

UN'INNOVATIVA STRATEGIA PER ACCURATEZZA CENTIMETRICA CON TECNICA PPP E RICEVITORI GNSS A SINGOLA FREQUENZA

A NEW GROUND BASED AUGMENTATION STRATEGY FOR CENTRIMETRIC PPP SOLUTION WITH GNSS SINGLE FREQUENCY RECEIVERS

M. Fortunato

Area di Geodesia e Geomatica, Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale - Università di Roma La Sapienza

PAROLE CHIAVE: ricevitori GNSS low-cost a singola frequenza, Precise Point Positioning, modellazione ionosferica, Zenith Tropospheric Delay, accuratezza centimetrica

KEY WORDS: GNSS low-cost single frequency receivers, Precise Point Positioning, ionospheric modeling, Zenith Tropospheric Delay, centimetric accuracy

RIASSUNTO

I ricevitori GNSS low-cost sono diventati sempre più diffusi sul mercato grazie al loro molto limitato costo e alle elevate prestazioni confrontabili con quelle di ricevitori di classe geodetica nelle ipotesi di basi corte. Tuttavia, non essendo applicabile la combinazione ionosphere-free, usualmente tali ricevitori non possono essere utilizzati nel posizionamento assoluto tramite Precise Point Positioning (PPP). Questo articolo descrive e valida una metodologia innovativa che permette di ottenere un'accuratezza centimetrica lavorando con PPP e ricevitori a singola frequenza. L'algoritmo, partendo dalle osservazioni acquisite da un unico ricevitore a doppia frequenza, permette di ricostruire un'osservazione sintetica L2 per un ricevitore a singola frequenza posizionato nelle sue vicinanze. Sotto questa ipotesi, la metodologia originale proposta estende pertanto l'applicazione della combinazione ionosphere-free ai ricevitori low-cost a singola frequenza. Le analisi di ripetibilità giornaliera delle coordinate, eseguite utilizzando ricevitori localizzati nell'Italia centrale, mostrano un RMSE inferiore a 1,5 cm per le componenti orizzontali e 3 cm in direzione verticale anche a distanze di 30 km dalla stazione di riferimento a doppia frequenza. In aree ad elevata attività ionosferica, l'accuratezza in direzione verticale risente maggiormente della distanza dalla stazione di riferimento a doppia frequenza: differenze con le coordinate di riferimento inferiori a 18 cm si osservano con distanze di 70 km. La stima assoluta di Zenith Tropospheric Delay (ZTD) rispecchia l'accuratezza ottenuta per le coordinate in direzione verticale. In aree caratterizzate da normale attività ionosferica, RMSE inferiori a 0,75 cm sono ottenuti anche a distanza dalla stazione di riferimento a doppia frequenza pari a 50 km.

ABSTRACT

In the last few years GNSS single frequency receivers have turned up more and more in the marketing especially for their low cost with respect to the dual frequency receivers and the high level of performance, comparable to those of geodetic class GNSS receiver for some applications in differential positioning over short baselines. However, because of the inability to apply ionosphere-free linear combination, their application for high accuracy Precise Point Positioning (PPP) requires detailed and reliable ionospheric modelling. This paper describes and validates an innovative methodology that allows to obtain centimetric PPP solution with single frequency receivers. The algorithm, starting from the observations acquired by a dual frequency receiver, allows to reconstruct a synthetic L2 observation for a generic single frequency receiver placed in its surroundings. This enables the application of ionosphere-free linear combination also for single frequency receivers. The daily repeatability analysis, executed considering receivers placed in the Central Italy, shows RMSE less than 1.5 cm for the horizontal components and less than 3 cm for the vertical component even at distance of 30 km from the reference station. In areas characterized by high ionospheric perturbation, the accuracy in vertical direction is more affected by the distance between the receivers: difference, with respect to the reference coordinate, less than 18 cm are obtained with distance of 70 km. The absolute estimation of Zenith Tropospheric Delay (ZTD) reflects the accuracy obtained in vertical direction for the positioning analysis. In areas characterized by normal ionospheric conditions, RMSE less than 0.75 cm are obtained at distance of 50 km from the dual frequency reference station.

1. INTRODUZIONE

Lo sviluppo tecnologico degli ultimi anni ha interessato anche il mondo della Geomatica portando allo sviluppo di ricevitori GNSS low-cost accanto ai ben noti ricevitori di classe geodetica. I ricevitori GNSS a singola frequenza sono diventati sempre più presenti sul mercato grazie al basso costo e alle elevate prestazioni confrontabili con quelle di ricevitori a doppia frequenza nel caso di posizionamento differenziale lavorando con basi corte. Il monitoraggio strutturale ed infrastrutturale ed il monitoraggio di sistemi franosi rappresentano solo due delle

applicazioni più comuni di questi dispositivi (Biagi, Grec, & Negretti, 2016; Benedetti, Roberts, Boreham, & Hogg, 2017; Benedetti, Brack, & Roberts, 2016). Considerando il costo di diverse migliaia di euro per ogni ricevitore di classe geodetica, i ricevitori GNSS a singola frequenza rappresentano una valida alternativa nel caso di applicazioni, come le citate, che generalmente richiedono l'installazione di una rete densa di ricevitori per poter osservare il fenomeno nella sua complessità. Se l'applicazione di tecniche di posizionamento differenziale è ormai consolidata anche con l'utilizzo di software free and open source, un problema ancora aperto è rappresentato dal loro

