

# Rapporti tecnici INGV

Validazione dei dati dell'Osservatorio  
Geomagnetico di Duronia

291



## **Direttore Responsabile**

Stefano Gresta

## **Editorial Board**

Andrea Tertulliani - Editor in Chief (INGV - RM1)

Luigi Cucci (INGV - RM1)

Nicola Pagliuca (INGV - RM1)

Umberto Sciacca (INGV - RM2)

Alessandro Settimi (INGV - RM2)

Aldo Winkler (INGV - RM2)

Salvatore Stramondo (INGV - CNT)

Milena Moretti (INGV - CNT)

Gaetano Zonno (INGV - MI)

Viviana Castelli (INGV - BO)

Antonio Guarnieri (INGV - BO)

Mario Castellano (INGV - NA)

Mauro Di Vito (INGV - NA)

Raffaele Azzaro (INGV - CT)

Rosa Anna Corsaro (INGV - CT)

Mario Mattia (INGV - CT)

Marcello Liotta (Seconda Università di Napoli, INGV - PA)

## **Segreteria di Redazione**

Francesca Di Stefano - Referente

Rossella Celi

Barbara Angioni

Tel. +39 06 51860068

Fax +39 06 36915617

redazionecen@ingv.it

# Rapporti tecnici INGV

## VALIDAZIONE DEI DATI DELL'OSSERVATORIO GEOMAGNETICO DI DURONIA

Paolo Palangio<sup>1</sup>, Cinzia Di Lorenzo<sup>1</sup>, Manuela Pietrolungo<sup>1</sup>, Guido Dominici<sup>1</sup>, Quintilio Taccetti<sup>2</sup>,  
Anna De Santis<sup>3</sup>, Domenico Di Mauro<sup>1</sup>

<sup>1</sup>INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Geomagnetismo, Aeronomia e Geofisica Ambientale)

<sup>2</sup>INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Amministrazione Centrale - Centro Elaborazione Dati)

<sup>3</sup>INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Amministrazione Centrale - Lab. Didattica e Divulgazione Scientifica)

# 291



## **Indice**

Introduzione	7
1. La misura	7
2. Il rumore magnetico	10
3. Analisi degli invarianti	13
4. Analisi del rumore magnetico	17
5. Conclusioni	24
Ringraziamenti	24
Bibliografia	24



## Introduzione

La validazione dei dati illustrata in questa nota concerne due bande di frequenza distinte, separate dalla frequenza di ripetizione delle misure assolute  $f_m$ . Questa frequenza definisce due regioni spettrali:  $f > f_m$  e  $f < f_m$ . Nella prima regione spettrale il rumore complessivo non viene discriminato dalle misure assolute perché si colloca al di fuori della banda delle misure assolute stesse, nella seconda regione spettrale le misure assolute consentono di eliminare, entro certi limiti, le varie derive introdotte dalla catena strumentale. Un terzo segmento spettrale, di grande interesse dal punto di vista del rumore, si colloca nella banda delle pulsazioni magnetosferiche (0.001 Hz – 1 Hz). In questa banda giace il ginocchio che separa il rumore bianco da quello colorato. In questa nota si pongono in evidenza soprattutto le componenti del rumore che non vengono discriminate dalle misure assolute.

## 1. La misura

La misura di una grandezza fisica è legata al concetto di confronto con un campione rappresentativo della grandezza stessa e il risultato della misura è dato dal rapporto delle due entità. In molti casi la grandezza da misurare non è accessibile né alla nostra percezione sensoriale e né a un surrogato sensoriale. Più in generale la misura può essere vista come un procedimento sperimentale che associa una grandezza fisica ad un'altra grandezza fisica suscettibile di essere misurata, registrata ed elaborata. Pertanto si rende necessario introdurre un'altra grandezza fisica di mediazione. Ad esempio nella misura scalare del campo magnetico effettuata con un magnetometro a protoni si lega il campo magnetico ad una frequenza [Denisov et al., 1999], con un magnetometro flux-gate si associa l'intensità delle 3 componenti del campo geomagnetico ad una grandezza scalare come il potenziale elettrico  $V(t)$ . Nel magnetometro HTM (Horizontal Torsion Magnetometer) l'intensità orizzontale del campo magnetico è associata alla coppia esercitata dal campo geomagnetico su un magnetino appeso ad un filo. In un sensore magnetoresistivo il campo magnetico viene trasdotto in una corrente ecc.

Nel caso del magnetometro a protoni il campo magnetico è legato all'osservabile tramite una costante fondamentale della Fisica che non dipende da altri parametri come ad esempio la temperatura o il tempo [Packard and Varian, 1954]. Per gli altri strumenti di misura menzionati il legame tra il campo magnetico e il relativo osservabile è una funzione complessa del fenomeno fisico che ciascuno di essi sfrutta, inoltre è anche funzione della temperatura, della frequenza, del tempo e di molte altre variabili che rivestono un ruolo minore ma non trascurabile nelle misure effettuate in ambito scientifico. In sintesi il procedimento sperimentale della misura è la traduzione di un determinato "osservabile" fisico in una entità concettuale che l'osservabile rappresenta. Il concetto di misura ampiamente sviluppato in meccanica quantistica, si basa sugli operatori hermitiani e sul principio di corrispondenza. Gli operatori misura hermitiani forniscono valori reali e permettono quindi attraverso misurazioni fisiche di determinare le proprietà del sistema. Il principio di corrispondenza assume che sia sempre possibile costruire un osservabile corrispondente ad una data grandezza fisica e che dall'osservabile sia sempre possibile determinare i valori che la grandezza può assumere mediante l'applicazione di un operatore misura. In ambito quantistico la misura però ha una diversa valenza, se si esegue la misura di un'osservabile, il risultato della misura si identifica con uno degli autovalori dell'operatore misura. Se il sistema fisico, nel momento della misura, si trova in uno stato stazionario o autostato, si ha la *certezza* di trovare, come risultato della misura, l'autovalore corrispondente. Questa certezza di ottenere un preciso valore per la misura di un'osservabile si verifica soltanto quando il sistema si trova in un autostato. Ciò significa che il risultato della misura è il valore esatto della grandezza fisica, senza dispersioni statistiche. Se si eseguono  $n$  misure su  $n$  repliche identiche del sistema fisico si ottengono  $n$  valori tutti uguali. Se invece il sistema, nel momento della misura, non si trova in un autostato, il valore dell'osservabile non corrisponde a un determinato autovalore dell'operatore misura. Lo stato del sistema è descritto dalla sovrapposizione di tutti i possibili stati ciascuno con la propria probabilità di divenire reale all'atto della misura. In questo caso se si eseguono  $n$  misure su  $n$  repliche identiche del sistema fisico si ottengono valori diversi forniti dagli autovalori pesati con le rispettive probabilità con cui i vari autostati intervengono nella costruzione dello stato. La distribuzione delle probabilità è data dal modulo quadro della funzione d'onda soluzione dell'equazione di Schrödinger. Pertanto si ha una certa dispersione del valore dell'osservabile intorno a quello più probabile come esito di una misurazione. La dispersione delle misure non è dovuta al procedimento sperimentale di misura come avviene in ambito classico. Inoltre in ambito classico il principio di sovrapposizione ha un diverso significato. Il risultato della misura del campo

magnetico generato da  $k$  sorgenti, in un punto  $r(x_o, y_o, z_o)$  e a un certo istante  $t_o$ , è dato dalla sovrapposizione dei  $k$  contributi. Possiamo immaginare una situazione analoga in ambito quantistico. Se lo spettro dell'operatore misura è costituito da  $k$  autovalori, lo stato del sistema è dato dalla sovrapposizione dei  $k$  stati, ma nell'istante in cui si esegue la misura soltanto uno dei  $k$  autovalori risulta essere il risultato della misurazione.

Nella misura del campo magnetico l'operatore misura  $\mathbf{M}$  è una matrice  $3 \times 3$  che ingloba sia i parametri vettoriali relativi alla giacitura spaziale della terna magnetometrica, sia i parametri scalari che caratterizzano le funzioni di trasferimento dello strumento. Se la matrice rappresentativa dell'operatore misura  $\mathbf{M}$  è hermitiana o almeno simmetrica allora possiamo diagonalizzarla, nel senso che possiamo proiettare l'operatore nella base dei suoi auto-vettori in cui la matrice diventa diagonale e costituita dai suoi 3 autovalori. La misura consiste quindi nel proiettare l'osservabile nel riferimento costituito dagli autovettori dell'operatore misura e moltiplicare le 3 componenti per i relativi autovalori. Questa base, considerato che  $\mathbf{M}$  viene calcolato utilizzando le misure variometriche e le misure assolute, dovrebbe coincidere con il riferimento geografico XYZ. Come vedremo questo è un aspetto delicato nella misura vettoriale del campo magnetico. Nel caso di un magnetometro vettoriale flux-gate ciò che è accessibile alla nostra esperienza è l'osservabile associato, ovvero i tre potenziali elettrici campionati agli istanti  $t_i$ :

$$\begin{aligned} V_x &= V_x(t_1), V_x(t_2), \dots, V_x(t_n) \\ V_y &= V_y(t_1), V_y(t_2), \dots, V_y(t_n) \\ V_z &= V_z(t_1), V_z(t_2), \dots, V_z(t_n) \end{aligned} \quad (1)$$

Nella misura continua del campo magnetico vogliamo stabilire, mediante l'operatore misura  $\mathbf{M}$ , una corrispondenza tra le 3 funzioni rappresentative dell'osservabile e le 3 funzioni rappresentative del campo magnetico espresso nell'unità di misura propria in un riferimento cartesiano georeferenziato. Nel caso di un magnetometro search-coil  $\mathbf{M}$  è un operatore differenziale. In una configurazione vettoriale di sensori,  $\mathbf{M}$  può essere rappresentato da una semplice matrice diagonale costituita da 3 funzioni differenziali oppure da una matrice simmetrica con 6 elementi misti indipendenti, oppure mediante 9 funzioni tutte indipendenti tra di loro (Power, 1985), in ogni caso l'operatore misura deve includere anche i parametri relativi all'orientamento della terna strumentale. Se si vogliono rimuovere tutte le assunzioni esemplificative che stanno alla base di questa schematizzazione allora gli elementi del tensore diventano funzioni a 1 o 2 variabili. Se il magnetometro è un flux-gate triassiale  $\mathbf{M}$  dovrebbe essere un operatore lineare hermitiano o almeno simmetrico in modo che la matrice sia diagonalizzabile, i 3 autovettori siano ortogonali e i 3 autovalori siano reali. Anche in questo caso se si vuole caratterizzare compiutamente la misura, se la strumentazione non fosse termostata e se la frequenza di campionamento fosse molto più elevata della frequenza di taglio del magnetometro, gli elementi della matrice dovrebbero includere anche funzioni a 2 variabili (temperatura e frequenza).

