

Monitoraggio di strutture con tecnologia GNSS

Luigi Colombo (*), Barbara Marana (*), Diego Galbusera (**)

(* Università di Bergamo, DPT, Viale Marconi 5, 24044 Dalmine (BG), luigi.colombo@unibg.it

(**) Indagini Strutturali, Via G. De Ruggero 5, 00142 Roma, diego.galbusera@indaginistrutturali.it

Riassunto

Il mantenimento in sicurezza delle costruzioni rappresenta una problematica di sempre maggiore rilevanza, che riguarda gli edifici antichi, quelli moderni, soprattutto se molto sviluppati in altezza, i manufatti di contenimento, i viadotti e le grandi infrastrutture in genere.

Fatto salvo che nulla può essere ritenuto perfettamente statico, la *sensibilità* strutturale di ogni opera è strettamente correlata alla complessità progettuale e costruttiva, alle dimensioni, allo stato di conservazione, alla durabilità dei materiali e al contesto geologico-ambientale.

Tutti questi parametri concorrono a produrre situazioni di pericolosità latente, sia nell'ordinarietà che nell'emergenza, e vanno pertanto tenuti sotto controllo durante l'intero ciclo di vita dell'opera.

La conservazione di un adeguato livello di *sicurezza* funzionale rappresenta dunque la motivazione principale del processo di monitoraggio, che nasce, di fatto, con l'opera stessa in quanto fisiologicamente connesso ai problemi strutturali-materici che il progetto, la realizzazione e, infine, la fase di esercizio mettono in evidenza.

All'interno di questo scenario tematico, il lavoro analizza l'applicabilità della più recente tecnologia satellitare GNSS a elevata frequenza di campionamento (fino a 50 Hz) al controllo di deformazioni e spostamenti (quasi stazionari e/o dinamici) di strutture e infrastrutture.

La tecnologia GNSS è infatti alla base della stazione (Master) di monitoraggio, attivata di recente presso i laboratori di Ingegneria dell'Università di Bergamo, in grado di rilevare e gestire nel tempo, in modalità wireless interattiva, la posizione di ricevitori di controllo (Rover), ubicati su strutture poste in un intorno di qualche decina di chilometri.

La stazione sarà impiegata, nei prossimi mesi, per il monitoraggio dinamico del monumento industriale, simbolo della città di Dalmine: un'enorme struttura metallica a tubo (realizzata dalla Dalmine S.p.A., ora Tenaris) che dal 1936 fa bella mostra di sé al centro della piazza del Comune.

Abstract

Building safety maintenance is an ever increasing problem which involves both ancient and modern constructions, mainly if very high, defence artefacts, viaducts and wide infrastructures.

Since nothing can be considered perfectly static, each building structural sensibility is strictly connected to its planning and construction complexity, dimensions, preservation, material durability and geological-environmental context.

All these parameters represent a source of latent danger, both in ordinary and emergency circumstances, and therefore need to be kept under control for building whole life-cycle.

The conservation of a proper security level is therefore the main aim of the monitoring process which is related to a building from the beginning, due to all structural-material problems stressed in design, construction and operation.

In this context, the work analyses the application of the most recent GNSS satellite technology (with high frequency sampling up to 50 Hz) to structure and infrastructure control of deformations and displacements (static and/or dynamic).

The GNSS technology is, as a matter of fact, the core of the monitoring station (Master), recently started up at the Geomatic Lab of the University of Bergamo, which can detect and manage in time,

through an interactive wireless way, the position of control receivers (Rover) placed over structures within some ten kilometres.

This station will be employed, in the next months, for a dynamic long-lasting monitoring of the industrial monument, symbol of the city of Dalmine: a huge all-metal pipe structure (manufactured by Dalmine Spa, or Tenaris) which, since 1936, has been towering above the city square centre.

Il monitoraggio

L'avvento di strumentazioni geomatiche automatizzate e lo sviluppo di software dedicato, ha reso possibile, da qualche tempo, l'impiego di tecnologie *senza contatto* in operazioni di monitoraggio strutturale e ambientale, temporaneo o permanente, a integrazione o sostituzione delle classiche procedure variometriche, *per contatto*, di impiego più tradizionale.

