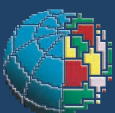


Caratterizzazione del  
rumore magnetico di fondo nel  
nuovo osservatorio di Varese Ligure

# Quaderni di Geofisica

# 109



# Quaderni di Geofisica

## **Direttore**

Enzo Boschi

## **Editorial Board**

Raffaele Azzaro (CT)

Sara Barsotti (PI)

Mario Castellano (NA)

Viviana Castelli (BO)

Rosa Anna Corsaro (CT)

Luigi Cucci (RM1)

Mauro Di Vito (NA)

Marcello Liotta (PA)

Simona Masina (BO)

Mario Mattia (CT)

Nicola Pagliuca (RM1)

Umberto Sciacca (RM1)

Salvatore Stramondo (CNT)

Andrea Tertulliani - Editor in Chief (RM1)

Aldo Winkler (RM2)

Gaetano Zonno (MI)

## **Segreteria di Redazione**

Francesca Di Stefano - coordinatore

Tel. +39 06 51860068

Fax +39 06 36915617

Rossella Celi

Tel. +39 06 51860055

Fax +39 06 36915617

[redazionecen@ingv.it](mailto:redazionecen@ingv.it)

# Caratterizzazione del rumore magnetico di fondo nel nuovo osservatorio di Varese Ligure

## Characterization of magnetic noise in the new Observatory of Varese Ligure

Paolo Palangio, Cosmo Carmisciano, Cinzia Di Lorenzo

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

# Caratterizzazione del rumore magnetico di fondo nel nuovo osservatorio di Varese Ligure

L'accuratezza con cui si può misurare il campo geomagnetico in un determinato punto della superficie terrestre è limitata dal livello di rumore del sito. Il rumore generalmente è determinato dalla sovrapposizione di segnali generati da diverse sorgenti. Il rumore che domina in tutti i sistemi fisici, in particolare nelle regioni spettrali a più bassa frequenza, è il rumore  $Cf^{-\alpha}$  [Vladimirov and Kleimenova, 1962]. Nella fase progettuale di un nuovo osservatorio magnetico è di fondamentale importanza analizzare il rumore di fondo esistente nel sito. Le misure di rumore consentono quindi di valutare lo stato di inquinamento magnetico dell'area e costituiscono lo strumento conoscitivo di base per la nascita di un nuovo osservatorio magnetico. Soltanto dal confronto tra i segnali di origine naturale e il rumore (noise) complessivo è possibile caratterizzare il sito. Lo scopo di questa nota è la separazione del rumore magnetico locale e regionale dai segnali di origine esterna alla Terra. Nel campo vicino (near field) i gradienti del campo sono molto elevati, il contributo di queste sorgenti dipende molto dalla distanza sorgente-osservatore. Il livello di rumore in un determinato punto dipende oltre che dalla intensità e dalla distanza delle sorgenti dal sito di misura anche dalle caratteristiche elettromagnetiche del sito in cui viene effettuata la misura, ovvero dipende dalla struttura di conducibilità elettrica del sottosuolo che determina l'accoppiamento elettromagnetico sorgente-Terra. Da un singolo punto di misura è comunque arduo separare il rumore dal segnale anche nel campo vicino. Tuttavia poiché i due segnali godono di alcune proprietà peculiari che riguardano le condizioni al contorno dei campi sulla superficie terrestre è possibile sfruttare queste peculiarità per separare il segnale dal rumore. Nel campo vicino i segnali di origine naturale sono sempre indivergenti e irrotazionali mentre i campi artificiali sono quasi sempre rotazionali e divergenti. Nel campo lontano (far field) invece entrambi i campi sono irrotazionali e indivergenti. Un altro aspetto riguarda le proprietà spettrali del segnale e del rumore: sia il segnale che il rumore hanno un andamento del tipo  $Cf^{-\alpha}$  dove  $C$  è una costante di proporzionalità,  $f$  è la frequenza ed il coefficiente  $\alpha$  è diverso per i due tipi di segnali [Vladimirov and Kleimenova, 1962]. In geomagnetismo le bande di interesse ai fini della valutazione del rumore sono due: la prima occupa il segmento spettrale che si estende dal  $\mu$  Hz al mHz, la seconda banda 1  $\mu$  Hz - 1 mHz e la terza è quella che coincide con la banda delle pulsazioni magnetiche [Jacobs, 1970], [Troitskaya, 1964] di origine magnetosferica e ionosferica (1 mHz - 1 Hz). In questa nota viene effettuata l'analisi della componente stazionaria del rumore soltanto nella terza banda di frequenze.

The accuracy of geomagnetic field measurement at a given point on the Earth's surface is limited by the ambient magnetic noise level which is usually determined by the superposition of signals generated from different sources. The noise that dominates in all physical systems, particularly in spectral regions at lowest frequencies is the flicker noise [Vladimirov and Kleimenova 1962]. The analysis of the background noise that exists on the site is essential to design a new magnetic Observatory. Noise measurements allow then to evaluate the magnetic pollution status of the area and constitute a basic cognitive tool for the building of a new magnetic Observatory. Only by comparing signals of natural origin and the noise is possible to characterize the site. The purpose of this note is the separation of local and regional magnetic noise from signals of external origin. In the near field zone gradients are very high, the contribution of these sources depends much on the source-observer distance. The noise level at a given point is determined not only by the intensity and the distance from sources but also on the electromagnetic characteristics of the site where the measurement is performed, i.e. on the electrical conductivity structure of the subsoil, which determines the electromagnetic Earth-source coupling. From a single measurement point it is difficult to separate the signal from the noise even in the near field zone. However since the two signals have some peculiar properties which affect the field boundary conditions on the Earth's surface you can take advantage of these features to separate them. In the near field, magnetic natural signals coming from magnetosphere and ionosphere are always curl-free and divergence-free while artificial signals are almost always divergent and curled. In the far field instead both signals are curl-free and divergence-free. Another aspect concerns the spectral properties of signal and noise that both have a trend  $Cf^{-\alpha}$  where  $C$  is a constant of proportionality,  $f$  is the frequency and the coefficient is different for the two types of signals [Vladimirov and Kleimenova, 1962]. In geomagnetism there are three frequency bands of interest useful to evaluate the noise: the first is the spectral range that extends from nHz to  $\mu$  Hz, the second is that from  $\mu$  Hz to mHz and the third band is the one that coincides with the range of magnetic pulsations [Jacobs, 1970], [Troitskaya, 1964] originated from magnetospheric and ionospheric sources (1mHz-1Hz). In this note an analysis of stationary noise component only in the third band of frequencies has been made.



## Introduzione

“The noise is the signal” (R. Landauer)

Il rumore è un segnale che noi non desideriamo che ci sia, la distinzione tra rumore e segnale è quindi assai delicata perché spesso sono funzioni con caratteristiche molto simili [Kalouptsidis, 1997], e la separazione dei due contributi è un'operazione molto complessa soprattutto quando i due segnali occupano la stessa banda di frequenze. In generale il rumore è una fluttuazione casuale del campo magnetico, è un segnale il cui andamento nel tempo non è esprimibile analiticamente, ma soltanto in termini statistici perché il rumore generalmente è prodotto della sovrapposizione di  $n$  sorgenti indipendenti e scorrelate tra di loro il cui spettro complessivo costituisce un continuo che si estende in regioni spettrali più o meno vaste. Questo spettro si compone di vari contributi ciascuno caratterizzato da una diversa dipendenza dalla frequenza. La nomenclatura corrente distingue questi contributi in due classi: il rumore bianco e il rumore colorato. Quello bianco è indipendente dalla frequenza mentre quello colorato si suddivide a sua volta in sottoclassi cromatiche: “red noise”, “pink noise”, “brown noise”, ecc. a seconda della dipendenza funzionale dalla frequenza. La

caratterizzazione del rumore richiede inoltre che all'interno della finestra temporale di analisi i segnali conservino un certo grado di stazionarietà rispetto ad un determinato parametro statistico. Altra cosa sono i disturbi magnetici che non godono delle proprietà dette in quanto sono caratterizzati da un elevato livello di non-stazionarietà e di impulsività, quest'ultima definita come il rapporto tra la varianza e la media opportunamente normalizzate. Il segnale invece viene generato da una o due sorgenti indipendenti, comunque da poche sorgenti. Talvolta però anche il rumore viene generato da una o due sorgenti, e in questo caso il rumore assume caratteristiche simili a quelle del segnale, in particolare nel campo lontano. Ogni segnale magnetico, generato in prossimità della superficie terrestre, si accoppia elettromagneticamente con la Terra a causa della conducibilità elettrica del nostro pianeta. Quando l'osservatore si trova nella zona di “Fraunhofer” rispetto alla sorgente del rumore, il rumore è difficilmente distinguibile dal segnale perché entrambi manifestano le peculiarità derivanti dall'interazione del rumore con la Terra (*far field noise*). Soltanto quando la sorgente di rumore si trova, rispetto all'osservatore, all'interno di un'area il cui raggio è pari alla distanza di diffusione allora il rumore misurato conserva le proprietà fisiche della sorgente (*near field noise*), come ad esempio la fase, e le 3 componenti del campo magnetico risultano essere in fase ( $\pm \pi$ ) tra di loro.

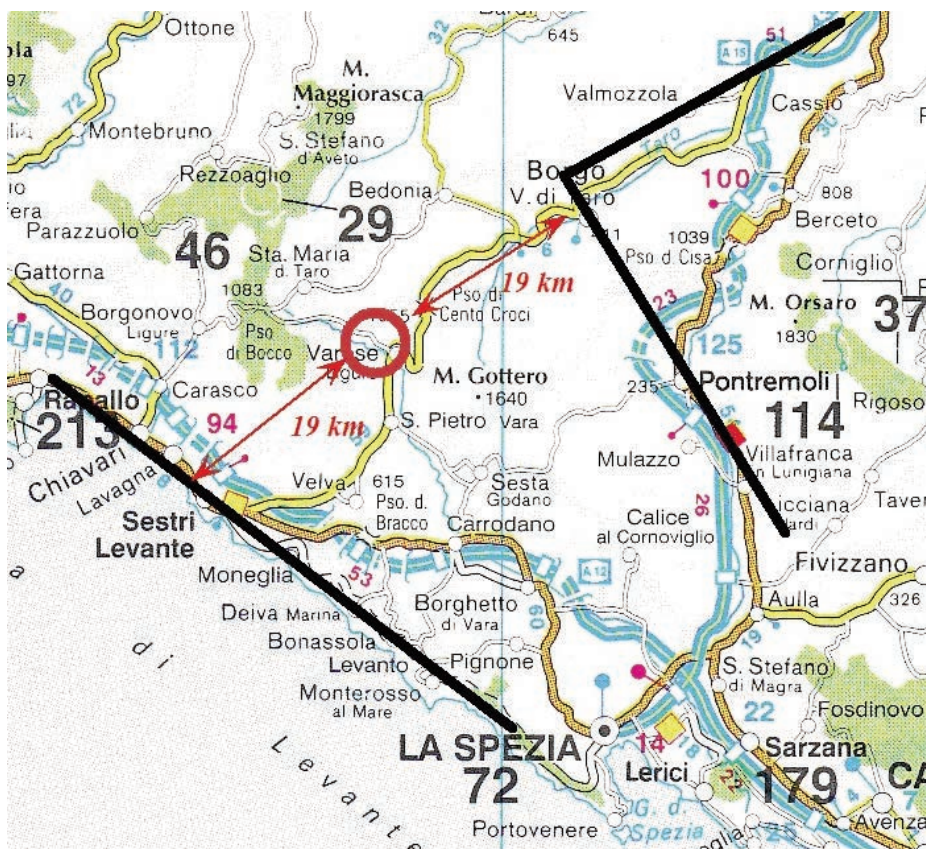


Figura 1 Ferrovie elettrificate in corrente continua nella zona di Varese Ligure: Parma – La Spezia e Genova – La Spezia.

Figure 1 DC electrified railways in the area of Varese Ligure: Parma – La Spezia and Genova – La Spezia.

