# BREVE RASSEGNA SUI MAGNETOMETRI SCALARI

*Tradotto da documento originale a cura di dott. Ivan Hrvoic & Greg M. Hollyer, M.Sc. (Eng), P.Eng.*

I magnetometri scalari sono ampiamente utilizzati nell'esplorazione minerarie e petrolifera, archeologia, indagini ambientali, ricerca ordigni (UXO) ed armi e altre applicazioni nell'ambito delle scienze della Terra. Lo scopo di questo documento è quello di fornire una breve panoramica tecnica dei vari modelli di magnetometri scalari disponibili, i loro principi di funzionamento ed alcune linee guida per il loro utilizzo in ambienti geofisici reali.

*Figura 1: gradiometro scalare Overhauser con opzione VLF*

## MAGNETOMETRI - UNA BREVE DESCRIZIONE

Un magnetometro è uno strumento con un singolo sensore che misura la densità di flusso magnetico B (in unità di Tesla o As / $m^2$).

La Terra genera un debole campo magnetico che produce densità di flusso (in aria) di circa 18 micro Tesla in alcune parti del Sud America ad un livello di oltre 60 microTesla nel Circolo Artico e Antartide.

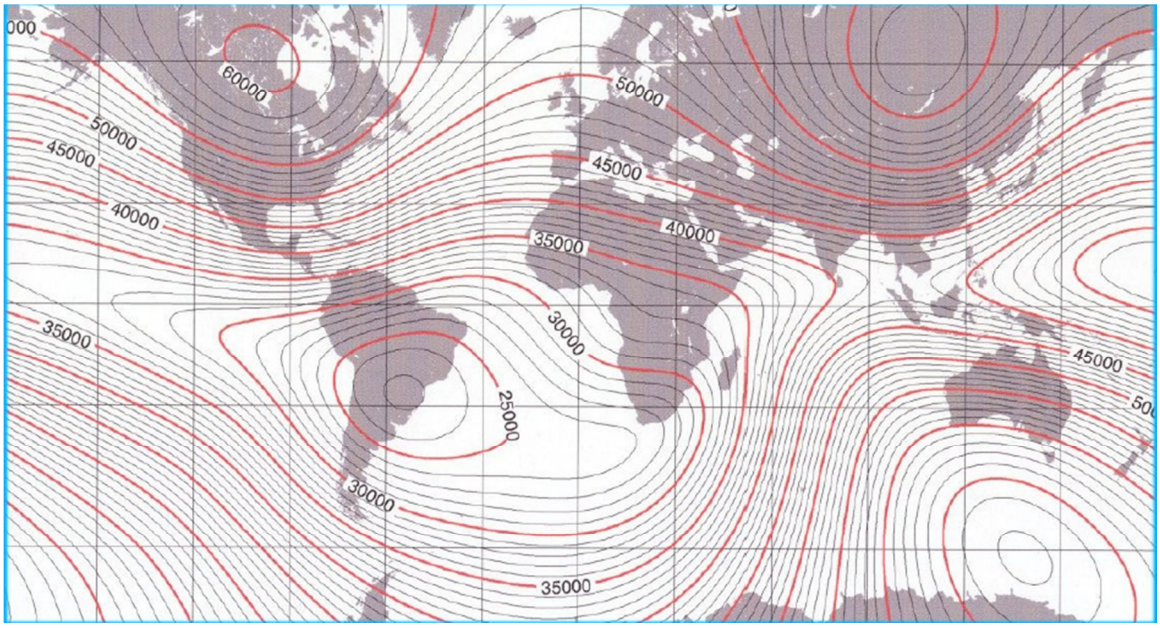


*Figura 2: intensità del campo magnetico terrestre totale in nT*

Poiché la densità del flusso magnetico nell'aria è direttamente proporzionale alla forza del campo magnetico H [A / m], un magnetometro è in grado di rilevare le fluttuazioni nel campo della Terra.
I valori registrati possono essere dovuti ad effetti dinamici o statici. Le anomalie dinamiche sono legate all'attività all'interno del nucleo fuso della Terra, all'attività solare o da flussi di ioni o tempeste solari provenienti dallo spazio.. Le anomalie statiche sono legate ai diversi materiali presenti nella crosta terrestre.
I materiali che distorcono le linee di flusso magnetico sono noti come magnetici e includono materiali come la magnetite che possiedono campi magnetici propri, così come alto valori di conducibilità magnetica. Materiali come questo creano distorsioni nel flusso magnetico della Terra che fluisce intorno a loro: i magnetometri sono in grado di rilevare queste distorsioni.
Un magnetometro misura la densità del flusso magnetico al punto dello spazio in cui si trova il sensore. Una distorsione generata da un oggetto magnetico (dipolo magnetico) diminuisce di solito in intensità con il cubo della distanza dall'oggetto. Quindi, la distanza massima a cui un dato magnetometro può individuare un oggetto è direttamente proporzionale alla radice cubica della sensibilità del magnetometro.
La sensibilità è comunemente misurata in nano Tesla, [10-9 T] o gamma (l'unità non SI che molti geofisici usano comunemente), o in pico Tesla [10 -12 T] o femto Tesla [10-15 T].
Generalmente, i magnetometri sono suddivisi in due categorie che variano sia nella modalità operativa che nel principio di funzionamento:

