Uno studio sui risultati di PPP integrando il GNSS esistente con LEO-PNT

N. Zallemi (1), L. Biagi (1)

[1] Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale (DICA), Piazza Leonardo da Vinci 32, 20133 Milano, ludovico.biagi@polimi.it

Parole chiave: GNSS, LEO, PPP

1 Riassunto esteso

Il Precise Point Positioning (PPP) fornisce accuratezze centimetriche con un solo ricevitore, ma richiede un periodo di convergenza di alcune decine di minuti. Nella stima, le ambiguità di fase sono fortemente correlate con le altre incognite (coordinate, offset di orologio, troposfera) e si decorrelano solo con il variare della geometria fra satelliti e ricevitore. Per i satelliti GNSS, in orbita media, con periodi di 12–14 h, la variazione è lenta e questo determina il tempo di convergenza.
I satelliti in orbita bassa (LEO), con periodi di circa 1.5–2 h, offrono una variazione molto più rapida della geometria di osservazione. Alle grandi costellazioni LEO per telecomunicazioni (Iridium NEXT, OneWeb, Starlink) si stanno affiancando progetti di costellazioni dedicate al posizionamento, navigazione e tempo (LEO-PNT), come Xona Pulsar e il dimostratore ESA Celeste.
In un lavoro precedente (Alghisi, Zallemi, Biagi, 2025) il contributo LEO è stato studiato dal solo punto di vista geometrico, in termini di diluizione della precisione. Nel presente lavoro, l'analisi è estesa al problema PPP completo: si è quindi implementato un stimatore PPP che utilizza osservazioni GNSS reali e osservazioni LEO-PNT sintetiche per quantificare (i) la riduzione del tempo di convergenza, (ii) i contributi separati di codice e fase LEO e (iii) l'effetto sull'accuratezza dopo la convergenza.
La costellazione LEO, simulata in una precedente collaborazione con ESA sulla base di concetti LEO-PNT di letteratura, conta 263 satelliti su orbite kepleriane circolari a circa 1190 km di quota: una parte in orbita quasi polare (inclinazione a 89°, 8 piani orbitali × 15 satelliti) e una parte a media inclinazione (55°, 11 piani × 13 satelliti).
Al presente il software implementato per l'elaborazione usa le combinazioni ionosphere-free (IF) di codice e fase in doppia frequenza. Le osservazioni GNSS sono fornite in file RINEX; i prodotti precisi di orbite, orologi e bias sonoo forniti nell'usuale formato IGS; le osservazioni LEO sono simulate direttamente in forma IF, con struttura analoga a quella GNSS e un offset d'orologio del ricevitore specifico per il tempo di sistema LEO-PNT. Alle misure sintetiche sono aggiunti un errore residuo d'orologio del satellite gaussiano, con deviazione standard di 12 cm, rumore di codice e fase gaussiani, rispettivamente con deviazione standard di 30 cm e 3 mm; infine viene

aggiunto un errore orbitale residuo sinusoidale, con periodo pari a quello orbitale e fase casuale per ciascun satellite.
Le osservazioni GNSS e quelle LEO sono elaborate in un unico modulo EKF ibrido, che applica anche le correzioni deterministiche (maree terrestri solide, ritardo di Shapiro, offset e variazioni dei centri di fase, phase wind-up). Il vettore di stato comprende le coordinate e un orologio del ricevitore per ciascuna costellazione GNSS, un orologio per LEO, il ritardo zenitale umido (random walk lento) e un'ambiguità float per ogni arco di satellite. Alla prima epoca lo stato è stimato ai minimi quadrati pesati: la relativa stima e covarianza inizializzano poi un filtro di Kalman esteso sequenziale, con aggiornamento della covarianza epoca per epoca. Il modello temporale del vettore di stato è random walk per le coordinate, gli offset di orologio e il ritardo zenitale umido, costante per le ambiguità. E' utile notare che l'EKF implementato al presente applica solo la stima forward.
In termini di coordinate, il software restituisce una stima di posizione per ogni epoca. Per analizzare le soluzioni in modo oggettivo si calcola la posizione media su finestre mobili di 5 min, traslate di 2.5 min. La convergenza è dichiarata quando le distanze 3D tra le medie di tre finestre consecutive sono tutte inferiori a 2 cm, cioè quando la soluzione è stabile su 10 min. Tale criterio misura appunto la stabilità della soluzione e non la sua accuratezza; in parallelo, conoscendo le coordinate di riferimento del sito, è anche possibile valutare l'errore 3D delle stime.
AL presente, è stata analizzata una giornata (19 febbraio 2026,DoY 50) di osservazioni GPS e Galileo a 30 s della stazione DLF1 (Delft). Con cutoff di 5°, sono visibili in media 19 satelliti GNSS. In base alla costellazione LEO simulata sono inoltre visibili 18 LEO.
Si confrontano tre soluzioni: solo GNSS (G), GNSS + codici LEO (G + L(P)) e GNSS + codici e fasi LEO (G + L(P+Φ)). In particolare, la giornata è divisa in 22 sessioni di 2 ore ciascuna, la prima che inizia a mezzanotte, le successive sfalsate di un'ora.
In base ai primi risultati ottenuti, l'elaborazione del solo GNSS raggiunge la convergenza in media dopo 35 minuti: dopo la convergenza, l'errore di stima 3D è dell'ordine dei 3 cm. L'aggiunta dei codici LEO non cambia significativamente lo scenario. Con l'aggiunta delle fasi LEO, si raggiunge la convergenza in circa 14 minuti e l'errore cala a poco più di un centimetro.
Al momento della stesura di questo abstract i risultati preliminari sono già molto incoraggianti. Nelle prossime settimane si concluderanno i test sui dati già disponibili, con particolare attenzione alla relazione tra l'evoluzione della geometria LEO e la convergenza del PPP. Inoltre si implementerà l'elaborazione non combinata delle fasi con la stima dei disturbi ionosferici. Nella presentazione al convegno verranno mostrati e discussi tutti i risultati ottenuti. SI prevede di maturare l'articolo completo nei primi mesi del 2027.

Riferimenti bibliografici

Alghisi M., Zallemi N., Biagi L., 2025. Improvements in PPP by integrating GNSS with LEO satellites: a geometric simulation. Sensors, 25, 4427