

Rapporti tecnici

INGV

**Progetto FIRB-UR4.
Installazione stazioni
elettromagnetiche e validazione dei
segnali registrati**

343



Direttore Responsabile

Stefano GRESTA

Editorial Board

Luigi CUCCI - Editor in Chief (INGV-RM1)

Raffaele AZZARO (INGV-CT)

Mario CASTELLANO (INGV-NA)

Viviana CASTELLI (INGV-BO)

Rosa Anna CORSARO (INGV-CT)

Mauro DI VITO (INGV-NA)

Marcello LIOTTA (INGV-PA)

Mario MATTIA (INGV-CT)

Milena MORETTI (INGV-CNT)

Nicola PAGLIUCA (INGV-RM1)

Umberto SCIACCA (INGV-RM2)

Alessandro SETTIMI (INGV-RM2)

Salvatore STRAMONDO (INGV-CNT)

Andrea TERTULLIANI (INGV-RM1)

Aldo WINKLER (INGV-RM2)

Segreteria di Redazione

Francesca Di Stefano - Referente

Rossella Celi

Tel. +39 06 51860068

redazionecen@ingv.it

in collaborazione con:

Barbara Angioni (RM1)

Rapporti tecnici INGV

PROGETTO FIRB-UR4. INSTALLAZIONE STAZIONI ELETTROMAGNETICHE E VALIDAZIONE DEI SEGNALI REGISTRATI

Cinzia Di Lorenzo, Manuela Pietrolungo, Achille Zirizzotti

INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Geomagnetismo, Aeronomia e Geofisica Ambientale)

343

Indice

Introduzione	7
1. Studio delle sorgenti geomagnetiche endogene	7
2. Misure preliminari di rumore	10
3. Struttura delle stazioni di misura	12
4. Analisi dei segnali registrati dalle tre stazioni di misura LEMI (30 nHz-0.4 Hz)	15
4.1 Gradienti magnetici nel dominio della frequenza	16
4.2 Analisi dei gradienti longitudinali e trasversali e del rotore del campo magnetico nel dominio del tempo	17
5. Analisi dei segnali registrati dalle tre stazioni di misura METRONIX (0.001 Hz - 105 Hz)	19
5.1 Analisi dei segnali registrati a Collebrincioni	20
5.2 Analisi dei segnali registrati a Paganica	22
5.3 Analisi dei segnali registrati a Preturo	25
6. Conclusioni	27
Ringraziamenti	28
Bibliografia	28
Appendici	29
Appendice A: Diffusione del campo magnetico	31
Appendice B: Propagazione elettromagnetica in un mezzo conduttivo	33

Introduzione

In questa nota viene presentata una nuova infrastruttura di misura realizzata nell'ambito del progetto FIRB-Abruzzo-UR4 (Monitoraggio Gravimetrico, Magnetico ed Elettromagnetico dell'area del terremoto di L'Aquila), in particolare è stato sviluppato un interferometro elettromagnetico a bassa frequenza finalizzato allo studio dei campi elettromagnetici legati alla dinamica della crosta terrestre. La realizzazione di questa infrastruttura ha comportato un rilevante impegno tecnico, finanziario, organizzativo e burocratico legato essenzialmente all'acquisizione delle aree, ai permessi di edificazione, ai cantieri, alla logistica, all'organizzazione del lavoro, ecc. L'interferometro è costituito da tre stazioni di misura ubicate in aree a basso rumore elettromagnetico, intorno a L'Aquila.

Ciascuna stazione di misura è stata equipaggiata con strumenti per la misura del campo elettrico e del campo magnetico nella banda 30 nHz - 2000 Hz. La necessità di realizzare un interferometro per rilevare i segnali geogenici nasce dal fatto che questi segnali sono molto meno intensi del rumore di fondo antropico presente praticamente in tutti i contesti ambientali anche quelli elettromagneticamente più quieti. Nel nostro caso anche i segnali naturali di origine magnetosferica e ionosferica costituiscono il rumore da eliminare. La strumentazione impiegata per rilevare questi segnali è quanto di meglio offra oggi il mercato mondiale del settore. Nella banda 30 nHz - 0.4 Hz è stato impiegato un magnetometro flux-gate LEMI 18, uno strumento estremamente preciso ed accurato, con un rumore di fondo molto basso [Trigg, 1988]. Nella banda 0.001 Hz - 2000 Hz sono stati impiegati sensori METRONIX MFS06, caratterizzati da un rumore intrinseco molto basso. Al di sopra di 40 Hz il rumore è inferiore a quello dei magnetometri quantistici (SQUID, noise $10 \text{ fT/Hz}^{1/2}$).

Questa infrastruttura in una prima fase dovrà minimizzare i livelli di rumore della strumentazione scegliendo la configurazione strumentale migliore, e successivamente operare in continuo nella misura e acquisizione dei campi elettromagnetici.

1. Studio delle sorgenti geomagnetiche endogene

L'interno della Terra emette con continuità segnali elettromagnetici le cui proprietà sono modulate dall'attività geodinamica. Tali segnali sono molto deboli, generalmente l'ampiezza della componente magnetica è al di sotto di 1 pT (per confronto, l'intensità del campo alle nostre latitudini è di circa 46000 nT). Le caratteristiche di questi segnali dipendono oltre che dalle proprietà della sorgente anche dalla struttura di conducibilità elettrica all'interno della terra nella zona sottostante il punto di osservazione. A causa della presenza del terreno (mezzo conduttivo), la loro propagazione avviene per diffusione. Al di sotto della frequenza di diffusione il campo magnetico si propaga conservando le proprietà della sorgente mentre, al di sopra di tale frequenza, esso subisce dispersione nel mezzo attraversato perdendo memoria del sistema di genesi (effetto di schermo). Inoltre, le correnti primarie prodotte nei meccanismi tettonici si chiudono nel mezzo conduttore tramite correnti secondarie di tipo ohmico la cui struttura dipende dalla distribuzione spaziale della conducibilità elettrica. I campi magnetici che esse producono, anche per distanze inferiori allo *skin depth*, non sempre sono osservabili. Ci sono anche altri fattori che determinano l'osservabilità di questi segnali quali le sorgenti di rumore (strumentale e non) e le tecniche utilizzate per l'analisi dati.

Sebbene lo studio del tetto elettromagnetismo (effetti presismici) e del sismo elettromagnetismo (effetti cosismici) abbia portato a molteplici osservazioni di anomalie elettromagnetiche nelle fasi precedenti, durante e post terremoto, ancor oggi non è stato trovato alcun legame causale tra i movimenti tettonici e i segnali osservati a Terra. Questo tipo di indagine prescinde dalle circostanze legate al terremoto in quanto connessa ai processi geodinamici in generale. Un monitoraggio continuo e a lunga durata permette di analizzare la stazionarietà dei parametri fisici coinvolti. Eventuali anomalie sono definite come variazioni di questi parametri. Osservazioni su lunghi periodi permettono inoltre di fare una statistica dei fenomeni anomali osservati e danno la possibilità di osservare anche eventi sporadici di maggiore intensità.

Come sopra detto, i fattori in parte 'governabili' che determinano l'osservabilità sulla superficie terrestre dei segnali ipogei possono essere distinti essenzialmente in due categorie: un fattore dovuto all'effetto di schermo del 'sistema Terra' che, a causa delle grandi profondità a cui si possono trovare queste sorgenti, attenua il segnale che si vuole osservare ed un fattore dovuto a rumori di diversa natura (strumentale e antropico) che si sovrappongono ad esso limitandone l'osservabilità. Entrambi questi due fattori contribuiscono a determinare una sorta di finestra spettrale naturale privilegiata in cui è possibile osservare meglio o con maggiore probabilità i segnali endogeni. L'utilizzo di una strumentazione di grande

sensibilità e ad alta frequenza di campionamento permette di esplorare anche le zone al di fuori di questa finestra naturale ‘privilegiata’. Inoltre i rumori di origine naturale e artificiale vengono ridotti ulteriormente; quello dovuto alle sorgenti antropiche, utilizzando siti lontani da fonti di disturbo, quello dovuto ai segnali di origine esterna ed indotta, utilizzando tecniche gradiometriche che richiedono la misura simultanea in differenti siti.

Come mostrato nella figura 1, la finestra spettrale in cui il rumore di fondo naturale è minimo è quella delle ELF (10-100Hz), causato da fenomeni che avvengono nella cavità Terra-ionosfera. Per analizzare questa banda di frequenze non basta il campionamento standard degli osservatori magnetici (1 s). L’ampiezza di questi segnali infatti è dell’ordine del pT, confrontabile con le ampiezze dei segnali di origine interna alla Terra. Per analizzare questa parte dello spettro occorre una strumentazione che abbia una sensibilità dell’ordine di qualche decina di fT. Questo è possibile utilizzando i magnetometri *search coil*.

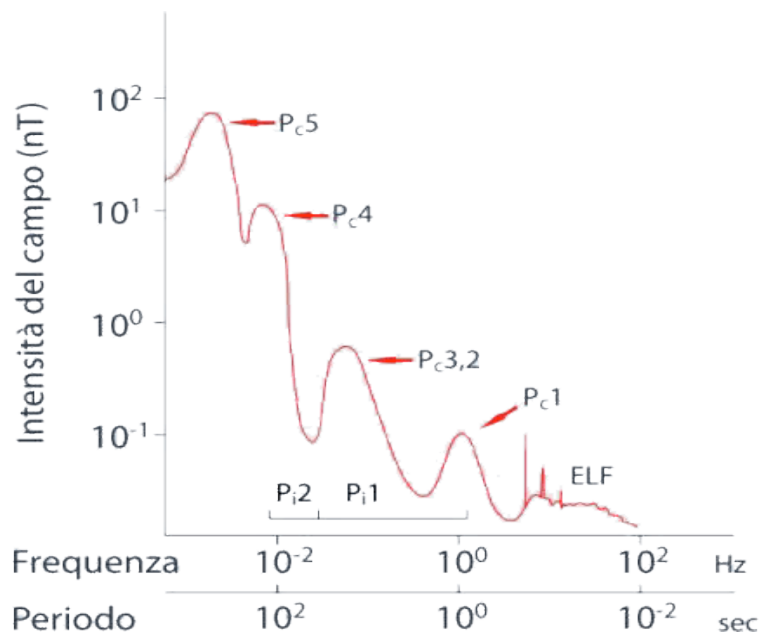


Figura 1. Spettro del segnale magnetico naturale nella banda ULF-ELF.

Nella banda di frequenze ULF-ELF (0.001-100Hz) e per profondità tipiche della zona sismogenetica (~15 km) la conducibilità elettrica (tipicamente maggiore di 10^{-5} S/m) è $\sigma \gg \omega \epsilon_r \epsilon_0$ (dell’ordine di $10^{-14} - 10^{-9}$ S/m nella banda selezionata), questo caratterizza il mezzo come un mezzo conduttivo con alte perdite e forte attenuazione del segnale elettromagnetico. Nell’equazione d’onda del campo elettromagnetico è dunque possibile trascurare il termine dovuto alla corrente di spostamento nel range di frequenze considerate (condizioni quasi stazionarie). L’equazione del campo magnetico è l’equazione di diffusione (vedi appendice A) in cui la struttura di conducibilità elettrica del sottosuolo gioca un ruolo fondamentale nella propagazione di questi segnali. La soluzione dell’equazione è complessa ed è espressa in termini di funzioni di Bessel ma nell’ipotesi di mezzo a conducibilità uniforme, si semplifica notevolmente. In tale approssimazione è possibile calcolare la curva di dispersione teorica dei segnali calcolando la velocità di gruppo in funzione della frequenza (Appendice B). In figura 2 è mostrata la dispersione delle velocità considerando una profondità $L=10$ km e una resistività media di circa 800 ohm·m.

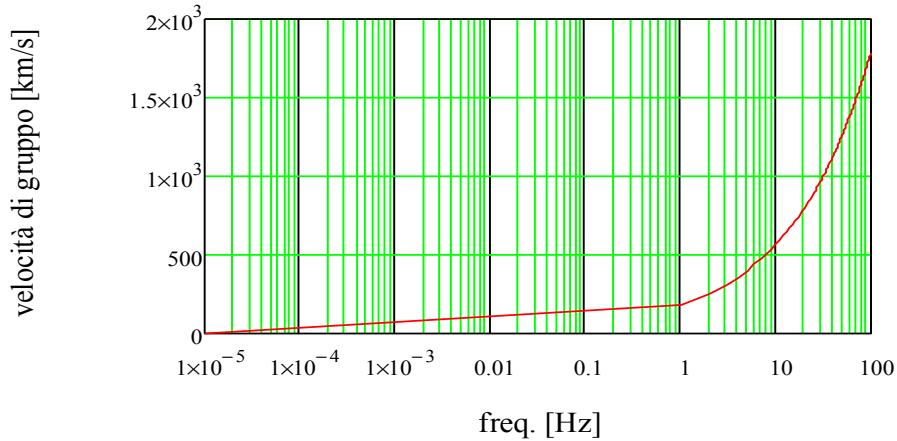


Figura 2. Curva di dispersione delle velocità di fase (Appendice A).

Nel caso realistico di una struttura complessa di conducibilità elettrica, la velocità di questi segnali dipende dalla direzione di propagazione. Ne risulta che le componenti orizzontali e verticali del campo magnetico hanno ciascuna una propria curva di dispersione per cui raggiungono la superficie terrestre sfasate tra loro. Lo sfasamento tra le due componenti è dovuto però anche alle diverse condizioni sul bordo della superficie terrestre.

La soluzione dell'onda che si propaga nel mezzo conduttivo contiene un termine di ampiezza e di sfasamento che dipendono dallo "skin depth", distanza in cui l'ampiezza del campo si riduce di 1/e, la cui espressione è:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}$$

Ciò comporta che fissata la profondità cui si trova la sorgente, le componenti spettrali al di sopra di un valore di soglia vengono 'distorte' dal mezzo cioè l'effetto del mezzo è quello di attenuare la loro ampiezza e di modificarne la fase.

Nella Tabella 1, nell'intervallo di frequenze considerate, sono dati i valori della velocità, del tempo di propagazione e della profondità di penetrazione, per una sorgente a 10km, considerando a L'Aquila una resistività media di 800 $\Omega\cdot m$ (frequenza di diffusione $f_d = 1/\tau \approx 10$ Hz).

f [Hz]	$V_g(f)$ [km/s]	$t=10km/V_g$ [s]	$\varphi=\omega t$ [deg]	δ [km]
0.0001	1.8	5.6	0.2	1424
0.01	17.9	0.56	2.0	142
0.1	56.6	0.18	6.3	45.0
1	178.9	0.056	20	14.2
100	1789	0.005	201	1.4

Tabella 1. Parametri del campo magnetico generato da una sorgente endogena.

A noi interessa ampliare la banda di indagine sia perché vogliamo abbracciare tutto lo spettro intrinseco emesso dalla sorgente (di cui a priori non conosciamo nulla) sia perché vogliamo indagare le sorgenti poste a diverse profondità (ricordiamo che la frequenza di diffusione è proporzionale alla posizione

della sorgente). Quello che si osserva a Terra infatti è la sovrapposizione di segnali provenienti non da un singolo punto bensì da sorgenti distribuite in un volume, ciascuna con la sua ‘curva di diffusione’. Nelle varie bande di frequenza si mescolano i contributi dei segnali provenienti da varie zone della crosta terrestre alcuni dei quali contengono informazioni sulla sorgente ed altri contengono gli effetti del mezzo.