• Magnetometri vettoriali: misurano il valore di densità del flusso in una specifica direzione nello spazio tridimensionale (densità del flusso magnetico è un vettore quindi dotato di una direzione e un'intensità). Un esempio è il magnetometro Fluxgate in grado di misurare la forza di qualsiasi componente del campo della Terra orientando il sensore nella direzione della componente desiderata.
• Magnetometri scalari: misurano solo la grandezza del vettore passando attraverso il sensore indipendentemente dalla direzione.
Limiteremo questo articolo a magnetometri scalari, appartenenti tutti al tipo quantico.

## MAGNETOMETRI QUANTICI

I magnetometri quantici si basano sullo spin (rotazione) di particelle subatomiche:

- Nuclei - solitamente protonici o isotopi dell'elio 3
- Elettroni di valenza non appaiati

La rotazione di nuclei e di elettroni di valenza non appaiati è associata al momento magnetico ed è caratteristico per ogni particolare particella. L'accoppiamento del momento magnetico di ogni particella con il campo applicato è quantizzato o limitato ad un insieme discreto di valori come determinato dalle leggi della meccanica quantistica.
Le seguenti equazioni mettono in relazione il momento magnetico alla costante giromagnetica ed al numero quantico:

$$\mu = \gamma_n \mathbf{p} \quad \mu = \gamma_n \, I \, h / 2\pi$$

Dove μ e p sono rispettivamente vettori del momento magnetico e meccanico, e γn è una costante giromagnetica (caratteristica per ogni particella), h è la costante della Plank e I è un numero quantico (un "semi-intero").
Nel campo magnetico ambientale, ci sono 2I + 1 orientamenti per gli elettroni e per i nuclei (cioè i protoni e l'elio 3). Per ciascuno di questi, I = ½. Ci sono pertanto, solo 2 orientamenti consentiti (paralleli e anti-paralleli al campo magnetico).
Poiché le popolazioni di ciascuno degli orientamenti sono diverse, un insieme di momenti magnetici produrrà una piccola magnetizzazione macroscopica netta che è allineata con il campo magnetico.
La magnetizzazione macroscopica del nucleo o dell'elettrone è statica. Se i momenti magnetici elementari
vengono forzati fuori dall'allineamento con la direzione del campo magnetico ambientale, le corrispondenti particelle precedono (cioè ruotano) intorno al campo in un piano di precessione perpendicolare alla direzione del campo.
Essi precedono con una frequenza angolare associata, chiamata frequenza di Larmor, ω0, come definito secondo la seguente espressione:

$$\omega_0 = \gamma_n \mathbf{B} \quad (2)$$

dove B è la densità del flusso magnetico ambientale. B è generalmente proporzionale al valore del campo magnetico.
Tuttavia, nei campi magnetici deboli, come la Terra, i segnali di tutti i magnetometri scalari sono troppo deboli per consentire una misura semplice della Frequenza Larmor. Devono essere aumentati in intensità o "polarizzati" per assicurarsi sensibilità sufficiente per la misurazione.

