

UN SISTEMA GPS MULTIAN TENNA PER LA DETERMINAZIONE DELL'ASSETTO DI UN VEICOLO RILEVATORE

Andrea FORNAIA, Ambrogio Maria MANZINO(*), Marco ROGGERO(*).

(*) DITAG, Politecnico di Torino, C.so Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino
(ambrogio.manzino; marco.roggero)@polito.it

Introduzione

Si è affrontato lo studio di algoritmi per l'elaborazione di osservazioni GPS generate da sistemi multiantenna, per la determinazione di traiettorie ed assetti di un veicolo rilevatore. Differenziando le misure di fase acquisite da almeno tre antenne non collineari, sono stati determinati i vettori base indipendenti e, da questi, ricavati gli angoli di assetto. Sono stati trattati dati a singola frequenza: la lunghezza delle basi, infatti, difficilmente può superare i 30 m (ad esempio nel caso di applicazioni navali), pertanto il ritardo ionosferico è completamente cancellato nelle differenze prime.

La precisione raggiungibile con sistemi multiantenna dipende fortemente dalla configurazione geometrica del sistema ed è degradata dagli effetti legati al multipath. Anche il fissaggio delle ambiguità di fase assume particolare importanza e richiede particolare robustezza, specialmente per l'elevato numero di cycle slip nel caso dell'utilizzo su veicoli rilevatori terrestri. Lo schema di rete deve quindi essere scelto in base ad un criterio che porti a minimizzare il numero di cycle slip nelle osservazioni differenziate.

Ciò che si è condotto è la riduzione dell'area di ricerca delle ambiguità intere con l'introduzione di vincoli geometrici, grazie al fatto che il sistema multiantenna costituisce una rete di geometria nota. Infine si è irrobustita ulteriormente la rete grazie al fatto che i parametri del sistema (posizione e assetto) evolvono nel tempo con una dinamica i cui parametri stocastici possono essere a loro volta oggetto di vincolo.

Riguardo il trattamento delle osservazioni, il problema può essere visto come la risoluzione di una rete dipendente dal tempo ed è stato affrontato da due punti di vista diversi: aggiornamento sequenziale della soluzione con il filtro di Kalman (State Space Approach) e soluzione minimi quadrati (Network Approach). Quest'ultima soluzione consente con più semplicità, sia di seguire l'approccio multibase, sia di aggiungere o riazzerare una nuova ambiguità incognita ad ogni salto di fase ed estrarre, nella soluzione, le sole incognite di ambiguità senza risolvere in blocco il sistema.

Il software

Gli algoritmi studiati sono stati implementati in due software specifici: *Gladesy* (*Global Attitude Determination System*), che sfrutta il primo approccio e *GAS* (*Global Attitude System*) che utilizza il secondo. Si sono esaminati vantaggi e svantaggi sulla base di considerazioni teoriche e dei risultati sperimentali. Presenteremo qui però solo parte dei risultati ottenuti con il programma *GAS*.

Sono stati eseguiti test su dati simulati e su dati reali. In entrambi i casi i vincoli hanno irrigidito la soluzione. L'algoritmo proposto ed implementato lavora in approccio multibase, sotto l'ipotesi semplificativa di trattare basi corte. La ricerca intera delle ambiguità viene eseguita con il metodo *Lambda*. I vincoli e la dinamica riducono il volume di ricerca delle ambiguità, migliorano il parametro ADOP ed il "Success Rate", inoltre l'effetto del rumore nella traiettoria è ulteriormente ridotto in funzione del modello cinematico. Le coordinate così stimate sono utilizzate per calcolare gli angoli di assetto del veicolo, necessari all'orientamento di altri sensori.

Basi fisiche e matematiche

Consideriamo un sistema dinamico lineare discreto descritto da un vettore di stato finito dimensionale x e da un vettore di biases b costanti. Il sistema evolve con una dinamica nota nelle epoche t ($t = 1, \dots, T$):

$$\begin{aligned} x_{t+1} &= T_{t+1}x_t + v_{t+1} \\ y_{t+1} &= H_{t+1}x_{t+1} + C_{t+1}b_{t+1} + \varepsilon_{t+1} \end{aligned} \quad [1]$$

dove y sono le osservazioni. Il vettore b può essere costante in ogni epoca o costante a tratti. Ciò avviene nel caso in cui le ambiguità siano affette da cycle slips; allo scopo, i salti possono essere considerati adeguatamente con l'uso della matrice C .

