

# MONITORAGGIO STRUTTURALE E AMBIENTALE CON SERIE TEMPORALI GPS

Riccardo BARZAGHI, Maria Elena GAETANI, Livio PINTO, Alice POZZOLI

DIAR – Politecnico di Milano, P.zza Leonardo da Vinci 32 - 20133 Milano, tel.0223996510, fax.0223996530,  
[\[riccardo.barzagli, mariaelena.gaetani, livio.pinto, alice.pozzoli\]@polimi.it](mailto:riccardo.barzagli@polimi.it)

## Riassunto esteso

### Introduzione

Il Dipartimento DIAR, sezione Rilevamento, del Politecnico di Milano in collaborazione con Leica Geosystems ha avviato una ricerca volta alla creazione di un sistema di monitoraggio di grandi opere attraverso l'uso di un sistema GPS. Per analizzare dati reali una serie di ricevitori GPS sono stati montati su una diga dell'Ente Acque della Sardegna (ex E.A.F.).

La diga in studio (figura 1) è situata sul rio Cixerri, in località Genna Is Abis - Uta (CA), è una diga a gravità massiccia in cls, possiede un coronamento di 1295 m ed è posta a circa 42,5 m s.l.m. Attualmente è monitorata dall'Ente Acque della Sardegna con diversi sensori automatici posti permanentemente nel corpo diga, che acquisiscono dati in continuo: la misura periodica del monte-valle (come previsto dal foglio condizioni diga) viene effettuata con un collimatore ottico.

Il monitoraggio con tecnica GPS riveste, per il momento, carattere di sperimentazione, e a tal fine sono stati installati 6 ricevitori GPS LEICA GMX902, le cui antenne risiedono su pali di acciaio, che attualmente acquisiscono dati con una frequenza di 1 Hz. Quattro delle antenne sono state installate sul coronamento della diga, circa equidistanti, (2 in corrispondenza dei pendoli rovesci e 2 alle estremità della diga), affiancate da due antenne GPS supplementari, esterne alla diga, monumentate in posizione stabile (una su una formazione rocciosa, l'altra su edificio dell'Ente che ha struttura portante in c.a.). Le serie temporali di dati vengono trasmesse in continuo tramite connessione wireless alla casa di guardia dove è stato installato un centro di analisi e trattamento dati (per una prima elaborazione degli stessi).



Figura 1 – Diga sul Rio Cixerri (CA)



Figura 2 – Supporto del ricevitore in corrispondenza del pendolo rovescio

### Descrizione dell'attività

L'obiettivo della ricerca è quello di creare un software di valutazione e di analisi in grado di gestire le emergenze strutturali ed ambientali e che sia un valido supporto per il controllo e per la sicurezza. Attualmente in Italia il monitoraggio di grandi opere, quali le dighe, viene effettuato con tecniche classiche che prevedono l'uso di teodoliti o stazioni totali ovvero, come nel caso della diga Cixerri oggetto dello studio, attraverso un sistema di pendoli rovesci associati alle osservazioni di un collimatore. Spesso però collimatore e mira sono troppo lontani e subiscono negativamente gli

effetti non controllati della rifrazione atmosferica, impedendo così una reale efficacia della suddetta strumentazione di controllo. Tramite questo studio si vuole creare un'ulteriore soluzione di misura automatica, per le grandi strutture, che possa coerentemente completare ed integrare il Sistema di Monitoraggio globale, attraverso l'uso di strumentazione satellitare che negli ultimi anni ha beneficiato di notevoli miglioramenti in quanto a precisione ed affidabilità delle misure, raggiungendo risultati analoghi a quelli ottenuti finora con la strumentazione classica. I vantaggi dell'uso di strumentazione satellitare, rispetto alle tecniche classiche, sono principalmente legati alle elevate precisioni relative, indipendenti da perturbazioni locali quali rifrazione atmosferiche o legate al campo della gravità, la discreta flessibilità di installazione dei sensori e il loro costo contenuto, nonché l'elevata frequenza di acquisizione dei dati in continuo ed in maniera del tutto automatica. Grazie a ciò, definito il livello di rischio, è possibile implementare un sistema di allarme che, superata una certa soglia di deformazione o l'innescio di un processo perturbativo, avverta in automatico le autorità di competenza.

