

Primi test cinematici con ricevitori GNSS multi-costellazione e dati GALILEO – analisi delle prestazioni

Raffaella Cefalo^(a), Eufemia Tarantino^(b), Antonio Novelli^(b), Tatiana Sluga^(a),
Agostino Tommasi^(a), Alessandro Capra^(c)

^(a) GeoSNav Laboratory, Università degli studi di Trieste, Via Alfonso Valerio 6/1, 34127 Trieste Italy, +390405883585, raffaella.cefalo@dia.units.it, tatiana.sluga@gmail.com, agostino.tommasi@dia.units.it

^(b) AGLab, DICATECh, Politecnico di Bari, Via Orabona 4, 70125 Bari Italy, +390805963417, eufemia.tarantino@poliba.it, antonio.novelli@poliba.it

^(c) Dipartimento di Ingegneria "Enzo Ferrari", Università degli studi di Modena e Reggio Emilia, Via Università 4, 41121 Modena Italy, +390592056188, alessandro.capra@unimore.it

Riassunto

Il 15 dicembre 2016 la Commissione Europea ha annunciato formalmente l'avvio dei Servizi iniziali del Sistema Galileo, il primo passo verso la fase FOC (Full Operational Capability).

Il seguente lavoro presenta i primi risultati di esperimenti cinematici condotti con ricevitori GNSS multi-costellazione con utilizzo di dati della costellazione Galileo. I dati così acquisiti sono stati confrontati con quelli provenienti da un veicolo MMS (Mobile Mapping System) equipaggiato con strumentazione GPS/INS ad alte prestazioni. Al fine di comparare i risultati multi-costellazione è stata simulata una ridotta operatività anche per i sistemi GPS e GLONASS. I risultati ottenuti hanno mostrato la maggiore affidabilità e accuratezza del sistema Galileo.

Abstract

On 15 December 2016 the initial Galileo services became available with a formal announcement by the European Commission. This was the first step toward the Galileo system Full Operational Capability (FOC).

This article shows the results of kinematic tests involving GNSS multi-constellation receivers able to acquire the Galileo Open Service (OS) signal. The acquired data were compared with the outputs of a Mobile Mapping System mounted on a vehicle and implementing integrated high-performance GPS/INS measurements. A reduced operativity was simulated for GPS and GLONASS systems with the aim to compare the results from a multi-constellation point of view. The final results have shown a greater robustness and accuracy of the Galileo system

Introduzione

Il sistema di navigazione satellitare Galileo è il programma di posizionamento/navigazione globale Europeo, progettato per essere completamente interoperabile con gli analoghi sistemi di produzione Americana

(GPS) e Russa (GLONASS). La motivazione principale della messa a punto di Galileo è fornita dalla volontà, dell'Unione Europea, di possedere e fornire un servizio di posizionamento/navigazione indipendente e sotto il controllo civile (http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/Galileo/Why_Europe_needs_Galileo). La costellazione, una volta completata, consisterà di 24 satelliti più due satelliti di riserva per ogni piano orbitale, per un totale di 30 elementi. Nella sua piena operatività, ogni satellite impiegherà 14 ore per completare la sua orbita all'altitudine di progetto di 23.222 Km. Il sistema è concepito per garantire la visibilità di almeno quattro satelliti in ogni punto del globo terrestre grazie alla disposizione dei 24 satelliti su tre piani orbitali inclinati di 56° rispetto all'equatore (European Spatial Agency). Il programma Galileo è costituito da due macro-fasi: In *Orbit Validation* (IOV) e *Full Operational Capability* (FOC). Durante la prima fase il sistema è stato testato preventivamente con due satelliti (GIOVE-A e GIOVE-B) e, in seguito, con una ridotta costellazione di quattro satelliti e le relative "ground infrastructures" con lo scopo di sincronizzare gli orologi atomici a bordo dei satelliti e del periodico aggiornamento delle reali traiettorie (orbite) seguite. La fase FOC consiste nella messa a punto della piena operatività del sistema. Alla data di sottomissione del presente articolo il sistema presenta in orbita già 18 satelliti dei quali 15 pienamente utilizzabili. Il completamento della fase FOC è previsto per l'anno 2020.