utilizzo per applicazioni di “Precise Point Positioning” (PPP). Il PPP nasce come una tecnica di post processing di dati GNSS che, combinando le osservazioni di codice e fase, permette di ottenere posizionamento con accuratezza centimetrica o decimetrica nel caso, rispettivamente, di scenario statico o cinematico (Zumberge, Heflin, Jefferson, Watkins, & Webb, 1997). Non trattandosi di una tecnica di posizionamento differenziale, tali livelli di accuratezza possono essere raggiunti solamente utilizzando prodotti affidabili per correggere i principali errori che riguardano il posizionamento come la posizione dei satelliti, l’offset dell’orologio satellitare o dei centri di fase delle antenne e i fenomeni periodici di marea terrestre (Karabatic, 2011). Lo studio di tecniche di Real Time PPP, ostacolato dalla disponibilità di queste correzioni con un ritardo che dipende dal tipo di correzione (ultrarapida, rapida o precisa), è argomento discusso all’interno della comunità scientifica con lo sviluppo di metodi di correzione per le orbite e gli offset degli orologi satellitari che permettono l’applicazione della tecnica in tempo reale (Zhang, Yang, Gao, Yao, & Xu, 2018). Il principale ostacolo al raggiungimento di accuratezza centimetrica è rappresentato, tuttavia, dalla presenza dell’atmosfera: troposfera e ionosfera introducono errori variabili tra metri e decine di metri che devono opportunamente essere modellati (Biagi, 2006). Il disturbo troposferico, ben rappresentato tramite l’utilizzo dell’errore troposferico zenitale e del suo gradiente orizzontale, viene tipicamente stimato all’interno di algoritmi di PPP per incrementare l’accuratezza del posizionamento (Bar-Sever, Kroger, & Borjesson, 1998). Inoltre, la combinazione lineare ionosphere – free permette, utilizzando ricevitori GNSS a doppia frequenza, di eliminare il disturbo ionosferico fino al secondo ordine. L’impossibilità di applicare tale combinazione a dati acquisiti da ricevitori a singola frequenza impedisce il raggiungimento di elevati livelli di accuratezza nel posizionamento con questa tecnica.

Scopo di questo articolo è descrivere una metodologia innovativa che permette di applicare la combinazione lineare ionosphere – free a dati acquisiti da ricevitori a singola frequenza in modo da ridurre l’impatto del disturbo ionosferico nel posizionamento con tecnica PPP. Questa introduzione è seguita da una descrizione (Capitolo 2) dei principali modelli utilizzati per rimuovere il disturbo ionosferico lavorando con ricevitori GNSS a singola frequenza con lo scopo di evidenziarne i principali pregi e difetti. Successivamente viene descritta (Capitolo 3) e validata tramite due campi di prova indipendenti (Capitolo 4) la strategia sviluppata nell’ Area di Geodesia e Geomatica dell’Università di Roma “La Sapienza”.

2. STATO DELL’ARTE DELLA MODELLAZIONE IONOSFERICA SU RICEVITORI A SINGOLA FREQUENZA

Come sottolineato al Capitolo 1, uno dei principali disturbi sul segnale GNSS è indotto dalla ionosfera. La ionosfera è un mezzo dispersivo in banda L e, pertanto, induce effetti differenti su osservazioni acquisite sulle diverse frequenze. Inoltre, l’effetto indotto dal disturbo ionosferico differisce nel caso di osservazioni di codice e di fase. Infatti, se gli elettroni liberi contenuti nella ionosfera generano un ritardo nell’osservazione di codice, l’osservazione di fase risulta, invece, accelerata. Lavorando con ricevitori a doppia frequenza, il disturbo ionosferico viene eliminato fino al primo ordine utilizzando la combinazione lineare ionosphere - free. Nel caso di ricevitori a singola frequenza un ruolo strategico è esercitato in generale dalla stima del disturbo ionosferico: all’aumentare dell’accuratezza con cui il

disturbo viene stimato, aumenta l’accuratezza nel posizionamento finale.

Diversi modelli per ridurre il disturbo ionosferico su ricevitori GNSS a singola frequenza possono essere trovati in bibliografia. Il metodo più semplice è rappresentato dall’applicazione in tempo reale del modello di Klobuchar (Klobuchar, 1987) i cui parametri sono riportati all’interno del messaggio navigazionale broadcast. Sebbene questa tecnica permetta di rimuovere in media circa il 50% dell’errore ionosferico, si tratta di un modello poco sensibile alle variazioni spaziali e temporali del contenuto di elettroni liberi connesso alla variabilità dell’attività ionosferica (Chen & Gao, 2005).

Accuratezza decimetrica può essere ottenuta utilizzando le Global Ionosphere Maps (GIMs) prodotte da centri come l’International GNSS Service (IGS) o il Center of Orbit Determination in Europe (CODE). Queste mappe forniscono i valori di Vertical Total Electron Content (VTEC) ai vertici di una griglia con una risoluzione di 5° in longitudine e 2,5° in latitudine a cadenza bioraria. La deviazione standard dei VTEC varia tra 0,2 e 0,8 Total Electron Content Unit (TECU) – ovvero tra 0,32 e 1,68 m – a seconda del ciclo solare e di altri fattori ambientali. Questa metodologia, tuttavia, non è applicabile in tempo reale e risente della bassa risoluzione sia spaziale che temporale propria delle mappe (Memarzadeh, 2009).

Un’altra tecnica che può essere utilizzata per eliminare il disturbo ionosferico nasce dalla considerazione che tale disturbo produce un effetto diametralmente opposto sulle osservazioni di codice e di fase. Pertanto, la combinazione di queste due permette di costruire una nuova osservazione, definita GRAPHIC (GRoup and PHase Ionospheric Combination), priva di disturbo ionosferico. Questa osservazione è caratterizzata, tuttavia, da una rumorosità, ereditata dall’osservazione di codice, maggiore rispetto alla pura osservazione di fase e, contemporaneamente, dalla presenza del termine di ambiguità di fase (Andrei, et al., 2009).

