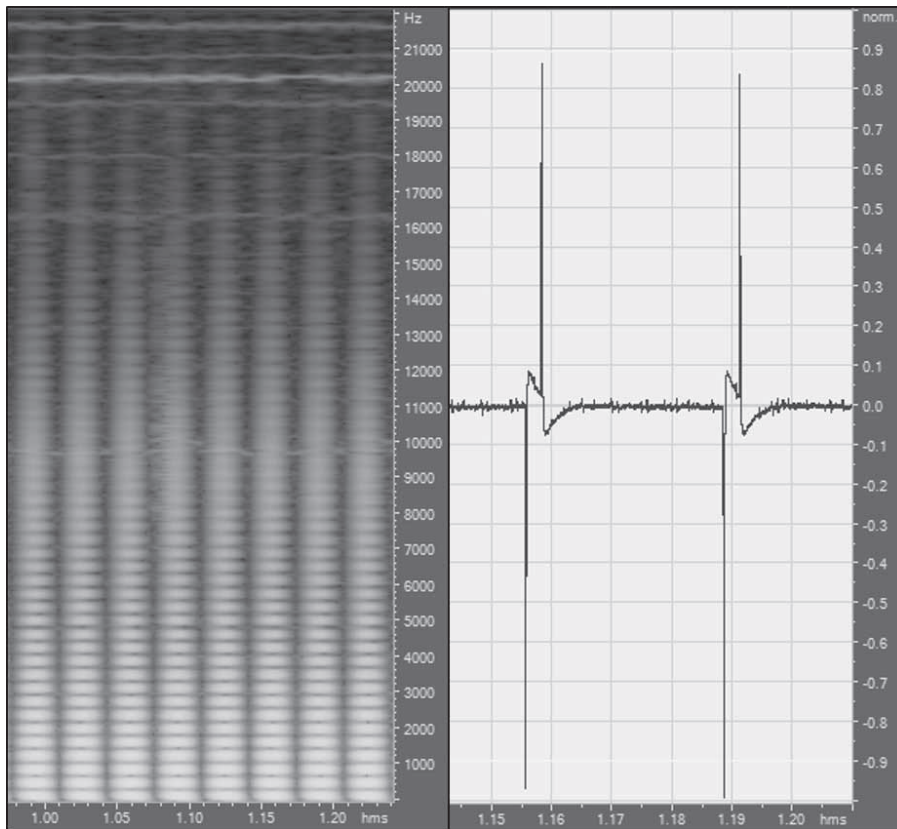


Figura 62 Pannelli fotovoltaici. Tra i pannelli fotovoltaici e la batteria che essi mantengono in carica c'è un dispositivo detto “regolatore” che produce un disturbo “martellante” e diffuso su un ampio spettro come quello qui rappresentato in forma di spettrogramma (a sinistra, bianco = max ampiezza) e di oscillogramma (a destra). Questo segnale in particolare è stato captato da un’antenna elettrica “portatile” alimentata autonomamente dalla propria batteria. È stato verificato in questo caso che il segnale veniva emesso dal telaio metallico del pannello solare e fino a una distanza di 15 metri risultava estremamente fastidioso.

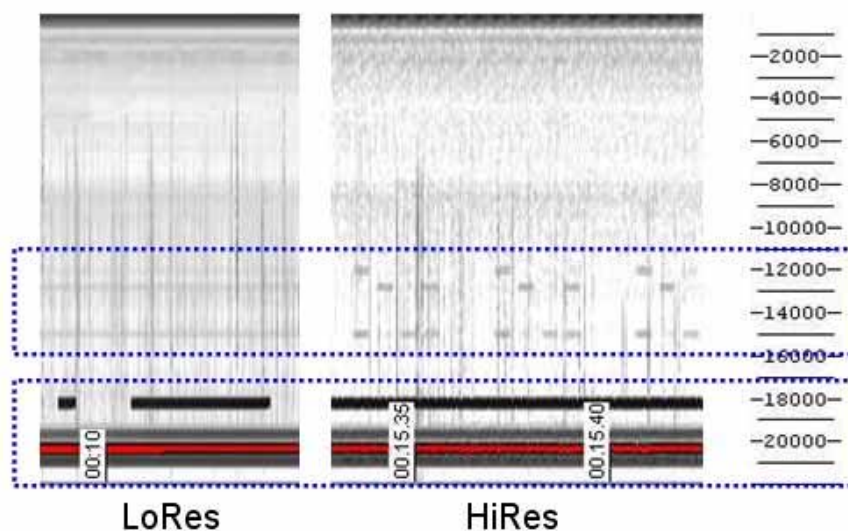


Figura 63 Segnali radio tipici. Le stazioni radio che si possono osservare più comunemente in banda VLF sono le così dette Alpha e Beta della rete sovietica per la radionavigazione. Prima dei GPS il punto nave si faceva triangolando queste sorgenti. Qui vediamo delle sorgenti intermittenti (in alto) e ad emissione continua (in basso). Essendo segnali costanti e correlabili si possono usare anche per la calibrazione remota di una stazione rispetto a un'altra di riferimento già tarata.

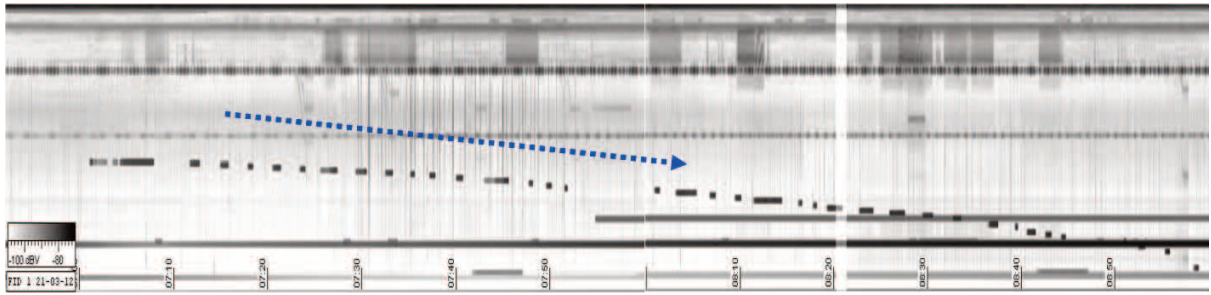


Figura 64 Segnali radio atipici. Qui vediamo qualcosa di abbastanza insolito anche se non rarissimo: la stessa stazione radio trasmette segnali di periodo incostante spostandosi progressivamente di frequenza. L'andamento è quello accompagnato dalla freccia blu. Ha iniziato poco dopo le 7:00 UTC ed ha proseguito per almeno due ore spazzando tutta la banda monitorata.

7. Appendice

Questo manuale vuole essere un testo tecnico ma allo stesso tempo divulgativo, per questo motivo si aggiungono in appendice degli approfondimenti specifici e una sintesi delle formule discusse nel testo in modo da rendere più chiara la spiegazione e più rapida l'applicazione delle tecniche. Verranno anche evidenziate le analogie tra sismologia e radiotecnica, derivanti dal semplice fatto che i due campi di studio si confrontano con onde di perturbazione di grandezze fisiche, se pure di diversa natura. Per ulteriori approfondimenti, altre fonti utili allo studio vengono suggerite a fine appendice. Sempre in questa appendice sono riportati nella loro interezza i codici di programma di cui si parla nel testo, in modo da poter essere estratti per intero con un semplice copia/incolla dal testo PDF⁵⁸.

7.1 Intensità e Magnitudo del terremoto

La scala di Mercalli esprime l'*intensità* del terremoto, cioè la forza con cui questo si è manifestato in un determinato luogo, misurata in base ai suoi effetti distruttivi. Per convenzione si esprime in numeri romani. La Magnitudo (M), introdotta successivamente da Richter, esprime invece l'*energia* con cui il terremoto si è manifestato all'epicentro. Supponiamo che il terremoto sia una trasmissione radio. La magnitudo Richter può essere vista allora come la potenza irradiata dalla stazione trasmittente mentre il grado Mercalli rappresenta l'intensità del segnale misurato dalla radio ricevente. La misura di Mercalli è una *scala*, in quanto è suddivisa in intervalli discreti detti *gradi* che variano da un valore minimo (nessun effetto) a un valore massimo (distruzione totale). La misura di Richter invece non è una scala (se si vuole può considerarsi "scala" nel senso di "misura", ma sia chiaro che non è suddivisa in rigidi livelli) infatti può assumere infiniti valori essendo il risultato di un calcolo effettuato a partire da grandezze che variano con continuità. Il calcolo della Magnitudo si basa sull'ampiezza dei segnali ricevuti dai sismometri confrontata con un valore standard⁵⁹:

⁵⁸ Se questa è una copia cartacea, si raccomanda il download dell'originale testo digitale dal sito delle edizioni Quaderni di Geofisica dell'INGV [INGV, QdG].

⁵⁹ In realtà esistono diversi modi per calcolare la magnitudo ma questa espressione rende meglio il confronto con le misure radiotecniche. Per completezza ricordiamo soltanto, senza approfondire ulteriormente, che nel tempo sono state introdotte successive evoluzioni nella definizione e nel metodo di calcolo della magnitudo (che hanno portato a magnitudo "diverse") sostanzialmente come conseguenza dell'evoluzione della strumentazione sismometrica e delle capacità di estrarre sempre maggiore informazione dai tracciati sismici oltre la semplice ampiezza massima dell'onda registrata.

- Magnitudo:

$$M = \log_{10}(A/A_0) \quad \text{dove: } A = \text{ampiezza massima di un terremoto;} \\ A_0 = \text{ampiezza del terremoto di riferimento} \\ (\text{se fosse stato registrato alla medesima distanza})$$

Come riferimento è stato scelto quel terremoto che produce su un sismografo standard, posto a 100 km dall'epicentro, un sismogramma con oscillazione massima pari a 0,001 mm. La Magnitudo è dunque espressa da un numero decimale che può assumere qualsiasi valore (es: 4,2). Non esiste un limite inferiore (dipende dalla sensibilità degli strumenti) e non esiste nemmeno un limite superiore. Come affermò lo stesso Richter: «*Il limite dipende dalla Terra, non dalla scala*». Ciò significa che questa grandezza ha bisogno di esprimere e confrontare tra loro valori che si estendono su una scala quasi infinita. La soluzione matematica è stata il logaritmo del rapporto tra due grandezze, esattamente come in elettronica si adotta il Bel (o meglio il sottomultiplo dB)⁶⁰ per la misura dei segnali radio e acustici. Altra conseguenza dell'adozione del logaritmo in base 10 è che l'incremento di una unità (es. da magnitudo 5 a 6) significa che l'ampiezza dell'onda sismica è aumentata di dieci volte.

Malgrado la differenza concettuale che esiste tra energia erogata ed intensità degli effetti, è ragionevole aspettarsi che, a parità di condizioni, all'aumentare della magnitudo debba aumentare anche il valore della scala Mercalli. In effetti per terremoti superficiali dell'Appennino centrale (ma con ciò stiamo implicitamente fissato una profondità tipica di 9-10 km) esiste una relazione empirica tra magnitudo e scala Mercalli, cioè tra energia irradiata dall'ipocentro e intensità percepita all'epicentro:

- Equivalenza tra Magnitudo e Mercalli:

$$M = 0,40 I + 1,69 \quad \text{dove: } M = \text{magnitudo}; I = \text{intensità massima della scala Mercalli.}$$

Inoltre, essendo la magnitudo una misura relativa indiretta (presa in superficie) dell'energia con cui il terremoto si è manifestato all'ipocentro, è ragionevole aspettarsi di poterla usare anche per risalire ad una misura assoluta dell'energia liberata dal sisma nell'ipocentro. In teoria esiste anche questa formula:

- Energia liberata dal sisma:

$$E = 10^{1,5M+4,8} \quad \text{dove: } M = \text{magnitudo}; \text{ energia espressa in Joules}$$

Un'altra caratteristica importantissima della sismicità tettonica è che in qualunque posto del mondo i terremoti forti accadono raramente mentre quelli piccoli sono enormemente più numerosi. Questo concetto viene espresso da una legge empirica che mette in relazione una magnitudo Richter con il numero totale dei terremoti di almeno quella magnitudo occorsi in una data regione e periodo di tempo (per convenzione un anno):

- Legge di Gutenberg-Richter:

$$\log N = a - bM \quad \text{ovvero: } N = 10^{a - bM}$$

dove: $M = \text{magnitudo Richter}$
 $N = \text{numero di terremoti con magnitudo maggiore di } M$
 $10^a = \text{numero terremoti di } M=0 \text{ occorsi in quella regione in un anno.}$

Da questa legge risulta che universalmente, al diminuire di una sola unità di magnitudo, il numero di terremoti che statisticamente ci si attende di osservare quell'anno in quel luogo aumenta di circa dieci volte. Per fare un esempio, per ogni evento di magnitudo 4.0 (percepibile) ci saranno

⁶⁰ Confronta direttamente con il paragrafo 7.5 "Decibel".

10 scosse di magnitudo 3.0 (appena percepibili) e 100 scosse di magnitudo 2.0 (non percepibili). Considerando soltanto quelli percepibili, ogni giorno nel mondo si registra una media di un terremoto ogni 30 secondi: due eventi al minuto. La media annua mondiale degli eventi sismici risulta distribuita per classe di magnitudo secondo i valori indicati (approssimativamente) della Tabella 11.

Tabella 11 Media annua mondiale degli eventi sismici.

Magnitudo	Eventi per anno
0 - 1.9	> 1 milione
2.0 - 2.9	> 1 milione
3.0 - 3.9	100000
4.0 - 4.9	10000
5.0 - 5.9	1000
6.0 - 6.9	130
7.0 - 7.9	15
8.0 - 8.9	1
9.0 - 9.9	< 1

Per puro esercizio dilettantistico, e ricordando che la citata equivalenza tra Magnitudo e grado Mercalli è una formula empirica e valida soltanto per i terremoti superficiali dell'Appennino centrale, si riporta di seguito una tabella dettagliata dei gradi della scala Mercalli in una moderna versione MCS:

- I. *Scossa strumentale: impercettibile agli esseri umani*, è rilevabile soltanto dagli strumenti.
- II. *Scossa leggerissima*: avvertita soltanto da persone particolarmente sensibili o nervose, in perfetta quiete, cioè ferme o a riposo in ambiente tranquillo. Solitamente è **percepibile solo nei piani superiori delle case** ove possono oscillare lievemente i lampadari.
- III. *Scossa leggera*: viene avvertita all'interno delle abitazioni con un effetto simile al passaggio di un autocarro: **poche persone ci fanno caso** ed altre la riconoscono come terremoto soltanto dopo averne parlato con altri. Oggetti appesi possono oscillare.
- IV. *Scossa moderata*: all'aperto la scossa è percepita fisicamente da poche persone anche se le automobili ferme oscillano vistosamente. All'interno delle abitazioni **numerose persone, ma non tutti, avvertono un effetto simile al passaggio di un autocarro pesante** su una strada dissestata: tremolio o leggere oscillazioni dei mobili, urti di cristalleria e vasellame posti a breve distanza; tremano i vetri o tintinnano le finestre; scricchiolano porte, travi e assi in legno. Nei recipienti aperti, i liquidi vengono leggermente mossi. Si può avere la sensazione che in casa sia caduta una serie di oggetti pesanti. Si oscilla con tutta la sedia o il letto come su una barca. Generalmente questi fenomeni non provocano paura a meno che le persone non siano state già spaventate da terremoti precedenti. Raramente la scossa può svegliare chi dorme.
- V. *Scossa forte*: all'interno delle case la scossa viene avvertita da tutti. Nelle strade e durante le attività lavorative il sisma viene percepito da numerose persone e persone sensibili lo avvertono anche in aperta campagna. Nelle case si avverte lo scuotimento dell'intero edificio. Oggetti appesi ma anche tendaggi non troppo pesanti oscillano; nel caso di campanelle, suonano. Gli orologi a pendolo possono fermarsi od oscillare con maggior periodo a seconda se la scossa si

esplica in direzione normale o perpendicolare al piano su cui oscillava il pendolo. Talvolta orologi a pendolo fermi possono riprendere temporaneamente il movimento. I mobili vibrano e piccoli oggetti possono cadere. Recipienti colmi ed aperti versano piccole quantità dei liquidi contenuti. I quadri si spostano, urtano tra loro o battono contro le pareti. Porte ed imposte sbattono e i vetri possono infrangersi. Talvolta l'illuminazione elettrica guizza o viene a mancare. **Chi dorme viene svegliato bruscamente** e sporadici gruppi di persone fuggono all'aperto. Chi si trova già all'aperto nota piante o rami che si muovono con evidenza come sotto l'effetto di un vento moderato e calcinacci che cadono dai cornicioni delle case.

