

Approccio differenziato per la validazione dei dati GPS provenienti dalla rete UNIPA

Gino Dardanelli, Pietro Orlando, Marco Sciortino

Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Aerospaziale, Università di Palermo
Viale delle Scienze, 90118 Palermo, Tel. 091 23896228, Fax 091 588853
email: gino.dardanelli@unipa.it, pietroorlando@unipa.it, marco.sciortino@alice.it

Riassunto

In questo lavoro ci si è proposti la verifica di qualità iniziale e la successiva elaborazione delle osservazioni provenienti dalle stazioni permanenti appartenenti alla rete dell'Università di Palermo, creata nell'ambito del progetto PRIN2005 dal titolo: "*Reti di stazioni permanenti GPS per il rilievo in tempo reale in impieghi di controllo e emergenza*" e gestita dal Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Aerospaziale. Tale rete attualmente è formata da nove stazioni permanenti localizzate presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Palermo e altri istituti o enti pubblici presenti nelle località di Termini Imerese (PA), Trapani, Agrigento, Caltanissetta, Partinico (PA), Campobello di Mazara (TP), Prizzi (PA), Alcamo (TP). Il lavoro svolto è relativo ad un arco temporale compreso tra Gennaio del 2008 ed Agosto del 2010. Per le elaborazioni dei dati grezzi sono stati impiegati tre differenti software scientifici *TEQC*, *QC2SKY* e *NDA Lite*, che hanno restituito piena corrispondenza dei risultati. In particolare, si può osservare come tutte le stazioni abbiano presentato elevati livelli di qualità sia in termini di potenza del segnale ricevuto (SNR), che in termini di multipath e cycle slips. A seguito dei risultati ricavati dalle operazioni di controllo di qualità iniziale dei dati si è passati all'elaborazione e alla stima delle coordinate delle stazioni permanenti attraverso l'utilizzo del software scientifico *NDA Professional*. Sono state valutate le influenze di differenti modelli troposferici e ionosferici. Si è osservato che, relativamente alle condizioni imposte e a i dati utilizzati, i risultati sono indipendenti dal modello troposferico utilizzato (a parità di modello ionosferico). Lo stesso non può dirsi per ciò che riguarda la dipendenza dei risultati dalla scelta del modello di correzione dell'errore ionosferico; la scelta iniziale ha riguardato il modello di *Euler* e *Goad*. Le analisi successive sono state condotte attraverso l'uso dei coefficienti *Klobuchar-style* calcolati dal *Centre for Orbit Determination in Europe* (CODE) dell'Università di Berna. Si è visto come a seguito di tale scelta, la precisione delle coordinate calcolate, valutata attraverso l'analisi degli scarti quadratici medi, sia aumentata in maniera assolutamente evidente. Infine, è stata effettuata l'indagine statistica sulle serie storiche risultanti dal processamento utilizzando i mezzi propri dell'analisi spettrale, come la *Fast Fourier Transform*.

Abstract

In this work there has been proposed the initial quality check and further processing of the observations from the permanent stations in the network of the University of Palermo, which was created under the project entitled PRIN2005 *Reti di stazioni permanenti GPS per il rilievo in tempo reale in impieghi di controllo e emergenza*", operated by the Department of Civil Engineering, Environmental and Aerospace. The network currently consists of nine permanent stations located at the Faculty of Engineering, University of Palermo and other public institutions or organizations present in Termini Imerese (PA), Trapani, Agrigento, Caltanissetta, Partinico (PA), Campobello di Mazara (TP), Prizzi (PA), Alcamo (TP). It should first be noted that although the work is between January 2008 and August 2010. For the processing of raw data were used three different scientific

software: *TEQC*, *QC2SKY* and *NDA Lite*, which returned full correspondence of the results. In particular, one can see how all the stations have presented the high level of quality both in terms of received signal strength (SNR), and in terms of number of multipath and cycle slips. Following the results obtained from the initial quality control of data has passed to processing and estimation of the coordinates of the permanent stations through the use of scientific software *NDA Professional*. We evaluated the influences of different tropospheric and ionospheric models. It was noted that in relation to the conditions imposed and to data used, the results are independent of the tropospheric model used (for the same ionospheric model). The same is not true in what concerns the dependence of the results from the choice of the ionospheric error correction model; the initial choice covered the model of *Euler and Goad*. The subsequent analysis was carried out through the use of the *Klobuchar-style* coefficients calculated by the *Centre for Orbit Determination in Europe* (CODE), University of Bern. It is seen as a result of this choice, the accuracy of calculated coordinates, evaluated through the analysis of the standard deviations, increased in an absolutely clear. Finally, the survey will be made on statistical time series resulting from the processing using its own means of spectral analysis, such as the *Fast Fourier Transform*.

