

L'OSSERVATORIO IONOSFERICO IN ARTIDE E ANTARTIDE : OSSERVAZIONI SPERIMENTALI E RISULTATI SCIENTIFICI

Giorgiana De Franceschi, Lucilla Alfonsi, Vincenzo Romano, Bruno Zolesi, Luca Spogli
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Roma, Italia

Abstract

The Italian Upper Atmosphere Observatory at polar latitude was firstly established during the Antarctic campaign 1990-1991 to support the telecommunication logistic activity of the National Program for Antarctic Research (PNRA). The Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), formerly Istituto Nazionale di Geofisica (ING), was involved in this action as the long time experience in HF radar, ionospheric sounding and ionospheric prediction services for radio communication purposes, managing two of the most important and historical ionospheric observatories all over the world: Rome (41.8N, 12.5E) and Gibilmanna (37.9 N, 14.0 E). Since that time, starting from 1993 up to now, several research projects have been carried on focusing on the multi instruments upper atmosphere observations in Arctic and Antarctica with the aim to study the polar ionosphere in different time and space domains, contributing both to the Global Change and to the emerging Space Weather needs. Here we briefly report on the experimental activities as well on the main scientific results obtained highlighting the latest findings in the field of bipolar GNSS (Global Navigation Satellite Systems) ionospheric scintillation measurements and investigation.

Riassunto

L'Osservatorio ionosferico per il monitoraggio e lo studio dell'alta atmosfera ionizzata nelle regioni polari è stato inaugurato durante la campagna antartica 1990-1991, inizialmente come supporto alle necessità logistiche nel settore delle telecomunicazioni del Programma Nazionale di Ricerche in Antartide (PNRA). L'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), già Istituto Nazionale di Geofisica (ING), è stato coinvolto in questa attività vista la sua lunga esperienza nel settore del sondaggio ionosferico con tecniche radio (radar in HF) e relativi servizi di previsione dei parametri ionosferici di interesse per la comunicazione in HF, avendo la gestione di due tra i più importanti e storici osservatori ionosferici di tutto il mondo: Roma (41.8N, 12.5E) e Gibilmanna (37,9 N, 14,0 E). Da quel momento, a partire dal 1993 fino ad oggi, si sono susseguiti numerosi progetti di ricerca finalizzati al monitoraggio multistrumentale dell'alta atmosfera ionizzata sia in Artide che Antartide con lo scopo di studiare la ionosfera polare in diverse scale temporali e spaziali, contribuendo sia ai programmi sul Cambiamento Globale che alle necessità dell'emergente Space Weather. In questo lavoro vogliamo brevemente descrivere le attività sperimentali e i principali risultati scientifici ottenuti, ponendo in rilievo le ultime novità nell'uso di particolari ricevitori GNSS

(Global Navigation Satellite Systems) per il monitoraggio e lo studio delle scintillazioni ionosferiche.

Introduzione

La ionosfera alle alte latitudini contiene l'impronta dei processi fisici che hanno la loro origine nello spazio interplanetario. In queste regioni i fenomeni di perturbazione ionosferica causati da eventi solari hanno una elevata percentuale di accadimento anche durante periodi di minimo di attività solare, possono propagarsi con tempi e modalità diverse verso le latitudini medie, e quindi degradare seriamente la prestazione e l'affidabilità di diversi sistemi tecnologici largamente usati dalla società moderna, quali ad esempio i sistemi GNSS utilizzati nella navigazione e posizionamento. Il monitoraggio continuo e sistematico dell'alta atmosfera ionizzata da stazioni a terra e da osservazioni in situ (satellite) è quindi un valido supporto per lo studio e la modellazione delle perturbazioni ionosferiche in diverse scale temporali (da msec a diversi cicli solari), contribuendo concretamente ai programmi di meteorologia spaziale (Space Weather) e alla comprensione dei meccanismi di cambiamento globale (Global Change). I progetti guidati dall'INGV in questo settore si basano su un'interpretazione sinergica di una serie di osservazioni e di tecniche sperimentali per caratterizzare adeguatamente la dinamica del plasma ionosferico e delle sue irregolarità. I progetti includono la capacità necessaria di gestire da remoto le stazioni di misura e una grande quantità di dati eterogenei acquisiti. Per questo motivo tra gli obiettivi specifici c'è anche la realizzazione di strumenti dedicati al controllo a distanza delle stazioni, al flusso di dati e alla loro archiviazione. In particolare, per organizzare, archiviare e analizzare adeguatamente i dati tanto in tempo reale che in post-processing, è stato necessario lo sviluppo e la realizzazione di un Data Base (DB) e algoritmi opportuni per la visualizzazione e l'interpretazione dei processi ionosferici di maggior interesse. In questa relazione vengono descritti gli obiettivi specifici e i progressi raggiunti all'interno dei progetti che si sono susseguiti fin dagli anni '90. Nella prima sezione vengono descritti gli apparati sperimentali per il monitoraggio e lo studio della ionosfera polare, nella seconda viene introdotto il Data Base realizzato in Italia per strutturare e per archiviare le osservazioni sperimentali, e, infine, nella terza sezione sono presentati i principali risultati scientifici raggiunti. L'ultima sezione riporta alcune osservazioni conclusive.

