

RIPETIBILITÀ E INTEROPERABILITÀ NELLE MISURE GPS STATICHE

Vittorio Casella ⁽¹⁾, Marica Franzini ⁽¹⁾, Barbara Padova ⁽¹⁾, Francesca Amisano ⁽²⁾

⁽¹⁾ DIET - Università degli Studi di Pavia, via Ferrata 1, 27100 Pavia
(vittorio.casella, marica.franzini, barbara.padova)@unipv.it

⁽²⁾ neolaureata - fra_ami@yahoo.it

Riassunto

Negli ultimi anni la sperimentazione sulle tematiche GPS è stata soprattutto focalizzata sull'analisi e la validazione di tecniche speditive per il rilevamento, con particolare riguardo al posizionamento NRTK. Ciononostante, gli autori ritengono che le tecniche "classiche" (in particolar modo quelle che coinvolgono un post-processamento dei dati), ritenute ormai spesso tecniche consolidate, presentino ancora alcuni elementi che richiedono ulteriori approfondimenti. Tra queste, il posizionamento relativo statico, usato per la misura delle reti geodetiche e per il monitoraggio. In questo ambito, esperienze maturate dagli autori nel corso degli anni hanno mostrato come la ripetibilità della misura di una baseline sia in realtà un argomento molto delicato a causa di sorgenti di errore non sempre adeguatamente tenute in considerazione.

La presente nota vuole condurre uno studio sistematico di queste fonti di errore allo scopo di quantificarne gli effetti sulla determinazione della baseline.

Abstract

In recent years, research work on GPS has been largely focused on the analysis and validation of fast surveying techniques, especially with regard to NRTK. Nevertheless, the authors believe that the "classical" post-processed, relative positioning still has some items that require further investigation. This technique is used for the measurement of geodetic networks and monitoring. In this context, the experiences of the authors have shown that the repeatability of a baseline is actually a very sensitive issue due to the presence of some error sources that are not always adequately taken into account.

This note aims to lead a systematic study of these error sources in order to quantify their effect on the determination of a baseline.

1 Introduzione

Le tecniche GPS statiche sono certamente molto ben conosciute dal punto di vista teorico e anche sperimentale. Tuttavia, esperienze maturate dagli autori nel corso degli anni hanno mostrato come la ripetibilità della misura di una baseline sia in realtà un argomento molto delicato a causa di sorgenti di errore non sempre adeguatamente tenute in considerazione: l'errore di messa in stazione; l'errore di misura dell'altezza strumentale; la compatibilità fra antenne di tipo diverso; le differenze che si riscontrano quando software di calcolo diversi vengono applicati agli stessi dati.

La presente nota descrive uno studio sperimentale di queste fonti di errore che è stato svolto nell'ambito della tesi di laurea di una delle autrici. L'ambito considerato è quello di una base molto corta, di circa 100 m; lo scopo di tale scelta è annullare di fatto alcune sorgenti di errore consentendo di metterne a fuoco altre. Sono stati materializzati due vertici a circa 100 m l'uno

dall'altro e si è proceduto al loro rilievo utilizzando due coppie di strumenti GPS differenti: due Leica GPS1200 e due Trimble 5700. Sono state considerate tutte le possibili combinazioni (Leica con Leica, Trimble con Trimble e rilevamenti misti) fino ad arrivare ad un insieme di otto esperimenti differenti costituenti un ciclo di misure. Sono stati eseguiti quattro cicli di misura in giornate differenti.

I dati ottenuti sono stati post-processati con tre software GPS differenti: LGO di Leica Geosystems, TGO di Trimble e GNSS Solutions di Magellan; le elaborazioni sono state effettuate utilizzando il formato di interscambio RINEX e, dove possibile, anche i formati proprietari.

La sezione 2 illustra gli strumenti utilizzati, i programmi usati e le misure svolte sul campo. Le tre successive sezioni illustrano i risultati ottenuti per le misure acquisite con strumenti Leica, Trimble e strumenti misti.

