

Il Precise Point Positioning per il calcolo di reti di stazioni permanenti GNSS regionali

Stefano Gandolfi, Luca Tavasci, Luca Poluzzi

(*) DICAM-ARCES, Facoltà di Ingegneria, Università di Bologna, Viale Risorgimento 2, 40136, Bologna, Tel. 051-2093106, Fax 051-2093114, e-mail: stefano.gandolfi@unibo.it, poluzzi.luca@gmail.com

Riassunto

Il Precise Point Positioning (PPP) si è dimostrato essere uno strumento potente per applicazioni in ambito geodetico e per lo studio della geodinamica. Tale approccio, così come quello differenziato, dipende dai modelli e dalle condizioni al contorno che vengono impiegate in fase di calcolo e nella fase di inquadramento. In questo lavoro verranno mostrati i risultati ottenuti a partire da due reti ben distinte in una lunghezza temporale di 3 anni: una rete situata a medie latitudine (zona italiana) ed una rete nella regione polare. Tali test sono stati effettuati con lo scopo di valutare l'impatto di differenti modelli e strategie di elaborazione PPP, tra le quali: la risoluzione delle ambiguità di fase, la funzione mappante della troposfera (relativa all'angolo di cut-off) e le tecniche di inquadramento (globale e regionale) della soluzione in un determinato sistema di riferimento. I risultati ottenuti mostrano che un inquadramento di tipo regionale porta significativi miglioramenti sia in termini di accuratezza (1.5 mm in planimetria e 5 mm in altimetria) che in termini di precisione (2 mm in planimetria e 4 mm in altimetria) tali da ridurre l'impatto dovuto all'applicazione dei modelli e delle condizioni a contorno.

Abstract

Precise Point Positioning (PPP) has been demonstrated to be a powerful tool in geodetic and geodynamic applications. As in the other data processing techniques (based on phase differences) also in PPP the final solution is dependent on the applied models and considered boundary conditions, both for computation and framing. In this paper, considering data from two GPS test networks (one at middle latitudes and one in a polar region) processed for a lapse of time of three years, some tests have been performed in order to evaluate the impact of different models and data processing strategies. The ambiguity resolution, the troposphere mapping function (related to the cut-off angle) and the techniques to frame a solution onto a defined reference frame have been here investigated. In particular, a framing strategy based on local transformation parameters obtained from a regional network were investigated. The obtained results can be summarized as follows: if the dimension of the GPS network is regional, then local transformation parameters can be estimated and applied, thus improving the final results both in terms of repeatability and accuracy. Moreover, applying regional transformation parameters, the impact of the tested models and boundaries conditions for PPP computation is reduced significantly. It has been demonstrated that when regional transformation parameters are applied to a PPP solution, it is possible to obtain an RMS of less than 2 millimeters for planimetry and 4 mm in height, whereas the final accuracy is assessed to 1.5mm in planimetry and 5 mm in height respectively.

1. Introduzione

Il GPS è una delle tecniche più utilizzate in vari ambiti, dallo studio del moto delle placche al monitoraggio dei sistemi di riferimento, delle frane e delle strutture. L'utilizzo di questo sistema può variare in termini di strategia di elaborazione dei dati in funzione dei differenti scopi sopra