## LA POLARIZZAZIONE

A causa della distribuzione dei campi magnetici locali, tutte le particelle presenti nel sensore precedono con frequenze naturalmente diverse e perdono il sincronismo nel tempo.
Il segnale associato alla precessione decade esponenzialmente ed il tempo di decadimento caratteristico è chiamato tempo di rilassamento "trasversale" T2.
Allo stesso modo, se si applica un campo magnetico ad un insieme di spins, ci vuole tempo per stabilire la magnetizzazione macroscopica. L'aumento è ancora esponenziale con la costante di tempo, T1, chiamata tempo di rilassamento "longitudinale". L'intensità della magnetizzazione è proporzionale alla forza del campo magnetico applicato.
La forza della magnetizzazione e quindi del segnale di precessione rilevabile, dipende dalla differenza di popolazioni dei due orientamenti dei momenti magnetici. L'aumento di questa

differenza si chiama polarizzazione e può essere raggiunto nei seguenti tre modi nei magnetometri quantici:

- Applicazione di forti campi magnetici ausiliari (in realtà densità di flusso). Questo fenomeno è basato sugli effetti nucleari.
- Trasferimento di polarizzazione naturale di elettroni ausiliari a protoni (effetto Overhauser); questo fenomeno è basato sugli effetti nucleari.
- Manipolazione ottica o "pompaggio" di elettroni elevandoli ad uno stato superiore selettivo.

Questo fenomeno si basa sugli effetti di risonanza elettronica e nucleare (Elio 3).

Nota: in pratica, T2 è molto breve in campioni solidi. Tutti i magnetometri quantici utilizzano quindi sensori liquidi o gassosi. Nei liquidi e nei gas T1 e T2 assumono valori tra una frazione di secondo e diversi secondi.
Un'eccezione è l' Elio 3, che ha un valore T2 di diverse ore o addirittura giorni.

**MAGNETOMETRI A PROTONI**

I magnetometri a precessione di protoni hanno a lungo avuto una nicchia di mercato in quanto considerati poco costosi e portatili, nonostante limiti quali uno elevato consumo ed una sensibilità relativamente bassa. Le applicazioni tipiche includono le indagini ambientali e di ingegneria dove la profondità di esplorazione richiesta è generalmente ridotta e non sono richieste elevate sensibilità per rilevare e mappare, o Indagini finalizzate alla esplorazione mineraria.
Principi operativi
Un magnetometro a precessione di protoni utilizza gli atomi di idrogeno per generare segnali di precessione. I liquidi, come il kerosene, vengono usati perché offrono densità molto elevate di idrogeno e non sono pericolose da gestire.
Una corrente DC polarizzante viene fatta passare attraverso una bobina avvolta attorno ad un campione di liquido (acqua, kerosene o simili). Ciò crea una densità di flusso magnetico ausiliario dell'ordine di 100 Gauss.
I protoni durante la misura sono polarizzati a una magnetizzazione più forte corrispondente all'equilibrio termico del flusso magnetico di più forte densità. Quando il flusso ausiliario viene interrotto rapidamente, i protoni "polarizzati" precedono per riallinearsi alla densità di flusso normale. La frequenza della precessione, f0, è legata direttamente alla densità del flusso magnetico, B, (in Tesla, T), secondo la seguente equazione:

$Fo = (\gamma_p / 2\pi) B \qquad \gamma_p / 2\pi = 42{,}5763751 \text{ MHz / T} \qquad (3)$

Il segnale di precessione è presente da una frazione di un secondo fino a 2 secondi e può essere misurato con un contatore speciale. La qualità del segnale può essere ricavata dall'ampiezza del segnale e dalle sue caratteristiche di decadimento, che sono calcolate in media durante il periodo di registrazione.
Le misure di precessione del protone sono necessariamente sequenziali. Ciò significa che Vi è una polarizzazione iniziale, seguita da una misurazione della frequenza – dopo di che il ciclo si ripete. Ciò differisce dalle misurazioni continue dove i nuclei sono polarizzati e vengono effettuate misure di frequenza contemporaneamente. Ulteriori informazioni sulle misure continue sono disponibili nelle sezioni dedicate ai magnetometri Overhauser ed a pompaggio ottico.
In sintesi, la precessione di protoni utilizza un semplice metodo di polarizzazione, ma esso consente di misurare le sensibilità a una frazione di nT e fino a 2-3 letture al secondo.