VI. *Scossa molto forte: tutti si rendono conto che c'è un terremoto provandone paura*, anche a causa dei forti rumori e boati che produce. Molti fuggono all'aperto ma spesso si ha una sensazione d'instabilità che può arrivare al punto da far barcollare. La superficie dei liquidi si agita vistosamente. Quadri, libri ed oggetti possono cadere a terra; le porcellane si frantumano anche senza cadere; suppellettili assai stabili e perfino pezzi d'arredo vengono spostati o rovesciati. Nelle chiese piccole campane suonano da sole e battono gli orologi dei campanili. Le abitazioni di solida costruzione subiscono strutturalmente danni lievi: spaccatura dell'intonaco e caduta del rinzaffo di soffitti e pareti. Danni più gravi, ma non pericolosi, si hanno negli edifici mal costruiti. All'esterno può cadere qualche tegola o pietra di camino con qualche pericolo per chi fugge in strada.

VII. *Scossa fortissima: la scossa provoca panico nella popolazione*. I mobili si scostano dai muri e notevoli danni vengono provocati ad oggetti di arredamento anche pesanti. Numerosi edifici costruiti solidamente subiscono danni moderati: piccole spaccature nei muri, caduta di toppe piuttosto grandi dell'incalcinatura e dello stucco; caduta a volte anche di mattoni. Negli edifici a pareti intelaiate i danni all'incalcinatura e all'intelaiatura sono più gravi. In casi isolati può avvenire la distruzione di case mal costruite oppure riattate. All'esterno cadono molte tegole e vetri di finestre. Molti fumaioli vengono lesi da incrinature. Camini già danneggiati possono rovesciarsi sopra il tetto danneggiandolo. Da torri e costruzioni alte cadono decorazioni mal fissate. Grandi campane rintoccano. Le chiome degli alberi oscillano. Si producono onde sugli specchi d'acqua e le acque si intorbidiscono a causa della melma mossa. Varia la portata delle sorgenti.

VIII. *Scossa rovinosa: la scossa viene avvertita distintamente anche da chi è alla guida di un'auto*, che può perderne temporaneamente il controllo. Cadono rami, alberi, palizzate, torri e si aprono crepe nel terreno. Statue e monumenti in chiese, cimiteri e parchi pubblici ruotano sul proprio piedistallo o si rovesciano. Solidi muri di cinta in pietra si rompono e crollano. All'interno delle case anche i mobili più pesanti vengono spostati lontano o rovesciati. Gli edifici non costruiti in cemento armato subiscono gravi danni strutturali: circa un quarto delle case è gravemente lesa, alcune crollano, molte diventano inabitabili; gran parte di queste cadono. Negli edifici intelaiati cade gran parte della tamponatura. Case in legno vengono schiacciate o rovesciate. Spesso campanili di chiese e di fabbriche con la loro caduta causano danni agli edifici vicini più di quanto non avrebbe fatto da solo il terremoto. In pendii e terreni acquitrinosi si formano crepe. In terreni bagnati si ha l'espulsione di sabbia e di melma.

IX. *Scossa distruttiva: distrugge gli edifici poco resistenti o vetusti*: circa la metà delle case in pietra vengono distrutte; molte crollano; la maggior parte diviene

inabitabile. Le case ad intelaiature sono divelte dalle proprie fondamenta e crollano; travi strappate a seconda delle circostanze contribuiscono alla rovina. All'esterno si aprono numerose crepe nel terreno provocando la fuoriuscita di fango e la rottura di condutture e cavi sotterranei. Acqua e "vulcanetti" di sabbia traboccano dai terreni alluvionali.

- X. *Scossa fortemente distruttiva: distruzione di circa 3/4 degli edifici*, la maggior parte di essi crolla. Subiscono gravi lesioni, e a volte vengono distrutti, anche ponti e solide costruzioni di legno. Argini e dighe vengono notevolmente danneggiati. I Binari vengono leggermente piegati mentre le tubature (gas, acqua e scarichi) vengono troncate, rotte e schiacciate anche a causa delle profonde fratture che si formano nel terreno. Nelle strade lastricate e asfaltate si formano crepe e per pressione sporgono larghe pieghe ondose. In terreni meno densi e più umidi si creano spaccature fino alla larghezza di alcuni decimetri; si notano parallelamente ai corsi d'acqua spaccature che raggiungono larghezze fino a un metro. Si producono frane e smottamenti; interi macigni rotolano a valle. Grossi massi si staccano dagli argini dei fiumi e da coste scoscese; riviere basse subiscono spostamenti di masse sabbiose e fangose, per cui il livello del terreno viene notevolmente variato. Le sorgenti subiscono frequenti cambiamenti di livello dell'acqua. Da fiumi, canali e laghi ecc. le acque vengono gettate contro le sponde o subiscono locali straripamenti a causa delle frane.
- XI. *Scossa catastrofica*: muoiono molte persone. **Crollano tutti gli edifici in muratura**, resistono soltanto le capanne di legno e le costruzioni ad incastro di grande elasticità. Crollano anche i ponti più sicuri a causa della caduta dei pilastri in pietra o del cedimento di quelli in ferro. I binari si piegano fortemente e si spezzano. Le tubature interrate vengono spaccate e rese irreparabili (vengono a mancare tutti i servizi di pubblica erogazione). Nel terreno si manifestano vari mutamenti di notevole estensione, a seconda della natura del suolo, si aprono grandi crepe e spaccature. Soprattutto in terreni morbidi e acquitrinosi il dissesto è considerevole sia orizzontalmente che verticalmente. Ne segue il trabocco di sabbia e melma con diverse manifestazioni. Sono frequenti lo sfaldamento di terreni e la caduta di massi.
- XII. *Scossa gravemente catastrofica*: provoca migliaia di vittime. **Ogni opera umana viene rasa al suolo**. Vengono scagliati in aria oggetti di ogni dimensione. Grandi masse di terreno vengono spostate con sollevamenti e abbassamenti del suolo (si creano onde sulla superficie del suolo). Lo sconvolgimento del paesaggio assume aspetti grandiosi. Corsi d'acqua sia superficiali che sotterranei subiscono mutamenti vari, si formano cascate, scompaiono laghi, deviano fiumi.

7.2 Analogie nella propagazione di onde sismiche ed EM

La propagazione delle onde sismiche ha delle peculiarità curiosamente simili a quelle delle onde radio nella ionosfera. L'analogia, in fondo, non è sorprendente poiché è la loro natura ondulatoria che, in determinate condizioni del mezzo attraversato, può dar luogo a fenomeni di *riflessione*, *rifrazione* e *diffrazione*, analogamente alla *legge di Snell* nell'ottica. Ciò che cambia nettamente è la natura di questo mezzo e quindi le condizioni fisiche che ne caratterizzano il comportamento. Ad esempio la rifrazione è prodotta in sismologia dal progressivo aumento di densità del mantello mentre nelle comunicazioni HF dalla densità di elettroni liberi nella ionosfera. Accade così che si avrà rispettivamente una zona "d'ombra" o "di silenzio" (Figura 65) in cui dalla superficie non

si potrà ricevere rispettivamente la radiazione della sorgente sismica o del trasmettitore radio. In realtà anche la *propagazione ionosferica* delle onde radio non è necessariamente un fenomeno di riflessione pura ma può manifestarsi come una progressiva rifrazione che (analogamente ai raggi sismici nel mantello) fa sì che il segnale radio si ripieghi verso la superficie terrestre.

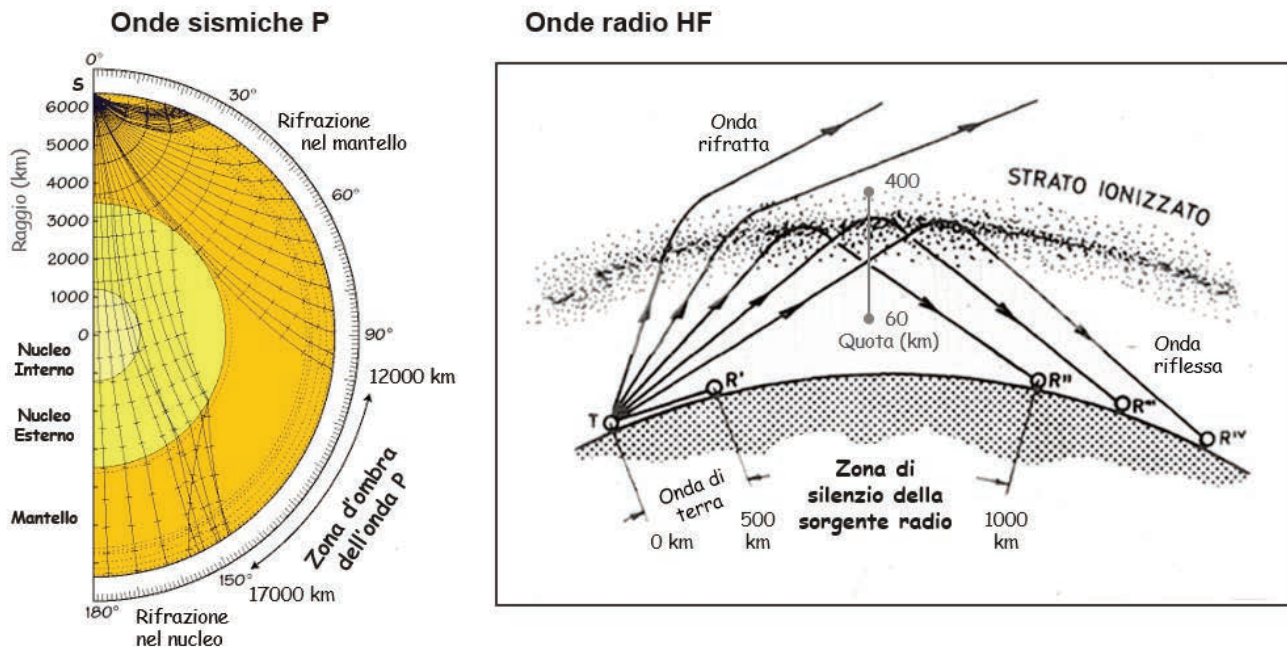


Figura 65 Riflessione, rifrazione e zona d'ombra. Questi due schemi mettono a confronto la propagazione delle onde sismiche al di sotto della crosta (a sinistra) e quella delle onde radio HF nella ionosfera (a destra). Nelle prime, a causa della netta diminuzione di velocità in corrispondenza della discontinuità nucleo-mantello, i raggi che subiscono rifrazione (per aumento della densità del mezzo), vengono deviati verso l'interno della Terra, tendendo a concentrarsi verso una zona che circonda il punto antipodale rispetto alla sorgente (S). Ciò implica che, in un settore che si estende da 103° a 143° di distanza angolare dalla sorgente (circa 12.000 -17.000 km in superficie) non ci saranno raggi che raggiungeranno i sensori in superficie. Questo settore è chiamato "zona d'ombra del nucleo". Analogamente nella propagazione delle onde radio HF, per un certo intervallo di distanze dal trasmettitore T si può verificare una "zona di silenzio" tra il limite di ricezione dell'onda di terra (R') e la prima ricezione dell'onda riflessa nella ionosfera (R"). Inoltre nella figura notiamo come l'apice delle traiettorie dei segnali radio sia una curva e non uno spigolo, come siamo abituati a considerare nell'ottica. Qui infatti, analogamente all'onda sismica, è l'aumento della densità elettronica a produrre una progressiva rifrazione e a ripiegare in basso le traiettorie dei segnali radio HF.

7.3 Energia, ampiezza, intensità, potenza e attenuazione di un'onda

Che sia di natura elastica o elettromagnetica, la propagazione di un'onda trasporta energia tra due punti nello spazio. L'*ampiezza* di un'onda è la massima perturbazione rispetto alla situazione di equilibrio. L'*intensità* dell'onda è l'energia che essa trasporta nell'unità di tempo. Anche se onda elastica ed elettromagnetica hanno formulazioni diverse che esprimono grandezze fisiche diverse, in entrambi i casi si tratta di un'energia propagata per unità di tempo e unità di superficie che si misura in potenza trasmessa per unità di superficie (W/m^2).

Immaginiamo l'onda sferica che si espande. Man mano che l'onda si propaga, allontanandosi

dalla sorgente, il fronte d'onda sarà una sfera di dimensione sempre maggiore. La stessa quantità di energia viene quindi distribuita su una superficie via via sempre maggiore (la superficie della sfera è proporzionale al quadrato del raggio: $S=4\pi r^2$). Ne segue che l'intensità dell'onda si attenua con il quadrato della distanza percorsa. Per chi fosse pratico di fotografia, è esattamente quella legge "dell'inverso del quadrato della distanza" che richiede l'incremento degli step del diaframma all'aumentare della distanza dal flash: Figura 66.