Tale matrice, che collega il vettore dei bias alle osservazioni, deve però essere nota a priori.

Il sistema conduce ad una matrice normale N

$$N = D^T W_\omega D + M^T W_\varepsilon M \quad [2]$$

che include il contributo della dinamica e della geometria, come descritto in (Albertella et al., 2006) e (Roggero, 2006).

Il modello dinamico è descritto, epoca per epoca, dalla matrice di transizione T e dalla matrice generale D , con la matrice dei pesi W_ω .

Il contributo della geometria è dato, epoca per epoca, dalla matrice disegno H e dalla matrice globale M , con la matrice di peso W_ε . Si noti come le matrici peso dipendano dalle matrici di covarianza del rumore di sistema e degli errori di misura. Come i termini nella somma ($D^T W_\omega D$ e $M^T W_\varepsilon M$), anche la matrice normale $N = D^T W_\omega D + M^T W_\varepsilon M$ è nella forma quasi triangolare di Schur e può essere così partizionata

$$\begin{bmatrix} N_x & N_{xb} \\ N_{xb}^T & N_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_\omega + T^T W_\omega T & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H^T W_\varepsilon H & H^T W_\varepsilon C \\ C^T W_\varepsilon H & C^T W_\varepsilon C \end{bmatrix} \quad [3]$$

Grazie alla decomposizione è possibile la stima delle ambiguità reali b con la loro matrice di dispersione, senza risolvere il sistema per gli altri parametri ignoti (la traiettoria).

Questo risultato è usato come input del metodo *Lambda* per cercare e fissare le ambiguità intere. Ricavati i valori interi delle doppie differenze di fase, il loro valore è introdotto nel sistema e sono risolte così le altre incognite (posizioni, velocità, ecc.). In quest'ultimo passo non occorre invertire la sottomatrice N_x , che è già stata invertita per calcolare S_b , il complemento di Schur a N_b . Si noti che occorre invertire solamente le matrici N_x , che è grande, di dimensione $(p \cdot T) \times (p \cdot T)$, ma è di forma tridiagonale, e la matrice S_b di dimensione $n \times n$.

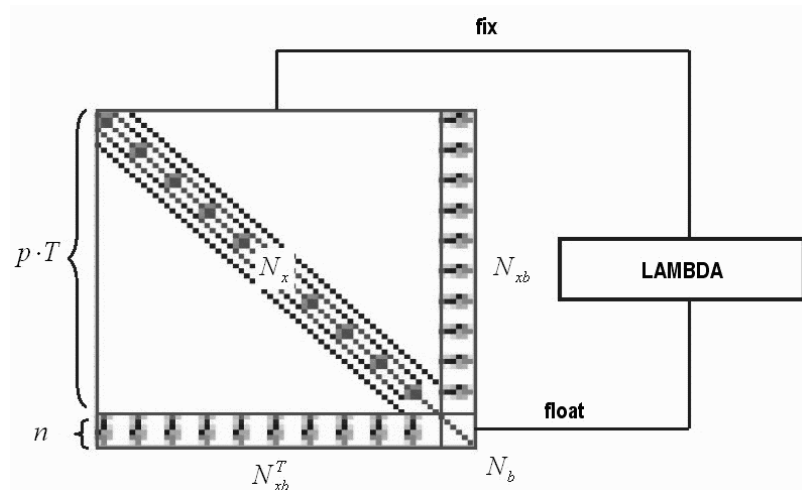


Fig. 1. La decomposizione permette di ricavare le ambiguità reali trascurando gli altri parametri di sistema.

L'algoritmo

Il software, basato sul processamento batch dei dati GPS cinematici, include routines per la lettura dei dati ed il preprocessing. In ingresso sono lette osservazioni *rinex* ed è possibile usare sia le effemeridi precise, rapide od ultrarapide, che quelle broadcast.

I parametri approssimati sono stimati ad ogni epoca, trascurando correlazioni nel tempo. Per prima cosa viene calcolata la traiettoria approssimata in point positioning, con sole misure di codice. Le coordinate a priori sono assegnate alla stazione master, vengono formate le baselines preparando le osservazioni differenziali di codici e fasi e si utilizzano le doppie differenze di codice per raffinare la traiettoria. Si ipotizza che i biases residui di ionosfera e troposfera siano trascurabili per basi di ordine metrico, come avviene per antenne montate su un veicolo. Un successivo affinamento avviene trattando le differenze triple di fase. Anche se questi trattamenti non rappresentano il prodotto finale, è possibile vincolare anche qui le lunghezze delle basi.