## MAGNETOMETRI OVERHAUSER

Il magnetometro Overhauser, con il suo insieme unico di funzioni, rappresenta un pilastro della magnetometria moderna del campo magnetico della Terra. La sua sensibilità ad esempio, è paragonabile a quella dei più costosi magnetometri al Cesio.
Il magnetometro Overhauser offre anche sensori omnidirezionali superiori, nessuna zona morta, nessun errore di orientazione o tempo di riscaldamento prima delle indagini; largo intervallo di temperatura di funzionamento (da -40 a 55 gradi Celsius e da -55 a 60 gradi Celsius facoltativi); è robusto e affidabile e non richiede manutenzione o calibrazione. Altri vantaggi legati alla elevata precisione assoluta, velocità di funzionamento rapida (fino a 5 letture al secondo) e consumo di batteria eccezionalmente basso.
I magnetometri Overhauser utilizzano segnali di precessione protonica per misurare il campo magnetico  ma è qui che termina la somiglianza con gli strumenti a precessione del protone.
I magnetometri Overhauser sono stati introdotti da GEM Systems, Inc. negli anni '80 e '90 e sono lo standard per gli osservatori magnetici, per il monitoraggio del campo magnetico a lungo termine in vulcanologia e geofisica, l'esplorazione in movimento e l'esplorazione marina.
Principi operativi
L'effetto Overhauser sfrutta un effetto fisico quantico che si applica all'atomo di idrogeno. Questo effetto si verifica quando un liquido speciale (contenente elettroni liberi e non appaiati) è combinato con atomi di idrogeno e quindi esposto a polarizzazione secondaria da una radiofrequenza (RF) magnetica (cioè generato da una sorgente RF).
I campi magnetici RF sono ideali per l'uso in dispositivi magnetici perché sono "Trasparenti" al campo magnetico "DC" della Terra e la frequenza RF è ben fuori dalla larghezza di banda del segnale di precessione (cioè non introducono rumore al sistema di misura).
Gli elettroni non legati nel liquido speciale trasferiscono il loro stato eccitato (cioè energia) ai nuclei dell'idrogeno (cioè ai protoni). Questo trasferimento di energia altera le popolazioni dello stato di spin dei protoni e polarizza il liquido - proprio come un magnetometro a precessione di protoni - ma con molta meno potenza e molta maggiore portata.
La proporzionalità tra la frequenza di precessione e la densità del flusso magnetico è perfettamente lineare, indipendente dalla temperatura e solo leggermente affetta  dalla schermatura degli elettroni orbitali di idrogeno. La costante di proporzionalità, γp, è ben conosciuta ed è identica alla costante giromagnetica di precessione protonica (equazione 3).
I magnetometri Overhauser raggiungono livelli di rumore di 0,01nT / √Hz e possono operare in modalità stazionaria (manuale) o continua (automatica).

## VANTAGGI SULL'USO DEI MAGNETOMETRI A PRECESSIONE DI PROTONI ED ALTRI QUANTICI

Riassumendo, alcune delle principali differenze tra magnetometri Overhauser ed a precessione di protoni sono i seguenti:

- Più di un ordine di grandezza di maggiore sensibilità anche nei valori più bassi di campo magnetico terrestre; questo comporta il fatto che i sistemi Overhauser compensano una "debolezza" di base dei magnetometri a protoni (cioè deterioramento della qualità del segnale in caso di bassa densità del flusso magnetico (gamma di 20μT) creando un piccolo flusso magnetico ausiliario durante la polarizzazione.
- Sensibilità: praticamente coincide con la sensibilità del Cesio.
- Questo è l'unico magnetometro quantistico che offre funzionamento continuo o sequenziale. Con i magnetometri Overhauser è possibile misurare continuamente o sequenzialmente a causa dell'uso di un campo di polarizzazione RF. Il campo RF è trasparente alla misura del campo magnetico e quindi può essere abilitato in ogni momento.
- Velocità di campionamento: dal momento che il liquido può essere polarizzato durante la misura del segnale, la frequenza di campionamento è più alta (fino a 10 Hz).
- Efficienza energetica: i magnetometri Overhauser sono notevolmente più efficienti di qualsiasi altro magnetometro quantistico a causa della bassa potenza necessaria per la generazione di segnali RF. Il consumo di energia può essere ottimizzato fino a 1 W per il funzionamento continuo.
- Sensori omnidirezionali. Nessuna zona morta, praticamente nessun errore di orientamento e nessun tempo di riscaldamento.

