

Una simulazione di PPP tramite l'integrazione di GNSS e LEO-PNT

Marianna Alghisi¹, Nikolina Zallemi¹, Florin-Catalin Grec², Ludovico Biagi¹

¹ Politecnico di Milano, DICA, P.zza Leonardo da Vinci 32, Milano, Italy

² European Space Agency, Keplerlaan 1, 2201AZ Noordwijk, The Netherlands

Abstract. The abstract should summarize the contents of the paper in short terms, i.e. 15–250 words.

Keywords: First Keyword, Second Keyword, Third Keyword.

1 Introduzione

Nel Precise Point Positioning mediante GNSS vengono elaborate osservazioni indifferenziate di fase e codice a più frequenze di un singolo ricevitore. Chiaramente, il PPP richiede un'accurata rimozione o modellazione di tutte le fonti di errore che influenzano il posizionamento standard. Ciò premesso, negli ultimi decenni sono stati compiuti notevoli progressi e il PPP è ormai una prassi consolidata nel processamento di sessioni statiche per reti permanenti, con accuratezze che eguagliano quelle delle tecniche tradizionali differenziali.

Il PPP richiede la stima congiunta delle coordinate del ricevitore e delle ambiguità di fase: a questo proposito, il problema del tempo di convergenza della soluzione è ancora un limite principale, causato principalmente dalla lenta variazione di configurazione dei satelliti GNSS rispetto a un ricevitore a terra: l'orbita si trova a circa 20000 Km di quota con una velocità di circa 4 km/s. Inoltre, in un ambiente urbano difficile, la visibilità e la geometria dei satelliti sono compromesse, con ripercussioni sulle prestazioni complessive o, nel peggiore dei casi, rendendo impossibile la convergenza.

Negli ultimi decenni, diverse costellazioni di satelliti in orbita bassa (Low Earth Orbit, orbite dai 400 Km ai 1500 Km di quota) sono state attivate per diversi scopi, come le telecomunicazioni e l'osservazione della Terra. Ora, molte agenzie spaziali stanno valutando l'idea di progettare e utilizzare i satelliti LEO anche per applicazioni di Positioning, Navigation and Timing (PNT), dotandoli di strumenti e di segnali simili a quelli del GNSS.

In questo contesto, le costellazioni LEO-PNT possono rivoluzionare lo scenario. Innanzitutto, la loro disponibilità accresce la ridondanza del GNSS. Inoltre, i satelliti LEO orbitano con velocità che vanno da 7 Km/s a 8 Km/s: pertanto la loro geometria varia molto più velocemente rispetto a quella del GNSS. Di conseguenza, in linea di principio questo dovrebbe ridurre significativamente il tempo di convergenza delle soluzioni PPP.

Lo scopo di questo studio è quello di analizzare come l'integrazione di LEO-PNT con il GNSS tradizionale possa potenzialmente migliorare le prestazioni del PPP in sessioni statiche veloci e cinematiche. Simulando stime mediante Minimi quadrati, le metriche utilizzate per valutare la convergenza delle soluzioni sono il buon condizionamento e la stabilità delle relative matrici normali.

In particolare, innanzitutto si analizza il tempo di convergenza delle soluzioni PPP utilizzando solo GNSS, le cui orbite sono ottenute dalle effemeridi precise di una giornata tipo per la Stazione Permanente di Milano.

Vengono poi simulati vari tipi di costellazioni LEO con diverse altitudini e inclinazioni del piano orbitale, utilizzando valori realistici. Quindi, utilizzando le orbite GNSS vere e quelle simulate per LEO, si calcola il tempo di convergenza del PPP con le soluzioni combinate GNSS-LEO. Le analisi vengono svolte tenendo conto di tre diversi possibili scenari rappresentativi di diversi ambienti di applicazione dei servizi PNT: open-sky, scenario urbano con costruzioni di tipo residenziale e scenario di canyon urbano. Un'ulteriore analisi viene condotta per valutare i miglioramenti in ambienti difficili, simulando ostruzioni in uno scenario urbano.