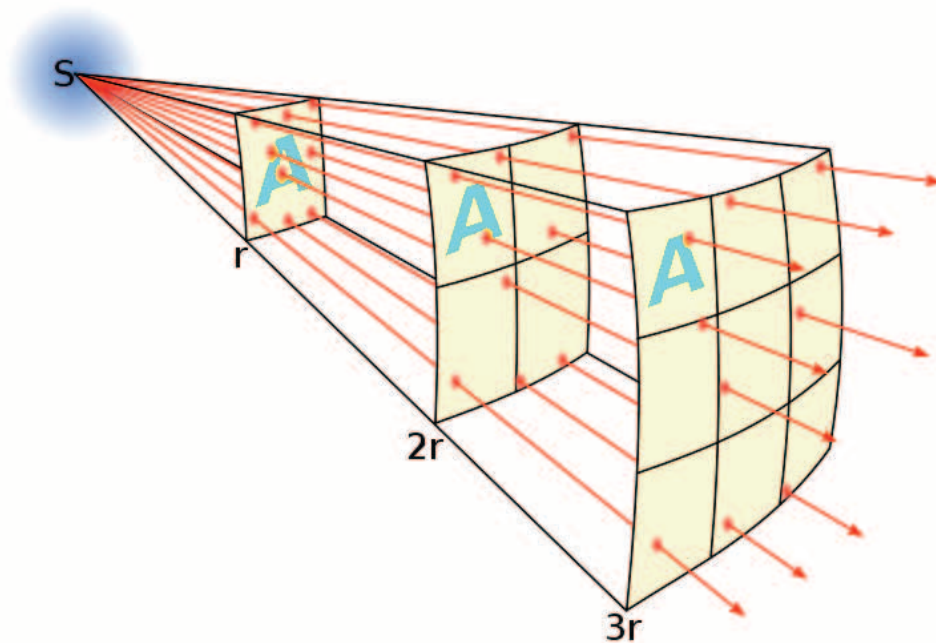


Figura 66 Attenuazione geometrica. Immaginiamo una sorgente luminosa S che irradia energia in ogni direzione sul fronte di un'onda sferica. Prendiamo come unità di misura della sua energia quella che investe una certa superficie della sfera alla distanza r. Vediamo che alla distanza 2r lo stesso flusso attraversato ora una superficie 4 volte più ampia, riducendo di 4 volte l'energia che investe l'unità di superficie e così via. La superficie della sfera equivale a $4\pi r^2$ e di conseguenza il fattore di attenuazione è funzione di r^2 : per 2r sarà $1/2^2=1/4$; per 3r sarà $1/3^2=1/9$ e così via. (Immagine: "Inverse square law" da Wikimedia).

Un'attenuazione geometrica⁶¹ esiste sempre, indipendentemente da fenomeni di dissipazione nel mezzo, che dipendono invece dalle caratteristiche del mezzo. L'onda elettromagnetica non ha la necessità di un supporto fisico per propagarsi, tuttavia il passaggio attraverso un mezzo diverso dal vuoto comporterà una certa attenuazione che è funzione della costante dielettrica del mezzo. L'onda elastica del terremoto invece non può propagarsi che attraverso il mezzo elastico (la crosta) dissipando energia sotto forma di calore nell'atto stesso di deformare il mezzo. In questo caso allo smorzamento geometrico si aggiunge uno smorzamento interno dovuto alle proprietà meccaniche del mezzo⁶². Per questi stessi motivi la radiazione sismica subisce un'attenuazione anche in funzione della sua frequenza: nel percorrere la medesima distanza, un'oscillazione subisce una certa attenuazione ma una frequenza 10 volte maggiore dovrà sollecitare il mezzo 10 volte di più. Ne segue che il mezzo agisce sulla radiazione come un filtro passabasso,

⁶¹ Per completezza d'informazione va detto che nel caso delle onde sismiche, per la loro varia natura oscillatoria, il problema dell'attenuazione geometrica è più complesso ma qui è stato presentato nella forma più semplice per completare il confronto con l'onda EM a favore del lettore non specialista.

⁶² Analogamente all'onda elettromagnetica esisterebbe anche uno smorzamento per scattering che addirittura genera onde secondarie ma come al solito stiamo semplificando il problema a scopo divulgativo.

attenuando in proporzione al crescere della frequenza.

In definitiva, riducendosi l'energia dell'oscillazione, si riduce anche l'ampiezza della perturbazione rispetto alla situazione di equilibrio. La misura dell'ampiezza del segnale è anche una misura dell'energia trasportata dalla sorgente fino al punto di misura: di nuovo l'analogia tra segnale radio ricevuto e scala Mercalli. In un certo senso la scala Mercalli è, per l'onda sismica, l'equivalente della scala dell'*S-Meter* di un radiorecettore. Nel caso della Mercalli però il trasduttore non è un'antenna ma la massa inerziale (es. il palazzo) che ha subito lo spostamento. Gli stessi sismometri lavorano su masse inerziali (pendoli) sospese nelle tre dimensioni spaziali x, y, z. Al contrario, la necessità di questa terna nei sismometri equivale alle esigenze di polarizzazione e orientamento che si risolvono con le antenne direttive.

Una volta che un trasduttore (sia esso un pendolo o un'antenna) avrà trasformato l'oscillazione in segnale elettrico, qualunque fosse stata la natura dell'oscillazione, questo avrà un'ampiezza misurabile in Volt (μV) che per praticità si potrà esprimere in espressione logaritmica: la *Magnitudo* del terremoto o i *Decibel* di un segnale radio o acustico. Abbiamo visto che nella propagazione dell'onda, qualunque essa sia, per motivi geometrici e per l'attraversamento della crosta, la sua ampiezza subirà un'attenuazione. Di conseguenza si ridurrà, all'uscita del trasduttore, la misura del segnale in V e, di conseguenza ancora, la misura della *potenza* del segnale, che deriva da V attraverso la legge di Ohm.

7.4 Legge di Ohm

La caduta di tensione V (Volt) ai capi di un conduttore è data dal prodotto tra la sua resistenza elettrica R (Ω , Ohm) e l'intensità di corrente I (A, Ampere) che lo attraversa:

$$V = RI \text{ [V]} \text{ o anche } I = V/R \text{ [A]} \text{ o ancora } R = V/I \text{ [\Omega]}$$

La resistenza di un conduttore dipende dalle sue caratteristiche fisiche e geometriche: resistività ρ , lunghezza L (m) e sezione S (m^2). In un conduttore di composizione e geometria uniformi si ha:

$$R = \rho * L/S \text{ [\Omega*m]}$$

Quando una corrente attraversa un conduttore, una parte della sua energia viene ceduta al materiale sotto forma di riscaldamento (Effetto Joule) con una potenza P (W, Watt) di trasferimento pari a:

$$P = V*I = V^2/R = R*I^2 \text{ [W]}$$

7.5 Decibel

- I. Il Bel (B) è il logaritmo del rapporto fra due grandezze fisiche omogenee (devono avere cioè la stessa unità di misura). È quindi un'unità adimensionale che grazie all'espressione logaritmica può esprimersi su una scala estesissima (come la Magnitudo sismica). Il B rappresenta tuttavia valori troppo grandi per le applicazioni elettroniche. Comunemente si usa il decibel (dB) che è la sua decima parte. Per tensioni e correnti⁶³ si avrà:

⁶³ Notare anche l'analogia con la definizione di Magnitudo sismica.

Tensione: $\text{dB} = 10 \log_{10} (V_2/V_1)$
 Corrente: $\text{dB} = 10 \log_{10} (I_2/I_1)$

Nel caso della potenza del segnale l'espressione raddoppia poiché si ha a che fare con una grandezza che dipende non linearmente dalla tensione (o corrente) che le potenze svilupperebbero se applicate alla stessa impedenza ($R_1 = R_2$). Infatti, ad esempio, poiché $P = V \cdot I$ e per la legge di Ohm $I = V/R$, si avrà $P = V^2/R$ e considerando anche, per le proprietà dei logaritmi, che $\log x^k = k \log x$, in definitiva sarà:

$$\text{Potenza: dB} = 10 \log_{10} (W_2/W_1) = 10 \log_{10} (V_2/V_1)^2 = 20 \log_{10} (V_2/V_1)$$

II. Il valore misurato N_2 si rapporta a un valore di riferimento N_1 . Per esempio la misura di 100mV, riferita al valore di 1mV, dà un valore di 20dBV, così come 100mW, riferiti a 1mW, danno 40 dBW:

$X = N_2/N_1$	$10 \log X$	$20 \log X$
1000	30	60
100	20	40
10	10	20
1	0	0
0.1	-10	-20
0.01	-20	-40
0.001	-30	-60

III. Spesso, ma soltanto nel caso della potenza⁶⁴, viene omessa l'indicazione della dimensione [W] e questo può creare un po' di confusione:

dBm	è solitamente riferito alla potenza di	1 mW
dBmV	è chiaramente riferito alla tensione di	1 mV

7.6 Calcoli rapidi con i dB senza usare i logaritmi

- I. Moltiplicazioni (*guadagno*) e divisioni (*attenuazione*) equivalgono rispettivamente a somme e sottrazioni tra il valore iniziale riferito (es. dBV) e i valori dB assoluti delle devices applicate al segnale. Non è invece possibile sommare fra di loro più valori in decibel assoluti. Es. un segnale sorgente di -20 dBV (0.01V) amplificato di 20 dB diventa 0 dBV (1V).
- II. Si può calcolare con buona approssimazione il valore in dB di un dato rapporto tra grandezze ricordando che un raddoppio (o dimezzamento) corrisponde a circa +3 dB (o -3 dB) e un aumento (o riduzione) di 10 volte corrisponde a +10 dB (o -10 dB). Sapendo questo è facile calcolare ad es. che un incremento di 80 volte corrisponde in decibel a 19 dB. Infatti: $80 = 10 \times 2 \times 2 \times 2$, quindi $10 + 3 + 3 + 3 = 19$ dB.
- III. Moltiplicare un valore dB di un fattore 1000, ad es. per trasformare dBmV in dBμV equivale a sommare 60dB, es. $12 \text{ dBmV} = 72 \text{ dBμV}$, infatti $1 \text{ dBmV} = 60 \text{ dBμV}$.

⁶⁴ Pare che la colpa sia degli ingegneri, tradizionalmente pigri riguardo la notazione dei decibel potenza.

7.7 Formulario di analisi dei segnali

Questo è uno specchio riepilogativo delle formule discusse nel paragrafo 3. L'analisi di segnali sismici e acustici è del tutto analoga perché in entrambi i casi un trasduttore avrà fornito un segnale elettrico analogico che esprime l'oscillazione da studiare. Cambia però la banda di frequenza e quindi, prima di tutto, le esigenze tecniche legate alla frequenza di campionamento del segnale.

- La *Frequenza di Campionamento* (F_c) è il numero di campioni raccolti in un secondo:

$$F_c = 1/T_c \quad [\text{Hz}]$$
- Il *Periodo di Campionamento* (T_c) è la durata di ogni lettura e di ogni intervallo:

$$T_c = 1/F_c \quad [\text{s}]$$
- La *Risoluzione del Campione* (R) è l'informazione codificata in un campione ($n = \text{livelli}$):

$$R = \log_2 n \quad [\text{bit}] \quad (8 \text{ bit} = 1 \text{ Byte})$$
- La *Risoluzione del Campionamento* (R_c) è la quantità di informazioni codificate in un secondo:

$$R_c = F_c \cdot R \quad [\text{bit/s}]$$
- Spazio in *Byte* che un singolo campione occuperà sul supporto di memoria:

$$\text{Grandezza del campione} = R/8 \quad [\text{B}]$$
- Spazio in *Byte* che il file di dati occuperà sul supporto di memoria (campionato per t secondi su N canali):

$$\text{Grandezza del file} = (R/8) \cdot F_c \cdot N \cdot t = (R_c/8) \cdot N \cdot t \quad [\text{B}]$$
- Periodo dell'analisi FFT:
 - come intervallo temporale: $T_a = N_c/F_c \quad [\text{s}]$
 - come numero di campioni analizzati: $N_c = F_c \cdot T_a$
- La *Frequenza di Nyquist* (F_n) è la massima frequenza acquisita nel segnale campionato:

$$F_n = F_c/2 \quad [\text{Hz}]$$
- Risoluzione dell'analisi spettrale:
 - minima frequenza risolvibile dalla FFT: $F_r = 1/T_a (= F_c/N_c) \quad [\text{Hz}]$
 - più breve evento risolvibile della FFT: $T_r = 1/F_r = T_a (= N_c/F_c) \quad [\text{s}]$

7.8 Script di salvataggio dati per Spectrum Lab

Script per l'acquisizione HiRes (vedi paragrafo 4.2):

```
REM Salvataggio dati preparato da Adriano Nardi (iz0rii) per le stazioni VLF
REM del progetto SDT – Segnali Dalla Terra
REM
REM Spettrogrammi HiRes
REM Personalizzare gli argomenti scritti "tra virgolette" nelle seguenti quattro voci:
REM
```

```

StatName = "FID" REM nome della stazione
SaveSpec = "D:\VLF\HiRes" REM indirizzo della cartella dove salvare gli spettrogrammi
SaveWav = "D:\VLF\Wav" REM indirizzo della cartella dove salvare i files Wav
LaDir = "D:\Programmi" REM indirizzo della cartella 'La' dove è installato Losless Audio
REM
REM ----- NON MODIFICARE QUI SOTTO -----
REM
TimeCapture = str("hhmmss",now)
TimeConvert = str("hhmmss",now-40)
TimeDelete = str("hhmmss",now-80)
wave.stop
capture(SaveSpec+"\\"+StatName+"_HiResT_"+str("YYMMDD",now)+"UTC"+TimeConvert+".jpg")
wave.record(SaveWav+"\\"+StatName+"_Audio_"+str("DD",now)+"UTC"+TimeCapture+".wav")
exec(LaDir+"\La\la -high"+SaveWav+"\\"+StatName+"_Audio_"+str("DD",now)+"UTC"+TimeConvert+".wav")
exec("cmd /C del /Q "+SaveWav+"\\"+StatName+"_Audio_"+str("DD",now)+"UTC"+TimeDelete+".wav")

```

Script per l'acquisizione LoRes (vedi paragrafo 4.3):

```

REM Salvataggio dati preparato da Adriano Nardi (iz0rii) per le stazioni VLF
REM del progetto SDT – Segnali Dalla Terra
REM
REM Spettrogrammi LoRes
REM Personalizzare gli argomenti "tra virgolette" delle due voci seguenti:
REM
StatName = "FID" REM nome della stazione
SaveSpec = "C:\VLF\LoRes" REM indirizzo della cartella dove salvare gli spettrogrammi
REM
REM ----- NON MODIFICARE QUI SOTTO -----
TimeCapture = str("hh",now-3600)
capture(SaveSpec+"\\"+StatName+"_LoResT_"+str("YYMMDD",now)+"UTC"+TimeCapture+"00.jpg")

```

7.9 Modifica al file di configurazione di Apache Server (vedi paragrafo 5.2)

```

#BEGIN PHP INSTALLER EDITS - REMOVE ONLY ON UNINSTALL
LoadModule php5_module "C:/Programmi/Apache Software Foundation/php5apache2_2.dll"
AddType application/x-httpd-php .php
PHPIniDir "C:/Programmi/Apache Software Foundation/"
#END PHP INSTALLER EDITS - REMOVE ONLY ON UNINSTALL

```

7.10 Codice dell'interfaccia WEB di controllo remoto delle stazioni VLF (vedi paragrafo 5.3 e Figura 52)

Home Page (file "index.php"):

```

<html>
<?PHP include("ID.txt"); ?>
<head>
<title>Stazione VLF <?php echo $G." - ".$SEZ;?></title>

```



```

<a href="http://<?php echo $REF;?>" TARGET="NEW4"><?php echo $REF;?></a>
</FONT>
<FONT size="3">
<BR><BR><BR>
Interfaccia di ricerca e download dei dati di<BR>
Adriano Nardi, iz0rii
</FONT>
</FONT>
</TD>
<TD WIDTH="160" bgcolor="#ffffff" valign=center ALIGN=center>
<FONT face="arial" size="3">
<A HREF="http://<?php echo $REF;?>" TARGET="New"><IMG SRC="IMG/ari.jpg" BORDER=0><BR><B><?php echo
$SEZ;?></A>
<BR><BR><BR>
<FONT size="2">
<A HREF="http://www.ingv.it/it/monitoraggio-e-infrastrutture-per-la-ricerca/reti-di-monitoraggio/l-ingv-e-le-sue-reti/rete-di-
monitoraggio-elettromagnetico-in-banda-ulf-elf-vlf" TARGET="New"><IMG SRC="IMG/ingv.jpg" BORDER=0><BR>Rete
INGV</A>
</FONT></FONT>
</TD>
</TR>
</TABLE>
</TD>
</TR>
</TABLE>
</body>
</html>