## 1. Il rumore elettromagnetico

Nella banda geomagnetica denominata “f band” (*flicker*) che si estende da 0.001 Hz fino a 1 Hz operano diverse sorgenti di rumore e la più intensa è costituita dalle ferrovie elettrificate in corrente continua [Palangio et al., 1991]. La sorgente di rumore più pervasiva è data dall'insieme delle correnti elettriche che fluiscono nel sottosuolo e che vengono canalizzate dagli strati più conduttivi del terreno che in genere coincidono proprio con gli strati più superficiali e quindi più vicini ai sistemi di misura.

Questo sistema di correnti di dispersione viene alimentato soprattutto dagli impianti ferroviari, da quelli di distribu-

zione dell'energia elettrica e dagli impianti industriali in genere. L'interazione tra le infrastrutture e la Terra è di due tipi: galvanico e indotto. Il primo tipo di interazione riguarda prevalentemente le ferrovie elettrificate ed è il tipo di accoppiamento più pernicioso in quanto è il più efficiente sistema di trasferimento di correnti dalla infrastruttura alla Terra. Mentre la rete nazionale di distribuzione dell'energia elettrica è accoppiata induttivamente con il terreno, le correnti indotte non sono confinate soltanto lungo il percorso dei cavi di distribuzione, poichè le correnti fluiscono anche a distanza privilegiando i percorsi a bassa resistività. Tutti gli altri sistemi infrastrutturali e industriali disperdono correnti nel terreno sia induttivamente che galvanicamente. Al fine della caratterizzazione del sito, occorre individuare le sorgenti principali di rumore esistenti nell'area dell'osservatorio (traffico su strade di scorrimento primarie, linee ferroviarie, insediamenti produttivi, ecc.). Le principali sorgenti di rumore che interessano l'area di Varese Ligure sono due linee ferroviarie alimentate in corrente continua. La prima linea ferroviaria è l'arteria Genova-La Spezia, l'altra linea è quella che interessa il circuito Parma-Borgo-Pontremoli-La Spezia. Queste due linee, in prossimità di Varese Ligure sono approssimativamente parallele per un certo tratto e la zona dell'osservatorio si trova al centro dei due tracciati (fig. 1). Benché queste due linee distino circa 19 km dall'osservatorio, il loro effetto è misurabile.

Il complesso sistema di correnti attivato dal circuito ferroviario porta ad un accoppiamento elettromagnetico dei due sistemi fisici: infrastruttura tecnologica - Terra.

L'accoppiamento galvanico infrastruttura-Terra genera una distribuzione di correnti la cui configurazione dipende dalla struttura di conducibilità elettrica dell'interno della terra nell'area coperta dal tracciato ferroviario e dell'area di misura (fig. 2). Possiamo schematizzare le diverse componenti di questo accoppiamento in base alla diversa legge di attenuazione del campo magnetico con la distanza. Le correnti assumono essenzialmente 5 configurazioni:

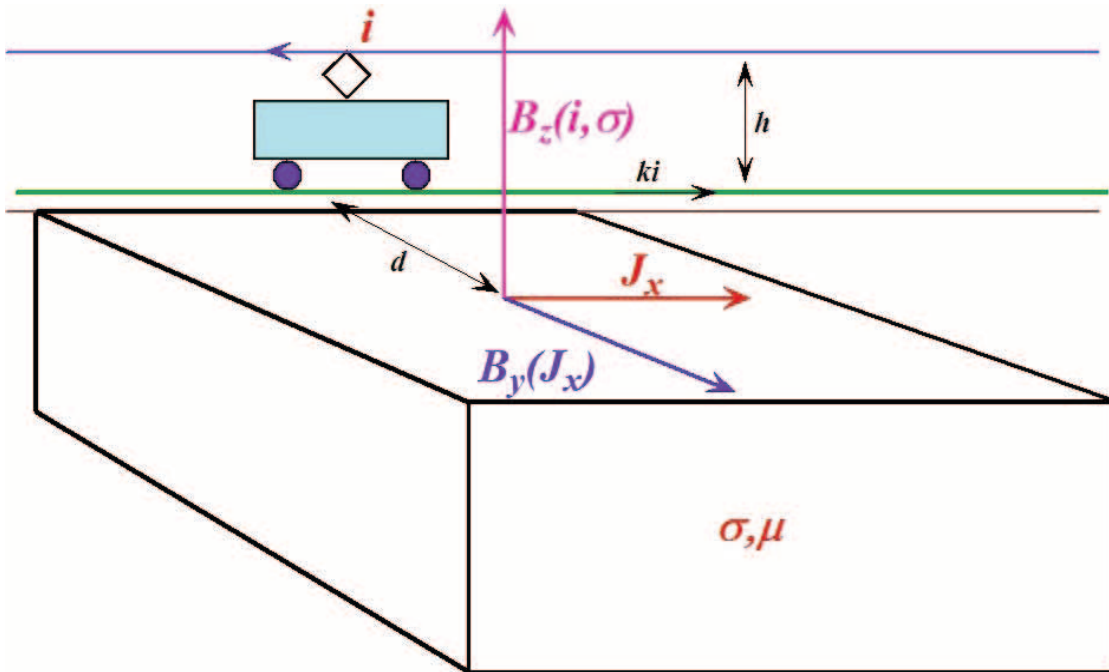
Strato di corrente quasi infinito	$B = \text{costante}$
Corrente filare	$B \propto \frac{1}{r}$
Corrente elementare	$B \propto \frac{1}{r^2}$
Corrente toroidale	$B \propto \frac{1}{r^3}$
Sistema complesso di correnti	$B \propto \frac{1}{r^n} \quad (n > 3)$

La prima configurazione di correnti è assimilabile ad uno strato di corrente orizzontale infinito, la seconda è un filo rettilineo infinito, la terza è assimilabile ad una corrente elementare ovvero un segmento di filo e la quarta ha una configurazione toroidale. Questo complesso sistema di correnti

genera campi magnetici che si attenuano con la distanza in maniera diversa, lo strato di corrente genera un campo che è indipendente dalla distanza dallo strato di corrente, il campo magnetico dipende soltanto dalla densità di corrente. La corrente in un filo di lunghezza infinita genera un campo che si attenua linearmente con la distanza. Le correnti elementari, ovvero filo rettilineo di lunghezza finita, generano campi che si attenuano approssimativamente con il quadrato della distanza mentre le correnti toroidali-planari generano un dipolo magnetico il cui campo si attenua con il cubo della distanza. In un conduttore 3D con distribuzione anisotropa della conducibilità elettrica, quale è l'interno della Terra, la morfologia spaziale delle correnti elettriche può assumere configurazioni complesse che generano campi magnetici multipolari. Poi ci sono altri effetti minori come l'accoppiamento induttivo delle correnti modulate dall'assorbimento variabile dei locomotori, i campi elettromagnetici generati dal treno che corre all'interno del campo magnetico da esso stesso creato. In questo caso l'effetto di trascinarsi del campo prodotto dal treno è praticamente trascurabile, il treno si muove sempre ortogonalmente al campo magnetico il quale viene trascinato debolmente dal treno in corsa, pertanto i vagoni del treno tagliano sempre le linee di forza del campo. Infine c'è anche il campo elettromagnetico generato dal contatto strisciante del pantografo sul filo aereo della ferrovia. Lo spettro di emissione delle ferrovie elettrificate in continua, considerando soltanto gli effetti dell'accoppiamento galvanico delle rotaie con la terra, si estende da qualche mHz a qualche Hz. Se invece si considerano tutti gli altri effetti, la banda di emissione si amplia enormemente includendo anche le radioonde.

## 2. Modello della sorgente di rumore

Poiché ciò che si misura è la sovrapposizione di segnali di origine naturale e di segnali di origine antropica, al fine di valutare la corretta interpretazione delle procedure di separazione del segnale dal rumore e quindi la corretta valutazione dei livelli di rumore, dovremmo utilizzare opportuni modelli di calcolo previsionale. I modelli matematici consentono di prevedere il livello di rumore in un dato punto, in funzione del numero delle sorgenti, delle caratteristiche delle sorgenti, della posizione relativa fra il punto di stima ed ogni singola sorgente e delle caratteristiche del sottosuolo. Il livello di rumore prodotto da più sorgenti in un punto di stima può essere scomposto nei singoli contributi di ogni sorgente. Questi modelli deterministici consentono di stimare in un dato sito il livello di rumore in funzione di parametri che non sempre sono noti. Ad esempio per valutare il rumore prodotto dalla ferrovia è di fondamentale importanza conoscere la struttura di conducibilità elettrica 3D di tutta la zona che interessa il circuito ferroviario e la zona dell'osservatorio.



**Figura 2** Schema semplificato del sistema di correnti elettriche principali attivate dal circuito ferroviario alimentato in corrente continua.

**Figure 2** A simplified diagram of the main electric currents system activated by a rail circuit DC powered.

Occorrono inoltre altri input che riguardano la corrente di alimentazione della linea in funzione del tempo, la morfologia della linea e lo schema di distribuzione delle correnti lungo il tracciato ferroviario. Il modello viene basato sull'equazione della diffusione che consente di legare le variazioni spaziali alle variazioni temporali del campo magnetico, là dove queste ultime sono quelle che effettivamente vengono misurate mentre quelle spaziali richiedono la conoscenza dei gradienti spaziali e possono essere fatte derivare dal modello. In pratica il funzionamento del modello è basato sull'applicazione dell'equazione della diffusione che può essere affrontata in diversi modi, quelli comunemente usati sono:

- metodo differenze finite;
- metodo elementi finiti;
- metodo delle superfici limite.

A tale scopo è necessario individuare le modalità di diffusione del rumore fra la sorgente ed il punto di misura. Il rumore prodotto da tali sorgenti può essere previsto con particolari modelli di calcolo. Il modello classico, in particolare, si basa su considerazioni di tipo fisico: vengono ipotizzate le modalità di generazione e produzione del rumore delle sorgenti e viene poi stimato il livello di rumore in un punto in funzione della distanza che lo separa dalla sorgente. A tale proposito, le sorgenti quali strade, superstrade, autostrade e ferrovie possono essere rappresentate come sorgenti di rumore lineari, ognuna delle quali caratterizzata da un parti-

colare valore dell'energia magnetica associata. In questa nota consideriamo soltanto il rumore generato dalle ferrovie elettrificate e quello generato dal traffico veicolare. Il campo magnetico generato dalle ferrovie, dal punto di vista spettrale, si compone di 2 contributi: quello legato alla derivata prima dello spostamento del treno e quello legato alla derivata seconda dello spostamento. Il primo interessa le frequenze basse mentre il secondo pervade la parte centrale e la parte alta dello spettro. I circuiti ferroviari elettrificati in corrente continua sono essenzialmente costituiti da un filo aereo e dai binari. Nel filo aereo scorre la corrente totale  $I$ , la corrente  $I$  si chiude attraverso i binari, questi però sono elettricamente collegati con la Terra mediante pozzetti disposti lungo i binari ogni 300 metri. Una parte della corrente  $I$  che scorre nel filo aereo fluisce nel terreno e una parte fluisce nel binario. La conducibilità elettrica del binario è molto elevata rispetto alla conducibilità della Terra tuttavia la sezione dei due conduttori è enormemente diversa, pertanto la corrente che scorre nel binario molto spesso è meno della metà di quella che scorre nel terreno. Quest'ultima dipende dalla struttura di conducibilità elettrica del sottosuolo, poiché gli strati più superficiali sono più conduttivi, e si crea uno strato di corrente superficiale molto ampio che può estendersi anche per centinaia di km dal tracciato ferroviario. Questa corrente crea un campo magnetico orizzontale ortogonale al tracciato ferroviario. A causa dello sbilanciamento della corrente  $I$  che fluisce nel conduttore aereo si ha la generazione



di un campo magnetico verticale che decresce linearmente con la distanza. La struttura elettrica di una ferrovia in realtà è molto più complessa e produce campi magnetici il cui spettro copre ben 10 decenni di frequenza (0.001 Hz - 10<sup>7</sup>Hz). Il rumore prodotto invece dal traffico veicolare è dovuto alla magnetizzazione degli automezzi indotta dal campo magnetico terrestre. Il rumore prodotto dagli automezzi dipende dalla massa del veicolo, dalla distanza, dalla velocità, dalla traiettoria, dall'intensità del campo magnetico inducente e dalla suscettibilità del materiale dell'automezzo. Pertanto il campo magnetico prodotto da un automezzo in movimento [Lee et al., 1999] è dato approssimativamente:

$$B \approx \frac{\mu M}{4\pi L^3} \left( 1 + \left( \frac{v}{L} t \right)^2 \right)^{3/2} \quad (1)$$

dove  $t$  è il tempo,  $L$  e  $v$  sono la distanza e la velocità dell'automezzo,  $\mu$  è la permeabilità magnetica. Il momento magnetico  $M$  dell'automezzo, caratterizzato da una suscettività magnetica media  $\chi$ , immerso nel campo magnetico terrestre  $H_T$  è dato dall'integrale di volume esteso a tutto il volume  $V$  occupato dall'automezzo:

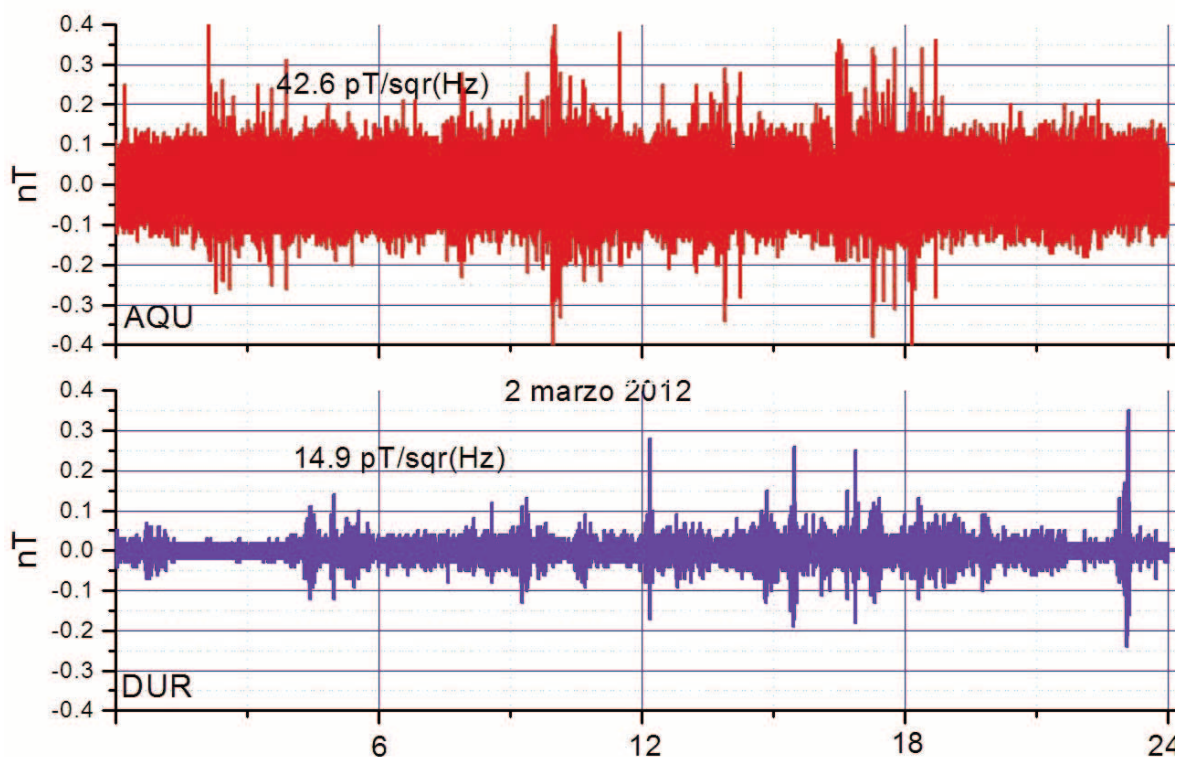
$$M = \int_V \chi H_T dv \quad (2)$$

Ad esempio un'automobile, del peso di 2 tonnellate, immersa nel campo magnetico terrestre statico  $B = 47000$  nT, con un

momento magnetico di circa 1000000 Am<sup>2</sup>, produce alla distanza di 100 metri un campo statico di circa 0.1 nT. Se l'automezzo si muove lungo un dato itinerario alla velocità  $v$  allora il campo prodotto è variabile nel tempo con spettro dato dalla trasformata di Fourier dell'espressione (1) integrata lungo il percorso. La stima del rumore dovuto al traffico, al fine di isolarne il contributo presente nelle misure, in realtà non è facile, tuttavia sono disponibili alcuni modelli che consentono di stimare il livello di rumore in un punto a prescindere dal dato di misura, ma basandosi esclusivamente sui dati del traffico e sulle particolarità topografiche dello specifico caso. Il principio di funzionamento di tali modelli si basa sull'applicazione di particolari correlazioni di origine sperimentale.

### 3. Elaborazione dei dati

La caratterizzazione del rumore magnetico di un dato sito di misura viene fatta normalmente mediante misure differenziali oppure mediante l'analisi spettrale dei segnali. Il primo metodo, anche se molto utilizzato, è estremamente approssimativo, generalmente non consente di separare il rumore dal segnale, e, in alcuni casi, consente di discriminare i disturbi ma solo quando la loro intensità è comparabile o più grande di quella dei segnali. Anche se alla base del metodo c'è la convinzione che la differenza tra i due segnali elimini il modo comune, ciò è vero soltanto se i segnali nei due siti sono esattamente identici. La ragione principale della non



**Figura 3** Componente quasi stazionaria del rumore di fondo della componente verticale Z di L'Aquila e di Duronia.  
**Figure 3** Almost stationary component of the background noise of the vertical component Z of L' Aquila and Duronia.



applicabilità del metodo risiede nel fatto che le variazioni del campo magnetico di origine esterna manifestano gradienti spaziali che dipendono dal tipo di sorgente esterna che si considera, dalla distanza dei due punti di misura e dalla struttura differenziale di conducibilità elettrica del sottosuolo nelle due aree, per cui i segnali nei due siti non sono in generale identici. Inoltre la funzione differenza contiene anche la differenza delle due componenti stocastiche associate ai due segnali che dovrebbero rappresentare il rumore dei due siti. Ma la differenza di due funzioni stocastiche è ancora una funzione stocastica [Papoulis and Pillai, 2002] che nulla aggiunge sulle due funzioni di partenza. Infine c'è da considerare che le sorgenti ionosferiche si muovono lungo la latitudine geomagnetica, pertanto i gradienti variano nel tempo. Queste variazioni sono considerevoli anche per variazioni temporali di pochi minuti. Ad esempio, gli osservatori di L'Aquila e di Duronio distano 130 km, se tentassimo di misurare il rumore di Duronio facendo le differenze tra le 3 componenti del campo magnetico misurato nei due osservatori nell'arco delle 24 ore troveremmo un residuo di circa 1 nTpp nelle funzioni differenza. Così dedurremmo che il rumore di Duronio è di questo ordine di grandezza, invece il rumore di fondo effettivo diurno di Duronio è dell'ordine di  $15pT(Hz)^{-1/2}$  mentre quello notturno è dell'ordine di  $5pT(Hz)^{-1/2}$  (fig. 3). La stima del rumore sarebbe pertanto di oltre 2 ordini di grandezza più grande di quella vera. L'altro tipo di analisi dei segnali fatta nel modo classico consiste nell'individuare nello spettro del segnale complessivo quelle regioni spettrali più o meno ampie che eccedono una certa soglia; se tali regioni esistono si attribuisce a queste regioni un segnale fisico ed il resto è rumore. Nei segnali geomagnetici a larga banda questo criterio non è molto efficace, in particolare quando il rapporto segnale/rumore è inferiore a 10 e quando sia il segnale che il rumore presentano un andamento del tipo  $Cf^{-\alpha}$ . In ogni caso anche questo metodo soffre le limitazioni dovute ai gradienti spaziali dei segnali geomagnetici. Il metodo di separazione del rumore e del segnale dai segnali misurati, adottato in questa nota, non utilizza misure differenziali, ma si basa sulla rappresentazione dei segnali mediante lo sviluppo in serie di funzioni ortogonali [Eldar Y. C. and M. Mishali, 2006] in uno spazio  $n$ -dimensionale e nel confinamento del segnale e del rumore nei due sottospazi rappresentativi (fig. 4).

$$B_m(t) = B_e(t) + B_{nF}(t) + B_{fF}(t) \tag{3}$$

dove  $B_m$  è il campo magnetico misurato,  $B_e$  è il campo magnetico di origine esterna (magnetosfera, ionosfera),  $B_{nF}$  è il campo magnetico associato a sorgenti artificiali locali nei confronti delle quali l'osservatore si trova nel *near field* e  $B_{fF}$  è il campo prodotto da sorgenti antropiche su scala regionale nei confronti delle quali l'osservatore è nel *far field*. Se il sistema di sorgenti segnale-rumore gode di una qualche proprietà stazionaria nell'intervallo di misura, cioè di stazionarietà locale, allora è possibile esprimere il campo misurato come la combinazione lineare di  $s$  sorgenti:

$$B_m = a_1s_1 + a_2s_2 + \dots + a_k s_k \tag{4}$$

I vettori unitari rappresentano la direzione del vettore campo associato alla  $k$ -esima sorgente, mentre i coefficienti rappresentano l'intensità della  $k$ -esima sorgente. Pertanto possiamo esprimere il campo misurato nel modo semplice:

$$B_m = GS_k \tag{5}$$

dove  $B_m$  è la matrice dei segnali misurati,  $G$  è la matrice di

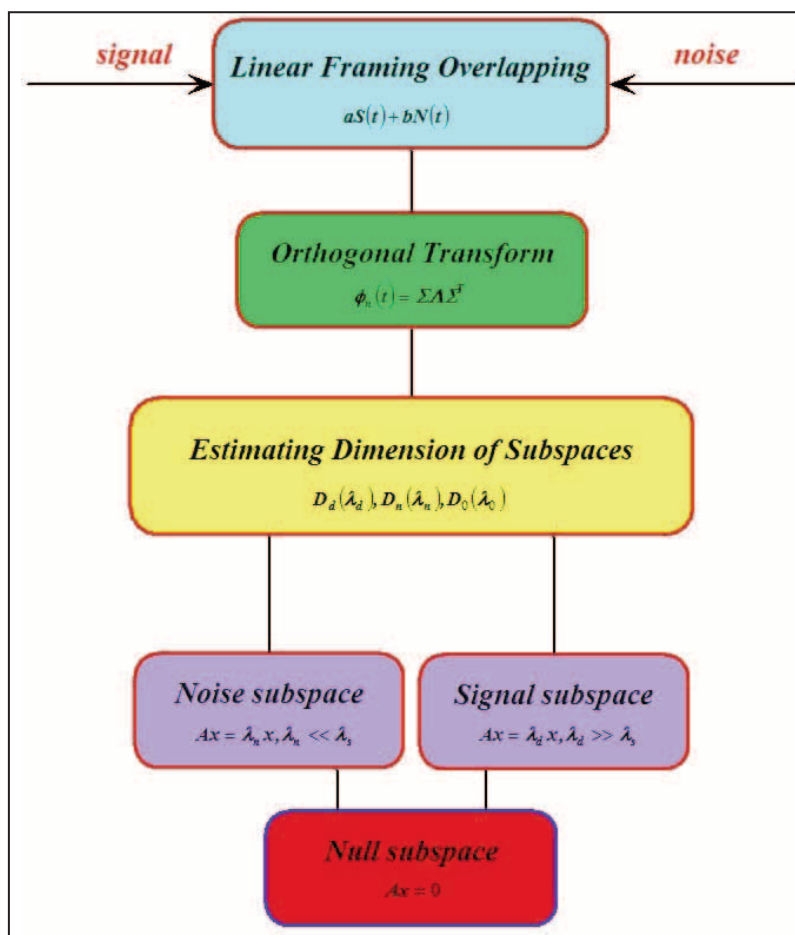


Figura 4 Schema a blocchi della procedura di estrazione del rumore. Figure 4 Block diagram for the noise evaluation procedure.

