

ANALISI CON SOFTWARE SCIENTIFICI DI UNA RETE GNSS PER IL MONITORAGGIO DI DEFORMAZIONI STRUTTURALI

Guido FASTELLINI*, Fabio RADICIONI*, Aurelio STOPPINI*

* Università degli Studi di Perugia, D.I.C.A., Via G.Duranti 93 - 06125 Perugia
Tel. 075/5853765 - Fax 075/5853756 - E-mail topos@unipg.it

Riassunto

Nel presente articolo viene analizzata una rete GNSS realizzata per il monitoraggio delle deformazioni di due viadotti autostradali. Sulla rete è stata eseguita una misura iniziale di zero e successive campagne di misura a cadenza circa semestrale, con ricevitori a doppia frequenza GPS/GLONASS, in modalità statica.

Vengono qui analizzate in particolare le soluzioni ottenute con il software Bernese 5.0 per la misura di zero e una delle campagne successive, valutando l'effetto e la convenienza di diverse opzioni e modalità di calcolo, ed effettuando un confronto con le soluzioni ottenute con altri software.

Sono state inoltre sviluppate alcune procedure software che partendo dalle soluzioni Bernese 5.0 e rispettive matrici di covarianza effettuano analisi e test statistici finalizzati a verificare l'attendibilità o meno delle deformazioni rilevate dal confronto tra le soluzioni.

Il lavoro presenta i risultati ottenuti mediante le procedure sopra menzionate, eseguendo un confronto con quelli ottenuti da altri software a carattere tecnico comunemente utilizzati per applicazioni come quelle in oggetto.

Abstract

In the present paper a GNSS network set up for deformation monitoring of two motorway viaducts is analyzed. On such network, starting from January 2003, a first "zero" measure and further campaigns at intervals of about one semester have been performed, using GPS/GLONASS receivers in static mode.

In particular, the solutions obtained with Bernese 5.0 software for the zero measure and some of the further campaigns are here analyzed, evaluating the effect and convenience of different options and computation modes, and performing comparisons with solutions obtained by means of other software.

Some software procedures have been developed for performing statistical tests on Bernese 5.0 solutions and their covariance matrices, to verify the reliability of deformations obtained by comparison between solutions at different epochs.

The paper presents the results deriving from the above mentioned procedures, comparing them with solutions obtained with technical software commonly adopted for similar applications.

1. Introduzione

I software scientifici per il post-processamento di misure GNSS (si fa qui riferimento in particolare al Bernese 5.0) vengono di norma utilizzati per l'analisi di reti geodetiche di inquadramento di grandi dimensioni, dalla scala nazionale a quella regionale. Meno frequente è l'applicazione di questo tipo di software a reti locali di piccole dimensioni, quali ad esempio quelle di monitoraggio dei movimenti del suolo o di strutture in aree limitate.

Si ritiene tuttavia che le notevoli possibilità di personalizzazione e scelta di modelli e parametri che tali programmi offrono, unitamente all'accuratezza e robustezza delle soluzioni ottenute, siano ca-

ratteristiche particolarmente importanti in problemi come quello in oggetto. Vale quindi la pena sperimentare l'applicazione di software scientifici anche in ambiti come il monitoraggio delle strutture o del suolo, per valutare quali siano i settaggi e le strategie di calcolo più opportune in casi del genere, e se dall'impiego di tali software possa derivare un effettivo incremento dell'accuratezza e attendibilità dei risultati rispetto a quelli ottenibili con software a carattere tecnico e commerciale.

2. La rete oggetto della sperimentazione

La rete in oggetto è stata realizzata nel 2002 allo scopo di monitorare le eventuali deformazioni di due viadotti autostradali situati in Sicilia, e costruiti per esigenze di tracciato su un versante potenzialmente instabile. La rete GNSS si integra in un più complesso sistema di monitoraggio e controllo dei due viadotti comprendente mire a collimazione ottica, inclinometri e piezometri.

La rete GNSS comprende 6 vertici “fiduciali” ubicati in zone ritenute geologicamente stabili, e circa 40 vertici di controllo situati su spalle e fondazioni dei due viadotti e in corrispondenza delle teste degli inclinometri. Lo schema della rete è visibile nella figura 1: si nota come ogni vertice di controllo sia collegato a due vertici della rete fiduciale, realizzando uno schema modulare in cui nel corso del tempo è possibile, volendo, aggiungere o eliminare punti di controllo senza alterare in modo sostanziale la struttura della rete. La baseline più lunga della rete misura circa 1800 metri.