Il sistema GALILEO è concepito per erogare differenti servizi. In particolare, il servizio oggetto di analisi nel seguente articolo è rappresentato dall'*Open Service* (OS). Il servizio OS (European Union) è liberamente disponibile e fornisce segnali per applicazioni di sincronizzazione posizionamento. Il servizio è accessibile a qualsiasi utente dotato di un idoneo ricevitore e non richiede autorizzazioni per il suo utilizzo. In particolar modo l'OS fornisce fino a tre frequenze *carrier*: E1 a 1575.42 MHz, E5a ed E5b rispettivamente a 1176.45 MHz e 1207.14MHz. Il primo passo verso la FOC è stato costituito, il 15 dicembre 2016, dall'annuncio formale della Commissione Europa dell'avvio dei servizi iniziali del sistema Galileo.

Scopo di questo articolo è una preliminare comparazione dell'analisi delle performance, in ambito cinematico, del Galileo OS sia nei riguardi delle principali altre costellazioni (GPS e GLONASS) che nei riguardi di una traiettoria determinata mediante un *Mobile Mapping System* (MMS) implementante un sistema *POS/LV* (*Position and Orientation System for Land Vehicles*) prodotto dall'Applanix Corporation. In particolar modo il sistema in oggetto integra misure GNSS con una IMU (*Inertial Measurement Unit*) al fine di garantire una maggiore precisione della singola acquisizione GNSS proprietà di *complementary and surpassing* (Quan et al., 2015)). Le comparazioni riguardano non solo il posizionamento epoca per epoca ma anche le velocità calcolate mediante l'acquisizione del segnale Galileo OS e le velocità fornite dal sistema POS/LV. Sebbene le applicazioni mediante MMS siano già consolidate (Cefalo et al., 2017), i benchmark tra acquisizioni Galileo OS e MMS implementanti IMU ad elevate prestazioni sono ancora rare nel panorama scientifico mondiale e ciò rende innovativo questo contributo.

Area di studio e strumentazione utilizzata

Il test è stato effettuato il giorno 11 luglio 2017 in località Basovizza nel comune di Trieste, lungo la viabilità interna del parco del centro di ricerca Sincrotrone Elettra. La data di esecuzione dei rilievi è stata scelta in base al *planning* di visibilità dei satelliti Galileo, mentre il luogo è stato selezionato nell'ottica di massimizzare la visibilità dei satelliti da parte dei ricevitori. Il centro Sincrotrone Elettra è infatti situato sull'altipiano del Carso, ad un'altitudine media di 375 m s.l.m., con vista libera su tutti i lati; l'unica asperità è rappresentata dal Monte Cocusso (674 m) a 3,5 km in direzione NE. L'esperimento descritto in questo articolo è stato effettuato mediante l'utilizzo del sistema Applanix POS/LV 420 e di un ricevitore multi-costellazione Leica GS14. L'utilizzo del sistema Applanix POS/LV è stato giustificato dall'esigenza di eseguire un confronto con una misura che sia svincolata dai noti problemi di continuità che le strumentazioni GNSS presentano (costellazioni di satelliti non adeguate, *cycle slips*, etc.). Il sistema Applanix POS/LV è montato su un apposito veicolo del Laboratorio GeoSNav (Università degli Studi di Trieste) e si configura come un sistema integrato composto da un ricevitore GPS a doppia frequenza per la determinazione della posizione e da un ricevitore GPS a singola frequenza per l'ausilio nella determinazione della direzione di marcia (*heading*), un sistema inerziale di elevata precisione (comprendente tre giroscopi a fibre ottiche e tre accelerometri) per la determinazione dell'assetto del veicolo ed un odometro (montato sulla ruota posteriore sinistra del veicolo) per la misura delle distanze incrementali. Tra gli oltre 50 campi di dati prodotti dal sistema POS/LV i più importanti sono posizione (latitudine, longitudine e quota ellissoidica), distanza percorsa, assetto del veicolo (angoli di rollio, beccheggio ed imbardata), velocità rispetto all'asse Nord, Est e all'asse z, accelerazioni (nel riferimento del veicolo), velocità angolari, scarti quadratici medi delle misure. In particolar modo i dati di posizione del sistema POS/LV sono stati ottenuti dall'integrazione dei dati posizionali GPS, mediante tecniche di *post-processing* differenziale per garantire deviazioni standard dell'ordine di 10^{-3} m, con i dati inerziali per mezzo di un *Extended Kalman Filter* (La descrizione dei principi di funzionamento del sistema Applanix POS/LV implementato va oltre gli scopi di questo articolo, per ulteriori dettagli si veda https://www.applanix.com/pdf/specs/POSLV_Specifications_dec_2015.pdf).

