

488

**Un sistema automatico per la misura di tre componenti
del campo geomagnetico utilizzando un magnetometro
a precessione nucleare**

**Automatic recording of three geomagnetic field
components by means of a proton vector magnetometer**

A. DE SANTIS * - A. MELONI * - P. PALANGIO ** - Q. TACCETTI *

Ricevuta il 18 Maggio, 1981

RIASSUNTO

L'acquisizione dei dati direttamente in forma digitale è diventata quasi una necessità negli Osservatori Magnetici; in questo articolo si presenta un sistema automatico per la registrazione delle componenti del campo geomagnetico basato sull'uso di un magnetometro a precessione nucleare equipaggiato con due bobine di Helmholtz per la generazione dei campi additivi. Utilizzando un microprocessore è stato possibile trasformare le frequenze dei segnali misurati, nei valori assoluti delle componenti e automatizzare il processo in modo da effettuare misure cicliche ad intervalli di tempo regolari.

Nella realizzazione del sistema si è costruito un sofisticato generatore delle correnti fluenti nelle bobine di Helmholtz che assicura fluttuazioni non superiori a 2 μ A. Allo scopo di massimizzare il segnale proveniente dal sensore si è realizzata una particolare geometria di bobine ortogonali che non richiede apparati meccanici di asservimento nella misura delle diverse componenti.

* I.N.G., Osservatorio Geofisico Monte Porzio Catone 00040 Roma, Italia.

** I.N.G., Osservatorio Geofisico Castello 67100 L'Aquila, Italia.

Il magnetometro automatico fornisce una buona stabilità e precisione ($\sim \pm 1.5$ nT in H , D , Z , F) e potrebbe risparmiare, in linea di principio, l'effettuazione di misure assolute.

Il tempo richiesto in un ciclo di misura delle componenti è di ~ 20 sec (questo valore dipende dal tipo di magnetometro a precessione impiegato); lo strumento può quindi essere utilizzato per ottenere informazioni sulle variazioni geomagnetiche con periodo $T > 1$ min. Il sistema è ideale per l'uso negli Osservatori magnetici non presidiati e per la determinazione dei valori medi orari in modo automatico.

ABSTRACT

Recording in digital form from the start is almost a necessary step in Geomagnetic Observatories; we propose in this paper a simple method based on the use of a proton precession magnetometer equipped with two Helmholtz coils. A small microprocessor has been used to transform the signal frequency measured by the electronic counter to obtain the components absolute values and to automatize the set of measures.

A sophisticated equipment for the current generation and control was necessary to maintain the current flowing in the Helmholtz coils within $2 \mu\text{A}$ for successive measurements. To maximize the signal coming from the sensor inside the coils, for the different components, a simple arrangement of two orthogonal small coils in only one sensor has been made.

The system proposed can furnish a very good stability and accuracy (~ 1.5 nT) in the measured components (H , D , Z) and could avoid the absolute measurements.

The time sampling for the complete set of components is ~ 20 sec; the instrument can be used then to obtain informations of the geomagnetic variations with period $T > 1$ min. The Observatory use is suggested for an automatic hourly means computation.

INTRODUZIONE

La scoperta e poi la successiva classificazione delle variazioni del campo geomagnetico ha condotto fin dal secolo scorso alla realizzazione di Osservatori permanenti del campo magnetico terrestre. Le singole variazioni a cui è soggetto il campo oltre a differenziarsi profondamente nei loro periodi intrinseci si diversificano anche per la loro intensità; in Fig. 1 ne viene riportata

CLASSIFICAZIONE DELLE VARIAZIONI DEL CAMPO GEOMAGNETICO		
TIPO	PERIODO (sec.)	FREQUENZA (Hz)
INTERNE: DIPOLARI E NON DIPOLARI	> 1. E+8	< 1 E-8
ESTERNE:		
TEMPESTE MAGNETICHE		
VARIAZIONI DIURNE	circa 1. E+6	circa 1. E-6
SOTTOTEMPESTE	" 1. E+5	" 1. E-5
	" 1. E+4	" 1. E-4
P		
U	150 - 600	6.6-1.6 E-3
L		
S	45 - 150	2.2-.66 E-2
A		
Z	10 - 45	1.0-.22 E-1
I		
O	5 - 10	0.2-0.1
N		
I	0.2 - 5.0	5.0-0.2

Nota : Il simbolo E sta per "10 elevato a"

Fig. 1 - Classificazione schematica delle variazioni del campo magnetico a seconda del tipo e frequenza (o periodo).

la corrente classificazione schematica. Il profondo studio delle variazioni geomagnetiche, iniziato già nel secolo scorso, ha condotto ad una migliore comprensione della struttura e dei pro-

cessi fisici che avvengono all'interno del nostro pianeta e nello spazio ad esso circostante.

Per decenni il sistema di acquisizione dati più efficiente in geomagnetismo è stato quello di magnetografi di tipo standard a carta fotografica. Questo tipo di registrazione, analogico per sua natura, è ancora in uso in moltissimi Osservatori in tutto il mondo e fornisce la base per la produzione dei dati magnetici tradizionalmente forniti ai centri mondiali di raccolta.

Il prodotto finito di questi strumenti (variografi) è un foglio di carta fotografica, generalmente lungo 40-50 cm ed alto circa 15-20, chiamato magnetogramma; su questo foglio sono riportate le tracce corrispondenti alle variazioni del campo magnetico in tre componenti. Il sistema di misura è costituito da magnetini sospesi il cui moto, sotto l'effetto della variazione del campo, viene amplificato otticamente da un sistema di specchi.

Le difficoltà di assicurare una regolare operazione di questi strumenti, dovute al fatto che essi sono affetti da notevoli derive di origine sia termica che di altra natura (alterazione dei fili di sospensione, movimenti del suolo) sono compensate dalla semplicità della manutenzione; in fondo la cura alla quale devono essere soggetti i magnetografi a carta fotografica, con interventi di tipo ordinario e straordinario, rimane la caratteristica di ogni strumento che debba funzionare regolarmente e a lungo. L'inconveniente principale dei sistemi di questo tipo consiste però nell'impossibilità di fornire direttamente dati digitali in uscita. L'unica possibilità con un variografo a carta fotografica di ottenere dati digitali è attualmente quella di digitalizzare manualmente il magnetogramma dopo che questo è stato prodotto. Apparecchiature elettroniche delle digitalizzatori hanno sollevato ultimamente l'utente dal noioso quanto impreciso compito di misurare certe grandezze, come aree o distanze, con un righello millimetrato, ma indipendentemente dal sistema di digitalizzazione il magnetogramma continua a riportare le imprecisioni insite nella registrazione fotografica; esse sono schematicamente: le irregolarità di velocità di rotazione del tamburo che fa da supporto al foglio fotografico, che si riflettono in inevitabili errori nella misura della ascissa temporale, la qualità della carta fotografica che una volta trattata con gli acidi può perdere di

nitidità con il tempo e deformarsi se non addirittura lacerarsi, e non ultima, la soggettiva interpretazione di altezze od intervalli temporali che rende il dato in uscita un valore non unico ma determinato dalla sensibilità e capacità pratiche dell'opera-

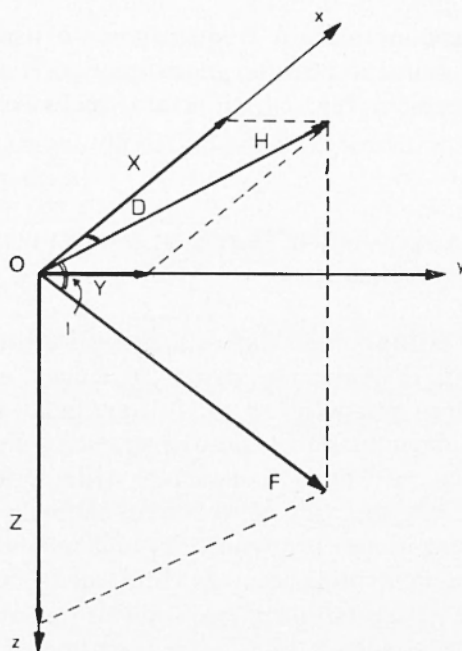


Fig. 2 - Rappresentazione del vettore campo magnetico terrestre F e dei suoi elementi X , Y , Z , D e I in una terna levogira avente origine in un punto della superficie terrestre, asse x diretto lungo il meridiano geografico (nel verso Sud-Nord), asse y lungo il parallelo geografico (Ovest-Est) ed asse z lungo la verticale orientata verso il basso.

tore. Per questi ed altri motivi quindi uno sforzo sempre maggiore è stato necessario negli ultimi 15-20 anni per realizzare un sistema affidabile di registrazione dei dati direttamente in forma digitale (Searson, 1977).