Introduzione

I sistemi satellitari *Global Navigation Satellite System* (GNSS), GPS, Glonass, GALILEO e Beidou/COMPASS rappresentano la migliore risposta all'esigenza di determinare in modo accurato, affidabile e possibilmente rapido la posizione di un qualsiasi punto, o oggetto, sul territorio; questa necessità coinvolge un gran numero di applicazioni scientifiche ed ingegneristiche. Nell'ambito delle proprie ricerche scientifiche sui temi della navigazione satellitare, i ricercatori del DICA dell'Università di Palermo hanno realizzato e gestiscono dal 2007 una rete di stazioni permanenti costituita da nove stazioni GNSS localizzate rispettivamente ad Agrigento, Alcamo (TP), Caltanissetta, Campobello di Mazara (TP), Palermo, Partinico (PA), Prizzi (PA), Termini Imerese (PA) e Trapani, coordinata da un centro di controllo sito nella Facoltà di Ingegneria dell'Università di Palermo.

La rete fornisce, in via sperimentale, dati per servizi di posizionamento sia in tempo reale che in post-elaborazione (Dardanelli et al., 2008). Le stazioni di Campobello di Mazara, Palermo e Termini Imerese sono state inserite nella *Rete Dinamica Nazionale* (RDN) gestita dall'IGM, per la definizione del nuovo *datum* geodetico italiano. Partendo da queste considerazioni, in particolare, l'analisi di serie temporali di coordinate provenienti da stazioni GNSS risulta un utile strumento da applicarsi, con diverse finalità, sia a monte che a valle del processo di trattamento dei dati misurati.

Trattamento preliminare dei dati

La sperimentazione è stata condotta sui dati acquisiti dalle stazioni permanenti nell'intervallo compreso tra le settimane GPS 1460-1598 e corrispondente, come detto, al periodo tra Gennaio 2008 e Agosto 2010.

La prima fase della sperimentazione ha riguardato il trattamento preliminare dei dati con tre software, due dei quali sono correntemente utilizzati in ambito internazionale nel pretrattamento dei dati provenienti da stazioni GNSS. I software utilizzati sono *TEQC* dell'UNAVCO, *QC2SKY* del Politecnico di Torino e *Network Deformation Analysis* (NDA), nella versione *Lite*, della Galileian Plus s.r.l. L'analisi con *TEQC* e *QC2SKY* è stata effettuata per ognuna delle stazioni della rete UNIPA e per ogni giorno del periodo preso in esame, per uniformarsi alle condizioni di qualità dei dati, quali i valori di ritardo ionosferico, di multipath e di rapporto segnale rumore sulle due frequenze GPS, delle stazioni internazionali che sono state impiegate nei calcoli successivi (Cagliari, Matera, Noto). Un'altra tipologia di analisi per la verifica della qualità iniziale dei dati è stata effettuata utilizzando un altro software sviluppato sempre dalla Galileian Plus s.r.l., *Network Deformation Analysis* (NDA), nella versione *Lite*. A tale pacchetto è stato aggiunto un modulo *Data Quality Evaluation* (DQE), per il controllo di qualità dei dati GPS. Di seguito, si riportano i risultati sintetici del controllo di qualità effettuato sui dati con l'ausilio di *NDA Lite* (Tabella 1).

Stazione	Cicle slips (per sessione)	Rumore L ₁ (m)	Rumore L ₂ (m)	Rumore C ₁ (m)	Rumore C ₂ (m)
AGRI	15.75	0.000309	0.000242	0.914	0.454
ALCA	2.74	0.000379	0.000297	1.110	0.561
CALT	30.64	0.000322	0.000252	0.912	0.483
CAMP	15.99	0.000356	0.000278	1.020	0.514
PALE	34.28	0.000311	0.000245	0.658	0.490
PART	13.13	0.000312	0.000244	1.190	0.460
PRIZ	16.89	0.000278	0.000218	0.938	0.410
TERM	25.72	0.000287	0.000225	1.190	0.439
TRAP	9.32	0.000265	0.000208	0.994	0.394

Tabella 1 – Risultati del trattamento preliminare dei dati con NDA Lite.

