

Traiettografia GNSS multicostellazione per applicazioni di gravimetria da aereo

Marco Osmo (*), Massimiliano Chersich (*), Davide Curone (*), Mirko Reguzzoni (**),
Daniele Sampietro (***), Massimiliano Tomassetti (****)

(*) Galileian Plus s.r.l., c/o EUCENTRE, via Ferrata 1, 27100 Pavia, 0382-524482, mosmo@galileianplus.it,
mchersich@galileianplus.it, dcurone@galileianplus.it;

(**) DICA, Politecnico di Milano, Piazza Leonardo da Vinci 32, 20133 Milano, mirko.reguzzoni@polimi.it;
(***) GReD s.r.l., Via Valleggio 11, 22100 Como, Italy, daniele.sampietro@g-red.eu;

(****) Galileian Plus s.r.l., Via V. Galati 87, 00155 Roma, 06-86325154, mtomassetti@galileianplus.it.

Riassunto

GAL – GALileo for gravity¹ (<http://www.gal-project.eu/>) è un progetto di ricerca della durata di ventiquattro mesi che vede attivo un consorzio composto da sette *partner* europei tra enti di ricerca e piccole e medie imprese tra cui Galileian Plus come capofila. Il progetto è finalizzato al miglioramento dello stato dell'arte nella determinazione della gravità terrestre su scala locale in termini di accuratezza e di risoluzione spaziale. La soluzione proposta si avvale di tecniche di gravimetria da aereo mediante osservazioni GNSS (GPS, Galileo ed EGNOS) e dati accelerometrici e dell'integrazione dei modelli locali con modelli globali ottenuti dalla missione satellitare GOCE.

Il presente lavoro illustra in particolare la metodologia utilizzata e i risultati ottenuti nell'attività di validazione del *software* di *Precise Point Positioning* (PPP) GNSS multicostellazione sviluppato da Galileian Plus. Sono illustrati due elementi di novità: il primo consiste in una più stretta integrazione tra i risultati del posizionamento GNSS con i dati accelerometrici nel calcolo delle anomalie gravitazionali locali; il secondo è la fusione tra osservabili GPS e osservabili (simulate) Galileo in un unico *batch* di dati per la stima cinematica della posizione dell'antenna del ricevitore. Le attività di validazione condotte sono state finalizzate alla valutazione dell'incremento di prestazioni ottenibili in modalità multicostellazione rispetto alle prestazioni ottenute con l'utilizzo del solo GPS.

Abstract

GAL – GALileo for gravity² (<http://www.gal-project.eu/>) is a 24-month project carried out by a consortium of seven European partners among research institutions and small and medium enterprises, including Galileian Plus as prime contractor. The goal of the project is the improvement of state of art in the determination of Earth gravity on a local scale in terms of accuracy and space resolution. The proposed solution makes use of kinematic airborne gravimetry by means of GNSS (GPS, Galileo and EGNOS) and accelerometers data and of integration between local models and global models obtained with GOCE satellite. The present paper illustrates in particular the methodology and results obtained during validation of the GNSS *Precise Point Positioning* (PPP) software developed by Galileian Plus. Two innovation elements have been pointed out: the first is related to a tighter integration between GNSS and accelerometer data for the local gravitational anomaly estimation; the second is the GPS and (simulated) Galileo data fusion into a unique batch for the kinematic estimation of the receiver's antenna position. The validation activities have been focused on the evaluation of the performances obtained in a multi-constellation mode respect to the performances obtained using GPS alone.

¹ Le ricerche che hanno condotto ai risultati presentati hanno ricevuto fondi dal programma quadro dell'Unione Europea (FP7/2007-2013), contratto n° FP7-287193.

² The research leading to these results has received funding from the European Union Framework Programme (FP7/2007-2013) under grant agreement n° FP7-287193.