citati. Se la soluzione che si vuole ottenere deve essere aderente ad un predefinito sistema di riferimento allora nel calcolo della rete devono essere inseriti punti noti nel sistema di riferimento desiderato e la fase di inquadramento può avvenire o mediante compensazione in blocco a vincoli sovrabbondanti o mediante trasformazione di similitudine. Nel caso di elaborazione mediante approccio PPP, non realizzando basi tra stazioni, la prima soluzione non è praticabile. Uno dei contesti che richiedono questa condizione è la definizione e il monitoraggio di un sistema di riferimento nazionale, che può essere definito a partire da un sistema di riferimento intra-placca come l'ETRF per l'Europa. L'approccio di elaborazione dei dati GPS utilizzato per questo lavoro è il noto Precise Point Positioning (PPP) e il codice di calcolo è il pacchetto software GIPSY OASIS II versione 6.2.1 sviluppato dal JPL (Webb et al., 1993) che permette, combinando le osservabili di codice e fase, una elaborazione dei dati molto accurata (Zumberge et al., 1997). Rispetto il più diffuso approccio differenziato, questo metodo risulta più veloce e flessibile e inoltre non richiede l'adozione di una particolare strategia per la definizione delle basi. D'altra parte, l'approccio differenziato è generalmente caratterizzato, da una ripetibilità migliore, in particolar modo per basi di dimensioni ridotte (Heflin et al., 1992). Nel corso degli ultimi 20 anni le performance del PPP sono però diventate sempre più efficienti (Bisnath et al., 2008) grazie al miglioramento sia di alcuni prodotti (orbite e derivate degli orologi) sia dei modelli geofisici (ritardo atmosferico, effetti di marea, moto polare, ecc.), nonché il miglioramento delle strategie di elaborazione dei dati. Attualmente il PPP costituisce un metodo alternativo per il posizionamento di precisione, soprattutto per soluzioni basate su osservazioni prolungate (24h). Come noto esso produce soluzioni nello stesso sistema di riferimento delle orbite, che costituiscono l'unico vincolo. Per migrare da questo sistema di riferimento ad altri, come anticipato in precedenza, devono essere calcolati ed applicati parametri di trasformazione. In questo lavoro sono stati confrontati e discussi i modelli più significativi e le strategie per l'elaborazione dei dati, partendo da due sottoreti della rete IGS (Dow et al., 2009) situati rispettivamente in Europa e in Antartide e calcolati per una finestra temporale di tre anni. In particolare, è stato indagato l'impatto dei seguenti parametri: la risoluzione dell'ambiguità, la funzione mappante della troposfera (in funzione dell'angolo di cut-off, per Antartide) e le tecniche di inquadramento. Per ogni soluzione sono stati identificati e discussi due parametri sintetici: il primo è legato all'accuratezza ottenuta, cioè quanto sono vicine le soluzioni ottenute rispetto quelle ufficiali; il secondo invece è legato alla dispersione che caratterizza la ripetibilità delle misure. Per valutare l'accuratezza delle diverse soluzioni è stato assunto come riferimento il frame ufficiale ITRF2008 (Altamimi et al., 2011).

2. Descrizione dei due dataset

Come anticipato, la sperimentazione è stata condotta su due sottoreti della rete IGS. La prima rete è costituita da 16 stazioni permanenti situate in Italia e nelle regioni limitrofe (Fig. 1a) ed utilizzata per il calcolo della Rete Dinamica Nazionale (RDN) che ufficialmente materializza dal 2012 il nuovo Reference Frame italiano (ETRS - ETRF2000 epoca 2008.0). La seconda rete è costituita da nove stazioni permanenti tutte situate lungo le coste dell'Antartide (Fig. 1b), ed è utilizzata per inquadrare sia la rete VLNDEF (Victoria Land Network for DEformation control) (Capra et al. 2008, Mancini et al. 2004) che la rete TAMDEF (Vazquez et al., 2012) nell'ITRF. Le peculiarità delle due reti sono: le diverse dimensioni, la densità (intesa come rapporto tra estensione e numero di stazioni) e la posizione, considerato che la prima è situata ad una latitudine media, mentre la seconda nella zona polare, in cui la geometria dei satelliti GPS e le condizioni atmosferiche (ionosfera e troposfera) sono differenti (King et al., 2000) e quindi potrebbero influenzare le soluzioni. Per entrambe le reti sono stati elaborati tre anni (2009-2011) di dati giornalieri a con intervallo di campionamento a 30 secondi.