Processamento dei dati

Terminato il trattamento preliminare dei dati, è stato utilizzato il software Network Deformation Analysis (NDA), nella versione *Professional*, per la stima delle coordinate delle stazioni permanenti della rete *UNIPA NRTK GNSS*. Il software (Chersich et al., 2002) è stato sviluppato dalla Galileian Plus s.r.l., in collaborazione con il Politecnico di Milano e con l’Agenzia Spaziale Italiana (ASI). Il processamento dei dati è stato impostato sia con soluzione su singola linea di base che con soluzione di rete, correzione della posizione del centro di fase dell’antenna, effemeridi precise, oltre a quelle relative al Sole e alla Luna ottenute dal *Jet Propulsion Laboratory* (JPLEPH). Successivamente si è scelto quale modellazione utilizzare per il calcolo e la correzione dell’errore ionosferico e dell’errore troposferico. Per modellare l’errore ionosferico è stato scelto inizialmente il modello di *Euler e Goad* (Euler, Goad, 1991) e successivamente quello di *Klobuchar* (Klobuchar, 1996), utilizzando i parametri giornalieri forniti dal CODE dell’Osservatorio Astronomico dell’Università di Berna. Per ciò che riguarda la modellazione della troposfera si è scelto di utilizzare sia il modello di *Saastamoinen* sia quello di *Hopfield*, entrambi modificati con la mapping function di *Niell* (Niell, 1996). Infine, per ciò che riguarda il fissaggio delle ambiguità si è scelto di utilizzare il metodo LAMBDA associato ad un test secondario sul ratio, che ad oggi risulta una delle metodologie maggiormente utilizzate in letteratura. Inoltre, si è impostato un numero massimo di ambiguità da fissare durante il calcolo pari a 300.

Analisi dei risultati (modello ionosferico di Euler e Goad)

Inizialmente, si è scelto di usare per la modellizzazione dell’errore ionosferico il modello di *Euler e Goad*, che in genere è utilizzato per la risoluzione delle ambiguità di fase oltreché per la valutazione dell’errore ionosferico e del multipath. Poiché, come è noto, i risultati derivanti da questa scelta sono migliorabili, le analisi successive sono state condotte attraverso l’uso del modello di *Klobuchar*, ed in particolare dei coefficienti calcolati in post-elaborazione su base regolare giornaliera dal CODE dell’Università di Berna.

Analisi dei risultati (modello troposferico di Saastamoinen)

Per quanto riguarda i risultati derivanti dall’elaborazione dei dati, si farà ora riferimento ai valori ottenuti utilizzando il modello troposferico di *Saastamoinen*. Nelle figure che seguono sono riportati gli andamenti preliminari delle serie temporali delle stazioni, considerando i valori determinati dalle tre stazioni di riferimento della rete IGS (Cagliari, Noto, Matera) nelle tre componenti X, Y, Z. Le stazioni permanenti di Caltanissetta e Palermo presentano delle serie temporali aventi, con riferimento all’intervallo oggetto di studio, un andamento lineare. Dall’analisi dei risultati si nota la completa risoluzione dei problemi di interferenza elettromagnetica manifestatesi nella stazione di Palermo, che nelle prime settimane del 2008, hanno provocato un decadimento repentino della qualità delle osservazioni registrate (Dardanelli et al., 2008) (Figura 1).

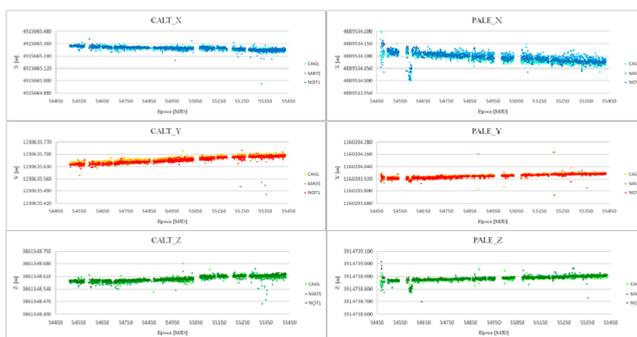


Figura 1 – Risultati per la stazione di CALT e PALE (Saastamoinen).

