

CARATTERIZZAZIONE STOCASTICA DELLE SERIE TEMPORALI DI COORDINATE DELLE STAZIONI PERMANENTI GPS TRAMITE ANALISI SPETTRALE E FILTRO DI WIENER

Mattia CRESPI, Susanna IANNELLI, Giovanni REINA

DITS - Area di Geodesia e Geomatica, Università di Roma "La Sapienza"
via Eudossiana, 18 – 00184 Roma - tel. ++39-0644585097 - fax ++39-0644585515
E-mail mattia.crespi@uniroma1.it, s.iannelli@libero.it, giovanni.reina@uniroma1.it

Riassunto

È ben noto che le stazioni permanenti GNSS permettono di stimare le serie storiche delle loro coordinate che vengono usate sia per il mantenimento del sistema di riferimento che per indagini geodinamiche. Per queste applicazioni è essenziale applicare le tecniche più raffinate per l'elaborazione dei dati ed associare alle stime delle coordinate quelle delle loro matrici di covarianza.

Malgrado alcuni Autori ammettano la presenza di correlazioni temporali nelle serie storiche di coordinate GPS di soluzioni giornaliere e settimanali, queste sono di solito ignorate nelle elaborazioni ordinarie dei dati. Ciò conduce a possibili bias nelle stime delle coordinate ed a sottostimare le matrici di covarianza.

Il lavoro, proseguendo le attività di indagine già avviate da alcuni anni, intende proporre una metodologia di caratterizzazione stocastica sufficientemente semplice da poter essere implementata in un programma di calcolo in MATLAB e, contemporaneamente, concettualmente rigorosa, basata sull'analisi spettrale delle serie di coordinate e sul loro successivo filtraggio in frequenza tramite un filtro di Wiener.

Il metodo è applicato a serie storiche settimanali di coordinate IGB00 lunghe 6 anni relative a 9 stazioni permanenti IGS presenti in Europa.

Abstract

It is pretty well known that GNSS permanent stations provide reliable coordinate time series that are used both for maintaining the geodetic reference frame and for geodynamical investigations.

In these applications, a careful data processing must be accomplished to ensure high quality standard in the estimates both of coordinates and site velocities with their covariance matrices. Even if some authors pointed out the existence of temporal correlations in GPS coordinates time series of the daily and weekly solutions, these correlations are usually disregarded in the routinely data processing. This leads to possible biases in the estimates and to unreliable values of their precisions. A different approach has been proposed to get more refined estimates which is based on the spectral analysis of the time series and their Wiener filtering. The method has been applied to the IGB00 6 years long weekly time series coordinates of 9 IGS permanent stations in Europe.

Introduzione

È ben noto che, la definizione di un sistema di riferimento consiste in un insieme di regole idonee ad individuare univocamente la posizione di un punto in un prefissato ambito dimensionale, mentre per la sua materializzazione (o realizzazione) si introduce un elenco di posizioni e di velocità stimate da un opportuno insieme di misure e riferite ad una assegnata epoca.

Attualmente la materializzazione dei SR si basa su tecniche di geodesia spaziale (GPS, GLONASS, SLR, VLBI, DORIS) e consiste nella determinazione di posizioni e velocità dei siti (stazioni permanenti) nei quali sono installate le apparecchiature che consentono di usare tali tecniche.

Conseguentemente il modello di stima delle coordinate e delle velocità delle stazioni permanenti (con le rispettive precisioni) è di fondamentale importanza sia per realizzare e mantenere un sistema di riferimento che per dedurre interpretazioni geodinamiche.

Le soluzioni settimanali, attualmente inquadrare nel sistema di riferimento IGB00, hanno precisioni formali poco realistiche, poiché le matrici di covarianza dei parametri stimati delle SP IGS (in qualunque SR) non sono rappresentative della dispersione delle coordinate in quanto sono ignorate le cause di errore di natura sistematica. Infatti, è ben noto da tempo che le serie temporali di coordinate delle stazioni permanenti GPS presentano comportamenti stocastici (presenza di correlazioni, potenza del rumore) affatto evidenziati dalle più che ottimistiche precisioni formali riportate, ad esempio (relativamente alle soluzioni settimanali), nei file SINEX disponibili in ambito IGS. Questa notevole discrasia tra comportamenti reali e precisioni formali ostacola, da un lato, la corretta materializzazione del sistema di riferimento tramite le stazioni permanenti GPS, in quanto impedisce di definire correttamente il livello di precisione al quale la suddetta materializzazione può essere effettuata; dall'altro, la corretta valutazione della significatività statistica delle eventuali variazioni spurie di coordinate, ad esempio dovute a fenomeni locali (ciò è particolarmente cruciale nella fase di avviamento di nuove stazioni permanenti).