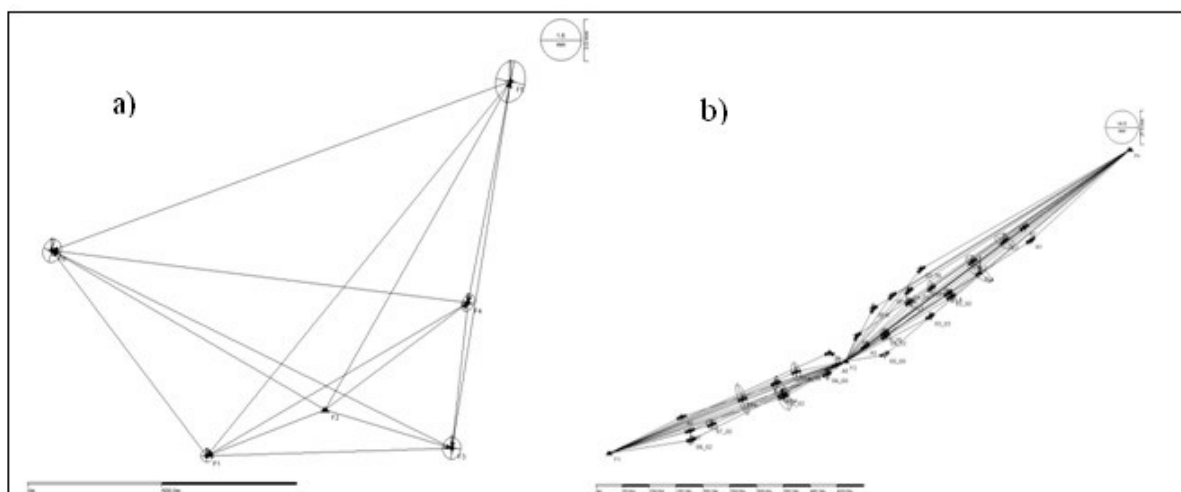


*Fig. 1 – Schema della rete di monitoraggio in oggetto, strutturata su due livelli:
a) rete fiduciale; b) rete dei punti di controllo*

I vertici sono materializzati tridimensionalmente con piastre e portantenna fissi in acciaio inox a centramento forzato, realizzati in modo da mantenere costante l'altezza dell'antenna in tutte le successive misure (fig. 2). Sulla rete è stata eseguita una misura di zero nel gennaio 2003, e successive campagne di misura a cadenza circa semestrale. In tutte le campagne sono stati utilizzati ricevitori GPS/GLONASS geodetici a doppia frequenza Topcon Legacy GGD/E con antenne LegAnt. Le misure sono state eseguite in modalità statica, con intervallo di campionamento di 5 secondi e angolo di cut-off in acquisizione di 5°. La durata minima delle sessioni è di 1 ora nella rete fiduciale e di 30 minuti per la rete dei punti di controllo.

Ai fini tecnici, l'elaborazione delle diverse campagne di misura viene effettuata con il software Geogenius Enterprise 2000, impiegando effemeridi precise GPS/GLONASS BKG. Il calcolo viene eseguito per singole baselines (soluzioni fixed L1) e successiva compensazione a rete, elaborando dapprima la sola rete fiduciale e quindi i punti di controllo. Verificata la stabilità della rete fiduciale e conseguentemente del datum, e calcolati gli ipotetici movimenti dei vertici di controllo per differenze di coordinate, la significatività o meno delle deformazioni viene valutata in base alla sepa-

razione delle regioni di confidenza al 95% relative alla misura di zero e alla campagna i-esima, e con i test di congruenza di Caspary (1987).



Fig. 2 – Esempi di materializzazione di un vertice fiduciale e di uno di controllo

3. Elaborazioni eseguite con Bernese 5.0

Il calcolo “di routine” della rete effettuato come sopra descritto con il software Geogenius ha sempre fornito risultati di soddisfacente accuratezza, ben interpretabili ai fini tecnici e ingegneristici. Si sono volute tuttavia testare nell’ambito in oggetto (rete locale di piccole dimensioni, con misure di durata relativamente breve) le potenzialità che può offrire un software scientifico quale il Bernese 5.0, di norma destinato al calcolo di reti di riferimento con baselines lunghe e sessioni di grande durata.