Scopo del presente articolo è la presentazione di un sistema di registrazione di tre componenti del campo magnetico completamente automatico e con produzione di dati digitali. Tale sistema potrebbe in futuro sollevare gli operatori di Osservatori geomagnetici dal noioso lavoro di routine richiesto dai sistemi fotografici e fornire agli utenti dati direttamente in forma digitale.

Nella esposizione si farà frequentemente uso della nomenclatura degli elementi del campo geomagnetico H , D , Z , X , Y ; per maggiore chiarezza in Fig. 2 è riportata una loro raffigurazione schematica.

MAGNETOMETRO A PRECESSIONE NUCLEARE, MISURA DELLE COMPONENTI DEL CAMPO GEOMAGNETICO

Il notevole sviluppo dell'elettronica degli ultimi anni e la impellente necessità di realizzare strumenti leggeri ed efficienti per le misure di campi magnetici su satelliti artificiali ha condotto ad un successo, confermato dalla notevole praticità d'uso, dei magnetometri a nucleo saturabile (conosciuti nella letteratura inglese con il nome di fluxgate). Questi strumenti sebbene molto sensibili (fino a 0.1 nT) ed idonei a misurare campi magnetici direzionalmente, cioè alla determinazione di componenti, non forniscono misure assolute ed hanno bisogno quindi di una regolare calibrazione. I fluxgate sono per loro natura strumenti di tipo analogico ma fornendo in uscita un segnale elettrico ne risulta molto semplice la trasformazione in forma digitale.

Tralasciando di considerare altri tipi di magnetometri quali quelli a pompaggio ottico (Bender, 1960) o quelli basati sulla superconduttività (Zimmermann, Campbell, 1975) vogliamo ora accennare brevemente al funzionamento del magnetometro a precessione nucleare che costituisce la base del lavoro qui presentato. Questo strumento, ideato da Packard e Varian nel 1954, basa il suo funzionamento sul rilassamento di un campione magneticamente polarizzato.

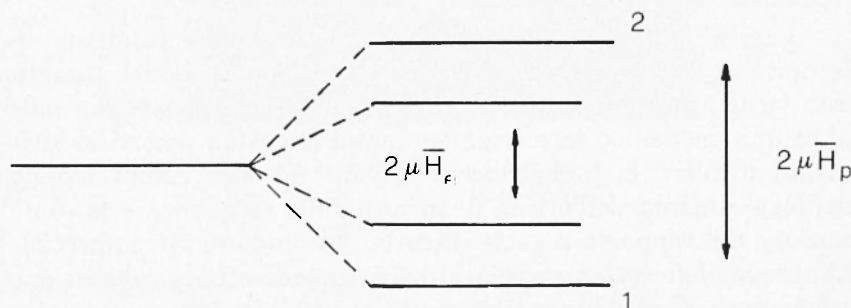
Il processo di misura del campo magnetico effettuato con un magnetometro a protoni è costituito essenzialmente da due

fasi: in una prima fase viene utilizzato un campo polarizzante per allineare i momenti nucleari dei protoni in un materiale in fase liquida presente all'interno di una bobina; in una seconda fase si elimina il campo polarizzante ed il momento totale di polarizzazione del liquido tenderà ad un nuovo stato di equilibrio statico. Il nuovo equilibrio viene raggiunto in presenza del campo magnetico terrestre. L'emissione di radiazione elettromagnetica a bassa frequenza che ne consegue, viene raccolta come un segnale elettrico oscillante dalla stessa bobina usata per la polarizzazione iniziale.

L'energia di un dipolo elementare in un campo magnetico esterno è data da

$$E = - \vec{\mu} \cdot \vec{H}_e \quad [1]$$

dove $\vec{\mu}$ è il momento magnetico del dipolo elementare del materiale ed $\vec{H}_e$ il campo esterno. Considerando che il liquido contenuto nel volume che interessa abbia inizialmente un momento magnetico risultante nullo (a causa dell'agitazione termica) l'applicazione di un campo polarizzante $\vec{H}_p$ scinde il precedente livello di energia in due sottolivelli 1 e 2:



Le relative popolazioni corrispondenti ai due sottolivelli saranno ora, indicandole con N_1 ed N_2 ,

$$N_1 \cong \exp (\mu H_p / KT) \quad ; \quad N_2 \cong \exp (-\mu H_p / KT) \quad [2]$$

ove K e T sono rispettivamente la costante di Boltzmann e la temperatura assoluta del liquido. Annullando il campo polarizzante $\vec{H}_p$, rimarrà solo il campo esterno (terrestre) $\vec{H}_e$ che, avendo direzione diversa, e valore più basso di $\vec{H}_p$, favorisce una situazione transitoria di non equilibrio statistico della popolazione nei sottolivelli. Il passaggio da questa situazione a quella di equilibrio statistico avviene con emissione di energia dovuta alle transizioni dal primo al secondo livello il che equivale alla emissione di quanti di frequenza

$$\nu = \frac{\gamma}{2\pi} \cdot |\vec{H}_e| \quad [3]$$

ove $\gamma = \mu/p = 2.67513 \cdot 10^4 \text{ sec}^{-1} \text{ gauss}^{-1}$ indica il rapporto giro-magnetico del nucleo in questione, nel caso dei liquidi idrogenati del protone e $\vec{p}$ il momento angolare spin. Il fenomeno di emissione di radiazione elettromagnetica può anche essere interpretato semiclassicamente come una precessione dei momenti magnetici dei nuclei atomici costituenti il liquido intorno alla direzione del campo magnetico esterno, in questo caso ν definisce la frequenza della precessione.

La realizzazione geometrica della bobina è generalmente effettuata in modo tale da poter ricevere il massimo del segnale, essa viene inoltre orientata in modo da avere il suo asse normale al campo magnetico terrestre. Per campi abbastanza forti lo strumento fornisce la precisione di 1 o 0.1 nT, per campi troppo deboli l'aumento dell'errore di misura della frequenza e la diminuzione del rapporto segnale disturbo, lo rendono più impreciso. L'inconveniente forse maggiore del magnetometro a precessione nucleare è però l'impossibilità di eseguire misure successive troppo vicine a causa della lunghezza del tempo di polarizzazione e di rilassamento del campione che è generalmente di alcuni secondi.