Introduzione

L'obiettivo di GAL (GALileo for gravity), un progetto della durata di 24 mesi co-finanziato dalla Agenzia Europea GNSS (European GNSS Agency - GSA) che vede attivo un consorzio di 7 *partner* europei tra enti di ricerca, piccole e medie imprese tra cui Galileian Plus (GPLUS) come capofila, è quello di studiare, progettare e sviluppare una metodologia innovativa per rendere la Gravimetria Cinematica da Aereomobile (KAG, *Kinematic Airborne Gravimetry*) una tecnica operativa. In particolare si intende usare questa tecnica in aree senza infrastrutture di terra (stazioni permanenti) e renderla in grado di stimare anomalie gravitazionali con accuratezze di 1 mGal in una scala spaziale di pochi chilometri e quindi adattarla a diversi tipi di applicazioni, da quelle scientifiche (oceanografia, terra solida, geodinamica, determinazione orbitale, cambiamenti climatici), a quelle istituzionali (valutazione/mitigazione del rischio sismico, vulcanico, frane) e commerciali (prospezione mineraria, ingegneria civile).

Per raggiungere tale obiettivo GAL si propone di sviluppare e validare *software* prototipali che fanno dell'integrazione di diverse tecniche e dell'utilizzo delle più avanzate tecnologie l'aspetto più rilevante e di novità. In particolare, per quanto concerne l'integrazione, questa è presente a tre livelli: integrazione dei dati accelerometrici provenienti dai dispositivi inerziali (INS) con dati GNSS per la ricostruzione dell'anomalia di gravità locale; integrazione tra modelli globali di gravità da satellite (in particolare GOCE) con le misure locali di gravimetria *airborne*; integrazione delle osservabili provenienti da sistemi satellitari differenti (GPS, Galileo ed EGNOS) per la ricostruzione della traiettoria precisa dell'aereomobile.

Quest'ultimo livello di integrazione in particolare è stato realizzato con lo sviluppo di un *software* (d'ora in poi "SW GNSS") che fondendo osservabili GPS e Galileo in un unico *batch* di dati, fornisce l'informazione di traiettoria e la stima gli errori in gioco (ritardi e *bias*). L'*output* del *software* è stato specificamente progettato per essere utilizzato all'interno della procedura di stima "*Closely Coupled Approach*" implementata all'interno del *software* "NAVEGA", messa a punto dal *partner* "Consorci Institut de Geomàtica" di Castelldefels (Barcellona, Spagna), nel seguito indicato con IG.

Metodologia di ricostruzione della traiettoria precisa multicostellazione

Il progetto GAL, nella parte di elaborazione dati GNSS in modalità cinematica, si concentra sulla valutazione della capacità di Galileo nel migliorare le prestazioni attuali di gravimetria da aereo. Il SW GNSS rappresenta il sottosistema dal quale inizia la catena di elaborazione necessaria alla stima accurata delle anomalie di gravità. L'obiettivo principale nello sviluppo del SW GNSS è stato quello di ottenere una soluzione a bassa rumorosità, ottimizzando l'accuratezza della stima degli spostamenti del velivolo tra un'epoca e quella successiva. Lo spettro degli effetti modellati in maniera approssimata (vedi ad esempio i ritardi atmosferici) ha una componente predominante a bassa frequenza, essendo essi ben correlati nello spazio e nel tempo. Questa caratteristica consente la loro mitigazione nella differenza di posizione tra una stima e l'altra. La ripetibilità della stima di posizione quindi è il fattore chiave per centrare gli obiettivi prestazionali del progetto mentre l'accuratezza gioca un ruolo secondario.

I requisiti prestazionali del SW GNSS sono stati ereditati dal requisito primario di poter stimare anomalie di gravità con una accuratezza dell'ordine di 1mGal al chilometro e sono:

1. accuratezza stima posizione: 50 cm [1];
2. precisione stima posizione (RMS): 5 cm, [2].

Questi requisiti sono validi nel caso di una stima ottenuta utilizzando contemporaneamente osservabili GPS e Galileo, mentre, in linea di principio, possono essere peggiori nel caso di utilizzo di sole osservabili GPS.

Per accuratezza e precisione valgono le definizioni che seguono. Sia P_k la posizione dell'antenna ottenuta dal SW GNSS all'epoca t_k e sia Q_k una soluzione di riferimento alla stessa epoca. Costruiti i residui:

$$\alpha_k = P_k - Q_k, \quad [3]$$

per accuratezza intenderemo la media aritmetica $\langle \alpha \rangle$, mentre per precisione la deviazione standard, ovvero la radice quadrata dello scarto quadratico medio: $\sqrt{\langle (\alpha_k - \langle \alpha \rangle)^2 \rangle}$.