Allo scopo sono state prese in esame due campagne di misura: quella di zero (gennaio 2003) e una campagna successiva (febbraio 2005) nella quale si erano iniziati a evidenziare alcuni movimenti ritenuti significativi. Come nello schema di calcolo standard, l’elaborazione è stata effettuata separatamente per la rete fiduciale e per quella dei punti di controllo. L’elaborazione è stata eseguita con la sequenza prevista dal software Bernese; di seguito si specificano le opzioni utilizzate.

Per la rete fiduciale, dopo aver convertito nei formati Bernese i files Rinex delle osservazioni (con il programma RXOBV3) e le effemeridi precise BKG (con i programmi PRETAB e ORBGEN), ed aver provveduto alla sincronizzazione degli orologi (programma CODSPP), è stato effettuato il pre-processamento dei dati con i programmi SNGDIF (nella quale le baselines sono state formate con il criterio OBS-MAX) e MAUPRP (ricerca e correzione cycle slips). La stima della soluzione è stata effettuata con il programma GPSEST, determinando in modalità *sessione* una prima soluzione di tipo float, risolvendo quindi le ambiguità in modalità *baselines* e calcolando infine le coordinate definitive in modalità *sessione*. Per la risoluzione delle ambiguità è stata scelta la strategia QIF, con l’analisi di entrambe le frequenze L1 e L2, utilizzando un modello ionosferico globale (file .ION per le giornate in esame scaricati dal sito dell’Osservatorio Astronomico di Berna). Per la troposfera è stato adottato il modello di Saastamoinen e la mapping function di Niell.

La rete fiduciale è stata calcolata a minimi vincoli fissando le coordinate del solo vertice F2 (stessa opzione di calcolo adottata con Geogenius). In figura 3 si riporta un estratto dal file FIX.OUT relativo alla misura di zero, dal quale si può notare la elevatissima ridondanza tipica della soluzione di sessione e il basso valore della deviazione standard dell’unità di peso, appena superiore a un millimetro.

NUMBER OF OBSERVATIONS (PART 1):			

TYPE	FREQUENCY	FILE	#OBSERVATIONS

--			
PHASE	L3	ALL	83957

--			
TOTAL NUMBER OF OBSERVATIONS			83957

--			
A POSTERIORI SIGMA OF UNIT WEIGHT (PART 1):			

A POSTERIORI SIGMA OF UNIT WEIGHT :			0.00105 M

DEGREE OF FREEDOM (DOF)		:	83894
CHI**2/DOF		:	1.74

Fig. 3 – Estratto dal file FIX.OUT della rete fiduciale (misura di zero)

La tabella 1 riporta le coordinate della rete fiduciale (misura di zero) e le relative indeterminazioni, che sono risultate tutte inferiori al millimetro. Si noti che la componente altimetrica ha accuratezza praticamente equivalente a quella delle componenti planimetriche.

	Coordinate geografiche (WGS84)			Deviazione Standard		
	N (° ' ")	E (° ' ")	H(m)	σ_N (mm)	σ_E (mm)	σ_H (mm)
F1	38 1 59,922081	14 31 30,645921	206,5318	0,2	0,1	0,3
F2	38 2 5,494471	14 31 48,681083	216,8193	0,0	0,0	0,0
F3	38 2 0,937653	14 32 8,019731	278,3215	0,5	0,3	0,6
F4	38 2 18,305415	14 32 10,361035	216,9765	0,8	0,5	0,9
F5	38 2 44,734500	14 32 16,647607	65,4305	0,9	0,3	1,0
F6	38 2 24,281097	14 31 6,921929	77,6665	0,9	0,8	0,9

Tab. 1 – Coordinate e indeterminazioni rete fiduciale (misura di zero)

Verificata la stabilità della rete fiduciale nelle due epoche analizzate (v. par. 4), è stato effettuato il calcolo della rete dei punti di controllo. In tale rete sono stati considerati fissi i vertici fiduciali F1, F2 ed F4, rispecchiando in tale modo lo schema del rilievo che prevedeva 2 ricevitori tenuti fissi su due di tali vertici, mentre altri due ricevitori venivano posizionati via via sui punti di controllo.