Analisi preliminare

Le stazioni permanenti della rete permanente EUREF consegnano con frequenza giornaliera i file delle osservazioni GPS in formato RINEX (Receiver Independent Exchange Format) ai centri di raccolta dati, regionali e locali. Quindi, dalla compensazione delle osservazioni giornaliere (file RINEX di 24 ore), vengono calcolate le soluzioni settimanali, con produzione di file settimanali in formato internazionale SINEX (Solution (Software/technique) INdependent EXchange Format) contenenti coordinate delle stazioni permanenti e relative matrici di covarianza.

Per lo scarico dei file SINEX si è utilizzato il programma NetDownload v. 1.7, che ha permesso l'estrazione dei file di coordinate settimanali nel formato Bernese e la produzione dei file delle serie temporali di coordinate cartesiane geocentriche IGB00 delle stazioni permanenti GPS di interesse per l'area italiana; in particolare sono state scelte le stazioni di Cagliari, Genova, Grasse, Graz, Matera, Medicina, Noto, Padova e Zimmerwald, nel periodo compreso tra marzo del 1998 fino a settembre del 2005.

Inoltre per eliminare il trend lineare si è usata la funzione FASTLTS che esegue la regressione ai minimi quadrati troncata (LTS), un metodo robusto nel senso che la regressione stimata idonea non è influenzata dagli outliers eventualmente presenti nei dati, che, grazie a questa robustezza, si possono individuare in base ai loro residui LTS. L'analisi preliminare delle serie storiche è consistita nella trasformazione delle coordinate da cartesiane geocentriche (X, Y, Z) a locali (Est, Nord, Up) e nel prefiltraggio delle serie storiche ovvero rimozione del trend con metodo LTS (figura 1).

Analisi spettrale

Si sono considerate le serie storiche nel periodo compreso tra dicembre del 2001 fino a settembre del 2005 delle stazioni permanenti GPS di interesse per l'area italiana, in particolare le stazioni di Cagliari, Genova, Grasse, Graz, Matera Medicina, Noto, Padova e Zimmerwald.

Vengono introdotti ed applicati alle serie storiche diversi metodi di stima spettrale tra cui il metodo del periodogramma, il metodo di Bartlett, il metodo delle finestre ed il metodo di Blackman – Tukey, il metodo di Welch, ed infine descritto e applicato un metodo, combinazione degli altri, ritenuto più idoneo al caso oggetto di studio.

In sintesi, per ridurre la varianza della stima, come suggerito dal metodo di Bartlett si è seguita la strategia di operare su stime indipendenti opportunamente modificate, secondo il metodo di Welch, al fine di aumentarne la risoluzione spettrale. Al posto della parziale sovrapposizione di tutti i sottoblocchi di analisi (per avere più periodogrammi da mediare) si è scelto di sovrapporre parzialmente i segmenti solo al fine di non lasciare dati inutilizzati; ovvero la sovrapposizione si è

applicata, quando necessaria, solo alle ultime due finestre. Come suggerito da Welch la finestra $w(n)$ di Bartlett è stata applicata direttamente sulle sottosequenze dei dati, prima del calcolo del periodogramma, quindi si sono calcolati 4 periodogrammi modificati.