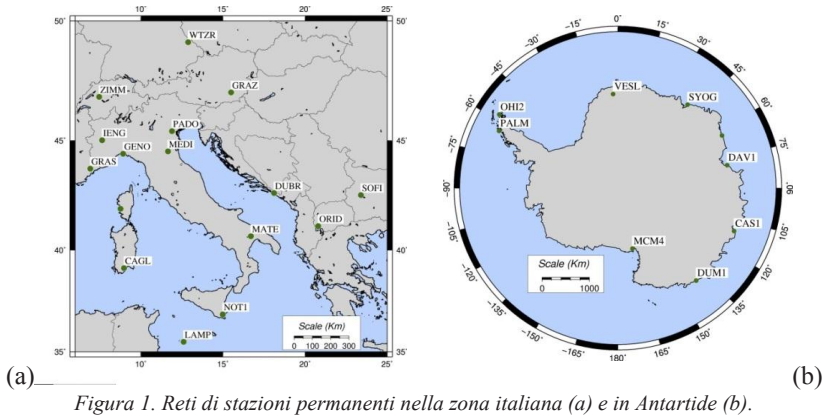


Figura 1. Reti di stazioni permanenti nella zona italiana (a) e in Antartide (b).

3. Codice di Calcolo e parametri statistici utilizzati per i confronti

Il trattamento dei dati GPS è stato eseguito con l’approccio PPP grazie al pacchetto software Gipsy-Oasis II versione 6.1.2. La realizzazione di script personalizzati in linguaggio Perl ha consentito un trattamento dei dati automatico e parallelizzato a seconda delle capacità hardware del calcolatore adottato. Come per l’elaborazione con approccio differenziato, anche nel PPP devono essere fissati, a priori, molti parametri e condizioni al contorno, come ad esempio: i modelli geofisici (modelli marea solida, funzioni mappanti troposferiche ecc.), le calibrazioni dei centri di fase delle antenne, l’angolo di cut-off, ecc.

Al fine di poter confrontare le varie soluzioni ottenute nelle differenti condizioni o usando reti di inquadramento differenti, sono stati individuati due parametri statistici uno volto a indicare la precisione delle soluzioni ottenute e l’altro la ripetibilità.

Il primo parametro considerato è l’errore quadratico medio:

$$\sigma_k^i = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m v_{kj}^i(t)^2}$$

Dove v_{kj}^i rappresenta il valore del residuo (ottenuto rimuovendo una retta di regressione lineare mediante approccio ai minimi quadrati) della componente k-esima di una soluzione giornaliera (j) relativa ad una stazione GPS (i) al tempo t, dove i = 1, n con n numero di stazioni GPS, e j = 1, m con m numero di soluzioni giornaliere, e k = Nord, Est, Up rispetto ad una posizione definita a priori. Al fine di rimuovere gli outliers, è stata adottata una procedura iterativa basata sulla ricerca del massimo valore anomalo e il confronto di esso con la deviazione standard. Sono state considerate come outliers le coordinate giornaliere quando il residuo massimo della serie superava di 3 volte il valore σ_k^i . Una volta rimosso l’outlier σ_k^i è stato ricalcolato. Tale procedura veniva reiterata fino all’assenza di outliers. Il valore finale risulta quindi essere dato dal parametro p_k^i .

$$p_k^i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{m_{clean}} v_{kj}^i{}^2}{m_{clean}}}$$

dove m_{clean} è il numero di coordinate giornaliere rimaste nella serie. La precisione delle soluzioni è stata poi valutata in termini di differenze rispetto alla soluzione ufficiale ITRF08 per ogni stazione. Per fare questo, la soluzione di riferimento è stata convertita nello stesso sistema geodetico locale utilizzato per la soluzione PPP-GPS, calcolando poi i bias quotidiani come:

$$\Delta_{kj}^i = S_{kj}^i - REF_{kj}^i$$

dove $REF_{k,j}^i$ è il valore di riferimento della componente k . Così il $\Delta_{k,j}^i$ può essere considerato come la serie temporale delle differenze tra una soluzione GPS e quella ufficiale. Come parametro rappresentativo dell'accuratezza di una serie temporale è stato calcolato il valore medio dei bias:

$$b_k^i = \frac{\sum_{j=1}^{m_{clean}} \Delta_{k,j}^i}{m_{clean}}$$

Per concludere, al fine di sintetizzare i suddetti parametri di ciascuna serie in un parametro per la rete, su ogni componente di riferimento, sono stati calcolati altri due parametri. Il primo (P_k) rappresenta la ripetibilità complessiva delle misure, il secondo (B_k) la precisione globale.