```

Display in tempo reale (file "display.php"):

```

<html>
<?PHP include("ID.txt"); ?>
<head>
<title>Stazione <?php echo $G." - ".$SEZ;?>. Monitoraggio in tempo reale.</title>
<meta http-equiv="Content-Type" CONTENT="text/html;CHARSET=iso-8859-1">
<meta name="author" content="Adriano Nardi">
<meta name="email" content="adriano.nardi@ingv.it">
<meta name="keywords" content="VLF, ARI, INGV, stazione monitoraggio, Adriano Nardi">
<meta HTTP-EQUIV="REFRESH" CONTENT="40"<!————[ Questo è il tempo di refresh che NON DEVE essere maggiore
di 40 sec ]————>
</head>
<body bgcolor="#ffffff">
<?PHP
$data = date("ymd");
$ora = gmdate("H"); // GMT
$hhmm = gmdate("Hi");
$oraZ = date("H"); // Zulu
$hhmmZ = date("Hi");
$orapassata = gmdate('H', strtotime("-1 hour", strtotime("now")));
$orapassataZ = date('H', strtotime("-1 hour", strtotime("now")));

```



```

</TABLE>
</TD>
</TR>
</TABLE>
</body>
</html>

```

Form di richiesta dati (file “archivio.php”):

```

<html>
<?PHP include(“ID.txt”); ?>
<head>
<title>Stazione <?php echo $G.” - “.$SEZ;?>. Ricerca nell’archivio dati.</title>
<meta http-equiv=“Content-Type” CONTENT=“text/html;CHARSET=iso-8859-1”>
<meta name=“author” content=“Adriano Nardi”>
<meta name=“email” content=“adriano.nardi@ingv.it”>
<meta name=“keywords” content=“VLF, ARI, INGV, stazione monitoraggio, Adriano Nardi”>
</head>
<frameset framespacing=“0” border=“false” frameborder=“0” rows=“300,300”>
<frameset framespacing=“0” border=“false” frameborder=“0” cols=“*,77%”>
<frameset framespacing=“0” border=“false” frameborder=“0” rows=“*,30%”>
<frame name=“LOGO” src=“logo.php” scrolling=“auto” style=“border: 0”><!———— Logo della stazione ———>
<frame name=“LINK” src=“link.html” scrolling=“auto” style=“border: 0”><!———— Bottoni —————>
</frameset>
<frameset framespacing=“0” border=“false” frameborder=“0” rows=“*,*,*”>
<frame name=“CERCA1” src=“LoRes.php” scrolling=“no” style=“border: 0”><!———— Ricerca LoRes —————>
<frame name=“CERCA2” src=“HiRes.php” scrolling=“no” style=“border: 0”><!———— Ricerca HiRes —————>
<frame name=“CERCA3” src=“Wav.php” scrolling=“no” style=“border: 0”><!———— Ricerca Wav —————>
</frameset>
</frameset>
<frameset framespacing=“0” border=“false” frameborder=“0” cols=“*,1050,*”>
<frame name=“SW” src=“spazio.html” scrolling=“no” style=“border: 0”><!———— spaziatore SW —————>
<frame name=“DISPLAY” src=“info.html” scrolling=“auto” style=“border: 0”><!———— Display spettri —————>
<frame name=“SE” src=“spazio.html” scrolling=“no” style=“border: 0”><!———— spaziatore SE —————>
</frameset>
</frameset>
<noframes>
<body>
<p>Interfaccia di ricerca e download di Adriano Nardi, iz0rii.</p>
</body>
</noframes>
</html>

```

Logo Stazione (file “logo.php”):

```

<html>
<head>
<style type=“text/css”>
<!--
a:link { color: #0000ff; text-decoration: none}

```

```

a:visited { color: #0000ff; text-decoration: none}
a:hover { color: #0000ff; text-decoration: underline}
—>
</style>
</head>
<body topmargin="0" marginwidth="0" bgcolor="#ffffff">
  <?PHP include("ID.txt"); ?>
<TABLE WIDTH="100%" HEIGHT="100%" ALIGN="center" BORDER="0" CELLSPACING="0" CELLPADDING="0">
<TR>
  <TD ALIGN="center" VALIGN="center">
<TABLE BORDER="1" CELLSPACING="0" CELLPADDING="0" ALIGN="center" VALIGN="center">
<TR>
  <TD valign="center" ALIGN="center">
<TABLE ALIGN="center" VALIGN="center" BORDER="0" CELLPADDING="0" CELLSPACING="5"
background="IMG/sfondo.jpg">
<TR>
  <TH valign="center" ALIGN="center" COLSPAN="2">
<FONT face="arial" size="2" color="#000000"><B>Stazione VLF<BR>
<FONT size="5"><?php echo $G;?></B></FONT>
<BR><?php echo $SIT;?><BR>
<FONT face="arial" size="1" color="#000000">locator: <?php echo $LOC;?></FONT>
</FONT>
  </TH>
</TR>
<TR>
  <TD valign=bottom ALIGN=right>
<FONT face="arial" size="1" color="#000000">
Latitudine<BR>
Longitudine<BR>
Quota
</FONT>
  </TD>
  <TD valign=bottom>
<FONT face="arial" size="1" color="#000000">
= <?php echo $LAT;?> N<BR>
= <?php echo $LON;?> E<BR>
= <?php echo $QTA;?> m slm
</FONT>
  </TD>
</TR>
</TABLE>
  </TD>
</TR>
</TABLE>
  </TD>
</TR>
</TABLE>
</TD>
</TR>
</TABLE>
</body>
</html>

```

Ricerca 1 (file "LoRes.php"):

```
<html>
<?PHP include("ID.txt"); ?>
<head>
<title>Ricerca LoRes</title>
<meta http-equiv="Content-Type" CONTENT="text/html;CHARSET=iso-8859-1">
<meta name="author" content="Adriano Nardi">
<meta name="email" content="adriano.nardi@ingv.it">
<!-- [ Script di ricerca ] -->
<script language="JavaScript">
<!--
// Adriano Nardi 2008
// INGV-RM1
// Don't delete this header!
//
function hidden(){
    var location="http://<?php echo $IP;?>/LoRes/<?php echo
$G;?>_LoResT_" + document.input.giorno.value+"UTC"+document.input.ora.value+"00.jpg";
    parent.DISPLAY.location.href = location;
}
// -->
</script>
<!-- [ Fine Script ] -->
</head>
<body bgcolor="#ffffff" topmargin="5" marginwidth="0">
<TABLE WIDTH="100%" HEIGHT="100%" CELLSPACING="0" CELLPADDING="0" BORDER="0">
<TR>
<TD ALIGN=center VALIGN=center>
<TABLE CELLSPACING="3" CELLPADDING="1" BORDER="0" bgcolor="#ffffff" HEIGHT="85">
<TR>
<TH WIDTH="160" valign="center" ALIGN="right" ROWSPAN="3">
<FONT face="arial" size="2" color="#000000">
Banda visualizzata<BR>
Periodo visualizzato<BR>
Scala ampiezze<BR>
Risoluzione frequenza<BR>
Risoluzione tempo
</FONT>
</TH>
<TH WIDTH="110" valign="center" ALIGN="left" ROWSPAN="3">
<FONT face="arial" size="2" color="#000000">
= 0 - 22 kHz<BR>
= 1 h<BR>
= -110 / -70 dB<BR>
= 0,67 Hz<BR>
= 4,5 sec/col
</FONT>
</TH>
<TH WIDTH="80" VALIGN="center" bgcolor="#aaaaff" ROWSPAN="3"><FONT FACE="Arial" SIZE=3
```

```

COLOR="#000000">&nbsp;<B>1<BR>Ricerca<BR>LoRes</B>&nbsp;</FONT></TH>
  <TD WIDTH="130" ALIGN="center" bgcolor="#dddddd"><FONT FACE="Arial" SIZE=1 COLOR="#000000">formato:
  &quot;AAMMGG&quot;</FONT></TD>
  <TD WIDTH="100" ALIGN="center" bgcolor="#dddddd"><FONT FACE="Arial" SIZE=1 COLOR="#000000">UTC
  (seleziona)</FONT></TD>
  <TD WIDTH="150" ALIGN="center" bgcolor="#ffffff"><FONT FACE="Arial" SIZE=1 COLOR="#000000"></FONT></TD>
</TR>
<TR>
<form name="input">
  <TD>
  <FONT FACE="Arial" SIZE=3 COLOR="#000000"><B>Data:&nbsp;  <input type="input" size="7" name="giorno" VALUE="
<?php
$FData = '%y%m%d';
$data = strftime($FData);
echo "$data\n";
?>
  style="background-color: #ffff55; color: #000000; font-weight: bold">
  </FONT>
</TD>
<TD>
  <FONT FACE="Arial" SIZE=3 COLOR="#000000"><B>&nbsp;  Ora:&nbsp;  <SELECT size="1" name="ora" VALUE="
<?php
$ora = gmdate('H', strtotime("-1 hour", strtotime("now")));
$ora = strftime($ora);
echo "$ora\n";
$sel = "s".$ora;
$$sel = "SELECTED";
?>
  style="background-color: #ffff55; color: #000000; font-weight: bold">
  <OPTION VALUE="00" <?php echo $s00;?> >00</OPTION>
  <OPTION VALUE="01" <?php echo $s01;?> >01</OPTION>
  <OPTION VALUE="02" <?php echo $s02;?> >02</OPTION>
  <OPTION VALUE="03" <?php echo $s03;?> >03</OPTION>
  <OPTION VALUE="04" <?php echo $s04;?> >04</OPTION>
  <OPTION VALUE="05" <?php echo $s05;?> >05</OPTION>
  <OPTION VALUE="06" <?php echo $s06;?> >06</OPTION>
  <OPTION VALUE="07" <?php echo $s07;?> >07</OPTION>
  <OPTION VALUE="08" <?php echo $s08;?> >08</OPTION>
  <OPTION VALUE="09" <?php echo $s09;?> >09</OPTION>
  <OPTION VALUE="10" <?php echo $s10;?> >10</OPTION>
  <OPTION VALUE="11" <?php echo $s11;?> >11</OPTION>
  <OPTION VALUE="12" <?php echo $s12;?> >12</OPTION>
  <OPTION VALUE="13" <?php echo $s13;?> >13</OPTION>
  <OPTION VALUE="14" <?php echo $s14;?> >14</OPTION>
  <OPTION VALUE="15" <?php echo $s15;?> >15</OPTION>
  <OPTION VALUE="16" <?php echo $s16;?> >16</OPTION>
  <OPTION VALUE="17" <?php echo $s17;?> >17</OPTION>
  <OPTION VALUE="18" <?php echo $s18;?> >18</OPTION>

```



```

</script>
<!-- [ Fine Script ] -->
</head>
<body bgcolor="#ffffff" topmargin="5" marginwidth="0">
<TABLE WIDTH="100%" HEIGHT="100%" CELLSPACING="0" CELLPADDING="0" BORDER="0">
<TR>
<TD ALIGN=center VALIGN=center>
<TABLE CELLSPACING="3" CELLPADDING="1" BORDER="0" bgcolor="#ffffff" HEIGHT="85">
<TR>
<TH WIDTH="160" valign="center" ALIGN="right" ROWSPAN="3">
<FONT face="arial" size="2" color="#000000">
Banda visualizzata<BR>
Periodo visualizzato<BR>
Scala ampiezze<BR>
Risoluzione frequenza<BR>
Risoluzione tempo
</FONT>
</TH>
<TH WIDTH="110" valign="center" ALIGN="left" ROWSPAN="3">
<FONT face="arial" size="2" color="#000000">
= 0 - 22 kHz<BR>
= 40 sec<BR>
= -110 / -70 dB<BR>
= 21,5 Hz<BR>
= 0,047 sec/col
</FONT>
</TH>
<TH WIDTH="80" VALIGN="center" bgcolor="#55aaff" ROWSPAN="3"><FONT FACE="Arial" SIZE=3
COLOR="#000000">&nbsp;&nbsp;&nbsp;<B>2<BR>Ricerca<BR>HiRes</B>&nbsp;&nbsp;&nbsp;</FONT></TH>
<TD WIDTH="130" ALIGN="center" bgcolor="#dddddd"><FONT FACE="Arial" SIZE=1 COLOR="#000000">formato:
&quot;AAMMGG&quot;</FONT></TD>
<TD WIDTH="100" ALIGN="center" bgcolor="#dddddd"><FONT FACE="Arial" SIZE=1
COLOR="#000000">UTC</FONT></TD>
<TD WIDTH="150" ALIGN="center" bgcolor="#dddddd"><FONT FACE="Arial" SIZE=1 COLOR="#000000">40 sec a partire
da:</FONT></TD>
</TR>
<TR>
<form name="input">
<TD>
<FONT FACE="Arial" SIZE=3 COLOR="#000000"><B>Data:&nbsp;&nbsp;&nbsp;
<input type="input" size="7" name="giorno" VALUE="
<?php
$FData = '%y%m%d';
$data = strftime($FData);
echo "$data\n";
?>
style="background-color: #ffff55; color: #000000; font-weight: bold">
</FONT>
</TD>
<TD>

```

```

<FONT FACE="Arial" SIZE=3 COLOR="#000000"><B>&nbsp;Ora:&nbsp;
<SELECT size="1" name="ora" VALUE="
<?php
$ora = gmdate('H', strtotime("-1 hour", strtotime("now")));
$ora = strftime($ora);
echo "$ora\n";
$sel = "s".$ora;
$$sel = "SELECTED";
?>"
style="background-color: #ffff55; color: #000000; font-weight: bold">
<OPTION VALUE="00" <?php echo $s00;?> >00</OPTION>
<OPTION VALUE="01" <?php echo $s01;?> >01</OPTION>
<OPTION VALUE="02" <?php echo $s02;?> >02</OPTION>
<OPTION VALUE="03" <?php echo $s03;?> >03</OPTION>
<OPTION VALUE="04" <?php echo $s04;?> >04</OPTION>
<OPTION VALUE="05" <?php echo $s05;?> >05</OPTION>
<OPTION VALUE="06" <?php echo $s06;?> >06</OPTION>
<OPTION VALUE="07" <?php echo $s07;?> >07</OPTION>
<OPTION VALUE="08" <?php echo $s08;?> >08</OPTION>
<OPTION VALUE="09" <?php echo $s09;?> >09</OPTION>
<OPTION VALUE="10" <?php echo $s10;?> >10</OPTION>
<OPTION VALUE="11" <?php echo $s11;?> >11</OPTION>
<OPTION VALUE="12" <?php echo $s12;?> >12</OPTION>
<OPTION VALUE="13" <?php echo $s13;?> >13</OPTION>
<OPTION VALUE="14" <?php echo $s14;?> >14</OPTION>
<OPTION VALUE="15" <?php echo $s15;?> >15</OPTION>
<OPTION VALUE="16" <?php echo $s16;?> >16</OPTION>
<OPTION VALUE="17" <?php echo $s17;?> >17</OPTION>
<OPTION VALUE="18" <?php echo $s18;?> >18</OPTION>
<OPTION VALUE="19" <?php echo $s19;?> >19</OPTION>
<OPTION VALUE="20" <?php echo $s20;?> >20</OPTION>
<OPTION VALUE="21" <?php echo $s21;?> >21</OPTION>
<OPTION VALUE="22" <?php echo $s22;?> >22</OPTION>
<OPTION VALUE="23" <?php echo $s23;?> >23</OPTION>
</FONT>
</TD>
<TD>
<FONT FACE="Arial" SIZE=3 COLOR="#000000"><B>&nbsp;min.sec:&nbsp;
<SELECT name="minuto" size="1" style="background-color: #ffff55; color: #000000; font-weight: bold">
<OPTION VALUE="0000">00.00</OPTION>
<OPTION VALUE="0040">00.40</OPTION>
<OPTION VALUE="0120">01.20</OPTION>
<OPTION VALUE="0200">02.00</OPTION>
<OPTION VALUE="0240">02.40</OPTION>
<OPTION VALUE="0320">03.20</OPTION>
<OPTION VALUE="0400">04.00</OPTION>
<OPTION VALUE="0440">04.40</OPTION>
<OPTION VALUE="0520">05.20</OPTION>
<OPTION VALUE="0600">06.00</OPTION>
<OPTION VALUE="0640">06.40</OPTION>