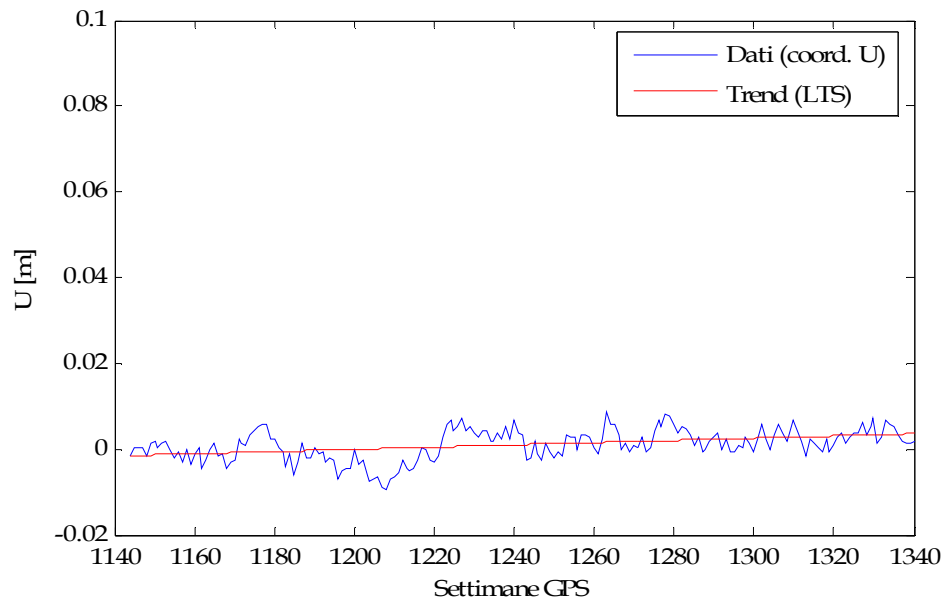


Figura 1- Serie storica (dalla settimana GPS 1144 alla settimana GPS 1340) della coordinata U della stazione di Matera e trend di primo ordine (lineare LTS)

Infine, la stima dello spettro di potenza delle serie storiche è stata determinata calcolando la mediana dei 4 periodogrammi, in modo da ottenere una stima robusta.

I risultati ottenuti applicando tale metodologia alle serie di coordinate settimanali IGb00 (trasformate in coordinate Est, Nord, Up) delle stazioni hanno mostrato una sostanziale costanza della struttura spettrale delle serie. Si sottolinea che, dal punto di vista spettrale, le stazioni si assomigliano, presentando tutte un picco in corrispondenza delle basse frequenze (periodicità annuale) ed una potenza del segnale sostanzialmente concentrata entro periodi di circa 10 settimane (frequenza max di circa 0.1 1/settimana) (figura 2).