Il magnetometro a precessione nucleare misura sempre il campo esterno totale, è possibile però misurare le componenti del



Fig. 3 - Sistema di bobine Helmholtz e sensore del magnetometro a protoni (tipo ELSEC).

campo geomagnetico variandone la configurazione nel volume di spazio occupato dal sensore. I principi che sono alla base della misurazione delle componenti, orizzontale (H) e verticale (Z), sono essenzialmente due, entrambi si basano sull'uso di un sistema di bobine di Helmholtz, una con il suo asse nel piano orizzontale l'altra nel piano verticale, che vengono utilizzate per generare un campo magnetico additivo uniforme intorno al sensore (Fig. 3).

a) *Metodo di compensazione* (Hurwitz, Nelson, 1960): il principio di tale metodo è la neutralizzazione della componente verticale o della componente orizzontale del campo magnetico terrestre in modo da poter misurarne la rimanente. Realizzato sperimentalmente il corretto posizionamento dell'asse della bobina nel piano del meridiano magnetico passante per il luogo di osservazione (operazione questa che si può effettuare con sole misure di campo), e livellato il sistema, si passa a misurare il campo totale F_0 che sarà possibile scomporre nelle due compo-

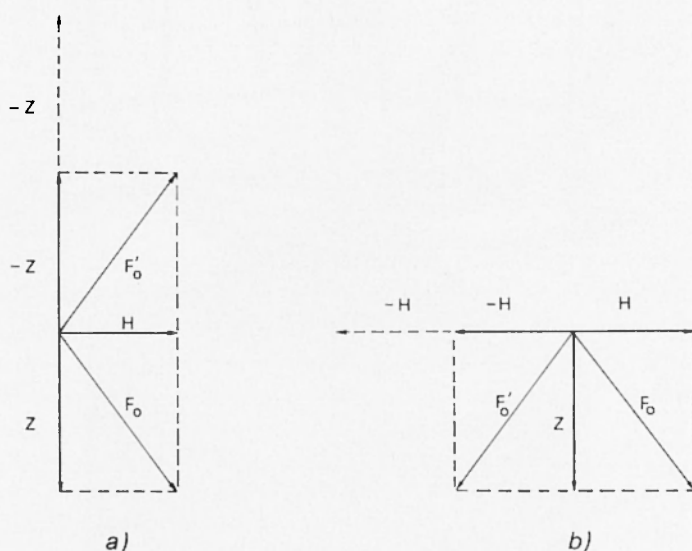


Fig. 4 - Metodo di compensazione.

nenti orizzontale e verticale. Si generi poi, con la bobina giacente nel piano orizzontale, un campo verticale che sia uniforme al centro di esse; l'intensità di questo campo sia tale da sommarsi vettorialmente a quello terrestre verticale in modo da fornire un valore $|F_0|$ uguale al precedente (Fig. 4a). Ciò si realizza quando la componente Z risulta in pratica ribaltata, ossia per un campo verticale $-2Z$ sommato al precedente. Con un opportuno

apparato elettronico si dimezza la corrente generante tale campo additivo; la componente verticale sarà allora completamente compensata e nello spazio del sensore verrà solo misurata la componente orizzontale. Lo stesso metodo può applicarsi alla misura della componente verticale operando sulla seconda bobina (Figura 4 b).

Il metodo di compensazione, ora esposto, risulta ovviamente assoluto solo se si suppone perfettamente realizzata l'operazione di dimezzamento della corrente nelle bobine (si fa presente che non importa conoscere la corrente nelle bobine in quanto è insensenziale la conoscenza del valore del campo compensante).

Per località della Terra dove il campo magnetico è prevalentemente orizzontale (basse latitudini) o prevalentemente verticale (alte latitudini) il metodo di compensazione non risulta indicato nella misura della componente più piccola; la frequenza di precessione è infatti, come si è visto, proporzionale al campo da misurare e quindi in questo caso molto bassa.

b) *Metodo dell'addizione* (De Vuyst e Hus, 1966): questo metodo si basa su successive intensificazioni della componente da rivelare. Orientate le bobine di Helmholtz si supponga di voler misurare la componente verticale. In Fig. 5 è mostrata la situa-

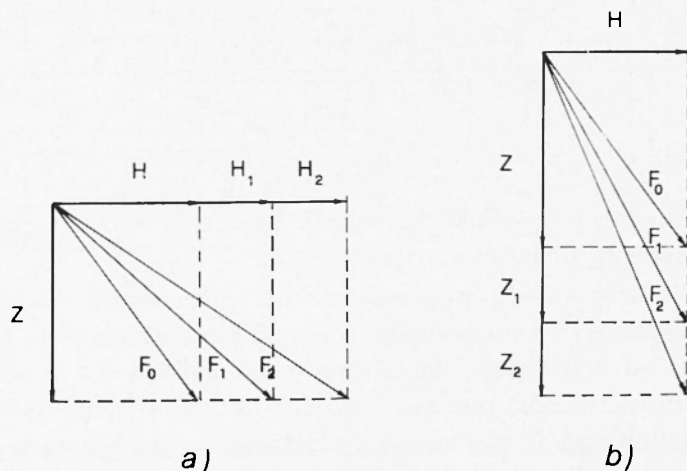


Fig. 5 - Metodo di addizione.

zione che si viene a generare per tre diverse misure del campo (illustrata per H e Z): F_0 situazione iniziale, F_1 situazione modificata dalla presenza di un campo additivo generato dalle bobine verticali (campo additivo H_1) e F_2 campo misurato dopo l'addizione del campo H_2 . Valgono le seguenti equazioni:

$$\left. \begin{aligned} Z^2 + H^2 &= F_0^2 \\ Z^2 + (H + H_1)^2 &= F_1^2 \\ Z^2 + (H + H_2)^2 &= F_2^2 \end{aligned} \right\} \quad [4]$$

se supponiamo $H_2 = 2H_1$, dalle precedenti equazioni si ricava:

$$H_1^2 = \frac{F_2^2 + F_0^2}{2} - F_1^2 \quad [5]$$

$$H = \frac{F_2^2 - F_1^2 - 3H_1^2}{2H_1}$$

Analogamente è possibile ricavare Z da campi additivi generati con il sistema di bobine orizzontali.

In conclusione il magnetometro a precessione nucleare è uno strumento che permette la facile misura dell'intensità totale, verticale ed orizzontale, del campo geomagnetico. La misura di declinazione D è possibile con l'uso dello stesso sistema di bobine di Helmholtz ed il metodo dell'addizione, sarà necessaria però la preventiva determinazione del meridiano geografico passante per il luogo di osservazione.

PROCEDURA DI UNA MISURA AUTOMATICA

Per realizzare un metodo di una misura automatica delle tre componenti del campo geomagnetico si impiegano due bobine di Helmholtz, una con l'asse posto verticalmente e l'altra con l'asse giacente nel piano orizzontale in direzione normale al meridiano geografico passante per il luogo di misurazione.

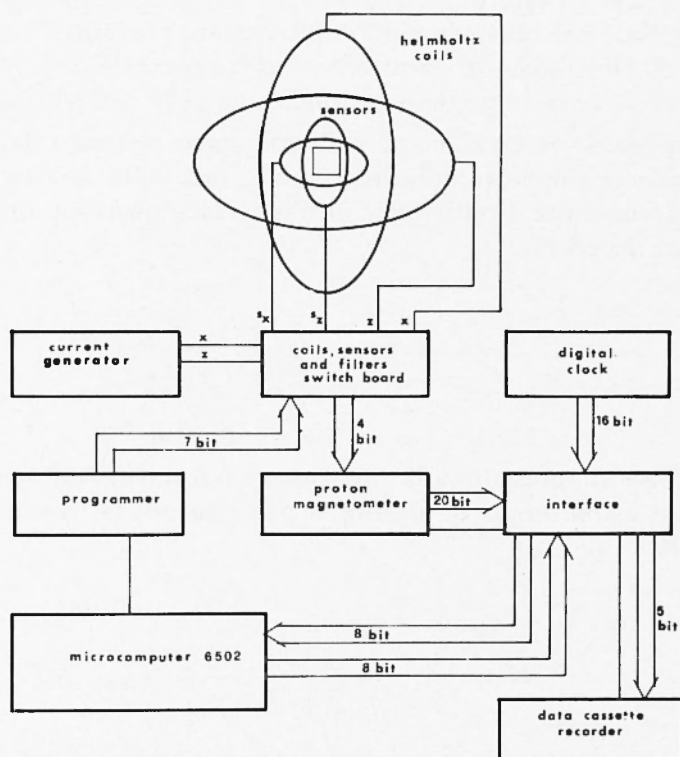


Fig. 6 - Schema a blocchi del sistema automatico. Le frecce indicano il verso di trasmissione dati da blocco a blocco.

Lo strumento di misura completo che verrà ora descritto, è costituito da un magnetometro a precessione nucleare con un sensore appositamente progettato, una serie di apparecchiature

elettroniche per il controllo e la commutazione delle correnti delle bobine, ed un sistema per la elaborazione numerica e l'acquisizione dei dati su nastro magnetico. Il complesso delle strumentazioni è alimentato a 12V (4.5 A) ed ha una autonomia di circa 30 ore in assenza di tensione di rete. Lo schema a blocchi delle apparecchiature è illustrato in Fig. 6.