Una tecnica molto interessante è rappresentata dal modello SEID (Satellite-specific Epoch-differenced Ionospheric Delay) sviluppato per ricostruire un’osservazione sintetica L2 su un ricevitore a singola frequenza e, quindi, per rimuovere l’errore ionosferico fino al primo ordine (Deng, 2012). Sfruttando 4 ricevitori a doppia frequenza e un processo di interpolazione, l’osservazione L2 può essere ricostruita per un generico ricevitore posizionato all’interno del poligono individuato dai 4 ricevitori di classe geodetica (Fig. 1).

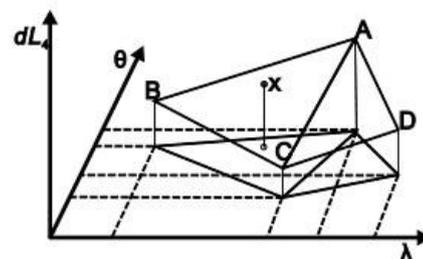


Figura 1 Rappresentazione grafica dell’interpolazione eseguita nel modello SEID.

3. METODOLOGIA

Il presente lavoro descrive una metodologia innovativa che permette di ricostruire un’osservazione sintetica L2 per un ricevitore GNSS low cost a partire dalle osservazioni acquisite

da un unico ricevitore di classe geodetica posizionato nelle vicinanze. L'algoritmo calcola la variazione temporale, epoca dopo epoca, del ritardo ionosferico per ogni satellite in vista dal ricevitore di classe geodetica di riferimento applicando la combinazione lineare geometry-free alle sue osservazioni di fase (L1 e L2). L'equazione di osservazione di fase per la frequenza f_i , ricevitore R e satellite S può essere espressa come segue:

$$Li_R^S = \rho_R^S + c(dt_R - dt^S) - Ii_R^S + T_R^S + \lambda i Ni_R^S \quad (1)$$

dove i termini rappresentano, rispettivamente, la distanza geometrica ricevitore-satellite, la differenza tra gli offset degli orologi ricevitore-satellite, il ritardo ionosferico, il ritardo troposferico e la lunghezza d'onda moltiplicata per l'ambiguità iniziale di fase.

Omettendo gli indici per il ricevitore e per il satellite, è possibile ricostruire il ritardo ionosferico I in assenza di cycle slip:

$$L1 - L2 = -I1 + I2 = -I1 + I1 \frac{f_1^2}{f_2^2} \quad (2)$$

Nella relazione si è indicato con f_i la frequenza del segnale. I può essere ricavato tramite un'adeguata modellazione dello strato ionosferico. Una categoria di modelli, ampiamente utilizzati in Geodesia, è rappresentata dai Single Layer Models (SLMs) in cui la ionosfera viene assimilata ad un unico strato di spessore infinitesimale posto ad una quota media di 350 km dalla superficie terrestre. Inoltre, l'utilizzo di una mapping function (MF) permette di mappare in direzione zenitale ($Iz1$) l'errore ionosferico I calcolato sulla linea di segnale. In questo caso si decide di utilizzare il comune modello Single-Layer Model (SLM) MF (Schaer, 1999) che, assumendo una distribuzione del campo di elettroni liberi sfericamente simmetrica nella regione al disopra della stazione GNSS considerata, permette di relazionare I e $Iz1$ per tutti i satelliti in vista dal ricevitore di classe geodetica come segue:

$$Iz1 = I1 \cos Z' \quad (3)$$

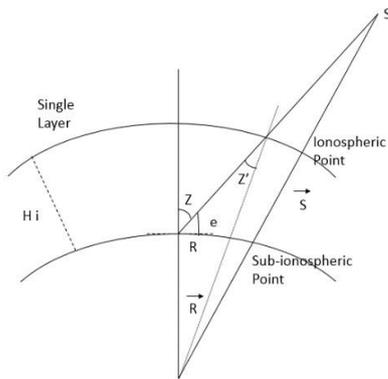


Figura 2 Rappresentazione schematica della mapping function usata nell'algoritmo.

Combinando (2) e (3) è possibile ottenere la formulazione completa per $Iz1$:

$$Iz1 = \frac{(L1 - L2)}{\frac{f_1^2 - f_2^2}{f_2^2}} \cos Z' \quad (4)$$

Pertanto, considerando due epoche consecutive, è possibile ottenere la variazione nel tempo del ritardo ionosferico in direzione zenitale $\delta Iz1$:

$$\delta Iz1 = \frac{\delta(L1 - L2)}{\frac{f_1^2 - f_2^2}{f_2^2}} \cos Z' \quad (5)$$

Ragionando in maniera simile, è possibile ricostruire il ritardo ionosferico $I1^*$ per tutti i satelliti in vista da un generico ricevitore GNSS a singola frequenza posizionato ad una distanza $\overline{\Delta R}$ dalla stazione di riferimento considerata (Fig. 3):

$$I1^* = \frac{Iz1}{\cos Z'^*} = \frac{(L1 - L2)}{\frac{f_1^2 - f_2^2}{f_2^2}} \frac{\cos Z'}{\cos Z'^*} \quad (6)$$

L'utilizzo della mapping function, infatti, permette di considerare il differente percorso del segnale che viaggia da uno stesso satellite a due ricevitori differenti e svolge un ruolo cruciale nell'accuratezza della ricostruzione ionosferica eseguita. Per quanto detto, è possibile costruire la variazione temporale dell'osservazione sintetica $L2^*$ per tutti i satelliti in vista contemporaneamente dai due ricevitori:

$$\delta L2^* = \delta L1^* - \delta(L1 - L2) \frac{\cos Z'}{\cos Z'^*} \quad (7)$$

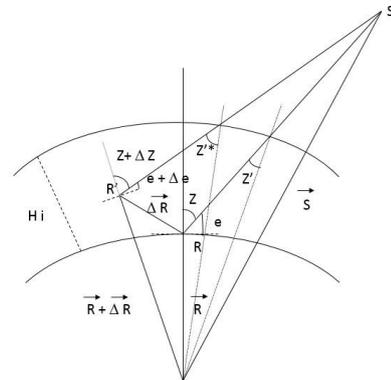


Figura 3 Rappresentazione schematica della metodologia sviluppata.