Prima di stimare le ambiguità float è necessario scoprire eventuali cycle slips nei dati.

Dopo aver fissato le epoche nelle quali è necessario un ricalcolo delle ambiguità, è possibile risolverle a valori reali: utilizzando la decomposizione di Schur si ricavano le sole ambiguità a valori reali. Questi risultati, assieme alla loro matrice di varianza covarianza sono utilizzati come ingresso approssimato nel metodo *Lambda*, utilizzato per la ricerca delle ambiguità intere. La stima della soluzione fix è ottenuta dopo aver rimosso il vettore dei bias dal vettore delle osservazioni.

L'algoritmo lavora in linguaggio Fortran90. Considerare la correlazione nel tempo richiede l'uso di grandi matrici, anche se sparse. Allo scopo, le matrici sono state memorizzate nel formato CSR (Compact Sparse Row).

Si pensi ad esempio che quindici minuti di dati ad un secondo, in doppia precisione (8 byte), di un rilievo a singola frequenza GPS, produrrebbero una matrice disegno di circa 120 Mbyte. Scrivendo questa matrice nel formato CSR l'occupazione si riduce a circa 1 Mbyte.

Le operazioni matriciali di somma, moltiplicazione, trasposizione ed inversione, che sono normalmente molto onerose, sono estremamente rapide, considerando adeguatamente la loro natura sparsa. Per dare un'idea del miglioramento occorre sottolineare che, in applicazioni pratiche, senza usare la natura sparsa delle matrici, sono necessarie molte ore di calcolo di un moderno personal computer. Siccome i tempi di CPU richiesti per l'inversione di una matrice $n \times n$, senza particolari cautele, sono dell'ordine di n^3 , un'analisi di qualche ora di dati reali è praticamente impossibile.

Applicando le procedure idonee a memorizzare ed a risolvere sistemi sparsi, i tempi di calcolo si riducono ad alcuni secondi o ad alcuni minuti, in ogni caso più che accettabili. (Mussio, Benciolini, 1984) (Saad, 2000).

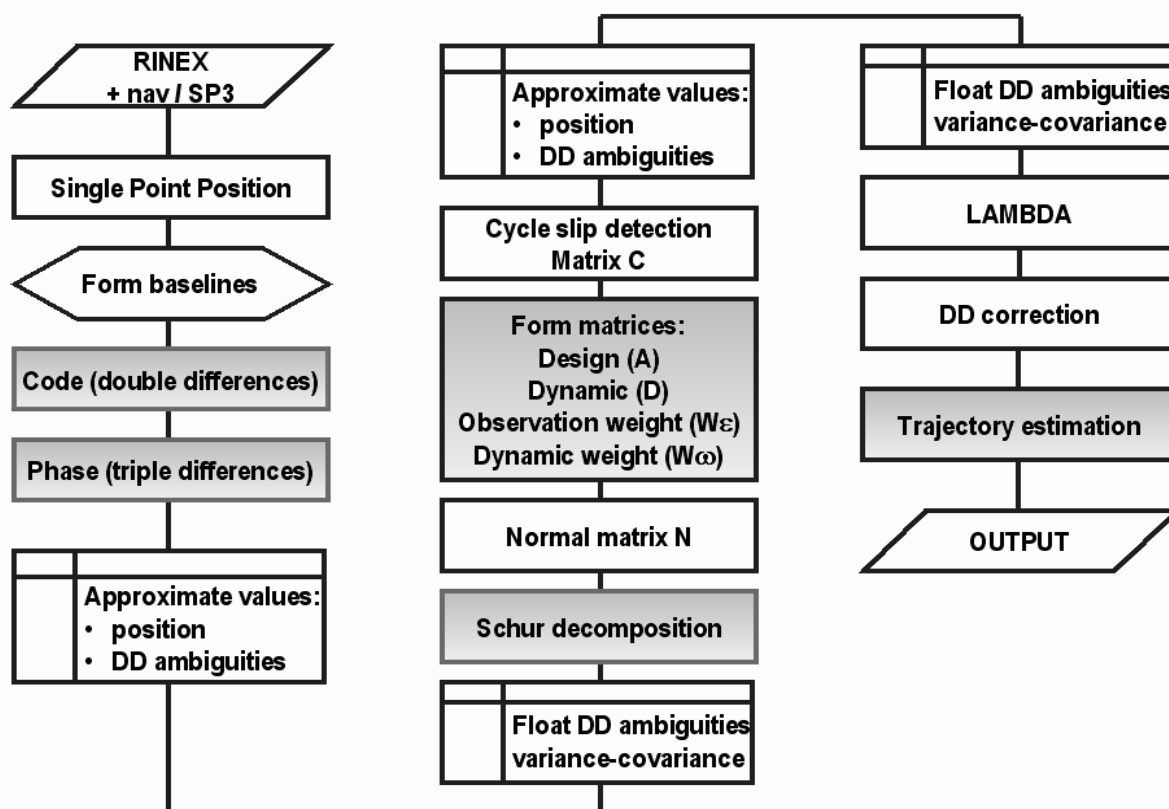


Fig. 2 Diagramma di flusso di GAS. Il vincolo sulle basi può essere imposto nei blocchi in grigio.

I risultati ottenuti

In alcuni passi dell'algoritmo è possibile imporre dei vincoli inerenti l'interdistanza tra le basi, col vantaggio principale di irrobustire il fissaggio di ambiguità. Vedremo invece che non migliora di molto la precisione delle basi.

Consideriamo un vettore di antenne costituito da tre antenne disposte sui vertici di un triangolo equilatero orizzontale. Le lunghezze delle basi sono note e vincolate.

Vogliamo comprendere qual'è l'effetto dei vincoli delle lunghezze sulla precisione delle basi e, di conseguenza, sugli angoli di assetto.

Con le ipotesi a priori che le tre basi abbiano uguale lunghezza (2 m) e precisione ($\sigma = 1$ cm nelle tre componenti), se il vincolo non è imposto otteniamo sqm di 0.32 gon per i tre angoli di assetto.

Vincolando le basi con $\sigma = 1$ mm, la rete simulata è caratterizzata da un piccolo miglioramento nella precisione orizzontale, ma solo nella direzione delle basi, mentre la precisione verticale risulta immutata. Ciò è dovuto al fatto che il triangolo giace su un piano orizzontale. In pratica è migliorata solo la precisione dell'angolo "drift" ottenendo in simulazione uno sqm di 0.14 gon.

		non constrained				constrained			
		σ_E	σ_N	σ_h	σ_{base}	σ_E	σ_N	σ_h	σ_{base}
C/A	DD	0,45	1,07	1,02	0,41	0,10	1,16	1,05	0,02
L1	TD	0,010	0,020	0,025	0,010	0,001	0,008	0,026	0,0003
L1	DD float	0,011	0,010	0,030	0,012	0,001	0,007	0,011	0,0003
L1	DD fix	0,003	0,007	0,009	0,003	0,001	0,006	0,010	0,0003

Tab. 1 Prova statica: deviazione standard delle coordinate stimate [m]
Due minuti di osservazioni singola frequenza ad intervallo di un secondo. La base è di 50 m approssimativamente in direzione E – O.

Lo sqm delle coordinate è stato valutato anche in una prova statica con dati reali, comparando i risultati ottenuti con e senza il vincolo. In questo caso è stata trattata un'unica base di circa 50 m,

approssimativamente in direzione E - O, in cui il vincolo influenza principalmente la componente est. Il trattamento è stato compiuto in cinque passi: punto singolo (in tal caso non si possono imporre vincoli), differenze doppie di codice, differenze triple di fase, differenze doppie di fase float, differenze doppie di fase ad ambiguità fissate. Ognuno di questi ultimi passi è stato calcolato con o senza il vincolo di base. I risultati sono visibili in Tab.1. Sono stati valutati gli sqm delle posizioni (tre minuti di dati ad un secondo) e si nota come la precisione sia migliore nella componente Est, come è evidente anche dalla dispersione dei risultati visibile in Fig. 3.

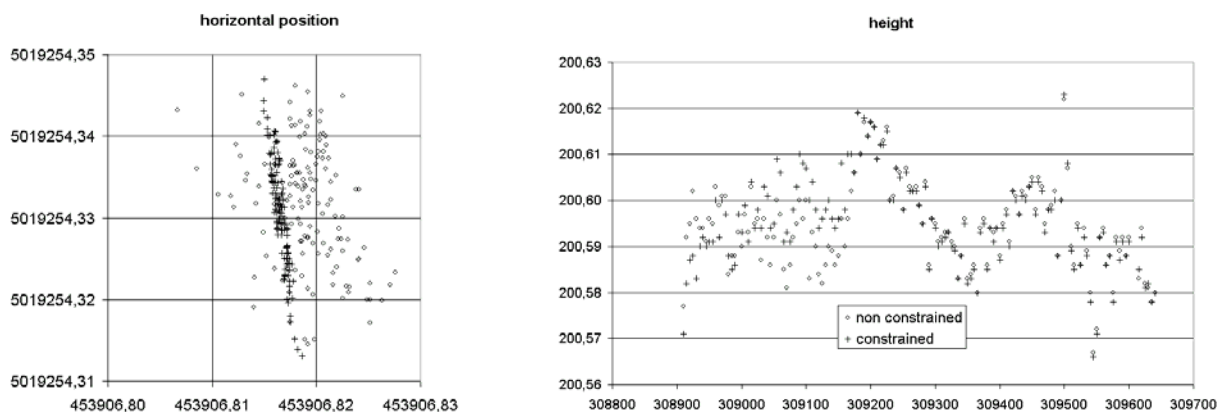


Fig. 3 Prova statica: posizione orizzontale e verticale. Le croci rappresentano la soluzione vincolata, i cerchi quella libera.

Dopo la prova statica, si sono condotte due prove cinematiche. I dati utilizzati allo scopo sono provenienti da due sistemi di rilevamento mobile. Il primo è un veicolo equipaggiato da tre antenne GPS e da altri sensori (camere, inerziale, odometro), il secondo è relativo ai dati di una barca fornita a poppa e a prua di due antenne GPS e da altri sensori batimetrici.

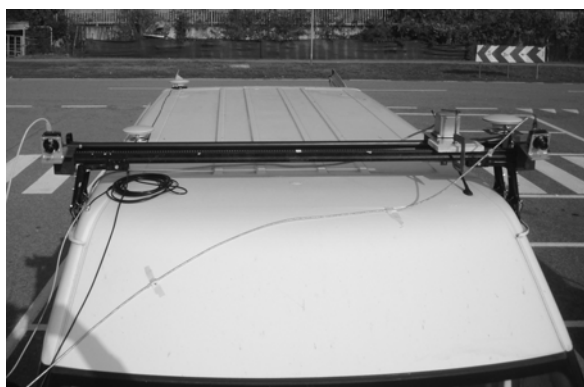
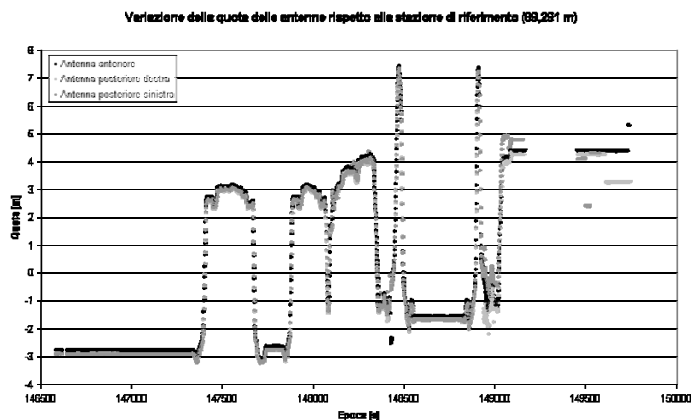


Fig. 4 Andamento altimetrico delle 3 antenne cinematiche montate sul veicolo rilevatore

In entrambi i casi si sono condotte le stesse prove con due software commerciali trattando separatamente i dati delle singole antenne rispetto ad una stazione master a terra. Si sono ricavati risultati identici a livello centimetrico quasi ovunque. Ciò che il termine “quasi” distingue, sono essenzialmente i salti di fase presenti e molto numerosi, specie sui dati provenienti da una antenna del furgone. Il trattamento commerciale evidenzia un recupero molto più lento dei cycle slip, con valori delle coordinate per nulla verosimili. Il trattamento GAS invece, in molti casi, non presenta scollamenti od al massimo riprese della traiettoria che avvengono in poche epoche di misura. Proprio nel caso del veicolo rilevatore (Fig. 4), dove il segnale era molto interrotto non sono evidenti grandi variazioni di quota per le tre antenne, si sono comunque raggiunte precisioni finali

millimetriche, con sqm medi di circa 5 mm indistintamente sia nelle tre coordinate che per le tre antenne.