mescolamento e  $S_k$  è la matrice sorgente. I dati del campo magnetico misurato possono essere organizzati in una matrice  $3 \times n$  dove  $n$  è il numero dei campioni:

$$B_m = \begin{bmatrix} B_x(t_1) & B_x(t_2) & \dots & B_x(t_n) \\ B_y(t_1) & B_y(t_2) & \dots & B_y(t_n) \\ B_z(t_1) & B_z(t_2) & \dots & B_z(t_n) \end{bmatrix} \quad (6)$$

Gli elementi della relativa matrice di covarianza  $n \times n$  sono dati da:

$$\Pi_{lm} = \sum_{f=1}^3 [B_f(t_1) - \langle B \rangle] \cdot [B_f(t_m) - \langle B \rangle]^T \quad l, m = 1 \dots n \quad (7)$$

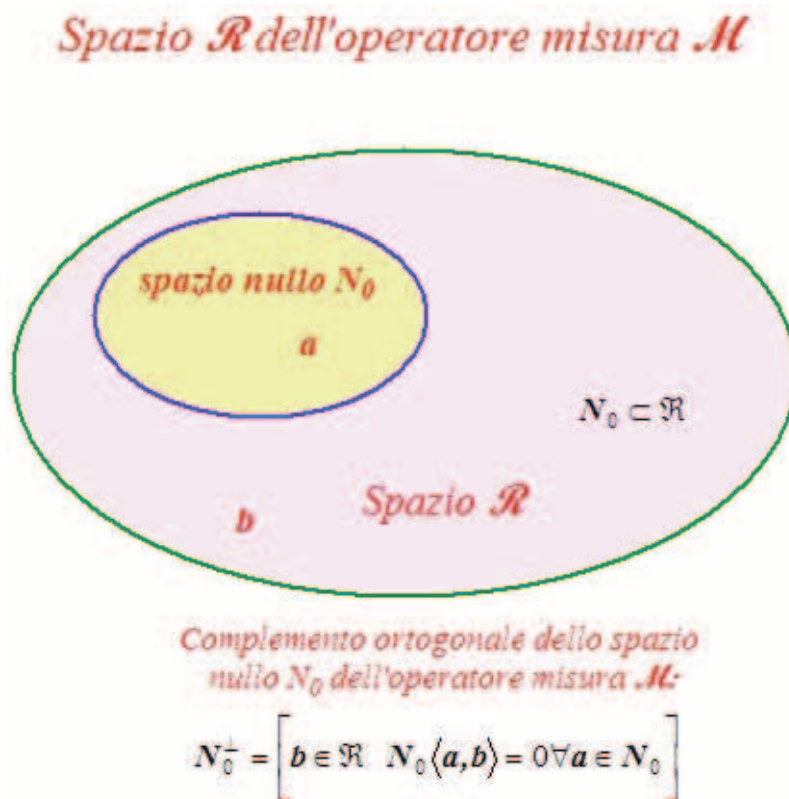
Data la natura di questa funzione gli elementi della matrice sono legati alla varianza delle grandezze pertanto la stazionarietà nella finestra temporale di osservazione è riferita a questo parametro statistico. Questa matrice gode di essere simmetrica e (semi) definita positiva pertanto avrà  $n$  autovalori tutti reali e positivi e  $n$  auto-vettori tutti ortogonali tra di loro nello spazio  $n$ -dimensionale della matrice di covarianza [Aapo et al., 2001]. Se gli elementi non diagonali sono tutti nulli allora le funzioni  $X$ ,  $Y$  e  $Z$  sono totalmente indipendenti, cioè non contengono componenti comuni. Ciò si verifica soltanto quando i segnali osservati possono essere fatti derivare da 3 sorgenti indipendenti disposte lungo i 3 assi  $x$ ,  $y$  e  $z$ . Poiché  $X(t)$ ,  $Y(t)$  e  $Z(t)$  sono funzioni che hanno una considerevole componente gaussiana, la matrice di covarianza può essere vista anche come rappresentativa di una ipergaussiana multidimensionale le cui curve di livello sono superellissi con assi disposti lungo gli auto-vettori della matrice di covarianza. L'asse disposto lungo  $V_k$  è proporzionale a  $\sqrt{\lambda_k}$ .

Il primo auto-vettore indica la direzione dell'asse maggiore e l'ultimo indica la direzione dell'asse più piccolo. In generale il processo di misura del campo magnetico può essere descritto attraverso un operatore di misura in uno spazio di Hilbert multidimensionale, che, nel caso ideale (quando il rumore complessivo è zero), coincide con l'operatore identità. Nel caso reale il processo di misura può essere descritto mediante l'azione di un operatore lineare di rango finito più un termine additivo che ingloba tutti gli errori associati alla misura. Un magnetometro è un oggetto che trasforma la grandezza fisica da misurare, il campo

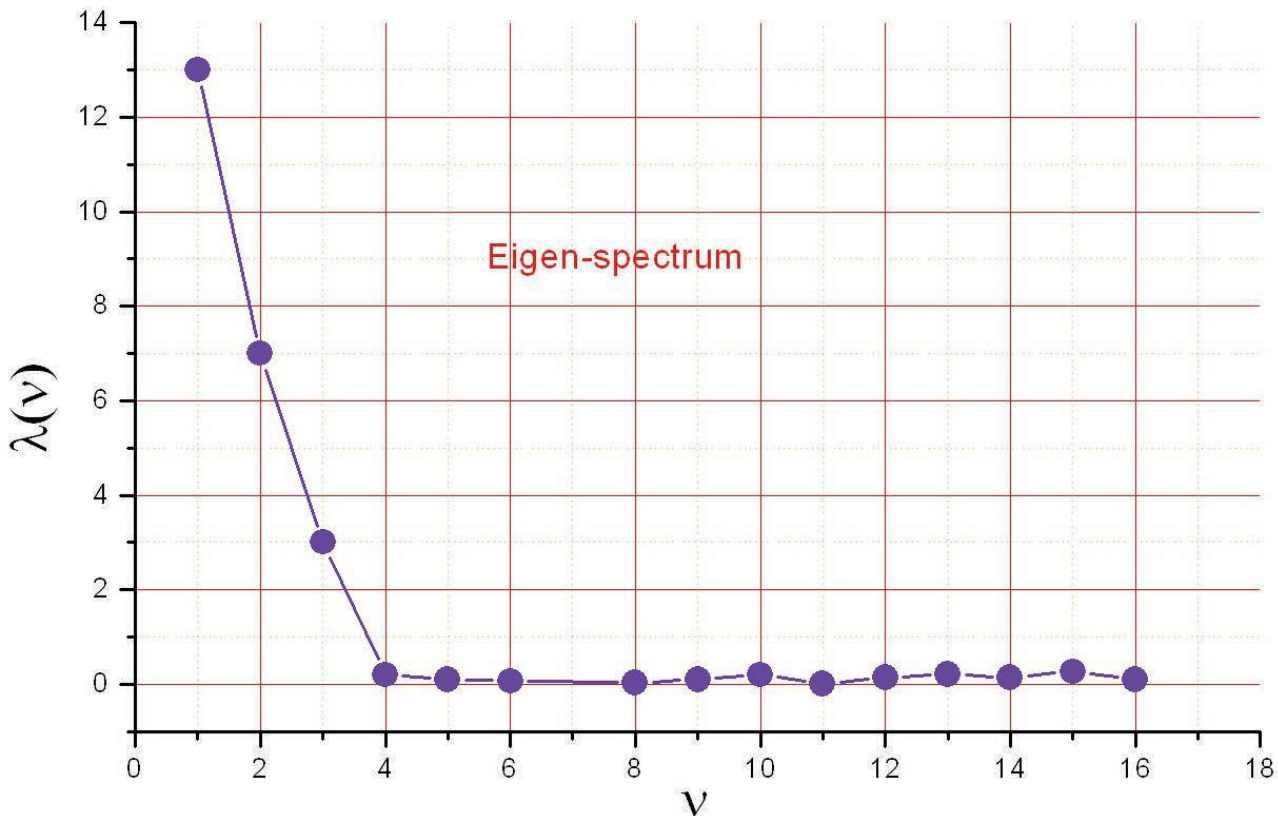
magnetico, in un'altra grandezza che usualmente è una tensione oppure una frequenza. Nel caso dei magnetometri *flux-gate* triassiali l'operatore che associa il campo magnetico ad un numero che ne esprime l'intensità, nell'unità di misura propria, è una matrice  $3 \times 3$  che ingloba tutti i parametri fisici del magnetometro. L'obiettivo del processo di misura è quello di ridurre la componente invisibile della misura confinandola in un sottospazio (*null space*) così mirando a proiettare l'errore di misura, che ingloba anche il rumore, nel complemento ortogonale dello spazio nullo dell'operatore misura (fig. 5).

Le implicazioni che derivano dalla incompletezza di ogni processo reale di misura sono riconducibili alla finitezza dimensionale dello spazio dell'operatore misura. Ne consegue che abbiamo bisogno di una conoscenza a priori della componente invisibile della misura che ci assicuri se questa componente, che giace nello spazio nullo, sia trascurabile rispetto all'errore di misura.

Se possiamo accedere a questa informazione allora possiamo stabilire il numero minimo di misure che rende trascurabile la componente invisibile della misura. La conoscenza a priori di questo numero ci consente di determinare le dimensioni dello spazio rappresentativo della componente visibile della misura. Nel caso ideale questo numero minimo di misure è 1.



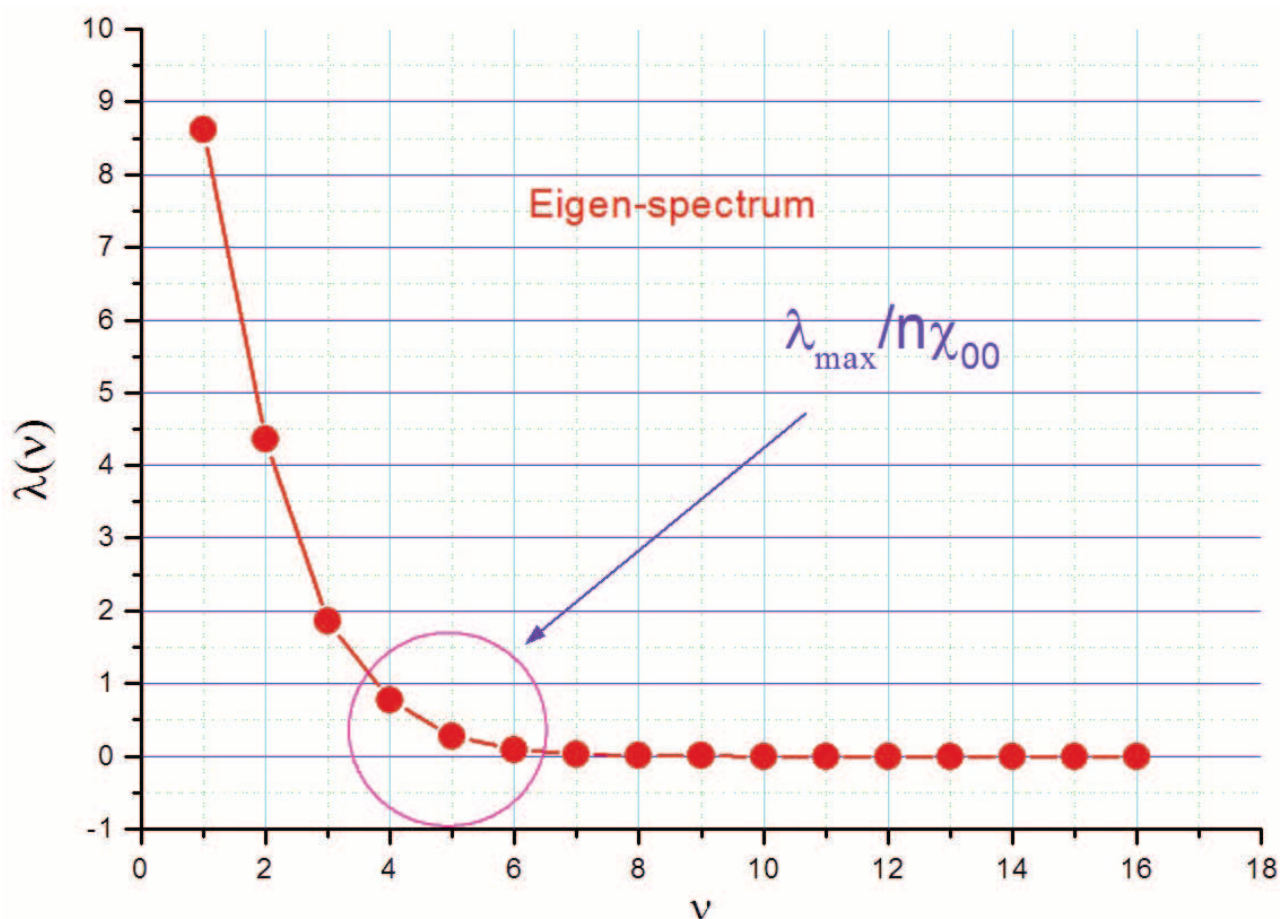
**Figura 5** Schema rappresentativo dello spazio dell'operatore misura,  $a$  e  $b$  sono due arbitrari autovettori.  
**Figure 5** Block diagram of the measurement operator space,  $a$  and  $b$  are two eigenvectors.