Il metodo di misura delle componenti è simile a quello di addizione presentato nel paragrafo precedente; il principio è quindi quello di effettuare una misura di campo geomagnetico totale iniziale che chiameremo F_0 e di alterare poi, con l'uso delle bobine di Helmholtz, le caratteristiche magnetiche dello spazio circostante il sensore per la determinazione delle componenti.

Sommando vettorialmente a F_0 un campo generato dalle bobine verticali, che verrà indicato come B , una volta diretto verso l'alto ed una volta diretto verso il basso, sarà possibile ottenere le misure F_1 ed F_2 :

$$F_1 = | \vec{F}_0 + \vec{B} | \quad F_2 = | \vec{F}_0 - \vec{B} | \quad [6]$$

In Fig. 7 a è rappresentata la situazione su descritta, dal teorema di Carnot e con un po' di algebra si può ricavare la formula per il calcolo di Z :

$$Z = \frac{F_1^2 - F_2^2}{\sqrt{8(F_1^2 + F_2^2 - 2F_0^2)}} \quad [7]$$

la misura di H segue immediatamente dalla relazione

$$H^2 = F_0^2 - Z^2; \quad H = \sqrt{F_0^2 - \frac{(F_1^2 - F_2^2)^2}{8(F_1^2 + F_2^2 - 2F_0^2)}} \quad [8]$$

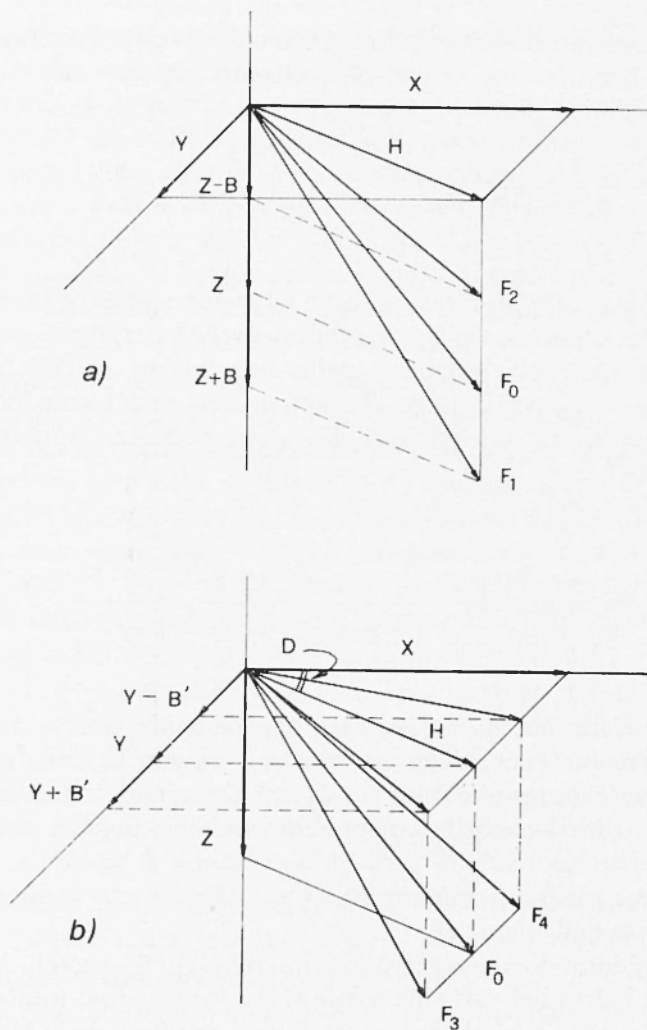


Fig. 7 - a) Misure di F_1 e F_2 (per H e Z)
b) Misure di F_3 e F_4 (per D).

Per la misura della declinazione D , terzo elemento ora ignoto, è necessario l'uso delle bobine orizzontali, il campo da esse generato sia B' e venga anch'esso applicato nei due versi in modo da pervenire alla determinazione di due misure di cam-

po F_3 , ottenuta quando B' è diretto verso Est, e F_4 , ottenuta quando B' è diretto verso Ovest, date rispettivamente da:

$$F_3 = | \vec{F}_0 + \vec{B}' | \quad F_4 = | \vec{F}_0 - \vec{B}' | \quad [9]$$

In Fig. 7 b è rappresentata questa situazione vettorialmente. Se l'asse della bobina orizzontale è stato precedentemente orientato con esattezza nella direzione della normale al meridiano geografico passante per il luogo di osservazione, sarà immediata, con un procedimento algebrico simile al precedente, la determinazione di D .

$$D = \arcsin \frac{F_3^2 - F_4^2}{\sqrt{8H(F_3^2 + F_4^2 - 2F_0^2)^{1/2}}} \quad [10]$$

Se l'asse della bobina orizzontale non coincide con la direzione della normale al meridiano geografico, l'angolo D della formula precedente rappresenta l'angolo D' fra l'asse magnetico della bobina e la direzione della componente orizzontale, che differisce di un certo valore dalla vera Declinazione: $D = D' + \epsilon$ dove ϵ si ottiene mediante misure assolute di Declinazione simultanee alla misura dell'angolo D' .

Considerando un intervallo di tempo di 5 secondi fra una misura e l'altra dei vari valori di F ($F_0 \dots F_4$) il tempo totale necessario alla misura delle tre componenti risulta essere di 20 secondi. Tale valore, di molto inferiore a quello apprezzabile su di una registrazione a carta fotografica è in linea di principio sufficiente, se le misure vengono ripetute con continuità, a fornire una ricostruzione per punti del magnetogramma. L'esigenza di ridurre il tempo totale di una serie di misure è però necessaria se si desidera seguire con cura certe variazioni del campo geomagnetico. Per alcuni fenomeni infatti esse possono essere talmente rapide da non consentire di utilizzare il valore di $\bar{F}_0$ come

valore del campo totale costantemente per il 20 secondi della durata delle misure. Nel caso di un SC, ad esempio, il tempo di salita di una singola componente può raggiungere (alle medie latitudini) i 0.3 nT/sec e quindi il metodo indicato non risulterebbe opportuno data la non contemporaneità delle misure di cui sopra. Rimandando ad un successivo paragrafo una discussione più dettagliata sui limiti del presente metodo nell'analisi di certe variazioni del campo geomagnetico, si noti che una ulteriore riduzione del tempo totale di una serie di misure è possibile, alle medie latitudini, con un particolare accorgimento.

Adottando un valore di corrente iniziale nelle bobine verticali fissato in modo tale da fornire un campo che sia esattamente uguale, ma in direzione opposta (metodo di compensazione) alla componente verticale, il valore di F_2 coinciderà con H dato che la Z viene annullata da Z_1 . Si noti che questo valore di corrente, alle medie latitudini, non è assolutamente critico, per un $\Delta Z = 200$ nT, ad esempio, l'imprecisione sulla misura di H non supera 1nT. La sequenza delle operazioni può essere quindi modificata nel seguente modo $F_0, F_2 = H, F_3, F_4, (F_1)$.

Dalle prime quattro misure si ottengono H, Z e D , la quinta viene utilizzata per effettuare un controllo su H e sulla corrente che alimenta le bobine verticali, mentre F_3 e F_4 , oltre che per il calcolo di D , servono anche per controllare la corrente che alimenta le bobine orizzontali; le due correnti sono prodotte da un alimentatore unico.

Le misure di F_0 e H rappresentano valori praticamente istantanei anche rispetto a condizioni di campo perturbato, mentre la Z determinata dalla relazione $Z = (F_0^2 + H^2)^{1/2}$ può essere considerata un valore medio nei cinque secondi che superano H e F_0 , il valore di D calcolato con la [10] rappresenta, in pratica, una media nei cinque secondi che intercorrono fra F_3 e F_4 .

Adottando il metodo della compensazione per la misura della H l'errore che si ottiene per la componente orizzontale è praticamente quello tipico del magnetometro a protoni e cioè ± 1 nT. Calcolando Z dalla $Z = (F^2 - H^2)^{1/2}$ si ottiene dalla propagazione degli errori un $\sigma Z = 1.3$ nT. La propagazione degli errori applicata alla [10] comporta un $\sigma D = 0.16'$.