Il termine $\frac{\cos Z'}{\cos Z'^*}$ può essere ricavato a partire da semplici considerazioni trigonometriche a partire dalla Figura 3, essendo:

$$\cos Z' = \sqrt{1 - \left(\frac{|\vec{R}| \cos e}{|\vec{R}| + H_1} \right)^2} \quad (8)$$

$$\cos Z'^* = \sqrt{1 - \left(\frac{|\vec{R} + \overline{\Delta R}| \cos(e + \Delta e)}{|\vec{R}| + H_1} \right)^2} \quad (9)$$

dove $|\vec{R}|$ rappresenta il raggio della Terra, H_1 l'altezza dello strato ionosferico al di sopra della superficie terrestre, e l'elevazione del satellite S rispetto al ricevitore GNSS a doppia

frequenza R , ($e + \Delta e$) l'elevazione del satellite del satellite S rispetto al ricevitore GNSS a singola frequenza R' e ΔR la distanza fra i due ricevitori.

È bene sottolineare che la medesima strategia può essere utilizzata per ottenere un'osservazione di codice sintetica sulla frequenza L2 necessaria nel caso dell'utilizzo di tecnica PPP o di alternative metodologie basate sulle osservazioni di pseudorange.

4. CASI DI STUDIO

La metodologia descritta è stata validata sfruttando due campi di prova indipendenti con lo scopo di valutare l'accuratezza con la quale sia possibile stimare, tramite tecnica PPP, le coordinate e i parametri troposferici. Le analisi sono state eseguite con il software free and open source RTKLIB (2.4.3) e utilizzando i prodotti precisi forniti dal CODE. Considerando la posizione dei ricevitori, è stato utilizzato un angolo di cut-off pari a 5° . Tutte le analisi sono state eseguite considerando solamente la costellazione GPS.

4.1 Regione Lazio, Italia Centrale

Le prime analisi sono state eseguite considerando, nel periodo compreso tra il 24 e il 30 luglio 2017, i dati giornalieri acquisiti ogni 30 secondi da due ricevitori GNSS low-cost posizionati all'interno della Facoltà di Ingegneria Civile ed Industriale dell'Università di Roma La Sapienza e all'interno dell'Area di ricerca del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) di Roma Tor Vergata. La ricostruzione dell'osservazione sintetica L2 sui due ricevitori GNSS a singola frequenza, denominati rispettivamente LOW1 e LOW2, è stata eseguita a partire da 4 differenti Continuously Operating Reference Stations (CORSS) appartenenti alla rete GNSS della regione Lazio con lo scopo di analizzare gli effetti della distanza sulla ricostruzione ionosferica. Per LOW1 sono state utilizzate le stazioni ROUN, MOSE, FIUM e ARDE posizionate, rispettivamente, a 0,08, 0,01, 26,85 e 31,45 km di distanza (Fig. 4). Per LOW2, invece, sono state utilizzate ROUN, MOSE, VIVA e FROS posizionate a 14,07, 14,10, 28,13 e 62,33 km (Fig. 5).

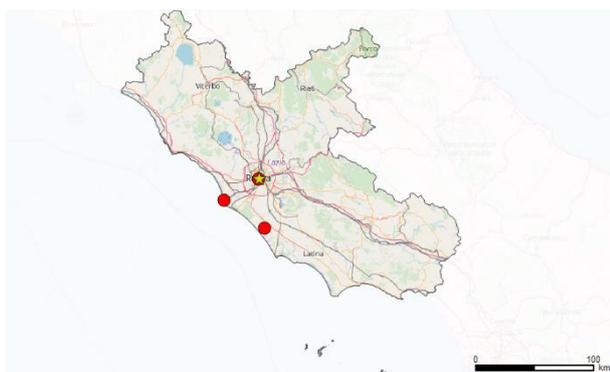


Figura 4 Localizzazione delle quattro stazioni considerate nel caso di LOW1.

Le coordinate giornaliere di riferimento per analizzare l'accuratezza dei risultati ottenuti sono state stimate tramite un'elaborazione differenziale dei file di osservazione originali nell'ipotesi di base corta e sfruttando MOSE come stazione di riferimento. Una base di circa 14 km, come nel caso di LOW2-MOSE, può essere considerata corta considerando l'area di studio.



Figura 5 Localizzazione delle quattro stazioni considerate nel caso di LOW2.

L'analisi statistica dei residui (Figg. 6-7), ottenuti come differenza tra i risultati giornalieri del PPP e le coordinate di riferimento, evidenzia valori di RMSE inferiori a 1,5 cm per le componenti orizzontali e a 3 cm in direzione verticale considerando una distanza di circa 30 km dalla stazione di riferimento considerata. Per distanze maggiori, invece, come atteso si osserva una diminuzione dell'accuratezza delle coordinate stimate testimoniata da un rapido incremento dei valori di RMSE: 5,3 cm sono stati ottenuti in direzione verticale considerando LOW2 e la stazione di riferimento FROS. I risultati ottenuti su LOW1 e LOW2 considerando, rispettivamente, FIUM e VIVA mettono in luce, per distanze confrontabili, una differenza di circa 0,8 cm in Est, 0,4 cm in N e 0,6 cm in UP. Tale differenza, comunque inferiore ad 1 cm in tutte le direzioni, può essere connessa a diversi fattori locali anche legati alle differenti quote a cui sono posizionati i ricevitori: 64,84 m per FIUM e 382,80 m per VIVA. Inoltre, una differenza in direzione verticale non superiore alle differenze osservate per le componenti planimetriche, conferma l'indipendenza di questo fenomeno dal disturbo ionosferico.

