

INTEROPERABILITÀ E INTEGRAZIONE TRA RETI NRTK INTERAGENTI E INSERIMENTO NEI SISTEMI GEODETICI E CARTOGRAFICI UFFICIALI

Betti B.⁽¹⁾, Biagi L.⁽¹⁾, Passoni D.⁽¹⁾, Tornatore V.⁽¹⁾, Cina A.⁽²⁾, Pesenti M.⁽²⁾, Piras M.⁽²⁾, Barrile V.⁽³⁾, Meduri G.⁽³⁾

⁽¹⁾ DIAR – Sezione Rilevamento – Politecnico di Milano, Piazza L. Da Vinci, 32 – 20133 Milano
Tel. 02 23996502 – fax 02 23996530

⁽²⁾ DITAG – Politecnico di Torino, C.so Duca degli Abruzzi, 24 – 10129 Torino
Tel. 0115647630 – fax 0115647699

⁽³⁾ DIMET, Facoltà di Ingegneria - Università degli studi Mediterranea di Reggio Calabria
Tel. 0965 875301 – fax 0965 875247

Riassunto

Le reti permanenti regionali GNSS hanno avuto un grande sviluppo sul territorio nazionale negli ultimi anni, tuttavia vi sono ancora significative questioni aperte concernenti in particolare l'interazione tra reti contigue. Punto cruciale per ottenere una completa interoperabilità tra reti differenti è che esse siano inquadrare nello stesso sistema di riferimento. Inoltre è opportuno che le coordinate da fornire all'utenza finale siano nel sistema di riferimento ufficiale nazionale (IGM95).

Al fine di valutare quali siano i parametri e le trasformazioni ottimali tra le reti di stazioni permanenti regionali e la rete IGM95 è stata progettata e realizzata una campagna GNSS di rioccupazione di alcuni vertici IGM95 presenti sul territorio delle regioni Lombardia e Piemonte. L'obiettivo di questa campagna statica è duplice: valutare la deformazione della rete IGM95 e determinare i parametri di trasformazione tra i più recenti sistemi di riferimento.

Oltre all'acquisizione in modalità statica, sono state realizzate delle misure RTK il cui obiettivo era valutare su una lunga serie di dati cinematici l'affidabilità e la ripetibilità della stima delle coordinate dei punti ottenute mediante posizionamento in tempo reale con correzioni di rete, ove possibile sfruttando a pieno la doppia costellazione.

I risultati presentati in questo lavoro riguardano la rideterminazione delle coordinate dei vertici IGM95 ottenute a partire dalle coordinate IGb00 delle stazioni permanenti regionali stimate congiuntamente per le due reti. In particolare, in questo primo studio, sono stati determinati i parametri di trasformazione tra il sistema di riferimento IGb00 e IGM95.

Abstract

Regional GNSS Networks have had a big development on our national territory in the last years, but there still remain important open problems particularly regarding the interaction between adjacent networks. The main aspect of the interoperability between networks is that of the reference system. The networks have to be defined in the same reference system. Besides it is appropriate to supply the users with final coordinates that are in the official Italian reference system (IGM95).

To define the best transformations between regional networks of permanent stations and the IGM95 network a measurement campaign has been made, occupying the same IGM95 vertices in Lombardy and Piedmont. The aim of this project is twofold: firstly to estimate the deformation of the IGM95 reference system and secondly to define the transformation parameters between the most recent reference systems. The results shown in this paper concern the determination of the coordinates of the IGM95 vertices obtained using the IGb00 coordinates of the regional permanent stations. In particular in this first study the transformation parameters between IGb00 and IGM95 have been estimated.

1. Introduzione

Nel febbraio 2007 è stata organizzata una campagna di rioccupazione di alcuni vertici IGM95 presenti sul territorio delle regioni Lombardia e Piemonte, realizzata grazie alla collaborazione tra il Politecnico di Milano, il Politecnico di Torino e l'Università di Reggio Calabria.

Si è scelto di rilevare le coordinate di alcuni punti IGM95 in Piemonte e Lombardia in quanto su entrambe le regioni sono operative reti di stazioni permanenti per posizionamento RTK. L'obiettivo primario della campagna è quello di stimare la posizione di alcuni vertici IGM95, con l'ausilio delle reti di stazioni permanenti GNSS per il calcolo della deformazione della rete statica IGM, definendola nel sistema IGB00. Oltre all'acquisizione statica si è scelto di registrare contemporaneamente le soluzioni NRTK (Network RTK) al fine di disporre di un set dati su cui effettuare analisi statistiche sulla qualità delle misure in modalità NRTK.