L'operatore  $\mathbf{M}$  deve necessariamente includere tutti i parametri che entrano in gioco nella catena di misura, in modo che gli autovalori  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ , dell'operatore  $\mathbf{M}$  moltiplicati per i 3 segnali  $V_x, V_y, V_z$ , campionati all'istante  $t_i$ , proiettati nella base degli auto-vettori di  $\mathbf{M}$  rappresentino il risultato della misura delle 3 componenti del campo magnetico. Si perviene allo stesso risultato anche moltiplicando semplicemente la matrice  $\mathbf{M}$  per il vettore  $\mathbf{V}$  ma soltanto nel caso in cui  $\mathbf{M}$  sia hermitiana o simmetrica. Considerata l'estrema sensibilità degli auto-vettori rispetto alle variazioni degli elementi non diagonali di  $\mathbf{M}$ , l'autospazio dev'essere normalizzato mediante le 3 matrici  $A_1, A_2, A_3$ :

$$A_1 = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad A_2 = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \end{pmatrix}, \quad A_3 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \end{pmatrix}$$

Molto spesso nei nostri osservatori si utilizza un operatore unitario,  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 1$ , i cui rispettivi auto-vettori sono  $u_1 = (1,0,0), u_2 = (0,1,0), u_3 = (0,0,1)$ , in cui  $\mathbf{M}$  è:

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

In questo caso il risultato del processo di misura si identifica direttamente con il valore della tensione all'uscita del magnetometro oppure con un valore numerico nei magnetometri digitali, si identifica l'effetto con la causa:

$$\begin{aligned} \lambda_1 V_x(t_1) &= B_x(t_1) \\ \lambda_2 V_x(t_1) &= B_y(t_1) \\ \lambda_3 V_x(t_1) &= B_z(t_1) \end{aligned} \quad (3)$$

Tale semplificazione implica inoltre che lo spazio degli autovettori dell'operatore  $\mathbf{M}$  [Kubrusly, 2003] coincide con lo spazio definito dalla terna magnetometrica. Nelle misure effettuate in ambito amatoriale queste semplificazioni non hanno conseguenze importanti, nelle misure professionali finalizzate alla ricerca scientifica queste assunzioni esemplificative sono molto spesso eccessive e possono generare in alcuni casi vistosi effetti indesiderati. Un effetto di questa semplificazione è illustrato nelle figure 12, 14, e 15, in cui si nota un consistente mescolamento delle componenti dovuto alla identificazione del sistema di riferimento fisico variometrico con l'autospazio dell'operatore misura. Noi abbiamo tre sistemi di riferimento: quello fisico materializzato dalla terna variometrica, quello materializzato dalle misure assolute e quello astratto definito dall'operatore misura (autospazio). Questi tre spazi dovrebbero essere coassiali [Zhu, 2007], il non parallelismo degli assi dovrebbe essere dell'ordine della risoluzione angolare del teodolite impiegato nella misura assoluta di D e I (D è la declinazione magnetica vale a dire l'angolo tra il meridiano magnetico e il meridiano geografico. I è la inclinazione magnetica, vale a dire l'angolo tra il piano orizzontale e il vettore "campo magnetico terrestre" [Wienert, 1970]. La procedura corretta per la misura del campo magnetico dovrebbe essere quella di proiettare i segnali misurati  $V_x, V_y$  e  $V_z$  nell'autospazio definito dagli autovettori dell'operatore  $\mathbf{M}$ ,

L'operatore  $\mathbf{M}$  viene costruito utilizzando le misure assolute e le misure variometriche in modo da includere tutti i parametri in gioco, anche quelli non direttamente accessibili all'operatore come ad esempio le funzioni di trasferimento dei magnetometri flux-gate digitali, perché queste vengono inglobate dal costruttore in costanti interne allo strumento stesso. Queste costanti vengono assunte tempo-invarianti. Vengono assunti tempo-invarianti anche tutti gli altri parametri che entrano in gioco nel processo di misura. Tutto ciò presuppone una serie di semplificazioni che riguardano la catena strumentale coinvolta nel processo di misura: la deriva dello zero, la stabilità, il coefficiente di isteresi, la dispersione legata al fattore di ripetitività, la risoluzione, l'accuratezza ecc., ad esempio si assume che la sensibilità dei sensori vettoriali sia assiale, che la non ortogonalità dei sensori sia trascurabile, che la dipendenza dalla temperatura dei parametri dei tre sensori sia nulla o quasi, che la funzione di trasferimento sia piatta per T che va da meno infinito fino all'intervallo di campionamento e che sia così anche per la funzione di trasferimento della fase, che sia trascurabile il rumore intrinseco dello strumento, ma soprattutto che sia trascurabile il rumore  $1/f$  totale, ovvero la somma del rumore  $1/f$  canonico più la componente  $1/f$  associata alle varie derive strumentali. Poi ci sono le assunzioni che riguardano fattori esterni alla catena strumentale di misura come ad esempio che l'orientamento della terna magnetometrica sia nota fino alla risoluzione voluta delle misure, ecc. L'esperienza ci suggerisce che queste semplificazioni possono introdurre talora errori macroscopici nella misura vettoriale del campo magnetico. Ad esempio se volessimo rappresentare in 3D la sensibilità dei sensori magnetici ci accorgeremmo subito che la distribuzione di questo parametro segue la geometria di un ellissoide. Pertanto abbiamo una sensibilità longitudinale lungo l'asse maggiore e una sensibilità trasversale lungo l'asse minore. Tanto più è panciuto l'ellissoide tanto più grande è la sensibilità trasversale. Ad esempio nei magnetometri con nuclei toroidali la sensibilità trasversale è apprezzabile. L'assunzione che noi facciamo è che l'asse minore dell'ellissoide sia zero. Per alcuni tipi di sensori questa assunzione è parecchio

lontana dalla realtà. Se consideriamo non nullo l'asse minore dell'ellissoide rappresentativo della sensibilità dei sensori magnetici introduciamo un mescolamento delle componenti del campo magnetico misurato, ma il mescolamento più macroscopico delle componenti viene prodotto anche da altri effetti, come si vedrà nei prossimi paragrafi.

## 2. Il rumore magnetico

Il rumore associato alla misura del campo geomagnetico nella banda di frequenze che si estende da 1 pHz fino a 1 Hz è un argomento ampio e complesso. In questa nota vengono esaminati soltanto alcuni aspetti di questo tema tralasciando le proprietà e la natura fisica del rumore [Bevington and Robinson, 2003]. Nel nostro specifico caso l'analisi delle diverse componenti che concorrono alla formazione della componente invisibile della misura è limitata alla banda di frequenze che include le variazioni diurne fino alle variazioni annuali (10 $\mu$ Hz - 30 nHz). Considerata l'oggettiva difficoltà di discriminare il segnale dal rumore in questa singolare banda di frequenza in cui il rumore 1/f assume un ruolo preponderante in quanto operiamo ben oltre il ginocchio che contraddistingue la regione spettrale di transizione tra il rumore bianco e il rumore colorato, vengono esaminati sommariamente alcuni criteri per separare i diversi contributi che concorrono alla formazione del rumore totale presente nei segnali registrati nell'osservatorio di Duronia.

In particolare vengono esaminate due bande di frequenza distinte, separate dalla frequenza di ripetizione delle misure assolute  $f_m$ . Questa frequenza definisce due regioni spettrali:  $f > f_m$  e  $f < f_m$ . Nel primo segmento spettrale il rumore complessivo 1/f non viene discriminato dalle misure assolute mediante le basi perché si colloca al di fuori della banda delle misure assolute stesse, nel secondo segmento spettrale le misure assolute consentono di eliminare, entro certi limiti, le varie derive introdotte dalla catena strumentale.

Il monitoraggio del rumore nel primo segmento spettrale è di fondamentale importanza perché, come vedremo, questo rumore si propaga direttamente nei dati assoluti dell'annuario. Premesso che il rumore è un segnale indesiderato, ciò che viene considerato rumore in un certo ambito, può diventare segnale in un altro ambito. Nel nostro caso ad esempio i segnali magnetici di origine esterna diventano rumore quando le 3 componenti misurate si mescolano a causa di un disorientamento della terna oppure a causa della non perfetta ortogonalità degli assi della terna materializzata dal sensore magnetometrico [Love, 2009]. C'è una vastissima letteratura sulla discriminazione del rumore dal segnale [McDonald, 1962], data la peculiarità delle nostre misure noi abbiamo scelto tra i tanti un approccio molto semplice. Il rumore totale viene decomposto in due componenti soltanto, indipendentemente dalla natura del rumore stesso:

- 1) rumore longitudinale
- 2) rumore trasversale

Questa semplice decomposizione del rumore si basa sulla misura simultanea e indipendente delle 3 componenti relative, delle 3 componenti assolute e del modulo del vettore  $\mathbf{F}$  ( $\mathbf{F}$  è il campo magnetico totale). Il rumore longitudinale coinvolge le variazioni del campo magnetico che avvengono parallelamente al vettore campo totale  $\mathbf{F}$ , questo tipo di rumore influenza il modulo del vettore  $\mathbf{F}$  ma ne lascia invariata la giacitura spaziale. Il rumore trasversale invece è associato alle variazioni del campo che avvengono ortogonalmente al campo totale  $\mathbf{F}$ , ne lasciano invariato il modulo ma ne alterano la giacitura spaziale. L'importanza di scindere il rumore totale in queste due componenti risiede nel fatto che nella banda  $f < f_m$  la componente longitudinale del rumore può essere discriminata mediante le misure assolute mentre la componente trasversale non può essere discriminata pertanto si propaga nei dati assoluti finali rimanendo quasi inalterata in tutta la banda. Nella banda  $f > f_m$  entrambe le componenti non vengono discriminate dalle misure assolute. Ma perché abbiamo scelto questa singolare specificazione del rumore? Questa scelta ci consente di separare le due componenti utilizzando il teorema di Helmholtz e mediante l'analisi degli invarianti per rotazione. Il campo magnetico misurato con un magnetometro a protoni è:  $|F_{mis}| = |F_v + n|$ , dove  $n$  è il rumore totale, poiché in pratica  $F_o \gg n$  allora:

$$|\Delta F_{mis}| = |F_{mis}| - |F_o| \approx \sqrt{(F_o \cdot F_o) \left( 1 + \frac{2n \cdot F_o}{F_o \cdot F_o} \right)} - |F_o| \neq |n| \quad (4)$$

Possiamo decomporre il rumore totale  $n$  in una componente longitudinale  $n_l$  e una componente trasversale  $n_t$  :

$$n_l = \frac{F_o \cdot n}{|F_o|}, \quad n_t = \frac{F_o \times n}{|F_o|} \quad (5)$$

Le due componenti del campo magnetico misurato sono completamente diverse, la componente trasversale non altera quasi il campo totale misurato  $F_{mis} \approx F_o + (n_t * 0.0033)^2$  (valido alle nostre latitudini a condizione che  $|n_t| > 1000nT$ ), mentre quella longitudinale si somma direttamente al rumore  $F_{mis} \approx F_o + |n_l|$ . La decomposizione del rumore nelle due componenti trasversali e longitudinali si ispira alla decomposizione di Helmholtz-Hodge. Un campo vettoriale può essere sempre decomposto in 3 componenti: un campo conservativo, un campo solenoidale e un campo armonico, queste tre componenti possono essere caratterizzate mediante gli operatori: rotore e divergenza. Però anche le variazioni naturali del campo geomagnetico possono essere rappresentate mediante la somma di queste 3 componenti. Come facciamo a separare il rumore dal segnale?