```


<OPTION VALUE="0720">07.20</OPTION>
<OPTION VALUE="0800">08.00</OPTION>
<OPTION VALUE="0840">08.40</OPTION>
<OPTION VALUE="0920">09.20</OPTION>
<OPTION VALUE="1000">10.00</OPTION>
<OPTION VALUE="1040">10.40</OPTION>
<OPTION VALUE="1120">11.20</OPTION>
<OPTION VALUE="1200">12.00</OPTION>
<OPTION VALUE="1240">12.40</OPTION>
<OPTION VALUE="1320">13.20</OPTION>
<OPTION VALUE="1400">14.00</OPTION>
<OPTION VALUE="1440">14.40</OPTION>
<OPTION VALUE="1520">15.20</OPTION>
<OPTION VALUE="1600">16.00</OPTION>
<OPTION VALUE="1640">16.40</OPTION>
<OPTION VALUE="1720">17.20</OPTION>
<OPTION VALUE="1800">18.00</OPTION>
<OPTION VALUE="1840">18.40</OPTION>
<OPTION VALUE="1920">19.20</OPTION>
<OPTION VALUE="2000">20.00</OPTION>
<OPTION VALUE="2040">20.40</OPTION>
<OPTION VALUE="2120">21.20</OPTION>
<OPTION VALUE="2200">22.00</OPTION>
<OPTION VALUE="2240">22.40</OPTION>
<OPTION VALUE="2320">23.20</OPTION>
<OPTION VALUE="2400">24.00</OPTION>
<OPTION VALUE="2440">24.40</OPTION>
<OPTION VALUE="2520">25.20</OPTION>
<OPTION VALUE="3000">30.00</OPTION>
<OPTION VALUE="3040">30.40</OPTION>
<OPTION VALUE="3120">31.20</OPTION>
<OPTION VALUE="3200">32.00</OPTION>
<OPTION VALUE="3240">32.40</OPTION>
<OPTION VALUE="3320">33.20</OPTION>
<OPTION VALUE="3400">34.00</OPTION>
<OPTION VALUE="3440">34.40</OPTION>
<OPTION VALUE="3520">35.20</OPTION>
<OPTION VALUE="3600">36.00</OPTION>
<OPTION VALUE="3640">36.40</OPTION>
<OPTION VALUE="3720">37.20</OPTION>
<OPTION VALUE="3800">38.00</OPTION>
<OPTION VALUE="3840">38.40</OPTION>
<OPTION VALUE="3920">39.20</OPTION>
<OPTION VALUE="4000">40.00</OPTION>
<OPTION VALUE="4040">40.40</OPTION>
<OPTION VALUE="4120">41.20</OPTION>
<OPTION VALUE="4200">42.00</OPTION>
<OPTION VALUE="4240">42.40</OPTION>
<OPTION VALUE="4320">43.20</OPTION>
<OPTION VALUE="4400">44.00</OPTION>


```

<meta name="email" content="adriano.nardi@ingv.it">
<!--[ Script di ricerca ]-->
<script language="JavaScript">
<!--
// Adriano Nardi 2008
// INGV-RM1
// Don't delete this header!
// ATTENZIONE: sostituire ".la" con ".wav" se il file sorgente è stato salvato nel formato originale wave senza ulteriore
compressione Lossless Audio (script in "Periodic Action" di SpecLab).
//
function hidden(){
                                var    location="http://<?php    echo    $IP;?>/Wav/<?php    echo
$G;?>_Audio_"+document.input.giorno.value+"UTC"+document.input.ora.value+document.forms[0].minuto.options[self.docume
nt.forms[0].minuto.selectedIndex].value+".la";
    parent.DISPLAY.location.href = location;
}
// -->
</script>
<!--[ Fine Script ]-->
</head>
<body bgcolor="#ffffff" topmargin="5" marginwidth="0">
<TABLE WIDTH="100%" HEIGHT="100%" CELLSPACING="0" CELLPADDING="0" BORDER="0">
<TR>
<TD ALIGN=center VALIGN=center>
<TABLE CELLSPACING="3" CELLPADDING="1" BORDER="0" bgcolor="#ffffff" HEIGHT="85">
<TR>
<TH WIDTH="160" valign="center" ALIGN="right" ROWSPAN="3">
<FONT face="arial" size="2" color="#000000">
Campionamento<BR>
Durata file<BR>
Formato<BR>
Compressione<BR>
</FONT>
</TH>
<TH WIDTH="110" valign="center" ALIGN="left" ROWSPAN="3">
<FONT face="arial" size="2" color="#000000">
= 44100 Hz<BR>
= 40 sec<BR>
= mono 16 bit<BR>
= <A HREF="http://www.lossless-audio.com" Target="New">Lossless</A>
</FONT>
</TH>
<TH WIDTH="80" VALIGN="center" bgcolor="#ffaa00" ROWSPAN="3"><FONT FACE="Arial" SIZE=3
COLOR="#000000">&nbsp;&nbsp;&nbsp;<B>3<BR>Preleva<BR>Audio</B>&nbsp;&nbsp;&nbsp;</FONT></TH>
<TD WIDTH="130" ALIGN="center" bgcolor="#dddddd"><FONT FACE="Arial" SIZE=1 COLOR="#000000">formato:
&quot;GG&quot;</FONT></TD>
<TD WIDTH="100" ALIGN="center" bgcolor="#dddddd"><FONT FACE="Arial" SIZE=1
COLOR="#000000">UTC</FONT></TD>
<TD WIDTH="150" ALIGN="center" bgcolor="#dddddd"><FONT FACE="Arial" SIZE=1 COLOR="#000000">40 sec a partire
da:</FONT></TD>

```

```

</TR>
<TR>
<form name="input">
<TD>
<FONT FACE="Arial" SIZE=3 COLOR="#000000"><B>Giorno:&nbsp;&nbsp;&nbsp;</B>
<input type="input" size="3" name="giorno" VALUE="
<?php
$FGiorno = '%d';
$giorno = strftime($FGiorno);
echo "$giorno\n";
?>"
style="background-color: #ffff55; color: #000000; font-weight: bold">
</FONT>
</TD>
<TD>
<FONT FACE="Arial" SIZE=3 COLOR="#000000"><B>&nbsp;&nbsp;&nbsp;Ora:&nbsp;&nbsp;&nbsp;</B>
<SELECT size="1" name="ora" VALUE="
<?php
$ora = gmdate('H', strtotime("-1 hour", strtotime("now")));
$ora = strftime($ora);
echo "$ora\n";
$sel = "s".$ora;
$$sel = "SELECTED";
?>"
style="background-color: #ffff55; color: #000000; font-weight: bold">
<OPTION VALUE="00" <?php echo $s00;?> >00</OPTION>
<OPTION VALUE="01" <?php echo $s01;?> >01</OPTION>
<OPTION VALUE="02" <?php echo $s02;?> >02</OPTION>
<OPTION VALUE="03" <?php echo $s03;?> >03</OPTION>
<OPTION VALUE="04" <?php echo $s04;?> >04</OPTION>
<OPTION VALUE="05" <?php echo $s05;?> >05</OPTION>
<OPTION VALUE="06" <?php echo $s06;?> >06</OPTION>
<OPTION VALUE="07" <?php echo $s07;?> >07</OPTION>
<OPTION VALUE="08" <?php echo $s08;?> >08</OPTION>
<OPTION VALUE="09" <?php echo $s09;?> >09</OPTION>
<OPTION VALUE="10" <?php echo $s10;?> >10</OPTION>
<OPTION VALUE="11" <?php echo $s11;?> >11</OPTION>
<OPTION VALUE="12" <?php echo $s12;?> >12</OPTION>
<OPTION VALUE="13" <?php echo $s13;?> >13</OPTION>
<OPTION VALUE="14" <?php echo $s14;?> >14</OPTION>
<OPTION VALUE="15" <?php echo $s15;?> >15</OPTION>
<OPTION VALUE="16" <?php echo $s16;?> >16</OPTION>
<OPTION VALUE="17" <?php echo $s17;?> >17</OPTION>
<OPTION VALUE="18" <?php echo $s18;?> >18</OPTION>
<OPTION VALUE="19" <?php echo $s19;?> >19</OPTION>
<OPTION VALUE="20" <?php echo $s20;?> >20</OPTION>
<OPTION VALUE="21" <?php echo $s21;?> >21</OPTION>
<OPTION VALUE="22" <?php echo $s22;?> >22</OPTION>
<OPTION VALUE="23" <?php echo $s23;?> >23</OPTION>
</FONT>

```

</TD>

<TD>

```
<FONT FACE="Arial" SIZE=3 COLOR="#000000"><B>&nbsp;min.sec:&nbsp;</B>
<SELECT name="minuto" size="1" style="background-color: #ffff55; color: #000000; font-weight: bold">
  <OPTION VALUE="0000">00.00</OPTION>
  <OPTION VALUE="0040">00.40</OPTION>
  <OPTION VALUE="0120">01.20</OPTION>
  <OPTION VALUE="0200">02.00</OPTION>
  <OPTION VALUE="0240">02.40</OPTION>
  <OPTION VALUE="0320">03.20</OPTION>
  <OPTION VALUE="0400">04.00</OPTION>
  <OPTION VALUE="0440">04.40</OPTION>
  <OPTION VALUE="0520">05.20</OPTION>
  <OPTION VALUE="0600">06.00</OPTION>
  <OPTION VALUE="0640">06.40</OPTION>
  <OPTION VALUE="0720">07.20</OPTION>
  <OPTION VALUE="0800">08.00</OPTION>
  <OPTION VALUE="0840">08.40</OPTION>
  <OPTION VALUE="0920">09.20</OPTION>
  <OPTION VALUE="1000">10.00</OPTION>
  <OPTION VALUE="1040">10.40</OPTION>
  <OPTION VALUE="1120">11.20</OPTION>
  <OPTION VALUE="1200">12.00</OPTION>
  <OPTION VALUE="1240">12.40</OPTION>
  <OPTION VALUE="1320">13.20</OPTION>
  <OPTION VALUE="1400">14.00</OPTION>
  <OPTION VALUE="1440">14.40</OPTION>
  <OPTION VALUE="1520">15.20</OPTION>
  <OPTION VALUE="1600">16.00</OPTION>
  <OPTION VALUE="1640">16.40</OPTION>
  <OPTION VALUE="1720">17.20</OPTION>
  <OPTION VALUE="1800">18.00</OPTION>
  <OPTION VALUE="1840">18.40</OPTION>
  <OPTION VALUE="1920">19.20</OPTION>
  <OPTION VALUE="2000">20.00</OPTION>
  <OPTION VALUE="2040">20.40</OPTION>
  <OPTION VALUE="2120">21.20</OPTION>
  <OPTION VALUE="2200">22.00</OPTION>
  <OPTION VALUE="2240">22.40</OPTION>
  <OPTION VALUE="2320">23.20</OPTION>
  <OPTION VALUE="2400">24.00</OPTION>
  <OPTION VALUE="2440">24.40</OPTION>
  <OPTION VALUE="2520">25.20</OPTION>
  <OPTION VALUE="3000">30.00</OPTION>
  <OPTION VALUE="3040">30.40</OPTION>
  <OPTION VALUE="3120">31.20</OPTION>
  <OPTION VALUE="3200">32.00</OPTION>
  <OPTION VALUE="3240">32.40</OPTION>
  <OPTION VALUE="3320">33.20</OPTION>
  <OPTION VALUE="3400">34.00</OPTION>
```



```

—>
  </style>
</head>
<body topmargin="10" marginwidth="20" bgcolor="#ffffff">
<TABLE WIDTH="100%" HEIGHT="100%" ALIGN="center" BORDER=0>
<TR>
  <TD ALIGN="left" VALIGN="center">
<FONT face="arial" size="2" color="#000000">
<B>Informazioni generali</B><BR>In questa pagina è possibile reperire i dati raccolti dalla stazione VLF aggiornati in
tempo reale all'ultimo intervallo di lettura. L'analisi è continua, a cicli di 40 s (HiRes) e 1 ora (LoRes). I tempi sono in UTC, le
frequenze in Hz, le ampiezze in dBuV. Questa stazione impiega un ricevitore di campo su una banda radio che, come ordine
di grandezza dell'oscillazione, corrisponde a frequenze acustiche. Il segnale viene quindi analizzato attraverso spettrogrammi
acustici o sonogrammi. Il contenuto di energia del segnale sorgente viene suddiviso nelle componenti di intensità;
attribuibili agli intervalli di una scala di frequenze (spettro) in un dato intervallo temporale (periodo dell'analisi FFT).
Graficamente questi spettri esprimono le intensità; attraverso una scala di colore. Intervalli successivi compongono
un'immagine nella quale è possibile osservare l'evoluzione nel tempo della distribuzione spettrale
dell'intensità del segnale (spettrogramma).
<BR><BR>
I dati prodotti sono di tre tipi:
<UL>
<LI>Spettrogramma panoramico (<B>LoRes</B>): permette di esaminare rapidamente, a spots di un'ora, l'intero
spettro acustico.
<LI>Spettrogramma ad alta risoluzione (<B>HiRes</B>): permette di osservare nel dettaglio eventuali fenomeni interessanti
individuati nei grafici "LoRes". Visualizza spots di 40 secondi analizzati con un'alta risoluzione temporale
all'interno dello spettro utile.
<LI>Sorgente <B>Audio</B>: download del segnale acustico corrispondente agli intervalli osservati negli spettrogrammi
"HiRes". I files sono compressi con <A HREF="http://www.lossless-audio.com" Target="New">Lossless Audio</A>
(formato "lame") e sono reperibili nel passato fino al 31° giorno precedente la data di interrogazione.
</UL>
</FONT>
  </TD>
</TR>
</TABLE>
</body>
</html>