1. Osservazioni sperimentali

1.1 Radar HF

L'INGV effettua radio sondaggi verticali presso la stazione Mario Zucchelli (MZS, Baia Terra Nova, Antartide, 74.69S, 164.12E) dal 1990. Durante la campagna antartica 2003-2004 è stata installata presso l'osservatorio ionosferico di MZS una nuova ionosonda digitale, sviluppata e realizzata nei laboratori INGV a Roma. La ionosonda digitale, chiamata AIS (Advanced Ionospheric Sounder-INGV) è integrata in un sistema completamente automatico e programmabile da remoto che consente, durante l'inverno antartico, di variare la configurazione delle impostazioni, di sondare la ionosfera e di

inviare i dati a Roma. Gli ionogrammi sono disponibili on line sulle pagine web e sul sito ftp dell'INGV (Fig.1).

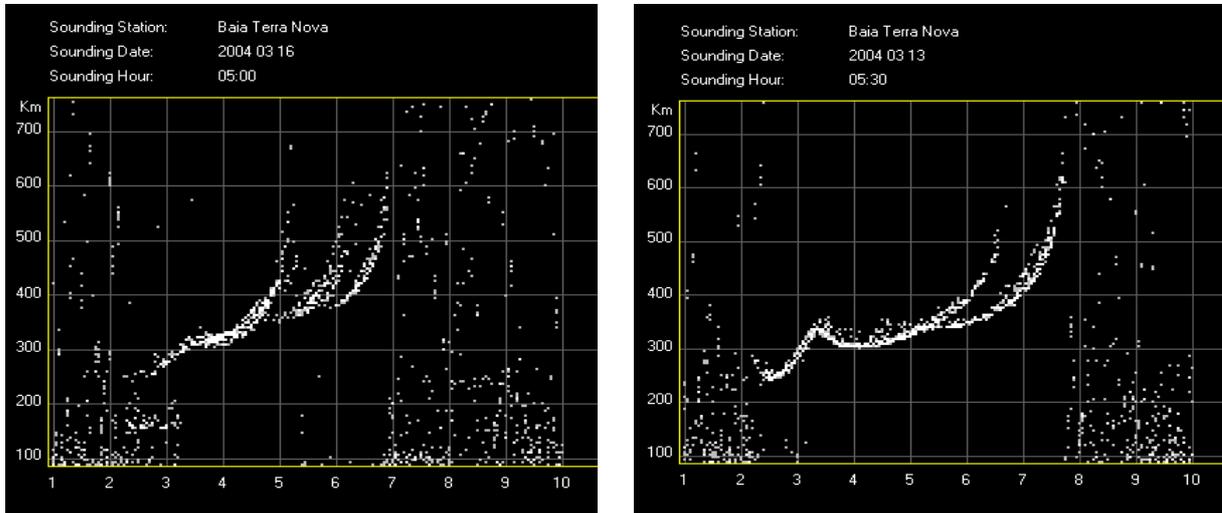


Figura 1. Esempio di ionogrammi ottenuti dal radar HF AIS. Mostrano differenti condizioni ionosferiche osservate a MZS il 16 Marzo 2004 alle 05.00 UT (sinistra) e alle 05.30 UT. La tipica traccia “z” osservabile alle alte latitudini e’ visibile sullo ionogramma a sinistra. Il setting dei parametri del radar HF e’ possibile in remoto dall’Italia per la migliore prestazione dell’apparato tecnologico in questione.

Le tecniche radar HF impiegate permettono di ridurre la potenza trasmessa (meno di 200 W), il peso, le dimensioni, il consumo e la complessità hardware garantendo un’eccellente affidabilità (Zuccheretti et al., 2003). AIS usa un codice di fase a 16 bit insieme alle più avanzate tecniche radar HF, quali: la compressione di impulsi e l’integrazione coerente di fase. Queste caratteristiche danno al nuovo sistema una duplice possibilità: consentire, quando possibile, la lettura più accurata di valori di frequenze critiche degli strati utili per la radio comunicazione; distinguere meglio gli strati ionosferici altamente coerenti da quelli debolmente visibili o fortemente variabili. Nonostante le avverse condizioni ambientali la stazione è in grado di lavorare senza intervento umano: un server windows 2000 è appositamente dedicato a questo scopo. Mediante tale server diverse operazioni possono essere compiute remotamente: la ionosonda può essere accesa e spenta, i parametri di sondaggio possono essere cambiati e i dati sono visibili in tempo reale attraverso una connessione satellitare (Romano et al., 2004). La nuova ionosonda continuerà a contribuire alle applicazioni di meteorologia spaziale mediante un data base ionosferico per le alte latitudini con un significativo miglioramento rispetto al passato per la disponibilità di dati in tempo reale e l’affidabilità del controllo remoto. Inoltre, è in fase di sviluppo un software per l’interpretazione automatica degli ionogrammi di alta latitudine che contribuirà al miglioramento dei servizi di meteorologia spaziale.