Nella realizzazione pratica del sistema automatico molti sono i problemi che si sono dovuti affrontare per ottenere un buon livello di affidabilità dei dati prodotti. Uno degli aspetti più importanti è relativo al possibile dislivello delle bobine, per quanto riguarda quelle verticali, poiché le operazioni di livellamento fatte magneticamente comportano una imprecisione di ± 0.1 , gli errori sistematici nella misura di H e Z sono rispettivamente di ± 1.2 nT. Stesse considerazioni valgono nei confronti delle bobine orizzontali, anche qui l'orientamento e il livellamento comportano errori non inferiori a 0.1 . Nel caso realistico di dislivelli non superiori a 2 decimi di primo gli errori che si commettono utilizzando le relazioni [7], [8] e [10] sono trascurabili.

Durante il periodo di sperimentazione si è osservato che il sistema è sensibile alle variazioni della temperatura, l'influenza si manifesta sotto forma di una deriva delle misure. Tali fluttuazioni sono connesse alle variazioni temporali dei gradienti termici nel volume occupato dalle bobine di Helmholtz. Questo problema è stato risolto racchiudendo il sistema in tre involucri concentrici di polistirolo da 40 mm di spessore, ciò ha dimostrato di garantire la necessaria uniforme distribuzione della temperatura nello spazio sensibile rispetto ad un'onda termica diurna di 3°C misurata all'interno del padiglione che ospita lo strumento. Tali fluttuazioni sono da imputarsi alle variazioni della geometria delle bobine in presenza di gradienti termici variabili nel tempo. Non è stata riscontrata alcuna dipendenza sensibile dalle variazioni stagionali della temperatura.

Per l'acquisizione dei dati si è scelto un registratore a cassetta magnetica che al pregio del bassissimo consumo unisce quello di avere un sistema di incisione su due piste complementari che garantisce una elevata immunità agli errori. Una misura completa delle componenti fatta ogni minuto comporta la registrazione di F_0 (20 bit), H (20 bit), D (16 bit), ora e minuto (16 bit). Ciò implica la preventiva elaborazione dei campi misurati dal magnetometro (F_1, F_2, F_3, F_4). Un microprocessore effettua la misura indiretta delle correnti e la verifica della loro stabilità nel tempo, segnalando eventuali malfunzionamenti. Onde massimizzare la durata del nastro F e H vengono registrati privi della

ciira più significativa, in questo modo una C90 dura 23 giorni, 30 giorni una C120.

Per una maggiore autonomia del sistema di registrazione si è puntato sul compattamento massimo dei dati da riportare. Ogni record presente sulla cassetta è composto da una serie di misure effettuate a 5 secondi l'una dall'altra con F_0 misurata al minuto esatto e H , F_3 , F_4 , F_2 in successione. Si è visto con elaborazioni successive che si ottiene un netto miglioramento eseguendo la riduzione di H , F_3 , F_4 allo stesso istante della misura di F_0 .

Condizione irrinunciabile per il corretto funzionamento del metodo qui proposto è, oltre al perfetto orientamento e livella-

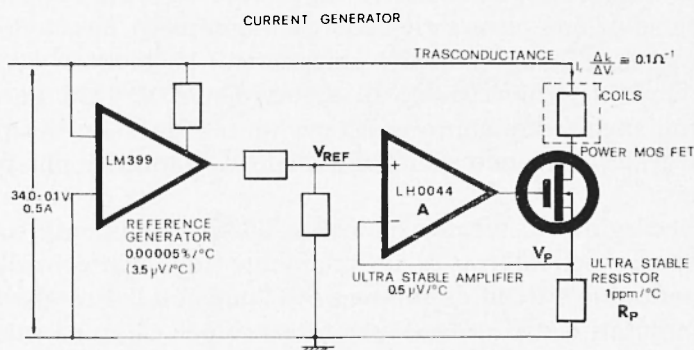


Fig. 8 - Schema elettronico dell'alimentazione stabilizzato in corrente.

mento delle bobine, la costanza della corrente durante le operazioni di misura. Affinché l'errore su D dovuto alla corrente sia del tutto trascurabile è necessario che le fluttuazioni della stessa nelle bobine non siano maggiori di $2 \mu A$ fra due misure successive. Allo scopo si è realizzato un alimentatore con tali prestazioni il cui principio di funzionamento è schematizzato in Fig. 8.

La stabilità di controllo della corrente è ottenuta dalla comparazione della tensione prelevata dal resistore R_p (direttamente proporzionale alla corrente $V_p = I_c \cdot R_p$) con una tensione campione. Come si vede dalla figura la stabilità assoluta della cor-

rente dipende essenzialmente dalla stabilità di R_p , dalla deriva di A , V_{ref} e dal FET rispetto alla temperatura.

Senza entrare nel dettaglio dei calcoli si può dimostrare che i componenti scelti per la realizzazione soddisfano ai requisiti del sistema. Come ultimo accorgimento si è prestabilizzata la tensione di alimentazione del sistema stesso.

Essendo il rapporto segnale-disturbo (S/N) del sensore del magnetometro a protoni proporzionale al quadrato del seno dell'angolo formato fra la direzione del campo da misurare e l'asse della bobina di rivelazione, è chiaro che per massimizzare tale rapporto e quindi avere la precisione richiesta dai calcoli, si dovrebbe in teoria disporre, di volta in volta, la bobina in maniera tale che l'angolo sopra descritto sia sempre circa 90° . E' evidente che tale soluzione oltre a richiedere un complesso meccanico non indifferente (e completamente amagnetico), richiederebbe anche un sistema elettromeccanico di asservimento. D'altra parte fissando un angolo di compromesso per un sensore fisso il rapporto S/N degrada rendendo la misura delle componenti più piccole imprecisa.

L'accorgimento tecnico realizzato sperimentalmente consiste nel disporre nell'interno di un recipiente contenente un liquido idrogenato due sistemi di bobine a 90° l'uno con l'altro che vengono commutati elettricamente per ottenere per ciascuna misura il massimo del rapporto S/N. A tale scopo si precisa che il volume occupato dai due sensori non deve superare quello di una sfera di ~ 5 cm di raggio, al di sopra del quale la non perfetta uniformità del campo da misurare creerebbe gradienti all'interno del sensore, ma non deve essere inferiore a ~ 160 cm³ per non pregiudicare il rapporto S/N (questi valori sono stati calcolati e confermati sperimentalmente per le bobine di Helmholtz utilizzate). La configurazione geometrica compromesso tra due contrastanti esigenze e sopra descritta nella sua forma, è illustrata in Fig. 9.

Per mantenere sintonizzato il preamplificatore passabanda nelle varie misure effettuate, si è realizzato un sistema di commutazione elettronica utilizzando switch elettronici e a Reed con contatti al mercurio. In tal modo il magnetometro può operare sempre nelle migliori condizioni.

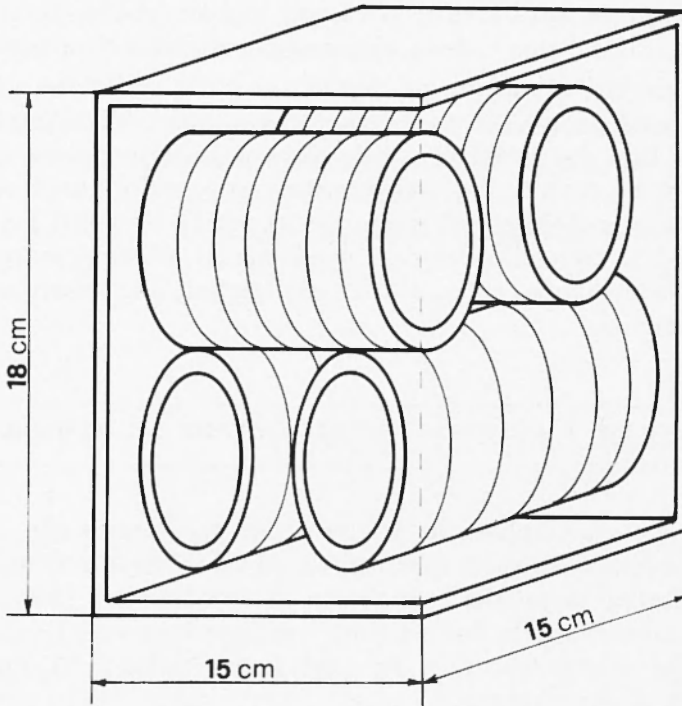


Fig. 9 - Sensore con due sistemi di bobine a 90° fra loro a commutazione elettrica.