```

Struttura (file "spazio.html"):

```

<html>
<head>
  <style type="text/css">
<!--
a:link { color: #0000ff; text-decoration: none}
a:visited { color: #00aa00; text-decoration: none}
a:hover { color: #ff0000; text-decoration: underline}
—>
  </style>
</head>
<body topmargin="0" marginwidth="0" bgcolor="#ffffff">
<TABLE WIDTH="100%" HEIGHT="100%" ALIGN="center" BORDER=0 CELLSPACING="0" CELLPADDING="0">

```



```

<TR>
<TD ALIGN="center" VALIGN="center">
</TD>
</TR>
</TABLE>
</body>
</html>

```

Lista di informazioni locali (file "ID.txt"):

```

<?PHP // (è già inserita la stazione di Fidenza come esempio)
// (**) = Campi obbligatori per il collegamento remoto
// Inserire tra le "virgolette" le seguenti informazioni:
$G = "FID"; // ** sigla della stazione
$IP = "arifidenza.dyndns.org"; // ** indirizzo del server della stazione (IP)
$LOC = "JN54BU"; // locator della stazione
$LAT = "##&deg;##'##.##"; // latitudine (sostituire solo i valori ##)
$LON = "##&deg;##'##.##"; // longitudine (sostituire solo i valori ##)
$QTA = "###"; // quota (sostituire solo i valori ##)
$SIT = "Fidenza (PR)"; // frazione, città, provincia
$SEZ = "ARI Fidenza"; // sezione ARI
$REF = "www.arifidenza.it"; // indirizzo web della sezione ARI
$MET = "www.3bmeteo.com/meteo/fidenza"; // sito di riferimento per il meteo locale
?>

```

7.11 Consigli per approfondire lo studio

Studiare segnali EM naturali associati alle deformazioni crostali richiede conoscenze interdisciplinari sia teoriche che tecniche. Questa guida si è limitata a fornire specifici indirizzi essenziali e tende a colmare qualche lacuna nella letteratura disponibile in Italia. Di seguito vengono indicati altri testi consigliati per approfondire l'argomento, soprattutto per l'ambito amatoriale. Inoltre, considerando che oggi si può disporre di potenzialità molto differenti dal classico cartaceo, approfittando dell'edizione digitale per proporre una risorsa nuova: in epoca Covid le attività di divulgazione interne dell'INGV si sono svolte esclusivamente in teleconferenza e i seminari sono stati registrati per la visione in differita. È quindi oggi disponibile online del materiale scientifico aggiornato e di altissimo livello molto differente dal classico documentario TV. Se ne propone quindi una selezione attinente agli argomenti di questa guida.

Segnali elettromagnetici in banda VLF:

- *Radio natura. La ricezione e lo studio dei segnali radio di origine naturale* di Renato Romero. Sandit Libri, 2006. Questo è un testo fondamentale per avvicinarsi allo studio della banda VLF. Il punto di partenza per chi vuole cimentarsi nel monitoraggio e il miglior panorama della fenomenologia per i radioamatori che volessero anche solo conoscere meglio questa banda.
- *Precursori Sismici - Monitoraggio Elettromagnetico* di Gabriele Cataldi. LULU PR, 2019. Più mirato al monitoraggio dei precursori, questo testo offre una panoramica degli studi in corso e degli utili suggerimenti tecnici come ad esempio una serie di schemi di filtri già calcolati. In particolare l'autore ha colto la caratteristica essenziale che deve avere lo studio di un precursore: la necessità di un monitoraggio continuo, duraturo e arealmente diffuso.

- *Ipotesi sulle anomalie elettromagnetiche associate ai terremoti* di Cristiano Fidani. Libreria Univ. Benedetti, 2005. Una panoramica sugli studi scientifici internazionali. Questo testo è il più impegnativo ma è indispensabile per un approfondimento della teoria fisica.
- *Radio Onde*, bollettino di “scienza e tecnica della radio” curato dal prof. Ezio Mognaschi dal 1996 al 2005. I fascicoli sono oggi disponibili in WEB in versione digitalizzata a cura di Renato Romero [Romero, RadioOnde].

Sismologia e precursori:

- *Sismologia e segnali precursori dei terremoti* di Michele Caputo. Edizioni Calderini, 1987. L'autore è un sismologo italiano di fama mondiale che in questo volume di piccole dimensioni (altrimenti noto tra gli studenti di Geologia come “Il Caputino”) propone una panoramica divulgativa sui problemi della sismologia e della previsione.
- *Previsione dei terremoti* di T. Rikitake. Libreria Dario Flaccovio Editrice, 1986. Pur essendo un po' datato resta un riferimento per quanto riguarda il panorama internazionale e giapponese degli studi storici sui precursori sismici.

Seminari INGV online:

- “*Elettrificazione di plume vulcanici: recenti progressi e prospettive future*” a cura di Corrado Cimarelli. <https://youtu.be/14mNll-r7j4>
- “*Ionospheric precursors of earthquakes from Swarm satellites*” a cura di Angelo De Santis e SAFE & LIMADOU Teams. https://youtu.be/RNr58IX_Rrl
- “*Uno sguardo alla fisica dei terremoti: studi di terreno, sperimentali e numerici*” a cura di Giulio Di Toro. <https://youtu.be/nywK-B6hKlk>
- “*Il radon, dagli effetti sulla salute umana alle applicazioni nel campo delle Scienze della Terra*” A cura di Gianfranco Galli e Antonio Piersanti. <https://www.youtube.com/watch?v=xnDzpSNFgfU>

Disclaimer

L'uso di un'antenna aerea in qualsiasi contesto espone al rischio di fulminazione. Questo rischio esiste sempre, anche in ambito domestico e hobbystico (radio o TV). Esiste ancor di più con dispositivi sperimentali impiegati in luoghi remoti, in spazi aperti e in quota, come quelli descritti in questa guida. Il lettore deve essere ben consapevole di ciò e usare ogni possibile cautela impiegando ogni possibile accorgimento necessario alla sicurezza elettrica sotto la propria responsabilità. L'autore declina ogni responsabilità in caso di danni a persone o cose causati da fulminazione o altri incidenti di natura elettrica derivati dall'uso proprio o improprio delle informazioni contenute in questa guida.

Ringraziamenti

Questa guida è una sintesi delle mie esperienze in questo campo, che nascono da uno studio amatoriale diventato pian piano una tesi di laurea, poi di dottorato e infine una parte del mio lavoro presso L'INGV. Non posso non ringraziare tutti coloro che mi hanno accompagnato in questo percorso e in particolare due personaggi che, indipendentemente da ciò, hanno segnato la storia di questa ricerca.

Primo fra tutti il prof. Michele Caputo, oggi in pensione, che tra l'altro fece parte di quel famoso gruppo di ricerca che installò una radio a onde lunghe in una grotta appenninica (vedi paragrafo

1.2). All'epoca dei miei studi era il docente di Sismologia all'Università la Sapienza. È stato uno dei pionieri dell'analisi spettrale in ambito sismologico e mentre in aula spiegava ai fisici (e a pochi geologi) l'analisi numerica dei segnali sismici, mentalmente io trasponevo quella conoscenza sui segnali acustici. Non sono mai diventato un sismologo di professione ma quell'insegnamento fu fondamentale. Ho avuto poi per molto tempo il privilegio della sua collaborazione nello sviluppo della ricerca sulle emissioni VLF dalle rocce. Anche se sinceramente non sono mai stato in grado di usare una *derivata frazionaria* (la cui soluzione porta il nome di Caputo) qualunque cosa di buono io possa aver realizzato, sia pure da geologo, deriva certamente dalla "scuola di Caputo". Spero che questa guida possa esserne all'altezza.

Vorrei poi ricordare un personaggio scomparso nel 2006, la cui memoria resterà per sempre legata ai precursori EM. È noto ai radioamatori come il prof. Mognaschi di Pavia. Ezio Mognaschi, lui stesso radioamatore (iw2goo), insegnava elettronica agli studenti di fisica dell'Università di Pavia. Fu anche divulgatore e in modo attivissimo, con il suo bollettino "aperiodico" *Radio Onde*, che curò in ogni aspetto e in modo del tutto autosufficiente. Nell'introduzione storica di questa guida (paragrafo 1.2) si legge come egli sia stato in Italia il "precursore dei precursori", riguardo i segnali EM. Avendo condotto quasi contemporaneamente (lui iniziò prima) studi ed esperimenti sulle rocce, ne abbiamo condiviso ipotesi e risultati. Spero di essere riuscito a infondere in questa guida quella passione *radiantistica* di impostazione scientifica che era la sostanza dello spirito divulgativo di Mognaschi.

In fine un ringraziamento particolare spetta ai colleghi Gabriele Ferrara e Antonio Piersanti. Il dott. Ferrara è il bibliotecario dell'INGV di Roma e ha reperito i documenti storici più rari: [Milne, 1890], [Maccioni, 1909] e [Zubkov, 1975]. La preziosa consulenza scientifica del dott. Piersanti, sismologo dell'INGV, è stata di fondamentale aiuto nella realizzazione di quest'impresa, forse audace per un geologo: una guida per estendere la sismologia allo studio della radiazione elettromagnetica naturale (e viceversa).

Questo lavoro è stato supportato dal Progetto INGV "Pianeta Dinamico" (codice progetto INGV 1020.010) finanziato dal MIUR ("Fondo finalizzato al rilancio degli investimenti delle amministrazioni centrali dello Stato e allo sviluppo del Paese", legge 145/2018).

Bibliografia

Annuario della Società dei Naturalisti in Modena (1870). Anno V, Tipografia dell'erede Solidani, Modena.

https://books.google.it/books?id=_asaxmhMSk4C&pg=PR7&dq=tremuoti+bagliori&hl=it&sa=X&ved=0ahUKEwiyk4W5nOfmAhXHsKQKHT13ALIQ6AEIUzAG#v=onepage&q&f=false

Asada T., Baba H., Kawazoe M. and Sugiura M., (2001). *An attempt to delineate very low frequency electromagnetic signals associated with earthquakes*. Earth, Planets and Space, 53, 55-62.

<https://doi.org/10.1186/BF03352362>

Baratta M., (1891). *Catalogo dei fenomeni elettrici e magnetici apparsi durante i principali terremoti*. In Rendiconti della Società Italiana di Elettricità pel progresso degli studi e delle applicazioni; Tip. Lamperti di G. Rozza, Milano, 1 (XIII), pp. 1-15. Trascrizione dall'originale a cura di Giuseppe Stilo: http://www.itacomm.net/EQL/1891_Baratta.pdf

Beccaria Giambattista (1753). *Dell'elettricità artificiale e naturale*. Stampa di Filippo Antonio Campana, Torino - 245 pagine.

[https://books.google.it/books?id=IRhhAAAACAAJ&ots=NlnOHH2Rmw&dq=beccaria%20%22Dell'elettricità%20artificiale%20e%20naturale%20\(1703\)%20&lr&hl=it&pg=PA1#v=onepage&q=beccaria%20%22Dell'elettricità%20artificiale%20e%20naturale%20\(1703\)&f=false](https://books.google.it/books?id=IRhhAAAACAAJ&ots=NlnOHH2Rmw&dq=beccaria%20%22Dell'elettricità%20artificiale%20e%20naturale%20(1703)%20&lr&hl=it&pg=PA1#v=onepage&q=beccaria%20%22Dell'elettricità%20artificiale%20e%20naturale%20(1703)&f=false)

- Beccaria Giambattista (1758). *Elettricismo atmosferico. Lettere ala Sacra Reale Maestà del Re di Sardegna*. Ed. Colle Ameno in Bologna: All'Insegna dell'Iride.
https://books.google.it/books?id=ORQAAAACAAJ&printsec=frontcover&hl=it&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- Bella F., Biagi P.F., Caputo M., Della Monica G., Ermini A., Plastino W., Sgrigna V., Zilpimiani D., (1995). *Electromagnetic and seismoacoustic signals revealed in karst caves (Central Italy)*. *Il Nuovo Cimento* 18C, 19–32. <https://doi.org/10.1007/BF02561456>
- Bella F., Biagi P.F., Caputo M., Cozzi E., Della Monica G., Ermini A., Plastino W., Sgrigna V., (1998). *Field strength variations of LF radio waves prior to earthquakes in central Italy*. *Physics of the Planetari Interiors*, 105, 279-286. [https://doi.org/10.1016/S0031-9201\(97\)00097-6](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(97)00097-6)
- Biagi P.F., Piccolo R., Ermini A., Martellucci S., Bellucci C., Hayakawa M., Capozzi V., Kingsley S. P., (2001). *Possibile earthquake precursors revealed by LF radio signals*. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 1:99-104. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00298995>
- Boudjada M.Y., Biagi P.F., Al-Haddad E., Galopeau P.H.M., Besser B., Wolbang D., Prattes G., Eichelberger H., Stangl G., Parrot M. and Schwingenschuh K., (2017). *Reception conditions of low frequency (LF) transmitter signals onboard DEMETER micro-satellite*. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, Volume 102*, 70-79. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2016.07.006>
- Bramanti C., (2001). *Atto Maccioni e le sue avventure radiotelegrafiche (parte prima)*. “La scala parlante”, rivista dell’AIRE, Associazione Italiana per le Radio d’Epoca, anno 2001, n.5, pp. 21-24. https://www.aireradio.org/articoli/1048_16-03-2019_23-09-08-0.23586200.pdf (Archivio della rivista: <https://www.aireradio.org/scala-parlante/>)
- Calzecchi Onesti T., (1884). *Sulla conduttività delle limature metalliche*. *Nuovo Cimento* 3, XIII, 58–64. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/BF02737267.pdf>
- Calzecchi Onesti T., (1911). *Le mie esperienze e quelle di Edoardo Branly sulla conduttività elettrica delle limature metalliche*. *Nuovo Cimento* 2, 387–396. <https://doi.org/10.1007/BF02958507>
- Cataldi G., (2019). *Precursori sismici. Monitoraggio elettromagnetico*. Radio Emission Project, Albano Laziale, Roma. ISBN 978-0-244-82005-3.
- Crescimanno F.P., De Rossi M.S., (1876). *I terremoti e il nuovo osservatorio sismico di Corleone in Sicilia. Lettere del signor Francesco Paolo Crescimanno, Capo dell’Ufficio Telegrafico, ed osservazioni di M. S. De Rossi*. *Bull. Vulc. It. Anno III*, Roma, 97-122. ftp://ftp.ingv.it/pub/william.thorossian/alessio.mautone/BVI/1876/Sismos_1151.pdf
- De S.S., De B.K., Bandyopadhyay B., Paul S., De D., Barui S., Das T.K., (2011). *Studies on the precursors of an earthquake as the VLF electromagnetic sferics*. *Rom. Journ. Phys.*, Vol. 56, Nos. 9–10, P. 1208–1227, Bucharest, 2011. http://www.nipne.ro/rjp/2011_56_9-10/1208_1227.pdf
- De Rossi M.S., (1879). *La meteorologia endogena*. Ristampa anastatica di Arnoldo Forni Editore, 2008, Vol. 1. ISBN: 88-271-3019-5.
- Derr J.S., (1973). *Earthquake lights: a review of observations and present theories*. *Bulletin of the Seismological Society of America* 63 (6-1): 2177–2187. <https://pubs.geoscienceworld.org/ssa/bssa/article/63/6-1/2177/117338/Earthquake-lights-A-review-of-observations-and>
- De Santis A., De Franceschi G., Spogli L., Perrone L., Alfonsi L., Qamili E., Cianchini G., Di Giovambattista R., Salvi S., Filippi E., Pavón-Carrasco F.J., Monna S., Piscini A., Battiston R., Vitale V., Picozza P.G., Conti L., Parrott M., Pinçon J.-L., Balasis G., Tavani M., Argan A., Piano G., Rainone M.L., Liu W., and Tao D., (2015). *Geospace perturbations induced by the Earth: the state of the art and future trends*. *Phys. Chem. Earth*, 85, 17–33. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2015.05.004>
- De Santis, A., Marchetti D., Pavón-Carrasco F.J., Cianchini G., Perrone L., Abbattista C., Alfonsi L., Amoruso L., Campuzano S.A., Carbone M., Cesaroni C., De Granceschi G., De Santis Anna,