1.2 Riometri

Il RIOMETRO (RIOMETER, Relative Ionospheric Opacity METER) riceve i segnali radio emessi da diverse sorgenti naturali, quali il Sole, Giove, il centro della Via Lattea e altre sorgenti più deboli. Generalmente riceve in una gamma di frequenze tra i 25 MHz e i 50 MHz, dove le onde radio vengono assorbite nel caso in cui sia presente un numero significativo di elettroni liberi alle quote tra i 60 km e i 110 km. L'antenna del riometro ha tipicamente una copertura piuttosto ampia che gli consente di ricevere energia da un vasto settore celeste. La tensione prodotta dal riometro in risposta all'energia radio ricevuta viene confrontata con una curva di calibrazione per valutare la tensione in uscita in relazione al rumore, generalmente espressa in gradi Kelvin (K) o in Watt per hertz (W/Hz). Le variazioni di tensione registrate dal riometro possono essere causate da energia radio assorbita dalla ionosfera (Fig.2). Le stazioni riometriche permanenti che operano presso MZS a 30 MHz e 38.2 MHz contribuiscono allo studio delle cause originate nello spazio esterno che provocano assorbimento ionosferico. I dati di assorbimento ionosferico (metodo A2) vengono ricavati dalle misure di rumore cosmico acquisite ogni 30 secondi. Il metodo A2 consiste nel calcolare l'assorbimento ionosferico tramite il rapporto tra il rumore cosmico P0, ossia il rumore cosmico che si osserverebbe se la ionosfera non esistesse, e P, il rumore cosmico misurato al tempo t. La stima migliore di P0, detta curva quieta (Quiet Day Curve, QDC), viene calcolata mediante l'analisi di Fourier della distribuzione dei livelli di rumore cosmico su un dato tempo siderale su periodi di diversi giorni (De Franceschi et al., 1997; 1997b). Nel 1997 un'altra stazione riometrica è stata installata a Eskimo Point (74. 16.358 S; 162. 32.591 E), come stazione remota utile per il test dei sistemi di alimentazione, acquisizione e trasmissione in condizioni estreme (Fig.3).



Figura 2. Antenna del RIOMETRO e sistema di alimentazione per ESKIMO point, Antartide.

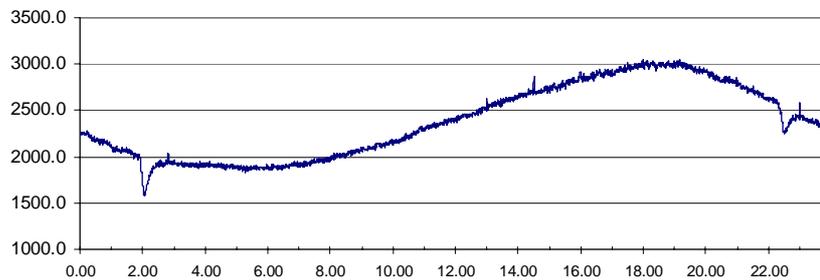


Figura 3 Andamento del rumore cosmico (mV) a 38.2 MHz in funzione del tempo UT il 24 febbraio 2004 quando si osservarono due eventi di Polar Cap Absorption (PCA) intorno alle 02.00 UT e 22.00 UT.

1.3. Rete GISTM

La prima stazione GISTM (GPS Ionospheric Scintillation and TEC monitoring), dedicata all'osservazione delle irregolarità ionosferiche, è stata installata a Ny Alesund (79.9N, 11.9E, Svalbard) presso la stazione Dirigibile Italia nel settembre 2003. Attualmente sono tre le unità operative alle Isole Svalbard (De Franceschi et al., 2006) e due quelle attive in Antartide: a MZS e presso la stazione Concordia (75S, 123E) (Fig. 4). Il GISTM è un ricevitore a doppia frequenza NovAtel OEM4 dotato di un firmware configurato per misurare la scintillazione di fase e ampiezza sulla frequenza GPS L1 e di derivare la misura del contenuto elettronico totale della ionosfera (TEC, Total Electron Content) dalle frequenze L1 e L2. Il software è integrato nel GISTM consentendo il calcolo automatico degli indici di scintillazione S4 e σ_{ϕ} su intervalli di 1, 3, 10, 30 e 60 s. Inoltre, il TEC e la fase sono registrati ogni 15 secondi. I dati di ampiezza e fase del segnale vengono campionati, sia in forma grezza che 'detrending' (per rimuovere variazioni sistematiche) a 50 Hz. Tutti i dati di scintillazione e TEC vengono archiviati localmente. Questo tipo di strumento è estremamente utile per osservare e studiare la formazione e lo sviluppo delle irregolarità ionosferiche che compromettono il corretto funzionamento dei sistemi di comunicazione satellitare. Server locali presenti sia in Artide che in Antartide garantiscono il necessario controllo delle stazioni, il flusso dati e il controllo remoto della strumentazione. Alle Isole Svalbard il controllo delle stazioni e il flusso di dati è possibile grazie alla disponibilità di una rete a banda larga, mentre in Antartide queste funzioni sono espletate localmente dal server web e ftp PATION installato nell'area PAT di MZS, che consente l'accesso intranet in tempo reale ai dati ionosferici, fornendo anche un servizio alle comunicazioni radio di MZS. PATION consente l'accesso ai dati antartici che, attraverso la connessione RADIOS, vengono scaricati da remoto a Roma e archiviati nel server ESKIMO all'INGV (<http://Eskimo.ingv.it>). La stazione di Concordia acquisisce dati RINEX ogni 5 secondi, dati grezzi a 50 Hz, indici di scintillazione e TEC. Una procedura automatica permette di spedire giornalmente in Italia alcuni parametri di controllo e acquisizione che hanno interesse scientifico. La spedizione viene fatta tramite

il servizio della base mediante una casella di posta dedicata creata appositamente per inviare i dati all'INGV.