Le acquisizioni GNSS da comparare con i dati POS/LV sono state ottenute mediante un ricevitore GNSS Leica GS14 (<http://leica-geosystems.com/products/gnss-systems/smart-antennas/leica-viva-gs14>) abilitato all'acquisizione del segnale proveniente dalle costellazioni GPS, GLONASS e Galileo OS. In particolare, il GS14 utilizzato era abilitato all'acquisizione della sola frequenza E1. Tramite ancoraggio magnetico il ricevitore GS14 è stato fissato sul tetto del veicolo MMS e, al fine di ricondurre le misure del sistema POS/LV a quelle del centro di fase del GS14 è stata rilevata, mediante stazione totale, la posizione relativa del GS14 rispetto alla coppia di ricevitori GPS del sistema POS/LV.

Metodo di indagine

I segnali acquisiti con il GS14 sono stati processati mediante il software di calcolo open source RTKLIB (<http://rtklib.com/> An Open Source Program Package for GNSS Positioning). RTKLIB consiste in una serie di librerie, corredate opzionalmente da GUI (*graphical user interface*) che supporta *standard* e *precise positioning* con GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou e SBAS supportando, inoltre, anche varie tecniche di processamento del dato GNSS sia *real-time* che in *post-processing* (*Single, DGPS/DGNSS, Kinematic, Static, Moving-Baseline, Fixed, PPP-Kinematic, PPP-Static* e *PPP-Fixed*).

Tenendo in considerazione il fatto che la fase FOC non ha raggiunto la piena operatività, l'esperimento ha presentato carattere di complessità anche nella semplice ricerca di configurazioni geometriche dei satelliti Galileo ottimali. Per garantire configurazioni accettabili della costellazione Galileo (con almeno 4 satelliti visibili) sono state prese in considerazione le acquisizioni, campionate ad 1 Hz, con GDOP < 6 (Cina, 2014) in modalità singola costellazione (Galileo). I dati considerati utili ai fini delle acquisizioni Galileo sono costituiti da un totale di 600 acquisizioni ad 1 Hz (Figura 1). La Figura 1 mostra il numero di satelliti e il valore del parametro GDOP durante il test per la costellazione Galileo e per le ulteriori analisi svolte.