L'elaborazione dei dati GPS sarà duplice: di tipo *near real time*, modalità cinematica, finalizzata al controllo degli spostamenti a breve periodo, nonché in modalità statica, su dati giornalieri e stagionali, per i controlli di lungo periodo. Con la sperimentazione si intende verificare la possibilità di controllare lo spostamento monte-valle con tecnica automatica GPS.

L'attività di controllo si svolgerà in tre fasi principali:

- caratterizzazione dell'oggetto e del sistema di monitoraggio;
- monitoraggio vero e proprio;
- test.

Ciascuna fase è caratterizzata da due differenti periodi temporali per il campionamento del dato GPS:  $\Delta t_0^{c,m,t}$  di acquisizione e  $\Delta t_1^{c,m,t}$  di trattamento, entrambi variabili. I differenti apici (*c,m,r*) stanno rispettivamente per caratterizzazione (fase 1), monitoraggio (fase 2) e test (fase 3). La scelta dei *rate* temporali di caratterizzazione e di monitoraggio vero e proprio dipende dal tipo di manufatto, dal sistema di monitoraggio, dalle condizioni esterne in cui ci si trova.

In particolare, per la caratterizzazione dell'oggetto e del sistema di monitoraggio, prima fase dell'attività, ci si avvale di dati acquisiti per ogni ricevitore in un breve periodo ( $\Delta t_1^c$ ). Con essi si intende eseguire un'analisi ad alta frequenza, dopo aver effettuato un'analisi di qualità del dato, con il programma GNSSQC (Leica), al fine di individuare l'eventuale presenza di multipath, analizzare il rapporto segnale-rumore e la visibilità/copertura dei satelliti (sky-plot); successivamente si effettua una prima compensazione della rete per determinare le coordinate approssimate delle stazioni GPS prese come riferimento; in seguito vengono elaborate delle soluzioni singola base in modalità cinematica, per ciascuna misura acquisita, tra le antenne *rover* e ciascuna delle stazioni GPS di riferimento (REF1 e REF2): il software utilizzato è LGO (Leica) con *rate* di campionamento  $\Delta t_0^c$  (si fissa l'ambiguità utilizzando ad esempio i primi 100 dati a disposizione); infine, dopo aver suddiviso le basi ottenute secondo un periodo  $\Delta t_1^c$ , viene realizzata l'analisi di frequenza dei dati per ciascun punto. Al termine di questa prima fase dell'attività si è in grado di valutare eventuali problemi locali di installazione delle antenne e di fissare la frequenza di campionamento ottimale per gli scopi del monitoraggio.

Nella seconda fase della ricerca, il monitoraggio vero e proprio, il dato acquisito viene filtrato per eliminare outlier ed effetti indipendenti dai movimenti della struttura (ad esempio legati al supporto di installazione dell'antenna). Allo stato attuale, si prevede di seguire 4 differenti vie e di analizzarne le eventuali differenze a posteriori:

Soluzione A: il filtraggio avviene mediante stima con metodo a minimi quadrati (a tale scopo è stata implementata da Leica una versione batch di LGO) in un periodo  $\Delta t_1^m$  (multiplo di  $\Delta t_0^m$ ).

Soluzione B: si utilizzano le basi calcolate in modalità cinematica con frequenza  $\Delta t_0^m$ , eventualmente "ripulite" da fenomeni oscillatori ad alta frequenza (valutati nella fase 1); successivamente si esegue una stima della funzione di "covarianza", un filtraggio

tramite collocazione e una compensazione dei dati in un periodo  $\Delta t_1^m$  (multiplo di  $\Delta t_0^m$ ).

**Soluzione C:** si effettua una compensazione robusta (metodo di stima L1) delle basi calcolate in modalità cinematica, similmente a quanto visto nella soluzione B.

**Soluzione D:** si applica un filtro di Kalman, utile nel caso in cui si sia a conoscenza di un'opportuna funzione di stato.