La sequenza operativa utile per un corretto approccio geomatico al processo di monitoraggio potrebbe essere la seguente:

- acquisizione delle informazioni generali sulla statica dell'opera;
- recupero della conoscenza riguardante le caratteristiche di deformabilità e le direzioni più significative dello spostamento;
- individuazione di punti di *controllo* che possano caratterizzare il comportamento strutturale, poiché l'effetto deformativo vi assume significati importanti e complessivi, e dei quali si determineranno gli spostamenti;
- definizione del raggio dell'intorno utile per la misura di controllo;
- scelta della procedura e della tecnologia in grado di fornire un'adeguata precisione assoluta e relativa (*precisione relativa = precisione assoluta /raggio dell'intorno di interesse*) e del sistema di riferimento per la lettura delle posizioni in gioco (coordinate).
- valutazione delle soglie ammissibili di rischio e programmazione conseguente dei sistemi di allarme.

La procedura descritta si potrà poi adattare di volta in volta alla specifica tipologia e all'importanza dell'opera.

Si ricorda che i punti di *controllo* della struttura possono subire, per effetto dei carichi in gioco, spostamenti spaziali sia *assoluti* (come in un corpo rigido), rispetto a punti fissi di *riferimento* posti all'esterno della zona di influenza del fenomeno in atto, sia *relativi* (come in un corpo deformabile, più o meno elastico), rispetto a punti della struttura stessa.

In genere, sono presenti entrambi i tipi di spostamento e risultano più interessanti gli uni o gli altri, in funzione delle diverse situazioni di esercizio.

Inoltre, è possibile che gli spostamenti si manifestino in tempi brevi (e generalmente con andamento quasi periodico), oppure in intervalli più ampi: nel primo caso si parla di spostamenti *dinamici* o continui, nel secondo di spostamenti *quasi stazionari* o discreti.

Nel caso di controllo dinamico (azione del vento, vibrazioni indotte da traffico veicolare pesante o macchinari, scuotimenti sismici, ecc.), si deve operare a intervalli temporali molti ridotti e quindi è necessario disporre di sensori real-time (frequenza in acquisizione superiore a 15÷20 Hz, e ora fino a 50 Hz) che consentano di seguire con continuità lo spostamento; si costruiscono poi modelli di analisi in quattro dimensioni: x, y, z, tempo. La misura può essere eseguita con sensori classici, come gli accelerometri, integrandoli con ricevitori GNSS (Global Navigation Satellite Systems) a elevato campionamento, collegati via antenna alle costellazioni satellitari (GPS, GLONASS).

Nel controllo quasi stazionario (pseudo-statico) gli spostamenti si manifestano, invece, in periodi più lunghi, e quindi le operazioni di misura possono essere eseguite, con strumentazione anche a basso campionamento (1 Hz), in condizioni di *temporanea stabilità* del manufatto; si costruiscono in questo caso modelli di analisi in tre dimensioni: x, y, z.

Si può procedere nei due casi sia in modalità real-time (RTK) sia in post-processing.

La scelta della strumentazione da utilizzare per il controllo è subordinata alla necessità di determinare gli spostamenti e le deformazioni con una precisione superiore all'entità dei valori

prevedibili: precisioni troppo alte permettono di seguire bene i fenomeni ma la strumentazione è più costosa e le operazioni risultano lunghe e complesse; viceversa, precisioni troppo basse finiscono col mascherare aspetti geometrici anche importanti del fenomeno indagato.

Le tecnologie di misura senza contatto più recenti consentono di sviluppare il controllo in modo anche automatico, con esecuzione telematica a distanza; al superamento di soglie di pericolosità prefissate, è programmabile l'invio di messaggi di posta elettronica o SMS di allerta all'utenza.

Nonostante la grande diffusione raggiunta in anni recenti dalla tecnologia satellitare, fra quelle senza contatto, grazie soprattutto al vantaggio della *non richiesta inter-visibilità fra punti di misura* (cosa che ha profondamente trasformato il settore del rilevamento), il suo impiego nella determinazione di spostamenti risulta ancora limitato. La motivazione sembra legata sia ai condizionamenti tecnologici al raggiungimento di precisioni sub-millimetriche, spesso richieste nel controllo strutturale, sia alle limitazioni d'impiego per la presenza di zone d'ombra nella ricezione del segnale, prodotte talvolta dalla stessa struttura sotto controllo.

Un elemento importante per la qualità del posizionamento satellitare è costituito dal numero di satelliti ricevibili dal sensore e dalla loro geometria nello spazio, nel senso che quanti più satelliti sono tracciati e ottimale è il loro assetto, tanto migliore risulta la precisione della determinazione spaziale.