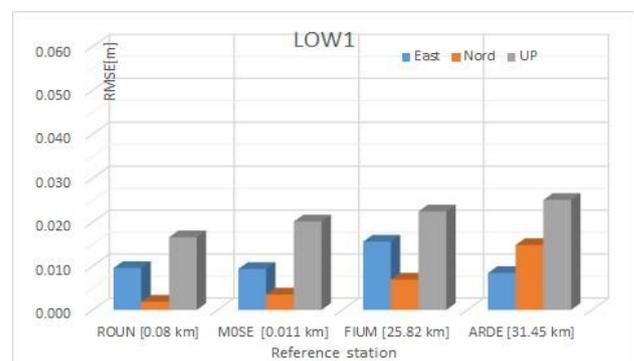


Figura 6 Risultati dell'analisi statistica eseguita sui residui ottenuti per LOW1.

Una delle principali applicazioni di ricevitori GNSS low-cost, nell'ipotesi di elevata accuratezza in seguito all'applicazione di un'analisi PPP, è rappresentata dalla stima assoluta dei parametri troposferici. Infatti, la densificazione dell'informazione troposferica, derivante dall'utilizzo di diverse classi di ricevitori GNSS, contribuisce positivamente alla descrizione delle condizioni atmosferiche. Un esempio è rappresentato dai modelli numerici di previsione meteorologica – Numerical Weather Prediction (NWP) – che possono beneficiare di un'informazione maggiormente diffusa, soprattutto nelle ipotesi di un evento meteorologico intenso.

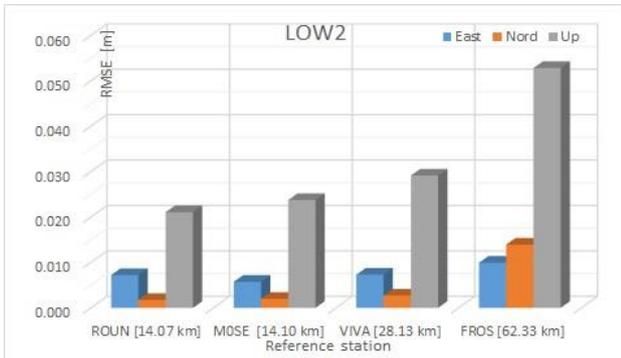


Figura 7 Risultati dell'analisi statistica eseguita sui residui ottenuti per LOW2.

L'applicabilità del metodo allo studio dei parametri troposferici è stata analizzata considerando un unico ricevitore GNSS a doppia frequenza: si è deciso di considerare la stazione di riferimento MOSE, che rientra all'interno delle reti di stazioni permanenti IGS ed EUREF. Per incrementare il numero di ricevitori a singola frequenza, dal momento che non è presente una rete densa di ricevitori a singola frequenza, si è deciso, in accordo con (Deng,2012), di considerare un ricevitore "forzato" a singola frequenza, cioè utilizzando un ricevitore a doppia frequenza ma rimuovendo le osservazioni acquisite sulla seconda frequenza. Tale ricevitore viene definito "simulato" nell'ambito di questo articolo. Di conseguenza, l'espressione ricevitore a singola frequenza "reale" indica un ricevitore GNSS a singola frequenza propriamente detto.

Utilizzando le osservazioni giornaliere acquisite ogni 30 secondi da questa stazione di riferimento nel periodo compreso tra il 20 e il 27 agosto 2017, l'osservazione L2 sintetica è stata ricostruita per 15 ricevitori a singola frequenza simulati a partire da ricevitori a doppia frequenza della rete GNSS della regione Lazio (Fig. 8).

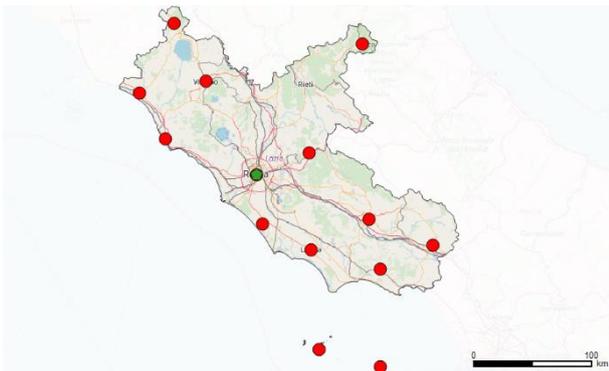


Figura 1 Localizzazione delle stazioni considerate nell'analisi dell'accuratezza della ricostruzione troposferica.

Il parametro tipicamente utilizzato per descrivere le condizioni troposferiche attraverso lo studio del segnale GNSS è rappresentato dal ritardo troposferico totale proiettato in direzione zenitale (Zenith Tropospheric Delay, ZTD). La strategia di analisi adottata permette di considerare come valore di ZTD di riferimento il valore stimato con tecnica PPP e combinazione ionosphere-free utilizzando le osservazioni originariamente acquisite sulle due frequenze dai ricevitori scelti in questa analisi.

La Figura 9 riporta la variazione di RMSE rispetto alla distanza dalla stazione di riferimento. Come prevedibile, all'aumentare della distanza corrisponde un incremento del valore di RMSE

stimato. Ciò è connesso alla presenza di residui di disturbo ionosferico che il modello non è in grado di riprodurre quando si considerano distanze molto elevate (50 km o più).