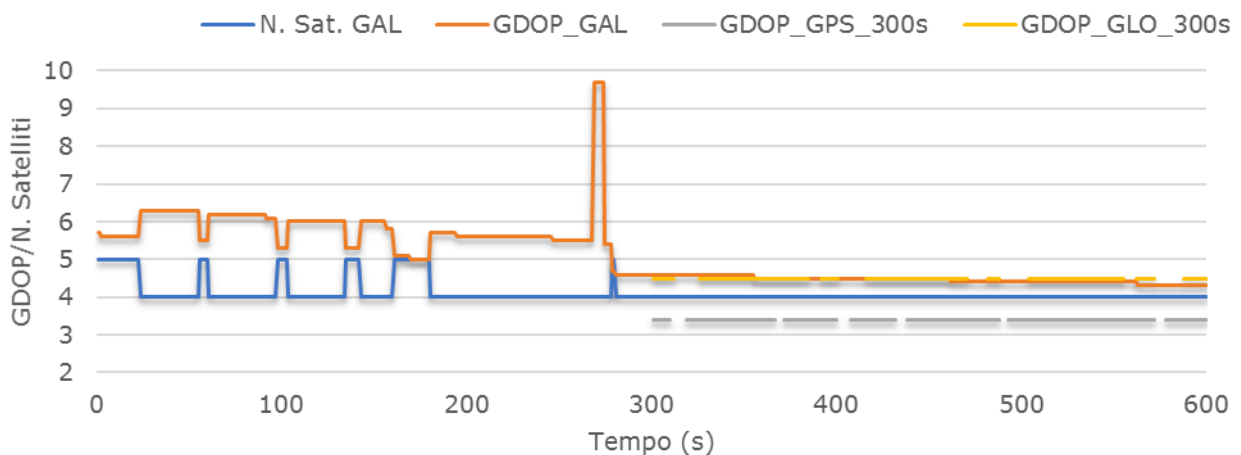


Figura 1 – Numero di satelliti per il sistema Galileo e GDOP per le analisi svolte.

La soluzione è stata ottenuta in modalità stand alone, con cut-off 10° (angoli superiori avrebbero precluso la visibilità dei satelliti Galileo); utilizzando i parametri *broadcasted* di effemeridi, clock e ionosfera e il modello Saastamoinen per quantificare il ritardo troposferico.

Le traiettorie così elaborate – quella di riferimento ottenuta ad alta precisione dal veicolo MMS e quella di test rilevata con singolo ricevitore esclusivamente con costellazione Galileo – sono state confrontate epoca per epoca (frequenza di 1 Hz) sia in planimetria che in altimetria in termini di coordinate e di velocità istantanee. Si tenga presente che i valori ottenuti dal sistema MMS sono sincronizzati con il sistema temporale GPS e che le velocità del GS14 sono state ottenute dal software RTKLIB a partire dalle misure doppler associate al segnale GNSS registrato.

Al fine di comparare i risultati ottenuti con le acquisizioni Galileo, GPS e GLONASS, in termini di scarti rispetto alla traiettoria tracciata dal sistema MMS, sono state individuate, visivamente e considerando solo 4 satelliti per volta, le configurazioni geometriche GPS e GLONASS più simili a quella esibita

dal sistema Galileo (Figura 1 e Figura 2). In questa maniera è stato eseguito un confronto multi-costellazione simulando una ridotta operatività anche per i sistemi GPS e GLONASS. Tali comparazioni sono state effettuate applicando la stessa modalità di calcolo seguita per il sistema Galileo: in singola frequenza, modalità stand alone, cut-off 10° ; effemeridi, clock e ionosfera *broadcasted*; modello Saastamoinen per quantificare il ritardo troposferico. Infine, le comparazioni multi-costellazione sono state effettuate solo per le ultime 300 epoche.

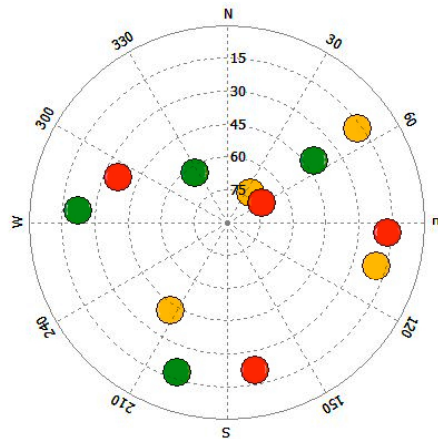


Figura 2 - Skyplot delle costellazioni utilizzate per il confronto: in arancione Galileo, in verde GLONASS e in rosso GPS.

Risultati

Le traiettorie, rilevate ed elaborate con le modalità descritte nel paragrafo precedente, sono state oggetto di analisi e confronto. Poiché la traiettoria acquisita tramite il veicolo MMS è caratterizzata da una precisione di 2 ordini di grandezza superiore a quelle rilevate con il ricevitore GS14 (in modalità stand-alone), essa è stata assunta come traiettoria riferimento.