In alcune applicazioni, come nel caso dei centri urbani, nell'ingegneria delle costruzioni, nei tunnel o in opere sotterranee e all'interno di edifici, il segnale satellitare può essere insufficiente o assente. In questi casi estremi, la numerosità e la geometria della costellazione satellitare tracciata può essere significativamente aumentata e migliorata mediante aggiunta di altri segnali (analoghi a quelli GNSS) trasmessi però da pseudo-satelliti localizzati a terra (detti *pseudolites*); queste integrazioni possono arrivare addirittura a costituire sistemi di posizionamento sostitutivi di quello convenzionale in applicazioni nell'interno di opere o in galleria.

La tecnologia GNSS

Nonostante qualche limitazione d'uso, come evidenziato, la tecnologia GNSS rappresenta una soluzione di interessante prospettiva anche nell'ambito del monitoraggio strutturale, per esempio già ai fini della verifica di stabilità nel tempo, su aree estese, della posizione dei *punti di riferimento*, rispetto ai quali si determinano gli spostamenti *assoluti* di un'opera.

La tecnologia GNSS consente la determinazione della posizione spaziale di punti di controllo in modalità sia statica sia dinamica: per la seconda tipologia, il mercato offre, da qualche tempo, un ricevitore progettato appositamente per operazioni di monitoraggio continuo.

Il ricevitore, di Leica Geosystems, è denominato GMX902 (sola costellazione GPS), con una versione più estesa (GPS più GLONASS) dalla sigla GMX902 GG (figura 1) e quella recentissima GNSS a 50 Hz (GPS con L5 più GLONASS e Galileo).

Si tratta di un sensore satellitare in grado di monitorare, 24 ore su 24, la posizione di punti di controllo su aree *sensibili* o infrastrutture, cioè versanti in frana, ponti, dighe, edifici, determinandone con continuità nel tempo il vettore spaziale di spostamento.

Il dispositivo, a doppia frequenza, acquisisce dati di posizione con campionamento a 20/50 Hz e fornisce una precisione *teorica* di 20 mm (con il codice) e di 0.2 mm, operando con la fase della portante; è garantita un'eccellente qualità operativa (attenuazione dei fenomeni di errore dovuti al multipath, basso noise di ricezione, ecc.) e il posizionamento real-time anche in presenza del movimento della struttura.

Il peso contenuto (800 grammi per il dispositivo, più l'antenna) e l'elevata resistenza all'azione degli agenti atmosferici lo rendono adatto in tutte le condizioni operative, su strutture estese, su quelle sviluppate in altezza e nei casi in cui la strumentazione debba risultare piuttosto compatta.



Figura 1 – Sensore Leica GG a 20 Hz.

La trasmissione dei dati, fra le posizioni controllate (dove sono installate le cosiddette Rover) e la stazione Master di riferimento del sistema (di posizione spaziale nota) e viceversa, avviene generalmente in radio frequenza mediante comunicazione wireless del tipo Radio Modem, oppure GPRS, supportato dalla rete cellulare GSM, o WLAN (Wireless Local Area Network).

L'apparato satellitare GMX902 può anche essere connesso nell'uso a eventuali sensori accelerometrici e meteo.

La stazione Master dell'Università di Bergamo

La stazione Master per il monitoraggio di strutture, attiva presso i laboratori della facoltà di Ingegneria dell'Università di Bergamo, utilizza la tecnologia differenziale GNSS-RTK (Real Time Kinematic) per gestire interattivamente la trasmissione delle correzioni di posizione verso i ricevitori locali (Rover), cioè le antenne poste sopra punti da controllare.

Le strutture e infrastrutture che possono essere interessate dal monitoraggio debbono essere collocate all'interno di un'area con raggio pari a qualche decina di chilometri rispetto alla stazione Master.

Le comunicazioni fra le diverse unità operative, inerenti alla misura e alle correzioni di posizione, è gestita tramite connessione wireless di tipo WLAN.

La precisione nel posizionamento dei punti di controllo, che è influenzata da parametri sistematici di tipo ambientale e varia con legge inversa alla distanza Rover-Master, si colloca su livelli sub-centimetrici, mentre la soglia di precisione nella tracciabilità del vettore spaziale spostamento-deformazione (dato *variazionale*) è quella del millimetro.

Il progetto

Nella fase di progetto e implementazione di un sistema di monitoraggio satellitare occorre considerare i seguenti fattori:

- distanza e inter visibilità tra la stazione Master e le Rover di controllo: la precisione di posizionamento delle Rover decresce con la distanza;
- collocazione dei vari componenti tecnologici delle stazioni;
- verifica di possibili effetti in grado di disturbare la trasmissione dei dati (fenomeni di *multipath*, presenza di ostacoli, ecc.);
- valutazione della copertura satellitare.