Una volta filtrati i dati si può eseguire la stima delle coordinate dei punti tramite compensazione delle baselines su periodi  $\Delta t_1^m$ . A tal proposito viene adottato un modello di stima ai minimi quadrati, ottenendo la stima delle coordinate  $X_j^m$   $Y_j^m$   $Z_j^m$  con  $j=1, \dots, n$  punti della rete.

Al termine di questa fase si è in grado di calcolare un funzionale delle coordinate o delle variazioni delle coordinate (distanze, tensore degli sforzi, ecc.) sul quale vengono effettuati i test.

Infine per quanto concerne la terza fase, quella di test, si effettua una analisi di significatività degli spostamenti nel tempo, analizzandola con classici test statistici sia sul breve periodo ( $\Delta t_0^b$ ) per valutare fenomeni di movimento impulsivo cioè di innesco di spostamenti, sia sul lungo periodo ( $\Delta t_1^l$ ) per la valutazione di movimenti lenti, ad esempio analizzando la significatività della stima dei parametri di un *trend* lineare.

Nel caso di integrazione con dati provenienti da altri sensori, non si esclude di poter applicare test di tipo bayesiano.

### Risultati Preliminari

Attualmente il sistema è ancora in fase di implementazione; si stanno eseguendo le prime analisi dei dati, mentre per il mese di novembre saranno disponibili i primi risultati della fase 1.

Dell'attività prevista si è svolta parte della fase di caratterizzazione dell'oggetto e del sistema di monitoraggio. Sono state eseguite le analisi di qualità del dato con il programma TEQC su serie di file di 24 h di misure acquisite con frequenza di 1Hz. Successivamente sono state calcolate le componenti di alcune baseline sempre su periodi di dati di 24 h sia in modalità cinematica (1 Hz) che con trattamento di tipo statico ( $\Delta t = 1$  h). Di seguito vengono riportati due esempi di grafici dei risultati (figure 2, 3 e 4): in blu sono rappresentate le posizioni giornaliere con trattamento cinematico e frequenza 1 Hz, in arancione i risultati del trattamento in modalità statica.

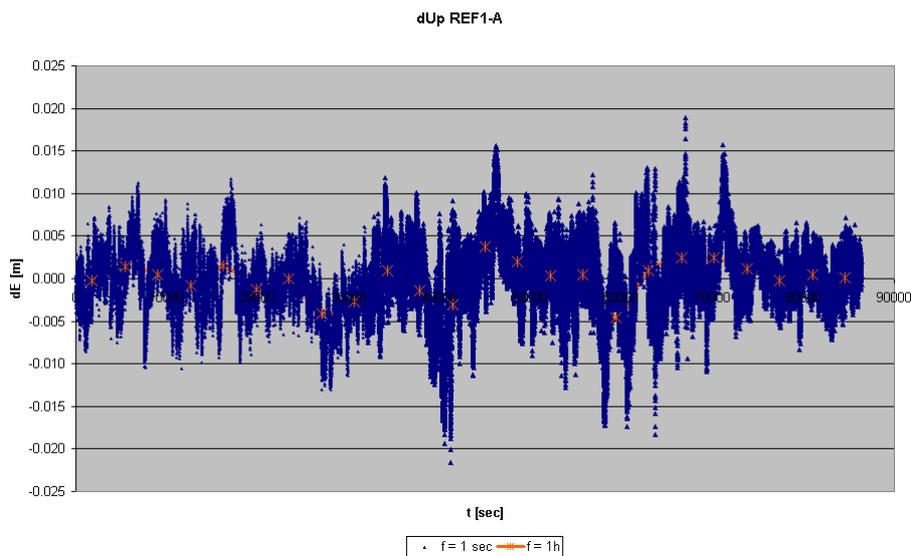


Figura 3 – Grafico spostamenti giornalieri  $\Delta E$  di una singola antenna (punto A).