2 Metodi

Per quanto riguarda le orbite GNSS, queste sono state ottenute utilizzando le effemeridi precise relative al giorno 15 Luglio 2024 per la Stazione Permanente di Milano. Le costellazioni in considerazione sono GPS, Galileo, GLONASS e BeiDou. Per la simulazione della costellazione LEO-PNT, ci siamo basati su esempi già presenti in letteratura.

Le orbite dei satelliti LEO-PNT sono state simulate utilizzando il modello orbitale kepleriano, che offre una rappresentazione accurata delle traiettorie satellitari in base alle leggi del moto di Keplero. La costellazione LEO-PNT simulata è composta da 263 satelliti, posizionati a un'altitudine di 1200 km e suddivisi in 19 piani orbitali circolari. I piani presentano due possibili inclinazioni: una inclinazione polare di 89° , che garantisce la copertura delle regioni più settentrionali e meridionali della Terra, e una inclinazione di 55° , mirata a rafforzare la presenza della costellazione nelle aree a media latitudine, le quali rappresentano le zone più densamente popolate del pianeta. Questa configurazione permette di ottimizzare la copertura globale, con particolare attenzione alle regioni geografiche strategiche.

Per valutare i tempi di convergenza del PPP, è stato utilizzato il PDOP (Position Dilution of Precision) come indicatore principale. Il PDOP rappresenta un indice di qualità della geometria satellitare, che influisce direttamente sull'accuratezza della soluzione di posizionamento: un valore basso di PDOP indica una geometria favorevole e quindi una soluzione più precisa. Questo indice dipende dalla matrice disegno della soluzione di posizionamento, che tiene conto delle posizioni relative dei satelliti rispetto al ricevitore.

Abbiamo calcolato il PDOP su diverse soluzioni batch di minimi quadrati per entrambe le configurazioni considerate (solo GNSS e GNSS+LEO). In particolare, è stato determinato il numero di epoche di processamento necessarie affinché il PDOP raggiungesse un valore inferiore o uguale a 1, che indica una qualità ottimale della soluzione di posizionamento. Questo test è stato eseguito tenendo conto dei tre scenari di simulazione precedentemente introdotti, al fine di valutare le prestazioni delle diverse configurazioni considerate in contesti differenti e mettere in luce i miglioramenti introdotti da LEO-PNT e in particolare dalla velocità della geometria. La simulazione dei diversi scenari urbani è stata realizzata introducendo un cutoff sull'elevazione dei satelliti:

- *Open-Sky*: cutoff = 5°
- *Area Residenziale Urbana* = 30°
- *Canyon Urbano* = 50°

Per quanto riguarda il calcolo del PDOP, la costruzione della matrice disegno del sistema è stata effettuata a partire dall'equazione di osservazione di fase, facendo riferimento alla letteratura standard. Viene riportata in seguito l'equazione di riferimento per un satellite s appartenente alla costellazione S , di frequenza j , all'epoca t . Per la notazione si fa riferimento a Springer, 2017[1].

$$\phi_{r,j}^s(t, \tau_r^s) = \rho_r^s(t, t - \tau_r^s) + T_r^s(t) + c[dt_r(t) + \delta_{r,j}^s(t)] - c[dt^s(t - \tau_r^s) - \delta_j^s(t - \tau_r^s)] - \mu_j^s I_r^s(t) + \lambda_j^s N_{r,j}^s + \epsilon_{r,j}^s(t)$$

Nell'equazione $\phi_{r,j}^s$ è l'osservazione di fase, ρ_r^s è la distanza geometrica satellite-ricevitore, T_r^s è il ritardo troposferico, c è la velocità di propagazione della luce nel vuoto, dt_r è il clock offset del ricevitore, dt^s è il clock offset dell'orologio del satellite, $\delta_{r,j}^s$ è l'hardware bias del ricevitore, δ_j^s è l'hardware bias del satellite, τ_r^s è il tempo di percorrenza del segnale, μ_j^s è il coefficiente ionosferico, I_r^s è il ritardo ionosferico, λ_j^s è la lunghezza d'onda, $N_{r,j}^s$ è l'ambiguità iniziale, $\epsilon_{r,j}^s$ è il noise di osservazione.