Il prototipo che GPLUS ha sviluppato nell'ambito del progetto GAL per la ricostruzione della traiettoria precisa di un aeromobile utilizza soltanto i dati GNSS raccolti da un ricevitore geodetico di bordo e i prodotti precisi distribuiti da IGS per applicazioni geodetiche.

La scelta della strategia di stima in post-processamento, che utilizzi tecniche di *Precise Point Positioning* (PPP), è stata il frutto di lunghe sessioni di progettazione e di scelta della miglior strategia algoritmica avvenute tra GPLUS, Politecnico di Milano e IG. Per una recente rassegna dello stato dell'arte del PPP si rimanda a (Martin et al., 2012). Gli elementi di novità introdotti nello sviluppo del SW GNSS derivano dalla opportunità che si è creata con il progetto GAL di sviluppare un *software* (per ora solo prototipale) per un utilizzo specifico in ambito di gravimetria da aereo, mirando a costruire degli *output* funzionali mirati ad una più stretta integrazione tra dati GNSS e INS (*Inertial Navigation System*) ed in particolare al metodo "*Closely Coupled Approach*" sviluppato da IG. Questo approccio non prevede di impiegare direttamente la traiettoria stimata dai dati GNSS ma le osservazioni GNSS, i modelli impiegati per la mitigazione degli effetti (quali ad esempio quelli atmosferici), tutti i *bias* costanti e gli errori variabili a ogni epoca (come il ritardo dell'orologio del ricevitore).

I passi con cui il SW GNSS produce gli *output* richiesti sono i seguenti:

1. Acquisizione input: vengono acquisiti i RINEX di osservazione, i dati EGNOS per i parametri ionosferici, le effemeridi, i parametri di orientamento della Terra, gli *offset* degli orologi dei satelliti campionati a 5 secondi, le griglie di parametri troposferici per l'utilizzo della Vienna Mapping Function (Bohem et al., 2006), i modelli di antenna per la rimozione della variazione di posizione del centro di fase dell'antenna (PCV) e i file contenenti la stima dei *bias* elettronici dei satelliti;
2. Elaborazione dati: l'algoritmo di PPP stima per raffinamenti successivi la traiettoria attraverso:
 - a. Utilizzo dell'algoritmo di Bancroft (Bancroft, 1985) per trovare le posizioni iniziali epoca per epoca;
 - b. Stima approssimata delle posizioni e dell'*offset* dell'orologio del ricevitore attraverso una combinazione *ionospheric-free* delle osservazioni di codice in un unico *batch* di dati;
 - c. Analisi e identificazione dei *cycle-slips* di fase con conseguente determinazione del numero di ambiguità iniziali da stimare come numeri reali;
 - d. Raffinamento della traiettoria mediante differenze di fase tra satelliti in vista simultanea alla medesima epoca nella combinazione *ionospheric-free* in un unico *batch* di dati. Questo permette di stimare le posizioni a ogni epoca e le ambiguità iniziali (singolo differenziate) eliminando dal modello di stima tutti i ritardi imputabili al solo ricevitore (*bias* elettronici e *offset* dell'orologio);
 - e. Ricalcolo della distanza geometrica satellite-ricevitore per tutti i satelliti a tutte le epoche e sua rimozione dalle equazioni di osservazione GNSS;
 - f. Stima, in ogni arco ad ambiguità costante, di tutti i restanti *bias* ed errori attraverso l'algoritmo di Euler-Goad esteso anche alle tre frequenze (de Lacy et al., 2008), suddividendo gli errori (ritardi) e i *bias* in tre categorie: ritardo non-dispersivo, ritardo dispersivo e *bias* costanti.
3. Produzione *output*: tutte le osservazioni GNSS, insieme a tutte la quantità calcolate da modello o stimate epoca per epoca o stimate come costanti su ogni satellite vengono scritte in un file che costituisce l'interfaccia tra il SW GNSS e il *software* NAVEGA per il calcolo dell'anomalia di gravità locale.