2 Le misure e le elaborazioni

E' stata usata una coppia di ricevitori Leica GPS 1200 equipaggiati con due antenne identiche, del tipo AX1202 (nome NGS LEIATAX1202) e una coppia di Trimble 5700 equipaggiati con una antenna Zephyr (nome NGS TRM39105) e una Zephyr Geodetic (nome NGS TRM41249).

2.1 I software disponibili e le strategie di calcolo seguite

I dati acquisiti sono stati elaborati con tre programmi: Leica LGO ver. 6.0, Trimble TGO ver. 1.63, Magellan GNSS Solutions ver. 3.10.01; essi verranno in seguito indicati, talvolta, con LGO, TGO e GS.

Durante il calcolo delle basi è stato fatto tutto il possibile per eliminare sorgenti di errore o semplicemente cause di disomogeneità nel comportamento dei programmi. Anzitutto sono state calcolate con buona accuratezza le coordinate di uno degli estremi della base, misurando per un tempo sufficiente la base fra tale punto e la stazione GPS permanente PAVI. Le coordinate così ottenute sono state assegnate al punto, come *fixed*, durante il calcolo di tutte le basi.

Inoltre è stato verificato che l'uso delle effemeridi predette o precise è influente; la stessa cosa dicasi per i vari parametri che influenzano il calcolo della base, come ad esempio il modello troposferico: come previsto, tali aspetti si sono tutti rivelati influenti nel calcolo di una base così corta; va detto che la scelta di misurare una base di circa 100 m, è stata fatta proprio per rendere trascurabili molte sorgenti di piccole differenze.

Potremmo allora chiederci quali sorgenti di errore ci aspettavamo di vedere: gli errori di messa in stazione e di misura dell'altezza strumentale; gli errori accidentali di misura commessi dai ricevitori. Le analisi svolte hanno indicato la presenza di altre due sorgenti significative: errori attribuibili ai programmi, nel senso che programmi diversi, fatti lavorare sugli stessi dati, producono risultati differenti; altri errori dovuti presumibilmente alla costellazione e al segnale, come verrà mostrato meglio in un lavoro successivo.

Una volta calcolate le basi, le loro componenti, fornite da tutti i programmi rispetto al sistema di riferimento ellissocentrico detto ECEF, sono state convertite a un sistema di riferimento cartesiano localmente tangente, avente origine in uno degli estremi della base, quello di coordinate note. Tutti i risultati mostrati in seguito si riferiscono a tale sistema di riferimento.

2.2 Le misure di controllo

E' stato deciso di fare misure che consentissero di validare non solo la precisione ma anche l'accuratezza delle determinazioni GPS. Non è evidentemente facile misurare le componenti di una base con metodi topografici dunque si è optato per la misura della componente *u* e della lunghezza piana.

La prima è stata misurata con livellazione geometrica eseguita in andata e ritorno con livello elettronico Leica DNA03; il dislivello stimato è di -0,0360 m; l'errore di chiusura è risultato essere 0,4 mm. La lunghezza piana fra gli estremi della base misurata è stata misurata ripetutamente, con due diversi teodoliti elettronici, Leica 1201 e 1205, facendo stazione su entrambi i punti: tutte le misure effettuate coincidono, al livello del millimetro, e valgono 113,621 m.

2.3 La misure GPS

Sono stati materializzati due vertici, P1 e P2, alla distanza di circa 113 m, in una zona avente caratteristiche ottimali di ricezione. Le misure si sono svolte in 4 sessioni occupanti circa mezza giornata nelle date: 9 marzo mattina, 17 marzo, mattina e pomeriggio, 23 marzo pomeriggio. In ogni sessione sono stati eseguiti 8 esperimenti che consistevano nella misura della base, per 15 minuti, con diverse combinazioni di ricevitori e antenne, elencate nella Tabella 1. I dati sono stati acquisiti con epoche da 5 secondi e angolo di *cutoff* di 10°.