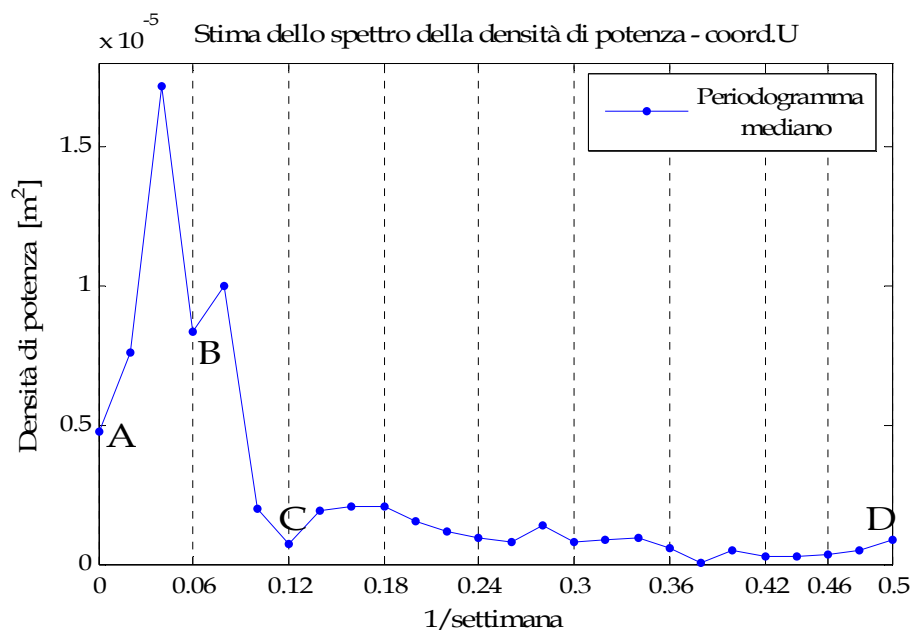


Figura 2 - Periodogramma mediano della coordinata U della stazione di Matera

Filtraggio con filtro di Wiener

Il comportamento spettrale simile delle serie storiche di differenti stazioni (Graz, Matera, Medicina, Noto e Zimmerwald) in uno stesso intervallo temporale (dalla settimana GPS 1143 alla settimana GPS 1340), ha permesso di definire un primo criterio di costruzione del filtro molto semplice e quindi certamente suscettibile di miglioramenti ma, al contempo, sufficientemente efficace. In questa fase si è implementato il filtro di Wiener (figura 3) (modellizzando opportunamente il periodogramma), si è sottratto al segnale osservato il segnale filtrato (figura 4) ed infine si è estratto il rumore residuo (figura 5).