Il confronto epoca per epoca delle coordinate rilevate con il GS14, utilizzando unicamente i satelliti Galileo, è stato eseguito per tutti i 600 s di rilievo cinematico ed ha dato come risultato uno scostamento medio pari a 1,72 m in planimetria e 2,22 m in altimetria. In Figura 3 le due traiettorie sono rappresentate graficamente su piattaforma Google Earth, mentre in Figura 4 vengono plottati gli scostamenti tra le due traiettorie per ogni epoca di rilievo cinematico.

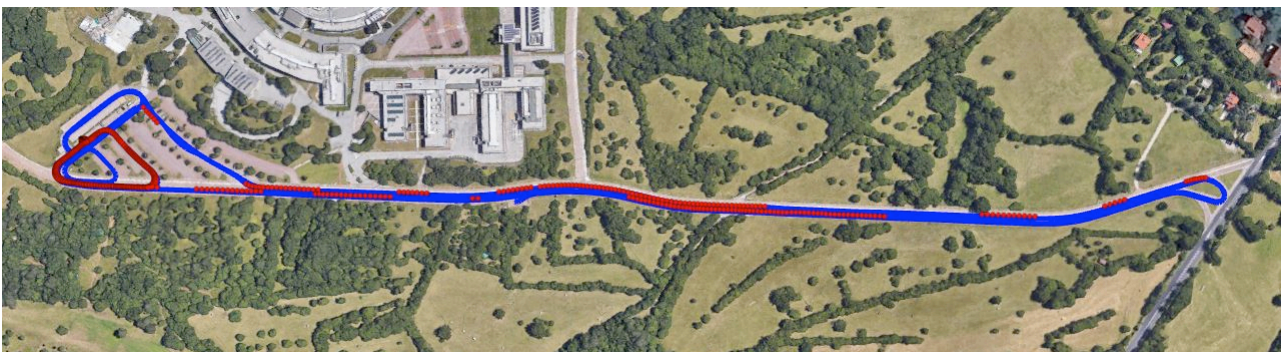


Figura 3 – Rappresentazione della traiettoria MMS (blu) e Galileo (rosso) su Google Earth.

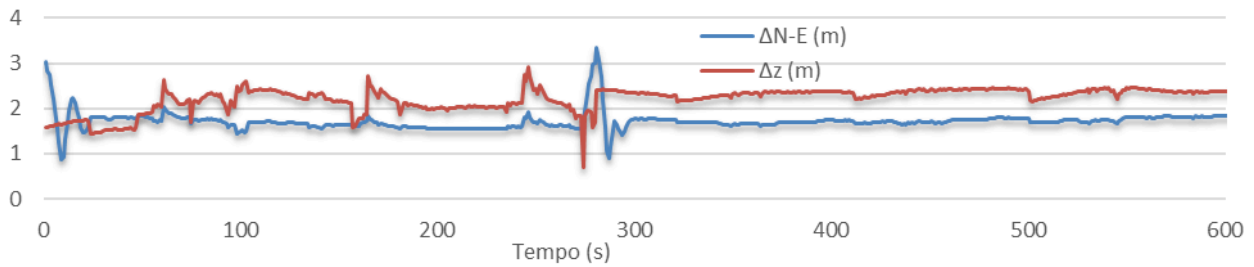


Figura 4 – Confronto epoca per epoca degli scostamenti tra la traiettoria del veicolo MMS e quella del GS14 in modalità Galileo.

Per queste due traiettorie è stata eseguita un'ulteriore comparazione calcolando la differenza, epoca per epoca, tra le rispettive velocità istantanee (tempo di campionamento 1s). La media dei valori assoluti di queste differenze tra velocità istantanee è risultata di $0,10 \text{ ms}^{-1}$ in planimetria e $0,12 \text{ ms}^{-1}$ in altimetria. In Figura 5 sono visualizzati i valori di velocità registrati dalle due strumentazioni nel periodo di riferimento, mentre in Figura 6 vengono plottati gli scostamenti tra le due velocità per ogni epoca di rilievo cinematico. A livello qualitativo è possibile notare come il dato Galileo sia più rumoroso (componente in alte frequenze) rispetto al dato MMS.