- Di Giovambattista R., Ippolito A., Piscini A., Sabbagh D., Soldani M., Santoro F., Spogli L. e Haagsmans R., (2019). *Precursory worldwide signatures of earthquake occurrences on Swarm satellite data*. Scientific Reports, 9:20287. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56599-1>
- Die Gartenlaube (1890). *Gewitter auf dem Sonnblick*. Heft 1, p. 31. Adolf Kröner, Leipzig https://de.wikisource.org/wiki/Gewitter_auf_dem_Sonnblick (free)
- Eftaxias K., Kapiris P., Polygiannakis J., Peratzakis A., Kopanas J., Antonopoulos G., Rigas D., (2003). *Experience of short term earthquake precursors with VLF-VHF electromagnetic emissions*. Natural Hazards and Earth System Sciences, 3: 217–228. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00299027/>
- Fidani C., (2005). *Ipotesi Sulle Anomalie Elettromagnetiche Associate ai Terremoti*. Libreria Universitaria Benedetti, L'Aquila.
- Fidani C., (2006). *On Electromagnetic Precursors of Earthquakes: Models and Instruments*. International Project Hessdalen Workshop, Medicina (BO), 17 giugno 2006. Lo Scarabeo editrice Bologna, pp 25-41. ISBN: 978-88-8478-111-6. (Link free)
- Fidani C., (2016). *The Central Italy Electromagnetic Network (CIEN) ten years after the beginning of continuous monitoring*. GNGTS 2016, sessione 2.1. <http://www3.ogs.trieste.it/gngts/files/2016/S21/Riassunti/Fidani2.pdf>
- Freund F., Ouillon G., Scoville J., Sornette D., (2018). *Earthquake precursors in the light of peroxy defects theory: critical review of systematic observations*. European Physical Journal (EPJ). <https://arxiv.org/abs/1711.01780>
- Galli I., (1910). *Raccolta e classificazione di fenomeni luminosi osservati nei terremoti*. Boll. Soc. Ital. Sismol. 1910; 14: 221–448. ftp://ftp.ingv.it/pub/alessio.mautone/Ale_Donatella_000/BSSI_1910/235422.pdf (free)
- Gokhberg M.B., Morgunov V.A., Aronov E.L., (1979). *On high-frequency electromagnetic radiation during the seismic activity*. Dokl. Akad. Nauk SSSR, 1979, Volume 248, Number 5, 1077–1081. (In lingua russa). http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=dan&paperid=43067&option_lang=eng
- Gokhberg M., Morgounov V., Yoshino T., Tomizawa I., (1982). *Experimental measurement of electromagnetic emissions possibly related to earthquakes in Japan*. J Geophys Res 87: 7824–7828. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/JB087iB09p07824/abstract> oppure: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/JB087iB09p07824>
- Hobara Y., Parrot M., (2005). *Ionospheric perturbations linked to a very powerful seismic event*. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Volume 67, Issue 7, Pages 677–685. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2005.02.006>
- Maccioni A., (1909). *Nuova scoperta nel campo della sismologia*. Atti della Regia Accademia dei Fisiocritici in Siena, vol. 1, pp. 435-444.
- Manno R., (2003). *Onde radio nella banda LF e precursori sismici*. Italian Committee for Project Hessdalen. <http://www.itacomm.net/ph/manno.pdf> (free)
- Martinelli G., (1997). *Non seismometrical precursors observations in Europe: steps of earthquake prediction research*. Historical Seismic Instruments and Documents: a Heritage of Great Scientific and Cultural Value Proc. Workshop, pp.195-216. (Link free). Vedi anche: Martinelli G. (1999). *History of Earthquake Prediction Research*. Nuovo Cimento 22 (3–4), 605–613 (1999). ISSN: 0390-5551. <http://eprints.bice.rm.cnr.it/13530/1/ncc7985.pdf> (free). Vedi anche: Martinelli G. (2000). *Contributions to a History of Earthquake Prediction Research*. Seismological Research Letters (2000) 71 (5): 583–588. <https://doi.org/10.1785/gssrl.71.5.583> (Link free)
- Meloni A., Bianchi C., Mele G., Palangio P., (2015). *Background electromagnetic noise characterization: the role of external and internal Earth sources*. Annals Of Geophysics, 58, 3, 2015, G0330. <https://doi.org/10.4401/ag-6745> (free)

- Milne J., (1890). *Earthquakes in connection with electric and magnetic phenomena*. Transaction of the Seismological Society of Japan, Vol. XV, pp. 135-162, Yokoama: printed at the Office of the "Japan Mail".
https://repository.dl.itc.u-tokyo.ac.jp/?action=pages_view_main&active_action=repository_view_main_item_detail&item_id=356&item_no=1&page_id=28&block_id=31 (free)
- Mognaschi E.R., (1997). *Segnali radio che precedono eventi sismici*. Radioonde n° 8, ott. 1997.
<http://www.vlf.it/radioonde/08-radioonde.pdf>
- Mognaschi E.R., (1998). *Precursori elettromagnetici dei sismi*. In: XVI Meeting dell'Associazione Italiana Radioascolto a Sirolo (AN) 1-3 maggio 1998; Radioonde n.12, maggio 1998; Radiorama, inserto n.10 ottobre 1998. <http://www.vlf.it/radioonde/12-radioonde.pdf>
- Mognaschi E.R. e Zezza U., (2000). *Detection of electromagnetic emission from fracture of rocks and building stones under stress*. Atti del "5th International Congress on Restoration of Architectural Heritage", Firenze, 17 set. 2000, pp. 553-562.
- Mognaschi E.R., (2002). *On the possible origin, propagation and detectability of electromagnetic precursors of earthquakes*. Atti Ticinesi di Scienze della Terra, vol.43, 111-118.
- Molchanov O., Rozhnoi A., Solovieva M., Akentieva O., Berthelier J.J., Parrot M., Lefeuvre F., Biagi P.F., Castellana L., and Hayakawa M., (2006). *Global diagnostic of the ionospheric perturbations related to the seismic activity using the VLF radio-signals collected on the DEMETER satellite*. Natural Hazards and Earth System Sciences, 6, 745-753.
<https://doi.org/10.5194/nhess-6-745-2006>
- Nardi A., (2005). *Emissioni elettromagnetiche naturali come precursori di fenomeni sismici*. Tesi di dottorato in Scienze della Terra, indirizzo geofisico, XVIII ciclo, Università di Roma "La Sapienza".
- Nardi A., Caputo M. e Chiarabba C., (2007). *Possible electromagnetic earthquake precursors in two years of ELF-VLF monitoring in the atmosphere*. Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata, Vol. 48, n. 2, pp. 205-212; June 2007, OGS Trieste.
http://www3.ogs.trieste.it/bgta/pdf/bgta48.2_NARDI.pdf
- Nardi A., Caputo M., (2009). *Monitoring the mechanical stress of rocks through the electromagnetic emission produced by fracturing*. Elsevier, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 46 (2009) 940-945. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2009.01.005>
- Nardi A., Piersanti A., (2020). *Il ruolo dei precursori sismici e l'importanza di un precursore elettromagnetico*. Quad. Geofis., 174: 140, <https://doi.org/10.13127/qdg/174> (free)
- Nardi A., (2021). *Terremoti in relazione a fenomeni elettrici e magnetici (Milne, 1890). Traduzione commentata*. Quad. Geofis., 170: 148, <https://doi.org/10.13127/qdg/170> (free)
- Nardi A., Piersanti A. (2021). *L'avvisatore sismico di padre Atto Maccioni. I documenti di una scoperta dimenticata*. Misc. INGV, 63: 132, <https://doi.org/10.13127/misc/63> (free)
- Nemec F., Santolik O., and Parrot M., (2009). *Decrease of intensity of ELF/VLF waves observed in the upper ionosphere close to earthquakes: A statistical study*. J. Geophys. Res., 114, A04303, <https://doi.org/10.1029/2008JA013972>
- Orsini M., (2011). *Electromagnetic anomalies recorded before the earthquake of L'Aquila on April 6, 2009*. Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata 2011, 52, 123-130.
http://www3.ogs.trieste.it/bgta/pdf/bgta52.1_OR SINI.pdf
- Parrot M., Benoist D., Berthelier J.J., Btecki J., Chapuis Y., Colin F., Elie F., Ferreau P., Lagoutte D., Lefeuvre F., Legendre C., Leveque M., Pincon J.L., Poirier B., Seran H.C., Zamor P., (2006). *The magnetic field experiment IMSC and its data processing onboard DEMETER: Scientific objectives, description and first results*. Planetary and Space Science 54: 441-455.
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2005.10.015>
- Petraki E., Nikolopoulos D., Nomicos C., Stonham J., Cantzos D., Yannakopoulos P., and Kottou S., (2015). *Electromagnetic Pre-earthquake Precursors: Mechanisms, Data and Models - A Review*.

- Journal of Earth Science & Climatic Change, 6: 250. <http://dx.doi.org/10.4172/2157-7617.1000250>
- Plinio il Vecchio (79 d.C.). *Naturalis Historia*. https://la.wikisource.org/wiki/Naturalis_Historia
- Rikitake T., (1968). Earthquake prediction. Elsevier, Earth-Science Reviews, vol.4, 245-282. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(68\)90154-2](https://doi.org/10.1016/0012-8252(68)90154-2)
- Romero R., (2006). *Radio natura. La ricezione e lo studio dei segnali radio di origine naturale*. Sandit Libri. ISBN-10: 8889150351.
- Scholz C.H., Sykes L.R., Aggarwal Y.P., (1973). *Earthquake prediction: a physical basis*. Science, 181, 803-810. <https://doi.org/10.1126/science.181.4102.803>
- Serpieri A., (1888). *Scritti di Sismologia*. Tipografia Editrice Calasanziana, Firenze. <https://archive.org/details/scrittidisismol00serpgoog/page/n6/mode/2up> (free). (Link a Google libri) (free)
- Solerti A., (1889). *I terremoti di Ferrara*. Tipografia Estense, Ferrara, 175 pp.
- Tommasina T., (1901). *L'ascoltazione dei temporali lontani per mezzo dell'elettro-radiofono*. Rivista tecnica d'elettricit . Milano, vol. XX, n. 1, 5 gennaio 1901, pp. 2-4. <https://books.google.it/books?id=yPo-AQAAMAAJ&hl=it&pg=PP9#v=onepage&q&f=false> (free)
- Vannucci G., (1787). *Discorso storico-filosofico sopra il tremuoto (...)*. Ed. Pallade, Cesena. https://books.google.it/books?id=L1rXGKU1QXAC&printsec=frontcover&hl=it&source=gb_s_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false (free)
- Vivenzio G., (1788). *Istoria de' tremuoti (...)*. Volume 1. Stamperia Regale, Napoli. https://books.google.it/books?id=dDQAAAAAQA&printsec=frontcover&hl=it&source=gb_s_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false (free)
- Warwick J.W., (1963). *Radio astronomical techniques for the study of planetary atmospheres*, in *Radio astronomical and Satellite Studies of the Atmosphere*, edited by J. Aarons, p. 400, North Holland, Amsterdam. https://www.scientificexploration.org/docs/4/jse_04_2_warwick.pdf (PDF free)
- Warwick J., Stoker C., Meyer T., (1982). *Radio emission associated with rock fracture: possible application to the great chilean earthquake of may 22, 1960*. J Geophys Res 87: 2851-2859. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/JB087iB04p02851/abstract>
- Zubkov S.I., and Migunov N.I., (1975). *On the time of appearance of the earthquake electromagnetic precursors*. Geomagnetism and aeronomy, Volume: 15, Issue: 6, Pages: 1070-1074. ISSN: 0016-7932.
- Yasui Y., (1968). *A study of the luminous phenomena accompanied with earthquake, part 1, Mem ries of the Kakioka Magnetic Observatory*, 13, 25-61. http://www.kakioka-jma.go.jp/publ/journal_DB/abstract_e.php?no=184& (Japanese PDF free)

Riferimenti bibliografici della Tabella 1

- [01] Warwick J., Stoker C., Meyer T., (1982). *Radio emission associated with rock fracture: possible application to the great chilean earthquake of may 22, 1960*. J Geophys Res 87: 2851-2859. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/JB087iB04p02851/abstract>
- [02] Gokhberg M.B., Morgunov V.A., Aronov E.L., (1979). *On high-frequency electromagnetic radiation during the seismic activity*. Dokl. Akad. Nauk SSSR, 1979, Volume 248, Number 5, 1077-1081. (In lingua russa) <http://www.mathnet.ru/links/6c6fd54e557ed9e4aa1265787a01c41b/dan43067.pdf>
- [03] Gokhberg M., Morgounov V., Yoshino T., Tomizawa I., (1982). *Experimental measurement of electromagnetic emissions possibly related to earthquakes in Japan*. J Geophys Res 87: 7824-