Ci sono anche altri vantaggi legati al processo produttivo (che sono meno interessanti per gli utenti), quali la relativa semplicità, l'affidabilità, costi di produzione relativamente bassi rispetto alla sensibilità, peso ridotto e bassa potenza richiesta.

## MAGNETOMETRI A POMPAGGIO OTTICO

Questo tipo di magnetometro è costituito da 1 magnetometro nucleare (elio 3) e quattro magnetometri a risonanza di elettroni (Elio 4, Rubidio, Cesio e Potassio).
Di seguito saranno trattati gli strumenti al Cesio e al Potassio a pompaggio ottico, i sistemi più comuni in uso.
Le applicazioni sono simili ai magnetometri Overhauser con l'eccezione che il Cesio consente tempi di campionamento più alti.
Il Potassio presenta una maggiore sensibilità e una velocità di lettura velocità rispetto al Cesio.

### Principi di funzionamento

I magnetometri a pompaggio ottico con vapore alcalino usano metalli alcalini gassosi appartenenti alla prima colonna della tavola periodica, come Cesio, Potassio o Rubidio. Ciò significa che la cella contenente il metallo deve essere continuamente riscaldata a circa 45-55 gradi Celsius.
Questi magnetometri funzionano con il principio illustrato nella figura successiva:

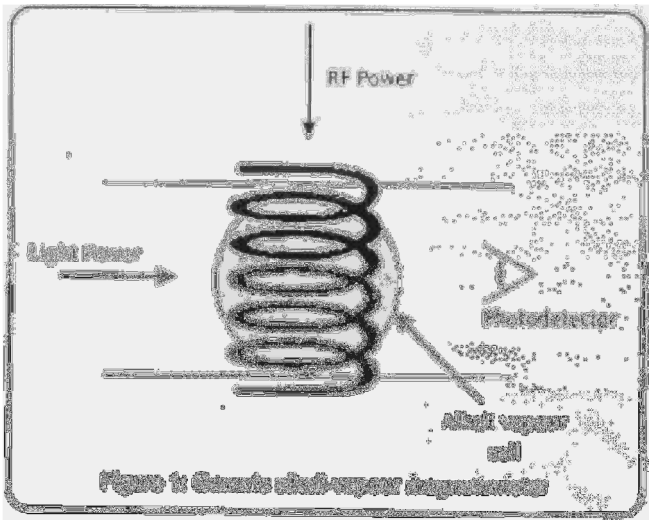


*Figura 3: Funzionamento del magnetometro a vapori alcalini.*

In primo luogo, una cella di vetro contenente metallo gassoso (vapore) è sottoposta (o "pompata") da luce ad una specifica lunghezza d'onda, un effetto chiamato polarizzazione della luce. La frequenza della luce è specificamente selezionata e circolarmente polarizzata per ciascuno elemento (chiamato linea spettrale D1) per spostare gli elettroni dal livello basale 1 a quello eccitato 2 (Figura 4).
Gli elettroni al livello 3 non sono stabili, e questi elettroni decadono spontaneamente a entrambi i livelli di energia 1 e 2. Alla fine, il livello 1 è pienamente popolato mentre il livello 2 è impoverito. Quando questo accade, l'assorbimento della luce polarizzante si ferma e la cella di vapore diventa più trasparente.
Quando ciò si verifica, entra in gioco la depolarizzazione RF. La potenza RF corrispondente alla differenza di energia tra i livelli 1 e 2 viene applicata alla cella per muovere gli elettroni dal livello 1 indietro al livello 2 (e la celle diventa nuovamente opaca). La frequenza del campo RF richiesto per ripopolare il livello 2 varia con il campo magnetico ambientale e viene chiamata *frequenza di Larmor*.