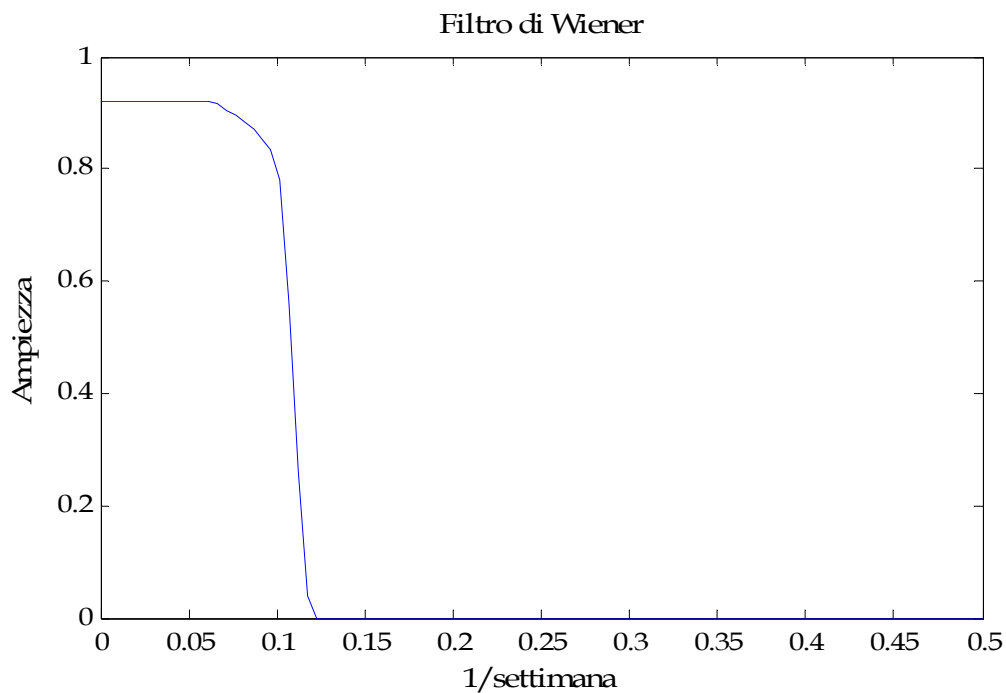


Figura 3- Filtro di Wiener

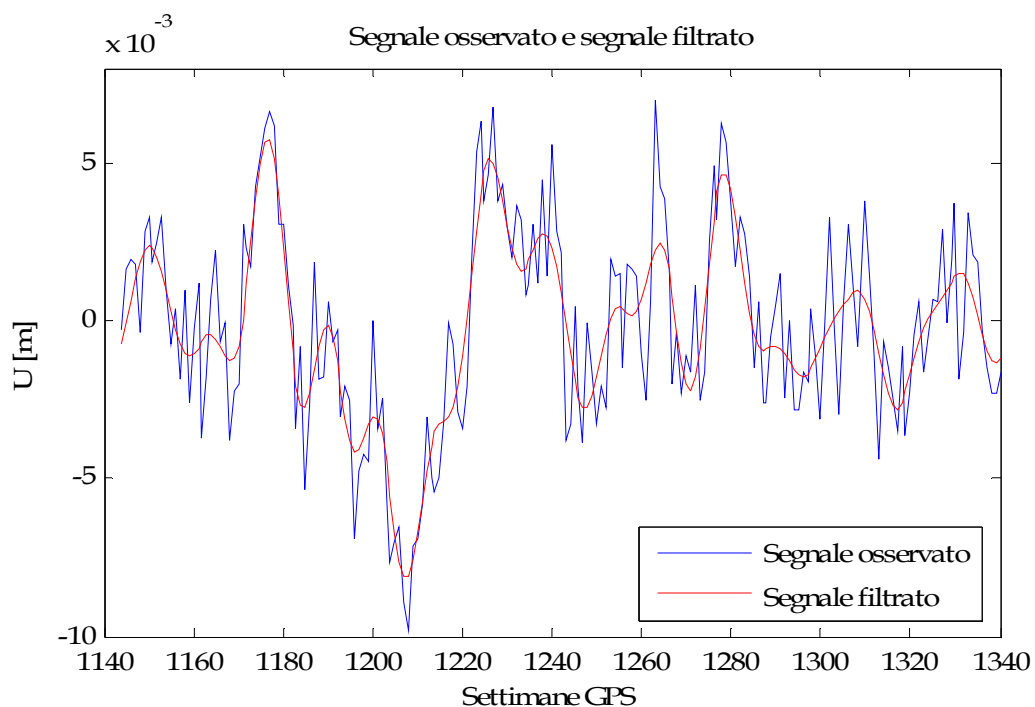


Figura 4 - Segnale osservato e segnale filtrato per la coordinata U della stazione di Matera

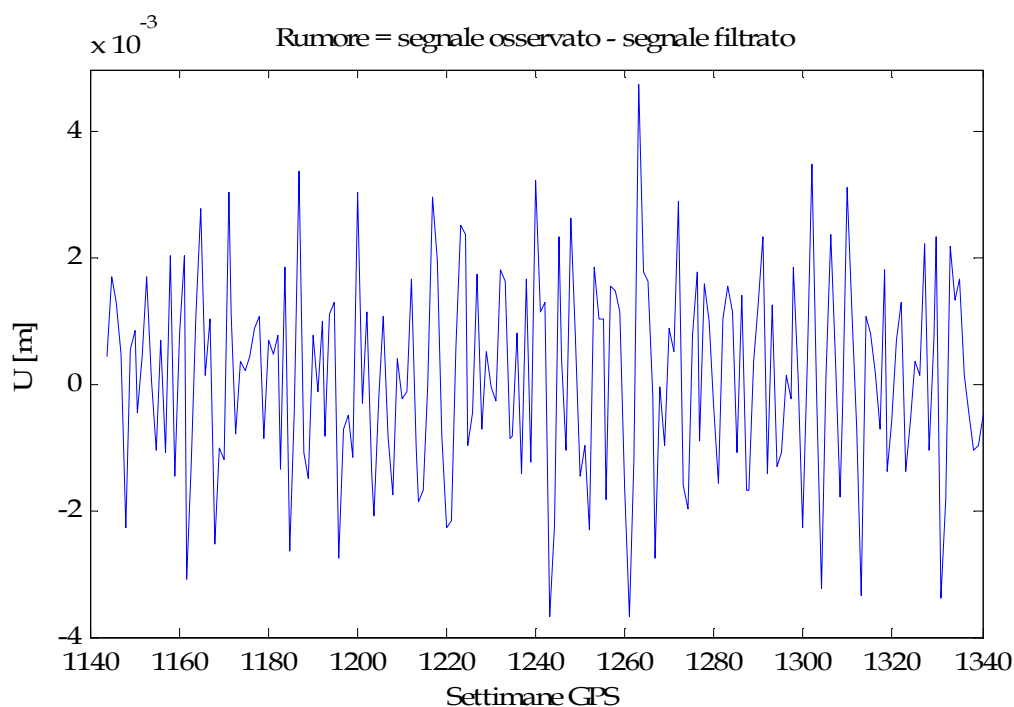


Figura 5 - Andamento del rumore residuo per la coordinata U della stazione di Matera

Conclusioni

In ultima analisi, dopo il filtraggio del segnale con un filtro di Wiener, si è eseguita la stima spettrale del rumore residuo ed infine valutata l'autocovarianza con due diversi stimatori. La potenza del rumore delle serie storiche, calcolata in doppio modo, si è verificata equivalente con un margine di errore del 10% (tabella 1); a tale proposito un possibile sviluppo futuro può essere quello di valutare oggettivamente la bianchezza del rumore residuo ottenuto, attraverso ad esempio il test di bianchezza di Anderson.

	Serie storiche di rumore residuo delle coordinate		
	U	N	E
$MSD \ [m^2]$	$7.28 * 10^{-8}$	$1.51 * 10^{-8}$	$1.32 * 10^{-8}$
$\bar{R}_{nn}(0) \ [m^2]$	$7.59 * 10^{-7}$	$1.16 * 10^{-7}$	$1.21 * 10^{-7}$
$\frac{MSD}{\bar{R}_{nn}(0)}$	0.09	0.13	0.11

Tabella 1 - Confronto tra i due stimatori di autocovarianza

Inoltre, per poter estrarre dalle serie storiche tutto il segnale correlato, in futuro si può prevedere una maggiore specializzazione del filtro al fine di ottenere un rumore residuo quanto più possibile bianco, incorrelato con autocovarianza diversa da zero solo nell'origine.

Di fatto, i risultati di questi sviluppi futuri permetterebbero di ottenere due “sottoprodotti” concreti:

- prevedere dopo quanto tempo dalla fase di avviamento di una stazione permanente sia possibile caratterizzare oggettivamente il suo comportamento, ovvero stabilire quanto dura la cosiddetta “infanzia” di una stazione permanente; si tratta, in pratica, di valutare la dimensione del campione di soluzioni settimanali sufficiente a comprovare che il comportamento della stazione dal punto di vista stocastico sia quello ipotizzato
- stabilire dopo quanto tempo è necessario aggiornare le coordinate delle stazioni che materializzano il sistema di riferimento.

Ringraziamenti

Si ringrazia sentitamente l'Ing. Marco Roggero del Politecnico di Torino per aver cortesemente messo a disposizione il software NetDownload v. 1.7.

Il presente lavoro è finanziato e si inquadra nelle attività di ricerca svolte nell'ambito del progetto di ricerca MIUR-COFIN 2004 *I servizi di posizionamento satellitari per l'e-Government* (coordinatore Fernando Sansò) – Progetto unità locale: *Le reti permanenti GPS regionali per le applicazioni cartografiche e catastali, la prevenzione del rischio idrogeologico e la fornitura di Location Based Services: aspetti metodologici ed indicazioni pratiche per la loro realizzazione, gestione ed impiego* (coordinatore Carla Nardinocchi).

Bibliografia

Bartlett M. S., (1953). "An Introduction to Stochastic Processes with Special Reference to Methods and Applications". *Cambridge University Press (New York)*

R. Barzaghi, A. Borghi, M. Crespi, G. Pietrantonio, F. Riguzzi (2004). "GPS Permanent Network Solution: the Impact of Temporal Correlations", *Proceedings of V Hotine-Marussi Symposium on Mathematical Geodesy, International Association of Geodesy Symposia*, vol. 127, Springer, 2004.

Blackman R.B and Tukey J.W, (1959). "The Measurement of Power Spectra". *Dover Publications (New York)*

Biagi L., Crespi M., Manzino A., Roggero M., Sansò F., (2005). "Guidelines to an optimal adjustment of local service permanent networks within a dynamic world: a first proposal". *Sito web: <http://geomatica.como.polimi.it/prin/>*

Boucher C., Altamimi Z., (2001). "Memo: Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign". *Sito web: <http://lareg.ensg.ign.fr/EUREF/>*

Box G. E. P., Jenkins G. M. and Reinsel G.C., (1994). "Time Series Analysis Forecasting and Control". *Prentice Hall*

Iannelli S., (2006). "Il problema della materializzazione del sistema di riferimento internazionale tramite stazioni permanenti GPS: definizione ed implementazione di una procedura per l'analisi delle serie storiche di coordinate". *Tesi di laurea, Relatori: M. Crespi, G. Reina; Controrelatore: L. Biagi*

Oppenheim A.V., Schafer R.W., (1999). "Discrete-time signal processing", *Prentice-Hall*

Welch P. D., (1970). "The Use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra", *IEEE Trans. Audio Electroacoust.*, Vol. AU-15, pp. 70-73