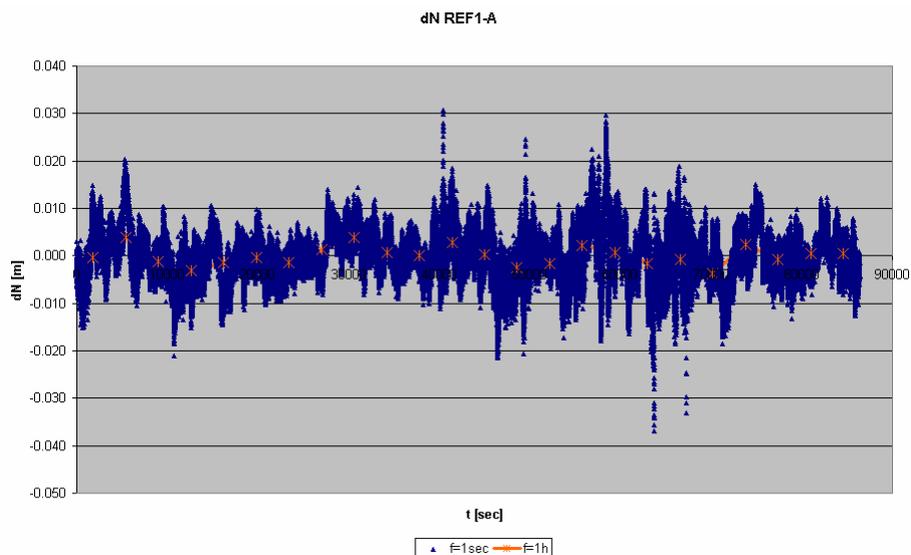


Figura 4 – Grafico spostamenti giornalieri  $\Delta N$  di una singola antenna (punto A).

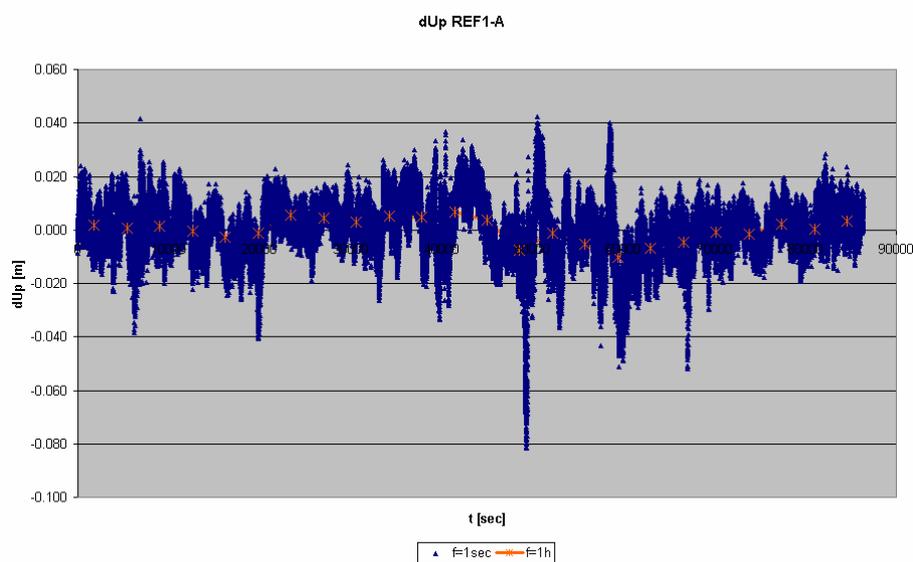


Figura 5 – Grafico spostamenti giornalieri  $\Delta Up$  di una singola antenna (punto A).

I grafici, seppur limitati ad un solo punto e ad una sola giornata, mettono in luce una notevole variabilità dei dati cinematici rispetto a quelli elaborati staticamente; con questi ultimi, infatti, vengono filtrati gli effetti di breve periodo, gli errori non ben modellizzati nel trattamento cinematico e i *bias* di misura. La variabilità, come era da prevedere, è maggiore nella direzione verticale. Gli spostamenti registrati nelle direzioni Est e Nord sono comunque compatibili con quanto atteso.

### Ringraziamenti

Si ringrazia l'Ente Acque dalla Sardegna per la collaborazione e la disponibilità del sito e la Leica Geosystem che finanzia la ricerca.