Il SW GNSS utilizza al suo interno modelli allo stato dell'arte per la rimozione dell'eccentricità d'antenna dei satelliti e del ricevitore, del *wind-up* e dei ritardi atmosferici. Molti dei modelli implementati sono stati mutuati dal *software* di elaborazione dati GNSS per applicazioni scientifiche NDA Professional (Fermi, 2010), già sviluppato e commercializzato da GPLUS. Il SW GNSS implementa stimatori ai minimi quadrati *batch* e non fa uso quindi di stimatori sequenziali. Nel caso si utilizzino dati multicostellazione, il SW GNSS provvede all'armonizzazione dei sistemi di riferimento temporali GPS e Galileo attraverso la stima del parametro GGTO (*GPS-Galileo Time Offset*) (Vanschoenbeek, 2007).

Data set utilizzati per la validazione

I risultati della validazione del SW GNSS sono stati ottenuti utilizzando sia dati reali che dati simulati.

La simulazione dei dati è stata affidata ad uno dei partner di progetto, Deimos Engenharia (Lisbona, Portogallo). Attraverso il simulatore GRANADA sono stati generati dati GNSS simulati nei seguenti scenari:

- a. punto fermo (statico): due ore di dati campionati a 1 Hz. Le coordinate del punto utilizzate per la simulazione sono state fornite insieme ai dati;
- b. punto in moto uniforme (cinematico): due ore di dati campionati a 1 Hz che simulano un punto che si muove lungo l'equatore verso Est a una velocità costante di 30 m/s. La traiettoria impiegata per la simulazione è stata fornita insieme ai dati.

Per ogni scenario sono stati prodotti dati GNSS generati in quattro condizioni differenti:

- condizioni ideali (no *bias*, no ritardi);
- solo rumore termico;
- rumore termico + ritardo di *clock* del ricevitore;
- dati simulati in condizione “quasi realistica” (rumore termico + ritardo di *clock* del ricevitore + errore orbitale + *outliers* e *cycle-slips*).

I primi tre gruppi di dati sono serviti per escludere possibili malfunzionamenti del *software*, mentre l'ultimo è stato utilizzato per generare una stima approssimativa del miglioramento atteso utilizzando soluzioni multicostellazione rispetto a quelle ottenute con il solo GPS. Insieme ai file RINEX di osservazione Deimos Engenharia ha prodotto anche le effemeridi precise dei satelliti in formato ‘*sp3c*’.

Oltre ai dati simulati sono stati impiegati anche dati GPS reali provenienti da:

- a. stazioni permanenti IGS: oltre ai RINEX di osservazione, sono state utilizzate le coordinate precise della stazione e altri prodotti quali gli orologi dei satelliti stimati ogni 5 secondi e i ritardi troposferici zenitali ottenuti ogni 2 ore;
- b. acquisizioni cinematiche da aereo.

I dati da aereo sono stati forniti da IG e sono stati acquisiti da un ricevitore GPS a due frequenze di classe geodetica montato a bordo di un aeromobile durante due voli di test svolti nella regione della Catalogna, regione scelta per la presenza pregressa di dati gravimetrici a terra. Insieme alle osservazioni GNSS in formato RINEX 2.11 IG ha fornito anche le traiettorie di riferimento ottenute con il *software* commerciale Waypoint Inertial Explorer³ e calcolate in modalità relativa attraverso l'utilizzo di una rete di stazioni permanenti di terra di supporto.

Strategia di validazione

Oltre alla valutazione delle prestazioni del SW GNSS rispetto ai requisiti di riferimento, le attività di validazione hanno consentito di effettuare una quantificazione preliminare del miglioramento che la fusione di dati GPS e Galileo porta in termini di accuratezza e precisione nella stima della posizione.

In dettaglio, la strategia di validazione del SW GNSS è riassunta nei seguenti 3 punti:

³<http://www.novatel.com/products/software/inertial-explorer/>

1. Valutazione dell'accuratezza e della precisione ottenibili processando:
 - a. Dati GPS a due frequenze reali;
 - b. Dati GPS a due frequenze simulati in condizione "quasi realistica" descritta sopra;
 - c. Dati Galileo e GPS a tre frequenze simulati in condizione "quasi realistica" descritta sopra;