Le opzioni di calcolo sono le stesse adottate per la rete fiduciale, con una sola eccezione: nella fase di formazione delle baselines (programma SNGDIF) le baselines sono state scelte manualmente con l'opzione "FROM FILE" in modo da aderire allo schema del rilievo sopra descritto.

Si sono ottenute accuratezze dell'ordine di 1-2 mm per i punti caratterizzati da visibilità satellitare ottimale (ad es. quelli situati sulle spalle dei viadotti e le teste degli inclinometri). Per i vertici di controllo con la peggiore visibilità (ad es. quelli materializzati sulle fondazioni delle pile) l'incertezza è maggiore, risultando comunque sempre inferiore al centimetro.

I risultati sono anche qui molto omogenei e le componente altimetrica risulta avere accuratezza molto vicina a quelle planimetriche.

4. Test statistici sulle soluzioni Bernese

Per verificare la stabilità della rete fiduciale è stato eseguito il test di congruenza di Caspary (1987) formulando la seguente ipotesi nulla: H_0 | I punti in comune alle due epoche sono stabili e hanno lo stesso valore atteso per le coordinate stimate.

Sono stati scelti tre livelli di significatività del test (90, 95 e 99%). L'esito del test prevede come noto due soli valori: 0 (ipotesi nulla verificata) e 1 (ipotesi nulla non verificata).

L'esecuzione del test richiede le coordinate stimate nelle due epoche e le rispettive matrici di varianza-covarianza, che per le soluzioni Bernese sono contenute nei files di output FIX.COV.

E' stata sviluppata una procedura in ambiente Mathcad® che partendo da tali valori esegue il test di congruenza di Caspary per tutti i punti della rete, ai tre livelli di confidenza sopra specificati, sia in coordinate geocentriche che in coordinate locali euleriane (con origine nel vertice F2 pressoché baricentrico per la rete).

Con i dati delle due campagne analizzate, l'ipotesi nulla è risultata verificata per tutti i vertici della rete fiduciale già al livello di confidenza del 90%.

Il diagramma che segue, ottenuto con il software Mathcad®, rappresenta graficamente l'esito del test in coordinate geocentriche per il vertice F1:

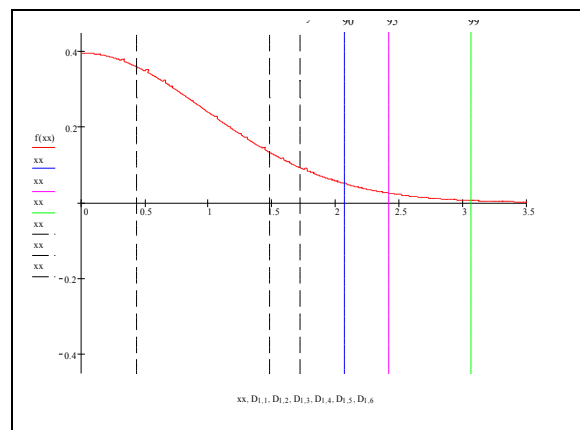


Fig. 4 – Test di congruenza per il vertice F1 della rete fiduciale

La stessa procedura di test è stata applicata anche alla rete dei punti di controllo. In questo caso si va alla ricerca dei vertici che *non* soddisfano l'ipotesi nulla con una o più componenti, indicando con alta probabilità la presenza di effettivi movimenti.

La maggior parte dei vertici sono risultati stabili, ma alcuni hanno evidenziato componenti di movimento significative. Si riporta ad esempio il grafico relativo al test sul punto S5_00 (testa di un inclinometro) dal quale si vede come i valori critici vengano ampiamente superati per la componente nord del movimento anche al livello del 99% :

