

Abstract

Politecnico di Torino
Department of Electronics and Telecommunications (DET)
2025

Potential of cooperation between GNSS users in lunar orbits

Anaïs Delépaut

As the second wave of lunar exploration gains momentum, the development of autonomous navigation solutions for spacecraft has become essential. Traditional ground-based tracking, such as NASA's Deep Space Network (DSN) or ESA's Estrack, imposes operational constraints, driving interest in Global Navigation Satellite Systems (GNSS) as an alternative. While GNSS was originally designed for Earth-based applications, advancements in high-sensitivity receivers, multi-constellation support (GPS, Galileo), and improved signal processing have enabled its use in lunar missions. Recognizing this potential, NASA and ESA are testing GNSS capabilities in lunar orbit via the recent Lunar GNSS Receiver Experiment (LuGRE), performed in collaboration with the Italian Space Agency (ASI), and the NaviMoon project, respectively. These initiatives aim to prove the feasibility of reducing missions reliance on ground stations by enhancing spacecraft autonomy, and potentially supporting the growing number of planned lunar missions.

Despite these advancements, and even assuming a high-sensitivity for the reception of weak signals, GNSS-based navigation in space at lunar distances remains challenged by poor signal geometry. The Earth-centered GNSS constellations result in suboptimal Geometric Dilution Of Precision (GDOP) for users located near the Moon as all the incoming signals have similar directions, hence degrading positioning precision. Poor geometrical conditions have been addressed in terrestrial applications by leveraging collaboration among users via measurements sharing to improve navigation performance. With over 400 lunar missions planned in the coming decades, inter-spacecraft cooperation may represent a promising approach to enhancing GNSS performance while minimizing infrastructure costs.

The technique called Differential GNSS (DGNSS) Cooperative Positioning (CP) has been studied in terrestrial applications such as in vehicular networks and robotics to leverage the presence of nearby networked GNSS receivers as anchors of opportunity. It is seen as a non-invasive solution in which users benefit from a communication link to share GNSS measurements for the improvement of GNSS-based solutions. The combination of such measurements allows for the collaborative estimation of their baseline length, hence creating additional ranging sources in the

vicinity of the target user.

This thesis investigates the use of DGNSS-CP techniques in space. In particular, it assesses their feasibility in spite of the peculiar conditions in terms of geometry and large dynamics that sets space scenarios apart from terrestrial applications. Specifically, the study focuses on GNSS users in lunar orbits to overcome the typically poor geometry of incoming GNSS signals at such altitudes, providing insight into the viability of collaborative GNSS techniques for lunar exploration. In the proposed framework, the focus is on collaborative techniques, which uniquely exploit the exchange of data typically used for GNSS-based positioning, without the need of additional sensors, to perform inter-user indirect ranging.

Within such a context, this thesis aims at investigating the paradigm of DGNSS-CP in the cislunar volume according to a bottom-up approach. First, a proper framework is defined for the analysis and investigation of GNSS-based ranging among networked receivers. Subsequently, the DGNSS-CP paradigm is explored through numerical and controlled-environment simulations of lunar orbiters, and eventually, the discussed framework is applied to real GNSS measurements generated by an Engineering Model of the NaviMoon receiver being fed by a radio frequency constellation simulator in the European Space Agency (ESA/ESTEC) Radio Navigation Laboratory. Mission parameters of the European Lunar Pathfinder mission are considered in a software-based algorithm verification and a hardware-in-the-loop simulation.

Results show that the integration of additional ranging information obtained via DGNSS-CP between lunar orbiters could improve the GDOP of the GNSS navigation problem for such users of up to two orders of magnitude. Additionally, the present contribution allowed to invalidate linear solutions commonly used for terrestrial scenarios of DGNSS ranging, as they introduce biases in the order of kms. Solutions were proposed according to which the design matrix involved in the inter-user range estimation was updated bypassing the parallelism assumption. Such solutions allow the reduction of undesired biases down to two orders of magnitude. The present work is assumed to be pioneer in the field as no previous contributions have been found on the use of DGNSS at lunar distances in the literature. The performed feasibility analysis is considered to pave the way for further studies in the field of DGNSS techniques for lunar missions.

Keywords: GNSS Cooperative Positioning, GNSS for lunar orbiters, DGNSS in space, NaviMoon, DGNSS-CP

Sommario

Politecnico di Torino
Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni (DET)
2025