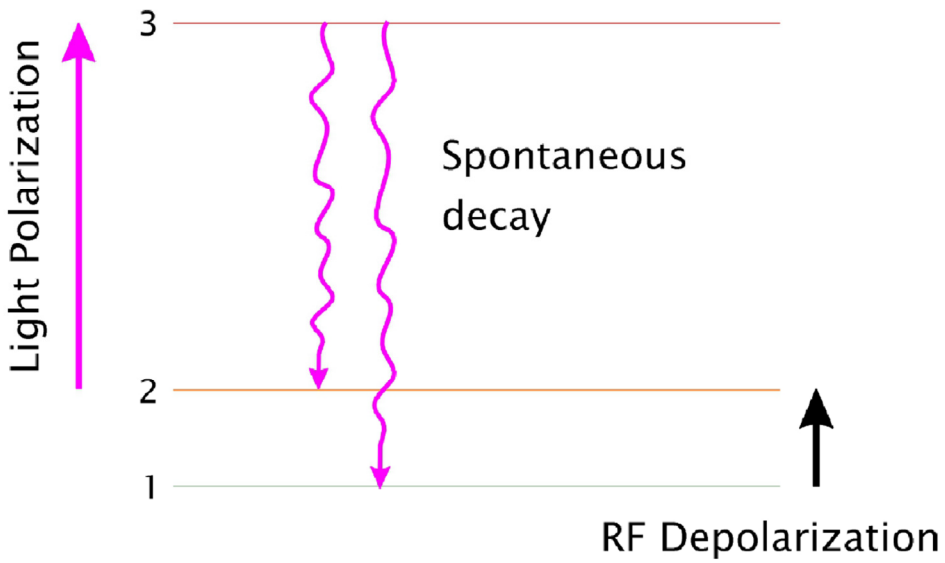


*Figura 4: Principio del sistema a vapori alcalini.*

La depolarizzazione da un campo magnetico circolare alla frequenza di Larmor tende a riequilibrare le popolazioni dei due livelli di base e la cella di vapore inizia ad assorbire più della luce polarizzante.
L'effetto della polarizzazione e della depolarizzazione determina una diversa intensità della luce in quanto modulata dalla frequenza RF. Rilevando la modulazione della luce e misurando la frequenza è possibile ottenere il valore del campo magnetico.
I magnetometri ad elio (chiamati magnetometri Mz) sono leggermente diversi in quanto la loro depolarizzazione RF deve essere modulata in frequenza. La modulazione consente il funzionamento al centro della linea spettrale, ma la velocità di funzionamento (Larghezza di banda) del magnetometro è limitata a circa una metà della frequenza di modulazione. I magnetometri a metallo alcalino sono tutti tipo Mx (vale a dire che la semplice frequenza di depolarizzazione è sufficiente).
Linee spettrali e l'influenza del nucleo
A causa dell'influenza dei loro nuclei, tutti gli elettroni di valenza dei metalli alcalini possiedono diversi livelli di energia, chiamati livelli di energia ad *effetto Zeeman*, ognuno proporzionale al campo magnetico. Le transizioni tra livelli di energia adiacenti sono chiamati linee spettrali. Per comprendere le linee spettrali, bisogna considerare sia i nuclei che gli elettroni che generano il segnale. I nuclei hanno un numero di stati magnetici consentiti corrispondenti ai loro numeri quantici. I metalli alcalini, ad esempio, hanno momenti magnetici con I = 3/2 (87Rb, K) e I = 7/2 (Cs). L'eccezione è il nucleo dell'elio 4 che non ha spin e momento magnetico. Tuttavia, ha un'unica, ampia linea spettrale (circa 70nT).
Il numero di linee negli spettri è governato dalle formule *Breit-Rabi* (vedi riferimento 2). Il Potassio, per esempio, ha 6 transizioni energetiche con separazioni reciproche di circa 100 nT mentre il Cesio ha 14 linee spettrali tutte entro 20 nT di separazione.
Le caratteristiche principali degli spettri sono la larghezza e l'ampiezza della linea. Con il Potassio, le linee sono molto strette e non si sovrappongono. Con Cs, le linee spettrali sono forti, ma anche densamente distanziate, molto ampie e sovrapposte. Di conseguenza, le linee di cesio vengono tipicamente raggruppate (cioè la misura si verifica sulla serie completa di tutte le linee spettrali).
Una implicazione è che il Cesio e il rubidio possono operare in modo semplice ed auto-oscillante, mentre il Potassio richiede un oscillatore ausiliario controllato in tensione (VCO)che viene quindi bloccato ad una linea spettrale. Il VCO fornisce la depolarizzazione per una sola linea, e le altre linee spettrali, rimangono passive (cioè non producono segnali di precessione).
Magnetometro di cesio
Il magnetometro a vapori di Cesio offre una buona sensibilità e larghezza di banda (circa 10 pT √ Hz) ma presenta alcuni svantaggi, inclusi errori di orientazione.
Come descritto in precedenza, le linee spettrali del Cesio sono ampie, il che significa che i livelli di energia dell'elettrone associati all'effetto Zeeman variano ampiamente di magnitudo su una popolazione di atomi di Cesio. In condizioni statiche (vale a dire che l'orientamento del campo magnetico è stazionario), compare un picco ed il sistema oscillerà intorno a questo picco.
Tuttavia, quando cambia la direzione del campo magnetico, la posizione di questo picco cambierà perché le ampiezze della linea spettrale cambiano. Di conseguenza, la frequenza di auto-oscillazione si sposta, producendo un errore di orientazione. Poiché le linee spettrali del Cesio sono distribuite su circa 20 nT, l'errore di orientazione potrebbe essere importante. Egli effetti di questo problema possono essere attenuati con la tecnica detta split-beam ma con una notevole riduzione della sensibilità dello strumento al Cesio; in ogni caso, l'errore di orientazione non potrà essere migliore di +/- 1 nT.
A causa di questa caratteristica, la prestazione di un magnetometro al Cesio dipende fortemente dall'orientamento della potenza luminosa applicata rispetto alla potenza RF applicata. Piccoli

spostamenti meccanici all'interno del sensore possono causare numerosi spostamenti numerici nell'uscita dello strumento. Per questo motivo il magnetometro al Cesio deve essere periodicamente inviato in fabbrica, per il riallineamento del sensore. Il costo di questo riallineamento può essere significativo.

Magnetometro al Potassio

Le linee spettrali dell'atomo di Potassio sono estremamente strette e non vanno in sovrapposizione. Di conseguenza, la progettazione e realizzazione di un magnetometro di Potassio è più complessa di quello di un magnetometro al Cesio, ed è probabilmente per questo che GEM Systems è l'unico produttore commerciale al mondo di magnetometri di Potassio.

Il fatto che le linee spettrali del Potassio non si sovrappongono significa avere errori di orientazione molto bassi. Un altro vantaggio è costituito dal fatto che un magnetometro al Potassio non richiede mai la calibrazione presso la casa madre. Il solo componente che si usura è la sorgente luminosa (la lampada), che ha una vita di migliaia di ore ed è comunque economica da sostituire. Un altro vantaggio di linee spettrali strette è la elevata ampiezza di banda e la sensibilità. In laboratorio, speciali magnetometri al Potassio hanno mostrato livelli di rumore inferiori a 0,05 pT e hanno misurato campi magnetici variabili fino a 10.000 nT / sec.

**ZONE MORTE E EFFETTI ANGOLO DOPPLER**

A causa della fisica alla base del sistema, l'intensità dell'effetto Zeeman è dipendente dalla direzione del campo magnetico ambientale rispetto alla direzione della luce applicata ed alla potenza RF. Ciò crea "zone morte" attorno al sensore, che manifesta una perdita di segnale quando esso è impropriamente orientato nell'ambiente in cui deve operare. La tolleranza di questo orientamento è alta, tuttavia, di solito tra 10 e 80 gradi di orientamento del sensore.

Le zone morte (polari e equatoriali) sono presenti in tutti i magnetometri a pompaggio ottico tranne quelli ad Elio 4 che hanno solo una zona morta equatoriale mentre i magnetometri a Protoni e Overhauser (a causa della semplicità dei loro sensori) possono evitare completamente zone morte. Inoltre, è possibile realizzare sensori completamente omnidirezionali, progettando adeguatamente la forma delle bobine ed il tipo di liquido sensore circostante.

Come discusso in precedenza, la frequenza Larmor è la frequenza del momento di precessione magnetico

attorno al campo applicato in un piano di precessione perpendicolare alla direzione del campo. L'effetto di rotazione del sensore nello stesso piano aggiunge o sottrae da quella frequenza.

Per i magnetometri a bassa frequenza Larmor, questo può essere significativo (per i magnetometri Overhauser e a protoni sono di circa 23,7nT per 1 rotazione del sensore al secondo nella geometria peggiore). Tuttavia, la realizzazione di sensori omnidirezionali permette la soppressione o addirittura l'eliminazione dell'effetto.

## SCELTA DEL MAGNETOMETRO ED APPLICAZIONI CONSIGLIATE

In conclusione si possono riassumere le caratteristiche dei magnetometri quantici come segue:

1. Potassio offre una sensibilità superiore a qualsiasi altro metodo dovuto alle sue ben definite linee spettrali e dovrebbe essere utilizzato per applicazioni più impegnative ed importanti (le misurazioni statiche più sensibili e delicate, indagini aeree ad alta sensibilità ed indagini a terra (UXO, rilevazione delle mine, ecc.). La moderata tolleranza ai gradienti e le zone morte sono i punti deboli del sistema al Potassio.

2. I più recenti magnetometri a pompaggio laser ad Elio 4 hanno rotto la barriera dei 1 pT / √Hz (0.4pT / √Hz è stato segnalato). L'elio 4 è eccellente per le misure aeree ed altre applicazioni in cui non è richiesta una velocità di campionamento elevata.

3. Il Cesio ha una buona sensibilità di circa 10 pT / √Hz ed è indicato per le indagini aeree (con compensatore attivo per correggere gli errori di orientazione). Anche in altre applicazioni per alta risoluzione e tolleranza al gradiente in cui è possibile controllare l'orientamento del sensore. I punti deboli sono gli errori di direzione e le zone morte.

4. I magnetometri Overhauser offrono praticamente la stessa sensibilità del Cesio a velocità di funzionamento moderate, alta precisione e senza zone morte e praticamente nessun errore di orientazione. Sono caratterizzati da semplicità di progettazione e costi contenuti. I magnetometri Overhauser sono quasi ideali per le indagini marine, ricerche minerarie ed esplorazione del petrolio, indagini archeologiche, monitoraggio a lungo termine del campo magnetico.

5. I magnetometri a protoni sono gli ultimi della lista a causa della sensibilità inferiore e bassa velocità di campionamento ma con sensori omnidirezionali ed il costo più basso della produzione. Indagini a terra per l'esplorazione mineraria ed ambientale e le misure in stazionario del campo magnetico terrestre sono le applicazioni raccomandate per questi tipo di magnetometri.

References:

1. Abragam, 1961. Principles of Nuclear Magnetism, Oxford and Clarendon Press, 1961

2. Breit, G. and Rabi, I.I. 1931. Measurement of Nuclear Spin Phys. Rev. 38, 2082, 1931.

3. Handbook of Chemistry and Physics, 2002. 83rd edition CRC Press.

4. Happer, W., 1972. Optical Pumping, Review of Modern Physics 44, 2.

5. Harris, Robnik, 1994. Nuclear Magnetic Resonance, Spectroscopy John Wiley & Sons.

6. Hrvoic, I. 1989. Proton Magnetometers for Measurement of the Earth's Magnetic field Workshop on Magnetic Observatory Instrumentation Espoo, Finland.

7. Kurrecket, K, et al., 1988. Electron Nuclear Double Resonance Spectroscopy of Radicals in Solution VCH Publishers N.Y.

8. Schumacher, R.T., 1970. Magnetic Resonance, Principles and Applications W.A. Benjamin N.Y.