Figura 4 – Il ricevitore GISTM (GPS Ionospheric Scintillation and TEC Monitor) installato a MZS. Questa stazione e' parte di un network che sara' sviluppato in ambito SCAR – Action Group “GPS for Weather and Space Weather Forecast”.

2. Data Base

La necessità di standardizzare le osservazioni storiche e in tempo reale acquisite dalle diverse strumentazioni ha stimolato lo sviluppo di un data base. Il progetto eSWua è iniziato nel 2004 per sviluppare un sistema hardware-software che gestisse tutte le misure effettuate dagli strumenti del gruppo di Fisica dell'Alta Atmosfera dell'INGV, incluse quelle ad alta latitudine. Il progetto, parzialmente supportato dal PNRA, è tuttora in svolgimento, ma molti obiettivi hardware e software sono stati raggiunti. Il sistema eSWua si basa su un archivio sviluppato e mantenuto dai ricercatori e tecnici INGV ed è in continuo sviluppo. Il sistema, infatti, consente agli amministratori INGV di effettuare qualsiasi tipo di modifica e include alcuni prodotti a valore aggiunto. eSWua è il risultato di uno sforzo in termine di lavoro, tempo e fondi motivato dalla consapevolezza che la scienza debba poter disporre di data digitali strutturati e su procedure scientifiche appropriate sviluppate ad hoc da esperti, accessibili e condivise all'interno della comunità internazionale. Per raggiungere questo obiettivo il sistema è progettato per essere pronto a garantire l'interoperabilità con sistemi simili. Quando sarà ultimato il sistema eSWua ospiterà i dati acquisiti dai seguenti strumenti:

- Digital Portable Sounder 4 (DPS4) che opera a Roma dal 1998;
- tre Advanced Ionospheric Sounders progettate e sviluppate dall'INGV (AIS-INGV), a Gibilmanna (Sicily), MZS dal 2003 e a Roma dal 2004;

- Ricevitori GISTM (GPS Ionospheric Scintillation and TEC Monitor) presso la stazione artica “Dirigibile Italia” a Ny-Alesund dal 2003;
- Ricevitori GISTM (GPS Ionospheric Scintillation and TEC Monitor) presso le stazioni antartiche MZS e Concordia dal 2006;
- Tre riometro La Jolla, uno operante a 30.0MHz e due a 38.2 MHz, presso MZS dal 1993;
- Un Radio Chirp Sounder (RCS) che ha operato in HF per i radio sondaggi obliqui a Chania (Creta, Grecia) nel 2004 e un Improved Radio Ionospheric Sounder (IRIS) installato a Roma nel 2005, entrambi ricevitori eco ionosferiche da Inskip (Gran Bretagna).

I dati sono accessibili in tempo reale tramite un sito web dinamico www.eswua.ingv.it (Fig. 5). Un rapporto statistico tiene conto dell’affidabilità delle connessioni e delle connessioni dall’esterno che vengono autorizzate mediante procedure di registrazione.

Un sito web interattivo supportato da un data base ben organizzato può essere un potente strumento per la comunità scientifica e tecnologica nel campo delle comunicazioni e della meteorologia spaziale. Una descrizione dettagliata del sistema è stata pubblicata nel 2008 (Romano et al., 2008). L’esperienza maturata durante il progetto eSWua ha stimolato l’idea di IDIPOS (Italian Database Infrastructure For Polar Observation Sciences): una proposta recentemente approvata dalla Commissione Scientifica del PNRA (Romano et al., 2008b).



Figura 5. eSWua home page (www.eswua.ingv.it).

3. Risultati scientifici

Numerose presentazioni a convegni internazionali e la produzione di diverse e prestigiose pubblicazioni testimoniano l'importanza e la attualità del monitoraggio e studio della ionosfera polare. L'utilizzo di differenti tipi di dati ha permesso lo studio dei vari aspetti che caratterizzano la dinamica del plasma ionosferico, partendo dalla individuazione dei trend a lungo termine (decenni) dell'alta atmosfera ionizzata fino alle sue variazioni rapide (secondi o minuti), causa di un particolare fenomeno chiamato scintillazione ionosferica.