Per il punto a) i dati sono stati acquisiti sia da stazioni permanenti IGS che sul volo di test descritto al paragrafo precedente e simulati (ai punti b) e c)) nelle stesse condizioni, utilizzando rispettivamente le coordinate IGS e la traiettoria di riferimento fornita da IG;

2. Calcolo di fattori di scala cosiddetti di "affidabilità del simulatore" ottenuti dal rapporto di accuratezze e precisioni ottenute al punto b) rispetto a quelle ottenute nel punto a). Questo fattore di scala rappresenta una stima del livello di efficienza con il quale il simulatore è in grado di generare osservabili GNSS "realistiche";
3. Calcolo di accuratezza e precisione del SW GNSS con i dati al punto c), opportunamente riscaliati per i corrispondenti fattori di "affidabilità del simulatore" calcolati al punto 2. Questi valori rappresentano una stima approssimata dell'accuratezza e della precisione attese processando dati GNSS reali multicostellazione. Questo risultato è stato confrontato con i requisiti di precisione e accuratezza generali riportati in [1] e [2].

Risultati numerici e prestazioni del SW GNSS

Le attività di validazione del SW GNSS sono iniziate al momento della prima stesura di questo articolo. La temporanea mancanza di dati Galileo che simulano il volo di test effettuato nel corso del progetto GAL ha limitato la descrizione contenuta nel presente articolo ai risultati ottenuti su stazioni permanenti IGS constringendo gli autori a rimandare una trattazione più esaustiva a pubblicazioni successive.

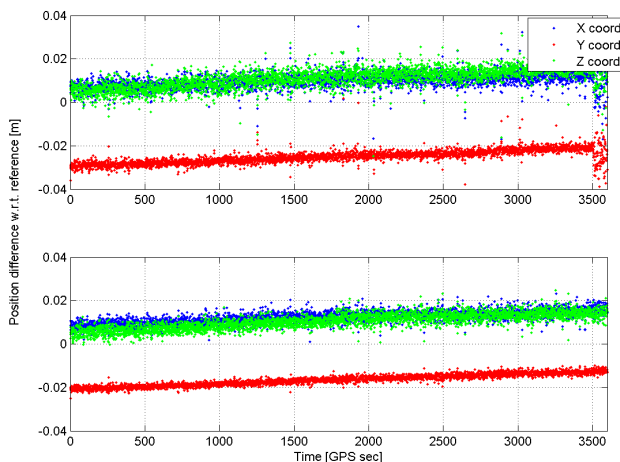


Figura 1. Residui della stima delle coordinate cartesiane di un punto fermo utilizzando dati GNSS simulati e in condizione "quasi realistica".

In Figura 1 sono mostrati i residui α_k [3] espressi in metri della stima delle coordinate cartesiane di un punto fermo ottenute dal SW GNSS processando in modalità cinematica dati GNSS simulati nello scenario statico e in condizione "quasi realistica". Nella parte superiore di Figura 1 sono mostrati i residui ottenuti della stima delle coordinate cartesiane processando solo dati GPS. L'accuratezza del modulo dei residui è 2.98 cm, mentre la sua precisione ammonta a 0.34 cm. Nella parte inferiore sono mostrati i residui ottenuti processando dati multicostellazione (GPS + Galileo). L'accuratezza del modulo risulta 2.35 cm, e la sua precisione 0.24 cm.

Quello che può apparire in Figura 1 come un *drift* di circa 1cm ogni ora nella stima delle coordinate cartesiane è imputabile all'errore orbitale sulla posizione dei satelliti, errore che ammonta a 2.5cm di ampiezza ed è generato, per ogni satellite, da una distribuzione uniforme e mantenuto costante per tutta la durata della simulazione. Una marcatura dei residui di questo tipo non è presente quando si processano i dati GNSS simulati nelle altre tre condizioni descritte nella Sezione precedente ma appare solo quando si introduce l'errore orbitale.