In generale alla base c'è la considerazione che il campo magnetico totale misurato possa essere descritto mediante la sovrapposizione degli effetti di  $n$  sorgenti elementari indipendenti ciascuna caratterizzata da una funzione sorgente arbitraria che può anche essere anche completamente random [Robinson, 1974]. Questa semplice rappresentazione garantisce che ciascuna sorgente produca, nel sistema di riferimento cartesiano dell'osservatore, 3 componenti coerenti tra di loro anche nel caso in cui la funzione sorgente sia totalmente casuale, vale a dire che  $cov(B_x B_y) \approx \pm 1$ ,  $cov(B_x B_z) \approx \pm 1$ ,  $cov(B_y B_z) \approx \pm 1$ . Le varie sorgenti di rumore e di segnale che concorrono alla formazione del campo magnetico totale misurato, sono rappresentabili mediante la semplice espressione lineare:

$$B_{tot}(t) = a_1 s_1(t) + a_2 s_2(t) + \dots + a_n s_n(t) \quad (6)$$

in cui i coefficienti  $a_i$  rappresentano il complesso dei parametri scalari e i vettori  $s_i$  tengono conto delle caratteristiche vettoriali complessive associate a ciascuna sorgente. Naturalmente la rappresentazione 6 non consente in generale di discriminare ciascuna delle  $n$  sorgenti sulla base di misure vettoriali puntuali del campo magnetico. Soltanto se le  $n$  funzioni-sorgenti  $s_n(t)$  fossero tutte ortogonali tra di loro allora ciascuna di esse conserverebbe la propria individualità, ma sarebbe necessario uno spazio euclideo  $n$ -dimensionale in cui rappresentarle. Inoltre l'insieme delle sorgenti dovrebbe conservare la stazionarietà rispetto ai parametri scalari e vettoriali soprattutto quelli inerenti la distribuzione spaziale delle sorgenti stesse. Nello spazio ordinario a 3 dimensioni possiamo discriminare soltanto 3 sorgenti ortogonali. Ad esempio l'analisi del rumore dovuto al mescolamento delle componenti, effettuata nei prossimi paragrafi, si basa su questo semplice principio. Se invece vogliamo discriminare un numero maggiore di sorgenti occorre creare uno spazio euclideo  $n$ -dimensionale in cui rappresentare  $n$  sorgenti indipendenti. Occorre poi costruire un set  $n$ -dimensionale di autofunzioni ortogonali ciascuna delle quali occupi un sottospazio distinto. Uno dei modi per conseguire questo obiettivo è l'utilizzo della matrice di covarianza, la quale definisce uno spazio di Hilbert  $n$ -dimensionale. L'analisi del relativo spettro degli autovalori consente di sezionare questo spazio in sottospazi diversamente specificati. Questa diversità è alla base della discriminazione del segnale dal rumore. Un classico esempio è la discriminazione del rumore coerente da quello incoerente. I sottospazi potrebbero essere: lo spazio relativo agli autovalori dominanti ( $\lambda_i \gg 0$ ), quello relativo agli autovalori intermedi (noise coerente,  $\lambda_i > 0$ ), il sottospazio incoerente (rumore bianco o quasi,  $\lambda_i \approx 0$ ) e il sottospazio nullo ( $\lambda_i = 0$ ). Ogni sottospazio può essere utilizzato per codificare un sottoinsieme di sorgenti elementari aventi caratteristiche comuni. Il rumore incoerente tende ad energizzare la diagonale principale e in misura minore anche le due diagonali adiacenti della matrice di covarianza (dipende dalla lunghezza di coerenza del segnale). Questa però è una rappresentazione bucolica della realtà perché le autofunzioni non riflettono esattamente le proprietà delle sorgenti fisiche inoltre questa schematizzazione non è sempre adeguata perché implica la linearità del sistema di rilevamento dei segnali, oltre ovviamente alla linearità dei processi fisici coinvolti, che sono le uniche condizioni che garantiscono la sovrapposizione lineare degli effetti. Poiché inoltre il punto di misura si trova sulla superficie di un conduttore approssimativamente semi-infinito, le sorgenti risultano accoppiate elettromagneticamente con la Terra. Tale interazione dipende tra l'altro dal contenuto spettrale di ciascuna sorgente. Inoltre ciascuna sorgente si trova ad una certa distanza dall'osservatore, tutto

ciò definisce 3 regioni spettrali: “near field”, “transition field” e “far field”. L’osservatorio può trovarsi, rispetto ad una data sorgente elementare, in una di queste 3 regioni, in ciascuna di esse il segnale sorgente viene modificato in misura diversa dal mezzo conduttore. Inoltre nell’intervallo temporale T in cui i segnali sono stati campionati, è richiesto che tutte le sorgenti siano stazionarie. La stazionarietà va riferita a un dato parametro statistico che può essere di tipo intensivo (ampiezza, frequenza, fase, ecc.) oppure di tipo vettoriale (giacitura spaziale del dipolo, parametri di polarizzazione ecc.) Poiché per i nostri segnali magnetici la stazionarietà talvolta non è garantita neanche localmente, per la discriminazione del rumore dai segnali utilizziamo la trasformata KL (Karhunen Loeve) perchè questo operatore non implica necessariamente che la serie temporale B(t) sia stazionaria rispetto ad un dato parametro statistico. Lo spazio n-dimensionale della misura sovente viene ridimensionato per varie ragioni, ad esempio a causa della non indipendenza di un certo numero di variabili. Una volta eseguita la riduzione di dimensionalità, la classificazione dei pattern relativi ai sottoinsiemi detti può essere eseguita utilizzando la comune distanza euclidea. Un ulteriore criterio di discriminazione, sia pure empirico, si basa sulla considerazione che le sorgenti di rumore interne agli strumenti, che in alcuni casi concreti rappresentano gran parte del rumore complessivo, occupano spazi diversi dalle sorgenti fisiche: il rumore interno non viene deconvoluto dall’operatore misura M,  $B = M(a_i S_i) + n$ , perchè l’osservabile non viene generato da alcuna grandezza fisica all’ingresso dello strumento. Mentre se il rumore è esterno alla catena strumentale l’operatore misura agisce su entrambi:  $B = M(a_i S_i) + n$ . Naturalmente non tutti i parametri statistici associati all’osservabile sono sensibili a questa asimmetria nella deconvoluzione della grandezza fisica in esame. Di volta in volta viene scelto il parametro maggiormente influenzato, generalmente il parametro chiave è la fase. Queste varie caratterizzazioni si traducono concretamente nel confinare segnali diversi in sottospazi distinti. Ciacuno di questi forma un pattern nei relativi iperpiani che può essere estremamente semplice come nel caso dello spazio dei segnali, ma anche molto complesso come nel caso del rumore coerente generato da sorgenti complesse ed estese come ad esempio le ferrovie elettrificate in corrente continua [Palangio et al. 1991]. Queste diverse tipologie di sorgenti possono essere rappresentate mediante le autofunzioni  $\phi_n(t)$  derivate dalla seguente equazione:

$$\int_0^{\tau} C[B(\tau)B(t)]\phi_n(\tau)d\tau = \lambda_n \phi_n(t) \quad (7)$$

Dove  $\lambda_n$  sono gli autovalori della matrice di covarianza C. Nel caso discreto in cui  $\tau$  sia il passo di campionamento, nell’analisi standard a 24 ore dei segnali campionati a 1 Hz, il numero totale di campioni è N=86400, si sceglie una finestra temporale di lunghezza  $m\tau$  e si costruisce la matrice di covarianza relativa a questa finestra:

$$C_m = \begin{pmatrix} B(t)B(t) & B(t)B(t+\tau) & \dots & B(t)B(t+m\tau) \\ B(t+\tau)B(t) & B(t+\tau)B(t+\tau) & \dots & B(t+\tau)B(t+m\tau) \\ B(t+2\tau)B(t) & B(t+2\tau)B(t+\tau) & \dots & B(t+2\tau)B(t+m\tau) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ B(t+m\tau)B(t) & B(t+m\tau)B(t+\tau) & \dots & B(t+m\tau)B(t+m\tau) \end{pmatrix} \quad (8)$$

Si opera una media mobile di lunghezza  $m\tau$ , spostando la finestra di un solo campione all’interno della finestra temporale complessiva  $(N)\tau$ . La matrice di covarianza complessiva può essere calcolata mediante la matrice A che ha  $m + 1$  righe ( $\tau=0, \dots, m$ ), e  $N - m + 1$  colonne ( $\tau=0, \dots, N - m + 1$ ):

$$C_{compl.} = \frac{1}{N - m + 1} AA^T \quad (9)$$

Questa è una matrice quadrata simmetrica, semi-definita positiva, con tutti gli autovalori reali e positivi (o nulli).

La ricostruzione dei segnali e del rumore viene effettuata mediante le autofunzioni della matrice di covarianza, ciascuna di queste funzioni viene associata ad una sorgente elementare indicata nella relazione 3.