Le serie temporali relative alle stazioni di Prizzi e Trapani presentano anch'esse andamento rettilineo con totale assenza di salti. Tuttavia si rilevano discontinuità localizzate tra Luglio ed Agosto del 2008 causate da un malfunzionamento della stazione permanente di Prizzi successivamente risolto. La stazione di Trapani presenta invece due evidenti discontinuità nel mese di Agosto del 2008 e del 2010, dovute al distacco della linea di trasmissione ADSL al server centrale (Figura 2).

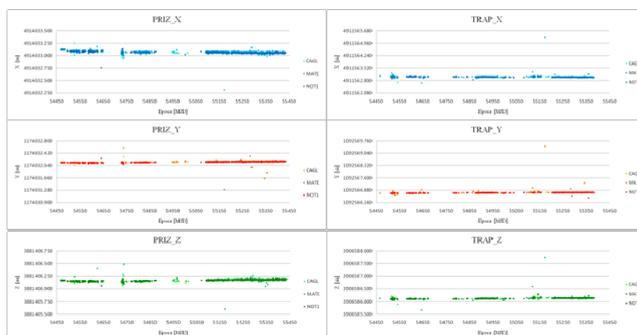


Figura 2 – Risultati per la stazione di PRIZ e TRAP (Saastamoinen).

Le serie temporali relative alle stazioni di Agrigento e Partinico presentano un evidente *trend* rettilineo dovuto allo spostamento della placca euroasiatica: circa un paio di centimetri all'anno per ciascuna coordinata, in linea con i modelli previsionali di tipo geodinamico (Figura 3).

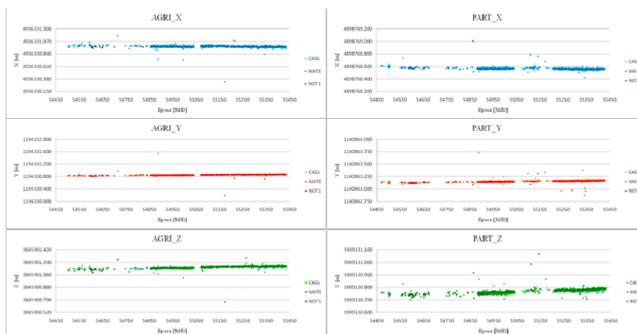


Figura 3 – Risultati per la stazione di AGRI e PART (Saastamoinen).

Si ritrova un andamento simile a quello delle stazioni di cui sono stati esposti i risultati anche per il sito di Termini Imerese, che appartiene alla *RDN*, malgrado in questo caso il numero di stime ottenute dal calcolo sia lievemente inferiore. Per la stazione di Campobello di Mazara, anch'essa facente parte della *RDN*, si sono ricavate invece delle serie temporali nelle quali non è stato possibile definire un andamento (Figura 4); ciò non ha permesso di effettuare la successiva analisi statistica dei risultati.



Figura 4 – Risultati per la stazione di CAMP e TERM (Saastamoinen).

Dall'analisi dei valori degli scarti quadratici medi relativi alla elaborazione di ogni singola baseline per tutte le stazioni permanenti, si osserva che i valori medi di detti scarti sono tutti millimetrici o submillimetrici, ad eccezione delle stazioni di Alcamo, che sotto le condizioni imposte non ha restituito un numero adeguato di risultati, e Campobello di Mazara. Ciò potrebbe essere riconducibile all'eccessivo numero di *clock jumps* del ricevitore; si rimanda ad ulteriori studi per approfondimenti in tal senso.

Applicando il modello di *Hopfield* per la correzione del ritardo troposferico, si ottengono risultati esattamente identici a quelli ricavati con l'uso del modello di *Saastamoinen*. Non sono individuabili particolari sistematismi nelle coordinate calcolate con un modello rispetto all'altro. Dal confronto dei valori delle deviazioni standard relative ai risultati ricavati con i due modelli, si nota come le loro differenze siano sempre pressoché costanti e dell'ordine di grandezza di $\pm 10^{-3}$ m.