Conclusioni

Le misure GPS cinematiche soffrono il problema della robustezza, particolarmente importante in ambienti ove è facile perdere il contatto con i satelliti (foreste, zone urbane ecc). La soluzione cinematica delle ambiguità può essere migliorata, a tale riguardo, aggiungendo delle ipotesi dinamiche dell'oggetto in moto e dei vincoli fra i parametri.

Il software utilizzato allo scopo è stato progettato per trattare osservazioni GPS a singola frequenza, su basi corte (2-10 km) e può elaborare i dati in approccio multibase, permettendo di vincolare la lunghezza di base tra le antenne. L'approccio minimi quadrati seguito permette di imporre vincoli statici alle osservazioni cinematiche. Imponendo i vincoli nel trattamento cinematico GPS, migliora la robustezza del sistema, la percentuale di fissaggio dei cycle slip e la precisione con la quale si stimano eventuali drift. L'effetto principale dei vincoli è quindi la robustezza del sistema rispetto ai cycle slips, sebbene la precisione globale del sistema stesso non migliori di molto.

Nota: Il presente lavoro è in parte stato presentato da Roggero (2006); in parte deriva da una tesi di laurea dell'Ing. Fornaia di cui è stato relatore il Prof. Manzino.

Bibliografia

- Mussio L., Benciolini B., (1984) *Algoritmi di riordino delle incognite nelle compensazioni ai minimi quadrati*. Ricerche di Geodesia Topografia e Fotogrammetria. Clup, Milano. Pagg 91-138.
- Teunissen P.J.G., de Jonge P.J., and Tiberius C.C.J.M. (1996), *The Volume of the GPS Ambiguity Search Space and its Relevance for Integer Ambiguity Resolution*, In Proceedings of ION GPS-96, Kansas City, Missouri, pp. 889-898.
- Teunissen P.J.G. (1997). *Closed form expressions for the volume of the GPS ambiguity search spaces*, In: Artificial Satellites, Journal of Planetary Geodesy, publ. in Affiliation with the space research centre of Polish Ac. of Sciences, 32(1), pp. 5-20.
- Teunissen P.J.G. (1997). *A canonical theory for short GPS baselines*, Part I-IV, Journal of Geodesy, Vol. 71, pp. 320-326, 389-401, 486-501, 513-525.
- Skaloud J. (1998), *Reducing The GPS Ambiguity Search Space By Including Inertial Data*, In Proceedings of ION-GPS-98, Nashville, Tennessee, pp. 2073-2080.
- Teunissen P.J.G. (1999). *The effect on GNSS ambiguity resolution of using an approximate weight matrix*, Artificial Satellites, Journal of Planetary Geodesy, publ. in Affiliation with the space research centre of Polish Ac. of Sciences, 34(2), pp. 59-64.
- Kailath T., Sayed A. H., Hassibi B. (2000). *Linear estimation*, Prentice Hall, New Jersey.
- Saad Y. (2000). *Iterative methods for sparse linear systems*, Second edition with corrections.
- Teunissen P. (2001). *Dynamic data processing*, Delft University Press.
- Colomina I., Blázquez M. (2004). *A unified approach to static and dynamic modelling in photogrammetry and remote sensing*, In: Altan, O. (ed.), Proceedings of the XXth ISPRS Congress, Istanbul, pp. 178-183.
- Albertella A., Betti B., Sansò F., Tornatore V. (2006). *Real time and batch navigation solutions: alternative approaches*, In: Bollettino SIFET, n. 2 - 2006.
- Roggero M. (2006). *Kinematic GPS Batch Processing, a Source for Large Sparse Problems*, In: Proceedings of VI Hotine-Marussi Symposium, Wuhan.
- Fornaia A. (2006). *Trattamento cinematico differenziale di dati GPS per la determinazione dell'assetto in applicazioni di navigazione geodetica*. Tesi di Laurea, Politecnico di Torino, Vercelli.