Naturalmente per sorgenti complesse, come ad esempio quella responsabile della variazione diurna del campo magnetico, viene rappresentata dalla sommatoria di un certo numero di sorgenti elementari e quindi dalla sommatoria di autofunzioni tutte giacenti nello stesso iperpiano dello spazio di Hilbert. Infatti il sistema di correnti ionosferiche responsabile della variazione diurna è caratterizzata da una estensione spaziale di migliaia di chilometri mentre l'osservatore sulla superficie terrestre si trova a circa 100 km di distanza minima dalla sorgente (altezza dello strato E ionosferico). Ciascuna regione di questa sorgente genera un campo magnetico che in alcune bande di frequenza può risultare coerente con tutti gli altri contributi prodotti da tutte le altre regioni della stessa sorgente e una componente invece che è del tutto spazialmente scorrelata. Questo sistema fisico si muove rispetto all'osservatore e i suoi parametri intensivi variano nel tempo. L'osservatore a Terra dovrebbe misurare la somma di due effetti: quello dovuto al moto della sorgente rispetto all'osservatore e quello dovuto alla variazione temporale intrinseca della sorgente. Infatti lo sviluppo in armoniche sferiche del campo generato da questa sorgente contiene un elevato numero di termini, nella rappresentazione 3 la sorgente viene decomposta in  $m$  sorgenti elementari indipendenti tra di loro. Mentre la sorgente a larga banda costituita dalla "ring current" ha una estensione spaziale comparabile con la distanza dall'osservatore a Terra ed è approssimativamente fissa, lo sviluppo in armoniche sferiche ha un solo termine dominante, pertanto questa sorgente potrebbe essere rappresentata anche con una sola autofunzione. Nell'espressione 3 le sorgenti fisiche semplici possono essere rappresentate mediante un solo termine mentre quelle complesse sono associate a insiemi di termini, ciascuno insieme è riferito ad una stessa sorgente fisica.

### 3. Analisi degli invarianti

Lo studio del rumore mediante gli invarianti si basa sul fatto che il rumore ortogonale a  $\mathbf{F}$  induce una rotazione del campo totale che può anche essere vista come una rotazione virtuale della terna variometrica, ma una generica rotazione virtuale della terna cartesiana di riferimento può essere decomposta nella rotazione intorno ai 3 assi ortogonali. Possiamo avere 3 tipologie di invarianti: assiali, planari e volumetrici. Una rotazione del sistema di riferimento intorno ad uno dei 3 assi lascia invariate 3 componenti: la componente lungo tale asse, il modulo della componente nel piano ortogonale all'asse di rotazione e il modulo del campo totale  $\mathbf{F}$ . Queste 3 componenti generano 7 funzioni invarianti per rotazione che possono essere valutate utilizzando le misure standard scalari e vettoriali, variometriche e assolute.

Ad esempio una rotazione intorno all'asse X implica 3 invarianti: la componente lungo l'asse X,  $B_x$ , il modulo del campo nel piano:

$$YZ, \sqrt{B_y^2 + B_z^2}$$

e il campo totale

$$\sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}.$$

La funzione invariante volumetrica coinvolge il campo totale  $\mathbf{F}$ . In un osservatorio standard abbiamo 3 funzioni del campo totale  $\mathbf{F}$ :

- 1) la  $F_m(t)$  misurata mediante un magnetometro a protoni
- 2) la  $F_v(t)$  calcolata dai dati variometrici
- 3) la  $F_r(t)$  calcolata mediante la rotazione virtuale della terna variometrica

La seconda può essere ottenuta tramite la formula:

$$F_v = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad [\text{Jankowski and Sucksdorff, 1996}],$$

mentre la terza si calcola ruotando virtualmente la terna variometrica intorno ai due assi Z e Y. Per calcolare  $F_r$  si ruotano i dati prima intorno all'asse Z di un angolo pari alla declinazione magnetica  $D$ , in questo modo l'asse X coincide con la componente orizzontale H:

$$\begin{pmatrix} B_{xD} \\ B_{yD} \\ B_{zD} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos D & \sin D & 0 \\ -\sin D & \cos D & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} B_{xm} \\ B_{ym} \\ B_{zm} \end{pmatrix} \quad (10)$$

$B_{xm}$ ,  $B_{ym}$  e  $B_{zm}$  sono i dati variometrici assoluti ovvero i dati misurati a cui sono state aggiunte le basi. Con questa rotazione  $B_{yD}=0$ . Poi si ruotano i dati intorno all'asse Y di un angolo pari alla inclinazione magnetica I:

$$\begin{pmatrix} B_{xDI} \\ B_{yDI} \\ B_{zDI} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos I & 0 & \sin I \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin I & 0 & \cos I \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} B_{xD} \\ B_{yD} \\ B_{zD} \end{pmatrix} \quad (11)$$

Con questa rotazione  $B_{zDI}=0$ , pertanto  $B_{xDI} = F_r$ .

Questa procedura per ricavare il campo totale ha un senso soltanto se il complesso delle sorgenti responsabile del campo misurato è assimilabile ad una sola sorgente elementare (eq. 3). Se il campo misurato è dato dalla sovrapposizione di più sorgenti elementari spazialmente distinte, questa procedura genera un campo totale diverso da quello calcolato con la espressione citata prima. L'analisi delle funzioni di covarianza nei 3 piani cartesiani:  $cov(B_x B_y)$ ,  $cov(B_x B_z)$ ,  $cov(B_y B_z)$ , consente di valutare il grado di molteplicità delle sorgenti responsabili dei segnali misurati.

In pratica il rumore associato alla misura del campo totale e il rumore associato alla ricostruzione del campo totale mediante rotazione virtuale della terna variometrica:

$$\begin{aligned} |F_m(t)| &= |F_o(t)| + |n_m(t)| \\ |F_v(t)| &= |F_o(t)| + |n_v(t)| \\ |F_r(t)| &= |F_o(t)| + |n_r(t)| \end{aligned} \quad (12)$$

In realtà  $F_v = F_r$  quindi  $n_v(t) = n_r(t)$ .

Naturalmente  $n_m(t)$  e  $n_v(t)$  e  $n_r(t)$  e essendo funzioni stocastiche, non è possibile esprimerne l'andamento nel tempo mediante funzioni algebriche o trascendentali [Papoulis et Pillai, 2002], pertanto queste due espressioni vanno intese in termini di funzioni di distribuzioni, se invece il rumore è gaussiano queste espressioni vengono sostituite semplicemente con i primi due momenti della distribuzione.

Abbiamo pertanto un solo invariante volumetrico:

$$F_m(t) - F_v(t) \quad (13)$$

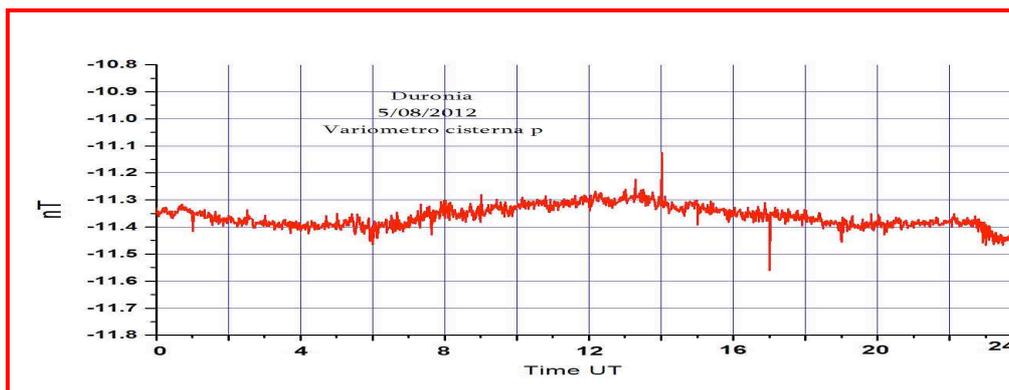
Questo non rappresenta il rumore totale, tale funzione tiene conto soltanto del rumore divergente, cioè quello parallelo al vettore  $\mathbf{F}$ . Negli osservatori standard questa funzione invariante dovrebbe oscillare intorno allo zero con ampiezze estremamente piccole, lo scarto quadratico medio non dovrebbe superare il decimo di nT nell'arco delle 24 ore. Su base annua le oscillazioni dovrebbero rimanere al di sotto di 1 nTpp.

Per concludere abbiamo 7 funzioni invarianti, l'analisi di queste funzioni è resa possibile dalla peculiarità delle misure geomagnetiche, queste implicano la misura continua simultanea e indipendente del modulo del vettore campo magnetico  $\mathbf{F}$ , la misura relativa e assoluta delle 3 componenti  $B_x$ ,  $B_y$  e  $B_z$ .

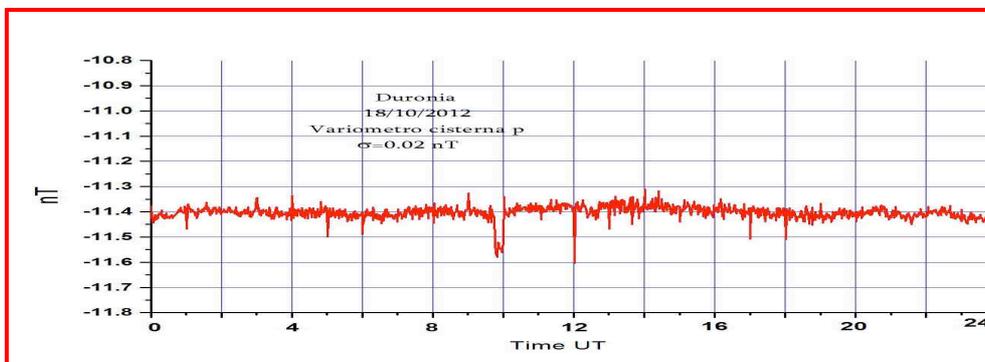
Per gli altri due invarianti, assiali e planari, non abbiamo misure assolute indipendenti al minuto come per il campo totale, disponiamo soltanto delle misure assolute eseguite una o due volte a settimana. Ovviamente la ricostruzione dei valori assoluti al minuto mediante l'interpolazione lineare al minuto delle basi, consente di valutare questi due invarianti soltanto nella banda al di sotto della frequenza di ripetizione delle misure assolute,  $f < f_m$ . Un esempio di invariante volumetrico è illustrato nelle figure 1,2,3,4,5 e 6 . Nelle figure 1 e 2 è riportato l'andamento nelle 24 ore della funzione  $F_m(t) - F_r(t)$  registrato dal variometro VAR1 posizionato nella cisterna più profonda dell'osservatorio di Duronia. Le due figure si riferiscono a due giorni caratterizzati da una diversa escursione termica diurna. Il 5 agosto, uno dei giorni più caldi del 2012 in