Analisi statistica dei risultati

Per questioni legate alla brevità, si riporterà per esteso il processo di analisi ed i risultati relativi alla sola stazione di Palermo processata utilizzando il modello troposferico di *Saastamoinen* e i coefficienti *Klobuchar style* per la correzione dell'errore ionosferico.

Le serie temporali risultanti dai processamenti possono essere intese come realizzazioni di processi stocastici non stazionari; ciò a causa della presenza di un *trend lineare* che non permette di prescindere dalla particolare finestra temporale per il calcolo delle statistiche legate alle serie.

L'ipotesi su cui si fonda lo studio (Gandolfi et al., 2005), fa riferimento ad un modello di tipo additivo e schematizza le serie temporali nel modo seguente:

$$y(t) = T(t) + C(t) + S(t) + \varepsilon(t) \quad [1]$$

in cui nell'ordine compaiono la componente lineare $T(t)$, quella ciclica $C(t)$, quella stagionale $S(t)$ e quella aleatoria di rumore $\varepsilon(t)$; quest'ultima può pensarsi come somma di white noise (WN), flicker noise (FN) e random walk noise (RW) (Agnew, 1992).

Per poter affrontare lo studio delle periodicità di un segnale si deve prima realizzare tuttavia la detrendizzazione della serie e la rimozione dei valori fuori scala, detti *outliers*. Il trend lineare individuabile nella serie temporale fornisce due informazioni di un certo rilievo; esso infatti

esplicita l'andamento che la serie assume nel tempo indicando in quale direzione stia migrando il punto su cui è collocata la stazione permanente ed in secondo luogo, in base allo studio del coefficiente angolare, fornisce la velocità con cui tale punto si sta spostando. Lo studio del trend è stato effettuato attraverso una *regressione lineare ai minimi quadrati*. Una volta rimosso il trend si può ritenere che la serie temporale sia la realizzazione di un processo stocastico stazionario in senso lato e quindi con caratteristiche adeguate affinché si possa operare su di essa l'analisi di Fourier.

Prima di effettuare l'analisi spettrale delle serie, sono stati eliminati gli *outliers* assumendo la distribuzione delle osservazioni di tipo gaussiano tutti i valori non rientranti nella fascia compresa tra $[+3\sigma; -3\sigma]$ sono stati considerati fuori scala.

Una volta resa stazionaria la serie è stato possibile applicare ad essa gli strumenti dell'analisi di Fourier (Cenni et al., 2000) ed in particolare la *Fast Fourier Transform*. Si è utilizzato il software denominato *Frequency Analysis Mapping On Unusual Sampling (FAMOUS)*, che può essere usato per trovare funzioni periodiche nascoste in un segnale, stimarne i parametri caratteristici e, se necessario, per rimuovere tali componenti periodiche dalla serie temporale (Mignard, 2005).

Sottraendo dal segnale originale la somma delle ampiezze delle armoniche trovate, è possibile capire di quanto è stato ridotto il segnale (Figura 5).

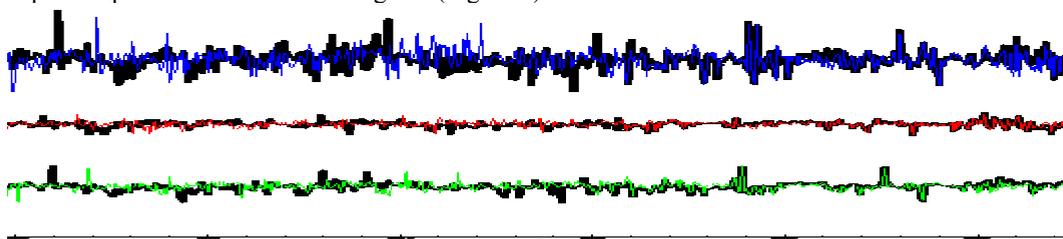


Figura 5 – Riduzione del segnale originale (nero) in seguito alla rimozione di tutte le armoniche statisticamente accettabili (colore) per le componenti X, Y e Z (rispettivamente in blu, rosso e verde).