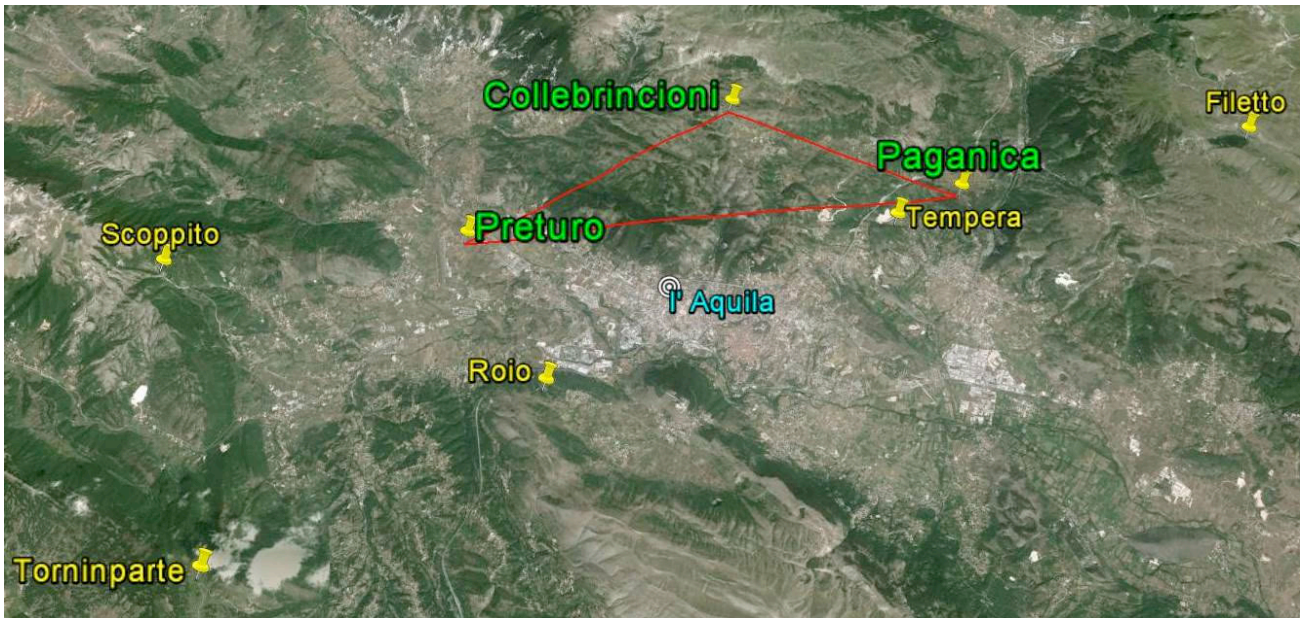


Figura 3. Mappa delle località in cui sono state effettuate le misure del rumore di fondo nel 2012, con le tre stazioni che costituiscono l'interferometro.

Con i dati di una singola stazione di misura non è possibile discriminare i vari contributi. Occorre un'analisi incrociata fatta da più punti di misura. La tecnica di misura proposta si basa sull'analisi gradiometrica tensoriale (l'applicazione di queste tecniche di analisi verranno pubblicate a breve) tramite la quale è possibile 'depurare' i segnali di origine interna dal contributo delle sorgenti esterne e indotte e di ricostruire il dipolo rappresentativo della sorgente interna i cui parametri (momento magnetico e posizione) sono legati agli elementi del tensore dei gradienti delle ampiezze delle componenti magnetiche orizzontali e verticali. Il tensore delle fasi permette di discriminare i segnali endogeni da quelli di origine esterna, considerando che questi ultimi, avendo lunghezze d'onda immensamente più grandi (107-1010 km) rispetto alle dimensioni della rete, raggiungono i siti di misura con la stessa fase per cui il loro contributo alle differenze di fase è nullo.

La distanza tra i siti è stata scelta in base ad un compromesso tra la necessità che non superi la lunghezza di diffusione dei segnali provenienti dalla zona sismogenetica (10-15 Km) e la necessità che su tale distanza si riescano ad apprezzare le differenze di fase per i segnali a più bassa frequenza nella banda di interesse.

2. Misure preliminari di rumore

A cominciare dal 2012, all'inizio del progetto FIRB, sono state eseguite misure del rumore di fondo magnetico in otto località intorno a L'Aquila al fine di individuare tre siti con un livello di rumore sufficientemente basso da rendere possibile il rilevamento dei segnali magnetici di origine interna alla Terra. I siti scelti per le stazioni di misura per la realizzazione dell'interferometro sono Collebrincioni (CLB), Paganica (PGN) e Preturo (PRT). Questi siti risultano avere un livello di rumore più basso rispetto alle altre località testate che sono: Tempera, Roio, Scoppito, Torninparte e Filetto (fig. 3). Il livello del rumore di fondo non è stato l'unico parametro preso in considerazione nella scelta dei tre punti di misura. Un altro

aspetto molto importante nella scelta della zona dove installare le stazioni di misura riguarda l'equipotenzialità magnetica dell'area designata, vale a dire la verifica della presenza di tensioni magnetiche tra i punti di misura minori di una certa soglia assegnata.

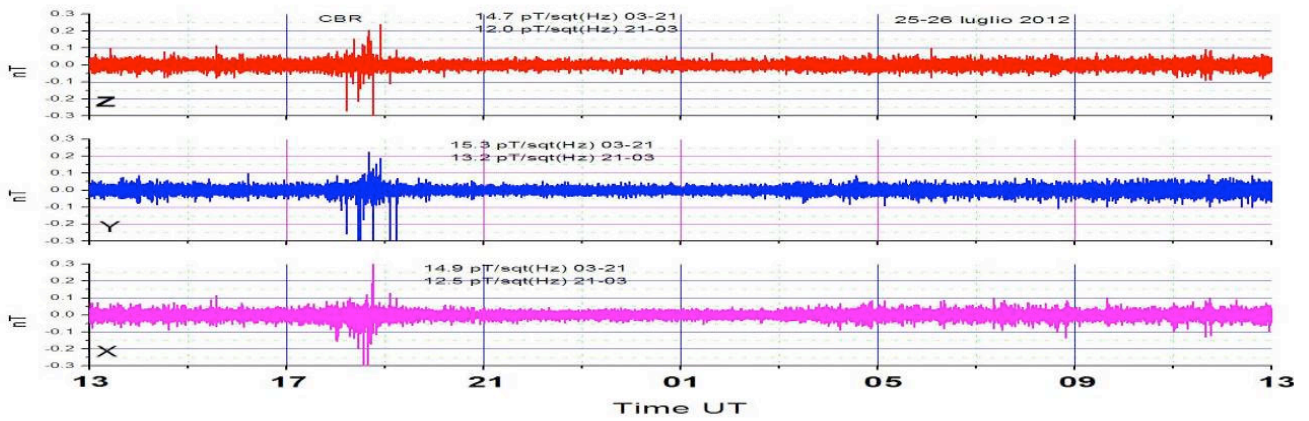


Figura 4. Rumore magnetico della stazione di Collebrincioni.

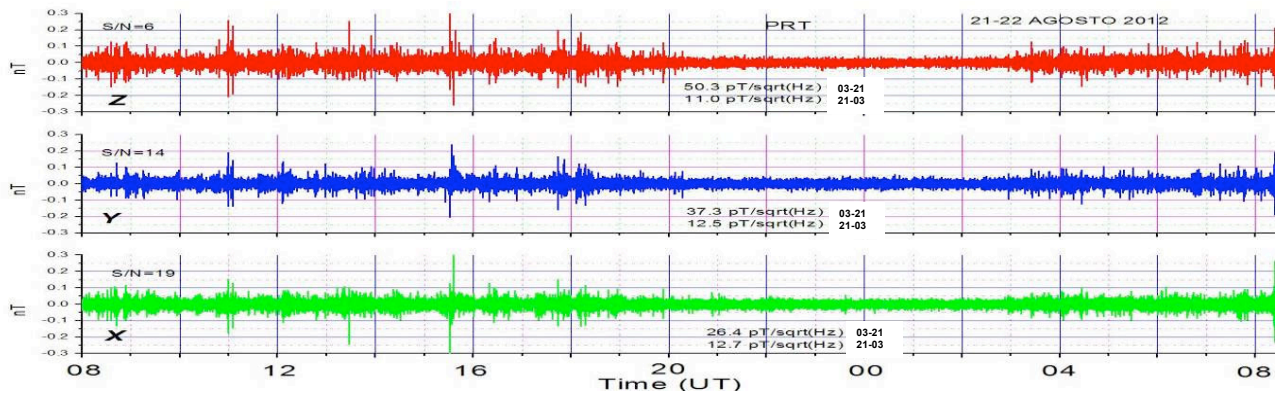


Figura 5. Rumore magnetico della stazione di Preturo.

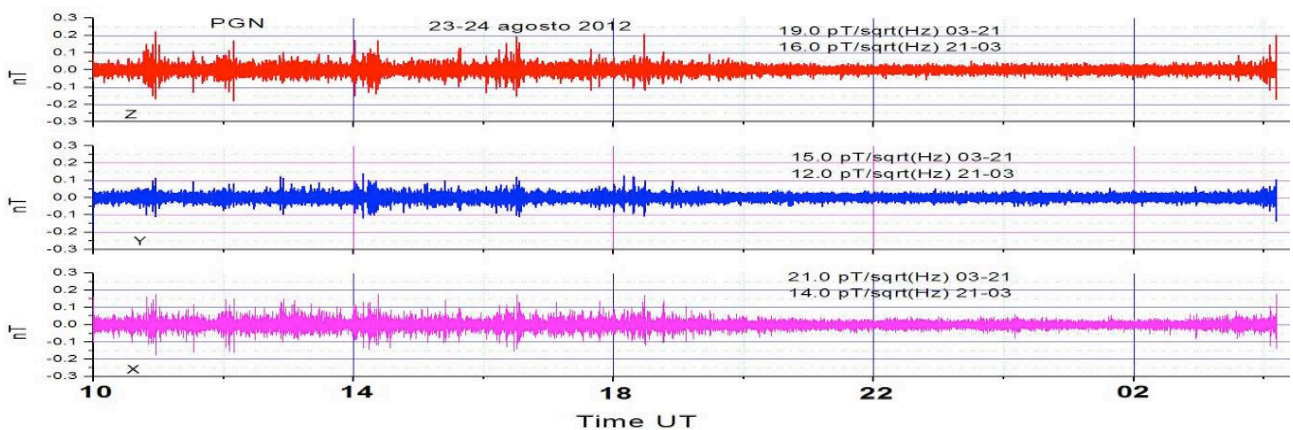


Figura 6. Rumore magnetico della stazione di Paganica.

Questo che è un criterio generale adottato nella scelta dei siti d'installazione degli osservatori geomagnetici, permette di evidenziare la presenza di anomalie locali del campo. Tali verifiche sono state effettuate nella zona dell'Aquila utilizzando la carta magnetica d'Italia 2010.0. Le tensioni magnetiche fra i tre punti scelti sono inferiori a 30 A.

Le figure 4, 5 e 6 mostrano la componente stazionaria del rumore magnetico di fondo. Questa componente deriva dallo sviluppo in autofunzioni ortogonali del segnale complessivo, è stato utilizzato uno spazio di Hilbert a otto dimensioni [Zhu, 2007], le autofunzioni associate ai primi tre autovalori dominanti sono state utilizzate per rappresentare le tre principali sorgenti dei segnali naturali [Power, 1985], le autofunzioni associate ai cinque autovalori restanti della matrice di covarianza, sono state utilizzate per rappresentare le cinque maggiori sorgenti di rumore [Kubrusly, 2003].

Nei grafici sono anche visibili i valori quadratici medi per ogni singola stazione. L'analisi è stata fatta separando i due segmenti temporali 03-21 UT (diurno) e 21-03 UT (notturno), il primo caratterizzato da una maggiore componente antropica del rumore e quindi da una differente distribuzione statistica. In questi grafici si nota una considerevole variazione diurna del rumore di fondo, questa modulazione a 24 ore è direttamente riconducibile al complesso delle attività umane che dominano nell'intervallo temporale diurno 03-21 UT [Palangio et al., 1991]. La densità spettrale del rumore di fondo nell'intervallo 21-03 UT è molto simile nei tre punti di misura, il rumore notturno ha una diversa caratterizzazione rispetto al rumore diurno. Il rapporto tra la densità spettrale del rumore diurno e quello notturno consente di caratterizzare il sito in maniera molto semplice e diretta [Robinson, 1974].

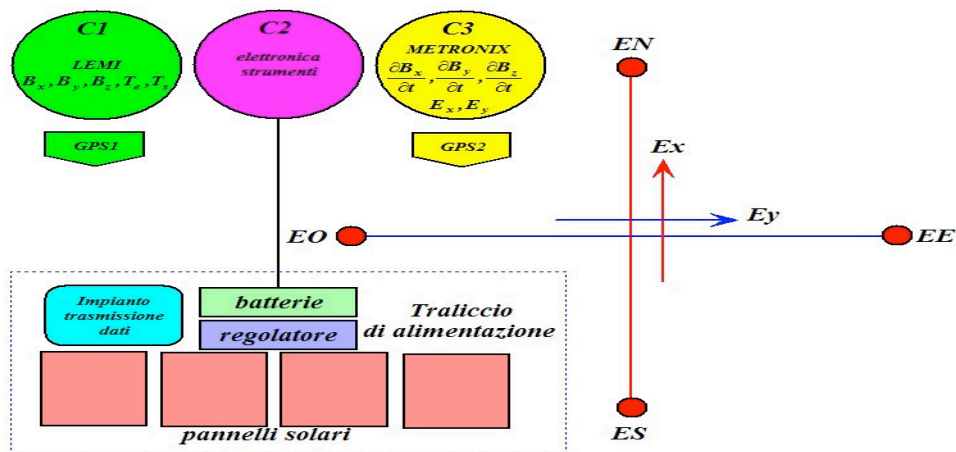


Figura 7. Schematizzazione di una stazione di misura.

3. Struttura delle stazioni di misura

Ciascuna stazione di misura è equipaggiata con un magnetometro triassiale MF06 METRONIX per la misura della derivata del campo magnetico nella banda 0.001 Hz – 2000 Hz, un elettrometro biassiale per la misura del campo elettrico nella banda 30 nHz – 2000 Hz e un magnetometro triassiale LEMI 18 per la misura del campo magnetico nella banda di frequenze che si estende da 30 nHz fino a 0.4 Hz. La parte sensoriale della strumentazione per la misura del campo elettrico tellurico è costituita da una coppia di dipoli ortogonali con elettrodi non polarizzabili.

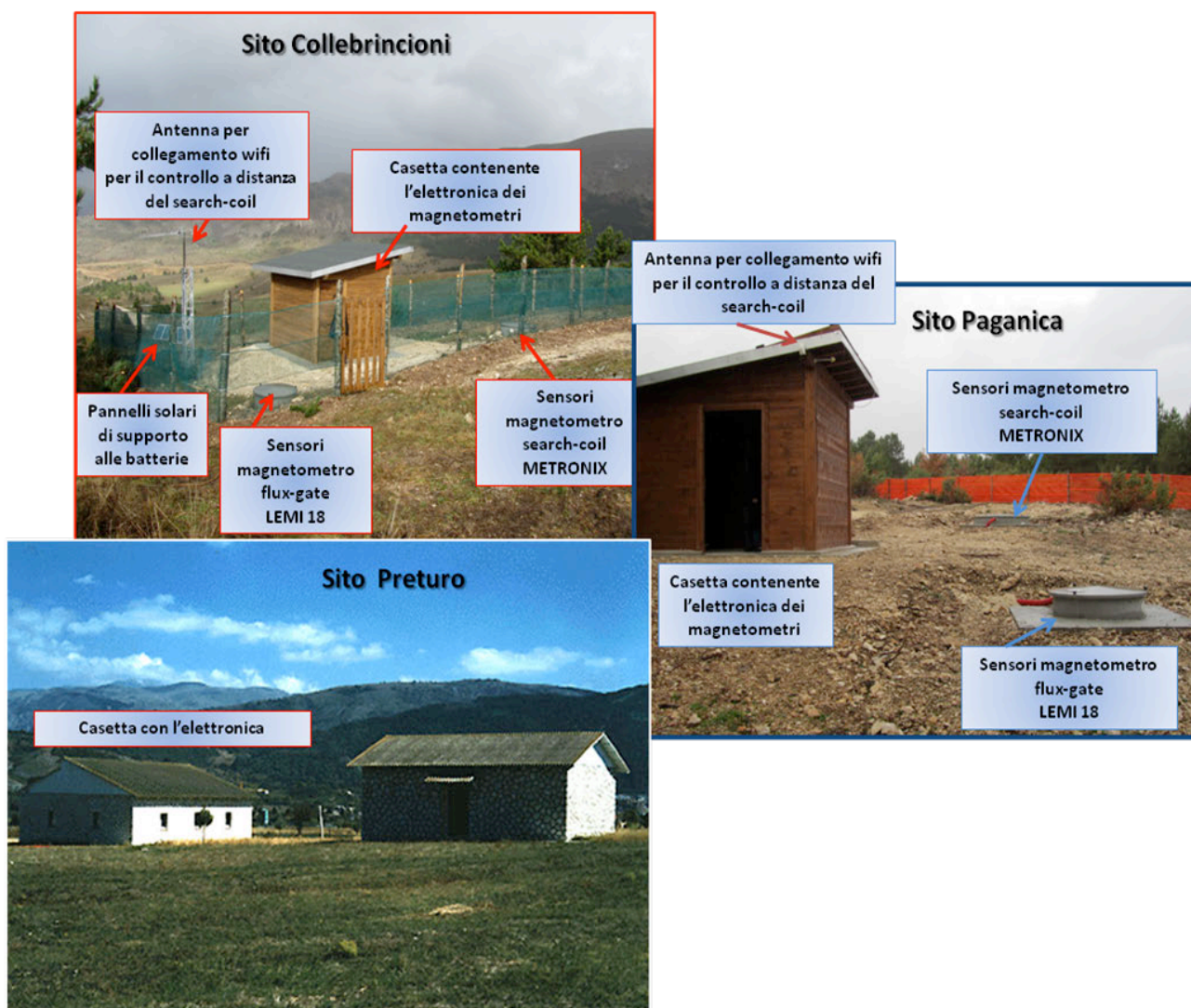


Figura 8. I tre siti della rete prescelti: Collebrincioni, Paganica e Preturo.