$$P_k = \frac{\sum_{i=1}^n p_k^i}{n} \quad B_k = \frac{\sum_{i=1}^n |b_k^i|}{n}$$

Al fine di trattare le diverse soluzioni ottenute per ciascuna rete è stata implementata una procedura di post-analisi automatica realizzata mediante script in linguaggio Perl e Fortran.

4. Analisi delle soluzioni

Come preliminarmente anticipato, su ciascuna rete considerata sono state realizzate soluzioni di tre anni utilizzando parametri differenti. Di seguito vengono mostrati i principali risultati ottenuti in forma tabellare riportando precisione ed accuratezze secondo quanto mostrato nel paragrafo 3.

4.1. Risoluzione delle ambiguità

I confronti tra soluzione ad ambiguità iniziale di fase fissata rispetto alla soluzione *float* mostrano, per entrambe le reti analizzati comportamenti simili. In particolare non si osservano significativi miglioramenti nelle componenti Nord e Up mentre nella componente Est il miglioramento si attesta sul 40% circa per la rete Italiana e sul 25% sulla rete Antartica. Questi risultati possono essere spiegati considerando che la stima nella componente Est del sistema GPS è più debole di quella Nord a causa della geometria della costellazione (Santerre et. al, 1991). Tale aspetto risulta essere più evidente alle medie latitudini rispetto alle regioni polari dove la costellazione appare con geometrie molto diverse. In termini di bias l'impatto della risoluzione dell'ambiguità è trascurabile, poiché le differenze sono circa un decimo di mm su entrambe le reti. Il dato ottenuto è in linea con i risultati di alcuni lavori simili (Ge et al., 2008 e Geng et al.,2009).

Tipo Soluzione	Area	Ripetibilità		
		N (mm)	E (mm)	U (mm)
No Ambiguità Risolte	Italia	2,1	3	6,4
	Antartide	2,3	2,4	7,3
Ambiguità Risolte	Italia	2	1,8	6,1
	Antartide	2,1	1,8	7,1
Miglioramento (%)	Italia	5%	40%	5%
	Antartide	9%	25%	3%

Tabella 1. Impatto della risoluzione dell'ambiguità in termini di precisione.

4.2. Inquadramento regionale rispetto ad un inquadramento globale

Come caratteristica intrinseca del PPP, le coordinate ottenute dopo il calcolo geodetico sono riferite nel medesimo sistema di riferimento utilizzato per la effemeridi (IGS). Per trasformare le coordinate

ottenute sul sistema ITRF08, il JPL fornisce un set di parametri di similitudine giornalieri, contenuti nei cosiddetti “X-files”, che sono disponibili nell’archivio online del JPL assieme alle efemeridi precise ed ai parametri di correzione degli orologi. Per ottenere questi parametri, il JPL utilizza le soluzioni giornaliere di circa 40 stazioni selezionate dalla rete di monitoraggio globale IGS e formalmente stimate in ITRF08 dallo IERS (*ITRF2008-TRF-IGS.SNX*). E’ però possibile applicare lo stesso procedimento su un sottoinsieme della rete di monitoraggio IGS, ed in particolare su un sottoinsieme attorno alla zona di interesse. In questo paragrafo è stato valutato l’impatto dell’applicazione degli X-files globali rispetto ai parametri di trasformazione regionali. I risultati ottenuti sono riportati in Tabella 2. Dalla tabella 2 si può osservare come, l’applicazione di parametri di trasformazione regionali migliori le soluzioni sia per quanto attiene la ripetibilità che l’accuratezza.