**Figura 6** Esempio di *eigen-spectrum* relativo ad una matrice di covarianza 16 x 16 con ginocchio a gradino.  
**Figure 6** An example of the *eigen-spectrum* relative to a covariance matrix 16 x 16 with a like-knee step.

Questo ci porta a decomporre i rispettivi auto-vettori in due classi: una classe, quella degli auto-vettori principali, che genera il sottospazio del segnale, l'altra che genera il sottospazio del rumore (fig. 4). Gli auto-vettori rumorosi che generano il sottospazio del rumore sono ortogonali tra di loro e sono ortogonali anche a quelli principali [Yang, 1995]. Gli auto-vettori rumorosi sono associati agli auto-valori più piccoli, mentre gli auto-vettori principali sono associati agli auto-valori più grandi. Operativamente si costruisce il vettore degli auto-valori della matrice di covarianza ordinando gli auto-valori in maniera decrescente  $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3 \dots > \lambda_n$ . Graficando questo vettore in funzione di  $n$  abbiamo l'auto-spettro. Dall'analisi visiva di questa funzione (fig. 6-7) emerge l'esistenza di 3 regioni spettrali più o meno ampie: nella prima regione sono collocati gli auto-valori dominanti che descrivono il segnale, la seconda regione è di transizione e nella terza regione gli auto-valori sono distribuiti casualmente e oscillano intorno a valori molto piccoli. Si assume che questa regione sia priva di segnali, quando questi sono presenti nel resto dello spettro. Questo fatto ci suggerisce di utilizzare tale particolarità come misura del rumore. Il criterio di scelta degli auto-valori da associare al segnale e di quelli da associare al rumore, perseguito in questo lavoro, si baserà pertanto sul confronto tra le due zone distinte, che

presentano caratteristiche molto differenti: una a prevalente contenuto di segnale, l'altra rappresentativa del rumore. Identificate le due zone procederemo alla valutazione statistica degli auto-valori associati. La zona di transizione invece contiene contributi misti segnale-rumore; la caratterizzazione del ginocchio della curva costituisce l'aspetto più delicato perché è basato su una relazione un po' empirica che discrimina gli auto-valori dominanti da quelli casuali. In sintesi lo spazio  $n$  dimensionale delle matrice di covarianza viene decomposto nei due sottospazi: il sottospazio del segnale e il sottospazio del rumore [Deshpande and Varadarajan, 2007]. Nello spazio nullo, intersezione dei due sottospazi principali, vengono confinati gli auto-valori la cui ampiezza è inferiore ad una certa soglia. Nel caso in cui l'auto-spettro è una funzione a gradino (fig. 6) abbiamo pochi auto-valori dominanti, i restanti decadono a zero rapidamente. In questo caso possiamo facilmente confinare il segnale nel sottospazio proprio la cui dimensione è enormemente inferiore a quella della matrice di covarianza di partenza, mentre il sottospazio del rumore coincide quasi del tutto con lo spazio nullo: abbiamo quindi un segnale in assenza di rumore [Jolliffe, 1986]. La fig. 7 rappresenta un caso concreto in cui il rumore ha un ruolo importante: l'energia non è più concentrata esclusiva-



**Figura 7** Esempio di *eigen-spectrum* relativo ad una matrice di covarianza 16 x 16.  
**Figure 7** An example of the *eigen-spectrum* relative to a covariance matrix 16 x 16.

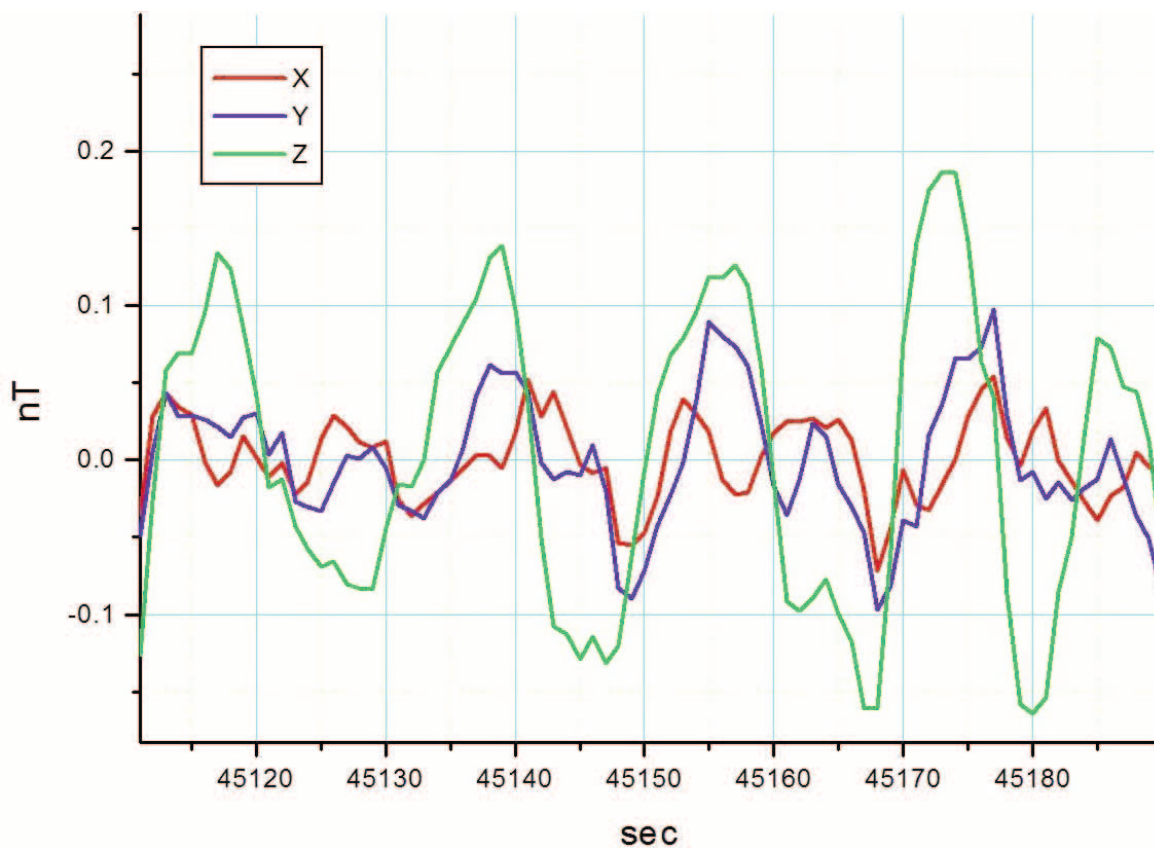
mente sui primi auto-valori ma una piccola quantità si è spostata verso gli auto-valori successivi. Lo spazio del segnale è evidentemente tridimensionale perchè abbiamo i primi 3 auto-valori a cui possiamo associare il segnale, poi abbiamo altri 3 auto-valori nella zona del gomito e poi c'è la regione dominata dal rumore in cui l'energia rappresentata dallo spettro agli auto-valori (*eigen-spectrum*) è letteralmente spalmata su tutti gli auto-valori dal sesto in poi che possono essere confinati nello spazio nullo. Per la rilevazione dei segnali si cerca di stabilire una soglia da applicare all'*eigen-spectrum* del *frame*-dati in analisi. Agli auto-valori dominanti ottenuti grazie ad un livello sufficientemente alto di rapporto segnale rumore (SNR), corrispondono auto-funzioni che sono una buona rappresentazione del segnale stesso. L'aspetto delicato è proprio nella scelta della soglia di discriminazione (noi abbiamo adottato il criterio citato [Deshpande and Varadarajan, 2007]). Da ciò si deduce che quando il rapporto segnale rumore è molto elevato ( $\gg 10$ ) il grafico dell'energia presenta un gradino che permette di isolare il segnale in maniera certa. Infatti in questa situazione è facile determinare un valore di soglia che permette di stabilire se

nel *frame*-dati è presente un segnale. Questo metodo è particolarmente efficace per i segnali a larga banda, per i quali la trasformata di Fourier è poco utile, fornendo un potente strumento matematico per il recupero ottimale di qualunque segnale immerso in qualsiasi forma di rumore. La ricostruzione del segnale con le auto-funzioni viene fatta mediante la matrice degli auto-vettori e degli auto-valori [Eldar and Mishali, 2006].

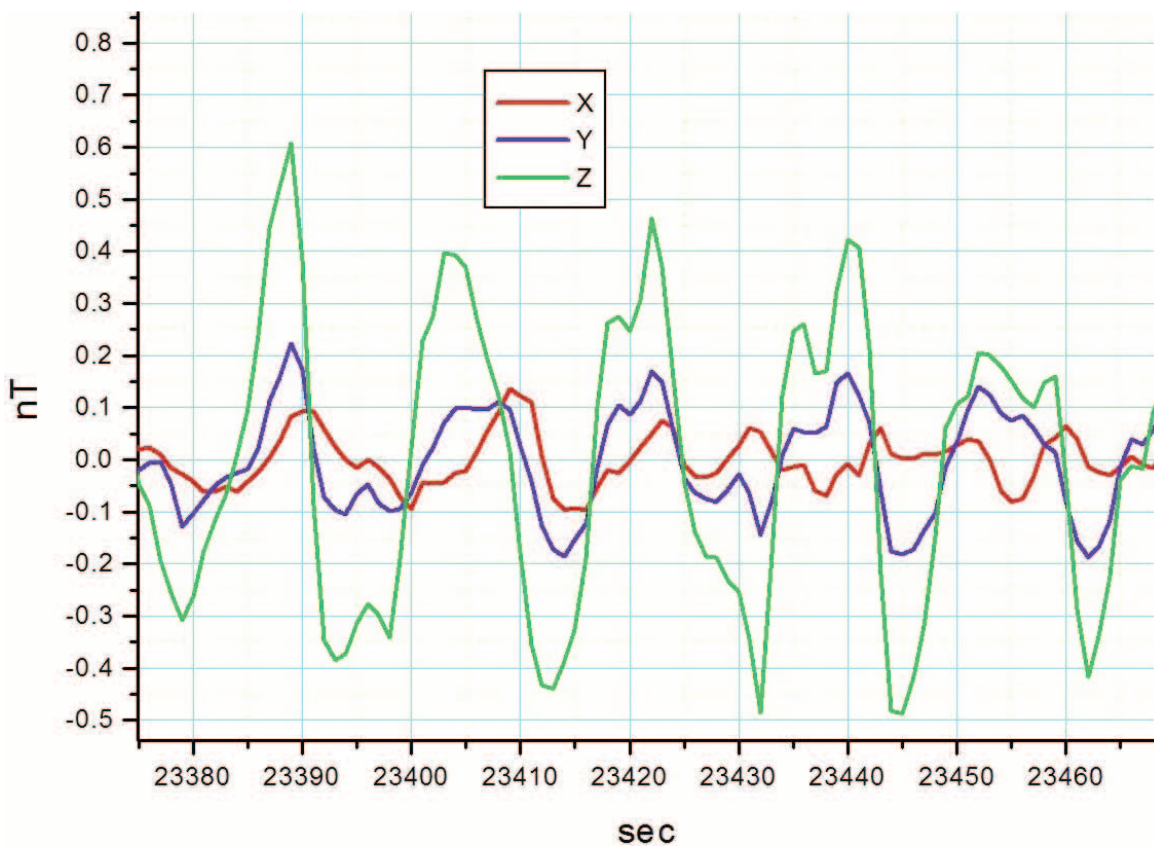
#### 4. Morfologia del rumore di fondo di Varese Ligure

La distanza del punto di misura dalle due sorgenti principali di rumore, ovvero le due linee ferroviarie, è tale per cui nella banda di frequenze 0 Hz - 30 mHz siamo nel campo vicino, mentre nella banda 30 mHz - 1 Hz siamo nel campo lontano. Da ciò ne consegue che nella prima regione spettrale non osserviamo effetti induttivi, mentre nella seconda regione spettrale si notano evidenti effetti soprattutto sulla componente Z.