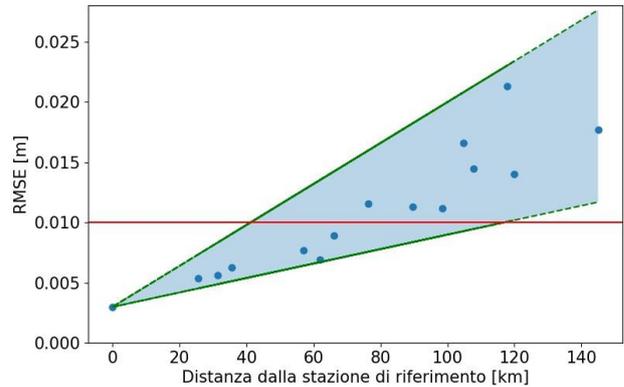


Figura 9 Evoluzione dei valori di RMSE di ZTD in funzione della distanza dalla stazione di riferimento. Le due semirette individuano la fascia di piano contenente i risultati, la retta rossa rappresenta il valore di soglia di RMSE pari ad 1 cm.

L'esiguo numero di stazioni analizzate non permette di ricostruire statisticamente la degradazione dell'accuratezza con la distanza, ma è possibile isolare la fascia del piano in cui i risultati sono contenuti. Fissando una soglia di RMSE pari ad 1 cm, valori inferiori a questa soglia sono ottenuti fino a distanze di circa 70 km dalla stazione di riferimento. Considerando reali ricevitori GNSS low-cost a singola frequenza tipicamente utilizzati in combinazione con un'antenna di altrettanto basso costo, la maggiore rumorosità delle osservazioni porta ad una riduzione ulteriore della distanza limite: si assume pertanto che un valore cautelativo del raggio di applicazione possa essere pari a 40 km (Fig. 10).

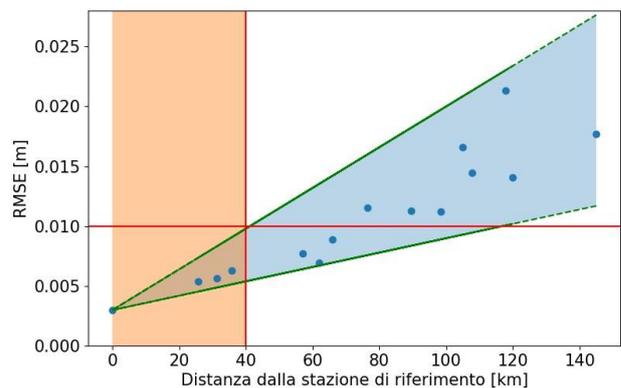


Figura 10 Rappresentazione del raggio di applicabilità della metodologia considerando reali ricevitori GNSS a singola frequenza.

4.2 Foresta Amazzonica, Brasile

Visto l'elevato livello di accuratezza raggiunto nei test descritti nel Capitolo 4.1, si è deciso di investigare il comportamento della metodologia in esame alle basse latitudini, ad esempio nella fascia equatoriale, dove la forte variabilità ionosferica presente potrebbe rappresentare un ostacolo per l'applicazione di questa metodologia. A scopo puramente indicativo, si riporta in Figura 11, la variabilità spaziale dei valori di TECU stimati dal CODE per il giorno 254 del 2004 alle ore 00:00. L'entità dell'attività

ionosferica risulta maggiormente accentuata nelle ore diurne dal momento che alla variabilità spaziale si aggiunge una variabilità su base giornaliera, stagionale o relazionata all'attività solare.

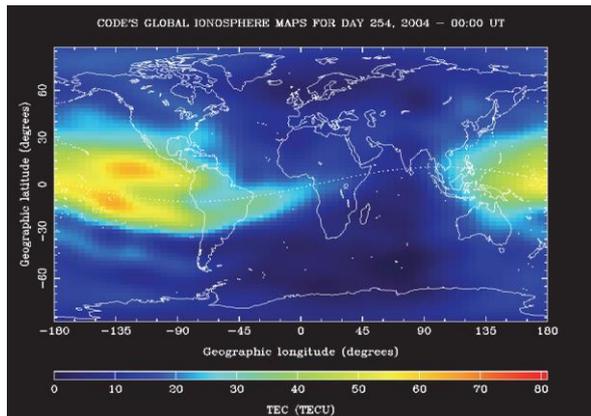


Figura 2 Variabilità spaziale di TECU per il giorno 254 del 2004 alle ore 00:00.

Le osservazioni giornaliere, acquisite ogni 15 secondi in data 27 ottobre 2011 da due ricevitori GNSS a doppia frequenza (TMB7 e NAUS) posizionati ad una distanza di 69,3 km all'interno della Foresta Amazzonica (Brasile), sono state considerate in questa analisi (Fig.12). La limitata diffusione di ricevitori GNSS in tale regione obbliga a valutare le potenzialità della metodologia considerando distanze significative tra le stazioni che sono, generalmente, ricevitori GNSS a doppia frequenza. Per questo motivo, in luogo di un ricevitore a singola frequenza reale si è deciso di considerare un ricevitore a singola frequenza simulato. Questa tecnica di analisi consente di sfruttare, come coordinate e ZTDs di riferimento per test statistici sull'accuratezza e precisione delle stime ottenute, i risultati giornalieri di un processamento PPP "standard". A valle di un'analisi sulla consistenza e continuità delle osservazioni e, quindi, in virtù del minor numero di cycle slip, NAUS è stato definito come ricevitore GNSS di riferimento per la ricostruzione del contenuto ionosferico. Di conseguenza, TMB7 è stato assunto come ricevitore GNSS a singola frequenza simulato.



Figura 12 Localizzazione delle stazioni considerate all'interno della Foresta Amazzonica: in giallo il ricevitore GNSS a singola frequenza simulato e in rosso la stazione di riferimento considerata.

In questo caso, la validazione delle coordinate ricostruite in PPP per il ricevitore GNSS low-cost è stata eseguita analizzando e confrontando con le coordinate di riferimento la convergenza delle soluzioni all'interno della giornata (Fig. 13).