La distanza tra posizione Master e Rover rappresentava una possibile limitazione all'applicazione della comunicazione wireless fino a qualche anno fa, poiché le connessioni avvenivano, in genere, via radio-modem ed erano pertanto limitate a un range di pochissimi chilometri: si doveva ricorrere altrimenti alle più lente e onerose procedure GPRS, supportate dalla rete di telefonia GSM.

L'evoluzione tecnologica del settore wireless ha portato in anni recenti a nuovi sistemi WLAN che

permettono di coprire distanze fino ad alcune decine di chilometri. In questi casi, la scelta della posizione dell'antenna (wlan) di trasmissione dei dati per le diverse stazioni deve garantire la reciproca inter visibilità.

Nel caso della stazione Master di UniBg, l'antenna di ricezione satellitare (una normale antenna GNSS) e la sua wireless di comunicazione sono collocate entrambe sul tetto a terrazzo dell'edificio che ospita i laboratori di facoltà e risultano opportunamente interfacciate con la sala metrologica, posta a piano terra, che accoglie invece la strumentazione hardware e software: armadietto protettivo con il ricevitore, server di rete, accessori, ecc. (figura 2, figura 3).

L'antenna wlan è gestita da un adattatore con funzione di modem (ESCG) che viene collegato al server preposto al governo delle operazioni; l'antenna GNSS di ricezione è invece connessa al sensore di acquisizione (ricevitore satellitare) e a un apparato (MOXA) di conversione del segnale da RS232 a rete locale (LAN).

L'apparato ESCG deve essere posto a pochi metri di distanza dall'antenna wireless, per non produrre indebolimenti del segnale; si è pertanto installato un armadietto "elettrico" appena sotto il solaio di copertura dei laboratori, in stretta adiacenza con l'antenna soprastante.



Figura 2 – Antenna di ricezione GNSS (a sinistra) e di comunicazione Wlan (a destra).



Figura 3 – Server del sistema e ricevitore satellitare della stazione Master.

La stazione Master risulta *efficiente* se la posizione scelta per l'antenna GNSS, le cui coordinate nel sistema geodetico di riferimento nazionale sono state in questo caso pre-determinate con precisione sub-centimetrica mediante la rete di ricevitori SmartNet ItalPos di Leica, garantisce un'opportuna copertura satellitare sull'intera giornata (figura 4).

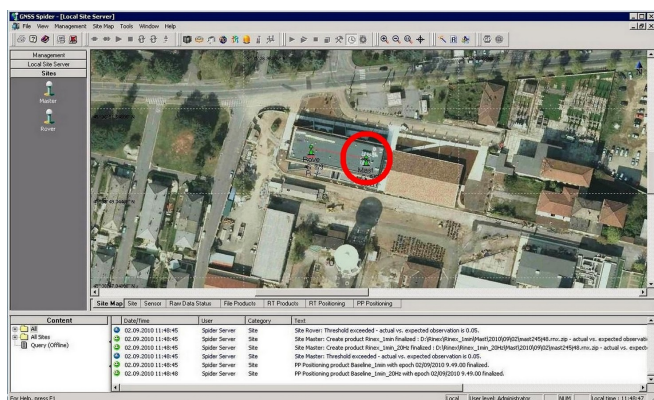


Figura 4 – L’antenna satellitare Master e il contesto circostante (cartografia da Google Earth).

Nel caso della stazione di Dalmine questo requisito è ben soddisfatto: si è, infatti, verificato che la copertura, anche nei momenti di minore ricezione, è costituita da almeno 7÷8 satelliti GPS più 4÷6 della costellazione GLONASS.

Componenti tecnologici

L’intero sistema di monitoraggio può essere schematizzato in tre sottosistemi:

- la stazione Master;
- le stazioni Rover;
- il software per la gestione della misura e per l’analisi del dato.

Le stazioni Master e Rover

L’antenna GNSS della stazione Master riceve i segnali satellitari (attualmente con frequenza massima di 20 Hz) e mediante cavo li invia al ricevitore che è interfacciato serialmente a un PC, con funzione di server.

Anche nel caso di una stazione Rover (figura 5), il ciclo inizia dalla ricezione dei segnali attraverso un’antenna GNSS, posta sul punto da controllare, e dal loro invio al ricevitore satellitare. Il segnale in uscita dal ricevitore passa poi a un convertitore e infine a un adattatore di rete che utilizza un’antenna WLAN per la trasmissione a quella corrispondente della stazione Master.

