

Prospettive del Sistema Satellitare Galileo nel Monitoraggio Geofisico: il Progetto GEOLOCALNET

Massimiliano CHERSICH(*), Maria C. DE LACY(**), Stefano FALZINI (***), Marco FERMI (*), Antonio J. GIL(**), Marco OSMO(*), Roberto SABADINI(****), Bojan STOPAR(*****), Aljosa ŽERIAL(*****)

(*) Galileian Plus S.r.l., Via Tiburtina 755, 00159, Roma, Tel. +39 (0)6 40696500 Fax +39 (0)6 40696276, mchersich@galileianplus.it, mfermi@galileianplus.it, mosmo@galileianplus.it

(**) Università di Jaen, Campus Las Lagunillas s/n 23071 Jaén, Spain, Tel. +34 953212467 Fax +34 953212854, ajgil@ujaen.es, mclacy@ujaen.es

(***) Space Engineering S.p.A., Via del Berio 91, 00155 Roma, Tel. +39 (0)6 225951 Fax +39 (0)6 2280739, stefano.falzini@space.it

(****) Università di Milano, Via Mangiagalli 34, 20133 Milano, Tel. +39 (0)2 503154936 Fax +39 (0)2 50315494, roberto.sabadini@unimi.it

(*****) University of Ljubljana, Jamova 2, 1000 Ljubljana, Slovenia, Tel. +386 (0)1 4768500 Fax: +386 (0)1 4250704, bstopar@fgg.uni-lj.si

(*****) Harpha Sea, Čevljarska 8, 6000 Koper, Slovenia, Tel. +386 (0)5 6260327, Fax 386 (0)5 6271529, cale@harphasea.si

Riassunto: Il monitoraggio continuo della crosta terrestre utilizzando reti di ricevitori GNSS (*Global Navigation Satellite System*) su scala locale richiede adeguati strumenti informatici e computazionali. Per applicazioni quali la mitigazione del rischio sismico e il monitoraggio di subsidenza e frane è richiesta la più alta accuratezza impiegando sessioni di misura più corte possibile. Il progetto GEOLOCALNET si propone di indagare le capacità di posizionamento basate sul segnale a tre frequenze del sistema Galileo sviluppando e validando un prototipo software contenente nuove e innovative procedure di stima, algoritmi e lo stato dell'arte dei modelli al fine di soddisfare i requisiti richiesti.

Abstract: Earth crust deformation continuous monitoring using GNSS local geodetic networks demands suitable computational and informatics tools. Applications like seismic hazard, subsidence or landslides monitoring requires the highest accuracy in positioning with as short as possible measurements sessions length. The GEOLOCALNET project investigates the three carriers based Galileo Satellite System positioning capability developing and validating innovative estimation procedures, algorithms and using the most efficient models with the purpose to fulfil these requirements.

Introduzione:

I sistemi satellitari, come GPS e GLONASS, sono stati usati per anni per il monitoraggio di costruzioni quali ponti, palazzi e dighe, e per applicazioni geofisiche che comprendono la misura del moto della crosta terrestre, il monitoraggio della subsidenza del suolo e l'attività vulcanica. La modernizzazione dei GNSS, basata sulla trasmissione di segnali su tre portanti, offre l'opportunità di migliorare l'efficienza del posizionamento riducendo il tempo necessario per raggiungere la massima precisione ottenibile.

Scopo principale del progetto GEOLOCALNET è l'utilizzo del sistema Galileo per migliorare l'accuratezza nel posizionamento differenziale sviluppando un opportuno strumento computazionale per processare le tre osservazioni di fase e per promuovere l'impiego delle reti locali di ricevitori geodetici per il monitoraggio della deformazione della crosta terrestre.

Il progetto GEOLOCALNET, il suo scopo, le sue applicazioni:

GEOLOCALNET è un progetto della durata di un anno, co-finanziato dal Galileo Joint Undertaking (GJU) con l'intento di utilizzare le nuove caratteristiche offerte dal sistema satellitare Galileo. Le attività, iniziate alla fine del 2005, termineranno alla fine del 2006.

Fanno parte del consorzio che lavora a questo progetto tanto *Research Units* (RUs) che *Small and Medium Enterprises* (SMEs) dell'Unione Europea. Capofila di GEOLOCALNET è Galileian Plus S.r.l., una SME italiana. Gli altri partner sono Space Engineering (SME italiana), Harpa Sea (SME slovena), l'Università di Ljubljana (RU slovena), l'Università di Milano (RU italiana) e l'Università di Jaen (RU spagnola). Il curriculum dei partners garantisce sia una solida competenza scientifica che le necessarie capacità informatiche e di sviluppo di strumenti computazionali idonei per raggiungere con successo gli obiettivi prefissi, e cioè sviluppare e validare algoritmi innovativi, modelli e procedure per migliorare l'accuratezza nel posizionamento differenziale utilizzando il sistema Galileo, e promuovere l'uso di reti geodetiche locali (scala tipica $20 \times 20 \text{ km}^2$) per l'analisi della deformazione della crosta terrestre con alta precisione.