Si è infine valutata l'entità delle tre aliquote di rumore, di cui si è detto in precedenza. Il *white noise* è la componente di rumore non correlata col tempo introdotta nella misurazione del fenomeno dipendente dall'inevitabile imprecisione dello strumento e dall'operato di chi effettua la misurazione. Si è assunta una distribuzione gaussiana dei risultati con ampiezze massime pari a $2 \div 3$ mm. Il *random walk noise* è dovuto ad una serie di forze casuali causate dagli sbalzi di temperatura, che producono spostamenti delle fondazioni del pilastro su cui poggia il ricevitore GPS. Concordemente con quanto riportato in letteratura tutte le stazioni hanno presentato valori di rumore correlato col tempo compresi tra 0,5 e 4 mm. Infine, il *flicker noise* assume un comportamento *ibrido* in quanto può essere sia correlato col tempo che indipendente da esso. La sua origine non è ancora chiara; si pensa sia dovuto a fattori come la cattiva modellazione dell'errore dell'orbita terrestre ed il particolare sistema di riferimento adottato. Come in letteratura, le analisi hanno prodotto valori di FN pari a circa una volta e mezzo il WN, che nel caso in esame raggiungono anche i $6 \div 8$ mm (Mao et al., 1999). Di seguito, si mostrano i valori delle tre componenti di rumore ricavati per tutte le stazioni appartenenti alla rete UNIPA (Tabella 2).

	Valori del rumore [mm]								
	AGRI	ALCA	CALT	CAMP	PALE	PART	PRIZ	TERM	TRAP
WN	2 ÷ 4	-	2 ÷ 5	-	3 ÷ 5	3 ÷ 4	2 ÷ 4	2 ÷ 3	2 ÷ 3
RW	1.5 ÷ 4	-	1.5 ÷ 3	-	1 ÷ 2.5	0.5 ÷ 4	2 ÷ 4	1 ÷ 3	1 ÷ 5
FN	4 ÷ 9	-	4 ÷ 8	-	2 ÷ 8	3 ÷ 5	2 ÷ 10	2 ÷ 8	4 ÷ 10

Tabella 2 – Riepilogo dei valori di WN, RW e FN sulla rete UNIPA.

Conclusioni

Si è visto che i risultati ricavati dal pretrattamento dei dati attraverso l'uso di tre differenti software scientifici *TEQC*, *QC2SKY* e *NDA Lite* abbia restituito piena corrispondenza dei risultati.

La prima conclusione è che, relativamente alle condizioni imposte e a i dati utilizzati, i risultati sono indipendenti dal modello troposferico utilizzato.

Si è dimostrato che, a parità di modello ionosferico, la scelta del modello troposferico di *Saastamoinen* e la scelta del modello di *Hopfield*, risulta essere ininfluente sia sui valori delle stime delle coordinate delle stazioni permanenti che sui valori delle precisioni delle stesse.

Lo stesso non può dirsi per ciò che riguarda la dipendenza dei risultati dalla scelta del modello di correzione dell'errore ionosferico. Le analisi successive sono state dunque condotte attraverso l'uso del modello di *Klobuchar*, con i coefficienti del *CODE*. Si è visto come a seguito di tale scelta la precisione delle coordinate calcolate, valutata attraverso l'analisi degli scarti quadratici medi, sia aumentata in maniera assolutamente evidente. Questa forte dipendenza delle stime dalla scelta del modello ionosferico può trovare una spiegazione nel fatto che, per la sua formulazione, il modello di *Euler* e *Goad* utilizza i dati acquisiti dalle stazioni permanenti attraverso algoritmi con coefficienti broadcast. I coefficienti *Klobuchar-style* calcolati dal *CODE* sono invece giornalieri e vengono calcolati in post-elaborazione.

Da un'attenta comparazione dei risultati ottenuti dall'analisi dei dati provenienti dalle stazioni permanenti in studio può affermarsi a livello generale, che la rete presenta una buona qualità dei dati raggiungendo in alcuni casi precisioni tanto elevate da essere paragonabili a quelle ottenute da reti certamente a scala più grande e non sperimentali.

Da ricerche bibliografiche condotte sulla letteratura degli ultimi anni, si è poi dedotto che una serie GPS presenta molteplici possibili perturbazioni principalmente dovute a errori nella modellizzazione di alcuni dati necessari al processamento. Inoltre, è emerso come tali serie temporali ricavate da rilievi geodetici, siano afflitte da differenti tipologie di rumore che possono alterare, se non opportunamente considerate, i parametri di interesse per le interpretazioni geofisiche del dato.