La strumentazione magnetica è alloggiata in tre cisterne di vetroresina C1, C2 e C3, (schematizzate in figura 7) e interrate ad una profondità di circa 2 metri, allo scopo di realizzare la termostatazione passiva dei dispositivi, eliminare le vibrazioni indotte dal vento e aumentare la stabilità meccanica dei sensori. Il sistema di alimentazione è quello convenzionale delle stazioni remote di misura che utilizzano dei pannelli solari con regolatore di carica per caricare delle batterie al piombo che alimentano tutta la strumentazione. Tutti i dispositivi di alimentazione sono montati su un traliccio di alluminio posto a circa 100 metri dalla strumentazione per evitare interferenze, a tale scopo inoltre tutti i cavi di alimentazione e di trasmissione dei segnali sono stati “twistati” e schermati e in particolare il regolatore di carica è di tipo lineare. Il traliccio di alimentazione ospita anche l'impianto di trasmissione dei dati che attraverso un router GSM-UMTS, collega la strumentazione alla rete internet attraverso la rete telefonica locale.

In figura 8 sono mostrate le immagini dei tre siti di misura. A Collebrincioni e Paganica è ben visibile la posizione delle cisterne contenenti i sensori e le casette in legno che ospitano l'elettronica della strumentazione. Le casette sono state scelte sia perché permettono un ricovero adeguato alla strumentazione, sia perché permettono di effettuare la manutenzione anche in condizioni di tempo poco favorevoli, abbastanza frequenti nelle zone selezionate. Tutte le stazioni di misura sono alloggiare all'interno di una recinzione amagnetica per tenere lontani gli animali. La stazione di Preturo è collocata all'interno del sito dove sorgeva l'Osservatorio geomagnetico dell'Aquila e di conseguenza sono state utilizzate le strutture già esistenti per alloggiare l'elettronica ed i sensori del LEMI 18. I sensori METRONIX sono stati posizionati all'esterno, riparati all'interno di una cisterna non ancora interrata.



Figura 9. Interno delle stazioni magnetiche di Collebrincioni e Paganica.

Nella figura 9 è mostrata la strumentazione all'interno delle casette di Collebrincioni e di Paganica. In particolare sono visibili gli strumenti alloggiati all'interno della cassetta: console del magnetometro METRONIX ADU-07 (console colore arancio) e del magnetometro LEMI 18 (console nera) e il Personal Computer utilizzato per lo scarico dei dati. Le figure 10 e 11 mostrano l'interno delle cisterne in cui sono collocati i sensori magnetici METRONIX e LEMI. Per le due stazioni la disposizione delle cisterne dei sensori è la stessa.

La distanza massima tra le stazioni di misura è inferiore ai 13 km, questa distanza è stata scelta sulla base della struttura di conducibilità elettrica del sottosuolo della zona. La banda di frequenze esplorata deve essere tale da includere tutte le possibili regioni spettrali nelle quali la lunghezza di diffusione [Jackson, 1975] dei segnali ipogei sia comparabile con la distanza tra le stazioni (vedi appendice A).

I tre siti si trovano ai vertici di un triangolo quasi isoscele, che definisce un piano inclinato di circa 3° rispetto al piano orizzontale. Data la configurazione morfologica dei tre siti, i segnali misurati vengono proiettati in uno spazio materializzato dalle posizioni delle tre stazioni di Collebrincioni (CLB), Preturo (PRT) e Paganica (PGN) in (figura 3). Le tre terne delle tre stazioni di misura, vengono ruotate in una terna x,y,z georeferenziata con il piano xy sempre parallelo al piano orizzontale e l'asse x diretto lungo il nord geografico, l'asse y è ortogonale a x ed è diretto verso est e l'asse z è ortogonale al piano orizzontale. In questo modo le variazioni spaziali delle componenti del vettore magnetico nei tre siti di misura permettono di calcolare in modo semplice il gradiente del vettore campo magnetico.



Figura 10. Cisterna contenente i tre sensori del magnetometro search-coil ADU-07 METRONIX, disposti ortogonalmente.

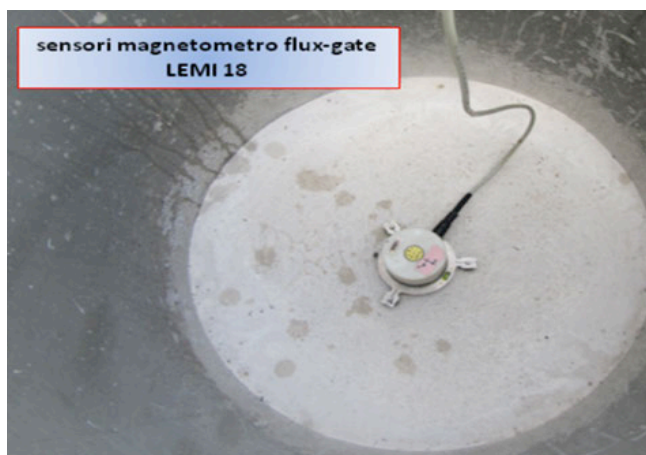


Figura 11. Cisterna contenente il sensore triassiale del magnetometro fluxgate LEMI 18.

4. Analisi dei segnali registrati dalle tre stazioni di misura LEMI (30 nHz – 0.4 Hz)

Per analisi dei segnali nella banda di frequenza 30 nHz – 0.4 Hz sono stati utilizzati i dati delle tre stazioni di misura LEMI che operano con un campionamento di 1 Hz. Il criterio adottato in questa nota per la scelta dei files da analizzare si basa sulla contemporaneità di funzionamento delle tre stazioni e sull'assenza di disturbi e "spikes" nelle registrazioni. Le figure 12, 13 e 14 riportano le tre componenti Bx, By e Bz misurate nelle tre stazioni di CLB, PRT e PGN il giorno 1 novembre 2014. Si nota che le tre funzioni sono praticamente sovrapponibili, sono identiche in ampiezza e sono perfettamente sincrone nei limiti di risoluzione dei grafici naturalmente. Questo è il primo controllo della strumentazione LEMI.

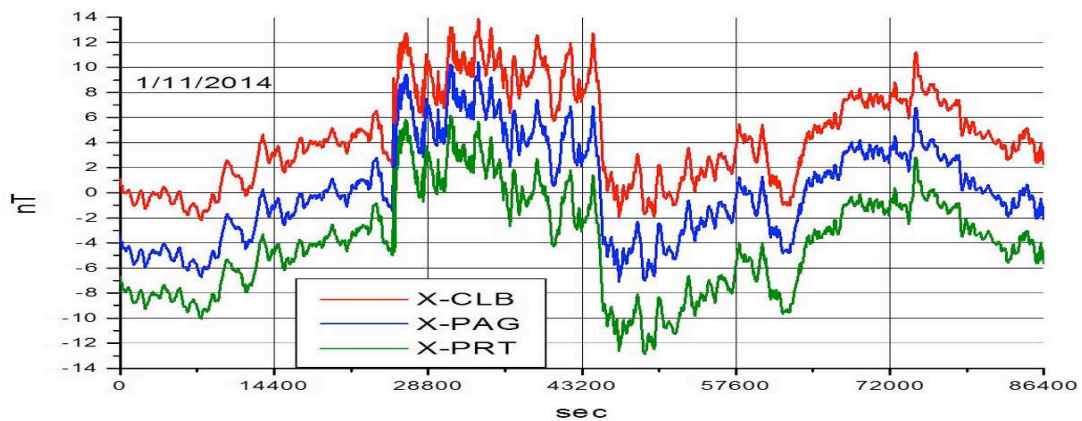


Figura 12. Componente X registrata nelle 3 stazioni di misura.

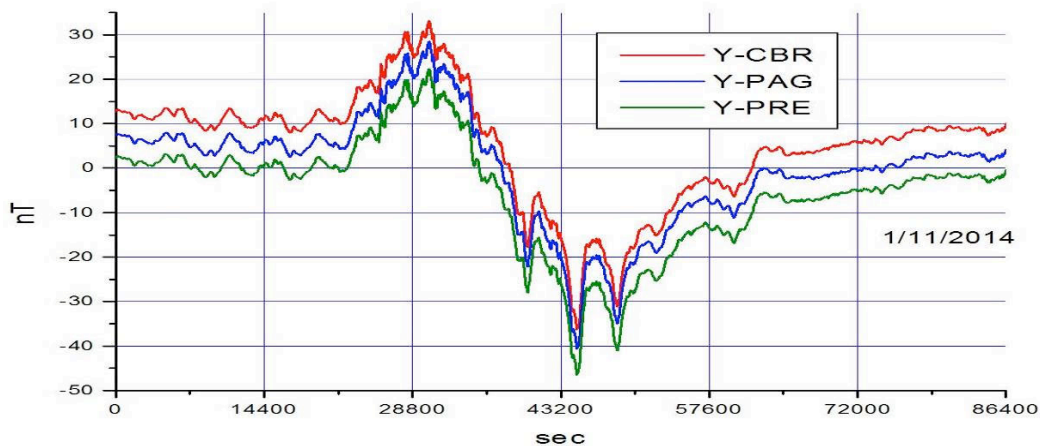


Figura 13. Componente Y registrata nelle 3 stazioni di misura.

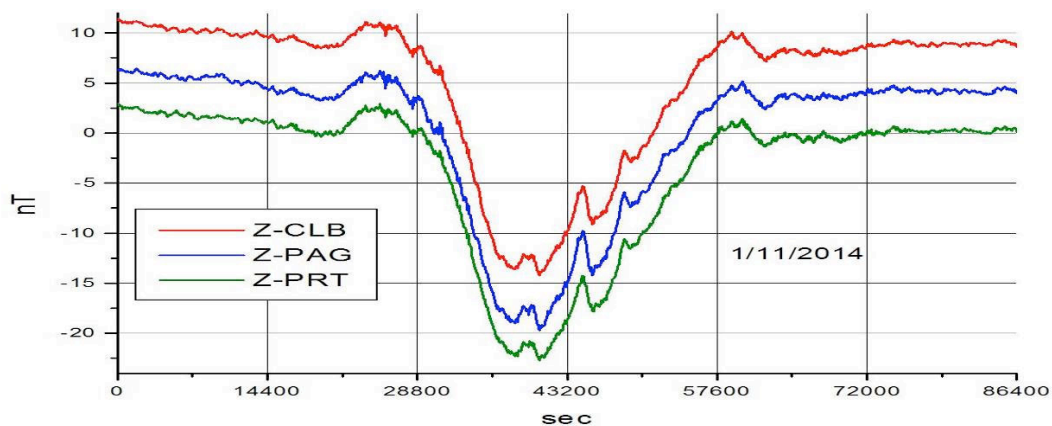


Figura 14. Componente Z registrata nelle 3 stazioni di misura.

4.1 Gradienti magnetici nel dominio della frequenza

Nel dominio del tempo, il rotore del campo magnetico definito come:

$$\nabla \times \mathbf{B} = \begin{pmatrix} \frac{\partial B_z(t)}{\partial y} - \frac{\partial B_y(t)}{\partial z} \\ \frac{\partial B_x(t)}{\partial z} - \frac{\partial B_z(t)}{\partial x} \\ \frac{\partial B_y(t)}{\partial x} - \frac{\partial B_x(t)}{\partial y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{zy}(t) - T_{yz}(t) \\ T_{xz}(t) - T_{zx}(t) \\ T_{yx}(t) - T_{xy}(t) \end{pmatrix}$$

e la sua divergenza:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = \frac{\partial B_x(t)}{\partial x} + \frac{\partial B_y(t)}{\partial y} + \frac{\partial B_z(t)}{\partial z} = T_{xx}(t) + T_{yy}(t) + T_{zz}(t)$$

sono legati, rispettivamente, ai gradienti trasversali e ai gradienti longitudinali del campo magnetico. Da queste grandezze è possibile effettuare un secondo test dei segnali registrati dalla strumentazione LEMI, attraverso il calcolo dei gradienti magnetici longitudinali $T_{xx}(\omega), T_{yy}(\omega), T_{zz}(\omega)$, e trasversali $T_{xy}(\omega), T_{xz}(\omega), T_{yx}(\omega), T_{yz}(\omega), T_{zx}(\omega), T_{zy}(\omega)$ nel dominio della frequenza, al fine di verificare l'effettiva banda di frequenze in cui è possibile effettuare l'analisi tensoriale che è alla base dell'interferometria elettromagnetica a bassa frequenza. Le figure 15 e 16 rappresentano i gradienti della densità spettrale dei segnali calcolati nel riferimento cartesiano dell'interferometro definito dai tre assi. Nei grafici si nota che al di sotto di 0.002 Hz il rumore cresce considerevolmente, pertanto la banda di frequenze in cui il rumore associato agli elementi del tensore intensivo assume valori accettabili, rimane limitata alla banda 0.002 Hz – 0.4 Hz. Ciò potrebbe essere dovuto anche ad una non perfetta orientazione delle tre terne cartesiane materializzate dai sensori vettoriali. Comunque in questa banda il rumore rimane limitato nell'intervallo $\pm 0.1 \text{ nT}^2 / \text{Hz km}$

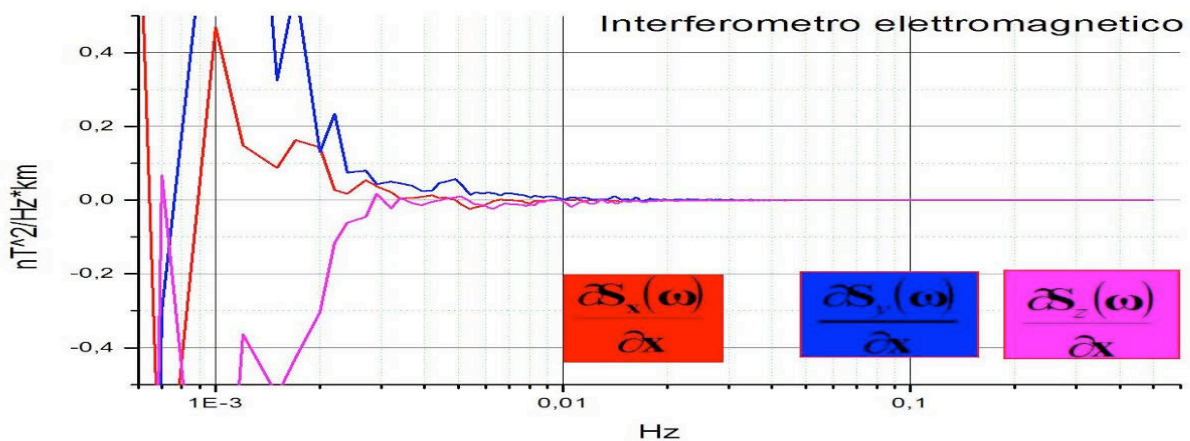


Figura 15. Gradienti delle densità spettrali delle tre componenti B_x, B_y e B_z rispetto all'asse x .