cui l'escursione termica diurna è stata di circa  $20^\circ$  e il 18 ottobre in cui la massima escursione termica è stata di  $5^\circ$ . Si nota che l'effetto della variazione diurna della temperatura sulla strumentazione rimane comunque confinata all'interno di 0.1 nT picco-picco anche in presenza di una notevolissima variazione diurna della temperatura. Il segnale squadrato è causato da un'automobile che ha sostato vicino all'osservatorio per circa 20 minuti. Nelle figure 3,4,5 e 6 è riportato la stessa funzione ricostruita con i segnali misurati a Castello Tesino in 4 giorni diversi del 2012 scelti a caso. In questi grafici si nota una componente del rumore con un periodo di 24 ore, dovuta alla non adeguata termostatazione del magnetometro. L'ampiezza di questo rumore è molto elevata se confrontata con gli standard IAGA-2002 [INTERMAGNET, Technical Reference Manual, Version, 4.5 2011]. Nelle figure 1 e 2 è mostrato il rumore associato alle misure variometriche di Duronia, si nota che l'ampiezza picco-picco è 30-40 volte inferiore al rumore di Castello Tesino. Inoltre si nota che anche la componente sovrapposta a più alta frequenza è molto meno intensa, circa 20 volte più piccola. Questa è dovuta principalmente all'operatore misura. Nelle misure eseguite a Castello Tesino si assume che l'operatore misura si identifichi con una matrice unitaria, ciò non consente di deconvolvere correttamente i segnali misurati. Queste componenti del rumore sono molto importanti perché non vengono eliminate con l'applicazione delle basi, perché occupano un segmento spettrale che si colloca al di sopra della banda delle misure assolute, pertanto si propagano nell'annuario inalterate [INTERMAGNET Technical Reference Manual, Version 4.3, 2007].

Il rumore rappresentato nelle figure 1,2,3,4,5, e 6 non è il rumore totale, rappresenta soltanto la componente del rumore totale parallela al vettore  $\mathbf{F}$ , non tiene in alcun conto delle componenti trasversali. Come vedremo nei prossimi paragrafi queste componenti sono le più perniciose perché non vengono discriminate dalle misure assolute in tutta la banda.



**Figura 1.** Esempio di rumore longitudinale del variometro VAR1 situato nella cisterna “p” dell’osservatorio di Duronia in un giorno in cui l’escursione termica è molto elevata.



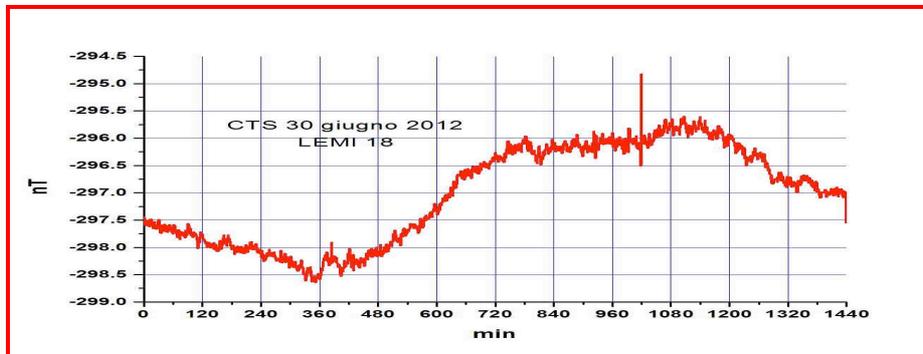
**Figura 2.** Esempio di rumore longitudinale del variometro VAR1 situato nella cisterna “p” dell’osservatorio di Duronia in un giorno in cui l’escursione termica è molto bassa.



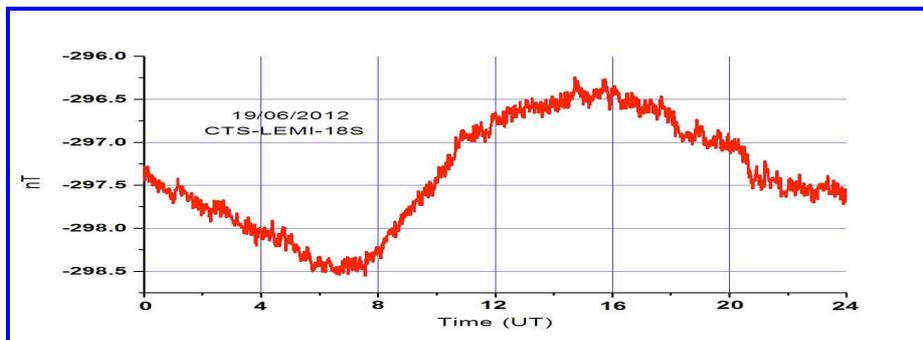
**Figura 3.** Esempio di rumore longitudinale del variometro LEMI-18S di Castello Tesino, 27 giugno 2012.



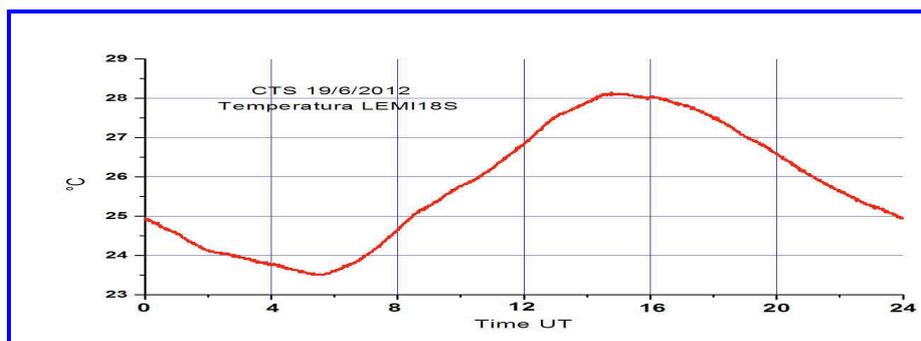
**Figura 4.** Esempio di rumore irrotazionale manifestato dal variometro LEMI-18 sospeso di Castello Tesino.



**Figura 5.** Esempio di rumore longitudinale del variometro LEMI-18S di Castello Tesino, 30 giugno 2012.



**Figura 6.** Altro esempio di rumore longitudinale manifestato dal variometro LEMI-18 sospeso di Castello Tesino.



**Figura 7.** Andamento della temperature del LEMI 18 sospeso di Castello Tesino del 19 giugno 2012.

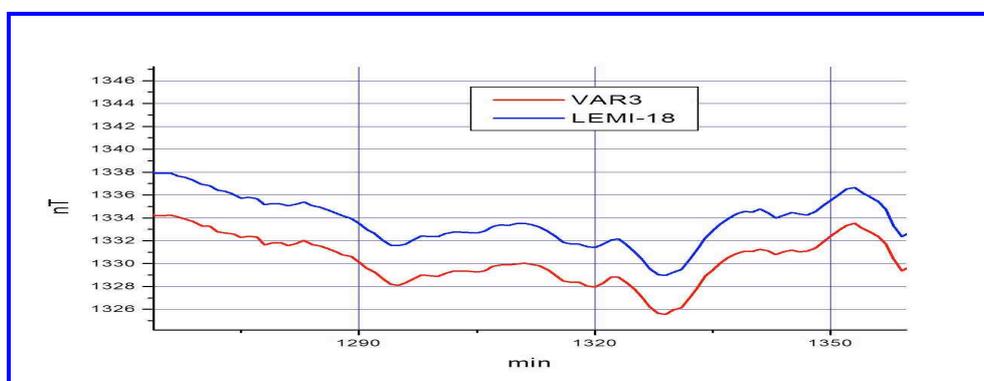
Nella figura 7 è riportato l'andamento a 24 ore della temperatura del sensore LEMI-18S di Castello Tesino, è la dimostrazione che la variazione diurna del rumore variometrico longitudinale è legato all'onda termica diurna.

#### 4. Analisi del rumore magnetico

Le anomalie ricorrenti che troviamo nei dati analizzati in questa nota sono principalmente le seguenti:

- 1) mescolamento delle componenti dovute alla non equipotenzialità dei 3 pilastri: misure assolute, variometro e campo totale.
- 2) Mescolamento delle componenti dovute al disorientamento statico della terna variometrica.
- 3) Deriva termica dei sensori variometrici.
- 4) Mescolamento delle componenti dovuto al movimento continuo della terna variometrica indotto dai movimenti del pilastro.

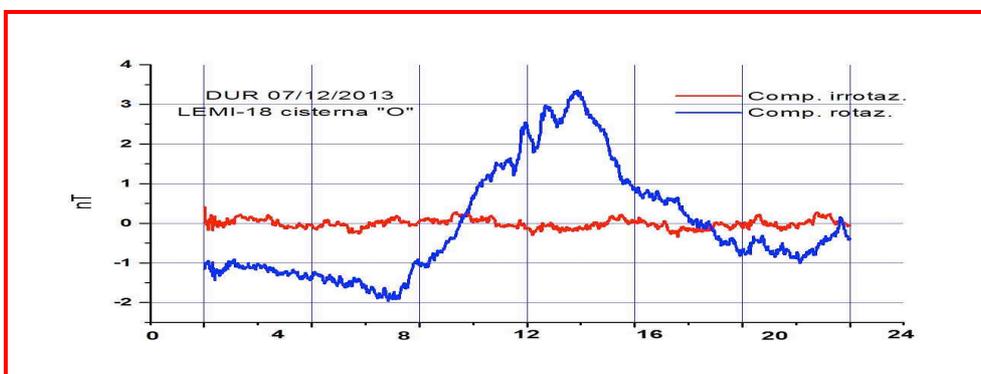
Il problema del mescolamento dei dati affligge invariabilmente tutti i nostri osservatori magnetici. Sarebbe opportuno effettuare un controllo periodico dei dati per evitare questo tipo di inconveniente. Ad esempio il 22 ottobre 2013 venne installato a Duronia un variometro LEMI-18 come supporto al VAR3 in caso di avaria. La figura 3 mostra la componente By misurata dai due variometri VAR3 e dal LEMI-18. Sebbene i due strumenti siano completamente diversi tra di loro, il primo è un magnetometro a protoni vettoriale mentre il secondo è un flux-gate digitale, apparentemente i due segnali hanno lo stesso andamento temporale nei minimi dettagli, sono praticamente sovrapponibili. Effettuando l'analisi classica del rumore a 24 ore emerge invece la presenza di un consistente mescolamento delle componenti.