La deformazione locale è misurata attraverso stime ripetute delle componenti del vettore linea di base tra una coppia di marcatori fissi. Queste reti di ricevitori hanno lo scopo di monitorare le deformazioni dovute, per esempio, a moti sismici, frane e subsidenza del suolo.

Tra i fenomeni di deformazione dovuti ad eventi geofisici la sismicità richiede la massima precisione e velocità di aggiornamento delle stime dei parametri dinamici.

Il monitoraggio della deformazione utilizzando misure GNSS, integrate con studi sismologici e modelli geofisici, è diventato di grande importanza per evidenziare siti sensibili a possibili terremoti di una certa intensità (Ambrosius et al., 2003; Basili et al., 2001; Gardi et al., 2003). Questi risultati sono ottenuti applicando algoritmi di predizione dei terremoti e a modelli di *Geophysical Forward Modelling* (GFM) che trasferiscono il tensore degli sforzi superficiali, ottenuto dall'analisi GNSS, nel tensore degli sforzi profondo a livello della faglia sismogenetica.

Obiettivo dei modelli GFM è quello di derivare le mappe del rischio sismico alle quali sono attualmente associate incertezze spaziali dell'ordine delle centinaia di chilometri e temporali di qualche anno. Gli ordini di grandezza di queste incertezze non permettono un efficace e tempestivo servizio di allerta per proteggere la popolazione. La chiave per ridurre le sistematicità di tempo e spazio associate alla previsione di un evento sismico è data dalla sinergia dei modelli GFM e le stime dei parametri dinamici basate sulle misure GNSS.

Un requisito essenziale per un efficiente aggiornamento delle mappe di rischio sismico scaturisce direttamente facendo osservare che durante le fasi post-sismica e inter-sismica i moti relativi tipici che attraversano la faglia mediterranea sono dell'ordine dei millimetri per anno, invece che dei centimetri per anno, come nel caso della faglia californiana. E' di conseguenza possibile stabilire che, al fine di risolvere i segnali pre-sismici sulla superficie della Terra nella area sismogenetica mediterranea, è necessario andare oltre le prestazioni offerte dall'attuale sistema GPS, con il quale peraltro si sono già raggiunte risoluzioni di circa un millimetro all'anno sulla componente orizzontale e di 2-3 millimetri su quella verticale. Queste accuratezze sono state ottenute durante studi delle fasi post-sismiche mediterranee, su linee di base di pochi chilometri. Al fine di risolvere le deformazioni attese della crosta terrestre, e in particolare la possibile accelerazione del tasso di deformazione sulla zona di faglia durante l'ultimo stadio della fase pre-sismica, è necessario, raggiungere precisioni sulla velocità di deformazione dell'ordine di 0.3-0.5 mm/anno sulla componente orizzontale e 0.5-1.0 mm/anno sulla componente verticale. Inoltre queste stime di velocità devono essere aggiornate con cadenza al più settimanale.

Questi requisiti costituiscono la frontiera per un supporto efficace alla Protezione Civile nella gestione delle emergenze.

Un prototipo di processamento dati Galileo:

Il progetto GEOLocalNET si concentra sullo sviluppo di uno strumento prototipale di processamento in modalità Near Real Time (NRT) di dati Galileo, finalizzata alla riduzione delle incertezze di tempo e spazio nel monitoraggio geodinamico e realizzare perciò un passo preliminare verso un più rapido e raffinato aggiornamento delle mappe di rischio sismico.

Il progetto non richiede lo sviluppo di un nuovo strumento software ma il riutilizzo di un prodotto interamente sviluppato da Galileian Plus e chiamato Network Deformation Analysis (NDA). NDA (Chersich et al., 2002) è basato su tecniche di processamento dati GNSS (a due frequenze) allo stato dell'arte ed è stato progettato per reti di scala locale e continentale. NDA esegue la compensazione della singola linea di base usando, a scelta dell'utente, la singola frequenza (L1) o la combinazione ionosferic-free (L3) doppio differenziate.

Al momento della scrittura di questo articolo il progetto è entrato nell'ultimo quarto della sua durata. I primi sei mesi di attività sono stati dedicati alla definizione dei requisiti, all'analisi del funzionamento dello strumento *Galileo Satellite Simulation Facility* (GSSF), il prodotto dell'Agenzia Spaziale Europea con cui è possibile simulare i dati di osservazione e le effemeridi Galileo e GPS a due frequenze, alle attività preliminari di implementazione (acquisizione del formato RINEX 3.0, aggiornamento degli algoritmi di individuazione di outliers e cycle slips e stima preliminare delle ambiguità float iniziali utilizzando tre frequenze) e all'elaborazione della strategia di processamento dati Galileo per la compensazione della singola linea di base.