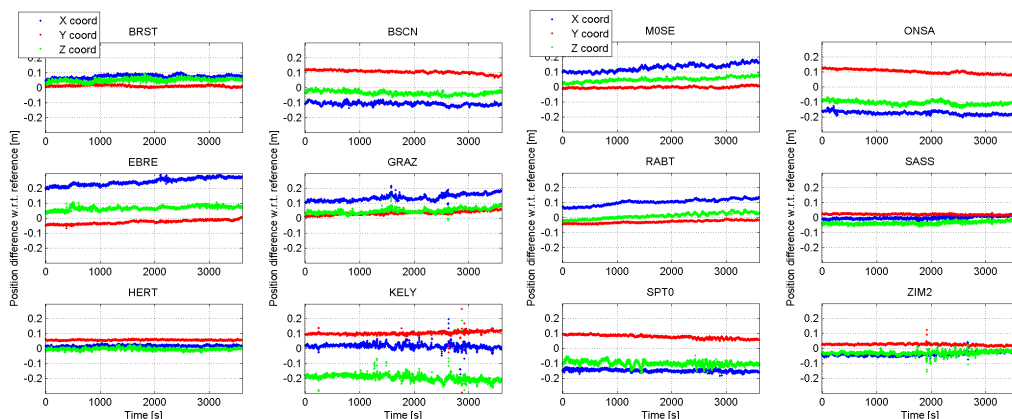


Figura 2. Come in Figura 1 nel caso di dati GPS reali da stazioni permanenti IGS.

In Figura 2 sono mostrati le analoghe distribuzioni dei residui della stima ottenuta con il SW GNSS in modalità cinematica delle coordinate cartesiane di stazioni permanenti IGS (solo GPS).

La tabella che segue riporta le precisioni e le accuratze del modulo delle coordinate cartesiane stimate per le stazioni permanenti IGS scelte per la validazione. Tutti i valori ottenuti dimostrano che, nel caso di dati statici (processati in modalità cinematica), il SW GNSS è in grado di soddisfare i requisiti di precisione e accuratezza enunciati in [1] e [2] anche utilizzando il solo sistema satellitare GPS.

Dati GPS reali da stazioni permanenti IGS	Accuratezza		Precisione (RMS)	
	Output [cm]	PASS/FAIL	Output [cm]	PASS/FAIL
BRST	9.32	PASS	1.21	PASS
BSCN	15.64	PASS	1.06	PASS
EBRE	25.60	PASS	1.21	PASS
GRAZ	15.07	PASS	1.70	PASS
HERT	6.11	PASS	0.26	PASS
KELY	22.28	PASS	1.88	PASS
MOSE	13.86	PASS	1.63	PASS
ONSA	23.06	PASS	1.13	PASS
RABT	10.97	PASS	1.07	PASS
SASS	4.21	PASS	0.59	PASS
SPT0	19.69	PASS	1.06	PASS
ZIM2	5.53	PASS	1.20	PASS
Media:	14.28		1.17	
Peggior valore:	25.60		1.88	

Tabella 3. Riassunto delle prestazioni del SW GNSS processando, in modalità cinematica, dati GPS reali acquisiti da stazioni permanenti IGS. Su stazioni permanenti IGS i requisiti di precisione ed accuratezza in [1] e [2] sono stati rispettati utilizzando solo osservabili GPS a 2 frequenze.

Utilizzando i risultati medi di accuratezza e di precisione mostrati in grassetto nella Tabella 3 e gli analoghi risultati ottenuti nel caso di processamento di dati GNSS simulati, è possibile produrre una prima stima preliminare del miglioramento che l'introduzione del sistema Galileo si prevede possa apportare in termini di precisione e accuratezza. Tale stima è mostrata evidenziata in verde nella Tabella 4 che segue.

Stima del miglioramento con l'introduzione di Galileo	GPS reali	GPS simulato	GPS + Galileo simulato	GPS + Galileo previsione
Accuratezza (cm)	14.28	2.98	2.35	11.26 (target 50.0)
Precisione (cm)	1.17	0.34	0.24	0.83 (target 5.0)
Affidabilità del simulatore (Accuratezza)	0.2087			
Affidabilità del simulatore (Precisione)	0.2906			
Miglioramento in accuratezza (%)	23.6			
Miglioramento in precisione (%)	34.5			

Tabella 4. Stima preliminare, attualmente limitata al solo caso statico e al modulo delle coordinate cartesiane, del miglioramento che l'introduzione del sistema satellitare Galileo porterà in termini di accuratezza e precisione nella stima della posizione.