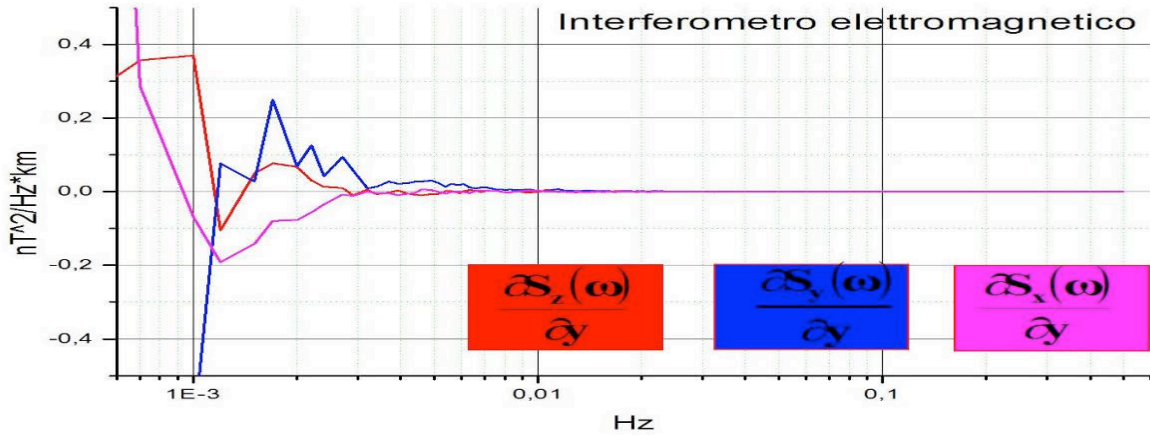


Figura 16. Gradienti delle densità spettrali delle tre componenti Bx, By e Bz rispetto all'asse y.

4.2 Analisi dei gradienti longitudinali e trasversali e del rotore del campo magnetico nel dominio del tempo

Nell'ipotesi di correnti nulle e in assenza di dipoli magnetici nel terreno, il rotore del campo magnetico e la sua divergenza dovrebbero essere nulli. Tuttavia, dato che derivano dai gradienti misurati, le funzioni associate alla divergenza e al rotore vengono contaminate dagli errori di misura. Dalla conoscenza a priori dei vari contributi che concorrono alle indeterminazioni di queste misure possiamo definire il valore atteso picco-picco per tali funzioni nell'area in esame [Bevington and Robinson, 2003]. Le componenti tensoriali illustrate nelle figure 17, 18 e 19 mostrano delle variazioni all'interno di 0.3 nT/km. Dai grafici si possono riconoscere due contributi principali: gli effetti della temperatura sui sensori LEMI di Collebrincioni e di Paganica e gli effetti del non parallelismo tra i tre sistemi di riferimento cartesiani dei sensori [Love, 2009]. Infatti si nota che soprattutto nelle ore di maggiore insolazione i valori crescono e in modo diseguale per le differenti componenti. Naturalmente questi effetti si propagano immediatamente nelle funzioni rappresentative dei due operatori, rotore e divergenza illustrati nelle successive figure 20 e 21, calcolati con gli elementi tensoriali rappresentati nelle figure 17, 18 e 19.

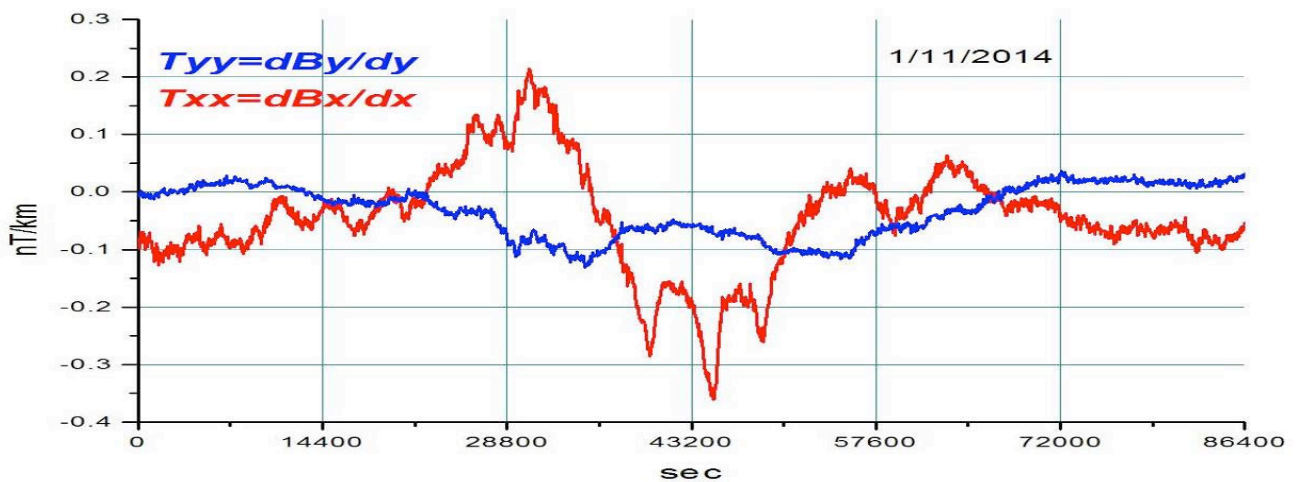


Figura 17. Gradienti longitudinali del campo magnetico orizzontale Bx e By lungo l'asse x e l'asse y rispettivamente.

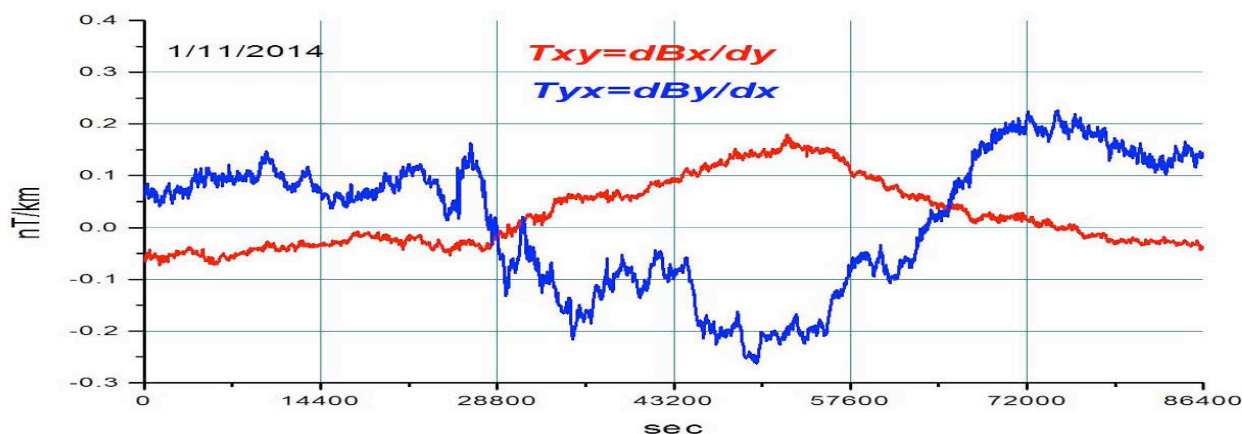


Figura 18. Gradienti trasversali delle componenti orizzontali Bx e By lungo l'asse y e l'asse x rispettivamente.

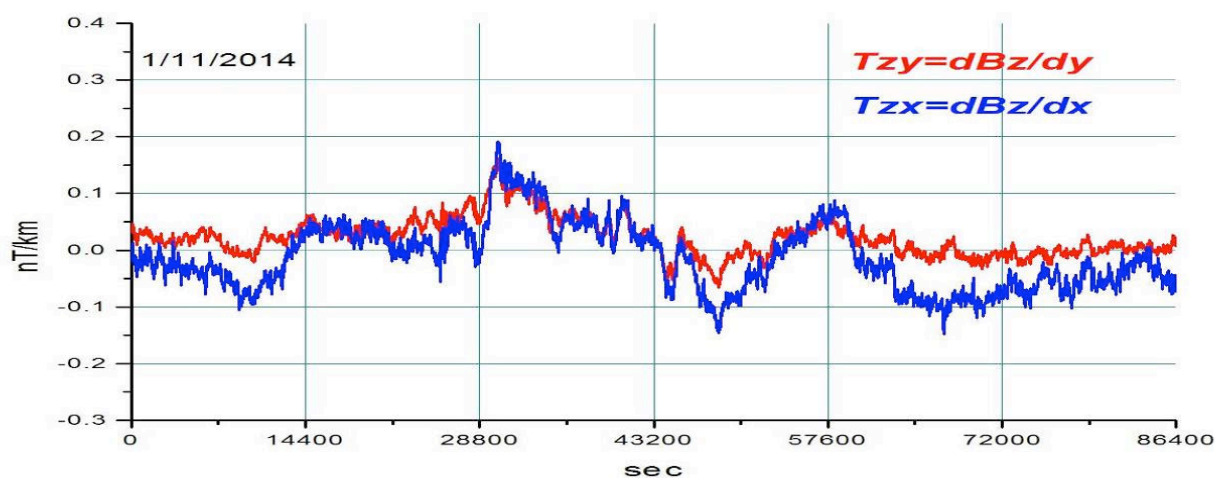


Figura 19. Gradienti trasversali della componente Bz lungo l'asse y e l'asse x.

La figura 20 illustra la componente verticale del rotore nel dominio del tempo, la variabilità di questa funzione nel corso delle 24 ore dovrebbe essere contenuta in ± 0.01 nT/km picco-picco, inoltre dovrebbe essere indipendente dalle variazioni del campo magnetico esterno. La figura 21 rappresenta la funzione divergenza nel dominio del tempo durante 24 ore. Tutti questi contributi non dovrebbero superare 0.02 nT/km picco-picco. Ulteriori sforzi verranno intrapresi per un continuo miglioramento della qualità dei dati acquisiti [Palangio et al., 2012].

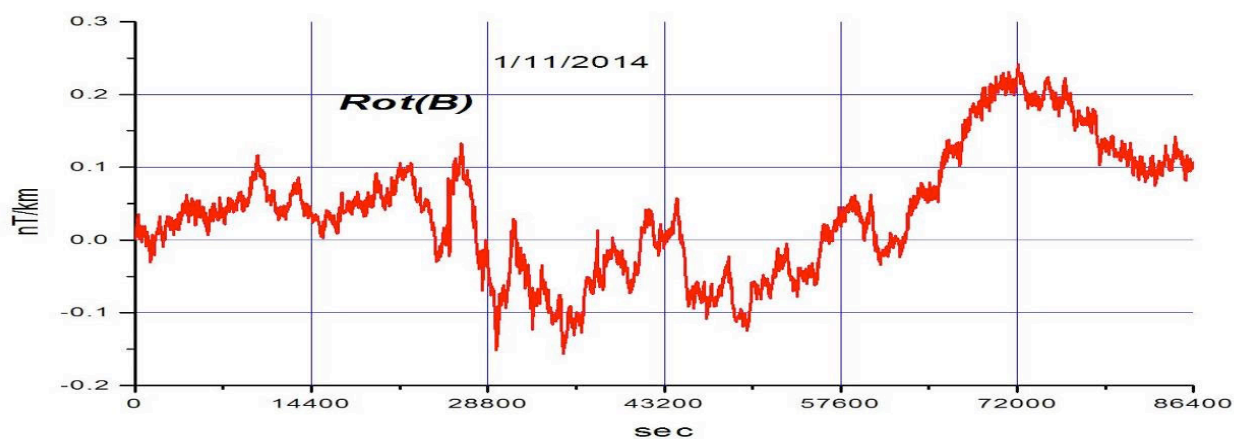


Figura 20. Componente verticale del rotore del campo magnetico.

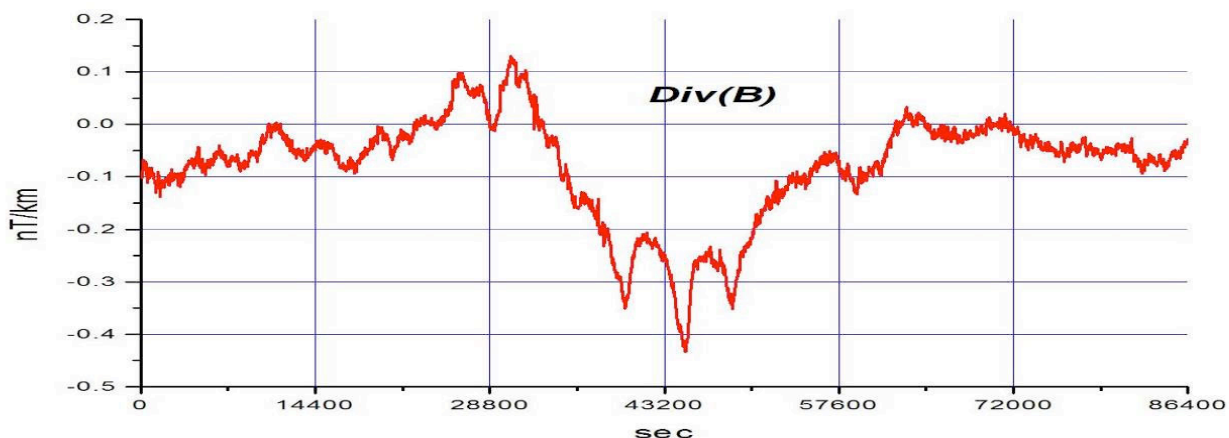


Figura 21. Divergenza del campo magnetico.

5. Analisi dei segnali registrati dalle tre stazioni di misura METRONIX (0.001 Hz – 105 Hz)

Per l'analisi dei segnali a più alta frequenza sono stati utilizzati i dati delle tre stazioni di misura in cui sono attivi i tre magnetometri a induzione METRONIX che operano con un campionamento di 256 Hz. Le tre stazioni sono entrate in funzione in periodi diversi. I primi dati disponibili sono quelli del sito di Collebrincioni e di Preturo, attivi dall'Ottobre 2013 mentre per il sito di Paganica l'acquisizione è iniziata nel mese di Agosto 2014 a causa di ritardi burocratici legati alla cessione del terreno da parte dell'amministrazione comunale. Il criterio adottato in questa nota per la scelta dei files da analizzare si basa sulla contemporaneità di funzionamento delle tre stazioni e sul massimo numero di canali funzionanti. Nei primi periodi di prova della strumentazione erano attivi solo i canali magnetici.

Nella figura 22 è riportato lo spettro del campo elettrico registrato a Collebrincioni il 14 novembre 2013, nel corso di un primo esperimento per testare la strumentazione, quando non erano stati ancora installati i pannelli solari e l'elettronica di contorno. La batteria si trovava nella cisterna C2 (fig. 7) insieme alle due console METRONIX e LEMI. Si distinguono nitidamente le prime 6 armoniche Schumann, si nota immediatamente che il rumore di fondo è estremamente basso. Questo grafico dimostra l'eccezionale qualità della strumentazione impiegata e l'adeguatezza del sito per questo tipo di misura. Le tre stazioni hanno iniziato a funzionare con una certa continuità soltanto nel secondo semestre del 2014. La quantità di dati archiviati fino ad oggi è molto ampia, a parte i periodi di interruzione nel funzionamento della strumentazione.

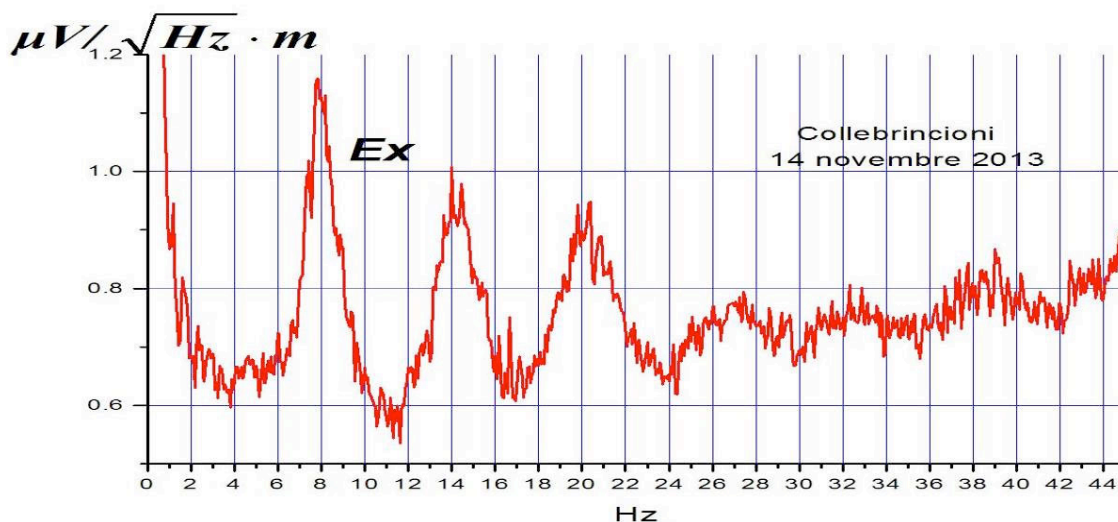


Figura 22. Componente nord-sud del campo elettrico registrato a Collebrincioni.