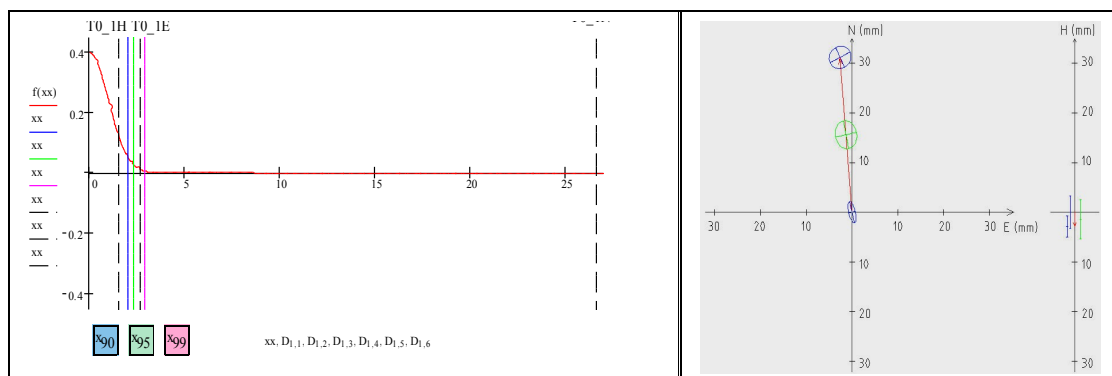


Fig. 5 – Test di congruenza e vettore spostamento per il vertice S5_00 della rete di controllo

Lo spostamento evidenziato per il punto S5_00 dal confronto tra le due soluzioni risulta in effetti di circa 3 cm verso nord (direzione di valle del pendio) ed è perfettamente coerente con le rilevazioni effettuate con l'inclinometro nello stesso punto.

5. Confronto con risultati ottenuti con il software Geogenius

E' stato effettuato un confronto tra le coordinate ottenute dalle soluzioni Bernese (vedi par. 3) e quelle delle soluzioni Geogenius. Le indeterminazioni delle coordinate nelle soluzioni Bernese risultano inferiori a quelle ottenute con Geogenius, probabilmente anche a causa della maggiore ridondanza della soluzione di sessione rispetto a quella convenzionale per singole baselines, ma sono anche distribuite in modo più uniforme nella rete.

Le coordinate compensate ottenute con i due diversi software presentano differenze non trascurabili. Nella seguente tabella si riporta a titolo di esempio il confronto tra le due soluzioni relative alla misura di zero sulla rete fiduciale (cfr. tab. 1).

DIFFERENZE COORDINATE			SCARTI HELMERT 6 PAR.		
Geogenius-Bernese			Geogenius-Bernese		
ΔN	ΔE	ΔH	sN	sE	sH
(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
1,2	0,5	0,4	0,1	1,0	0,1
0,0	0,0	0,0	0,4	0,2	1,0
-2,0	0,2	-1,2	-0,9	0,7	0,9
-2,7	1,0	-4,0	-2,2	0,1	0,1
-0,3	-0,6	-4,6	1,2	-3,2	0,3
4,6	3,0	-1,6	1,3	1,3	-2,4

Tab. 2 – Confronto soluzioni Geogenius-Bernese rete fiduciale (misura di zero)

Le differenze tra le coordinate stimate dai due software raggiungono il mezzo centimetro, anche se effettuando una rototraslazione rigida tra le due soluzioni si riducono notevolmente, mostrando di essere probabilmente riconducibili per buona parte a differenze di datum.

6. Conclusioni

Il software Bernese ha confermato la sua versatilità e completezza di opzioni che lo rende adatto anche all'analisi di reti di piccole dimensioni come quella in oggetto, nelle quali la elevata accuratezza ottenuta permette di eseguire analisi statistiche come il test di Caspary (per il quale è stata sviluppata una apposita procedura Mathcad®) con elevata affidabilità.

I valori dei movimenti ottenuti per alcuni punti tra le due soluzioni esaminate risultano in ottimo accordo con le rilevazioni fornite da altri sensori (ad es. inclinometri).

7. Bibliografia

Caspary W.F. (1987): Concept of Network and Deformation Analysis. School of Surveying, The University of New South Wales, Monograph 11.

D.Dominici, F.Radicioni, S.Selli, A.Stoppini (1998): The Assisi Landslide GPS network. In F. K. Brunner (Ed.): Advances in Positioning and Reference Frames (Proc. of the Scientific Assembly of the IAG - Rio de Janeiro, sept.1997) - IAG Int. Symposia Vol. 118 - Springer Verlag.

Cilli M.E., Radicioni F., Stoppini A.(2003): Analisi dei risultati di recenti campagne di misura nella rete di monitoraggio GPS della frana di Assisi. Atti del Convegno Nazionale "Conservazione dell'ambiente e rischio idrogeologico" CNR - GNDICI, Assisi, dicembre 2002.