**Figura 8.** Confronto tra i due variometri VAR3 e LEMI-18, componente Y.

La figura 9 mostra l'andamento delle due componenti del rumore totale. Si nota un considerevole livello del rumore rotazionale la cui ampiezza picco-picco è 30 volte più grande del variometro VAR3. Anche la componente irrotazionale è eccessivamente alta, non dovrebbe superare 0.2 nT picco picco. Considerata la precisione e l'accuratezza del LEMI-18, queste componenti dovrebbero essere caratterizzate da valori picco-picco/die dell'ordine di 100-200 pT. Ove questi dati venissero utilizzati nella redazione dell'annuario, l'anomalia messa in luce da questa analisi non verrebbe filtrata dalle misure assolute, pertanto ce la ritroveremmo inalterata nei dati finali. Questo inconveniente ci suggerisce che tutte le operazioni relative alla manutenzione della strumentazione effettuate a Duronia e in qualsiasi altro osservatorio dovrebbero seguire i protocolli standard illustrati nei manuali di osservatorio citati in bibliografia [McComb, 1952]. Pertanto l'impiego di questi dati per riempire eventuali vuoti del VAR3 pone qualche problema.

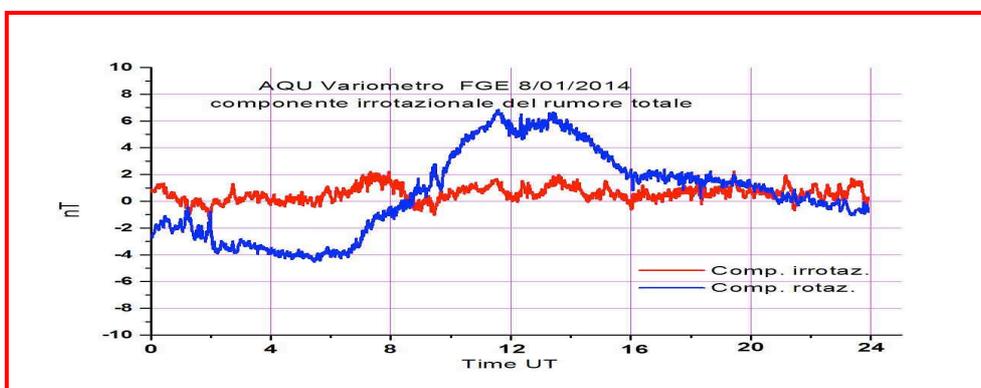
Un esempio di separazione delle due componenti del rumore totale è mostrato nella figura 9, in rosso è rappresentato il rumore parallelo e in blu è riportato il rumore trasversale al vettore  $\mathbf{F}$ . Le due componenti sono state calcolate con i segnali registrati dal nuovo variometro digitale LEMI-18 installato a Duronia il 22 ottobre 2013. L'ampiezza picco-picco di questo rumore risulta essere 40-50 volte più grande di quello canonico.



**Figura 9.** Rumore esibito dal nuovo variometro LEMI-18 installato a Duronia il 22 ottobre 2013. Componente euleriana (blu) e componente non euleriana (rosso) nella banda  $f > f_m$  (1 mHz - 1  $\mu$ Hz).

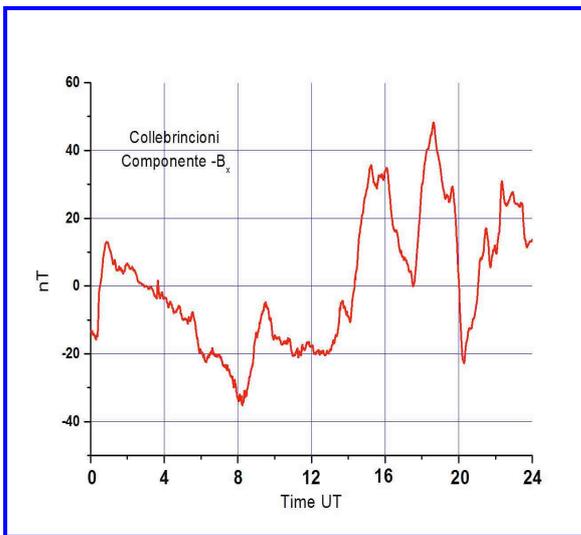
Un altro esempio è illustrato nelle figure 10 e 11. L'Osservatorio di Preturo è stato scelto per diventare il terzo nodo dell'interferometro nell'ambito del progetto FIRB. Nel mese di dicembre 2013 il variometro di Preturo è stato reinstallato al fine di georeferenziare la terna di riferimento.

Anche in questo caso l'ampiezza picco-picco delle due componenti del rumore risulta essere molto più elevata di quella standard, dovrebbe essere 50-60 volte più piccola.

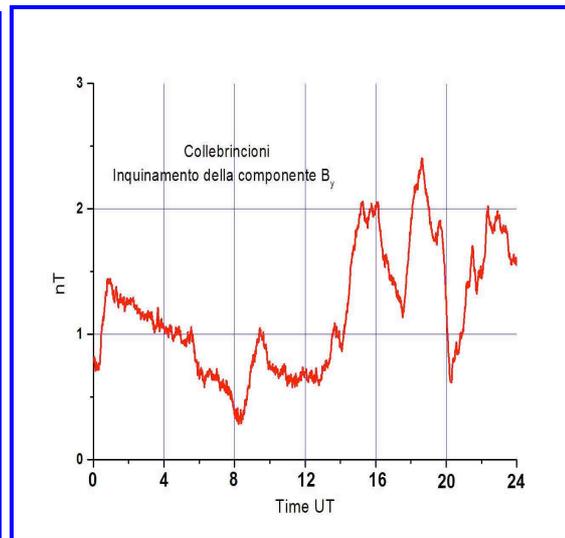


**Figura 10.** Componenti euleriane e intensive del rumore totale dal variometro FGE di Preturo.

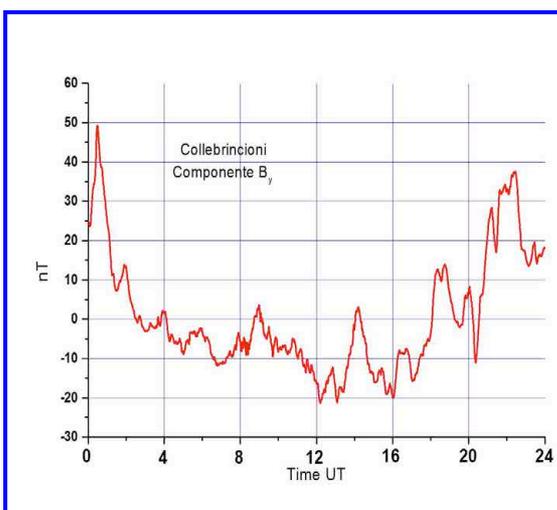
Un altro esempio ancora riguarda il variometro installato nel mese di ottobre 2013 a Collebrincioni. Sono stati esaminati i segnali campionati a 1 Hz, le figure 11, 12, 13 e 14 riportano l'effetto del mescolamento delle componenti orizzontali causato dal disorientamento azimutale della terna variometrica. La figura 15 mostra l'inquinamento della componente verticale  $B_z$  da parte delle componenti orizzontali  $B_x$  e  $B_y$ , segno evidente questo che oltre al disorientamento azimutale vi è anche un consistente contributo dovuto al dislivellamento del piano XY della terna variometrica. Naturalmente l'inquinamento delle componenti mostrato nelle figure 12, 14 e 15 dipende dalla variabilità del campo geomagnetico, se è in atto una tempesta magnetica molto intensa tale rumore può crescere considerevolmente. Le figure 11 e 12 sono state accostate per mettere in rilievo la similarità dei due grafici, infatti la figura 12 mostra il rumore dovuto alla proiezione della componente  $B_x$  sull'asse Y, cambiata di segno; la componente  $B_x$  è riportata nella figura 11. L'andamento temporale delle due funzioni, a parte il fattore di scala, è quasi identico.



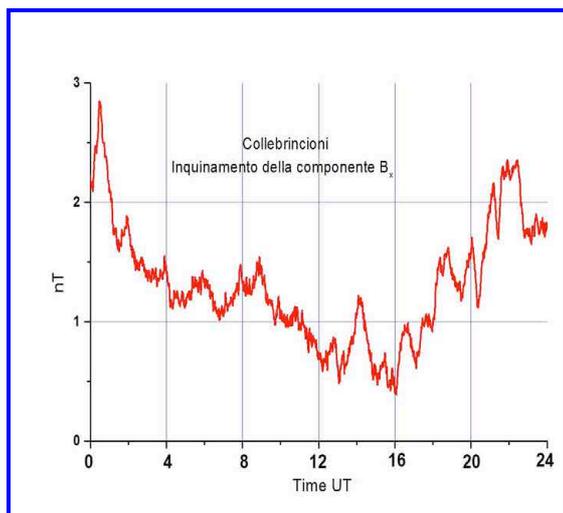
**Figura 11.** Componente  $B_x$  invertita.



**Figura 12.** Inquinamento della componente  $B_y$ .



**Figura 13.** Componente  $B_y$ .



**Figura 14.** Inquinamento della componente  $B_x$ .

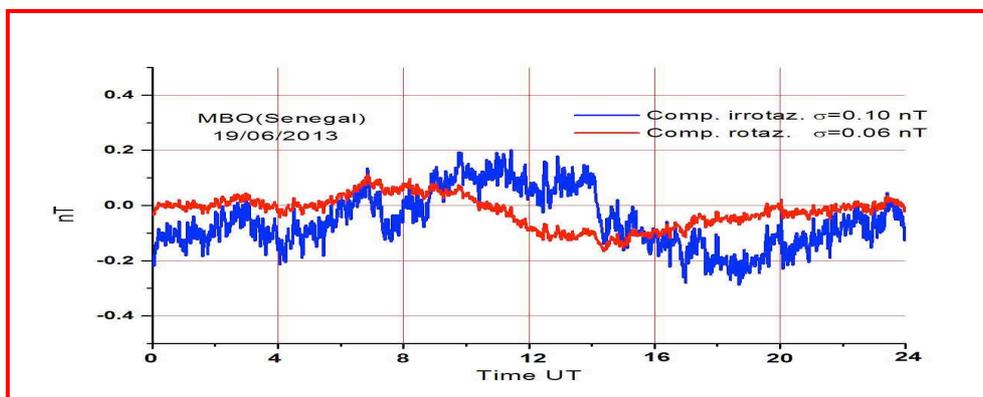


**Figura 15.** Inquinamento della componente verticale  $B_z$  da parte delle componenti orizzontali  $B_x$  e  $B_y$ .

La figura 14 mostra il rumore dovuto alla proiezione della componente  $B_y$  sull'asse X, la componente  $B_y$  è riportata nella figura 13. anche in questo caso L'andamento temporale delle due funzioni, a parte il fattore di scala, è quasi identico.