Il valore assoluto ottimale della corrente da applicare alle bobine di Helmholtz orizzontali e verticali per creare i campi aggiuntivi è stato dedotto teoricamente minimizzando l'errore di misura di H , Z e D . Si è visto poi sperimentalmente che mentre il campo verticale applicato soddisfaceva in pieno ai requisiti richiesti, le cose andavano in maniera leggermente diversa per quello orizzontale dove il valore sperimentale ottimale era pari a metà circa di quello calcolato. La ragione di quest'ultimo comportamento è da attribuirsi al fatto che l'omogeneità del campo globale (terrestre più addizionale) nello spazio occupato dal sensore è funzione della intensità della corrente addizionale oltre che della geometria del sistema. Infatti se è lecito supporre che il campo terrestre sia omogeneo nel sensore non lo stesso si può

dire di quello addizionale; il campo globale risente quindi del più intenso dei due e della sua maggiore o minore omogeneità.

Il sistema di misura qui descritto è stato realizzato e tenuto in funzione presso l'Osservatorio Geomagnetico di L'Aquila dell'I.N.G. Uno dei primi controlli sul suo funzionamento è stato quindi il confronto con l'ivi esistente variografo Ruska a carta fotografica; nel prossimo paragrafo verranno descritti l'elaborazione ed il controllo dei dati prodotti dal sistema automatico ottenuto mediante confronti tra i dati digitali e le letture sui magnetogrammi.

ELABORAZIONE E CONTROLLO DEI DATI FORNITI DAL SISTEMA AUTOMATICO

E' stato sviluppato un pacchetto di programmi con il compito di permettere la visualizzazione dei valori registrati su nastro sotto forma di tabelle e grafici e di controllarne l'affidabilità e la precisione sulla base di una comparazione con i valori dedotti dal magnetogramma del variografo Ruska a 20 mm/h di velocità di scorrimento.

La non contemporaneità della determinazione delle componenti richiede una riduzione delle misure reali ad un istante fittizio intermedio. La riduzione più semplice è l'interpolazione lineare tra 2 misure successive, prima e dopo l'istante desiderato e l'uso dei valori così dedotti per il calcolo della Z e della D . Un'interpolazione di tipo quadratico risulterebbe superflua per la precisione voluto (dell'ordine del nT per H e Z e del decimo di primo per la D).

Un primo sommario confronto tra il magnetogramma tradizionale ed il sistema automatico in esame è stato effettuato graficandone i valori con uguale scala (Figg. 10a, b; 11a, b).

I dati sul nastro a grande capacità sono stati analizzati in due modi differenti ma complementari, confrontando:

1) valore istantaneo e 2) valore medio orario con i corrispondenti valori rilevati dal magnetogramma e dalle misure assolute con un sistema Elsec.

1) *Confronto sul valore istantaneo*

Un apposito programma permette il confronto dei dati rilevati a minuti successivi con misure lette da magnetogramma per mezzo di un digitalizzatore. Queste ultime a loro volta erano state preelaborate al fine di ottenere gli stessi fattori di scala.

TAVOLA 1

Confronti	d_F σ_F	d_H σ_H	d_D σ_D	d_Z σ_Z
$A^Q - A_r^Q$	0.00 0.00	.43 0.53	— .11 0.83	.01 0.344
$A^D - A_r^D$	0.00 0.00	.47 0.57	— .15 1.29	— .00 4.38
$A^Q - R_M^Q$	.55 1.33	.54 2.05	.37 2.81	.17 1.02
$A_r^Q - R_M^Q$	.55 1.33	.10 1.97	.48 2.69	.16 0.99
$A^D - R_M^D$	— .23 1.97	— .08 3.19	.51 5.35	— .46 1.33
$A_r^D - R_M^D$	— .23 1.97	— .55 3.11	.66 5.05	— .35 1.25

dove: d differenza media nel confronto sulla componente indicata;

σ deviaz. stand. nel confronto sulla componente indicata;

$A^{Q(D)}$ valori sistema automatico giorno $Q(D)$ senza riduzione;

$A_r^{Q(D)}$ valori sistema automatico giorno $Q(D)$ con riduzione;

$R_M^{Q(D)}$ valori dedotti digitalizzando 3 volte il magnetogramma del Ruska e quindi mediando i due valori più vicini

Essendo la lettura del magnetogramma di per sé abbastanza delicata (dovendo seguire tracce in maniera continua) sono stati presi due magnetogrammi, uno rappresenta un giorno « calmo » (tipo Q) l'altro uno « disturbato » (tipo D), e la digitalizzazione manuale di ciascuno di essi è stata ripetuta tre volte con diversi operatori. Ciascun magnetogramma digitalizzato era rappresen-

tato da tre serie di 1.440 valori equidistanti tra loro (1 minuto in tempo e 0.3 mm. in spazio).

Le tre serie di dati sono state messe a confronto ricavando una nuova serie con un filtro non lineare che ha mediato, istante per istante, i due valori più vicini scartando il terzo. In tal modo si è notevolmente diminuita la possibilità di errori grossolani durante la digitalizzazione manuale.

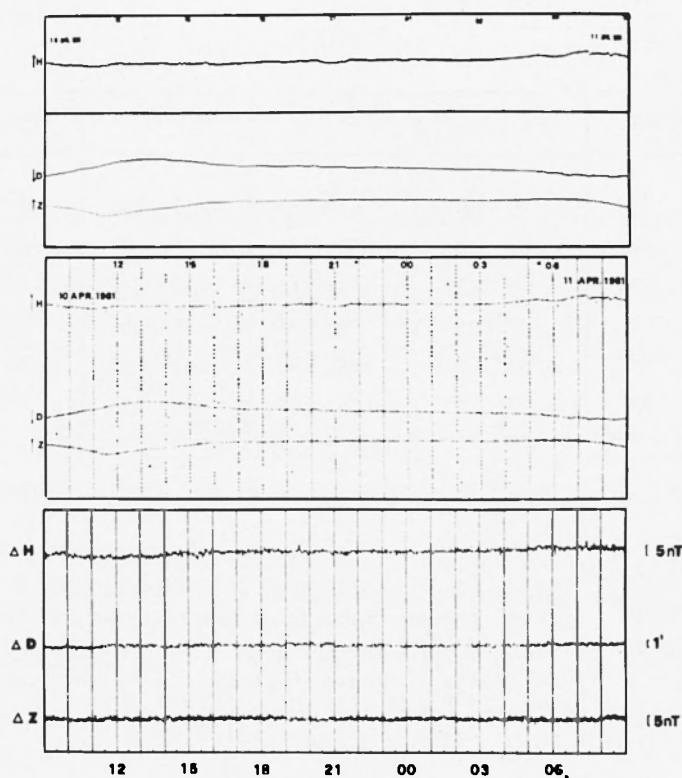


Fig. 10 - a) Magnetogramma del giorno "Q" (10-11 aprile 1981) a carta fotografica;
 b) corrispondente ricostruzione grafica dei dati del sistema automatico;
 c) differenze, componente per componente, tra i valori dedotti da a) e b).