Nome esperimento	Ricevitore/antenna sul punto P1	Ricevitore/antenna sul punto P2
1	Leica1	Leica2
2	Leica2	Leica1
3	Trimble1	Trimble2
4	Trimble2	Trimble1
5	Leica1	Trimble1
6	Trimble1	Leica1
7	Leica1	Trimble2
8	Trimble2	Leica1

Tabella 1 – Elenco degli otto esperimenti eseguiti in ogni sessione

All'inizio e alla fine di ogni singolo esperimento veniva effettuata la misura dell'altezza strumentale. Purtroppo non è stata resa accidentale la messa in stazione dei cavalletti, cosa che sarebbe stata possibile sollevandoli e chiudendoli dopo ogni sperimento, a causa di un fraintendimento delle indicazioni avute da parte della laureanda che ha svolto le prove. Va detto tuttavia che tale prassi ci ha consentito in seguito di individuare diversi errori grossolani commessi durante la fase sperimentale. Bisogna anche notare che la messa in stazione cambia da una sessione all'altra dunque, per fare un esempio, gli otto esperimenti considerati nella Sez. 3 sono caratterizzati da 4 messe in stazione diverse.

2.4 La omogeneizzazione dei dati di calibrazione delle antenne

Una particolare attenzione è stata posta nella omogeneizzazione dei file di calibrazione delle antenne. E' stato deciso di inserire in tutti i tre programmi i dati forniti da NGS (lo statunitense *National Geodetic Service*). Gli autori hanno dovuto imparare a loro spese come anche questi aspetti elementari presentino molti problemi legati alle convenzioni: si rimanda ad articolo successivo per spiegare tutti i dettagli, ma si sottolinea che la buona compatibilità conseguita alla fine richiede un lavoro preliminare non banale e soprattutto richiede che si sappiano cose che, nella manualistica e nella letteratura, sono trattate poco e male.

3 Analisi delle misure compiute con strumenti Leica

Nella presente sezione vengono presi in considerazione gli otto esperimenti svolti con le antenne Leica, cioè i primi due esperimenti di ogni sessione, moltiplicati per le quattro sessioni. I dati sono stati scaricati dai ricevitori ed esportati in formati Rinex. Successivamente sono stati caricati nei tre software disponibili e le basi sono state calcolate. La Tabella 2 indica i risultati ottenuti con i tre programmi usando i dati acquisiti dagli strumenti Leica. Vengono riportati solamente i valori medi e gli sqm, per ragioni di spazio. Si indica inoltre la numerosità del campione usato per la stima.

	n°	Media			Sqm		
		<i>e</i> [m]	<i>n</i> [m]	<i>u</i> [m]	<i>e</i> [m]	<i>n</i> [m]	<i>u</i> [m]
LGO	8	-111,9431	19,4583	-0,0354	0,0014	0,0019	0,0032
TGO	8	-111,9423	19,4574	-0,0344	0,0017	0,0023	0,0028
GNSS	8	-111,9433	19,4582	-0,0373	0,0014	0,0020	0,0027

Tabella 2 – Analisi statistica delle otto misure eseguite con strumenti Leica

Per il SW Leica il range degli scarti planimetrici, non mostrato, è di 4,9 mm; gli sqm delle singole componenti planimetriche sono fra 1,5 e 2 mm; il valore medio è 1,7 mm. La componente altimetrica ha un range di 9 mm e un sqm di 3.2 mm. Gli altri due SW mostrano un comportamento, per quanto riguarda la variabilità accidentale, molto simile.

I valori medi sono utili per comprendere se, fra le soluzioni ottenuti con programmi diversi, esistano differenze sistematiche. I SW Leica e Trimble presentano differenze massime di 1 mm in tutte le componenti, certamente non significative. Il programma Magellan presenta uno scostamento maggiore per la terza componente, ma tale fatto è in sostanza dovuto al caso; nel seguito verrà mostrato il confronto fra la componente *u* misurata e quella vera, determinata con la livellazione geometrica, e si evidenzierà come i risultati di tutti i tre programmi siano centrati attorno al valore vero.

Va detto tuttavia che il programma GNSS ha evidenziato qualche problema: in due casi non è riuscito a calcolare la base e in due altri casi, non riportati nell'articolo, ha fornito risultati contenenti errori grossolani, cioè scostamenti rispetto al vero maggiori di un metro. I SW Leica e Trimble, al contrario, hanno sempre calcolato la base e fornito valori ragionevoli.