I trend secolari della ionosfera sono oggetto di dibattito fin dagli anni '90, quando è stata introdotta l'ipotesi di un possibile collegamento con l'effetto serra atmosferico. Più di recente la discussione è stata rinnovata ponendo l'accento sulla variazione secolare del campo geomagnetico come possibile origine naturale dei trend ionosferici a lungo termine. L'influenza dell'attività geomagnetica è stata profondamente studiata da vari autori, i quali convergono su un suo possibile incremento nel corso del secolo XX. L'indebolimento del dipolo magnetico della Terra è anche il protagonista di numerosi lavori principalmente dedicati allo studio su scale temporali tipiche associate ad una possibile inversione (o escursione) del campo magnetico terrestre. In particolare, la constatazione di una rapida diminuzione totale del campo magnetico su gran parte dell'Antartide indicherebbe questa come una regione di possibile inversione di flusso magnetico. Il controllo geomagnetico sulla ionosfera è ben noto e l'andamento della attività geomagnetica potrebbe in effetti essere collegato con le tendenze secolari della ionosfera polare. Dopo i primi risultati alle alte latitudini (Alfonsi et al, 2001; Alfonsi et al, 2002) comprovanti una generale diminuzione del contenuto elettronico in ionosfera negli ultimi due cicli solari, ulteriori indagini condotte sull'Antartide (Alfonsi et al, 2008) hanno evidenziato in questa regione un effettivo possibile collegamento tra una più pronunciata "contrazione" della ionosfera e le variazioni regionali del campo geomagnetico. Questa correlazione è sostenuta da alcuni recenti risultati che stimano in 300 anni il tempo di possibile inversione del campo magnetico terrestre sopra l'Antartide, mentre su scala globale il tempo di decadimento è stimato a circa 1000 anni (De Santis et al, 2004; De Santis, 2007). Recentemente è stato condotto uno studio di correlazione tra i tempi di decadimento geomagnetico e ionosferico nell'emisfero meridionale alle alte latitudini attraverso lo sviluppo regionale in armoniche sferiche delle frequenze massime di riflessione in ionosfera (De Franceschi et al., 2007; De Franceschi et al. 1994). I risultati preliminari mostrano una scala di tempo di decadimento di circa 500 anni che è paragonabile alla scala dei tempi ottenuti da De Santis (2007) per la variazione secolare del campo geomagnetico, evidenziando un forte legame tra l'andamento a lungo termine della ionosfera e l'escursione del campo geomagnetico. Anche se l'influenza dell'attività solare non è ancora stata opportunamente filtrata, tale risultato potrebbe indicare la connessione tra lo stato di transizione di polarità geomagnetica risultante in un indebolimento dello scudo magnetosferico che a sua volta causerebbe una contrazione della ionosfera terrestre.

Una espulsione di massa coronale (CME) può produrre una importante emissione di protoni solari che, se diretti verso la Terra e a causa della geometria delle linee di forza

del campo geomagnetico, raggiungono facilmente la ionosfera nelle regioni polari provocando un eccesso di ionizzazione nella bassa regione ionosferica D. Questo evento innesca a sua volta fenomeni di assorbimento nella calotta polare (PCA, Polar Cap Absorption) per cui si assiste ad una degradazione delle trasmissioni in HF fino ad una loro possibile totale interruzione (Black Out). L' eccesso di ionizzazione avviene a diverse quote ionosferiche in funzione dell'energia delle particelle incidenti e, in occasione di eventi di PCA, è dovuta principalmente a protoni con energie comprese tra 1 e 100MeV, che corrisponde ad una altitudine compresa tra i 30km e gli 80 km (ovvero regione D). L'analisi dati di assorbimento ionosferico ottenuto attraverso le osservazioni sperimentali di rumore cosmico provenienti dalle stazioni riometriche prima descritte, ha permesso studi approfonditi di eventi di PCA particolarmente significativi occorsi nel novembre 2001 (Perrone et al., 2004). I risultati ottenuti suggeriscono che essi sono dovuti a fasci di protoni con energie comprese tra 0,6 e 82 MeV a cui sono associate quote ionosferiche comprese tra i 40 km e gli 80 km di quota. Nello stesso lavoro si è introdotta una formula empirica che collega il flusso di protoni e l'assorbimento ionosferico misurato. I risultati, piuttosto incoraggianti, permetterebbero lo sviluppo di tools di previsione degli assorbimenti ionosferici in ambito Space Weather, come dimostrato nei lavori più recenti (Perrone et al, 2006; Lepidi et al, 2008).

In condizioni disturbate la ionosfera alle alte latitudini diventa estremamente turbolenta e presenta regioni di particolare ionizzazione comunemente chiamate irregolarità ionosferiche. Queste zone altamente ionizzate possono svilupparsi e frammentarsi in strutture più piccole, assumendo forme comunemente indicata come patch, che possono causare effetti di diffrazione sui segnali satellitari che le attraversano. Tale effetto, noto come scintillazione ionosferica, induce a sua volta seri problemi agli apparati tecnologici basati sui sistemi GNSS (Global Navigation Satellite System) degradando ad esempio la navigazione e il posizionamento. Da qui si intuisce la necessità di comprendere e modellare le irregolarità ionosferiche i cui effetti, scintillazioni ionosferiche, sono altamente dannosi per la società civile. ISACCO (Ionospheric Scintillation Arctic and Antarctic Coordinated Campaigns Observation) è un progetto INGV, in parte sostenuto dal PNRA, nato alla fine del 2003 con l'installazione di un ricevitore GISTM (GPS Ionospheric Scintillation and TEC Monitor) presso la stazione del CNR "Dirigibile Italia" (79,9 ° N, 11.9 ° E, Ny-Alesund, Svalbard, Norvegia). Le misure acquisite durante alcuni eventi di tempesta occorsi nell'ottobre 2003, sono state oggetto di numerose presentazioni e pubblicazioni (Mitchell et al, 2005; Alfonsi et al, 2006; De Franceschi et al, 2008; Burston et al, 2009; Burston et al. , 2009b; Materassi et al, 2009). Obiettivo principale di questi studi è l'indagine sui meccanismi di formazione ed evoluzione spazio temporale delle patch polari che provocano scintillazione ionosferica. I risultati più importanti di questi studi suggeriscono un ruolo di primo piano della instabilità di deriva dei gradienti di ionizzazione nella formazione delle irregolarità, confermata dalla occorrenza di scintillazione proprio in coincidenza dei bordi di queste zone di alta ionizzazione (patch) (Fig. 6). Le osservazioni di ISACCO, se supportate da tecniche di tomografia ionosferica, sono inoltre di grande aiuto per la comprensione delle dinamiche delle patch polari. Per esempio, nel caso delle intense tempeste avvenute nei mesi di ottobre e novembre 2003, assume particolare importanza la componente z del campo

magnetico interplanetario, B_z , che svolge un ruolo determinante sulla dinamica delle irregolarità, sia in termini di direzione che di velocità (De Franceschi et al., 2008).