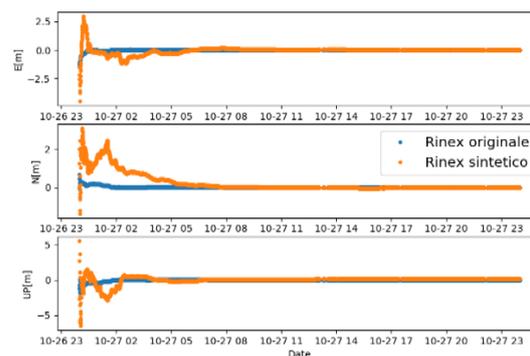


Figura 13 Convergenza dei residui rispetto alle coordinate di riferimento giornaliere in un sistema di riferimento locale (E, N, UP) per i due file di osservazione considerati.

L'analisi dei risultati in Figura 13 evidenzia un significativo tempo di convergenza richiesto dal filtro di Kalman per raggiungere livelli di accuratezza decimetrici. Ciò è dovuto alla forte variabilità del contenuto ionosferico in fascia equatoriale che non permette una corretta ricostruzione del ritardo ionosferico sul ricevitore GNSS a singola frequenza. La presenza di un ritardo ionosferico residuo, infatti, si riflette in un rallentamento nella convergenza alla soluzione. Tale residuo nella modellazione ionosferica emerge anche nella valutazione dell'accuratezza delle coordinate una volta giunti a convergenza (Fig. 14). Sono state infatti ottenute differenze rispetto alla coordinata giornaliera di riferimento pari a 0,4 cm in E, 1,3 cm in N e 17,4 cm in U. E' doveroso sottolineare che le soluzioni, come nel Capitolo 4.1, sono state stimate con ambiguità di fase float poiché, in presenza di cycle slip come nel caso delle osservazioni originali acquisite da TMB7 ed utilizzate per la ricostruzione delle coordinate di riferimento, le difficoltà nel fissaggio delle ambiguità aumentano sensibilmente.

Il confronto con i risultati ottenuti in Italia centrale considerando distanze tra i due ricevitori maggiori di 60 km (Figura 7), conferma l'ordine di grandezza dei residui ottenuti per le componenti planimetriche. Le differenze presenti in direzione verticale, invece, sono causate dalle perturbazioni ionosferiche come già sottolineato.

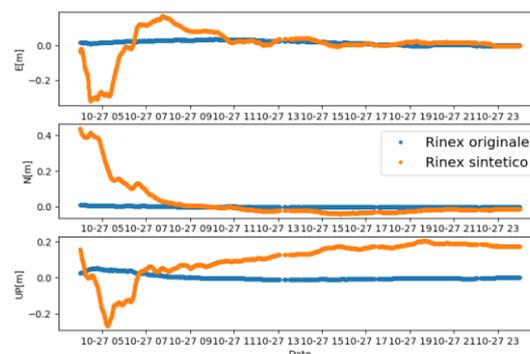


Figura 14 Convergenza dei residui rispetto alle coordinate di riferimento giornaliere in un sistema di riferimento locale (E, N, UP) per i due file di osservazione considerati dopo un tempo di convergenza arbitrario pari a 4 ore.

La stima dei valori di ZTD, come atteso, risulta inevitabilmente influenzata da un'incompleta modellazione ionosferica (Fig. 15).

Infatti, l'analisi statistica dei residui rispetto ai valori di riferimento, eseguita considerando le stime di troposfera ottenute dopo un tempo di convergenza arbitrario pari a 4 ore e applicando una mediana mobile con finestra 30 minuti (Fig. 16), evidenzia un RMSE pari a 9.2 cm.

Pertanto, la presenza di un ritardo ionosferico residuo impedisce la stima di valori affidabili di ZTD.

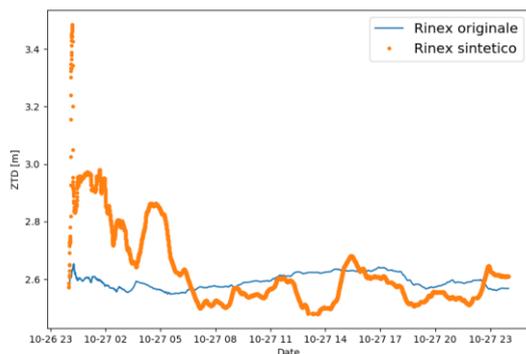


Figura 15 Valori di ZTD in funzione del tempo per i due file di osservazione considerati

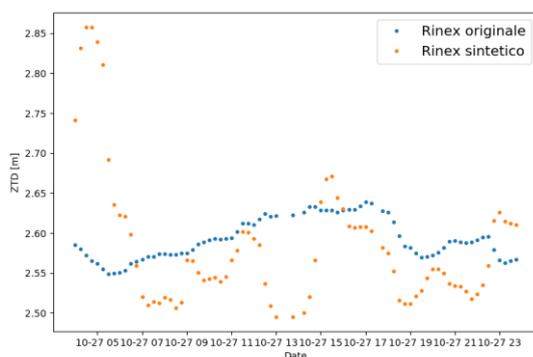


Figura 16 Valori di ZTD in funzione del tempo dopo l'applicazione di una mediana mobile per la rimozione degli eventuali outliers una volta superato il tempo di convergenza arbitrario pari a 4 ore.

5 CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

In questo articolo è stata descritta e validata una metodologia innovativa che permette di simulare un'osservazione sintetica L2 su un generico ricevitore GNSS a singola frequenza a partire dalle osservazioni acquisite da un ricevitore di classe geodetica. Questa metodologia permette l'applicazione anche su ricevitori GNSS low-cost dei consueti algoritmi di PPP basati sull'applicazione della combinazione lineare ionosphere-free per eliminare il disturbo ionosferico fino al primo ordine. La validazione di questa strategia è stata eseguita valutando l'accuratezza della stima delle coordinate e dei valori di ZTD su due campi di prova indipendenti.