Nella simulazione di una soluzione ai Minimi Quadrati si è ipotizzato di processare la combinazione ionospheric free; si è simulato lo scenario relativo a un'acquisizione statica su più epoche e di risolvere il relativo sistema di osservazioni rispetto alle seguenti incognite:

- le 3 coordinate del ricevitore,
- per ogni epoca un clock offset 'totale', dato cioè dalla somma del clock offset e dell'hardware bias, per una costellazione primaria, ad esempio il GPS,
- per ogni epoca, il medesimo clock offset e un interchannel bias per ognuna delle altre costellazioni (sia le altre GNSS sia i LEO-PNT),
- un'ambiguità iniziale per ogni satellite osservato.

In base alla configurazione dei satelliti si è quindi riempita la relativa matrice disegno linearizzata rispetto alle coordinate, si sono calcolate la matrice normale e la sua inversa, estraendo infine il PDOP dai tre elementi diagonali di quest'ultima relativi alle incognite di posizione..

3 Risultati

In Tabella 1 sono confrontati i risultati ottenuti per le configurazioni solo GNSS e GNSS+LEO nei tre diversi scenari. Sono state effettuate 10 sessioni di misura, equispaziate durante la giornata, con un intervallo di due ore ciascuna. I risultati mostrano i minuti necessari per raggiungere un valore di PDOP ≤ 1 , che abbiamo assunto come valore di soglia per un buon condizionamento.

La Tabella 2, invece, riassume i dati di Tabella 1, riportando il tempo medio necessario per raggiungere un PDOP ≤ 1 nelle diverse sessioni. Ciò che emerge chiaramente è che, in condizioni di Open Sky, il sistema GNSS da solo impiega circa 11 minuti per soddisfare il requisito, mentre con l'integrazione GNSS+LEO, il tempo si riduce significativamente andando sotto i 2 minuti, ottenendo un miglioramento dell'84%. In area residenziale, si passa ancora da 13.5 minuti per il GNSS a meno di 2 minuti in media, con un incremento dell'efficienza dell'84%. Il miglioramento più significativo da un punto di vista pratico si osserva in canyon urbano, dove da Tabella 1 si nota che in alcune sessioni con il solo GNSS il tempo

richiesto supera i 30 minuti, mentre con GNSS+LEO il tempo medio si riduce a circa 8 minuti, con un miglioramento dal 66%. Questo dimostra l'impatto notevole dell'aggiunta della costellazione LEO, soprattutto in ambienti più complessi come quello urbano.

Tabella 1. Tempo necessario per ottenere un PDOP \leq 1 (in minuti)

TEST	OPEN-SKY		AREA RESIDENZIALE		CANYON URBANO	
	GNSS	GNSS+LEO	GNSS	GNSS+LEO	GNSS	GNSS+LEO
1	12.6	1.8	11.7	2.4	10.0	6.4
2	11.3	1.8	11.9	2.3	11.9	7.2
3	11.2	1.7	12.4	2.2	29.3	9.0
4	11.0	1.8	14.4	2.4	22.4	8.7
5	8.5	1.8	14.0	2.1	32.1	8.2
6	11.1	1.8	13.2	2.3	14.5	9.3
7	11.0	1.8	16.5	2.6	33.4	9.1
8	11.2	1.8	14.6	1.5	35.1	8.4
9	11.5	1.8	13.4	2.6	31.3	7.1
10	12.1	1.8	13.2	1.9	19.3	7.6

Tabella 1. Tempo medio per ottenere un PDOP \leq 1 (in minuti)

MEAN	OPEN-SKY		AREA RESIDENZIALE		CANYON URBANO	
	GNSS	GNSS+LEO	GNSS	GNSS+LEO	GNSS	GNSS+LEO
	11.1	1.8	13.5	2.2	23.9	8.1

References

1. P. Teunissen and O. Montenbruck, *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*, 1st ed., Springer, 2017. doi: 10.1007/978-3-319-42928-1.