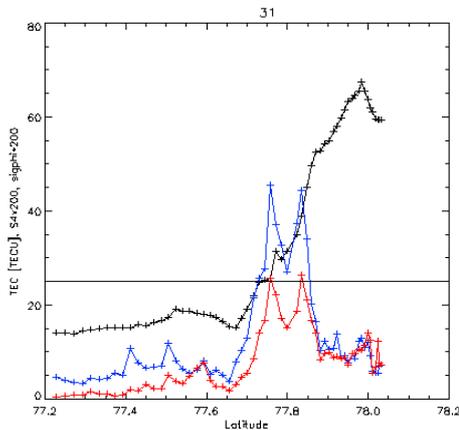


Figura 6. TEC (Total Electron Content) (nero), indice di scintillazione di fase (blu) e indice di scintillazione di ampiezza (rosso) per il satellite GPS ‘PRN 31’, osservati dal ricevitore GISTM alle Svalbard tra le 21:00 e le 22:00 UT del giorno 31 ottobre 2003, in occasione della tempesta di Halloween.

Sulla base delle reti GISTM disponibili, è stato recentemente sviluppato il concetto di "Ground Based Scintillation Climatologia", GBSC, che risulta essere estremamente promettente per individuare i principali settori del plasma ionosferico in cui la scintillazione è più probabile che si verifichi. La GBSC si basa su una analisi statistica originale dei due indici di scintillazione comunemente usati, $\sigma\Phi$ ed S4, relativi alla fase e all'ampiezza della scintillazione, rispettivamente. Obiettivo di questa analisi statistica è duplice: da un lato permette l'indagine e lo studio dei principali processi fisici coinvolti nella formazione e dinamica delle irregolarità ionosferiche e dall'altro contribuisce allo sviluppo di tecniche di mitigazione dell'errore di scintillazione sulla navigazione e posizionamento (Aquino et al, 2009). Un esempio di applicazione GBSC è in Figura 7, che mostra la localizzazione (in latitudine magnetica e tempo locale magnetico) di zone con elevate probabilità di accadimento di scintillazione di fase, sia in condizioni geomagneticamente quiete che disturbate, ottenuta sulla base delle osservazioni sperimentali nel periodo ottobre-dicembre 2003. Le mappe mostrano che in condizioni perturbate, a sinistra, la percentuale di accadimento è più elevata e si espande interessando anche le latitudini medie. Le strutture individuate sono relative a gradienti di densità elettronica e si possono riconoscere il bordo dell'ovale aurorale (tra 60° e 70° di latitudine in funzione dell'attività geomagnetica) e la zona di impoverimento di elettroni alle alte latitudini denominata "ionospheric trough" (Spogli et al, 2009; Spogli et al, 2010).

Il contributo scientifico delle osservazioni AIS è stato recentemente evidenziato nell'ambito di uno studio multi-strumentale degli effetti in ionosfera di un evento CIR

(Corotating Interaction Region), osservato in Antartide nel febbraio 2004. Durante le fasi discendenti e di minimo di attività solare, si osserva la formazione di strutture interplanetarie, CIR, che devono la loro origine alla presenza di buchi coronali da cui si originano flussi di particelle energetiche piuttosto veloci che interagiscono con il vento solare più lento. Il CIR può causare tempeste geomagnetiche se queste strutture raggiungono la magnetosfera terrestre in corrispondenza di una significativa componente B_z negativa del campo magnetico interplanetario, come nel caso del febbraio 2004. Durante l'evento gli ionogrammi acquisiti dal radar HF-AIS a MZS mostrano precipitazione di particelle attraverso anomalie nella frequenza di plasma degli strati ionosferici F1 e F2. In particolare, l'effetto detto di lacuna osservato sugli ionogrammi in questione, sarebbe riconducibile ad un evento di assorbimento nella regione ionosferica E causato da elettroni con elevate temperature dovuti a forti correnti di Hall che causano instabilità di plasma (Alfonsi et al, 2008b. Yin et al., 2009).

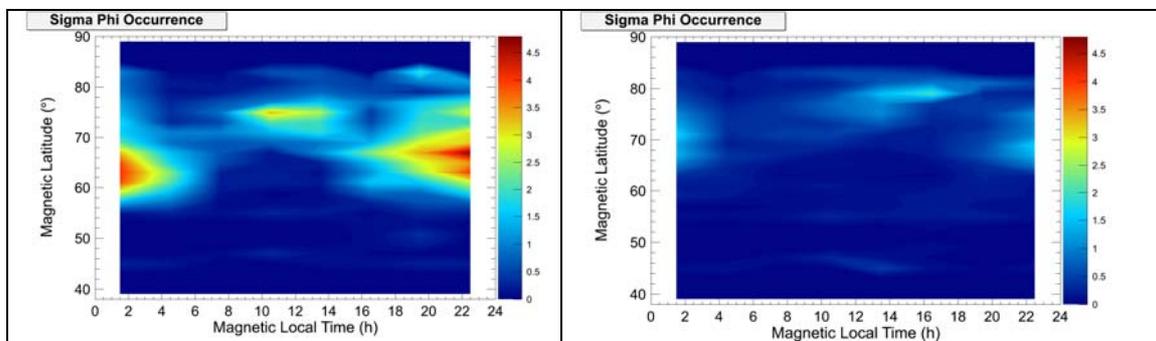


Figura 7. Percentuale di occorrenza dell'indice di scintillazione di fase superiore a .25 radianti per condizioni geomagnetiche quiete (destra) e disturbate ottenute dalle osservazioni sperimentali del periodo ottobre-dicembre 2003.