A tal fine, sottoponendo la serie reale ad una regressione lineare ai minimi quadrati si è potuto isolare un *trend*, il quale ha definito la direzione dello spostamento e la velocità con cui il sito si sta muovendo nell'ipotesi in cui gli effetti di rumore non alterino la stima della reale velocità media del punto. In seguito alla rimozione del trend, si è intervenuti sulla serie detrendizzata applicando un'analisi spettrale, che ha permesso l'individuazione di un certo numero di armoniche di notevole peso statistico, la cui composizione ha determinato un certo segnale periodico. L'analisi ha individuato, sulle tre componenti spaziali, armoniche con ampiezze prevalentemente di uno o due millimetri circa con qualche eccezione ad ampiezze superiori, soprattutto per la componente verticale. Per quanto riguarda i periodi, si evidenziano in maggioranza cicli stagionali, o semestrali associati alle armoniche con ampiezze minori. Le armoniche individuate e ritenute significative, sono state poi sottratte dalla serie e si è poi proceduto all'analisi della nuova serie depurata dagli effetti periodici per una nuova stima delle velocità. La nuova serie presentava una dispersione inferiore a quella iniziale e dunque la qualità del dato finale risulta essere significativamente migliore.

È doveroso ammettere che l'analisi non è completa poiché lo studio non si può dire concluso, ma le indicazioni che provengono dalle prove sperimentali eseguite possono confermare che l'impatto di questi rumori nella stima sia dei parametri di velocità che dei segnali periodici individuati all'interno di una serie temporale, non cambiano in maniera significativa la conoscenza della dinamica della serie.

La rete di stazioni permanenti dell'Università di Palermo anche se nata per scopi prettamente sperimentali presenta una qualità dei dati elevata assolutamente paragonabile a quella di altre reti operative sul territorio nazionale ed internazionale per scopi commerciali e/o scientifici.

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare il prof. Stefano Gandolfi della *Alma Mater Studiorum Università di Bologna* per i suoi preziosi consigli e Marco Osmo della *Galileian Plus s.r.l.* di Roma per la collaborazione durante l'elaborazione dei dati, in particolare per i settings dei software NDA Lite e Professional.

Bibliografia

- Dardanelli G., Franco V., Lo Brutto M. (2008). "La rete GNSS per il posizionamento in tempo reale dell'Università di Palermo: progetto, realizzazione e primi risultati". *Bollettino SIFET* (Società Italiana di Fotogrammetria e Topografia) n. 3-2008, 107-124.
- Gandolfi S., Abbondanza G., Zanetti F. (2005): "Indagine delle proprietà statistiche di serie temporali di posizione applicata al caso della stazione permanente GPS della base Mario Zucchelli in Terra Vittoria (Antartide)".
- Mignard F. (2005): "Frequency Analysis Mapping On Unusual Samplings". VSWG, Genève, 6 Giugno 2005.
- Chersich M., De Giovanni A., Osmo M. (2002): "NDA: un tool italiano per il processamento automatico di dati da reti GPS permanenti". *Atti VI Convegno Nazionale ASITA*, Perugia, Italia, 2002.
- Cenni N., Albarello D., Anzidei M., Baldi P., Casula G., Galvani A., Loddo F., Mantovani E., Pesci A., Serpelloni E. (2000): "Possibile approccio metodologico all'analisi delle serie temporali di stazioni GPS permanenti per lo studio delle deformazioni crostali". *Atti XIX Convegno Nazionale del GNGTS*, Roma, Italia, 2000.
- Mao A., Harrison C., Dixon T. H. (1999): "Noise in GPS coordinate time series". *Journal of Geophysical Research*, vol. 104, pp. 2797 - 2816.
- Klobuchar J. A. (1996): "Global Positioning System: Theory and Applications". Volume I, Cap. XII: Ionospheric effects on GPS, 485-515, American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc.
- Niell A. E. (1996): "Global mupping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths". *Journal of Geophysical Research*, Vol. 101, n. B2, pp. 3227-3246.
- Agnew D. C. (1992): "The time domain behavior of power law noise". *Geophysical Research Letters*, Vol. 29, n. 4, pp. 333-336.
- Euler H.-J., Goad C. C. (1991): "On optimal filtering of GPS dual frequency observations without using orbit information". *Bulletin Geodesique*, n. 65, pp.130-143.