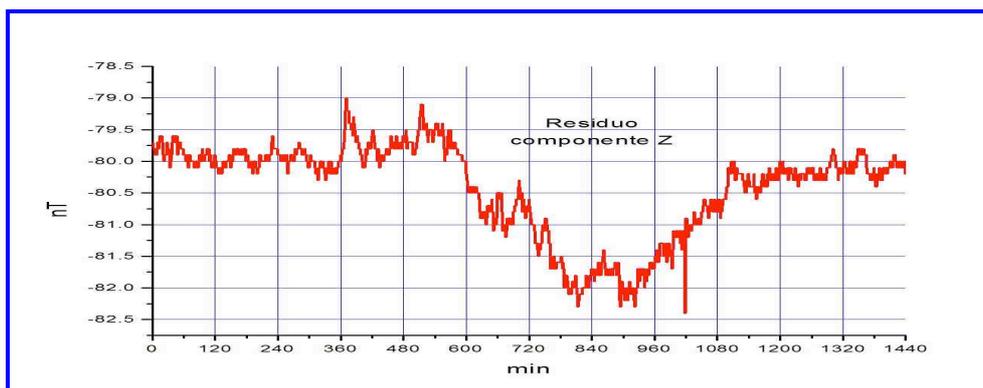
I dati dell'osservatorio di Collebrincioni, di Preturo e di Duronia dovrebbero servire per studiare i fenomeni sismo-magnetici. Considerato che l'ampiezza dei segnali associati ai processi geodinamici in questa banda di frequenze è molto piccola, è centinaia di volte inferiore alle anomalie artificiali messe in evidenza in questi grafici, risulterebbe piuttosto arduo affrontare il tema utilizzando queste misure. Inoltre il rumore a più alta frequenza, rappresentato dall'erbetta sovrapposta alla variazione diurna del rumore, è molto più intenso del rumore di fondo dei 3 siti misurato pochi mesi prima di queste recenti installazioni.

Nella figura 16 sono riportate le due componenti del rumore totale calcolate con i dati dell'Osservatorio Geomagnetico Nazionale del Senegal. Entrambe queste componenti presentano un andamento periodico a 24 ore a cui è sovrapposta una componente casuale a più alta frequenza. La componente rotazionale, in rosso, è dovuta principalmente ai movimenti del pilastrino su cui poggia il sensore del magnetometro, la componente irrotazionale, in blu, è invece causata dagli effetti della variazione diurna della temperatura sulla strumentazione. Si nota che il rumore complessivo è molto inferiore a quello registrato a Castello Tesino ( figure 3, 4, 5 e 6), a Duronia, di L'Aquila e a Collebrincioni.



**Figura 16.** Analisi del rumore effettuata con i dati dell'osservatorio MBO (Senegal).

Un altro esempio di contaminazione dei dati causata dal mescolamento dei segnali è illustrato nella figura 17 in cui è presente un consistente residuo della variazione diurna della componente  $B_y$  (fig. 18) sulla componente verticale  $B_z$ . Potrebbe essere interpretato anche come un effetto induttivo.



**Figura 17.** Contaminazione della componente  $B_z$  in gran parte dovuta alla variazione diurna della componente  $B_y$  (annuario 2010 di Castello Tesino).



**Figura 18.** Componente orizzontale  $B_y$ .

Un altro aspetto concerne il concetto generale che la misura perturba sempre il sistema fisico sotto osservazione. Spesso trascuriamo l'effetto prodotto dall'alterazione della grandezza fisica da misurare da parte del sistema stesso con cui effettuiamo la misura. Nei sensori flux-gate e nei sensori search-coil vengono impiegati nuclei ad alta permeabilità magnetica. Questi, in presenza del campo magnetico terrestre da misurare, si magnetizzano creando un campo magnetico addizionale molto elevato alterando localmente il campo magnetico. Inoltre in una configurazione triassiale di sensori il campo prodotto da un sensore influenza il sensore vicino. Il campo prodotto dai nuclei ferromagnetici è caratterizzato da elevati gradienti spaziali, spesso molto più grandi dei gradienti ambientali presenti in un osservatorio geomagnetico. La presenza di elevati gradienti magnetici altera la sensibilità e il noise intrinseco dello strumento. Nei sensori flux-gate che operano in campo nullo, nei quali la corrente di feed-back crea dinamicamente un campo opposto a quello esterno, in cui ciò che si misura è la corrente necessaria a mantenere nullo il campo magnetico in cui è immerso il nucleo ferromagnetico, questo effetto è minimizzato ma soltanto in parte perché ciò che viene parzialmente eliminata è la magnetizzazione longitudinale, quella trasversale rimane quasi inalterata. Infatti nei nuclei toroidali la magnetizzazione trasversale è esattamente uguale a quella longitudinale, il feedback elimina soltanto il 50% della magnetizzazione totale. Neanche nei nuclei lineari o ellittici la magnetizzazione longitudinale viene del tutto annullata a causa dell'effetto ai bordi del nucleo. Ad esempio la componente Y ne risente maggiormente perché la magnetizzazione trasversale è quella indotta dalla componente totale del campo mentre per la componente Z ne risente di meno perché la magnetizzazione trasversale è quella indotta dalla componente orizzontale che, alle nostre latitudini, è inferiore alla componente verticale. La magnetizzazione trasversale è responsabile in parte anche della deriva termica dei sensori. Quasi tutti i parametri che caratterizzano un sensore flux-gate dipendono in varia misura dalla temperatura. Se volessimo rappresentare l'operatore misura che tenga conto di tutto, conservando la

linearità, dovremmo utilizzare un tensore 3x3 i cui elementi siano funzioni linearizzate di almeno due variabili indipendenti e il tensore potrebbe essere anche non simmetrico pertanto potremmo avere autovalori complessi, dal punto di vista della misura un autovalore immaginario sarebbe leggermente imbarazzante anche se collocabile in una interpretazione diversa della misura. Il magnetometro a protoni viene considerato uno strumento assoluto e inoltre non altera la grandezza da misurare, ma non è così perché la misura della frequenza di precessione implica un clock, la cui stabilità non è garantita per qualsiasi variazione della temperatura e per qualsiasi intervallo temporale di funzionamento. Per ottenere un'accuratezza di 0.1 nT e garantire che tale accuratezza si conservi per un anno è necessario che il clock abbia una stabilità di 0.005 Hz, ciò implica che la stabilità della frequenza del clock sia dell'ordine di 1 ppm/anno (una parte per milione all'anno). Pertanto fissata la soglia di accuratezza richiesta, il clock deve rimanere stabile entro una data finestra temporale e una data finestra termica. Poi ci sono le derive del clock dovute all'invecchiamento dei componenti elettronici. Inoltre c'è anche l'influenza del processo fisico di misura sulla grandezza da misurare, ad esempio il diamagnetismo elettronico dovuto alla precessione degli elettroni intorno al campo da misurare, opposta alla precessione dei protoni, genera un campo magnetico addizionale che si somma al campo magnetico da misurare. I protoni si trovano immersi nella somma dei due campi durante la misura. Il campo dovuto al diamagnetismo elettronico è un campo quasi statico perché la frequenza di precessione elettronica è di 3 ordini di grandezza maggiore della frequenza di precessione protonica. L'entità di questo effetto dipende dalle proprietà fisiche della molecola di base del liquido protonico. Poi c'è il paramagnetismo molecolare per esempio dell'ossigeno gassoso disciolto, sempre presente qualunque sia il tipo di liquido utilizzato, poi c'è l'effetto di bordo esercitato dalle superfici interne del contenitore e delle superfici delle bobine sulla popolazione di spin protonico. Ci sono molti altri effetti di minore impatto sulle misure effettuate in ambito geomagnetico, in altri contesti metrologici potrebbero avere un certo peso. Tutto ciò implica che la frequenza di precessione non è legata al campo magnetico tramite il solo rapporto giromagnetico del protone ma entrano in gioco altre dipendenze funzionali. Infine anche il valore del rapporto giromagnetico adottato non si mantiene proprio costante nel tempo, è mutato diverse volte nel corso degli ultimi 50 anni [Mohr and Taylor, 2005]. Con il progredire delle ricerche metrologiche questa costante fondamentale della Fisica ha subito cambiamenti significativi [Cohen and Taylor, 1973], l'ultimo aggiornamento comunicato dal CODATA (Committee on Data for Science and Technology) è del 2008, la IAGA ha adottato il nuovo valore a partire dal 2010. tutti i magnetometri a protoni costruiti prima del 2010 vanno pertanto aggiornati. Poiché l'effetto dominante nei magnetometri a protoni è la deriva del clock, gli strumenti di riferimento per la misura quasi-metrologica del campo magnetico sono quelli muniti di un clock al cesio. (A Duronia è presente un magnetometro GEOMAG predisposto per essere collegato ad un oscillatore atomico modello Symmetricom CSAC). Tutti questi effetti vengono inglobati dal costruttore in costanti interne non accessibili all'operatore. Pertanto tutte queste costanti andrebbero aggiornate periodicamente e inglobate nell'operatore misura. I magnetometri a protoni presenti nell'osservatorio di Duronia vanno ricalibrati almeno ogni 10 anni. Ma qual è il concreto impatto sulle misure di tutti questi effetti secondari? Dipende dall'accuratezza che si desidera abbiano i dati finali. Nell'ambito della ricerca è indispensabile che l'accuratezza dei dati assoluti sia almeno di 1 nT. In altri ambiti tutti questi effetti potrebbero non avere alcun rilievo. Se il rumore magnetico locale è molto elevato oppure le misure vengono impiegate a livello amatoriale non ha alcun senso considerare effetti del secondo ordine. Tutto dipende dall'ambito di utilizzo dei dati e dal contesto in cui viene effettuata la misura.