5.1 Analisi dei segnali registrati a Collebrincioni

Una prima sommaria ed empirica validazione dei dati METRONIX si basa sulla osservazione dei segnali di risonanza Schumann della cavità Terra-ionosfera, in particolare sulle caratteristiche delle prime sei armoniche. Questi segnali possono essere evidenziati utilizzando gli algoritmi di separazione del segnale naturale dal rumore elettromagnetico naturale sempre presente nella stazioni di misura [Palangio et al., 1991; Meloni et al. 2015; Bianchi and Meloni, 2007]. Prendendo come riferimento questi modi di risonanza, l'ampiezza dei segnali associati a questi fenomeni è caratterizzata da una variabilità diurna e stagionale nelle nostre latitudini ben nota, che deriva dalle misure continue effettuate a Duronia nel corso degli ultimi anni. L'ampiezza della prima armonica a circa 7.83 Hz è di qualche pT, mentre la sesta armonica di circa 38 Hz è inferiore a 100 fT. La scelta di valutare i dati prendendo come parametro di riferimento i segnali associati ai modi di risonanza della cavità Terra-ionosfera si basa su due caratteristiche di questa radiazione: i gradienti e la stazionarietà. I gradienti spaziali di questi segnali, per distanze dell'ordine di 10 km, sono praticamente nulli, sicché le tre stazioni dovrebbero misurare esattamente lo stesso segnale salvo piccoli effetti induttivi locali. Inoltre questi segnali godono di un ottimo livello di stazionarietà temporale [Bevington and Robinson, 2003].

La radiazione Schumann è sempre presente, costituisce un continuo sia pure con lievi variazioni di ampiezza e di frequenza in funzione del tempo [Di Lorenzo et al., 2010]. Nelle ore notturne 00, 02, 04 e 06 UT si vedono chiaramente le prime cinque o sei armoniche Schumann sia negli spettri del campo magnetico che negli spettri del campo elettrico (figg. 35-36, 37-38, 39-40, 41-42). Si nota inoltre che il rumore di fondo in queste ore notturne è dell'ordine di 30-40 fT se escludiamo il rumore a 50 Hz e 100 Hz. Mentre per il campo elettrico il rumore è dell'ordine del μVolt per metro se non consideriamo le righe spettrali a 5.8, 11.7, 38, 44, 50, 56, 62, 67, 88, 94, 100, 106, 112 e 117 Hz di palese origine artificiale. Queste righe sono presenti nei segnali del campo elettrico a tutte le ore del giorno e della notte. Alle 08 UT il rumore magnetico cresce di un fattore variabile da 1000 a 100000 volte, in termini di densità spettrale, e si mantiene tale in funzione dell'insolazione fino alle ore 16 UT. Nelle figure 43, 23, 25, 27, e 29 relative alle ore di maggiore insolazione (08, 10, 12, 14 e 16 UT), le scale delle ordinate sono contratte di un fattore che varia da 1000 a 100000. Nelle figure 31 e 33, delle ore 20 e 22 UT il rumore torna ai livelli delle ore notturne. Tutte le figure degli spettri vengono riportate e saranno utili in futuro come riferimento dello stato delle stazioni.

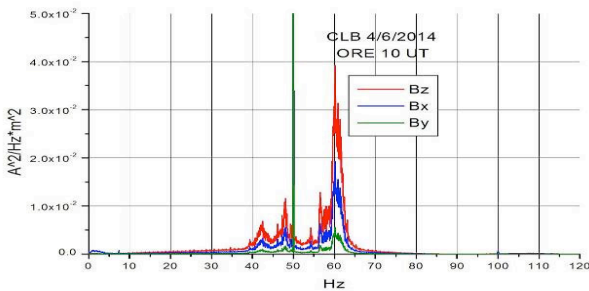


Figura 23. Spettro di Bx, By e Bz di CLB ore 10 UT.

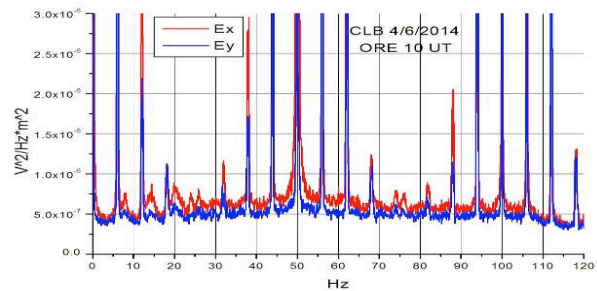


Figura 24. Spettro di Ex e Ey di CLB ore 10 UT.

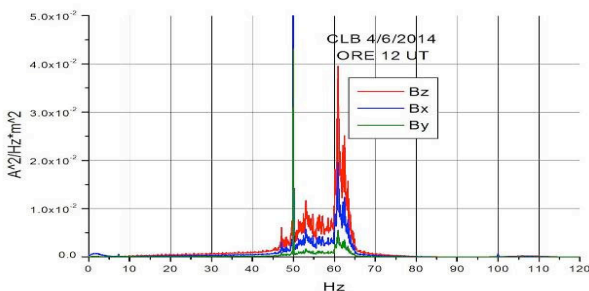


Figura 25. Spettro di Bx, By e Bz di CLB ore 12 UT.

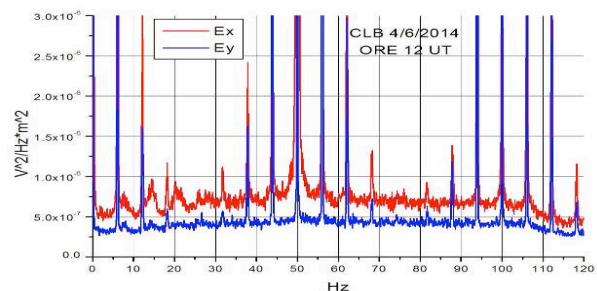


Figura 26. Spettro di Ex e Ey di CLB ore 12 UT.

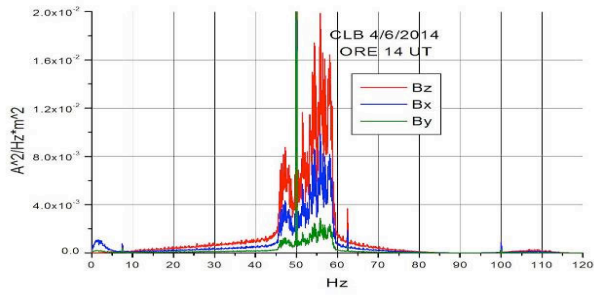


Figura 27. Spettro di Bx, By e Bz di CLB ore 14 UT.

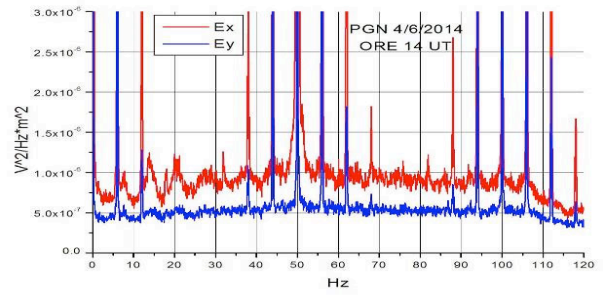


Figura 28. Spettro di Ex e Ey di CLB ore 14 UT.

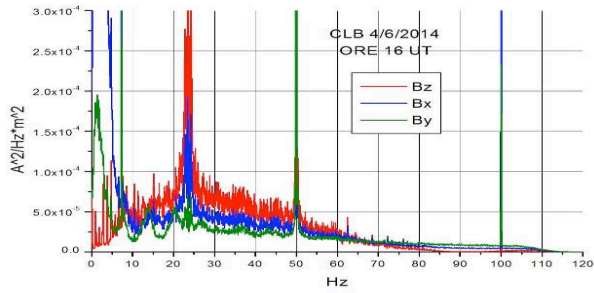


Figura 29. Spettro di Bx, By e Bz di CLB ore 16 UT.

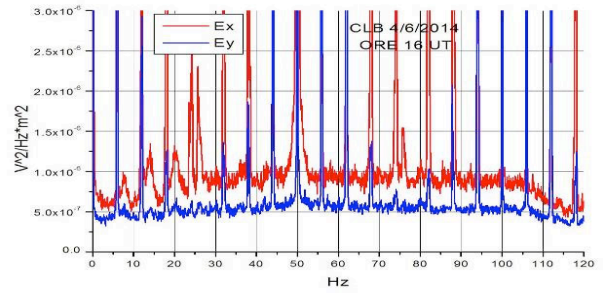


Figura 30. Spettro di Ex e Ey di CLB ore 16 UT.

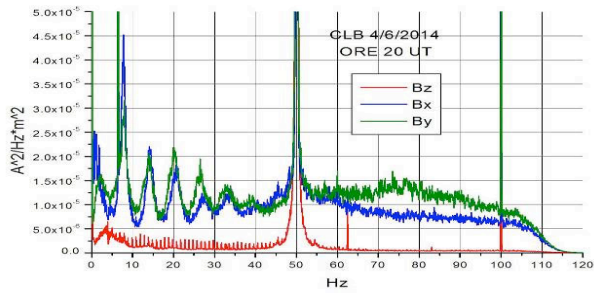


Figura 31. Spettro di Bx, By e Bz di CLB ore 20 UT.

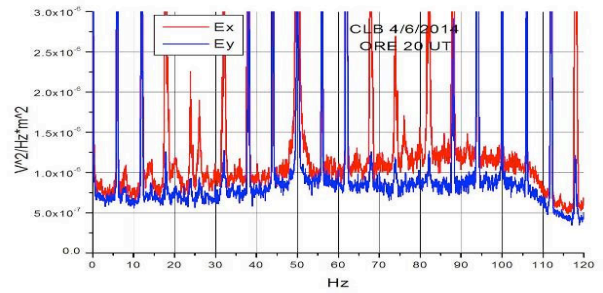


Figura 32. Spettro di Ex e Ey di CLB ore 20 UT.

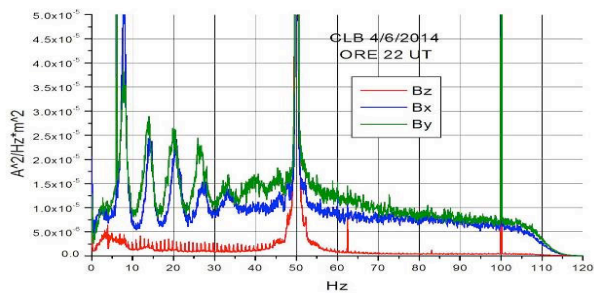


Figura 33. Spettro di Bx, By e Bz di CLB ore 22 UT.

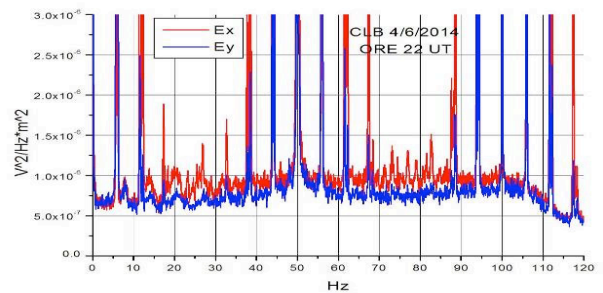


Figura 34. Spettro di Ex e Ey di CLB ore 22 UT.

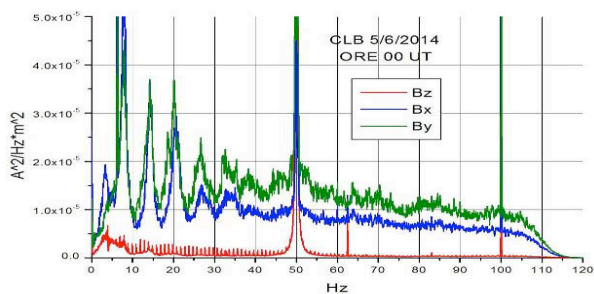


Figura 35. Spettro di Bx, By e Bz di CLB ore 00 UT.

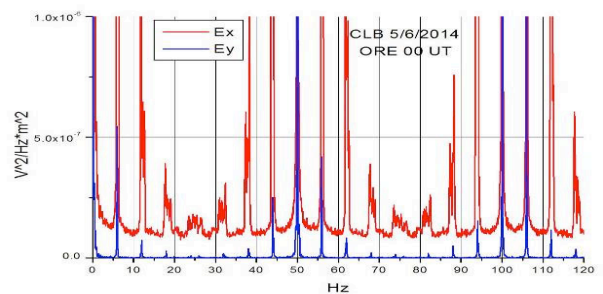


Figura 36. Spettro di Ex e Ey di CLB ore 00 UT.

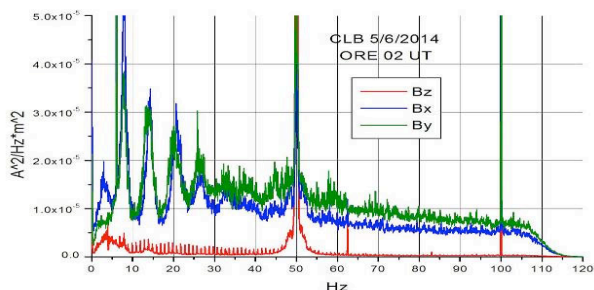


Figura 37. Spettro di Bx, By e Bz di CLB ore 02 UT.

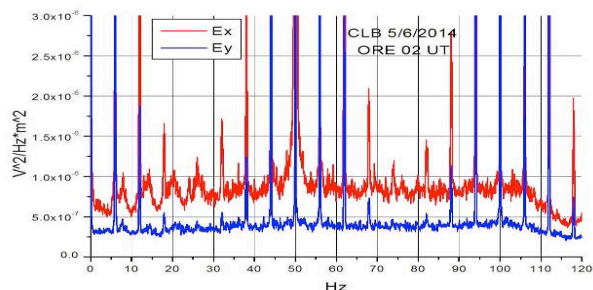


Figura 38. Spettro di Ex e Ey di CLB ore 02 UT.

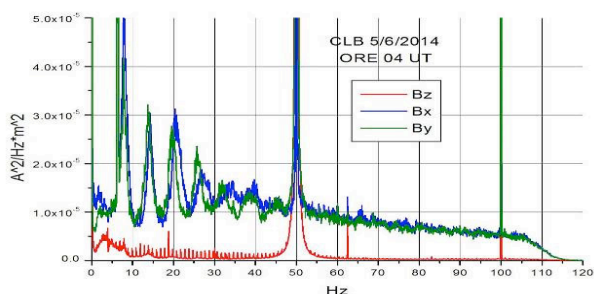


Figura 39. Spettro di Bx, By e Bz di CLB ore 04 UT.

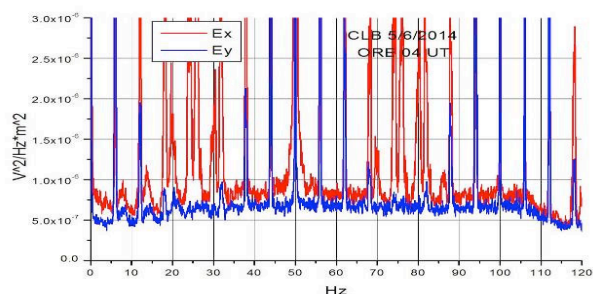


Figura 40. Spettro di Ex e Ey di CLB ore 04 UT.