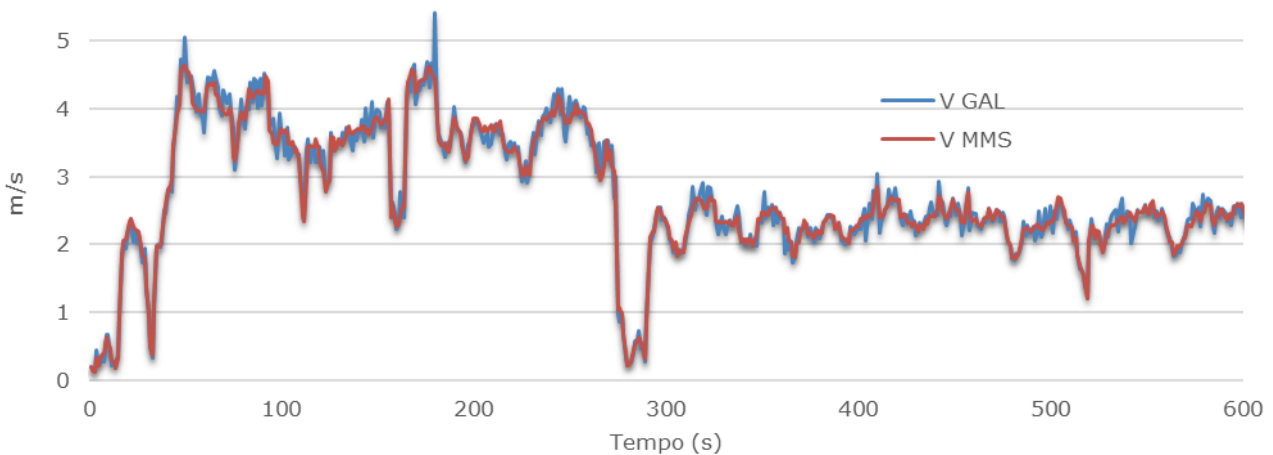


Figura 5 – Andamento temporale delle velocità istantanee rilevate con veicolo MMS e ricevitore GS14 in modalità Galileo.

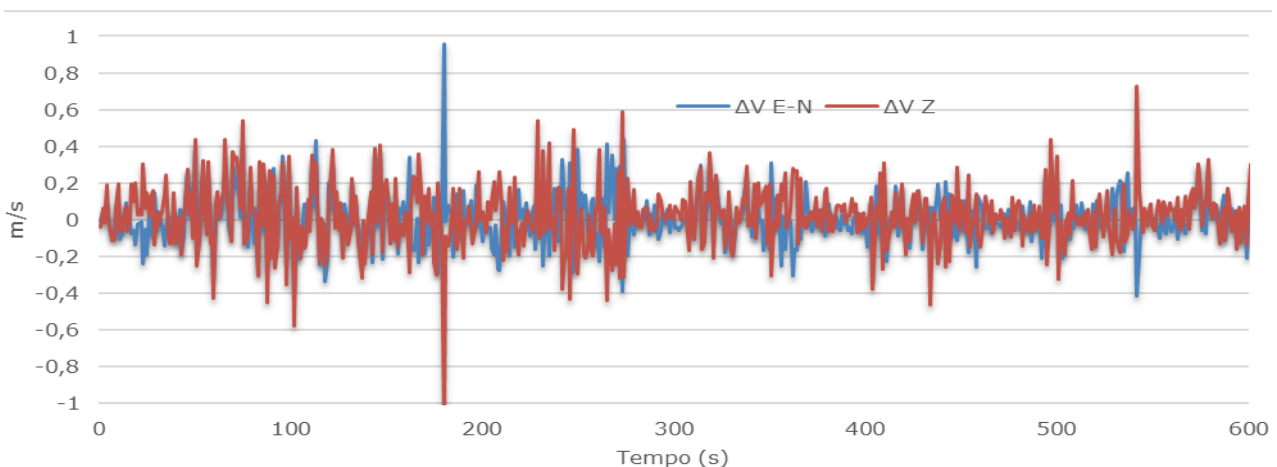


Figura 6 - Confronto epoca per epoca degli scostamenti tra le velocità istantanee rilevate con

veicolo MMS e GS14 in modalità Galileo.