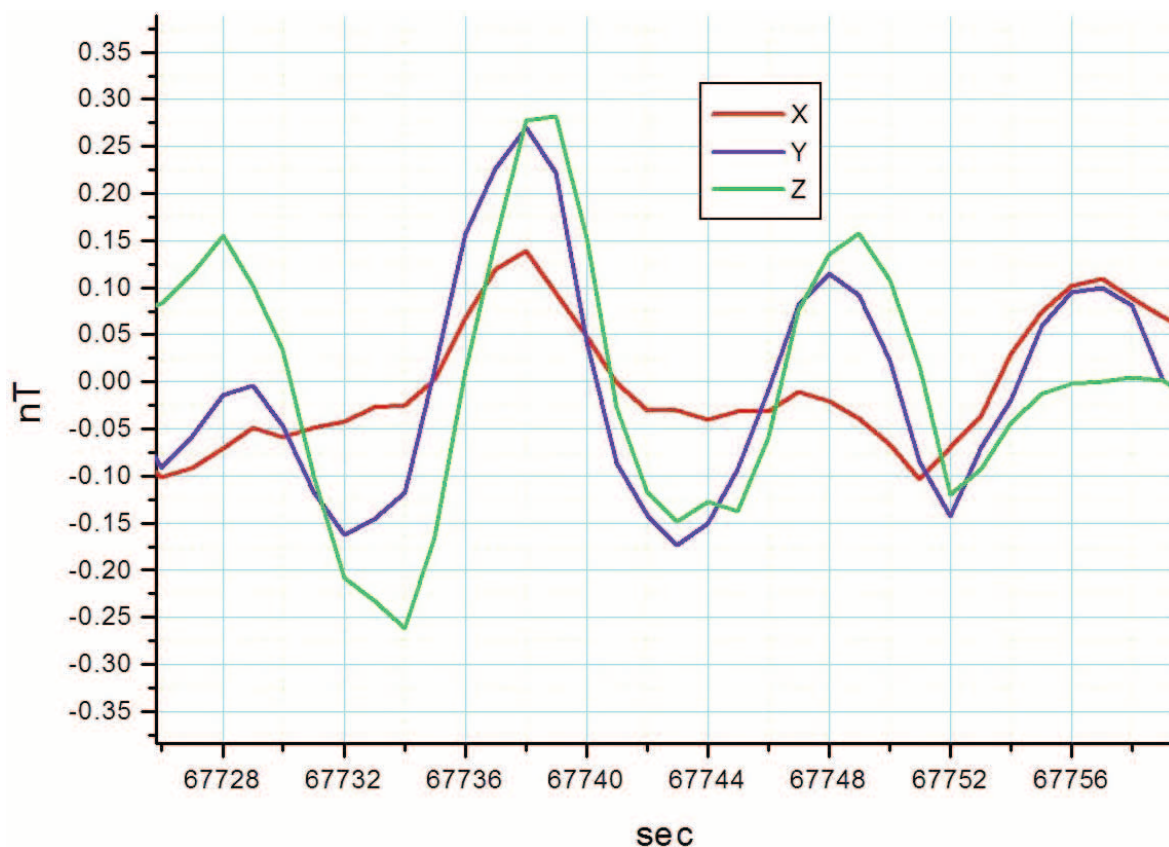




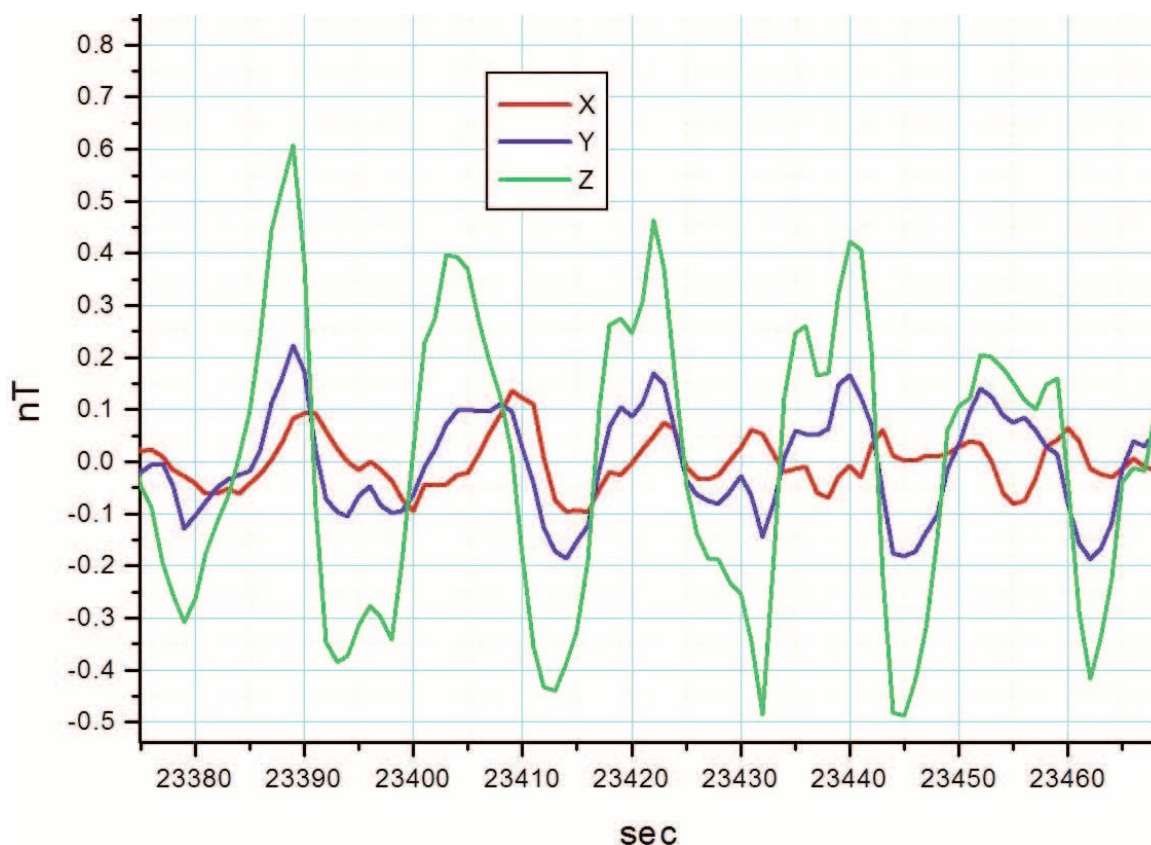
**Figura 8** Sfasamento tra le 3 componenti del rumore magnetico nella banda intorno a 50 mHz.  
**Figure 8** Phase shift between the 3 components of magnetic noise in the frequency band around 50 mHz.



**Figura 9** Le componenti nel piano ZY sono in fase mentre la componente X è in ritardo di fase sulle altre due componenti (50 mHz).  
**Figure 9** The magnetic components on the plane ZY are in phase while the X component lags behind the other two components (50 mHz).



**Figura 10** Sfasamento della componente verticale del rumore dovuto ad effetti induttivi nella banda intorno a 0.2 Hz.  
**Figure 10** Phase shift of the noise vertical component due to the inductive effects in the band around 0.2 Hz.

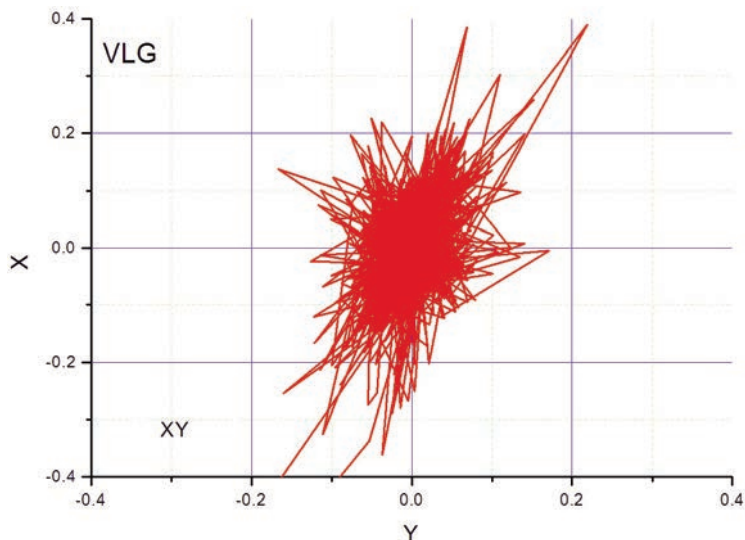


**Figura 11** Rumore dovuto allo strato di corrente visibile sulle componenti orizzontali X,Y e il rumore dovuto allo sbilanciamento delle correnti visibile sulla componente verticale Z.  
**Figure 11** Noise due to the current layer visible on the horizontal components X, Y and noise due to the unbalanced currents visible on the vertical component Z.

Le figg. 8, 9, 10 e 11 mostrano lo sfasamento delle componenti nella banda intorno a 50 mHz; questo sfasamento è prodotto da processi induttivi nel sottosuolo. La morfologia delle correnti messe in gioco dalle due ferrovie si riflette nella fig. 12 che rappresenta il campo magnetico associato al rumore nel piano XY; questo campo è generato principalmente dallo strato di corrente. Si nota che la componente principale è orientata nella direzione NE-SW, e la corrente è ortogonale a questa direzione e parallela alla linea ferroviaria. Le figg. 13 e 14 riportano invece il campo magnetico nei due piani verticali XZ e YZ.

Questo campo è generato prevalentemente dalla corrente di sbilanciamento che giace nel piano orizzontale ma produce un campo verticale. Un secondo contributo è dato dalla componente toroidale della corrente che scorre nel suolo. L'andamento di questi due grafici riflette la geometria del sistema ferroviario rispetto al punto di osservazione.