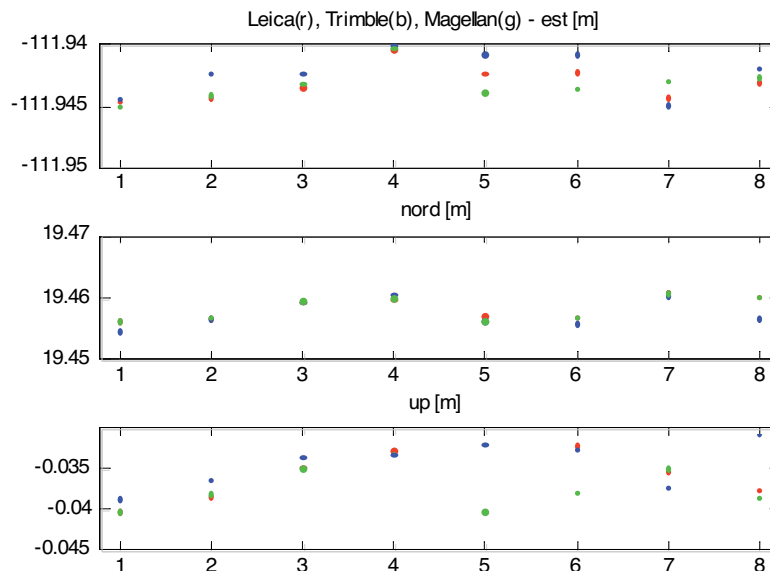


Figura 1 – Rappresentazione grafica delle basi misurate con strumenti Leica ed elaborate con i tre programmi considerati.

E' interessante visualizzare le varie determinazioni ottenute dai programmi, come riportato nella Figura 1. Essa indica l'andamento delle componenti est, nord e up delle 8 determinazioni. I risultati trovati dai vari programmi sono distinti con il colore. E' evidente l'accoppiamento a due a due delle soluzioni. E' evidente inoltre il fatto che i 3 programmi usati forniscano *soluzioni diverse*, nonostante i dati di input siano gli stessi. Tali differenze, significative ma limitate, sono probabilmente dovute alle diverse strategie di calcolo seguite e a problemi numerici. Sarebbe interessante verificare se queste differenze siano costanti oppure dipendano in qualche misura dalla lunghezza della base.

3.1 Differenze fra i programmi di calcolo

E' interessante calcolare i parametri media e sqm per le differenze fra le basi determinate dai diversi programmi. La Tabella 3 mostra tali valori per le differenze TGO-LGO e GS-LGO ed evidenzia che le soluzioni Leica e Trimble sono molto vicine tra loro, mentre le soluzioni Magellan sono leggermente più discostate.

	n°	Media			Sqm		
		<i>e</i> [m]	<i>n</i> [m]	<i>u</i> [m]	<i>e</i> [m]	<i>n</i> [m]	<i>u</i> [m]
TGO-LGO	8	0,0009	-0,0008	0,0010	0,0008	0,0014	0,0028
GS-LGO	8	-0,0001	0,0001	-0,0019	0,0010	0,0004	0,0035

Tabella 3 – Differenze fra le soluzioni ottenute dai vari programmi.

Consideriamo ora la Tabella 3 e la Tabella 2 e limitiamo la discussione alla componente *u*, per semplicità. Indichiamo con $\sigma_1 = 3.2$ mm lo eqm della componente *u* determinato dal SW Leica; indichiamo con $\sigma_2 = 2.8$ mm lo eqm della componente *u* determinato dal SW Trimble. Ci si aspetterebbe che lo eqm della loro differenza, σ_3 , fosse uguale alla somma nel senso della varianza,

cioè 4,3 mm, ma così non è in quanto la Tabella 3 riporta un valore di 2.8 mm. La spiegazione è nella correlazione esistente fra le grandezze sottratte.