Infine, si è proceduto ad effettuare un confronto, per le ultime 300 epoche acquisite, tra la traiettoria rilevata con la costellazione Galileo e quelle calcolate utilizzando unicamente le costellazioni GLONASS e GPS, adeguatamente selezionate per equipararne le geometrie satellitari e dunque le condizioni operative (si veda il precedente paragrafo e la Figura 2). Anche in questo caso la traiettoria ottenuta con veicolo MMS è stata presa come riferimento assoluto.

La comparazione degli scarti (differenza tra le coordinate rilevate dal ricevitore GS14 e quelle rilevate dal veicolo MMS) ha dato i risultati che vengono presentati di seguito, in Figura 7 per quanto riguarda la planimetria e in Figura 8 per l'altimetria. Le medie e gli scarti quadratici medi sono riassunte in Tabella 1.

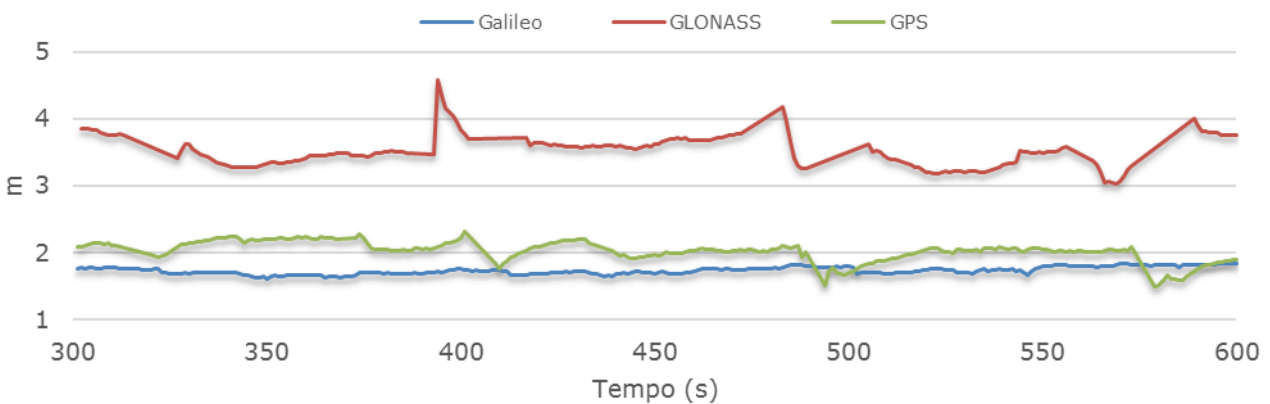


Figura 7 - Scarto planimetrico (m) dei risultati ottenuti solo con le costellazioni Galileo, GLONASS o GPS.