E’ però evidente come l’accuratezza sia il parametro che migliora in modo più significativo ed in particolare nella componente UP della rete antartica tale miglioramento si attesta sul 70% passando da 17.2mm a 5.3mm. Per l’area italiana le percentuali di miglioramento sono più localizzate nelle componenti planimetriche (42% e 35%).

Tipo Soluzione	Zona	Ripetibilità			Accuratezza		
		N (mm)	E (mm)	U (mm)	N (mm)	E (mm)	U (mm)
Inquadramento Globale	Italia	2	1,8	6,1	2,7	2,6	3,6
	Antartide	2,1	1,8	7,1	2	1,8	17,2
Inquadramento Regionale	Italia	1,6	1,4	3,8	1,6	1,7	2,9
	Antartide	1,5	1,1	4,9	1,5	1	5,3
Miglioramento (%)	Italia	22%	23%	37%	42%	35%	18%
	Antartide	28%	38%	30%	25%	44%	69%

Tabella 2. Miglioramento della ripetibilità e dell’accuratezza applicando un inquadramento globale o regionale.

4.3. Impatto della funzione mappante troposferica e dell’angolo di *cut-off* (Rete Antartica)

A causa di particolari geometrie satellitari sulla regione Antartica, è stato eseguito un ulteriore test per valutare l’impatto della funzione mappante troposferica combinata con diversi angoli di *cut-off*. Il test è stato eseguito confrontando la funzione mappante di Niell (Niell A, 2000), predefinita in Gipsy, con la *Vienna Mapping Function1* (VMF1) (Kouba, 2008), adottando per entrambe, tre diversi angoli *cut-off* di 7, 10 e 13 gradi. I risultati dei test, utilizzando parametri di inquadramento regionali, hanno mostrato come la VMF1 influenzi positivamente soprattutto la componente Up, con un miglioramento della dispersione di circa il 20% per la soluzione a 7°. Su questa soluzione il miglioramento della dispersione in planimetria è di circa 8%. Utilizzando un angolo superiore l’influenza del VMF1 diminuisce, diventando sempre più trascurabile. Il test utilizzando la VMF1 è stato effettuato anche sulla regione italiana, con un angolo di 7 gradi. I risultati non riportati in via tabellare mostrano come l’influenza della troposfera su tali latitudini è molto minore con miglioramenti dell’ordine di qualche unità percentuale.

Cut-off	Funzione mappante troposferica	Ripetibilità		
		N (mm)	E (mm)	U (mm)
7°	Niell	1,5	1,1	4,9
	VMF	1,4	1	3,9
10°	Niell	1,3	1,1	3,6
	VMF	1,3	1	3,3
13°	Niell	1,3	1	3,5
	VMF	1,3	1,1	3,4

Tabella 1. Impatto dei modelli della troposfera nella regione antartica considerando diversi angoli di cut-off (soluzioni ottenute con inquadramento regionale e ambiguità risolte).

5. Conclusioni

Sono state elaborate due diverse reti di stazioni permanenti GNSS regionali, una situata alle medie latitudini (Italia) e l'altra alle latitudini polari (Antartide), per un intervallo di tempo di tre anni utilizzando il pacchetto software GIPSY OASIS II con un approccio PPP, adottando diverse condizioni al contorno, sia per l'elaborazione dei dati che nella fase di inquadramento. L'obiettivo era di individuare quale strategia producesse i risultati migliori in termini di ripetibilità e di accuratezza. In particolare, è stato studiato l'impatto della risoluzione dell'ambiguità, della funzione mappante troposferica (Niell o VMF1) anche in relazione all'angolo di cut-off, e soprattutto l'impatto dei parametri di trasformazione regionali piuttosto che quelli globali per la fase di inquadramento sull'ITRF08. In sintesi, è da sottolineare come i maggiori miglioramenti sono provenienti dall'utilizzo di parametri di trasformazione regionali in alternativa a quelli globali. In particolare, i miglioramenti ottenuti in termini di ripetibilità vanno dal 22% al 38%, mentre per l'accuratezza l'intervallo è compreso tra il 18% e il 69%. In accordo con la letteratura nota, anche la risoluzione dell'ambiguità è un parametro che influisce positivamente sulle soluzioni anche se il miglioramento è prevalentemente a carico della componente Est, che migliora la ripetibilità dal 25% al 40%. Per concludere, al fine di ottenere una precisione ottimale per una rete regionale utilizzando un approccio PPP, il suggerimento è di inquadrare ogni soluzione quotidiana calcolando parametri di trasformazione locali. Ciò è possibile quando le coordinate di 3 o più stazioni calcolate sono anche definite nel sistema di riferimento desiderato.