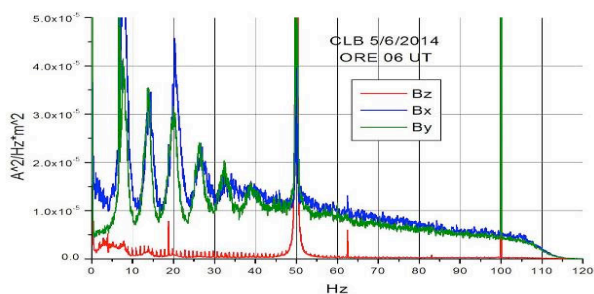


Figura 41. Spettro di Bx, By e Bz di CLB ore 06 UT.

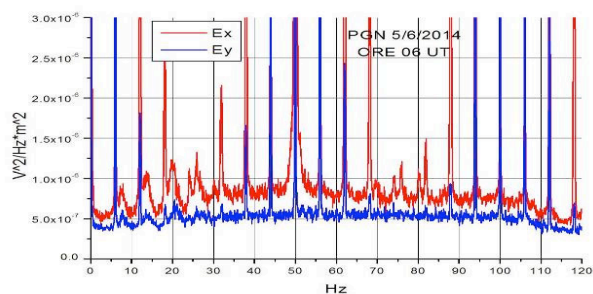


Figura 42. Spettro di Ex e Ey di CLB ore 06 UT.

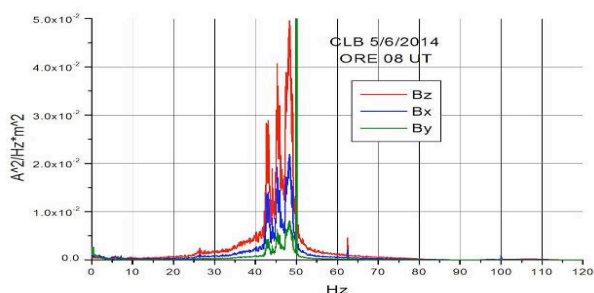


Figura 43. Spettro di Bx, By e Bz di CLB ore 08 UT.

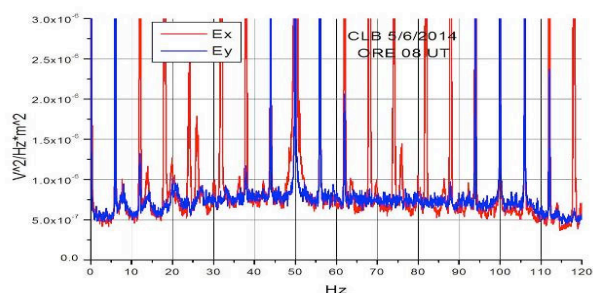


Figura 44. Spettro di Ex e Ey di CLB ore 08 UT.

L'analisi di questi segnali sembra far emergere nettamente che la componente del rumore, presente nei segnali elettrici sotto forma di righe spettrali molto strette, non è accoppiata con il campo magnetico. I due campi sembrano essere totalmente disaccoppiati, da ciò ne segue che la sorgente del rumore elettrico e la sorgente del rumore magnetico debbano essere diverse e si trovino vicine alla stazione di misura, ad una distanza molto più piccola della lunghezza di diffusione dei segnali all'interno della Terra [Jackson, 1975].

5.2 Analisi dei segnali registrati a Paganica

Notiamo innanzitutto che i segnali magnetici di Paganica, illustrati nelle figure 55, 57, 59 e 61, corrispondenti alle ore centrali della giornata (10, 12, 14 e 16 UT), sono molto inquinati dal rumore prodotto

dal regolatore di carica PWM, la scala di queste figure è compressa di un fattore che varia da 1000 a 100000 a seconda delle ore, rispetto agli altri grafici. In assenza di sole, il campo magnetico è inquinato da righe spettrali persistenti a frequenza fissa e ampiezza quasi costante per diverse ore. La componente Ex del campo elettrico, dalle 02 UT in poi, è soltanto rumore mentre sulla componente Ey si notano alcuni segnali naturali. Questi però sono eccessivamente contaminati da segnali artificiali generati dalla strumentazione stessa.

Sul segnale magnetico si nota immediatamente che la larghezza della riga spettrale a 1/100 di altezza, corrispondente ai 50 Hz è inconsuetamente molto più larga sulle componenti Bx e Bz mentre è stretta sulla componente By, al contrario la larghezza della riga a 100 Hz è stretta sulla Bz e larga sulle due componenti By e Bx. La conseguenza di ciò è che la banda incontaminata si restringe considerevolmente.

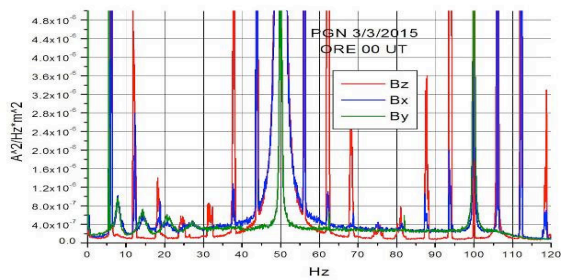


Figura 45. Spettro di Bx, By e Bz di PGN ore 00 UT.

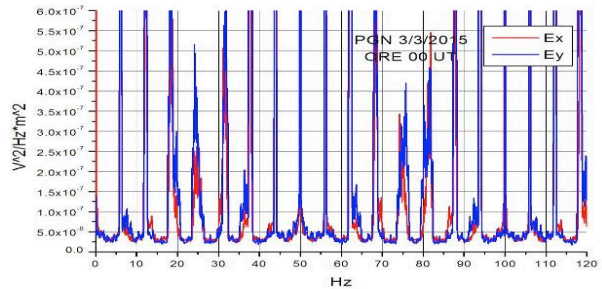


Figura 46. Spettro di Ex e Ey di PGN ore 00 UT.

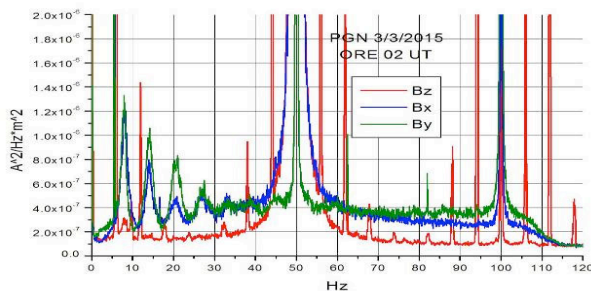


Figura 47. Spettro di Bx, By e Bz di PGN ore 02 UT.

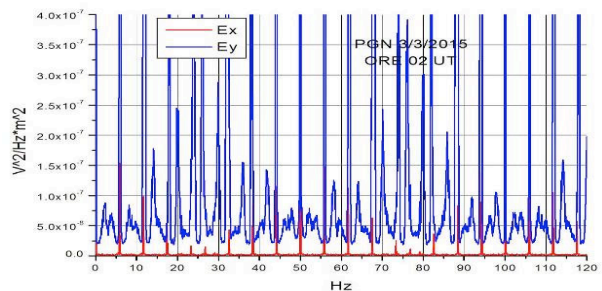


Figura 48. Spettro di Ex e Ey di PGN ore 02 UT.

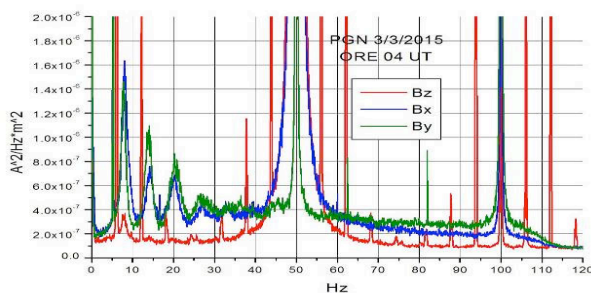


Figura 49. Spettro di Bx, By e Bz di PGN ore 04 UT.

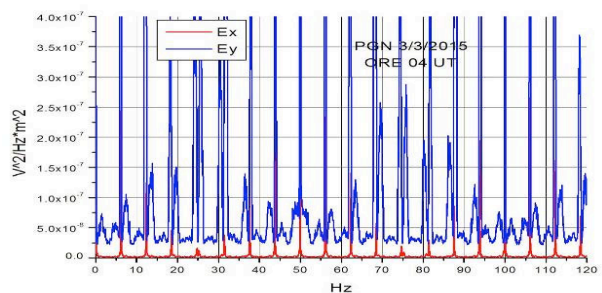


Figura 50. Spettro di Ex e Ey di PGN ore 04 UT.

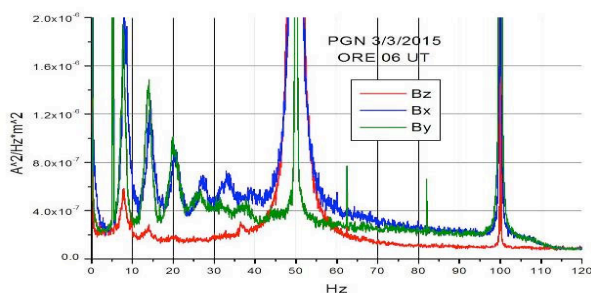


Figura 51. Spettro di Bx, By e Bz di PGN ore 06 UT.

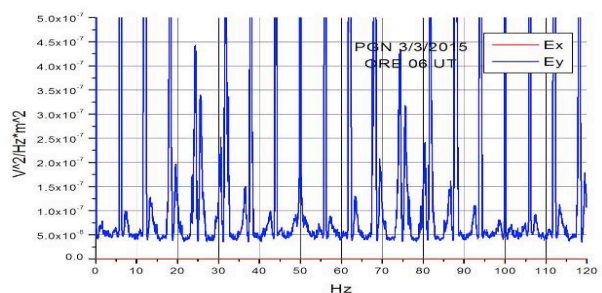


Figura 52. Spettro di Ex e Ey di PGN ore 06 UT.

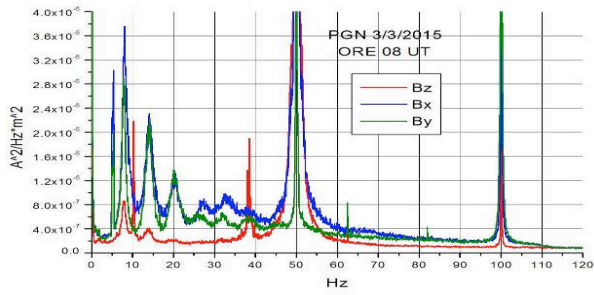


Figura 53. Spettro di Bx, By e Bz di PGN ore 08 UT.

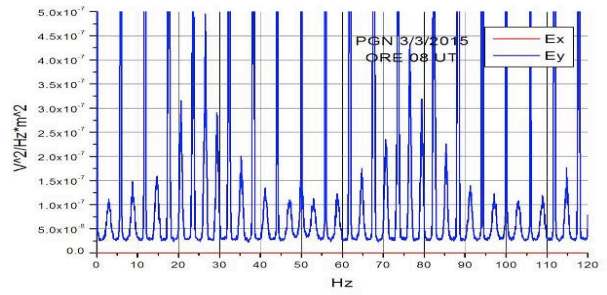


Figura 54. Spettro di Ex e Ey di PGN ore 08 UT.

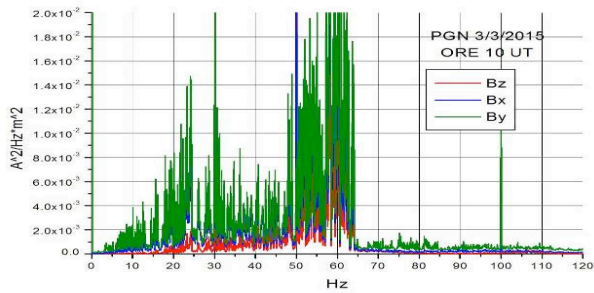


Figura 55. Spettro di Bx, By e Bz di PGN ore 10 UT.

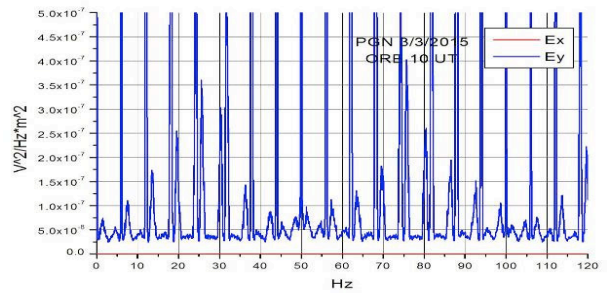


Figura 56. Spettro di Ex e Ey di PGN ore 10 UT.

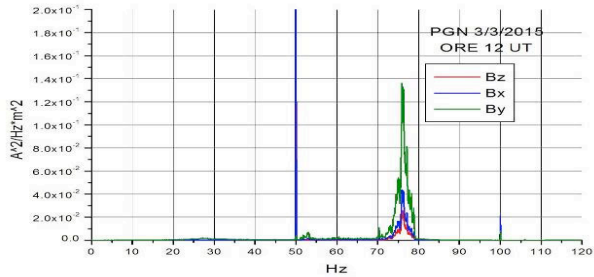


Figura 57. Spettro di Bx, By e Bz di PGN ore 12 UT.

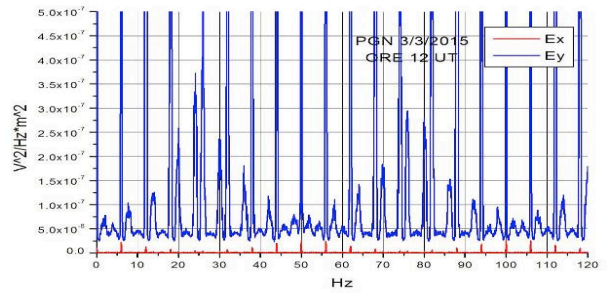


Figura 58. Spettro di Ex e Ey di PGN ore 12 UT.

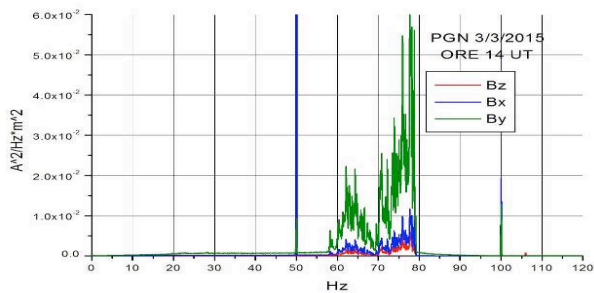


Figura 59. Spettro di Bx, By e Bz di PGN ore 14 UT.

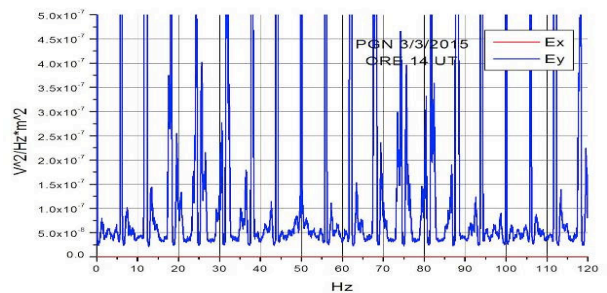


Figura 60. Spettro di Ex e Ey di PGN ore 14 UT.

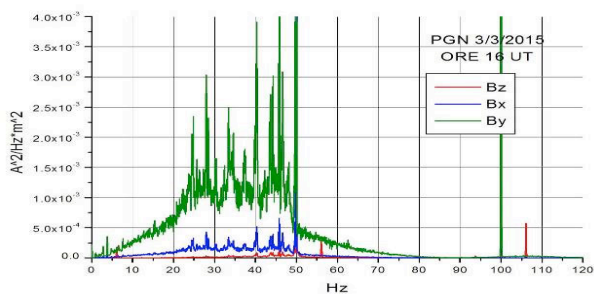


Figura 61. Spettro di Bx, By e Bz di PGN ore 16 UT.

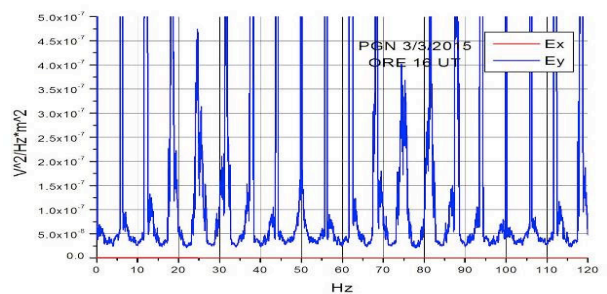


Figura 62. Spettro di Ex e Ey di PGN ore 16 UT.