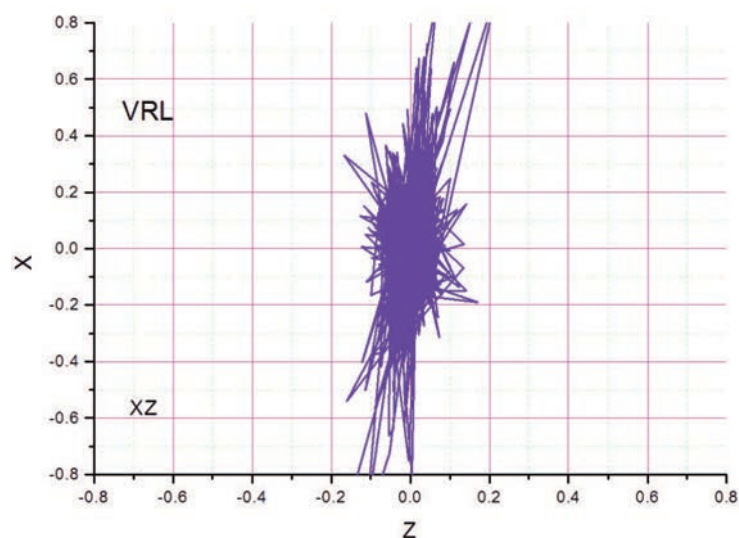
Le figg. 15, 16 e 17 illustrano il confronto del rumore sulle 3 componenti con i dati di Duronia la distanza dalle ferrovie di Duronia è di 50 km, mentre Varese Ligure è a circa 20 km, per cui questa diversa geometria non giustifica la grande differenza dell'intensità del rumore nei due siti. Ciò è dovuto alla diversa struttura di conducibilità elettrica del sottosuolo nei due casi. La fig. 16 mostra il confronto tra le componenti verticali, quelle più rumorose, tra Duronia e Varese Ligure, ed i dati sono filtrati mediante il filtro standard di Gauss a 19 coefficienti. Si nota che il rumore associato alle due funzioni è praticamente simile, considerato anche la differenza di latitudine dei due siti.



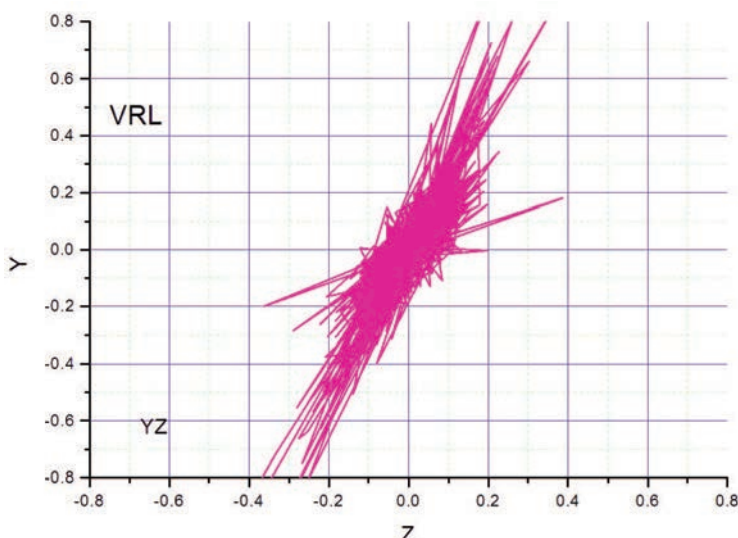
**Figura 12** Polarizzazione della componente stazionaria del rumore magnetico nel piano orizzontale.  
**Figure 12** Polarization for the stationary component of magnetic noise in the horizontal plane.

### Conclusioni

Il livello di rumore di Varese Ligure è influenzato prevalentemente dalle due linee ferroviarie elettrificate in corrente continua rispetto alle quali il sito risulta essere equidistante, mentre il rumore dovuto al traffico non è presente in questi dati perché è stato selezionato un giorno festivo (8/7/2012) durante il quale il traffico locale è assente. Il rumore misurato influenza prevalentemente la componente verticale (fig. 18).

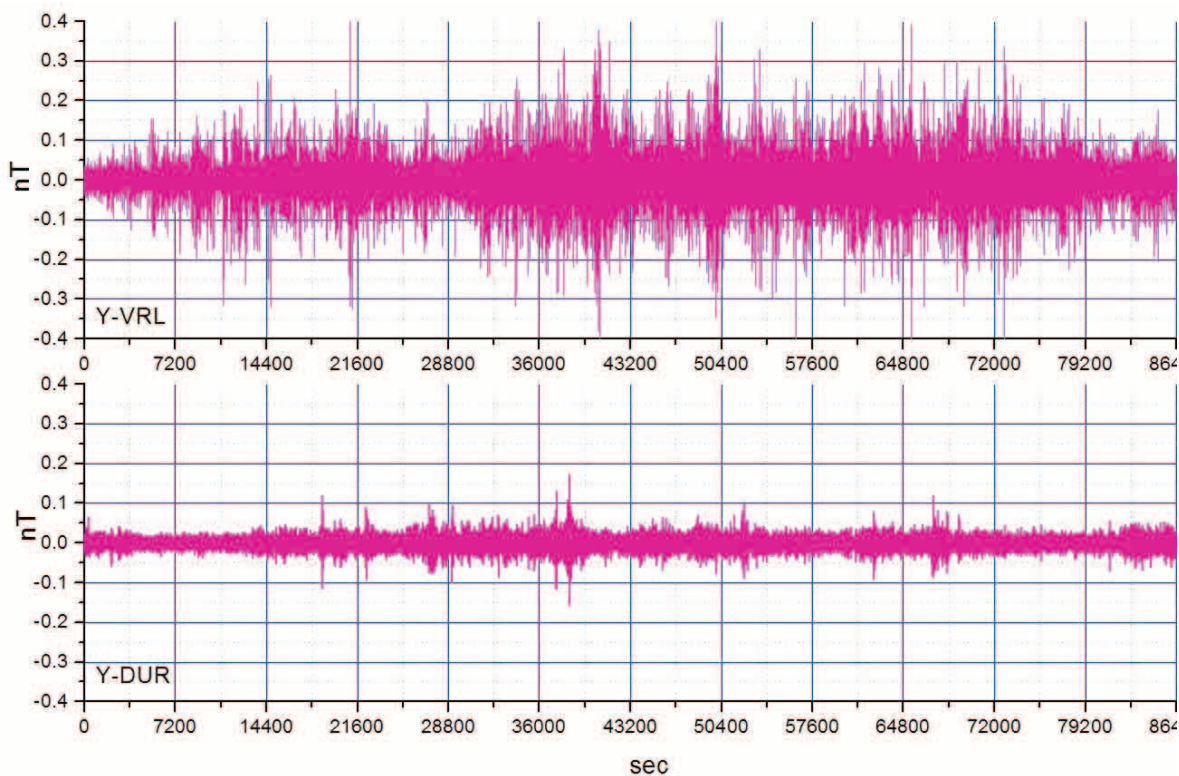


**Figura 13** Polarizzazione della componente stazionaria del rumore magnetico nel piano verticale XZ.  
**Figure 13** Polarization for the stationary component of magnetic noise in the vertical plane XZ.

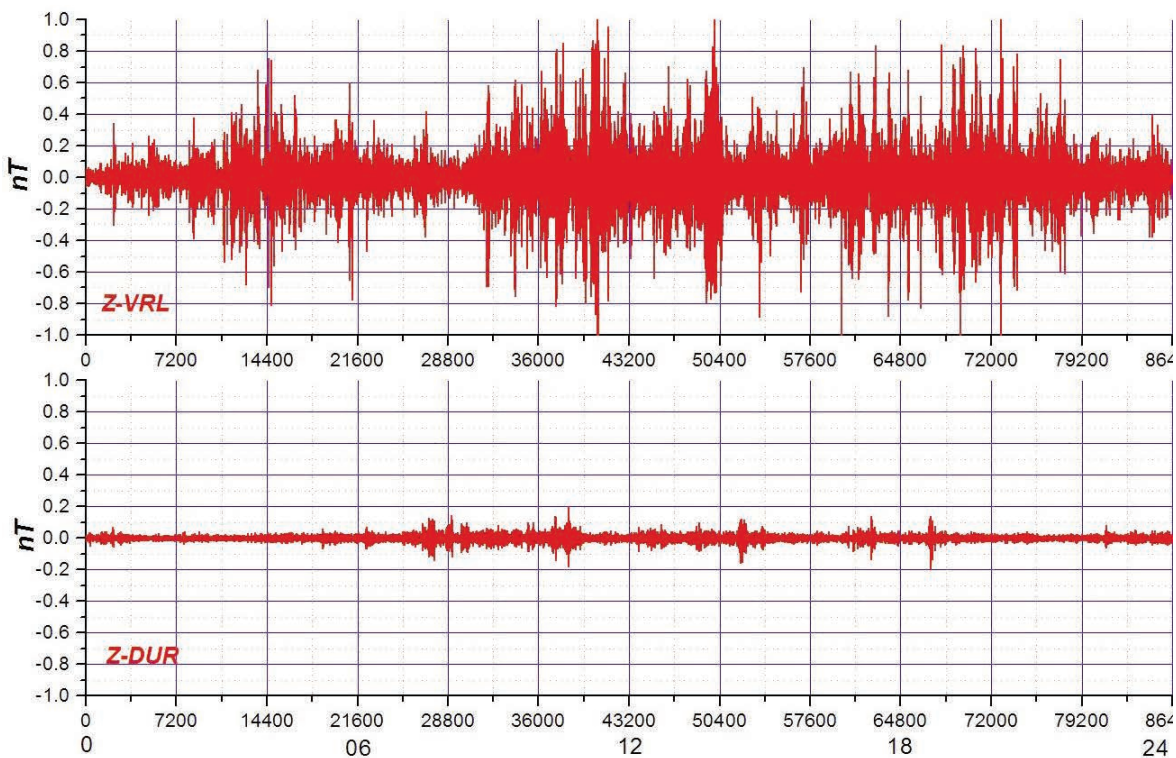


**Figura 14** Polarizzazione della componente stazionaria del rumore magnetico nel piano verticale YZ.  
**Figure 14** Polarization for the stationary component of magnetic noise in the vertical plane YZ.



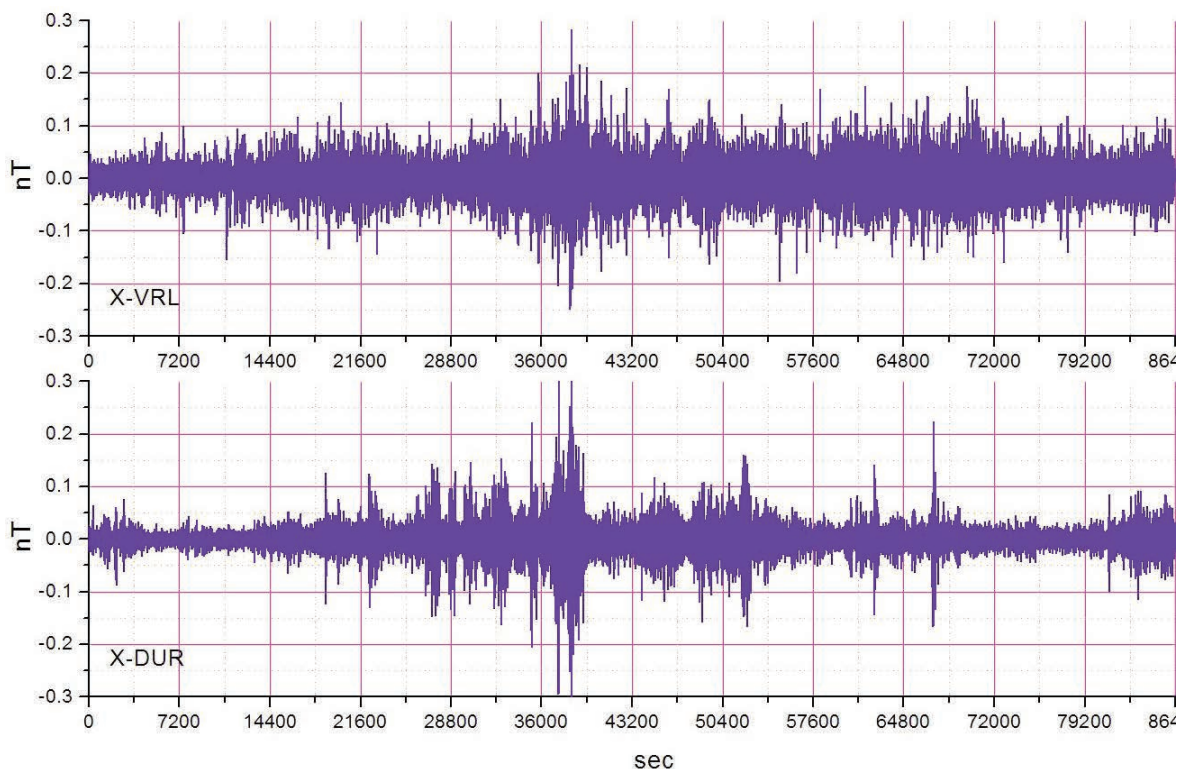


**Figura 15** Confronto del rumore di fondo con l'Osservatorio di Duronìa, componente Y.  
**Figure 15** Comparison of the background noise with the Observatory of Duronìa, Y component.