4 Conclusioni

L'Antartide è un laboratorio naturale per tutti i settori scientifici in particolare per la geofisica. La forma del campo magnetico terrestre rende le regioni polari di entrambi i poli molto sensibili agli eventi di origine solare che possono essere monitorati attraverso opportuni osservatori geofisici. L'osservatorio ionosferico contribuisce in modo particolare allo studio e alla comprensione di una vasta gamma di fenomeni che si originano sul Sole e che attraverso l'accoppiamento vento solare-magnetosfera-ionosfera hanno un elevato impatto proprio sulla tecnologia da cui dipende il benessere della società civile. I progetti guidati dall'INGV in questo settore e che si sono susseguiti dall'inizio degli anni 90 ad oggi hanno mostrato nel tempo il notevole contributo tecnologico e scientifico raggiunto attraverso la notevole quantità di presentazioni e pubblicazioni ottenute. L'esperienza maturata ha inoltre portato a istituire importanti collaborazioni internazionali, aprendo il percorso per la partecipazione a programmi e progetti nell'ambito SCAR (<http://www.scar.org/researchgroups/gpsforweather.html>), dei Programmi Quadro, delle azioni COST, ESA (European Space Agency) etc.. Le sfide poste dai programmi di Space Weather devono essere affrontate in cooperazione per un

migliore utilizzo delle risorse sia infrastrutturali che umane, attraverso lo sviluppo ad hoc di strumenti tecnologici dedicati ai servizi di nowcasting e di previsione utili per prevedere e mitigare gli effetti di degrado della ionosfera sui sistemi di comunicazione. Gli studi e i miglioramenti tecnologici di questa ricerca sono pienamente descritti nei nuovi progetti PROGDEF09_131 e BIS (Bipolar scintillazione ionosferica), imprescindibili da una adeguata ed efficiente connettività permanente tra MZS e l'Italia che permetta in remoto l'accesso alla strumentazione e ai dati acquisiti.

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano il Programma Nazionale di Ricerche in Antartide (PNRA), POLARNET-CNR, e i colleghi che dal 1990 hanno collaborato ai progetti attraverso la loro partecipazione alle campagne in Antartide e/o con il loro contributo agli studi in Italia: Massimiliano Cerrone, Angelo De Santis, Arrigo Caserta, Fawzi Doumaz, Diego Sorrentino, Giulio Fontana, Enrico Zuccheretti, Cesidio Bianchi, Carlo Scotto, Andrea Malagnini, Giuseppe Di Stefano, Fabio Di Felice, Marco Pietrella, Francesco Pongetti, Manuele Di Persio, Loredana Perrone, Silvia Pau, Michael Pezzopane, Giuseppe Tutone e Paolo Palangio.

References

Aquino M., Monico J.F.G., Dodson A.H., Marques H., De Franceschi G., Alfonsi Lu., Romano V., Andreotti M., Improving the GNSS Positioning Stochastic Model in the Presence of Ionospheric Scintillation, *Journal of Geodesy* (2009), doi: 10.1007/s00190-009-0313-6.

Alfonsi L., G. De Franceschi e L. Perrone, Long term trend in the high latitude ionosphere, *Phys.Chem. of the Earth*, 26/5, 303-307, 2001.

Alfonsi, L., De Franceschi, G., Perrone, L.: Long term trends of the critical frequency of the f2 layer at northern and southern high latitude regions, *Physics and Chemistry of the Earth* 27/6-8, 595-600, 2002.

Alfonsi L., G. De Franceschi, V. Romano, M Aquino, A. Dodson, Positioning errors during the space weather, *Location*, ISSN 0973-4627, issue 5, vol. 1, 2006.

Alfonsi, L., De Franceschi, G., De Santis, A.: Geomagnetic and ionospheric data analysis over Antarctica: a contribution to the long term trends investigation, *Ann. Geophys.*, 26, 1173-1179, 2008.

Alfonsi L., P. Yin, C.N. Mitchell, G. De Franceschi, V. Romano, P. Sarti, M. Negusini, A. Capra, GPS imaging of the Antarctic ionosphere: a first attempt, *XXX SCAR Open Science Conference*, St. Petersburg, July 8-11, 2008b.

Burston, R., I. Astin, C. Mitchell, Alfonsi Lu., T. Pedersen, and S. Skone (2009), Correlation between scintillation indices and gradient drift wave amplitudes in the northern polar ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 114, A07309, doi:10.1029/2009JA014151.

Burston R., I. Astin, C.N. Mitchell, Alfonsi Lu., T. Pedersen, S. Skone (2009b), Turbulent Times in the Northern Polar Ionosphere?, *J. Geophysical Research*, doi:10.1029/2009JA014813,

Chivers, H.J.: High latitude ionospheric absorption, *Antarc. J. U. S.*, X, 222-223, 1975.

De Franceschi, G., de Santis, A. and Pau, S.: Ionospheric mapping by regional spherical harmonic analysis: new developments, *Adv. Space Res.*,14, No. 12, 61-64, 1994.

De Franceschi, G., De Santis, A. and Perrone, L.: Analysis of Riometric data recorded at Terra Nova Bay, Antarctica, Conference Proceedings of Solar Terrestrial Predictions Workshop, edited by Heckman, G., Marubashi, K., Shea, M.A., Smart, D.F., Thompson, R., RWC Tokyo, 431-434, 1997.

De Franceschi, G., A. De Santis, M. Cerrone, M. Chiappini, P.Palangio, G. Romeo and G. Ricci (1997b), Riometry at the Italian Antarctic station of Terra Nova Bay, *Il Nuovo Cimento*, Vol. 20, N.6, 973-976.

De Franceschi G., L. Alfonsi, V. Romano (2006), ISACCO: an Italian project to monitor the high latitudes ionosphere by means of GPS receivers, *GPS Solution*, DOI 10.1007/s10291-006-0036-6.

De Franceschi, G., Alfonsi, L., De Santis, A.: Long term trends of foF2 over Antarctica: possibile links with the geomagnetic secular behaviour, Solicited paper, IUGGXXIV 2007, Perugia- Italy, 2-13 July 2007.

De Franceschi G., L. Alfonsi, V. Romano, M. Aquino, A. Dodson, C. N. Mitchell, A. W. Wernik (2008), Dynamics of high latitude patches and associated small scale irregularities, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, doi:10.1016/j.jastp.2007.05.018, 70, 6, 2008, 879-888.

De Santis, A., Tozzi, R., Gaya-Piqué, L.R.: Information content and *K*-entropy of the present geomagnetic field, *Earth and Planetary Science Letters*, 218, 269-275, 2004.

De Santis, A.: How persistent is the present trend of the geomagnetic field to decay and, possibly, to reverse?, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 162, 217-226, 2007.

Lepidi S. L. Perrone, L. Cafarella, A. Meloni, Geomagnetic Storms And Polar Cap Absorption Event Recorded On January 2005 At Mario Zucchelli Station, XXX SCAR Open Science Conference, St. Petersburg, July 8-11, 2008.

Materassi M., Alfonsi Lu., De Franceschi G., Romano V., Mitchell C.N., Spalla P. Detrend effect on the scalograms of GPS amplitude scintillation, *J. Adv. Space Res.*(2009), doi:10.1016/j.asr.2008.01.023

Mitchell, C. N.; Alfonsi, L.; De Franceschi, G.; Lester, M.; Romano, V.; Wernik, A. W., GPS TEC and scintillation measurements from the polar ionosphere during the October 2003 storm, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 32, No. 12, L12S03 10.1029/2004GL021644, 2005.

Perrone L., L. Alfonsi, V. Romano, G. De Franceschi, Polar cap absorption events of November 2001 at Terra Nova Bay, Antarctica, *Annales Geophysicae*, Vol. 22, pp 1633-1648, 8-4-2004.

Perrone L., V. Romano, A. Malagnini, "Polar cap absorption event of September 2005 at Mario Zucchelli Station Antarctica", Proceedings of the 2nd cost 296 workshop, "Radio systems and ionospheric effects", Rennes, 3-7 October 2006.

Romano V., Zuccheretti E., De Franceschi G., Pezzopane M., Alfonsi L., Tutone G., Doumaz F., Ionospheric observatory development at Terra Nova Bay, INAG bulletin INAG-65 - 2004

Romano V., S. Pau, M. Pezzopane, E. Zuccheretti, B. Zolesi, G. De Franceschi, and S. Locatelli, The electronic Space Weather upper atmosphere (eSWua) project at INGV: advancements and state of the art, *Ann. Geophys.*, 26, 345–351, 2008.

Romano V., A. Salvati, S. Massetti, IDIPOS: a proposal for an Italian database infrastructure for polar observation sciences, XXX SCAR Open Science Conference, St. Petersburg, July 8-11, 2008b.

Spogli, L.; Alfonsi, L.; De Franceschi, G.; Romano, V.; Aquino, M. H. O.; Dodson, A. - Climatology of GPS ionospheric scintillations over high and mid-latitude European regions, *Ann. Geophys.*, 27, 3429–3437, 2009.

Spogli, L.; Alfonsi, L.; De Franceschi, G.; Romano, V.; Aquino, M. H. O.; Dodson, A. – Climatology of GNSS ionospheric scintillations at high and mid latitudes under different solar activity conditions, *Il Nuovo Cimento B* (2010), doi: 10.1393/ncb/i2010-10857-7.

Yin P., Mitchell C.N., Alfonsi Lu., De Franceschi G., Romano V., Sarti P., Negusini M., Capra A., Ionospheric imaging over Antarctica, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 71 (2009) 1757–1765.

Zuccheretti E., G. Tutone, U. Sciacca, C. Bianchi and B. J. Arokiasamy “The new AIS-INGV digital ionosonde”, *Annals of Geophysics* vol. 46, N. 4, pp. 647-659, 2003.