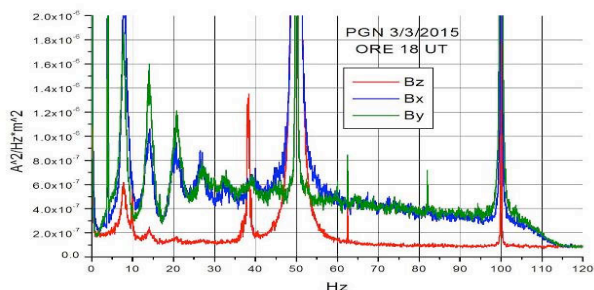


Figura 63. Spettro di Bx, By e Bz di PGN ore 18 UT.

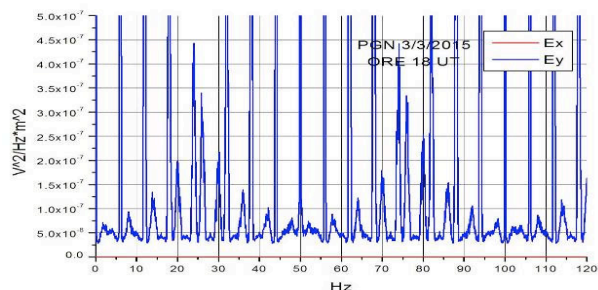


Figura 64. Spettro di Ex e Ey di PGN ore 18 UT.

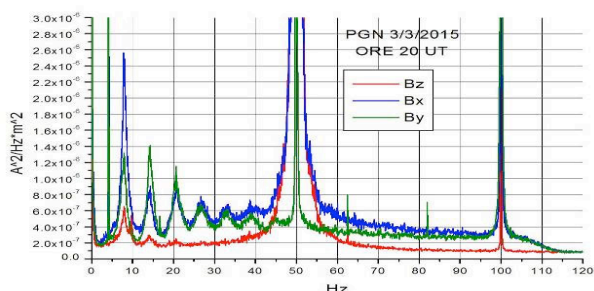


Figura 65. Spettro di Bx, By e Bz di PGN ore 20 UT.

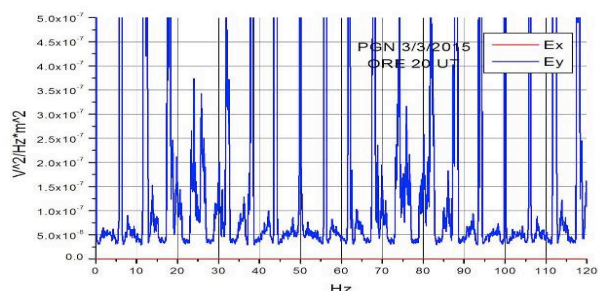


Figura 66. Spettro di Ex e Ey di PGN ore 20 UT.

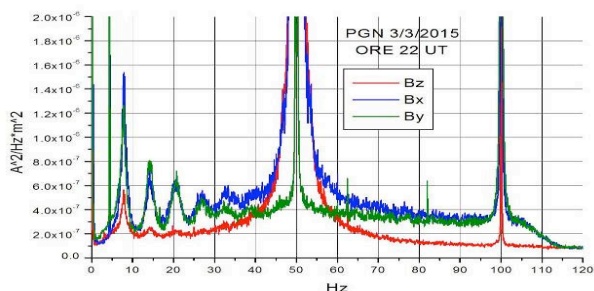


Figura 67. Spettro di Bx, By e Bz di PGN ore 22 UT.

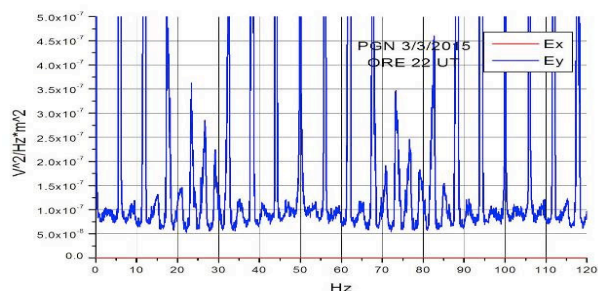


Figura 68. Spettro di Ex e Ey di PGN ore 22 UT.

Da questi grafici si evince che anche a Paganica la componente del rumore presente nei segnali elettrici, sotto forma di righe spettrali molto strette, non è propriamente accoppiata con il campo magnetico. Ciò significa che i due campi, quello elettrico e quello magnetico, sono generati anche in questo caso da sorgenti diverse. Considerata la sensibilità degli strumenti, qualunque sorgente elettromagnetica presente nell'area dell'interferometro, anche a pochi chilometri dalla stazione, si manifesterebbe su entrambi i sistemi di misura, per cui si osserverebbero entrambe le componenti.

5.3 Analisi dei segnali registrati a Preturo

Le successive figure mostrano che i segnali elettrici Ex ed Ey di Preturo sono soltanto rumore bianco, sporadicamente nella componente Ex emergono i segnali di risonanza Schumann (fig. 76). I segnali magnetici sono moderatamente inquinati, naturalmente non è presente l'effetto giorno-notte di Paganica e Collebrincioni, perché a Preturo non sono presenti i pannelli solari per l'alimentazione della strumentazione.

Si nota che le due righe a 50 Hz e 100 Hz a 1/100 di altezza sono molto più larghe di quelle presenti a Collebrincioni e a Paganica. Anche in questo caso si ha una considerevole riduzione della banda utile.

Sarebbe opportuno verificare l'accoppiamento dei sensori elettrici con il suolo mediante misure di impedenza, inoltre andrebbe curato il "grounding" e il "cablaggio" di tutta la strumentazione [Ott, 1988]. I manuali in bibliografia offrono preziosi spunti a cui ispirarsi.

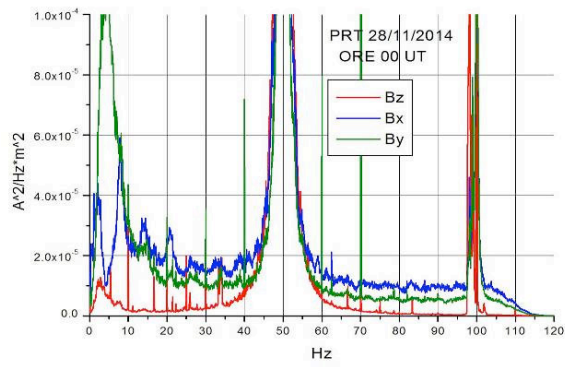


Figura 69. Spettro di Bx, By e Bz di PRT ore 00 UT.

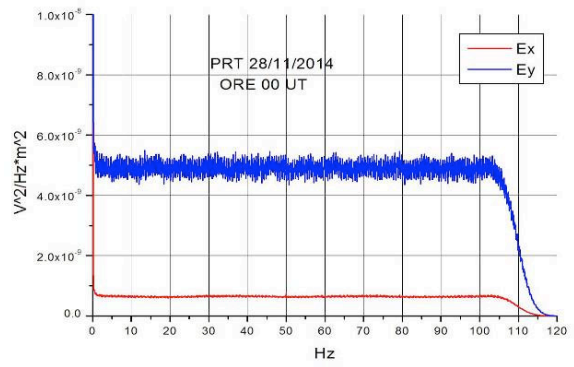


Figura 70. Spettro di Ex e Ey di PRT ore 00 UT.

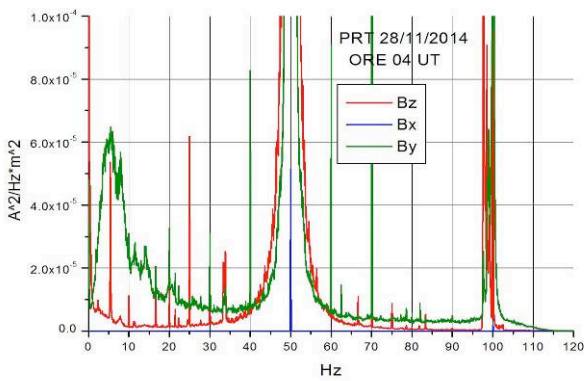


Figura 71. Spettro di Bx, By e Bz di PRT ore 04 UT.

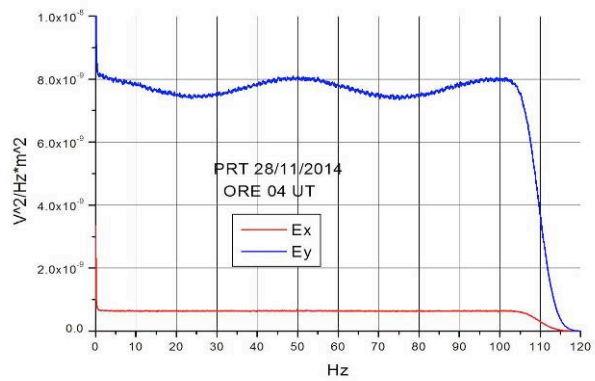


Figura 72. Spettro di Ex e Ey di PRT ore 04 UT.

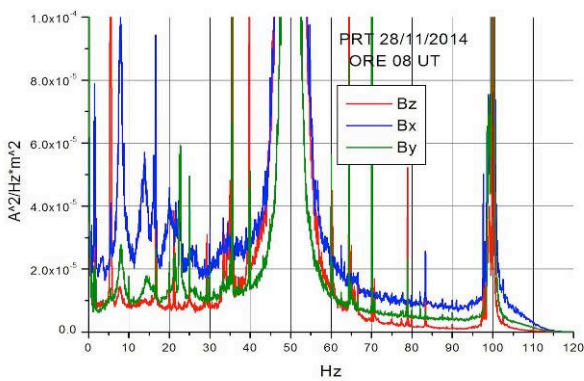


Figura 73. Spettro di Bx, By e Bz di PRT ore 08 UT.

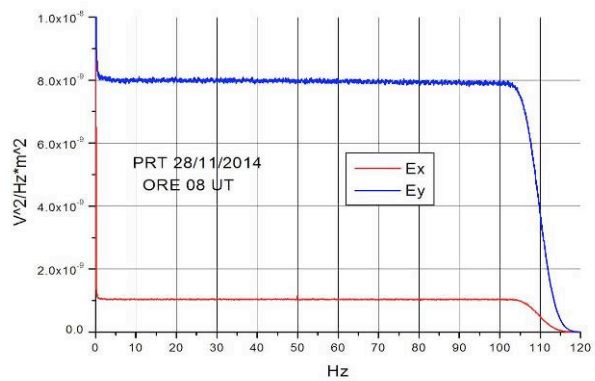


Figura 74. Spettro di Ex e Ey di PRT ore 08 UT.

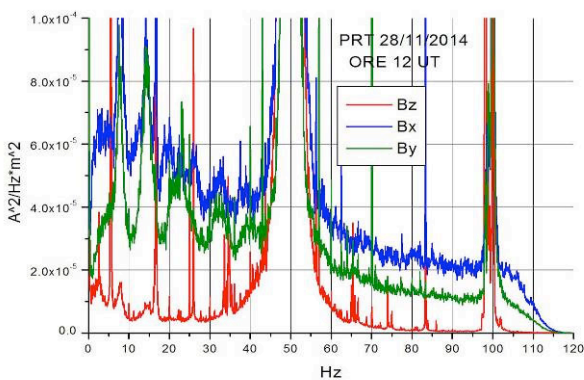


Figura 75. Spettro di Bx, By e Bz di PRT ore 12 UT.

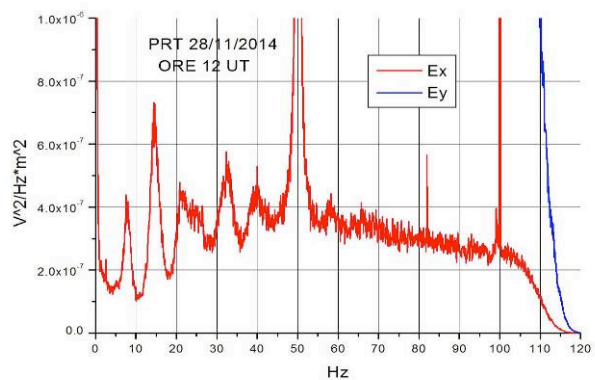


Figura 76. Spettro di Ex e Ey di PRT ore 12 UT.

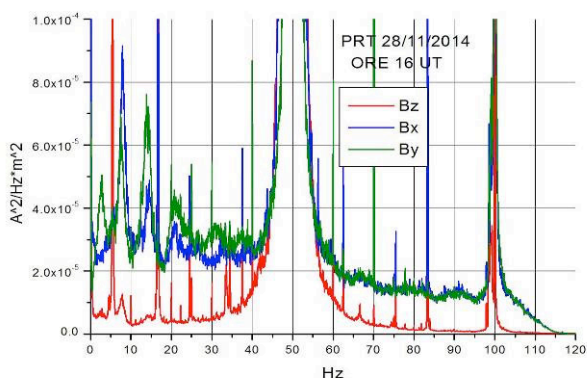


Figura 77. Spettro di Bx, By e Bz di PRT ore 16 UT.

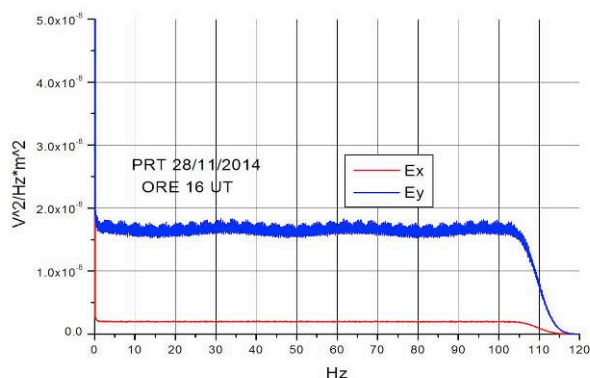


Figura 78. Spettro di Ex e Ey di PRT ore 16 UT.

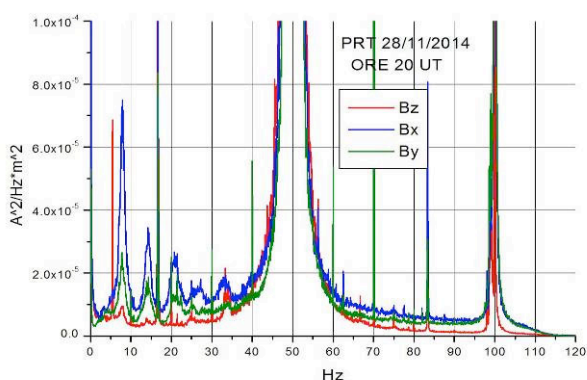


Figura 79. Spettro di Bx, By e Bz di PRT ore 20 UT.

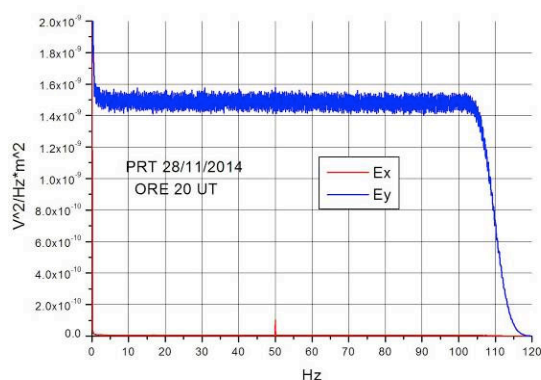


Figura 80. Spettro di Ex e Ey di PRT ore 20 UT.

Come si è detto, a Preturo non è presente l'effetto notte-giorno che si osserva a Collebrincioni e a Paganica, tuttavia è presente un segnale a 6 Hz quasi monocromatico. La riga spettrale a 50 Hz a 1/100 di altezza è insolitamente larga, quasi 14 Hz, dovrebbe essere almeno 10 volte più stretta.