2. Campagna GNSS il rioccupo di alcuni vertici IGM95

2.1 Criteri di scelta dei punti IGM95

La scelta dei punti da occupare è stata effettuata tenendo conto dei seguenti criteri:

- Interdistanza tra i punti IGM95 da rilevare circa 40 Km, pari ad un punto per ogni foglio 1:100000;
- punti baricentrici alle maglie individuate da tre stazioni permanenti con distanza media tra punti rilevati e stazioni non superiore ai 30-40 km;
- nelle zone di confine tra Piemonte e Lombardia scelta di due punti per foglio 1:100000.

Si è deciso di infittire il numero di punti da rilevare, nelle zone di confine in quanto queste sono le più critiche per una effettiva interoperabilità tra reti NRTK appartenenti a regioni differenti.

Per quanto riguarda il tipo di materializzazione del punto, sono stati scelti esclusivamente punti la cui materializzazione fosse stata realizzata mediante chiodi topografici e fosse tale da consentire la messa in stazione mediante treppiede.

Dalla campagna di rilievo sono stati esclusi i punti IGM95 lungo i confini a nord delle due regioni e al confine est della Lombardia per l'impossibilità di rispettare i criteri enunciati in precedenza, in particolare il limite della distanza media di ciascun punto dalle stazioni permanenti. Per ragioni analoghe, anche se opposte, sono stati scelti due punti non appartenenti né al Piemonte né alla Lombardia ma a distanza ragionevoli dalle stazioni permanenti del Piemonte o della Lombardia. Sulla base dei criteri precedentemente enunciati sono stati selezionati 45 punti di cui 21 in Lombardia, 22 in Piemonte, 1 in Valle d'Aosta ed 1 in Emilia-Romagna. Anche le coordinate dei punti IGM95 al di fuori delle regioni Piemonte e Lombardia sono state ottenute sia in modalità statica che cinematica rispetto a stazioni permanenti lombarde e piemontesi.

In Figura 1 sono indicati i punti scelti e le stazioni permanenti utilizzate; l'area complessiva coperta dal rilievo è di circa 63000 Km² con una densità pari a un punto ogni circa 1400 km².

Le stazioni permanenti scelte per l'elaborazione appartengono alle reti RTK della regione Lombardia (gestita da IREALP - Istituto di Ricerca per l'Ecologia e l'Economia Applicate alle Aree Alpine) e del Piemonte (gestita dal laboratorio di DITAG, Politecnico di Torino).

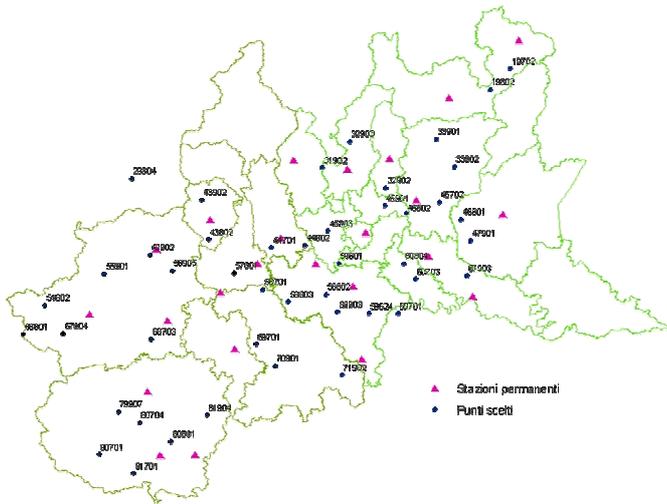


Figura 1 – Punti IGM95 scelti e stazioni permanenti utilizzate per l'elaborazione statica

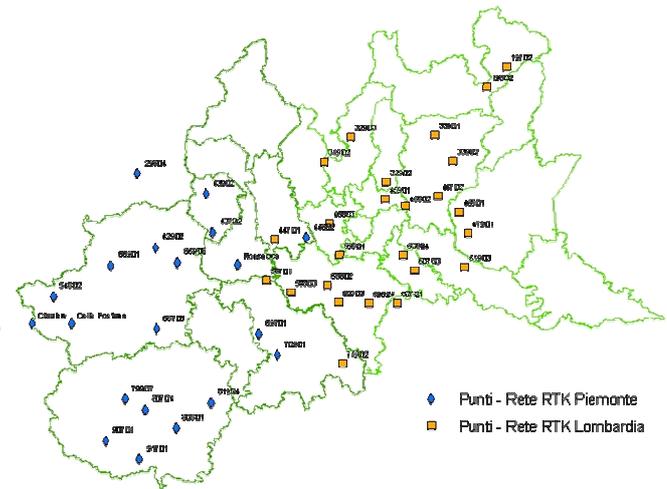


Figura 2 – Punti rilevati in NRTK usando la rete di stazioni in Lombardia e Piemonte