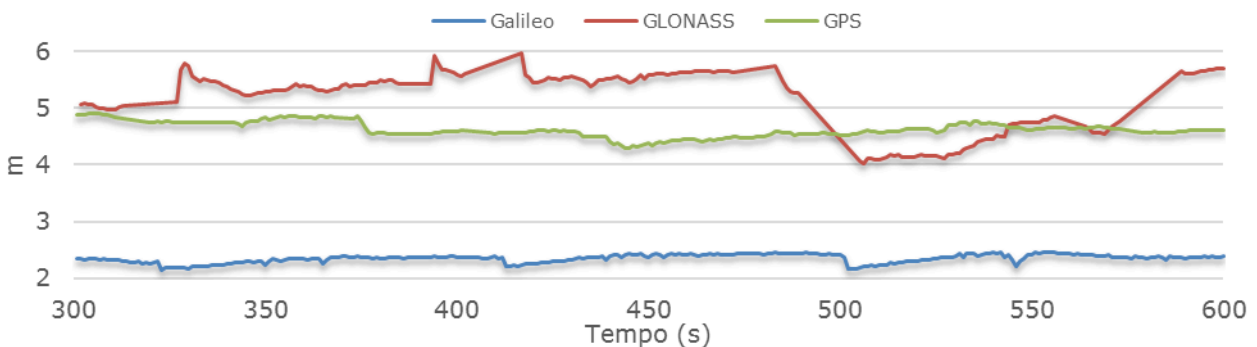


Figura 8 - Scarto altimetrico (m) dei risultati ottenuti solo con le costellazioni Galileo, GLONASS o GPS.

È possibile notare come, per le geometrie selezionate la prestazione del sistema Galileo sia migliore rispetto a quelle delle principali costellazioni. Ciò è particolarmente importante se si considera che la più simile configurazione GPS con 4 satelliti ha prodotto GDOP sempre inferiori rispetto a quelli rilevati con Galileo.

		Galileo	GPS	GLONASS
Scarto planimetrico	Media [m]	1.73	3.52	2.02
	Scarto quadratico medio [m]	0.05	0.24	0.15
Scarto altimetrico	Media [m]	2.35	5.16	4.62
	Scarto quadratico medio [m]	0.07	0.53	0.13

Tabella 1 – Medie e scarti quadratici medi per gli scarti planimetrici e altimetrici calcolati per le differenti costellazioni nei riguardi del dato MMS.

Infine, dall'analisi degli scarti risulta evidente come tra le tre configurazioni di satelliti selezionate il sistema Galileo risulti essere il più performante sia in termini di comparabilità con il sistema MMS (valore medio) che in termini di stabilità della soluzione (scarto quadratico medio).

Conclusioni

Lo scopo di questo articolo è stato una preliminare comparazione, in ambito cinematico, del Galileo OS sia nei riguardi delle principali altre costellazioni (GPS e GLONASS) che nei riguardi di una traiettoria determinata mediante un MMS implementante un sistema *POS/LV* prodotto dall'Applanix Corporation. I confronti mostrati sono stati eseguiti epoca per epoca nei riguardi della posizione e nei riguardi delle velocità calcolate usando il sistema MMS come riferimento in quanto più accurato. Al fine di produrre un confronto quanto più veritiero tra Galileo e gli altri principali sistemi di posizionamento è stata simulata una ridotta fase di operatività anche per le costellazioni GPS e GLONASS. Sebbene tale simulazione sia stata fatta individuando visivamente delle configurazioni simili, i risultati prodotti hanno evidenziato una superiorità prestazionale del sistema Galileo. Tale risultato risulta evidente soprattutto a livello altimetrico.

Futuri sviluppi saranno mirati al confronto dei risultati ottenuti con le tre costellazioni mediante tecniche di *post-processing* differenziale e ad un'analisi dei risultati più rigorosa.

Bibliografia

Cefalo, R., Grandi, G., Roberti, R., Sluga, T. (2017). "Extraction of Road Geometric Parameters from High Resolution Remote Sensing Images Validated by GNSS/INS Geodetic Techniques", in: Computational Science and Its Applications – ICCSA 2017. Springer International Publishing, Cham, pp. 181–195. doi:10.1007/978-3-319-62401-3_14

Cina, A. (2014). Dal GPS al GNSS (Global Navigation Satellite System): per la geomatica. Celid, Torino.

European Spatial Agency, Fact Sheet, url: <http://esamultimedia.esa.int/docs/galileo/GalileoFactsheet2017.pdf>

European Union, European GNSS (Galileo) initial Service, open service service definition document. url: https://www.gsc-europa.eu/system/files/galileo_documents/Galileo-OS-SDD.pdf

Quan, W., Li, J., Gong, X., Fang, J., 2015. INS/CNS/GNSS Integrated Navigation Technology. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. doi:10.1007/978-3-662-45159-5