La strategia computazionale del prototipo ottenuto a seguito dell'aggiornamento di NDA ha inizio con un pre-processamento dei dati delle due stazioni che costituiscono la linea di base.

Il pre-processamento inizia con l'acquisizione dei dati di input (osservazioni, effemeridi, informazioni ancillari), la rimozione di epoche con osservazioni incomplete, l'applicazione della maschera di elevazione, la stima dell'orologio del ricevitore, il riconoscimento e la correzione di *outliers* e *cycle slips*, il computo di quantità quali la posizione dei satelliti all'istante di emissione, la distanza geometrica, la valutazione dei ritardi atmosferici e la sincronizzazione delle osservazioni. A questo livello è stato implementato un aggiornamento alle tre frequenze (De Lacy, in press) dell'algoritmo di Euler-Goad (Euler, 1991) proposto originariamente per le due frequenze.

In seguito viene eseguita una stima iterativa ai minimi quadrati dei dati, pesandoli opportunamente e doppio differenziandoli. Per linee di base di lunghezza superiore a pochi chilometri, dove i ritardi atmosferici non possono essere considerati di modo comune, è consigliabile servirsi dell'approccio multifrequenza che si basa sul processamento delle combinazioni lineari di fase Extended Wide Lane e Wide Lane, prima di utilizzare la combinazione *ionospheric-free* (IF) che rimuove il residuo del ritardo ionosferico al primo ordine. Si è scelto di non usare la combinazione che rimuove il ritardo ionosferico al secondo ordine perchè è risultata troppo rumorosa. Delle molte combinazioni di fase IF che è possibile costruire con tre frequenze, la scelta è caduta su quella che ha il minimo rumore intrinseco associato.

Validazione del progetto

Al momento di scrivere questo articolo, è in corso la fase di validazione del progetto che richiede l'utilizzo di dati reali GPS provenienti da ricevitori di stazioni permanenti situati in Slovenia, e i corrispondenti dati simulati con GSSF, sia GPS che Galileo.

Due metodologie di test saranno adottate.

Test di ripetibilità: usando quattro linee di base di diversa lunghezza (zero, qualche centinaio di metri, circa dieci chilometri e circa 30 chilometri) e sessioni di misura di diversa durata (da una soluzione giornaliera a soluzioni orarie), estesi su una finestra temporale di 10 giorni consecutivi e campionati a 15 secondi, verranno raccolti e processati tre diversi insiemi di dati.

I dati simulati Galileo sono usati per verificare la capacità del prototipo sviluppato di produrre stime delle linee di base con accuratezza di un millimetro usando sessioni di misura progressivamente più corte, mentre i corrispondenti dati GPS reali e simulati verranno processati per verificare la capacità del GSSF di riprodurre situazioni verosimili.

La deviazione standard del campione di stime ottenute sarà interpretato come il più piccolo spostamento che il prototipo è in grado di apprezzare tra una sessione di misura e l'altra.

Test di prestazione NRT: simulare i dati Galileo presuppone la conoscenza della posizione dei ricevitori e la loro variazione nel tempo e il solo modo per produrre delle misure con i due sistemi satellitari senza usare delle coordinate stimate con il GPS è conoscere le coordinate della linea di base usando un dispositivo indipendente. Per questa ragione la validazione del prototipo di funzionamento in modalità NRT viene affrontata utilizzando un meccanismo mobile, realizzato da Harpha Sea, su cui è montata un'antenna GPS. Il meccanismo, alimentato da un motore mosso in accordo a una legge oraria nota, permette di conoscere la posizione dell'antenna a una data epoca entro il margine d'errore submillimetrico del meccanismo. Si effettueranno prove differenti volte a mettere in luce il tempo necessario per risolvere con i dati Galileo lo spostamento noto a priori della posizione dell'antenna.

Risultati preliminari

Ai fini di *debug*, sono state processate due ore di osservazioni simulate dalla costellazione Galileo per due ricevitori PRO1 e PRO2. Le osservazioni sono state campionate a 15 secondi e non sono state corrotte dal rumore dei ricevitori o da multipath, ovvero le osservazioni sono state generate in condizioni ideali di funzionamento. La Tabella 1 mostra le coordinate a-priori dei due ricevitori utilizzate per la simulazione dei dati RINEX.

	X (m)	Y (m)	Z (m)	Module (m)
PRO1	4562839.3221	1040349.2812	4320428.0735	-
PRO2	4556822.0410	1070672.8784	4320758.4559	-
Baseline	-6017.2811	30323.5972	330.3824	30916.6196

Tabella 1: Coordinate ITRF2000 a-priori di due ricevitori GALILEO e le componenti della linea di base PRO2-PRO1.