7828. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/JB087iB09p07824/abstract>
- [04] Molchanov A., Kopytenko A., Voronov M., Kopytenko A., Matiashviali G., et al., (1992). *Results of ULF magnetic field measurements near the epicenters of the Spitak (Ms=6.9) and Loma-Prieta (Ms=7.1) earthquakes: comparative analysis*. *Geophys Res Lett* 19: 1495-1498. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/92GL01152>
- [05] Kopytenko Y., Matiashviali T., Voronov P., Kopytenko E., Molchanov O., (1993). *Detection of ultra-low-frequency emissions connected with the Spitak earthquake and its aftershock activity, based on geomagnetic pulsations data at Dusheti and Vardzia observatories*. *Phys Earth Planet In* 77: 85-95. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0031920193900358>
- [06] Fraser-Smith A., Bernardi A., McGill P., Ladd M., Helliwell R., Viillard O., (1990). *Low-frequency magnetic field measurements near the epicenter of the Ms 7.1 Loma Prieta earthquake*. *Geophys Res Lett* 17: 1465-1468. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/GL017i009p01465/abstract>
- [07] Serebryakova O., Bilichenko S., Chmyrev V., Parrot M., Rauch J., et al., (1992). *Electromagnetic ELF radiation from earthquake regions as observed by low-attitude satellites*. *Geophys Res Lett* 19: 91-94. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/91GL02775/abstract>
- [08] Dea J., Hansen P., Boerner W., (1993). *Long-term EMF background noise measurements, the existence of window regions and applications to earthquake precursor emission studies*. *Phys Earth Planet In* 77: 109-125. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(93\)90037-A](https://doi.org/10.1016/0031-9201(93)90037-A)
- [09] Shalimov S., Gokhberg M., (1998). *Lithosphere-ionosphere coupling mechanism and its application to the earthquake in Iran on June 20, 1990*. A review of ionospheric measurements and basic assumptions. *Phys Earth Planet In* 105: 211-218. [https://doi.org/10.1016/S0031-9201\(97\)00092-7](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(97)00092-7)
- [10] Hayakawa M., Kawate R., Molchanov O., Yumoto K., (1996). *Results of ultra-low-frequency magnetic field measurements during the Guam earthquake of 8 August 1993*. *Geophys Res Lett* 23: 241-244. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/95GL02863/abstract>
- [11] Smirnova, N., Hayakawa M., (2007). *Fractal characteristics of the ground-observed ULF emissions in relation to geomagnetic and seismic activities*. *J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys* 69: 1833-1841. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364682607002295>
- [11b] Smirnova N., Hayakawa M., Gotoh K., Volobuev D., (2001). *Scaling characteristics of ULF geomagnetic fields at the Guam seismoactive area and their dynamics in relation to the earthquake*. *Natural Hazards and Earth System Science*, Copernicus Publications on behalf of the European Geosciences Union, 2001, 1 (3), pp.119-126. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00299009/> oppure <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00299009/document>
- [12] Hayakawa M., Ida Y., Gotoh K., (2005). *Multifractal analysis for the ULF geomagnetic data during the Guam earthquake*. *Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology*, 2005. *Proc. IEEE 6 th Int. Symposium on 21-24 June 2005*: 239 - 243. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00302534/> oppure <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00302534/document>
- [13] Fujinawa Y., Takahashi K., (1998). *Electromagnetic radiations associated with major earthquakes*. *Phys Earth Planet In* 105: 249-259. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031920197001179>
- [14] Maeda K., Tokimasa N., (1996). *Decametric radiation at the time of the Hyogoken Nanbu earthquake near Kobe in 1995*. *Geophysical Research Letter*, Vol 23, No. 18, pp. 2433-2436. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/96GL02307/abstract>
- [15] Nagao T., Enomoto Y., Fujinawa Y., Hata M., Hayakawa M., Huang Q., Izutsu J., Kushida Y., Maeda K., Oike K., Uyeda S., Yoshino T., (1995). *Electromagnetic anomalies associated with 1995 Kobe earthquake*. *Journal of Geodynamics*, Volume 33, Issues 4-5, 2002, pages 401-411, ISSN 0264-3707. [https://doi.org/10.1016/S0264-3707\(02\)00004-2](https://doi.org/10.1016/S0264-3707(02)00004-2)
- [16] Eftaxias K., Kapiris P., Polygiannakis J., Bogris N., Kopanas J., et al. (2001). *Signature of pending earthquake from electromagnetic anomalies*. *Geophys Res Lett* 29: 3321-3324.

- <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2001GL013124/abstract>
- [17] Eftaxias K., Kapiris P., Dologlou E., Kopanas J., Bogris N., et al. (2002). *EM anomalies before the Kozani earthquake: a study of their behavior through laboratory experiments*. *Geophys Res Lett* 29: 69-1-69-4. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2001GL013786/abstract>
- [18] Kapiris P., Polygiannakis J., Peratzakis A., Nomicos K., Eftaxias K. (2002). *VHF-electromagnetic evidence of the underlying pre-seismic critical stage*. *Earth Planets Space* 54: 1237-1246. <http://link.springer.com/article/10.1186%2F030352452>
- [19] Eftaxias K., Kapiris P., Polygiannakis J., Peratzakis A., Kopanas J., Antonopoulos G., Rigas D., (2003). *Experience of short term earthquake precursors with VLF-VHF electromagnetic emissions*. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3: 217-228. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00299027/>
- [20] Enomoto Y., Tsutsumi A., Yukio F., Kasahara M., Hashimoto H. (1997). *Candidate precursors: Pulse-like geoelectric signals possibly related to recent seismic activity in Japan*. *Geophysical Journal International*, Volume 131, Issue 3, December 1997, Pages 485-494, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1997.tb06592.x> oppure <https://academic.oup.com/gji/article-pdf/131/3/485/6100563/131-3-485.pdf> oppure ancora: https://scholar.google.com/scholar?output=instlink&q=info:C4tj2AFV7_gj:scholar.google.com/&hl=it&as_sdt=0,5&scillfp=7327029740737342461&oi=lle
- [21] Asada T., Baba H., Kawazoe M. and Sugiura M., (2001). *An attempt to delineate very low frequency electromagnetic signals associated with earthquakes*. *Earth, Planets and Space*, 53, 55-62. <https://doi.org/10.1186/BF03352362>
- [22] Karakelian D., Klemperer S.L., Fraser-Smith A.C., Thompson G.A., (2002). *Ultra-low frequency electromagnetic measurements associated with the 1998 Mw 5.1 San Juan Bautista, California earthquake and implications for mechanisms of electromagnetic earthquake precursors*. Volume 359, Issues 1-2, 22 November 2002, Pages 65-79. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(02\)00439-0](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(02)00439-0) oppure http://www.ltpaobserverproject.com/uploads/3/0/2/0/3020041/tectonophysics_karakelian_2002.pdf
- [23] Karakelian D., Klemperer S.L., Fraser-Smith A.C., Thompson G.A., (2002). *Ultra-low frequency electromagnetic measurements associated with the 1998 Mw 5.1 San Juan Bautista, California earthquake and implications for mechanisms of electromagnetic earthquake precursors*. *Tectonophysics*, Volume 359, Issues 1-2, 2002, Pages 65-79, ISSN 0040-1951. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(02\)00439-0](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(02)00439-0) oppure: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040195102004390> oppure ancora: http://www.ltpaobserverproject.com/uploads/3/0/2/0/3020041/tectonophysics_karakelian_2002.pdf
- [24] Ohta K., Umeda K., Watanabe N., Hayakawa M., (2001). *ULF/ELF emissions observed in Japan, possibly associated with the Chi-Chi earthquake in Taiwan*. *Natural Hazards and Earth System Science*, Copernicus Publications on behalf of the European Geosciences Union, 2001, 1 (1/2), pp.37-42. <https://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/30/15/77/PDF/nhess-1-37-2001.pdf> oppure: <https://hal.archives-ouvertes.fr/file/index/docid/301577/filename/nhess-1-37-2001.pdf>
- [25] Akinaga Y., Hayakawa M., Liu J. Y., Yumoto K., Hattori K., (2001). *A precursory ULF signature for the Chi-Chi earthquake in Taiwan*. *Natural Hazards and Earth System Science*, Copernicus Publications on behalf of the European Geosciences Union, 2001, 1 (1/2), pp.33-36. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00301576/document> oppure <https://hal.archives-ouvertes.fr/file/index/docid/301576/filename/nhess-1-33-2001.pdf>
- [26] Karakelian D., Beroza G.C., Klemperer S.L., Fraser-Smith A.C., (2002). *Analysis of Ultralow-Frequency Electromagnetic Field Measurements Associated with the 1999 M 7.1 Hector Mine,*

- California, Earthquake Sequence. Bulletin of the Seismological Society of America; 92 (4): 1513–1524. doi: <https://doi.org/10.1785/0120000919> oppure link
- [27] Ismaguilov V.S., Kopytenko Yu.A., Hattori K., Hayakawa M., (2003). *Variations of phase velocity and gradient values of ULF geomagnetic disturbances connected with the Izu strong earthquakes*. Natural Hazards and Earth System Science, Copernicus Publications on behalf of the European Geosciences Union, 2003, 3 (3/4), pp.211-215. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00299022/document>

Sitografia

- [Apache, foundation] *Apache Homepage* (Apache Software Foundation): <https://www.apache.org/>
- [INSPIRE, Kit] *Order INSPIRE VLF-3 Radio Receiver Kit* (NASA): <http://theinspireproject.org/default.asp?contentID=27>
- [INSPIRE, Signals] *Types of VLF signals* (NASA): <http://theinspireproject.org/default.asp?contentID=17>
- [INSPIRE, VLF-3] *INSPIRE VLF-3 radio receiver kit* (NASA): <http://theinspireproject.org/default.asp?contentID=3>
- [INGV, QdG] *Quaderni di Geofisica* (INGV): <http://istituto.ingv.it/it/le-collane-editoriali-ingv/quaderni-di-geofisica.html>
- [LPS-2510] *Antenna loop magnetico 1-500 KHz* (TR System): <https://tr-system.com/wp-content/uploads/2019/06/LPS-2510.jpg>
- [McGreevy, Audio] *Stephen P. McGreevy's ground-based ELF-VLF recordings* (Stephen P. McGreevy): <http://www-pw.physics.uiowa.edu/mcgreevy>
- [McGreevy, Listening] *The pocket-portable WR3-E natural-VLF-radio phenomena receiver listening guide* (Stephen P. McGreevy): <http://www.auroralchorus.com/wr3gde.htm>
- [McGreevy, Schematic] *Stephen P. McGreevy's BBB-4 (Bare Bones Basic) Natural VLF Radio Receiver Schematic* (Stephen P. McGreevy): <http://www.auroralchorus.com/bbb4rx3.htm>
- [McGreevy, VLF] *Natural ELF-VLF Radio Phenomena - "The Music of the Magnetosphere and Space Weather"* (Stephen P. McGreevy): <http://www.auroralchorus.com>
- [MyIP.com] *Check your IP address* (MyIP.com): <https://www.myip.com/>
- [Romero, E202] *EXPLORER E202* (Renato Romero): <http://www.vlf.it/romero2/explorer-e202.html>
- [Romero, RadioOnde] *Dedicato ad Ezio Mognaschi* (Renato Romero): <http://www.vlf.it/directcontact/mognaschi2.htm>
- [Romero, VLF] *Homepage del sito "VLF.it"* (Renato Romero): <http://www.vlf.it>
- [SDT, FESN] *Homepage del progetto "Segnali dalla Terra"* (Riccardo Rossi): http://www.fesn.org/index.php?option=com_content&view=article&id=68&Itemid=83&lang=it
- [SDT, Fidenza] *Stazione FID, progetto SDT* (ARI Fidenza): http://arifidenza.it/sito_sdt/index.php

Riferimenti al software

- [Apache] *Apache HTTP Server* (freeware da Apache Software Foundation): <https://httpd.apache.org/download.cgi>
- [Audacity] *Audacity audio software* (open source): <https://www.audacityteam.org/download>
- [FilterFree] *Filter Design Software* (freeware da Nuhertz): <https://www.nuhertz.com>
- [GRAM] *Spectrogram* (freeware da Visualization Software LCC): <http://db0fhn.efi.fh->

nuernberg.de/~dg8ygz/voicetools/

[La] *Losless Audio* (freeware): <http://www.lossless-audio.com>

[MS Visual C] *Microsoft Visual C++ Redistributable* (freeware da Microsoft):

<https://support.microsoft.com/it-it/help/2977003/the-latest-supported-visual-c-downloads>

[PHP] *PHP, Hypertext Preprocessor* (open source): <https://www.php.net/releases/index.php>

[RadioUt] *Radioutilitario - Il Radio Libro* (freeware di i4jhg): http://www.ariscandiano.org/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=159:nuova-versione-radioutilitario-219&catid=49:radioutilitario&Itemid=107

[Sonic] *Sonic Visualiser* (open source): <https://www.sonicvisualiser.org/download.html>

[SpecLab] *Spectrum Lab - Audio Signal Analyser* (freeware di dl4yhf):

<https://www.qsl.net/dl4yhf/spectra1.html>

[Wine] *WineHQ* (open source): <https://www.winehq.org/>

QUADERNI di GEOFISICA

ISSN 1590-2595

<http://istituto.ingv.it/le-collane-editoriali-ingv/quaderni-di-geofisica.html/>

I QUADERNI DI GEOFISICA (QUAD. GEOFIS.) accolgono lavori, sia in italiano che in inglese, che diano particolare risalto alla pubblicazione di dati, misure, osservazioni e loro elaborazioni anche preliminari che necessitano di rapida diffusione nella comunità scientifica nazionale ed internazionale. Per questo scopo la pubblicazione on-line è particolarmente utile e fornisce accesso immediato a tutti i possibili utenti. Un Editorial Board multidisciplinare ed un accurato processo di peer-review garantiscono i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi. I QUADERNI DI GEOFISICA sono presenti in "Emerging Sources Citation Index" di Clarivate Analytics, e in "Open Access Journals" di Scopus.

QUADERNI DI GEOFISICA (QUAD. GEOFIS.) welcome contributions, in Italian and/or in English, with special emphasis on preliminary elaborations of data, measures, and observations that need rapid and widespread diffusion in the scientific community. The on-line publication is particularly useful for this purpose, and a multidisciplinary Editorial Board with an accurate peer-review process provides the quality standard for the publication of the manuscripts. QUADERNI DI GEOFISICA are present in "Emerging Sources Citation Index" of Clarivate Analytics, and in "Open Access Journals" of Scopus.

RAPPORTI TECNICI INGV

ISSN 2039-7941

<http://istituto.ingv.it/le-collane-editoriali-ingv/rapporti-tecnici-ingv.html/>

I RAPPORTI TECNICI INGV (RAPP. TEC. INGV) pubblicano contributi, sia in italiano che in inglese, di tipo tecnologico come manuali, software, applicazioni ed innovazioni di strumentazioni, tecniche di raccolta dati di rilevante interesse tecnico-scientifico. I RAPPORTI TECNICI INGV sono pubblicati esclusivamente on-line per garantire agli autori rapidità di diffusione e agli utenti accesso immediato ai dati pubblicati. Un Editorial Board multidisciplinare ed un accurato processo di peer-review garantiscono i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

RAPPORTI TECNICI INGV (RAPP. TEC. INGV) publish technological contributions (in Italian and/or in English) such as manuals, software, applications and implementations of instruments, and techniques of data collection. RAPPORTI TECNICI INGV are published online to guarantee celerity of diffusion and a prompt access to published data. A multidisciplinary Editorial Board and an accurate peer-review process provide the quality standard for the publication of the contributions.

MISCELLANEA INGV

ISSN 2039-6651

http://istituto.ingv.it/le-collane-editoriali-ingv/miscellanea-ingv.html

MISCELLANEA INGV (MISC. INGV) favorisce la pubblicazione di contributi scientifici riguardanti le attività svolte dall'INGV. In particolare, MISCELLANEA INGV raccoglie reports di progetti scientifici, proceedings di convegni, manuali, monografie di rilevante interesse, raccolte di articoli, ecc. La pubblicazione è esclusivamente on-line, completamente gratuita e garantisce tempi rapidi e grande diffusione sul web. L'Editorial Board INGV, grazie al suo carattere multidisciplinare, assicura i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi sottomessi.

MISCELLANEA INGV (MISC. INGV) favours the publication of scientific contributions regarding the main activities carried out at INGV. In particular, MISCELLANEA INGV gathers reports of scientific projects, proceedings of meetings, manuals, relevant monographs, collections of articles etc. The journal is published online to guarantee celerity of diffusion on the internet. A multidisciplinary Editorial Board and an accurate peer-review process provide the quality standard for the publication of the contributions.

Coordinamento editoriale

Francesca DI STEFANO
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Progetto grafico

Barbara ANGIONI
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Impaginazione

Barbara ANGIONI
Patrizia PANTANI
Massimiliano CASCONI
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

©2022

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
Via di Vigna Murata, 605
00143 Roma
tel. +39 06518601

www.ingv.it



Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