Ad esempio nella fig. 19 è riportato il  $\Delta F$  di CTS, questa funzione residua dovrebbe avere una distribuzione gaussiana con valore medio intorno allo zero e  $\sigma < 0.2$  nT. Invece si osserva una palese contaminazione da parte della componente  $B_y$  con un periodo di 24 ore e una deriva a più lungo periodo. Apparentemente la presenza di  $B_y$  nel  $\Delta F$  sembra inspiegabile perché alle nostre latitudini

$$\frac{\partial F}{\partial B_y} \approx 0.02$$

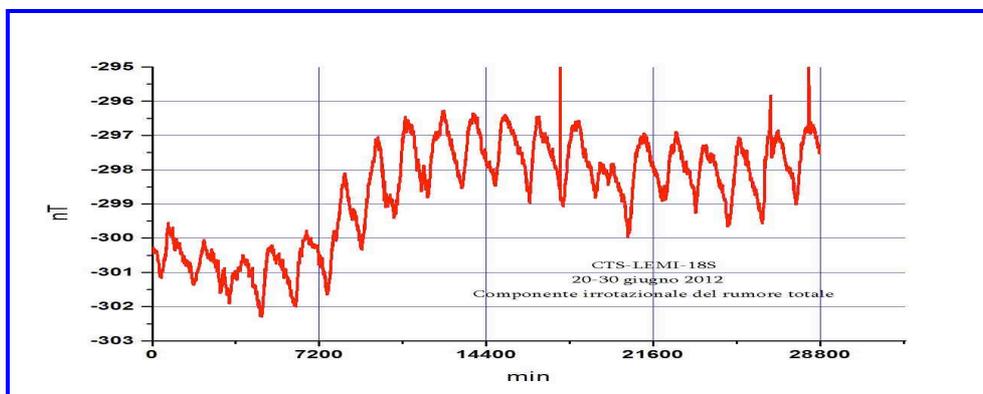
mentre

$$\frac{\partial F}{\partial B_x} \approx 0.5 \text{ e } \frac{\partial F}{\partial B_z} \approx 0.9.$$

Inoltre la componente  $B_y$  è quasi ortogonale a  $F$ , la proiezione di  $B_y$  su  $F$  è di circa 20 nT, mentre la variazione diurna di  $B_y$  proiettata su  $F$  è inferiore a 0.5 nT. In realtà queste considerazioni apparentemente plausibili, non sono propriamente corrette. Questa contaminazione è presente, in misura diversa, in tutti gli osservatori magnetici INGV.

Le azioni propedeutiche alla costruzione di un osservatorio geomagnetico riguardano, tra gli altri aspetti, soprattutto la mappatura magnetica dell'area dove si pensa di erigere l'osservatorio. È molto importante conoscere la distribuzione spaziale dei gradienti magnetici, non basta misurare i gradienti verticali e orizzontali della componente totale  $F$ , è necessario conoscere i gradienti orizzontali delle componenti, soprattutto della declinazione magnetica  $D$ . Queste informazioni servono per scegliere l'ubicazione della strumentazione relativa alle misure assolute, alle misure variometriche e alla misura della componente totale  $F$ . Questi 3 punti devono risultare equipotenziali rispetto alle anomalie magnetiche locali. La non equipotenzialità di questi tre punti può creare dei problemi. Nella fase di installazione di un variometro, poniamo all'istante  $t_0$ , nel riferimento geografico XYZ, è necessario effettuare nello stesso istante la misura assoluta della declinazione  $D(t_0)$ , della inclinazione  $I(t_0)$  e del campo totale  $F(t_0)$  questi valori servono per orientare la terna variometrica. Se però questi valori nei 3 siti sono diversi e non ne conosciamo l'entità, si ha che la terna variometrica e la terna materializzata dalle misure assolute non sono coassiali. Ciò significa che i due sistemi non misurano esattamente la stessa cosa. L'orientazione nel riferimento magnetico HDZ invece è relativo all'istante  $t_0$ , strumenti diversi orientati in tempi diversi nel sistema HDZ hanno una diversa giacitura spaziale rispetto alla terna di riferimento geografica XYZ, pertanto le componenti orizzontali misurate da questi strumenti non sono esattamente le stesse [Trigg, 1988]. Da ciò nasce l'esigenza di conoscere i valori assoluti di  $D(t_0)$  e  $I(t_0)$  e  $F(t_0)$ .

Un altro fattore che determina il mescolamento delle componenti è determinato dai protocolli adottati nel livellamento del piano XY della terna variometrica. Molto spesso viene effettuato soltanto il livellamento meccanico. La sensibilità delle livelle montate sui sensori variometrici commerciali di solito è di 10-20 primi d'arco, (naturalmente ci sono anche variometri che montano livelle calibrate con sensibilità di 6"). Ciò significa che quando il sensore è in bolla il dislivellamento è contenuto nell'intervallo +/- 10'-20'. L'effetto di mescolamento delle componenti prodotto da una tale indeterminazione potrebbe raggiungere anche 2 nT picco-picco, dipende anche dalla variabilità del campo geomagnetico. Le figure 11, 12, 13, 14 e 15 illustrano l'effetto del disorientamento azimutale e zenitale della terna variometrica di Collebrincioni. La rotazione virtuale della terna variometrica mediante la matrice di Eulero consente di risolvere il problema. Naturalmente la rotazione dei dati utilizzando le misure assolute risolve il problema soltanto se si conoscono gli offset assoluti delle componenti  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$  e del campo totale  $F$  tra le misure assolute, il variometro e il magnetometro a protoni. Talvolta non conosciamo i valori assoluti di questi offset e ruotiamo i dati direttamente utilizzando gli offset relativi derivati dalle misure assolute, inglobati nelle basi. Questa operazione non è ovviamente corretta e ingenera diversi problemi illustrati nelle figure precedenti.



**Figura 19.** Contaminazione dei dati dell'osservatorio di Castello Tesino. Componente divergente ovvero componente parallela al campo totale  $F$ .

## 4. Conclusioni

In questa nota vengono illustrate le procedure di validazione dei dati prodotti dall'osservatorio geomagnetico di Duronia, viene esaminato il problema della qualità dei dati e vengono proposte alcune semplici procedure per effettuare una diagnosi e per separare i vari tipi di rumore che possono inquinare i dati. L'analisi del rumore coinvolge anche gli altri osservatori magnetici italiani, ciò naturalmente al solo fine di dare un contributo costruttivo per promuovere un lavoro di analisi sistematica del rumore associato ai segnali registrati in tutti i nostri osservatori in modo da fornire agli utilizzatori utili informazioni sull'ambito di impiego dei dati stessi. Ad esempio l'inquinamento illustrato nelle figure 3, 4, 5 e 6 viene rimosso nei dati mediati a 24 ore, quindi le medie giornaliere ne sono immuni, in realtà nei dati mediati sopravvive sempre una traccia del rumore originario soprattutto se il valore medio del rumore è diverso da zero. Tale rumore a 24 ore è sicuramente a media non nulla data la palese origine termica. Inoltre anche la varianza del segnale originario si riflette sulla media.

Si sottolinea l'importanza della conservazione dello status quo per quanto attiene l'assetto dell'osservatorio di Duronia, ogni modifica procedurale nelle attività routinali riguardanti le misure variometriche e le misure assolute dovrebbe ispirarsi sempre ai protocolli standard riportati nei vari manuali di osservatorio indicati in bibliografia. Inoltre si spera che ogni modifica dell'assetto dell'osservatorio venga valutata attentamente in modo che l'impatto del cambiamento sulle misure avvenga con un margine sufficientemente ampio, tale da ritenere che valga la pena effettuarlo. Un altro esempio è il variometro LEMI-18 installato nella cisterna "o" nel mese di novembre 2013. I dati di questo strumento sono praticamente inutilizzabili a causa del mescolamento delle componenti. Sarebbe quindi opportuno evitare l'adozione di procedure non-standard nella installazione della strumentazione [McComb, 1952]. Come si è visto l'inquinamento dei segnali misurati derivano spesso dai cambiamenti che avvengono all'interno dell'osservatorio, è pertanto di fondamentale importanza che ogni nuova modificazione dell'assetto della struttura che riguardi la logistica o la strumentazione, venga attuata seguendo le procedure usuali riportate nei vari manuali di osservatorio. Il repertorio delle procedure descritte in questa nota, quale strumento di supporto tecnico, propone metodologie standard di valutazione dei dati con la finalità di conservare e possibilmente migliorare il livello qualitativo minimale raggiunto dall'osservatorio di Duronia negli anni 2010-2012. In conclusione, si sottolinea l'importanza di effettuare con continuità il monitoraggio del rumore associato alla misura del campo geomagnetico, come si è fatto negli anni precedenti, soprattutto in considerazione della vulnerabilità dell'osservatorio nei confronti dei mutamenti che possono avvenire all'interno dell'area che delimita la struttura.

## Ringraziamenti

Gli autori ringraziano tutti gli operatori degli osservatori geomagnetici italiani per aver fornito i dati utilizzati in questa nota.

## Bibliografia

- Bevington P.R., Robinson D.K., (2003). *Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences*. McGraw-Hill, 2003, pp. 230.
- Cohen, E.R., and Taylor, B.N., (1973). *The 1973 least-squares adjustment of the fundamental constants*. J. Phys. Chem. Ref. Data, 2, 663–734.
- INTERMAGNET (2007). *Technical Reference Manual, Version 4.3*, JAGA, Edinburgh. St-Louis, B., Ed. (2007).
- INTERMAGNET (2011). *Technical Reference Manual, Version 4.5*, [www.intermagnet.org](http://www.intermagnet.org)
- Jankowski J. and Sucksdorff C., (1996). *IAGA Guide for Magnetic Measurements and Observatory Practice*, 1996 Warsaw, pp. 235.
- 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, pp. 271.

- McComb H.E., (1952). *Magnetic Observatory Manual*, Special Publication 283, U.S. Department of Commerce, Coast and Geodetic Survey, Washington D.C..
- McDonald D.K.C., (1962). *Noise and Fluctuations: An Introduction*, John Wiley & Sons, NY.
- Mohr P.J, Taylor B.N., (2005). *2005 CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2002*. Rev. Mod. Phys, 77, 1–107.
- Packard M., Varian R., (1954). *Free Nuclear Induction in the Earth's magnetic field*, Phys. Rev. 93, 941.
- 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.
- Power S.C., (1985). *Operators and Functions Theory*, Springer, 1985.
- 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, 1988.
- Wienert, K.A., (1970). *Notes on Geomagnetic Observatory and Survey Practice*. Publ. UNESCO, Brussels.
- Zhu K., (2007). *Operator Theory in Function Spaces, second edition*, American Mathematical Society, Vol 138.

# 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

© 2014 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**