Ringraziamenti

Il presente lavoro si inserisce nell'ambito della ricerca PRIN 2010-11 coordinato dal Prof. Raffaele Santamaria e dal titolo "Tecniche geomatiche innovative ed emergenti di rilievo, telerilevamento (da aereo, satellite, uav) e WEBGIS per la mappatura del rischio in tempo reale e la prevenzione del danno ambientale"

Bibliografia

- Altamimi Z, Collilieux X, Métivier L (2011) ITRF2008: an improved solution of the international terrestrial reference frame, *J Geod* 85:457-473.
- Bisnath S, Gao Y (2008) Current state of precise point positioning and future prospects and limitations. *IAG Symp* 133:615-623.
- Capra A, Dubbini M, Galeandro A, Gusella L, Zanutta A, Casula G, Negusini M, Vittuari L, Sarti P, Mancini F (2008) VLNDEF Project for Geodetic Infrastructure Definition of Northern Victoria Land, Antarctica. *Geodetic and Geophysical Observations in Antarctica* 37-72.

- Dow JM, Neilan R, Rizos C (2009) The international GNSS service in a changing landscape of global navigation satellite systems, *J Geod* 83:191-198.
- Ge M, Gendt G, Rothacher M, Shi C, Liu J (2008) Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with daily observations, *J Geod* 82:389-399.
- Geng J, Teferle F, Shi C, Meng X, Dodson A, Liu J (2009) Ambiguity resolution in precise point positioning with hourly data, *GPS solut* 13:263-270.
- Heflin M, Bertiger W, Blewitt G, Freedman A, Hurst K, Lichten S, Lindqwister U, Vigue Y, Webb F, Yunck T (1992) Global geodesy using GPS without fiducial sites, *Geophys Res Lett* 19:131-134.
- King M, Nguyen LN, Coleman R, Morgan P (2000) Strategies for high precision processing of GPS measurements with application to the Amery Ice Shelf, East Antarctica, *GPS solut* 4:2-12.
- Kouba J (2008) Implementation and testing of the gridded Vienna Mapping Function 1 (VMF1), *J Geod* 82:193-205.
- Mancini F, Capra A, Gandolfi S, Sarti P, Vittuari L (2004) VLNDEF (Victoria Land Network for DEformation control) Monumentation during GANOVEX VIII ItaliAntartide XV: Survey and Data Processing, *Terra Antartica* 11:35-38.
- Niell A (2000) Improved atmospheric mapping functions for VLBI and GPS, *Earth Planets Space* 52:699-702.
- Santerre R, Lavoie M (1991) Propagation of GPS Errors for Ambiguities-fixed and Ambiguities-free Solutions, *Präsentiert auf IUGG XX General Assembly, Wien, 12-23*.
- Vázquez GE, Grejner-Brzezinska DA, Schaffrin B (2012) Traditional and Alternative Network Adjustment Approach for the TAMDEF GPS in Antarctica, *IAG Symp* 136:635-642.
- Webb F, Zumberge J (1993) An introduction to GIPSY, OASIS-II, *JPL Publ*, D-11088.
- Zumberge J, Heflin M, Jefferson D, Watkins M, Webb F (1997) Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, *J Geophys Res* 102:5005-5017.