6. Conclusioni

In questa nota viene presentata la nuova infrastruttura di misura dei campi elettromagnetici realizzata nell'ambito del progetto FIRB. La realizzazione di questa infrastruttura di misura ha comportato un notevole sforzo progettuale e realizzativo, legato soprattutto alla cantierizzazione dei lavori e agli aspetti burocratici inerenti i permessi di costruzione e le convenzioni stipulate con gli Enti Locali. Successivamente si è passati all'installazione logistica, nei siti prescelti, della strumentazione elettrica e magnetica del progetto e sono cominciate le prime acquisizioni e analisi dei dati delle stazioni. I dati magnetici dei LEMI, limitatamente alla ristretta banda di frequenze da 0.002 a 0.5Hz, hanno livelli di rumore adeguati agli scopi del progetto, ma occorre ancora migliorare l'orientazione dei loro sensori e garantire la termostatazione dell'elettronica e rimangono da fare piccoli interventi correttivi al fine di rendere la struttura funzionante anche per frequenze superiori ai 0.5 Hz cambiando il settaggio della strumentazione magnetica. La messa a punto della strumentazione METRONIX è leggermente più delicata, in quanto riguarda due aspetti: le interferenze della consolle ADU e07 e i sensori. I risultati sono stati presentati in questo rapporto in modo da fornire un riferimento per le analisi che seguiranno.

In questo progetto è stata impiegata la migliore strumentazione esistente oggi sul mercato mondiale del settore per questi scopi e dai risultati ottenuti si evince che si debbono fare ancora interventi per migliorare la qualità dei dati e spingere al massimo le caratteristiche della strumentazione ai fini dello studio dei segnali geogenici. La struttura realizzata rimane comunque un'opera di grande valenza scientifica e tecnica.

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano tutti gli operatori del progetto FIRB UR4, in particolare i tecnici dell'Osservatorio Geofisico di L'Aquila, Fulvio Biasini, Manuele Di Persio e Cesidio Gizzi, per il supporto logistico nella realizzazione dell'infrastruttura, per l'installazione della strumentazione e per la gestione periodica dello scarico dati.

Bibliografia

- Bevington P.R., Robinson D.K., (2003). *Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences*. McGraw-Hill.
- Bianchi C. and Meloni A., (2007). *Natural and man-made terrestrial electromagnetic noise: an outlook*. Annals of Geophysics, Vol. 50, N. 3, pp. 435-445.
- Di Lorenzo C., Palangio P., De Santis A., Taccetti Q., Dominici G., Meloni A., Lepidi S., Biasini F., Pietrolungo M., (2010). *Segnali di Risonanza Schumann misurati nell'Osservatorio di Duronia*, poster (<http://www.earth-prints.org/bitstream/2122/6486/1/POSTER-REGIONE-M2.pdf>).
- Jackson J.D., (1975). *Classical Electrodynamics*, 2nd ed., John Wiley, New York.
- Kubrusly C.S., (2003). *Hilbert Space Operators: A Problem Solving Approach*, Birkhauser, Boston.
- Love J.J., (2009). *Proceedings of the XIIIth IAGA Workshop on geomagnetic observatory instruments, data acquisition, and processing*, U.S. Geological Survey Open-File Report 2009, 1226, 271 p.
- Meloni A., Bianchi C., Mele G., Palangio P., (2015). *Background electromagnetic noise characterization: the role of external and internal Earth sources*. Annals of Geophysics Vol. 58 N.3 G0330; doi:10.4401/ag-6745.
- Ott H.W., (1988). *Noise reduction techniques in electronic systems*. Second edition, John Wiley and Sons, New York.
- Palangio P., Marchetti M., Di Diego L., (1991). *Rumore elettromagnetico prodotto dalle ferrovie elettrificate. effetti sulle misure magnetotelluriche e geomagnetiche*. Atti del X Convegno Annuale del G.N.G.T.S.
- Palangio P., Di Lorenzo C., Bianchi C., Pietrolungo M., (2012). *Impiego dell'interferometria a larga banda nello studio dei segnali elettromagnetici di origine interna alla Terra nel Progetto FIRB-Abruzzo*. Atti 31° convegno GNGTS, Cosenza 20-22 novembre.
- Power S.C., (1985). *Operators and Functions Theory*. Springer.
- Robinson F.N.H., (1974). *Noise and Fluctuations*. Monographs on Electronic Engineering, Clarendon Press, Oxford.
- Trigg D., (1988). *Specifications of an ideal variometer for magnetic observatory applications*. Proceedings of International Workshop on Magnetic Observatory Instruments, Ottawa, Canada, 73-75.
- Zhu K., (2007). *Operator Theory in Function Spaces*. second edition, American Mathematical Society, Vol. 138.

Appendici

Appendice A: Diffusione del campo magnetico

La realtà fisica dei fenomeni coinvolti nello studio delle sorgenti endogene è complicata dalla presenza di differenti fattori molti dei quali difficili da inglobare in un modello accurato. Per uno studio maggiormente accurato occorre partire dalla legge generalizzata di Ohm combinata con la legge di Ampère (senza il termine della corrente di spostamento per le condizioni quasi stazionarie in cui ci troviamo):

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{B} &= \mu_0 \mathbf{J} \\ \mathbf{J} &= \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})\end{aligned}$$

Utilizzando l'equazione di Maxwell si ottiene:

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{1}{\mu_0 \sigma} (\nabla \times \nabla \times \mathbf{B}) + \nabla \times \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

Introduciamo la diffusività $\eta = 1/\mu_0 \sigma$ ($[\eta] = \text{m}^2/\text{s}$) e considerando che $\nabla \times \nabla \times \mathbf{B} = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{B}) - \nabla^2 \mathbf{B}$, otteniamo:

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \eta [\nabla^2 \mathbf{B} - \nabla(\nabla \cdot \mathbf{B})] + (\nabla \times \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

Essendo \mathbf{B} solenoidale ($\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$) si ottiene

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \eta \nabla^2 \mathbf{B} + (\nabla \times \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

Da cui si ottiene così l'equazione di diffusione del campo magnetico:

$$\eta \nabla^2 \mathbf{B} + (\mathbf{v} \times \nabla \times \mathbf{B}) - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0$$

Questa equazione si risolve ricorrendo alle funzioni di Bessel. Più semplicemente nel caso di un mezzo fermo ($\mathbf{v}=0$) l'equazione si riduce all'equazione della diffusione del calore:

$$\eta \nabla^2 \mathbf{B} - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0$$

Nella soluzione di questa equazione, una configurazione iniziale del campo magnetico decadrà (diffondendosi) con un tempo di decadimento dato da:

$$\tau = \frac{L^2}{\eta} = L^2 \mu_0 \sigma$$

Dove con L possiamo considerare la lunghezza della sorgente del campo magnetico ($L = 0.1 - 10$ km). È da notare che il tempo τ è proporzionale alla conducibilità del terreno. Il segnale magnetico generato con un tempo di decadimento τ , si propagerà come un'onda nel mezzo ad alto assorbimento, le cui variazioni si sposteranno nel terreno con una velocità data dalla velocità di gruppo dell'onda nel mezzo (Appendice B).

Nel caso della zona di L'Aquila la struttura di resistività ρ misurata con tecniche gradiometriche in tre siti vicino all'Aquila è illustrata in figura A1. Si osserva una struttura di resistività con stesse caratteristiche

nei tre siti e con uno strato molto resistivo nell'intervallo 1-3 Km della crosta ed uno strato molto conduttivo nell'intervallo 10-25 Km. Considerando una sorgente estesa del campo situata a una profondità di 50 km, utilizzando un valore medio di resistività di 400 ohm.m si ottiene $\tau \sim 8$ s. Il campo si propaga decadendo in questa struttura in 8 s. Considerando invece una sorgente nei primi 3 km, $\tau \sim 0.01$ s. Questi due segnali sono rilevabili con il campionamento scelto per le stazioni di misura di 256 Hz. Da notare che con la tecnica GDS con un campionamento più alto si potrebbe ottenere una misura più dettagliata della struttura di resistività del terreno, permettendo di evidenziare piccole differenze nella resistività dei tre siti analizzando strutture più superficiali.

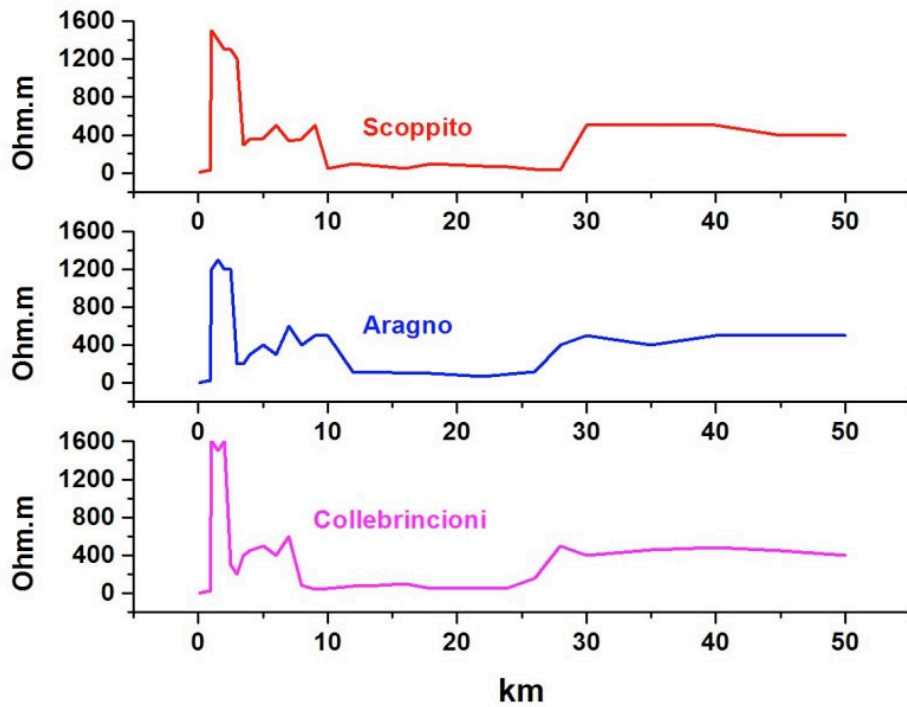


Figura A1. resistività del terreno misurata con tecniche GDS.

Appendice B: Propagazione elettromagnetica in un mezzo conduttivo

Le equazioni di Maxwell per un mezzo lineare, omogeneo e isotropo, non conduttivo e privo di cariche libere, con permittività dielettrica e magnetica rispettivamente ϵ e μ , sono:

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{E} &= 0 & \nabla \times \mathbf{E} &= -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{H} &= 0 & \nabla \times \mathbf{H} &= \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}\end{aligned}$$

combinandole

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\mu \epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}$$

ed applicando l'identità

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E}$$

si ottiene per il campo elettrico l'equazione di un'onda

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0$$

che viaggia nel mezzo con velocità $v = 1/\sqrt{\mu\epsilon}$

la cui soluzione è del tipo $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}_0 e^{j(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})}$

Vettore d'onda e frequenza sono legati dalla relazione di dispersione

$$-k^2 + \mu \epsilon \omega^2 = 0$$

La velocità di fase dell'onda si ottiene considerando che una superficie a fase costante è data da $\omega t - k r = \text{cost}$

$$v_f = \frac{\partial r}{\partial t} = \frac{\omega}{k} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}}$$

Ne risulta che la velocità di fase è una costante che dipende solo dalle proprietà elettromagnetiche del mezzo e non dalla frequenza dell'onda. Tutte le armoniche viaggiano alla stessa velocità, non c'è dispersione nel mezzo.

Nel caso di un mezzo conduttore con conducibilità costante σ , nelle equazioni di Maxwell compare anche il termine di corrente di conduzione

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{E} &= 0 & \nabla \times \mathbf{E} &= -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{H} &= 0 & \nabla \times \mathbf{H} &= \sigma \mathbf{E} + \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \end{aligned}$$

In analogia a quanto fatto prima nel caso di mezzo dielettrico, l'equazione dell'onda diviene

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu \sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0$$

In questo caso la relazione di dispersione diventa complessa, contenendo un termine immaginario in cui compare σ

$$-k^2 - i\mu\sigma\omega + \mu\varepsilon\omega^2 = 0$$

Rispetto al caso della diffusione del campo qui non viene trascurata la corrente di spostamento che potrebbe avere un peso non nullo, anche per le condizioni quasi stazionarie, in particolare nel caso di campi molto energetici e forti.

Introducendo la permittività complessa

$$\varepsilon_c = \varepsilon - i \frac{\sigma}{\omega}$$

formalmente le equazioni d'onda per un dielettrico e per un conduttore diventano uguali.

mezzo dielettrico

mezzo conduttore

$$\nabla^2 \mathbf{E} + \mu\varepsilon\omega^2 \mathbf{E} = 0$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} + \mu\left(\varepsilon - i \frac{\sigma}{\omega}\right)\omega^2 \mathbf{E} = 0$$

Il vettore d'onda è un numero complesso la cui parte immaginaria contribuisce al decadimento dell'ampiezza dell'onda. L'equazione infatti diventa

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}_0 e^{j(\omega t - \mathbf{a} \cdot \mathbf{r})} e^{-\beta \cdot \mathbf{r}}$$

dove α e β sono, rispettivamente, la parte reale e la parte immaginaria del vettore d'onda k .

A questo punto si possono fare varie considerazioni a seconda che il mezzo sia a basse o alte perdite. Nel caso di un mezzo ad alte perdite (alta conducibilità) $\sigma \gg \omega\varepsilon$:

$$\alpha \approx \beta \approx \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} \quad \Rightarrow \quad \mathbf{k} \approx \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} + i\sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}}$$

Il termine $1/e$: $\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}$ rappresenta lo “skin depth”, distanza alla quale l’ampiezza dell’onda si riduce di

Il fronte d’onda a fase costante sarà: $\omega t - \alpha r = \text{cost}$

da cui si ottiene la velocità di fase:

$$v_f = \frac{\partial r}{\partial t} = \frac{\omega}{\alpha} = \frac{\omega}{\sqrt{\mu\sigma\omega/2}} = \sqrt{\frac{2\omega}{\mu\sigma}}$$

A differenza di quanto accadeva nel caso di un mezzo non conduttivo, la velocità di fase dipende dalla frequenza, c’è dunque dispersione delle varie armoniche. In tal caso si definisce la velocità di gruppo che risulta diversa da quella di fase:

$$v_g = \frac{\partial \omega}{\partial \alpha} = \frac{4\alpha}{\mu\sigma} = \frac{4}{\mu\sigma} \cdot \sqrt{\frac{\mu\sigma\omega}{2}} = \sqrt{\frac{8\omega}{\mu\sigma}} = 2\sqrt{\frac{2\omega}{\mu\sigma}} = 2v_f$$

Quanto detto per il campo elettrico vale anche per il campo magnetico. In analogia, partendo dalle equazioni di Maxwell, si ottiene:

dielettrico

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} = 0$$

conduttore

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} = 0$$

Quaderni di Geofisica

ISSN 1590-2595

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/quaderni-di-geofisica/>

I Quaderni di Geofisica coprono tutti i campi disciplinari sviluppati all'interno dell'INGV, dando particolare risalto alla pubblicazione di dati, misure, osservazioni e loro elaborazioni anche preliminari, che per tipologia e dettaglio necessitano di una rapida diffusione nella comunità scientifica nazionale ed internazionale. La pubblicazione on-line fornisce accesso immediato a tutti i possibili utenti. L'Editorial Board multidisciplinare garantisce i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

Rapporti tecnici INGV

ISSN 2039-7941

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/rapporti-tecnici-ingv/>

I Rapporti Tecnici INGV pubblicano contributi, sia in italiano che in inglese, di tipo tecnologico e di rilevante interesse tecnico-scientifico per gli ambiti disciplinari propri dell'INGV. La collana Rapporti Tecnici INGV pubblica esclusivamente on-line per garantire agli autori rapidità di diffusione e agli utenti accesso immediato ai dati pubblicati. L'Editorial Board multidisciplinare garantisce i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

Miscellanea INGV

ISSN 2039-6651

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/miscellanea-ingv/>

La collana Miscellanea INGV nasce con l'intento di favorire la pubblicazione di contributi scientifici riguardanti le attività svolte dall'INGV (sismologia, vulcanologia, geologia, geomagnetismo, geochimica, aeronomia e innovazione tecnologica). In particolare, la collana Miscellanea INGV raccoglie reports di progetti scientifici, proceedings di convegni, manuali, monografie di rilevante interesse, raccolte di articoli ecc..

Coordinamento editoriale e impaginazione

Centro Editoriale Nazionale | INGV

Progetto grafico e redazionale

Daniela Riposati | Laboratorio Grafica e Immagini | INGV

© 2016 INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Via di Vigna Murata, 605

00143 Roma

Tel. +39 06518601 Fax +39 065041181

<http://www.ingv.it>



Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia