

ISSN/2499-5347

**S. BOLLANTI , P. DI LAZZARO,  
F. FLORA, L. MEZI, D. MURRA**

Dipartimento Fusione e Tecnologie per la Sicurezza Nucleare  
Laboratorio Applicazioni dei plasmi  
ed esperimenti interdisciplinari  
Centro Ricerche Frascati

**L. CAFARELLA, D. DI MAURO,  
A. ZIRIZZOTTI**

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia,  
Sezione Roma2  
via di Vigna Murata, 605 - Rome, Italy

# INDAGINE GEOMAGNETICA E METROLOGICA IN ANTARTIDE CON LA BUSSOLA SOLARE ELETTO-OTTICA BREVETTATA DA ENEA

RT/2024/19/ENEA

**ENEA**

AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,  
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

S. BOLLANTI , P. DI LAZZARO,  
F. FLORA, L. MEZI, D. MURRA

Dipartimento Fusione e Tecnologie per la Sicurezza Nucleare  
Laboratorio Applicazioni dei plasmi  
ed esperimenti interdisciplinari  
Centro Ricerche Frascati

L. CAFARELLA, D. DI MAURO,  
A. ZIRIZZOTTI

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia,  
Sezione Roma2  
via di Vigna Murata, 605 - Rome, Italy

# INDAGINE GEOMAGNETICA E METROLOGICA IN ANTARTIDE CON LA BUSSOLA SOLARE ELETTRO-OTTICA BREVETTATA DA ENEA

RT/2024/19/ENEA

**ENEA**

AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,  
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

I rapporti tecnici sono scaricabili in formato pdf dal sito web ENEA alla pagina [www.enea.it](http://www.enea.it)

I contenuti tecnico-scientifici dei rapporti tecnici dell'ENEA rispecchiano l'opinione degli autori e non necessariamente quella dell'Agenzia

The technical and scientific contents of these reports express the opinion of the authors but not necessarily the opinion of ENEA.

## **INDAGINE GEOMAGNETICA E METROLOGICA IN ANTARTIDE CON LA BUSSOLA SOLARE ELETTRO-OTTICA BREVETTATA DA ENEA**

S. Bollanti, L. Cafarella, P. Di Lazzaro, D. Di Mauro, F. Flora, L. Mezi, D. Murra, A. Zirizzotti

### **Riassunto**

Una bussola solare elettro-ottica di elevata precisione, progettata e sviluppata presso il Centro Ricerche ENEA di Frascati, è stata usata per misure di orientamento presso l'Osservatorio polare della Stazione Concordia, in Antartide. La bussola solare (brevetto ENEA) è compatta, automatica, e fornisce una risposta in pochi secondi. È in grado di misurare la direzione geografica del Polo Nord con una deviazione standard di 0,01 gradi. Le sue prestazioni sono paragonabili a quelle dei costosi sistemi GPS e giroscopi, senza gli inconvenienti di lunghi tempi di misura, dipendenza del risultato dalla latitudine, e costi elevati. La bussola ENEA è stata usata durante la campagna antartica estiva del dicembre 2017 condotta dall'INGV, allo scopo di misurare la presunta deriva della banchisa antartica su cui si trova la base Concordia, che era stata evidenziata da diverse misurazioni tramite GPS differenziale. I risultati delle misure con la bussola solare ENEA mostrano che tale deriva non c'è stata. Questo falso allarme ha permesso di capire che alle latitudini elevate i risultati delle misure di orientamento effettuate con la bussola solare sono molto più affidabili di quelli ottenuti con i sensori GPS.

**Parole chiave:** Antartide; Bussola solare; GPS; Nord geografico;



## INDICE

<b>1. Introduzione.....</b>	<b>7</b>
<b>2. La bussola solare ENEA.....</b>	<b>8</b>
<b>3. Un problema in Antartide.....</b>	<b>10</b>
<b>4. Misure sperimentali.....</b>	<b>10</b>
<b>5. Risultati.....</b>	<b>12</b>
<b>Conclusioni.....</b>	<b>13</b>
<b>Referenze.....</b>	<b>14</b>



# INDAGINE GEOMAGNETICA E METROLOGICA IN ANTARTIDE CON LA BUSSOLA SOLARE ELETTRIO-OTTICA BREVETTATA DA ENEA

## 1. Introduzione

La misura accurata della direzione del Nord geografico (Nord vero) è importante per diverse applicazioni, che includono l'installazione e il controllo di impianti solari a concentrazione, rilievi cartografici, scavi di tunnel, installazioni aeroportuali, opere di ingegneria edile, calibrazione di bussole, archeoastronomia e molte altre. Nelle misure di geomagnetismo, la determinazione della direzione del Nord geografico è essenziale per ottenere il riferimento per la stima della declinazione magnetica, cioè la differenza angolare tra la direzione del Polo magnetico, che si muove continuamente lungo traiettorie irregolari e imprevedibili [1] e la direzione del Polo geografico, fissa per definizione. I dispositivi per la misura accurata della direzione del Nord geografico si basano su sensori GPS (Global Positioning System) multi-segnale e sui giroscopi [2-5].

I sensori GPS utilizzano la conoscenza delle esatte coordinate geografiche di due punti per fornire il loro azimut relativo. In condizioni ideali, quando un numero sufficiente di satelliti si trova all'interno dell'orizzonte ottico, un sensore GPS può raggiungere una precisione di poche decine di mm e quindi, per raggiungere una precisione di, ad esempio, 0,1 gradi, la distanza tra i sensori dovrebbe essere maggiore di 5 m, una condizione facile da soddisfare. Tuttavia, la precisione della misura può peggiorare a causa delle interferenze elettromagnetiche (dovute, ad esempio, a ostacoli e/o riflessi spuri del segnale da edifici, rilievi, neve). Inoltre, i risultati potrebbero essere inaffidabili alle latitudini elevate a causa della scarsa copertura satellitare.

Le girobussole sfruttano il principio di conservazione del momento angolare, che determina l'allineamento di un giroscopio lungo la direzione dell'asse terrestre. I risultati delle girobussole sono molto accurati (incertezza minore di 0,01 gradi), ma impiegano molto tempo per fornire i risultati (di solito sono necessari più di 20 minuti) e sono costosi. Analogamente ai sensori GPS multi-segnale, le girobussole potrebbero fornire risultati inaffidabili se utilizzate a latitudini elevate, dove l'asse terrestre è quasi parallelo alla direzione della gravità.

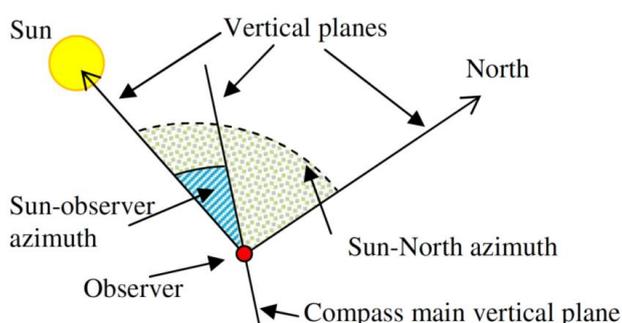
In linea di principio, il metodo più accurato per determinare il Nord geografico si basa sulla misura dell'azimut del Sole, note con precisione l'ora locale e le coordinate. Uno dei migliori dispositivi che sfrutta questo principio è la bussola solare elettro-ottica progettata, sviluppata, e brevettata dal gruppo Eccimeri del Centro ENEA di Frascati, descritta nelle referenze [6-12]. In questo Rapporto illustriamo il principio di funzionamento della bussola solare ENEA e descriviamo il suo utilizzo per verificare se una presunta deriva della banchisa antartica su cui si trova la base Concordia, che era stata rilevata da ripetute misurazioni GPS, fosse reale o dovuta al malfunzionamento degli stessi GPS.

## 2. La bussola solare ENEA

La bussola solare ENEA funziona come una meridiana inversa: le meridiane sono allineate al Nord geografico e in base alla posizione del Sole proiettano l'ombra che indica l'ora, mentre la bussola ENEA misura la posizione del Sole e dà la direzione del Nord geografico se si conoscono l'ora e le coordinate del luogo.

In pratica, un semplice algoritmo calcola la posizione del Sole, visto dall'osservatore in un dato luogo e tempo, mediante una soluzione semi-analitica delle leggi di Keplero [6]. Le leggi di Keplero danno in ogni istante la posizione relativa tra Sole e Terra. Invertendo le equazioni di Keplero è possibile calcolare la direzione del Sole visto da un dato luogo/tempo sulla Terra.

Utilizzando un rilevatore elettro-ottico, basato su una fenditura e un sensore CMOS, la bussola è in grado di misurare la 'linea di vista' del Sole rispetto ad una direzione di riferimento con un'altissima precisione. La Fig. 1 mostra come, una volta misurato l'angolo tra due piani verticali di riferimento, il primo contenente il Sole e l'osservatore ed il secondo rappresentato dal piano verticale della bussola solare, e conoscendo l'azimut del Sole, possiamo ottenere l'indicazione della direzione del Nord geografico rispetto al piano di riferimento, con una precisione quadratica media (rms) di circa 0,01 gradi [7-10].

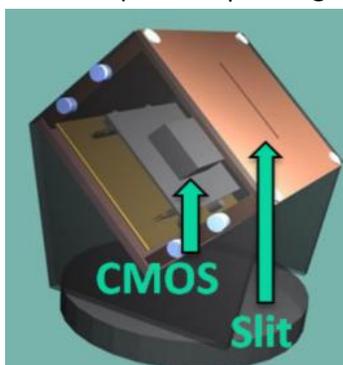


**Figura 1.** Rappresentazione degli angoli visti dal punto di vista dell'osservatore.

La precisione della bussola solare dipende dall'algoritmo usato per il calcolo delle effemeridi e dall'errore di misura della direzione del Sole.

Per quanto riguarda l'algoritmo, lo abbiamo confrontato con i risultati forniti dal *Solar Position Algorithm* [13] su decine di combinazioni data/ora, ottenendo un accordo entro una deviazione standard di 0,2 arcmin ( $\approx 3 \times 10^{-3}$  gradi).

Per quanto riguarda la misura della direzione del Sole, la Fig. 2 mostra il principio di funzionamento della bussola: una fenditura larga 0,1 mm e lunga 40 mm, illuminata dalla luce solare, proietta una linea di luce su un sensore CMOS (640x480 pixel; dimensione pixel 5,6  $\mu\text{m}$ ; angolo accettazione 12,6°; risoluzione 8 bit).



**Figura 2.** Rappresentazione schematica della bussola solare elettro-ottica ENEA. I raggi del Sole arrivano sulla fenditura, che lascia passare una riga di luce che colpisce il sensore CMOS. Un filtro ottico, qui non disegnato, è posto sopra la fenditura per attenuare l'intensità della linea luminosa e non saturare il sensore, vedi la Fig. 3.

Un software elabora l'immagine catturata dal sensore e calcola la posizione del picco d'intensità della linea luminosa rispetto alla linea rappresentata dall'intersezione, sul sensore, del piano verticale contenente la fenditura, con una precisione di  $1\ \mu\text{m}$  (circa un quinto di pixel). Poiché la distanza tra la fenditura e il sensore è di  $16,5\ \text{mm}$ , la direzione del Sole, ovvero l'angolo tra il Sole e il piano verticale della bussola che passa attraverso la fenditura, vedi la Fig. 1, è nota con un errore massimo di  $3,5 \times 10^{-3}$  gradi. Quindi, nel caso peggiore, la precisione totale della bussola solare può essere stimata come  $\sqrt{(3 \times 10^{-3})^2 + (3,5 \times 10^{-3})^2} = 4,6 \times 10^{-3}$  gradi.

Un microprocessore calcola sia l'algoritmo delle effemeridi che la posizione della linea luminosa in un secondo circa.

Per ottenere l'orizzontalità della bussola e avere un buon sistema di puntamento, la bussola solare ENEA è solitamente montata su un teodolite (Tecnix, modello FET402K-L), che ha una precisione di puntamento di  $10^{-3}$  gradi, e regolazione dell'orizzontalità entro  $8 \times 10^{-3}$  gradi, vedi la Fig.3.



**Figura 3.** Bussola solare ENEA montata su teodolite. La testa di misura con il sensore ottico è all'interno di una scatola di  $60 \times 60 \times 50\ \text{mm}^3$ , posta sulla parte superiore del teodolite, mentre l'elettronica è situata in una console di controllo con display fissata sulle gambe del treppiede. Un apposito filtro ottico scuro è posto sopra la fenditura, per evitare la saturazione del sensore CMOS.

Le prestazioni della bussola solare ENEA sono state ottenute misurando la direzione di vista di diversi target noti e misurando la direzione tra due pilastri geo-referenziati le cui coordinate sono note entro un errore angolare di circa  $4''$  ( $\approx 1/900$  di grado). Come mostrato in [6], in quest'ultimo caso la misura effettuata con la bussola ENEA era appena  $0,2'$  (cioè  $12''$  ovvero  $3,3 \times 10^{-3}$  gradi) diversa dal valore atteso.

Per le sue rimarchevoli caratteristiche, la bussola ENEA mostrata in Fig. 3 è adatta per la determinazione rapida e accurata del Nord geografico in diversi contesti, e potrebbe funzionare anche su altri pianeti sostituendo i parametri astronomici della Terra con quelli del pianeta, e sostituendo il GPS con un orologio interno [14]. In particolare, la bussola ENEA è un'interessante alternativa al GPS e ai giroscopi, soprattutto quando la misurazione deve essere effettuata a latitudini elevate. Durante l'estate antartica del 2017, la

bussola solare ENEA è stata utilizzata in una campagna di misura della declinazione magnetica, come descritto nella sezione successiva.

### 3. Un problema in Antartide

Nell'ambito di un accordo di collaborazione tra ENEA e INGV, la bussola solare ENEA è stata utilizzata per verificare la direzione individuata da una linea di riferimento presso la stazione antartica italo-francese Concordia, situata nella regione denominata Dome-C (coordinate: 75° 6' 4" S, 123° 19' 51" E) . Ad una distanza di 300 metri dagli edifici della stazione principale, due rifugi non magnetici mostrati in Fig. 4 sono usati per misurazioni geomagnetiche tramite l'orientamento di una linea ideale che unisce due punti di riferimento: un pilastro in uno dei rifugi e una palina sul muro esterno dell'altro rifugio.



**Figura 4.** I due rifugi utilizzati per effettuare misurazioni geomagnetiche fotografati dalla stazione Concordia durante l'estate antartica del 2005. Negli anni successivi entrambi i rifugi sono stati coperti da precipitazioni nevose.

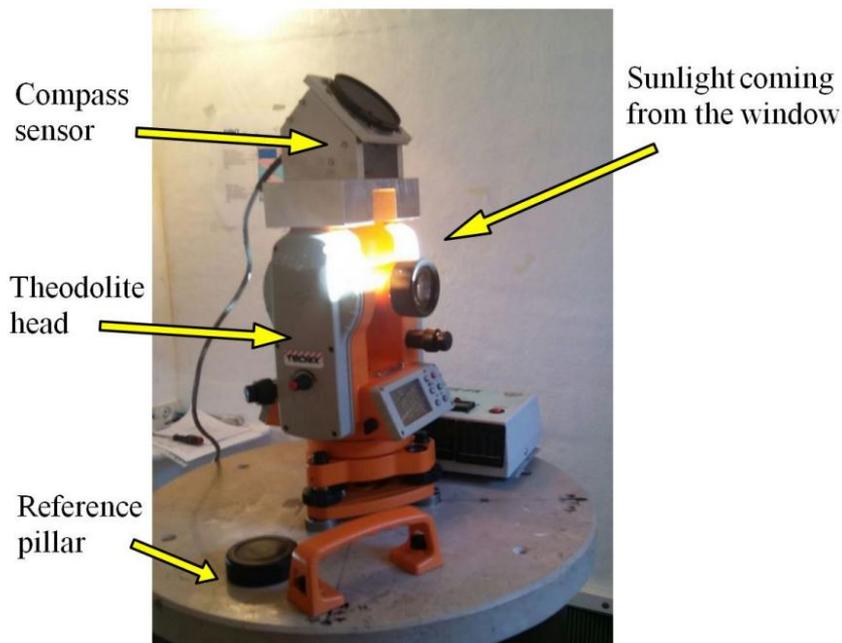
Quando il pilastro e la palina furono posizionati nel 2003 e fino al 2007, i rifugi erano liberi dalla neve, come si vede in Fig. 4. L'allineamento relativo dei due rifugi (cioè la linea che unisce il pilastro e la palina) è stato misurato con metodi astronomici, risultando in un valore di 253° 56' 52" (253,9478°) rispetto al Nord geografico [15]. Negli anni successivi i rifugi furono progressivamente coperti da neve [16], e furono effettuate misure con dispositivi GPS differenziali per verificare la costanza dell'allineamento. Queste misure hanno dato risultati diversi rispetto alla prima misura astronomica e la differenza è aumentata rapidamente negli anni.

Poiché la Stazione Concordia si trova a quota 3.232 metri sul livello del mare e i rifugi sono fissati sulla calotta glaciale, gli spostamenti della linea di allineamento hanno suggerito che la banchisa stesse subendo un lento movimento che stava trascinando i rifugi e di conseguenza anche la Stazione Concordia. Tuttavia, un'altra possibile spiegazione dell'incongruenza tra il dato astronomico e le misure effettuate con il GPS è che queste ultime potevano essere state influenzate da errori, perché alle latitudini elevate i satelliti sono bassi sull'orizzonte e i segnali GPS possono essere disturbati dai segnali riflessi dalla neve e dal ghiaccio circostanti, oltre alla distorsione del segnale quando i sensori GPS sono coperti da uno strato di neve.

Per verificare quale delle due ipotesi fosse corretta, l'INGV ha proposto una nuova misura astronomica usando la bussola solare ENEA, scelta per la sua facilità d'uso, la velocità di risposta e l'elevata precisione dei risultati che non sono influenzati dalla latitudine.

### 4. Misure sperimentali

Durante i primi tentativi di misura, ci attendeva una sgradita sorpresa. Infatti, a causa dell'elevazione del Sole e del limitato angolo di visione dalla finestra del rifugio, i raggi solari non potevano raggiungere la fenditura della bussola solare posta sopra il pilastro durante i 25 minuti del transito del Sole, vedi la Fig. 5.



**Figura 5** . La bussola ENEA, montata su un teodolite, è stata inizialmente posizionata sul pilastro all'interno del primo rifugio. In questa posizione, però, i raggi del sole non potevano raggiungere la fenditura della bussola.

Siamo stati quindi costretti a posizionare la bussola lungo la linea che congiunge il centro della colonna e la linea di allineamento tra i due rifugi, vedi la Fig. 6, in modo che i raggi del sole potessero illuminare la fenditura della bussola ENEA. Poiché la distanza tra il pilastro e il segno di riferimento è di 26 m, per mantenere l'errore angolare entro 1 arcmin lo spostamento trasversale massimo accettabile dalla linea di allineamento era di 7,6 mm, una condizione facile da soddisfare.



**Figura 6** . Foto della bussola ENEA posizionata lungo la linea di allineamento dei due rifugi. La foto è scattata da dietro il pilastro, e mostra la finestra del rifugio, da cui si intravede appena il punto di riferimento sul muro dell'altro rifugio attraverso un canale scavato nella neve.

Fino al 2005 i due rifugi erano privi di neve, vedi la Fig. 4, e negli anni successivi sono stati progressivamente sommersi dalla neve, ed è stato necessario scavare un tunnel nella neve per effettuare le misure di allineamento, come mostrato nella Fig. 6.

## 5. Risultati

Nonostante le difficoltà e le condizioni meteorologiche, le misure hanno avuto successo. In dettaglio, sono state effettuate 16 misure tra le 10:00 e le 10:30 ora locale, ad una temperatura costante all'interno del rifugio di +10 °C. La tabella 1 mostra l'elevato livello di precisione dei risultati, con la differenza tra i valori estremi inferiore al centesimo di grado. La deviazione standard associata alle misure è di soli 3 millesimi di grado.

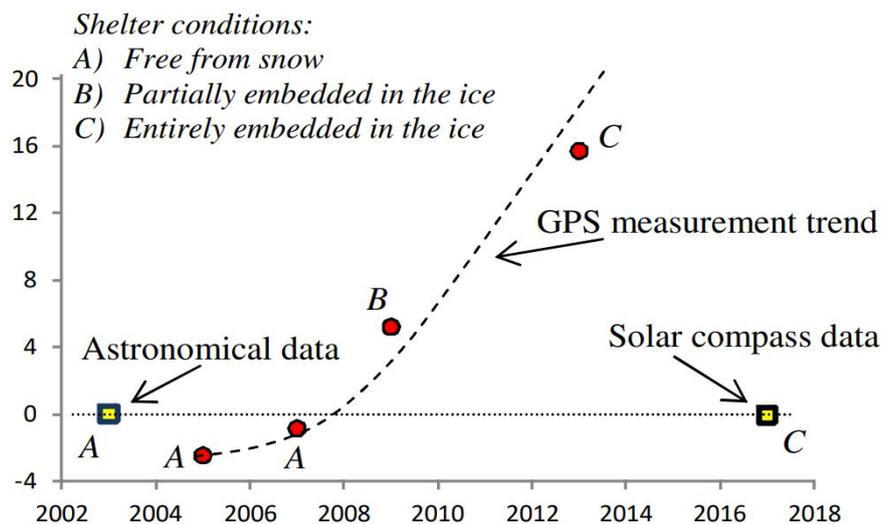
**Tabella 1** . Orientamento misurato rispetto al Nord reale della linea che congiunge i punti di riferimento dei due rifugi misurati con la bussola solare ENEA sull'altopiano antartico nei pressi della stazione Concordia, in funzione del tempo di misura, cioè dei diversi angoli da cui si i raggi del sole giungono durante il suo moto apparente.

TEMPO DI ACQUISIZIONE (minuti-secondi)	ALLINEAMENTO DEI DUE RIFUGI (gradi)
0	253,945°
1' 15"	253,945°
2' 39"	253,948°
4' 33"	253,949°
5' 49"	253,951°
8' 22"	253,946°
10' 08"	253,945°
13' 38"	253,943°
16' 38"	253,945°
17' 34"	253,942°
18' 39"	253,952°
19' 21"	253,948°
20' 05"	253,943°
20' 52"	253,945°
21' 48"	253,951°
22' 27"	253,947°

Dalla Tabella 1, il valore medio di orientamento della direzione di riferimento è 253,946° (253° 56' 46") con una differenza di soli 0,0018° ( $\approx 0,7''$ ) rispetto alla misura astronomica effettuata nel 2003. In pratica, il valore di orientamento ottenuto con la bussola solare coincide con il valore astronomico del 2003 entro gli errori di misura.

La Figura 7 mostra la differenza, in arcmin, dei valori dell'azimut della linea di riferimento tra i due rifugi raccolti a partire dal 2003 [15].

I valori sperimentali mostrano che le misure GPS sono affette da un errore sistematico crescente negli anni, ragionevolmente proporzionale alla progressiva copertura di neve e ghiaccio dei due rifugi. Tuttavia, anche le prime misure effettuate con il GPS nel 2005 e 2007 in assenza di copertura nevosa erano sensibilmente diverse rispetto alla misura astronomica.



**Figura 7.** Differenza in arcmin della direzione della linea che congiunge i due rifugi misurata dal 2003 ad oggi rispetto alla prima misura astronomica. I cerchi rappresentano i dati GPS, i quadrati le misure astronomiche e della bussola solare. Le lettere indicano lo stato della copertura nevosa dei rifugi.

### Conclusioni

ENEA ha progettato e realizzato una bussola solare compatta, economica, rapida nella misura ed estremamente precisa. Essa sfrutta un rilevatore elettro-ottico e un innovativo algoritmo basato sulle leggi di Keplero per fornire in pochi secondi l'orientamento del Nord geografico con una accuratezza migliore di 0,01 gradi.

Durante l'estate antartica del 2017, l'INGV ha utilizzato la bussola solare ENEA allo scopo di verificare la direzione individuata da una linea di riferimento usata come riferimento per misure di declinazione magnetica presso la stazione antartica italo-francese Concordia. Le misure effettuate da sensori GPS differenziale ripetute negli anni 2005-2014 davano tale linea di riferimento in continuo movimento, indice di un progressivo spostamento della banchisa dove è collocata la stazione Concordia.

I risultati nella Tabella 1 e nella Fig. 7 mostrano che la direzione della linea di allineamento relativa dei due rifugi devia di soli 0,0018 gradi dalla misura astronomica del 2003. Contrariamente a quanto misurato dai sensori GPS, non c'è nessuna deriva della banchisa e la stazione Concordia è ben stabile sul ghiacciaio antartico.

In generale, i nostri risultati confermano che le misure di orientamento con i sensori GPS non sono affidabili alle latitudini elevate, dove il segnale GPS è debole, i satelliti sono molto bassi sopra l'orizzonte e la presenza di ghiaccio e neve sul terreno può sia riflettere sia assorbire il segnale, creando direzioni spurie e ingannevoli del segnale stesso.

A condizione che il sole non sia coperto dalle nuvole, il modo più preciso e affidabile per conoscere esattamente la direzione del Nord è mediante metodi astronomici. In particolare, la bussola solare ENEA fornisce le sue migliori prestazioni alle latitudini elevate perché la bassa elevazione del Sole permette una misura più accurata della direzione del Sole, e il rumore elettronico del CMOS è ridotto a causa della bassa temperatura ambiente.

## Referenze

- [1] A. Witze: Earth's magnetic field is acting up and geologists don't know why (2019). *Nature* **565**, 143-144. <https://doi.org/10.1038/d41586-019-00007-1>
- [2] M.B. Ignagni: True north heading estimator utilizing GPS output information and inertial sensor system output information. U.S. patent 5,617,317A (April 1, 1997).
- [3] Y. Li, A. Dempster, B. Li, et al.: A low-cost attitude heading reference system by combination of GPS and magnetometers and MEMS inertial sensors for mobile applications (2006). *Journal of Global Positioning System* **5** pp. 88-95.
- [4] C. Ellum, N. El-Sheimy: Inexpensive kinematic attitude determination from MEMS-based accelerometers and GPS derived accelerations (2002). *Navigation* **49** (2002) pp. 117-126.
- [5] H.C.I. Grobler: Azimuth determination by gyroscope, 50 years later, has anything changed? Proc. 16th Int. Congress for Mine Surveying, Brisbane, Australia, 12-16 Sept 2016, pp. 105-112.
- [6] S. Bollanti, D. De Meis, P. Di Lazzaro, et al.: Calcolo analitico della posizione del sole per l'allineamento di impianti solari ed altre applicazioni (2012). Technical Report RT/2012/24/ENEA.
- [7] S. Bollanti, D. De Meis, P. Di Lazzaro, et al.: Electro-optical sun compass with a very high degree of accuracy (2015). *Optics Letters* **40** pp. 3619-3622. <https://doi.org/10.1364/OL.40.003619>
- [8] S. Bollanti, D. De Meis, P. Di Lazzaro, et al.: Performance of an electro-optical solar compass in partially obscured Sun conditions (2016). *Applied Optics* **55** pp. 3126-3130. <https://doi.org/10.1364/AO.55.003126>
- [9] S. Bollanti, F. Andreoli, L. Cafarella, et al.: High accuracy azimuth measurements: the ENEA solar compass in its instrumental and smart version (2021). *Il Nuovo Cimento C* **4-5** p. 116. <https://dx.doi.org/10.1393/ncc/i2021-21116-4>
- [10] F. Flora, S. Bollanti, D. De Meis, et al.: High precision electronic solar compass. European Patent EP2938963 (A1)- 2015-11-04 (July 3, 2014).
- [11] F. Andreoli, S. Bollanti, P. Di Lazzaro, et al: Converting a smartphone into an accurate solar compass (2022). *Applied Optics* **61**, pp. 1398-1402. <https://doi.org/10.1364/AO.450501>
- [12] D. Murra, S. Bollanti, P. Di Lazzaro, et al.: Interfacing Arduino boards with optical sensor arrays: overview and realization of an accurate solar compass (2023). *Sensors* **23**, 9787-9807 <https://doi.org/10.3390/s23249787>
- [13] I. Reda, A. Andreas: Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications (2004). *Journal of Solar Energy* **76** pp. 577-589.
- [14] F. Flora, S. Bollanti, D. De Meis, et al.: Electronic solar compass for high precision orientation on any planet (2016). *Journal of Instrumentation* **11** p. C07014. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/11/07/C07014>
- [15] D. Di Mauro, L. Cafarella, S. Lepidi, et al.: Geomagnetic polar observatories: the role of Concordia station at Dome C, Antarctica (2014). *Annals of Geophysics*, **57**, 6, G0656 doi:10.4401/ag-6605
- [16] C. Scarchilli, M. Frezzotti, P.M. Ruti: Snow precipitation at four ice core sites in East Antarctica: provenance, seasonality and blocking factors (2011). *Climate Dynamics* **37**, pp. 2107-2125. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-010-0946-4>

ENEA  
Servizio Promozione e Comunicazione  
[www.enea.it](http://www.enea.it)

Stampa: Laboratorio Tecnografico ENEA - C.R. Frascati  
novembre 2024