Come si evince il miglioramento atteso dall'utilizzo in modalità multicostellazione rispetto a quella di utilizzo del solo GPS è del 20% nell'accuratezza e del 30% nella precisione della misura.

Va fatto notare che, utilizzando i dati acquisiti in volo, ci si attende, in generale, un sensibile peggioramento dell'accuratezza e della precisione assolute in quanto, a differenza dei dati GNSS statici acquisiti da stazioni permanenti IGS, l'antenna del ricevitore in volo si trova in un ambiente più esposto a effetti di *multipath*, e dove, in generale, è più frequente la perdita dell'aggancio dei satelliti con il conseguente peggioramento complessivo della qualità del dato raccolto. Da un primo esame dei dati cinematici ricevuti è realistico ipotizzare un peggioramento di un fattore due rispetto ai risultati mostrati che, in ogni caso, rimarrebbero sempre nei limiti dei requisiti obiettivo in [1] e [2].

Conclusioni

Il progetto GAL – GALileo for gravity è un progetto di 24 mesi, iniziato a Febbraio 2012 e co-finanziato dalla European GNSS Agency (GSA), che è recentemente entrato nella fase di validazione. Il progetto mira allo sviluppo di nuove e innovative metodologie per la stima delle anomalie di gravità su scala locale basate su dati GNSS e INS acquisiti da aereo e alla valutazione del potenziale miglioramento che il sistema satellitare Galileo porterà in termini di accuratezza e precisione. Sono stati illustrati i principali risultati ottenuti dal *software*, al momento ottenuti solo su dati da stazioni IGS permanenti, a causa della temporanea mancanza di dati simulati del volo di test effettuato. Gli autori hanno messo a punto e illustrato un'approccio per la valutazione numerica approssimativa del miglioramento che ci si aspetta l'introduzione di Galileo potrà porterà nella stima della traiettoria dell'aereo. I risultati numerici ottenuti su dati da stazioni permanenti IGS mostrano che il SW GNSS soddisfa appieno i requisiti di progetto. E' in corso la fase di validazione con dati acquisiti durante il volo di test: nonostante ci si aspetti un peggioramento sostanziale delle

prestazioni ottenibili, alcuni risultati preliminari confermano in ogni caso la capacità del *software* di ottenere risultati in linea con requisiti di progetto.

Il progetto GAL ha offerto l'opportunità di sviluppare uno strumento per l'elaborazione di dati GNSS multicostellazione con caratteristiche specifiche per essere utilizzato in applicazioni nel campo della gravimetria da aereo. L'esperienza maturata nel corso del progetto si rifletterà in raccomandazioni sui ricevitori da impiegare, sulle modalità di realizzazione della raccolta dati e sull'ottimizzazione degli algoritmi realizzati in questa prima fase di ricerca e sviluppo, allo scopo di migliorare le prestazioni complessive del *software* e con l'obiettivo finale di far evolvere l'attuale prototipo in un prodotto funzionale ad un sistema di gravimetria da aereo pienamente operativo.

Riferimenti bibliografici

- Bancroft S. (1985), "An Algebraic Solution of the GPS Equations", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. AES-21: 56–59.
- Boehm J., Werl B. and Schuh H. (2006), "Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data", J. Geophys. Res., 111, B02406.
- de Lacy Pérez de los Cobos M.C., Gil A. J., Rodríguez Caderot G. and Moreno B. (2008), "A method to estimate the Ionospheric bias by using the new GNSS frequencies: an analysis of its theoretical accuracy in a PPP context", Física de la Tierra. Vol. 20, pp. 133-150.
- Fermi M., Caldera S., Chersich M. and Osmo M. (2010), "*Validazione del software NDA Professional per la compensazione di reti di stazioni permanenti GNSS*", Atti 14^a Conferenza Nazionale ASITA, 9 – 12 novembre 2010, Fiera di Brescia.
- Martin A., Anquela A. B., Berné J. L. and Sanmartín M. (2012), "Kinematic GNSS-PPP results from various software packages and raw data configuration", Scientific Research and Essays, Vol. 7(3), pp. 419-431.
- Vanschoenbeek I., Bonhoure B., Boschetti M. and Legenne J. (2007), "GNSS Time Offset Effect on GPS - Galileo Interoperability Performance", Inside GNSS magazine, Sept/Oct 2007.