2.2 Campagna di rilievo statico

Le squadre coinvolte nel rilievo sono state in tutto sei, dotate dei seguenti strumenti GNSS:

- n° 2: ricevitore LEICA Gx1230 GG; antenna LEICA AX1202 GG;
- n° 2: ricevitore TOPCON Legacy E, antenna TOPCON PG_A1;
- n° 1: ricevitore TOPCON GB500, antenna TOPCON PG_A1;
- n°1: ricevitore LEICA GX1230, antenna LEICA AX1230.

Tutti gli strumenti sono a doppia frequenza ed in grado di acquisire sia satelliti GPS che GLONASS.

Il rilievo statico è stato impostato secondo le seguenti modalità:

- Stazionamento con treppiede sul punto da rilevare e messa in stazione con piombino ottico.
- Intervallo di campionamento dati: 1 sec.
- Durata sessione di misura: 3 ore.
- Acquisizione di satelliti GPS e GLONASS.
- Misura dell'altezza dello strumento (verticale, riferita al BAM) all'inizio e alla fine della sessione di misura.
- Cut-off: 0°.

Dei 45 punti IGM95 scelti, 40 sono stati rilevati durante la campagna del febbraio 2007, per i rimanenti 5 punti sono stati utilizzati i dati acquisiti durante una precedente campagna. La distanza tra i punti e le SP rispetta quanto prescritto, tranne il punto di Tiolo per il quale la distanza dalla stazione GPS di Lecco è pari a 86 Km, che risulta essere anche il valore massimo.

2.3 Rilievo cinematico

Sui 45 punti IGM95 selezionati, è stato eseguito contemporaneamente anche un rilievo cinematico anch'esso della durata di tre ore. I dati sono stati acquisiti in continuo, in modalità traiettoria, con registrazione del valore di posizione ogni secondo. Il rilievo è stato effettuato in modalità NRTK (Network RTK), con ricezione del messaggio di rete per le osservabili di fase provenienti dalla rete di stazioni GNSS permanenti della regione Lombardia e dalle stazioni solo GPS del Piemonte. Lo schema dei punti rilevati e il tipo di rete utilizzata sono indicati in Figura 2.

Il rilievo è stato svolto seguendo le seguenti indicazioni:

- Correzioni differenziali via Internet
- Formato di trasmissione dati: RTCM 2.3 (strumenti Topcon) ed RTCM 3.0 (strumento LEICA GX1230);

- Soluzioni NRTK usate: VRS (Virtual reference Station), MAX (Master-Auxiliary);
- Registrazione di tutte le soluzioni (fixed, float, stand-alone);
- Cut-off: 10°.

Molti punti sono stati rilevati acquisendo sia satelliti GPS che GLONASS tranne quelli situati nella regione Piemonte in cui il servizio di correzione differenziale di rete GLONASS non era disponibile e alcuni punti in Lombardia per problemi di ricezione. Il totale dei punti completamente fruibili è di 36, di cui 24 in Lombardia e 12 in Piemonte.

3. Elaborazione del rilievo statico

L'elaborazione del rilievo statico è stata effettuata utilizzando il software commerciale LGO (Leica Geo Office) di Leica Geosystems (versione 5), in cui sono stati importati i parametri relativi di calibrazione delle antenne. Ciascun rover è stato elaborato rispetto a tre stazioni GPS permanenti in modalità single-base: le basi così ottenute sono state successivamente compensate per ottenere il valore di posizione preso come riferimento.

L'elaborazione è stata eseguita secondo i seguenti criteri:

- Cut-off: 10°
- Modello troposferico: Hopfield
- Costellazioni utilizzate: tutti i punti sono stati elaborati utilizzando solo satelliti GPS; inoltre i punti per i quali si dispone sia per il rover che per le tre stazioni permanenti di osservazioni sia GPS che GLONASS, è stata effettuata anche una elaborazione GPS+GLONASS
- Utilizzo di effemeridi precise sia GPS che GLONASS, scaricate dal sito dell'IGS (<http://igsceb.jpl.nasa.gov/>)
- Frequenza di elaborazione: L3 (ionofree).