Le opzioni di processamento usate sono state le seguenti:

- effemeridi precise Galileo generate in formato .sp3 'c' ;
- l'osservabile IF è stata usata;
- stima del residuo zenitale di ritardo troposferico applicata;
- ritardo ionosferico è stato computato con il modello di Klobuchar (Klobuchar, 1987) usando i coefficienti stimati da CODE;
- ritardo troposferico modellato con il modello di Saastamoinen zenitale (Saastamoinen, 1973) proiettato con le funzioni di mappatura di Niell (Niell, 1996);
- determinazione dell'ambiguità attraverso il metodo LAMBDA (Teunissen, 1993).

Le differenze ottenute tra le stime e i valori "veri" delle componenti della linea di base (mostrati nella terza riga della Tabella 1) sono le seguenti:

Δ Mod. (m)	Δ X (m)	Δ Y (m)	Δ Z (m)	Data amount
0.0011784	0.0012440	0.0014350	0.0016793	1 hour
0.0010074	0.0010882	0.0012324	0.0014434	2 hours

Tabella 2: differenza tra valori stimati e valori a-priori delle componenti della linea di base PRO2-PRO1. La lunghezza della sessione di misura impiegata è mostrata nella quarta colonna.

La Tabella 2 mostra uno scostamento dell'ordine del millimetro dai valori usati per generare i dati di effemeridi e osservazione.

Conclusioni

Il progetto GEOLOCALNET, co-finanziato da GJU, impegna un consorzio di RUs e SMEs dell'Unione Europea.

L'obiettivo del progetto è quello di utilizzare al meglio le nuove caratteristiche offerte dal sistema satellitare Galileo per il posizionamento differenziale di alta precisione su scala locale, avendo come applicazione di riferimento il monitoraggio geodinamico. L'aggiornamento delle mappe di rischio sismico richiede dati di posizionamento molto accurati (dell'ordine del millimetro) in tempi più rapidi di quelli ottenibili con gli attuali sistemi. Per questo motivo, il processamento dei dati Galileo, ottenuto mediante l'aggiornamento di un software preesistente sviluppato da Galileian Plus S.r.l, capofila del progetto, viene effettuato in modalità NRT.

Le competenze scientifiche, computazionali e informatiche dei partner coinvolti hanno permesso di relizzare un prototipo di software che presenta procedure di stima e algoritmi innovativi e l'utilizzo dello stato dell'arte dei modelli al fine di soddisfare i requisiti richiesti. Al momento di scrivere il presente articolo il progetto si trova nella fase di validazione.

Bibliografia:

- Ambrosius, B.A.C., Aoudia K., Barzaghi R., Borghi A., Panza G.F., Riva R., Sabadini R., and Vermeersen L.L.A., Postseismic deformation following the 1997 Umbria-Marche (Italy) moderate normal faulting earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, 30(7), 1390, doi:10.1029/2002GL016339, 2003;
- Basili R. and Meghraoui M., Coseismic and postseismic displacements related with the 1997 earthquake sequence in Umbria-Marche (central Italy), *Geophys. Res. Lett.*, 28, 2,695-2,698, 2001;
- Chersich M., De Giovanni A., Osmo M. (2002), NDA: un tool italiano per il processamento automatico di dati da reti GPS permanenti, *Atti della 6a Conferenza Nazionale ASITA*, Perugia, Novembre 2003, pagg. 769-774.
- De Lacy M. C., Gil A. J., Rodríguez-Caderot G., (in press). The Effect of Modernized GPS and Galileo in the theoretical Limits of the Precise Point Positioning (PPP).
- Gardi A., Jimènez-Munt I., and Sabadini R., Active deformation in the Mediterranean from Gibraltar to Anatolia inferred from numerical modelling and geodetic and seismological data, *J. Geophys. Res.*, 108, NO.B1, 2006, doi: 10.1029/2001JB001544, 2003;
- Euler H.J. and Goad C.C., On optimal filtering of GPS dual frequency observations without using Orbit Information, *Bulletin Geodesique* 65, pp 130-143, 1991;
- Niell A.E., Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelength, *J. Geophys. Res.*, 100 3227-3246, 1996.
- Klobuchar J.A., Ionospheric time delay algorithm for single-frequency GPS users, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System*, Vol. AES-23, No.3, pp. 325-331, 1987.
- Saastamoinen J., Contribution to theory of atmospheric refractions, *Bulletin Geodesique*, n. 105-107, pagg. 279-298; 383-397; 13-34, 1973.
- Teunissen P.J.G, Least square estimation of the integer GPS ambiguities, Invited lecture, Section IV Theory and Methodology, IAG General Meeting, Beijing, China, August 8-13, also in Delft Geodetic Computing Centre LGR series, No. 6, 16 pp, 1993.