Potenzialità di cooperazione tra utenti GNSS in orbita lunare

Anaïs Delépaut

Con l'avvento e il progressivo consolidamento delle attività rivolte ad una seconda era dell'esplorazione lunare, lo sviluppo di soluzioni di navigazione autonome per veicoli spaziali è diventato essenziale. Gli approcci classici a supporto della radionavigazione in contesti spaziali, basati sulle infrastrutture come il Deep Space Network (DSN) della Nasa o l'Estrack dell'ESA, impongono limiti operativi al potenziale incremento delle missioni, incentivando l'interesse verso il sistema satellitare globale di navigazione (GNSS) come alternativa o in via complementare. Sebbene il GNSS sia stato originariamente progettato per applicazioni terrestri, i progressi dei ricevitori ad alta sensibilità, il supporto multi-costellazione (GPS, Galileo), e il miglioramento nell'elaborazione del segnale hanno permesso il suo utilizzo nelle missioni lunari. Riconoscendone il potenziale, la NASA e l'ESA stanno testando le capacità del GNSS in orbita lunare, attraverso, rispettivamente: il Lunar GNSS Receiver Experiment (LuGRE), in collaborazione con l'Agenzia Spaziale Italiana (ASI); e il progetto NaviMoon. Queste iniziative mirano a provare la fattibilità della riduzione del ricorso alle stazioni terrestri tramite il potenziamento dell'autonomia dei veicoli spaziali, alimentando potenzialmente il numero crescente delle missioni lunari pianificate.

Nonostante tali miglioramenti, e presupponendo inoltre un'elevata sensibilità per la ricezione di segnali deboli, la navigazione basata sul GNSS nello spazio a distanze lunari rimane ostacolata da una geometria sfavorevole dei satelliti osservabili. Le costellazioni GNSS orbitanti la Terra inducono un progressivo aumento della diluizione della precisione (GDOP) all'aumentare della distanza. La precisione di stima della posizione risulta quindi degradata dalla direzione di ricezione dei segnali, che tende a divenire comune a tutti i satelliti visibili. Le sfavorevoli condizioni geometriche sono state affrontate in applicazioni terrestri avvalendosi della collaborazione tra utenti tramite la condivisione di segnali per migliorare le performance di navigazione. Con oltre 400 missioni lunari pianificate nei prossimi decenni, la cooperazione tra veicoli spaziali può rappresentare un approccio promettente per il potenziamento della performance GNSS minimizzando contemporaneamente i costi infrastrutturali.

La tecnica chiamata Differential GNSS (DGNSS) Cooperative Positioning (CP) è stata studiata nelle applicazioni terrestri come nelle reti veicolari e nella robotica per sfruttare la presenza di ricevitori GNSS di rete vicini in qualità di possibili ancore. È vista come una soluzione non invasiva in cui gli utenti beneficiano di un collegamento di rete per condividere misurazioni GNSS al fine di migliorare le performance di posizionamento e navigazione. La combinazione di tali misurazioni permette la stima collaborativa della lunghezza della loro distanza, formando dunque fonti aggiuntive di ranging in prossimità dell'utente di destinazione.

Questa tesi analizza l'utilizzo delle tecniche DGNSS-CP in ambito spaziale. In particolare, ne valuta la fattibilità, nonostante le particolari condizioni geometriche e le elevate dinamiche che distinguono gli scenari spaziali dalle applicazioni terrestri. Lo studio si concentra specificamente sugli utenti GNSS in orbita lunare fornendo indicazioni sulla sostenibilità delle tecniche GNSS collaborative per l'esplorazione lunare, con l'obiettivo di superare la tipica geometria sfavorevole dei segnali GNSS ricevuti a tali altitudini. Nel framework proposto, l'attenzione è rivolta alle tecniche collaborative che, per eseguire misurazioni indirette tra utenti, sfruttano lo scambio di dati comunemente impiegati per la localizzazione basata su GNSS senza la necessità di sensori aggiuntivi.

In tale contesto, la presente tesi si ripropone di indagare il paradigma DGNSS-CP nel volume cislunare secondo un approccio bottom-up. In primo luogo, viene definito un opportuno framework per l'analisi e l'investigazione del ranging basato su GNSS tra ricevitori interconnessi. Successivamente, il paradigma DGNSS-CP viene approfondito mediante simulazioni numeriche in ambienti controllati di orbitanti lunari. Infine, il framework esaminato viene applicato a misurazioni GNSS reali generate da un modello ingegneristico del ricevitore NaviMoon, alimentato da un simulatore di costellazione a radiofrequenza presso il Radio Navigation Laboratory dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA/ESTEC). I parametri di missione dell'European Lunar Pathfinder sono considerati sia nella verifica algoritmica basata su software, sia in una simulazione hardware-in-the-loop.

I risultati mostrano che l'integrazione di informazioni aggiuntive di ranging ottenute tramite DGNSS-CP tra orbitanti lunari può migliorare il GDOP del problema di navigazione GNSS per tali utenti fino a due ordini di grandezza. Inoltre, la presente contribuzione ha permesso di disqualificare soluzioni lineari comunemente adottate negli scenari terrestri per il ranging DGNSS, in quanto introducono bias dell'ordine di chilometri. Sono state quindi proposte soluzioni secondo le quali la matrice di progetto coinvolta nella stima del range inter-utente viene aggiornata, superando l'assunzione di parallelismo. Tali soluzioni consentono di ridurre i bias indesiderati fino a due ordini di grandezza. Il presente lavoro può essere considerato pionieristico nel settore, poiché non sono stati individuati contributi precedenti

sull'utilizzo del DGNSS a distanze lunari nella letteratura scientifica. Si ritiene che l'analisi di fattibilità spiani la strada per ulteriori studi nell'ambito delle tecniche DGNSS applicate a missioni lunari.