Alle SP sono state assegnate coordinate nel sistema di riferimento Igb00 ottenute tramite una compensazione congiunta (effettuata alla data del 15 gennaio 2006) in cui sono state considerate sia le stazioni permanenti della rete RTK lombarda che piemontese. La scelta del sistema Igb00 è stata fatta in vista del confronto tra le coordinate dei punti rilevati durante la campagna statica e le coordinate ottenute dal rilievo cinematico (ottenute, al tempo del rilievo, proprio in Igb00), avente come scopo la valutazione di affidabilità e ripetibilità di queste ultime.

Sviluppo futuro del lavoro sarà la compensazione delle basi elaborate relative a ciascun punto assegnando alle stazioni permanenti coordinate espresse nel sistema di riferimento IGS05.

Al termine dell'elaborazione e della compensazione delle basi ottenute, sia per la modalità solo GPS che per la modalità GNSS, è stato effettuato un confronto tra la lunghezza delle basi elaborate e la corrispondente lunghezza delle basi compensate. Da questo confronto è emerso che per la quasi totalità dei 42 punti (per i quali è stato possibile fissare a intero il valore delle ambiguità), la differenza tra basi compensate ed elaborate è, in valore assoluto, inferiore ad 1.5 cm. Questo non accade per 3 punti (elaborati tutti in modalità solo GPS), Fellizzano, Campiglia Cervo e Carignano. In tutti e tre i casi la base per cui il valore di 1.5 cm è stato superato è quella rispetto alla stazione GPS di Crescentino, anche se apparentemente da un'analisi di qualità effettuata con il programma TEQC, i dati provenienti dalla stazione non presentano particolari problemi.

In Tabella 3 sono riassunti i risultati ottenuti dal confronto tra basi compensate ed elaborate sia per le elaborazioni fatte utilizzando solo le osservazioni GPS che per le elaborazioni fatte utilizzando congiuntamente satelliti GPS e GLONASS, i punti elaborati in quest'ultima modalità sono in tutto 15.

	media [m]	sqm [m]
GPS (42 punti)	0.0008	0.0069
GPS+GLONASS (15 punti)	-0.0001	0.0033

Tabella 3 – Confronto tra media e sqm della differenza tra la lunghezza delle basi compensate e di quelle elaborate, ottenute dall'elaborazione dei punti in modalità solo GPS e GPS+GLONASS

In tabella 4 per i 15 punti elaborati sia in modalità solo GPS che in modalità GNSS (GPS+GLONASS) sono indicate le statistiche delle differenze tra le coordinate compensate in IGB00 nei due casi.

	Δx	Δy	Δz
Media [m]	0.0002	0.0011	0.0006
Sqm [m]	0.0077	0.0024	0.0058
Max [m]	0.0133	0.0049	0.0133
Min [m]	-0.0094	-0.0028	-0.0109

Tabella 4 – Statistiche delle differenze tra le coordinate compensate IGB00 GPS e GPS+GLONASS

4. Calcolo parametri di trasformazione

La trasformazione tra sistemi di riferimento è sicuramente una operazione molto delicata in quanto se non fatta correttamente rischia di vanificare tutta l'accuratezza e la precisione delle soluzioni ottenute. Solitamente tale operazione avviene usando 7 o 14 parametri. In entrambi i casi, come è noto, il calcolo dei parametri avviene mediante l'utilizzo di coppie di punti noti in entrambi i sistemi (IGM95 – IGB00) e nel caso dei 14 parametri sono necessarie anche le velocità, nel presente lavoro non essendo disponibili stime di velocità, abbiamo effettuato la stima di una trasformazione a 7 parametri sia mediante una soluzione a minimi quadrati (LS) sia utilizzando un metodo robusto (LS pesato).

I parametri di trasformazione sono calcolati utilizzando la seguente relazione di similarità:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{ETRF\ 2000,89} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} + (1+k) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{IGb00} + \begin{bmatrix} 0 & r_z & -r_y \\ -r_z & 0 & r_x \\ r_y & -r_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{IGb00} \quad [1]$$

Utilizzando la totalità dei punti doppi IGM95 a disposizione, è possibile calcolare i parametri, ma occorre effettuare una analisi statistica per definire l'eventuale presenza di *outlier* nei dati (*data snooping*) e la precisione dei parametri stimati, attraverso la stima della matrice di varianza-covarianza C_{xx} dei parametri.