I primi test eseguiti sfruttando ricevitori GNSS localizzati nella regione Lazio hanno permesso di evidenziare livelli di accuratezza, per quanto riguarda le coordinate, migliori di 1,5 cm per le componenti orizzontali e di 3 cm in direzione verticale considerando una distanza tra i due ricevitori GNSS circa pari a 30 km. Lo studio dei parametri troposferici, invece, evidenzia valori di accuratezza per i valori di ZTD rispetto ai valori di riferimento migliori di 1 cm anche a distanze di 70 km dalla

stazione di riferimento e utilizzando ricevitori GNSS a singola frequenza simulati a partire da ricevitori di classe geodetica. Una riduzione di tale distanza è attesa nelle ipotesi di reali ricevitori low-cost a causa delle prestazioni delle antenne con cui sono equipaggiati. Considerando che l'affidabilità della stima dei parametri troposferici è strettamente legata all'accuratezza della stima delle coordinate, soprattutto in direzione verticale, si ritiene ragionevole definire un campo di applicabilità per lo studio dei parametri troposferici limitato ad una distanza dell'ordine di grandezza di 40 km dalla stazione di riferimento a doppia frequenza.

Considerando zone a basse latitudini, i test eseguiti su dati acquisiti all'interno della Foresta Amazzonica (Brasile) permettono di affermare che non è possibile ottenere, a parità di distanza, gli stessi risultati ottenuti in una zona caratterizzata da normale attività ionosferica. In questi primi esperimenti, in presenza di una distanza pari a 69,3 km tra le stazioni considerate, un'accuratezza inferiore a 1,5 cm per le componenti orizzontali e inferiore ai 18 cm in direzione verticale sono state ottenute considerando ricevitori GNSS a singola frequenza simulati. Se i risultati ottenuti per la componente verticale non permettono una stima affidabile di ZTD, essi aprono a diversi campi di applicazione in cui l'elevata accuratezza per tale componente non è di primaria importanza.

Passando agli sviluppi futuri, sarà necessario analizzare più approfonditamente i punti di forza e debolezza della metodologia in presenza di perturbazioni ionosferiche. Il campione statistico delle analisi eseguite in queste condizioni è infatti ancora limitato. Un campo di analisi è rappresentato dallo studio dei benefici indotti nella stima delle coordinate con tecnica PPP, a valle della ricostruzione di un'osservazione L2 sintetica, quando la distanza da una stazione di riferimento supera i 10-15 km, poiché in questo caso il posizionamento differenziale a singola frequenza risente di errori residui dovuti alla rifrazione ionosferica. Inoltre, ulteriori analisi devono essere eseguite per la validazione dei valori di ZTD stimati da reali ricevitori GNSS low-cost anche in presenza di eventi meteorologici intensi. Infatti, la definizione del campo di applicabilità della metodologia per la stima assoluta di ZTD con ricevitori low-cost passa attraverso l'analisi di risultati ottenuti su reali ricevitori a singola frequenza in virtù, come sottolineato, delle differenze nelle caratteristiche delle antenne utilizzate e nell'hardware dei ricevitori di classe geodetica.

BIBLIOGRAFIA

- Andrei, C.-O., Chen, R., Kuusniemi, H., Hernandez-Pajares, M., Juan, J. M., & Salazar, D. (2009). Ionosphere Effect Mitigation for Single-Frequency Precise Point Positioning. *In ION GNSS*, 22-25.
- Bar-Sever, Y. E., Kroger, P. M., & Borjesson, J. A. (1998). Estimating Horizontal Gradients of Tropospheric Path Delay with a Single GPS Receiver. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 103, B3, 50195035.
- Benedetti, E., Brack, A., & Roberts, W. (2016). Performance Validation of Low Cost GNSS Sensors for Land Monitoring and Hazard Mitigation. *Proceedings of ION GNSS+ 2016 Land-Based Application 2*.
- Benedetti, E., Roberts, W., Boreham, N., & Hogg, W. (2017). A Cost Benefit Analysis of One Millimeter in GNSS Positioning. *Proceedings of ENC-GNSS 2017*.
- Biagi, L. (2006). *I fondamenti del GPS*. Geomatics Workbooks.

- Biagi, L., Grec, F., & Negretti, M. (2016). Low-Cost GNSS Receivers for Local Monitoring: Experimental Simulation and Analysis of Displacements. *Sensors* 16, 12, 2140.
- Chen, K., & Gao, Y. (2005). Real-Time Precise Point Positioning Using Single Frequency Data. *Proceedings of ION GNSS-2005*, 1514-1523.
- Deng, Z. (2012). *GPS Meteorology with Single Frequency Receivers*. GFZ.
- Karabatic, A. (2011). *Precise Point Positioning (PPP): an Alternative Technique for Ground Based GNSS Troposphere Monitoring*. Inst. of the Course on "Geodesy and Geoinformation" of the Vienna University of Technology.
- Klobuchar, J. A. (1987). Ionospheric Time-Delay Algorithm for Single-Frequency GPS users. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 3, 325-331.
- Memarzadeh, Y. (2009). *Ionospheric Modeling for Precise GNSS Applications*. NCG, Nederlandse Commissie voor Geodesie.
- Schaer, S., & Société helvétique des sciences naturelles. Commission géodésique. (1999). *Mapping and predicting the Earth's ionosphere using the Global Positioning System* (Vol. 59). Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Eidg. Technische Hochschule Zürich.
- Zhang, L., Yang, H., Gao, Y., Yao, Y., & Xu, C. (2018). Evaluation and Analysis of Real-Time Precise Orbits and Clocks Products from Different IGS Analysis Centers. *Advances in Space Research*.
- Zumberge, J., Heflin, M., Jefferson, D., Watkins, M., & Webb, F. H. (1997). Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 102, B3, 5005-5017.