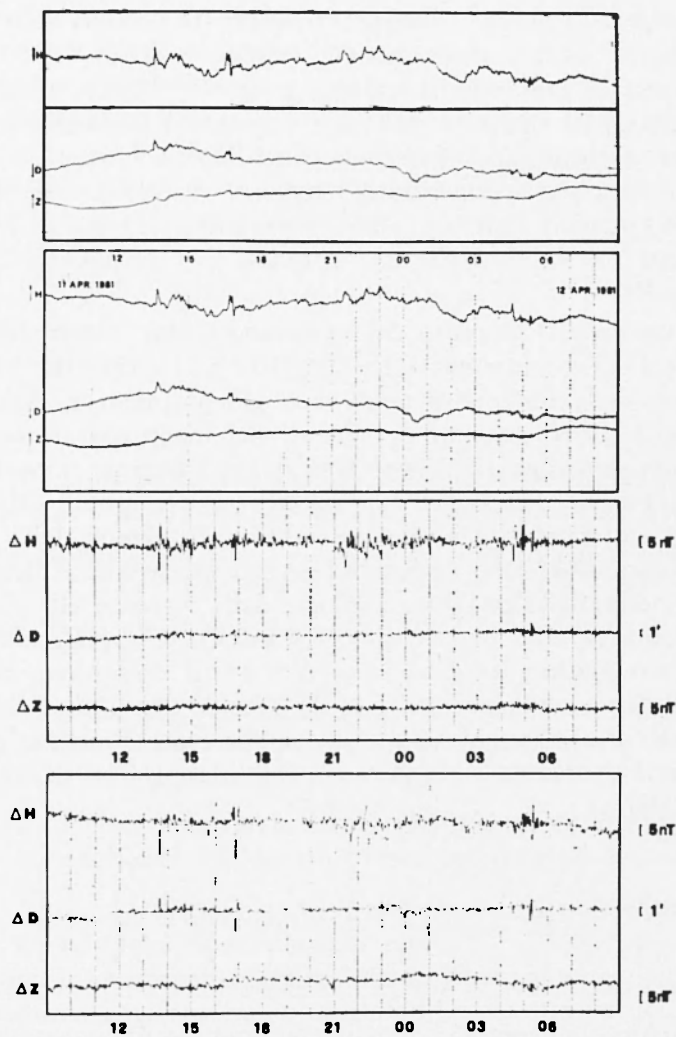


Fig. 11 - a) Magnetogramma del giorno "D" (11-12 aprile 1981) a carta fotografico;

b) ricostruzione grafica dei dati del sistema automatico;

c) differenze tra i valori dedotti da a) e b);

d) differenze tra i valori dedotti dalla nuova digitalizzazione dello stesso magnetogramma del giorno "D".

La tavola 1 indica i confronti eseguiti tra i valori del sistema automatico, senza e con riduzione lineare, e quelli dedotti dalla digitalizzazione del corrispondente magnetogramma; utilizzando come riscontro questi ultimi si è constatata la migliore bontà della serie ridotta per interpolazione lineare rispetto a quella senza riduzione. Il contributo maggiore si trova naturalmente nella componente D il cui calcolo è derivato da misure avvenute in istanti più lontani rispetto a quelli di riferimento (misura di $F_0 (=F)$).

Il valore di F desunto dai magnetogrammi è stato calcolato dai valori delle componenti. Le Figg. 10 c e 11 c riproducono l'andamento delle differenze per i due giorni presi in considerazione. Gli scarti massimi riscontrati nel magnetogramma « calmo » non superano i 3nT per H e Z , e i 3 decimi di primo per la Declinazione. Per il giorno « disturbato » le grandi differenze in Fig. 11 d, ricavate da una nuova digitalizzazione dello stesso magnetogramma, sono imputabili in gran parte alle difficoltà oggettive nella digitalizzazione manuale delle tracce e alla non perfetta costanza di scorrimento del tamburo di registrazione del variografo Ruska: infatti gli scarti più alti coincidono con periodi di forte variazione, difficili da seguire con il digitalizzatore o in periodi con lunghezza di registrazione di un'ora sul magnetogramma diversa da 2 cm (a causa delle irregolarità di rotazione del tamburo).

2) *Confronto sulle medie orarie*

Usualmente le medie orarie sui magnetogrammi vengono misurate con un reticolo millimetrato o con un digitalizzatore valutando l'altezza del rettangolo avente area uguale alla figura ottenuta chiudendo la traccia con due linee verticali (linee delle ore) fino alla linea base (Meloni e Molina, 1978), e ciò corrisponde alla valutazione operativa del teorema della media dove nel nostro

$$\int_a^b f(x) dx = L \cdot (b - a) \quad [11]$$

caso $f(x)$ è proprio la traccia, l'intervallo $[a, b]$ è 1 ora, e L l'altezza media valutata a mano. Naturalmente $m \leq L \leq M$, essendo M ed m rispettivamente il massimo ed il minimo valore che assume la funzione (traccia) nell'intervallo considerato. D'altra parte L è proprio il valore medio dell'insieme dei valori numerici che $f(x)$ assume in $[a, b]$. Questo sarebbe vero se si potesse digitalizzare con passo infinitesimo la funzione in questione cioè se fosse

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \frac{f_i}{n} = L \quad [12]$$

Il problema nasce con la digitalizzazione ad intervalli finiti: in questo caso la sommatoria in [12] è troncata senza passaggio al limite. Assumere $L^* = \sum_{i=1}^n f_i/n = L$ è lecito per n abbastanza alto.

Avendo 60 punti in un'ora ($n = 60$) L^* è calcolabile in due maniere:

a) assumendo la costanza del valore per il restante minuto ottenendo quindi tanti rettangolini di base unitaria (1 minuto) ed altezza f_i , con area quindi $A_{i1} = f_i$;

b) considerando la funzione ottenuta interpolando linearmente i 60 punti ottenendo tanti trapezi rettangoli con aree $A_{i2} = (f_i - f_{i-1})^{1/2}$

Da un semplice calcolo si vede che $L_1^* = \sum_{i=1}^{60} A_{i1}/60$ e $L_2^* = \sum_{i=1}^{60} A_{i2}/60$; L_1^* ed L_2^* differiscono di $(f_0 - f_{60})/120$, valore in generale estremamente piccolo: infatti anche supponendo per $f_0 - f_{60} = 60$ nT si otterrebbe 0.5 nT per H e Z . Per semplicità si è utilizzato il calcolo del valore medio del tipo a).

Si è verificato inoltre che il miglioramento ottenuto dalla riduzione dei valori istantanei si riflette positivamente su quello dei valori medi orari anche su un arco temporale più ampio: lo scarto massimo rilevato nel confronto non è stato mai maggiore di 1nT per la H e la Z e di un decimo di primo per la D .

Un ulteriore controllo (Fig. 12) è stato inserito per valutare l'attendibilità delle registrazioni. Questo controllo si basa sulla

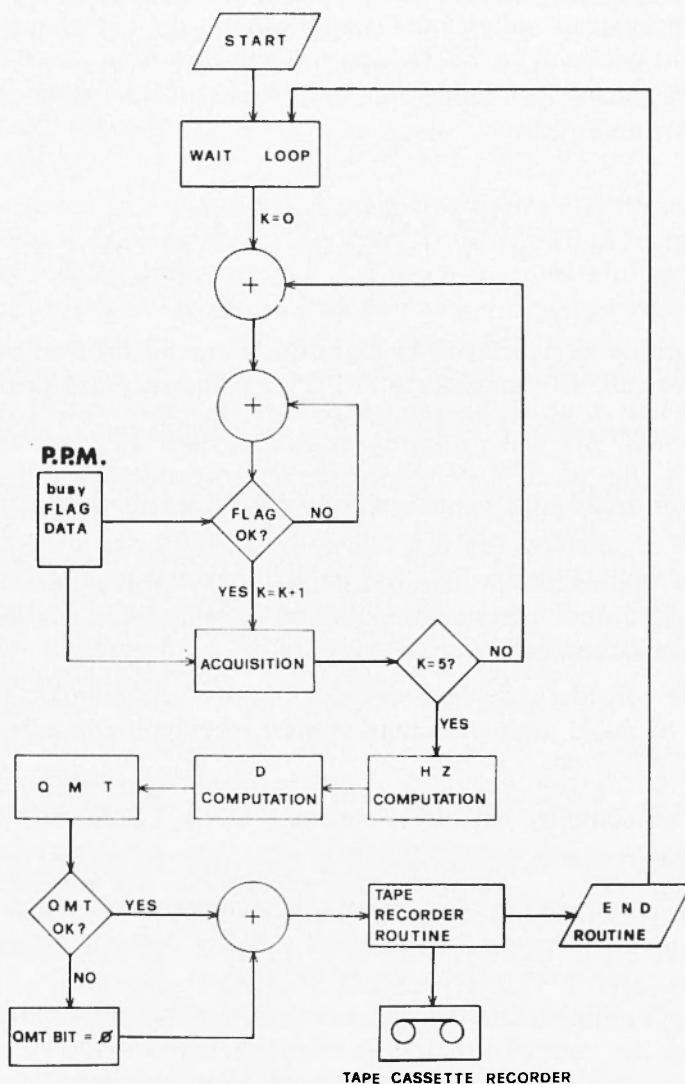


Fig. 12 - Grafo di flusso della logica di acquisizione del sistema.

condizione che la corrente generata dall'alimentatore che crea i campi magnetici addizionali rimanga costante nel tempo.