La matrice di correlazione della vc a 6 componenti $(e_L, n_L, u_L, e_T, n_T, u_T)$, dove i pedici L e T significano evidentemente *Leica* e *Trimble*, risulta essere

$$\begin{pmatrix} 1 & 0.1746 & 0.7348 & 0.8692 & 0.3084 & 0.6615 \\ & 1 & 0.1330 & -0.1326 & 0.7961 & 0.2136 \\ & & 1 & 0.6759 & 0.3459 & 0.5905 \\ & & & 1 & 0.0143 & 0.7903 \\ & & & & 1 & 0.0209 \\ & & & & & 1 \end{pmatrix}$$

Figura 2 – Matrice di correlazione fra le determinazioni LGO e quelle TGO dei dati acquisiti con strumenti Leica.

ed evidenzia una forte correlazione fra le componenti omologhe, e_L con e_T , eccetera. In particolare la correlazione fra le due u vale $\rho_{12} = 0.59$. Ricordando la propagazione della varianza-covarianza per la differenza di due vc correlate si ha

$$\sigma_3^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2\sigma_{12}$$

Inserendo i dati si ottiene per σ_3 un valore *propagato* di 2.74 mm, in buon accordo con quello *stimato*, di 2.8 mm.

3.2 Confronto con le misure di controllo

E' stato effettuato anche in confronto fra le misure della base ottenute con GPS e quelle ottenute con metodi topografici classici.

		Media		Sqm	
	n°	u [m]	$d2$ [m]	u [m]	$d2$ [m]
LGO	8	0,0006	0,0007	0,0032	0,0013
TGO	8	0,0016	-0,0003	0,0028	0,0017
GNSS	8	-0,0013	0,0008	0,0027	0,0011

Tabella 4 – Differenze fra le basi calcolate e le misure di controllo per le misure Leica.

Le grandezze considerate sono la componente u della base e la sua lunghezza proiettata sul piano, indicata con $d2$. Per queste grandezze è stata formata la differenza con le quantità di controllo e i risultati sono riassunti nella Tabella 4, che conferma l'assenza di sistematismi.

4 Analisi delle misure eseguite con strumentazione Trimble

Nella presente sezione vengono analizzati i dati acquisiti dagli strumenti Trimble negli esperimenti denominati 3 e 4 nella Tabella 1.

		Media			Sqm		
	n°	<i>e</i> [m]	<i>n</i> [m]	<i>u</i> [m]	<i>e</i> [m]	<i>n</i> [m]	<i>u</i> [m]
LGO	5	-111,9431	19,4583	-0,0354	0,0014	0,0019	0,0032
TGO	5	-111,9439	19,4581	-0,0372	0,0020	0,0019	0,0044
GNSS	3	-111,9444	19,4576	-0,0353	0,0018	0,0030	0,0073

Tabella 5 - Analisi statistica delle otto misure eseguite con strumenti Trimble.

La Tabella 5 è analoga alla Tabella 2. La Tabella 6 è invece analoga alla Tabella 5. Una prima osservazione riguarda la numerosità delle misure, che è inferiore a otto. Purtroppo la laureanda che ha svolto le misure in campagna ha commesso un numero elevato di errori di misura dell'altezza strumentale. Noi abbiamo potuto accorgercene sfruttando il fatto (di per sé improprio) che i cavalletti non venissero sollevati dopo ogni esperimento ma solo dopo quelli di numero pari. Se il cavalletto resta in stazione insieme con la basetta, se si conosce l'altezza strumentale dell'esperimento precedente, se si conosce la geometria delle antenne e dei loro supporti, l'altezza strumentale dell'esperimento successivo può variare solo di piccole quantità accidentali; variazioni di maggiore entità indicano evidentemente errori grossolani nella misura dell'altezza e le osservazioni contenenti tali errori sono state scartate. Si fa notare inoltre che la numerosità delle determinazioni GS è ulteriormente ridotta perché il software in questione non è stato capace di determinare due basi che invece gli altri programmi hanno elaborato senza problemi.

		Media		Sqm	
	n°	<i>u</i> [m]	<i>d2</i> [m]	<i>u</i> [m]	<i>d2</i> [m]
LGO	5	0,0000	0,0013	0,0032	0,0019
TGO	5	-0,0012	0,0015	0,0044	0,0020
GNSS	3	0,0007	0,0019	0,0073	0,0019

Tabella 6 - Differenze fra le basi calcolate e le misure di controllo per le misure Trimble.