Definendo un livello di significatività del 5%, il test del residuo normalizzato deve verificare quanto segue:

$$w_i = \frac{v_i}{\sigma_{v_i}} < 1.96 \quad [2]$$

In relazione a questo test e tenendo conto dei valori massimi degli scarti, sono stati esclusi 4 punti da un totale di 40. Dalla prima analisi dei rimanenti punti, e sottraendo un termine costante per evitare problemi di malcondizionamento delle matrici, i parametri stimati con le relative precisioni sono:

T_x	-0.2920	σ_{T_x}	0.0053765
T_y	0.2967	σ_{T_y}	0.0053467
T_z	0.2409	σ_{T_z}	0.0053273
R_x	-4.2244049e-008	σ_{R_x}	8.975734e-008
R_y	-7.3069461e-008	σ_{R_y}	1.18413793e-007
R_z	-1.3331508e-007	σ_{R_z}	7.8290066e-008
k	-1.1819048e-007	σ_k	5.803414894e-008

Tabella 5 – Parametri di trasformazione e relativi sqm stimati con LS

Il massimo valore assoluto dello scarto risulta compreso nei 10 cm. Il calcolo dei parametri è stato anche eseguito utilizzando il metodo robusto dalla ristima dai pesi, adottando come funzione peso quella proposta da Huber, vale a dire:

$$w = (\max(1, \text{abs}(r))^{-1} \quad [3]$$

dove

$$r = \frac{v}{(\text{TC} \cdot s \cdot \sqrt{(1-h)})} \quad \text{con TC} = 1.345, \text{ h il vettore dei leveraggi definito da LS e } s = \frac{\text{MAD}(v)}{0.675}.$$

T_x [m]	-0.2963
T_y [m]	0.2931
T_z [m]	0.2351
R_x	-3.466710-008
R_y	-3.196403-007
R_z	-9.234864e-007
k	- 1.44461e-007

Tabella 6 – Parametri di trasformazione stimati con LS pesato

5. Conclusioni

La campagna di misura descritta nel presente lavoro ha permesso di ottenere un buon set di dati sul quale poter effettuare analisi statistiche sia sul posizionamento statico che cinematico. È stato inoltre effettuato il calcolo dei parametri di trasformazione da IGB00 a IGM95, con una buona precisione e con una buona congruenza dei risultati determinati applicando le due diverse modalità di stima. Si prevede di determinare in un prossimo lavoro anche la trasformazione tra il sistema IGS05 e IGM95. L'analisi del posizionamento "lungo" cinematico ha condotto ad interessanti risultati, che verranno riportati all'interno di una monografia riguardante tutto il progetto PRIN05 che è in preparazione.

Bibliografia

- Barbarella M., Gandolfi S., Zanutta A., Cenni N., *Tecniche per l'inquadramento di reti di stazioni permanenti regionali per il posizionamento in tempo reale*, Atti del convegno SIFET Arezzo 2007, ISBN 88-901939-4-8 su CD.
- Biagi L., Crespi M., Manzino A., Sansò F., *I servizi di posizionamento basati su reti di stazioni permanenti GNSS*, Bollettino SIFET n°1, pagg 29-59, 2006.
- Biagi L. Sansò F. eds, AAVV, *Il Servizio di Posizionamento in Regione Lombardia e la prima sperimentazione sui servizi di rete in tempo reale*, Bollettino SIFET n°3, pagg. 71-90, 2006.
- Huber, P.J. (1981), *Robust Statistics*, New York: Wiley.
- Radicioni F., Stoppini A., *Applicazioni in post-processing e in real-time su reti locali di stazioni permanenti GPS/GNSS*, Atti della 9^a conferenza ASITA, Catania 2005, pagg. 1715-1720, 2005

Ringraziamenti

Il lavoro è stato svolto all'interno del PRIN05, dal titolo "Reti di stazioni permanenti GPS per il rilievo in tempo reale in impieghi di controllo e emergenza" con coordinatore nazionale prof. Maurizio Barbarella. Il gruppo di lavoro intende ringraziare tutti coloro che hanno collaborato al fine del compiere tutte le attività richieste da tale lavoro, in particolare l'IGM per aver fornito il materiale geodetico necessario e IREALP (Istituto di Ricerca per l'Ecologia e l'Economia Applicate alle Aree Alpine) che ha messo a disposizione il servizio di rete della regione Lombardia.