Indichiamo con i_x ed i_z le correnti nelle bobine, orizzontale e verticale, che generano i campi magnetici addizionali. I campi generati da i_x e da i_z sono dati rispettivamente da $B_x = k_x i_x$ e $B_z = k_z i_z$, e il loro rapporto è $B_x / B_z = (k_x i_x) / (k_z i_z)$; ora essendo questo rapporto costante (entro 3 parti su 10^6 , valore verificato sperimentalmente misurando con uno strumento campione la costanza di i_x e i_z nel tempo), ne risulta che anche la sua espressione in funzione di F_0, F_2, F_3, F_4 :

$$\frac{B_x}{B_z} = \sqrt{\frac{F_3^2 + F_4^2 - 2 F_0^2}{F_1^2 + F_2^2 - 2 F_0^2}} \quad [13]$$

(ferma restando la bontà dei valori di F_0) deve rimanere costante per ogni serie di misure effettuate. La costanza di tale valore è stata verificata sperimentalmente e misurata pari a $0.9084 + 0.0001$, fluttuazioni di queste quantità superiori a $\pm 3 \cdot 10^{-4}$ indicano l'assoluta inattendibilità delle misure.

E' stato sviluppato e messo a punto un programma che basandosi sull'algoritmo precedentemente descritto permette non solo la verifica di attendibilità ma consente anche l'eliminazione automatica di quei valori affetti da errori strumentali troppo grandi, questi ultimi in genere sono determinati quasi esclusivamente da impulsi di rumore istantanei sulla linea di alimentazione.

CONCLUSIONI

La strumentazione attualmente in uso negli Osservatori geomagnetici è ancora per la maggior parte basata sull'uso dei registratori a carta fotografica con produzione di magnetogrammi. Ad eccezione di alcune nazioni, « geomagneticamente » molto avanzate, la normale routine è quindi ancorata all'uso delle ca-

mere oscure, acidi e di tutto ciò che l'utilizzo dei sistemi fotografici comporta.

I vari tentativi di realizzare *Osservatori* automatici, iniziati già dagli anni '60 (Alldrege and Saldukas, 1964), non sono generalmente stati molto fortunati per varie cause: alto costo, scarsa affidabilità, complicazione di funzionamento. Il più utilizzato di questi *variografi* automatici è stato forse quello chiamato AMOS (Andersen, 1974) che nato all'interno della Energy and Mine Resources ad Ottawa ha poi seguito la strada della produzione industriale rimanendo sempre agganciato con il gruppo di utenti che lo ha ideato. Questa fortunata combinazione di attività industriale e scientifica ha permesso la realizzazione di un sistema di misura affidabile anche se ancora molto costoso.

Il problema di ancorare le variazioni misurate dai sistemi di registrazione a misure assolute eseguite con regolarità rimane comunque vivo anche nel caso dell'AMOS che utilizza sensori fluxgate. Il sistema qui proposto funzionando con un magnetometro a protoni per la determinazione delle componenti è di per sé, in principio, un sistema assoluto. Con ciò si intende che ogni misura di campo magnetico si riduce senza l'intervento di alcun riferimento ad un numero esprimente una grandezza magnetica (il rapporto giromagnetico si assume essere rigorosamente costante). E' chiaro comunque che nella valutazione delle componenti i fattori in gioco, livellamento delle bobine, costanza delle correnti, rendono la misura in qualche modo affetta da cause esterne. Uno dei migliori controlli è stato quindi quello del confronto costante con il sistema di registrazione Ruska, in uso presso l'Osservatorio de L'Aquila, che regolarmente viene ancorato a misure assolute bisettimanali.

Il sistema è stato tenuto sotto controllo con le tecniche descritte per alcuni mesi dal marzo 1981 in poi, i risultati ottenuti confermano la buona stabilità ed affidabilità dell'apparato come variografo a grande autonomia. Le misure effettuate fino ad ora fanno quindi ben sperare nella possibilità futura di utilizzare questo sistema come strumento assoluto. L'unica evidente variazione nel tempo che renderebbe le misure di campo relative sarebbe infatti un eventuale dislivellamento del sistema che si potrebbe controllare con un clinometro digitale utilizzabile per una

correzione automatica della variazione di inclinazione del sistema di bobine. La realizzazione di un sistema sofisticato di generazione e controllo delle correnti generanti i campi additivi (entro $2 \mu A$) rende il fattore di variazione delle correnti trascurabile rispetto a quello del dislivellamento.

Uno degli aspetti più importanti da considerare è che la realizzazione del sistema è stata fatta tenendo in mente la prospettiva dell'uso in località non presidiate dove una volta realizzata la coibentazione dell'ambiente nel quale vengono poste le bobine di Helmholtz con il sensore, il sistema è praticamente automatico e, dato il basso consumo, anche a lunga autonomia.

L'esame delle variazioni del campo geomagnetico si può estendere, con l'attuale realizzazione a segnali con periodo non inferiore a ~ 1 min; questo valore è comunque strettamente dipendente dal tipo di sistema di rivelazione utilizzato e dal tempo di rilassamento caratteristico del magnetometro a protoni utilizzato.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia il Dott. F. Molina per la viva discussione e gli utili suggerimenti sul presente lavoro. Si ringraziano inoltre la Sig.ra C. Vannucci per la trascrizione dattilografica ed il Sig. L. Innocenzi per il lavoro fotografico.

BIBLIOGRAFIA

- ALLDREGE, L.R., SALDUKAS, I., 1964 - *An Automatic standard magnetic Observatory*. "Journ. Geophys. Res", 69, 10, p. 1963.
- ANDERSEN, F., 1974 - *An automatic magnetic Observatory system*. Publ of "Earth Physics Branch", Ottawa, Canada, 44, 11.
- BENDER, P.L., 1960 - *Measurements of weak magnetic fields by optical pumping methods*. "Bull. Ampère", 9e Année, pp. 621-628.
- DE VUYST, A., HUS, J.J., 1966 - *Generalisation de la mesure de l'intensité des composantes verticale et horizontale du champ magnetique terrestre avec le magnetometre a protons*. "Annal. de Geophys.", 22, 1, 79.
- HURVITZ, L., NELSON, H.J., 1960 - *Proton Vector magnetometer*. "Journ. of Geophys. Res.", 65, 6, p. 1759.
- MELONI, A., MOLINA, F., 1978 - *Elaborazione dei dati dell'Osservatorio Geomagnetico dell'Aquila*. Monografia n. 1, Rep. Geomagn. I.N.G. (Roma, Italia).
- PACKARD, M., VARIAN, M., 1954 - *Free Nuclear induction in the Earth's magnetic field*. "Phys. Rev.", 93, 941.
- SEARSON, P.H., 1977 - *Digital recording and telemetry of magnetic Observatory data*. Talk given at "IAGA", Seattle, USA.
- ZIMMERMANN, J.E., CAMPBELL, W.H., 1975 - *Test of Criogenic SQUID for geomagnetic field measurements*. "Geophysics", 40, 269.

Received on June 6th, 1981