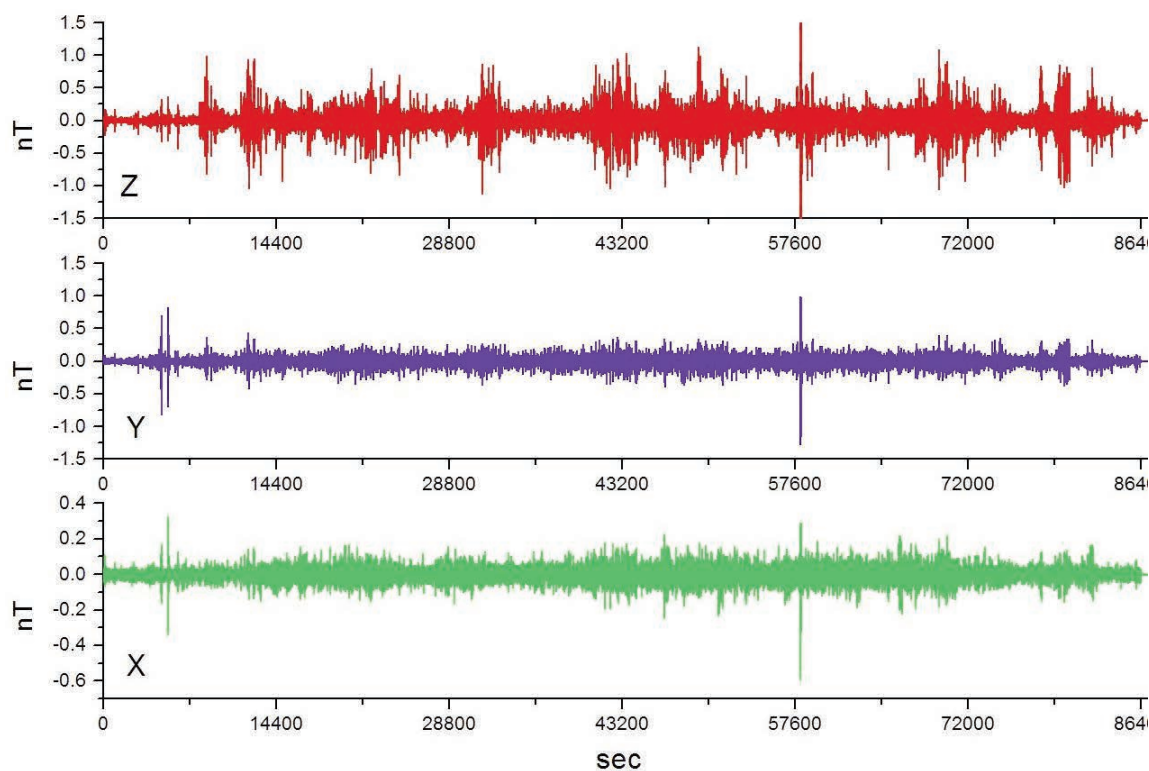


**Figura 16** Confronto del rumore di fondo con l'Osservatorio di Duronìa, componente Z.  
**Figure 16** Comparison of the background noise with the Observatory of Duronìa, Z component.

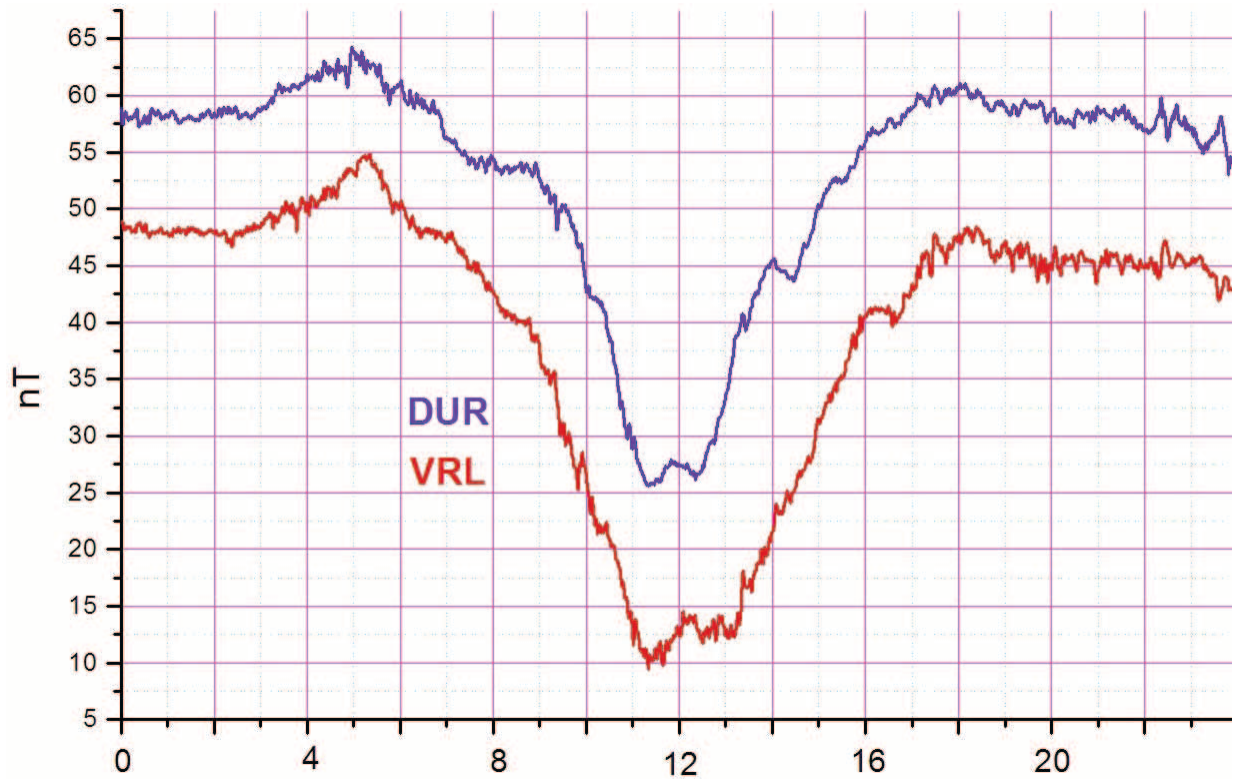




**Figura 17** Confronto del rumore di fondo con l'Osservatorio di Duronia, componente X.  
**Figure 17** Comparison of the background noise with the Observatory of Duronia, ZXcomponent.



**Figura 18** Auto-funzioni associate agli auto-valori nel sottospazio del rumore, andamento diurno sulle 3 componenti XYZ.  
**Figure 18** Eigen-functions associated with the eigen-values in the subspace of noise, diurnal trends on the 3 components XYZ.



**Figura 19** Variazione diurna della componente Z di VRL e DUR.  
**Figure 19** Daily variation of Z component in VRL and DUR.



**Figura 20** Sede della Stazione Multiparametrica di Varese Ligure.  
**Figure 20** Headquarters of Multiparametric Station of Varese Ligure.



Questo contributo è in parte dovuto allo sbilanciamento delle correnti che scorrono nel circuito ferroviario e in parte alle componenti toroidali delle correnti che scorrono nel terreno. La componente orizzontale del campo magnetico è influenzata prevalentemente dallo strato di corrente orizzontale che interessa la parte superficiale della crosta terrestre a più elevata conducibilità elettrica.

L'ampiezza del rumore sulla componente verticale è molto elevata, tuttavia se si limita la banda di frequenze e si rimane nella banda standard degli osservatori magnetici, ricampionando i dati al secondo per ottenere i dati ogni 5 secondi e poi applicando il filtro di Gauss a 19 coefficienti normalmente utilizzato nella rete INTERMAGNET, il rumore residuo sovrapposto all'andamento diurno del campo verticale di Varese Ligure risulta essere comparabile con quello di Duronia e di L'Aquila (fig. 19). Questo taglio della banda dei segnali applicato alle componenti orizzontali X e Y genera un andamento dello stesso tipo di quello standard di L'Aquila. Pertanto i dati di Varese Ligure (fig. 20) possono essere utilizzati in tutti quei campi di indagine in cui la banda spettrale utile giunga fino a circa 10 mHz. Inoltre poiché il rumore prodotto dalle ferrovie è a valore medio diverso da zero l'operazione di media dei dati campionati al secondo non elimina del tutto tale contributo, pertanto la risoluzione dei dati mediati viene leggermente mortificata. In sintesi i dati prodotti possono essere utilizzati in tutte quelle applicazioni in cui i limiti spettrali sono quelli detti (DC-10 mHz) e la risoluzione sia dell'ordine di 1 nT sulle componenti orizzontali X e Y e 2.5 nT sulla componente verticale Z.

## Ringraziamenti

Gli autori ringraziano il Dott. Paolo Stefanelli e il Sig. Riccardo Vagni per la collaborazione nella fase sperimentale di installazione della stazione magnetica di misura a Varese Ligure.

## Bibliografia

Aapo Hyvärinen, Juha Karhunen, Erkki Oja (2001). *Independent Component Analysis*, John Wiley & Sons, 2001.

Deshpande A. and K. Varadarajan (2007). *Sampling-based dimension reduction for subspace approximation*, Proc. 39th Annu. ACM Symp. Theory Comput. (STOC), 2007.

Eldar Y. C. and M. Mishali (2006). *Robust recovery of signals from a structured union of subspaces*, IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 55, no. 11, pp. 5302–5316, 2006.

Jacobs J.A. (1970). *Geomagnetic micropulsations*. Berlin-Heidelberg-New York, 1970, 179 p.

Jolliffe I.T. (1986). *Principal Component Analysis*, Springer-Verlag, New York, 1986.

Kalouptsidis N.(1997). *Signal Processing Systems-Theory And Design*, John Wiley & Sons Inc. New York, 1997.

Lee C.E., Borchardt D.W., and Fei Q. (1999). *Truck-Monitoring and Warning Systems for Freeway to Freeway Connections*, report number 2915-1. University of Texas, Texas Transportation Institute and Center for Transportation Research, Austin, TX. October 1999.

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, 1991.

Papoulis A. and Pillai S.U.(2002). *Probability, Random Variables and Stochastic Processes*, McGraw-Hill

Troitskaya V.A. (1964). *Rapid variations of electromagnetic field of the Earth*. Res. Geophys. V.1, No.19, p.485, 1964.

Vladimirov N.P., Kleimenova N.G. (1962). *About the structure of the natural electromagnetic field of the Earth in the frequency range 0.5-100 Hz*. Ivestiya AN USSR, ser.Geophysics, No.10, p. 1368, 1962.

Yang B. (1995). *Projection approximation subspace tracking*. IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 43, no. 1, pp. 95–107, 1995.





# Indice

<b>Introduzione</b>	5
<b>1. Il rumore elettromagnetico</b>	5
<b>2. Modello della sorgente di rumore</b>	6
<b>3. Elaborazione dei dati</b>	8
<b>4. Morfologia del rumore di fondo di Varese Ligure</b>	12
<b>Conclusioni</b>	15
<b>Ringraziamenti</b>	19
<b>Bibliografia</b>	19

**Coordinamento editoriale e impaginazione**

Centro Editoriale Nazionale | INGV

**Progetto grafico e redazionale**

Daniela Riposati | Laboratorio Grafica e Immagini | INGV

© 2013 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**