Per quanto riguarda gli errori accidentali, il confronto delle ultime tre colonne della Tabella 2 e della Tabella 5, limitato ai programmi LGO e TGO, mostra errori planimetrici comparabili. Per quanto riguarda l'altimetria, la figura relativa ad LGO è esattamente la stessa. TGO mostra un comportamento bizzarro: è meno rumoroso di LGO in quota quando elabora dati Leica; lo è di più quando elabora dati Trimble.

Per quanto riguarda gli errori sistematici, la Tabella 4 e la Tabella 6 evidenziano l'assenza di *bias* e la compatibilità statistica dei due insiemi di soluzioni.

5 Analisi delle misure eseguite con strumentazione mista

Nella presente sezione vengono analizzati i dati acquisiti da strumentazione mista negli esperimenti denominati 5, 6, 7 e 8 nella Tabella 1.

		Media			Sqm		
	n°	<i>e</i> [m]	<i>n</i> [m]	<i>u</i> [m]	<i>e</i> [m]	<i>n</i> [m]	<i>u</i> [m]
LGO	7	-111,9432	19,4578	-0,0358	0,0025	0,0020	0,0035
TGO	7	-111,9426	19,4575	-0,0350	0,0025	0,0015	0,0044
GNSS	7	-111,9437	19,4558	-0,0333	0,0019	0,0055	0,0038

Tabella 7 - Analisi statistica delle otto misure eseguite con strumenti misti

Gli errori accidentali sono leggermente più grandi di quelli riscontrati nei due precedenti scenari, ma riteniamo che le variazioni abbiano una natura puramente accidentale. Lo sqm per la componente *n* di GS è decisamente abnorme, invece, ed evidenzia che il programma è meno stabile degli altri. La Tabella 8 evidenzia infine la sostanziale assenza di sistematismi e tuttavia la minore qualità delle soluzioni GS.

		Media		Sqm	
	n°	<i>u</i> [m]	<i>d2</i> [m]	<i>u</i> [m]	<i>d2</i> [m]
LGO	7	0,0002	0,0007	0,0035	0,0024
TGO	7	0,0010	0,0000	0,0018	0,0025
GNSS	7	0,0027	0,0008	0,0038	0,0023

Tabella 8 - Differenze fra le basi calcolate e le misure di controllo per le misure effettuate con strumenti misti.

6 Conclusioni

E' stata misurata ripetutamente una base corta con 4 ricevitori diversi, che è stata elaborata con tre software differenti. E' stato evidenziato anzitutto che la buona compatibilità fra software diversi si ottiene solo uniformando le calibrazioni delle antenne, cosa non banale.

Inoltre, programmi diversi, fatti lavorare sugli stessi dati, producono risultati diversi e la differenza può arrivare a numerosi millimetri. Ciò ha sorpreso gli autori e richiederà ulteriori analisi, per basi più lunghe. Dei tre programmi considerati, quelli di Leica e Trimble si equivalgono, mentre quello di Magellan ha mostrato qualche problema di affidabilità. In conclusione la nota dimostra la compatibilità statistica delle varie misure fatte: indipendentemente da quali antenne si usino, indipendentemente da quale programma di calcolo si usi, le soluzioni oscillano attorno a valori identici, anche se l'entità dell'oscillazione è maggiore del previsto.

7 Bibliografia

- [1] Gandolfi, S., Stoppini, A., 2007. Capitolo 4 Definizione della tipologia e della qualità dei prodotti e dei servizi erogati, indicazioni in merito al trattamento dei dati da parte degli utenti. *Geomatics Workbooks, Volume 7, I servizi di posizionamento satellitare per l'e-government*. Ludovico Biagi, Fernando Sansò Editori, pp. 39-48. ISSN 1591-092X.
- [2] National Geodetic Survey web-site. <http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/> - ultimo accesso: ottobre 2009
- [3] Gerald L. Mader. GPS Antenna Calibration at the National Geodetic Survey - <http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/images/summary.html> - ultimo accesso: ottobre 2009.
- [4] PLazio.net web-site. <http://www.plazio.net/TGO/Adding%20an%20Antenna%20to%20TGO.htm> - ultimo accesso: ottobre 2009.