Gli schemi in figura 6 (sopra Master e sotto Rover) visualizzano il collegamento, di tipo WLAN, utilizzato per la trasmissione dei dati di misura fra le due unità.

Il software

Il software di supporto al sistema di monitoraggio della stazione Master è GNSS Spider di Leica. Questo pacchetto può controllare e gestire, in modo centralizzato, una o più stazioni Master, consentire lo scambio di dati fra Master e Rover e l’interrogazione del server di sistema da postazione remota.

Una delle potenzialità del software è la capacità di registrare, sia in forma grafica sia in modo tabellare, le informazioni concernenti un prefissato intervallo temporale (da stabilire nella fase di settaggio).



Figura 5 – Unità Rover, con l'antenna GNSS e l'antenna wlan.

Il software supporta, inoltre, la gestione dei vari livelli di sicurezza attraverso l'introduzione di opportune soglie di attenzione:

- *la soglia di allertamento* è un livello di sicurezza che segnala quando la situazione si discosti dal normale andamento;
- *la soglia di pre-allarme* segue l'allertamento e può essere considerata come la prima fase di pericolo; in questo caso, è opportuno prestare attenzione ed eseguire un sopralluogo per stabilire se e come intervenire;
- *la soglia di allarme*: questo punto è senz'altro il più critico; infatti, una volta verificatosi, si deve immediatamente intervenire per evitare conseguenze gravi per la stabilità della struttura soggetta al controllo.

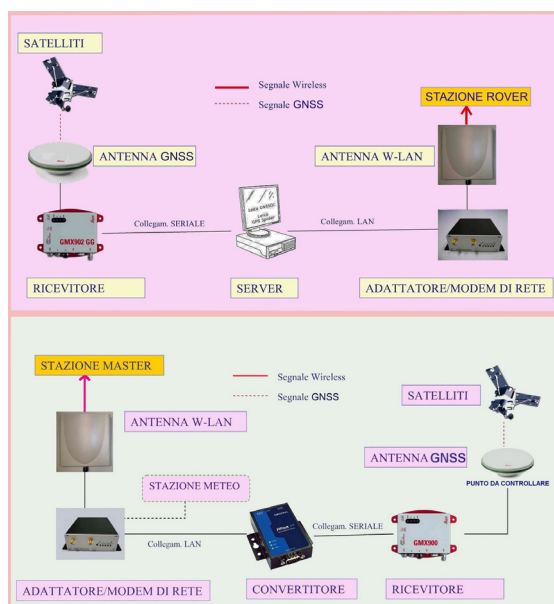


Figura 6 – La trasmissione dei dati dalla Master (sopra) e viceversa dalla Rover (sotto).

Le procedure software implementate sono costituite, oltre che dal pacchetto GNSS Spider, anche da altri software, come Leica GeoMoS e Leica GNSS QC, che consentono analisi diversificate dei dati e controlli sulle misure.

In particolare, GeoMoS opera attraverso i moduli Monitor e Analyzer. Monitor è il gestore in tempo reale dell'acquisizione e del controllo delle misure, dei messaggi di stato del sistema e dei cicli operativi. Analyzer è il modulo per l'analisi dei dati dedicato all'importazione ed esportazione, oltre che alla correzione e al post-processamento dei valori acquisiti. I dati di input e i risultati vengono poi visualizzati attraverso grafici e tabelle numeriche.

La connessione di differenti apparati di misura (per esempio, stazioni topografiche robotizzate, sistemi satellitari, sensori meteo, ecc.), è gestita da Leica Sensor Manager, che offre anche un'interfaccia utile per la configurazione dei sensori.

Leica GNSS QC costituisce, infine, un valido complemento applicativo e di approfondimento.

Questi software sono installati sul server della stazione Master e vi si può accedere anche a distanza, operando da client con procedure Internet di "remote desktop"; infatti, nasce spesso la necessità di verificare la situazione del monitoraggio o di eseguire interrogazioni da postazioni qualsiasi, diverse dalle Master.

Un'applicazione

La stazione Master verrà ora utilizzata per un monitoraggio di eccezione: quello di una struttura metallica prodotta dalla Dalmine SpA, un gigantesco tubo, simbolo fascista dell'operosità industriale della città.

La struttura è alta ben 63 metri, pesa 7500 kg ed evidenzia da tempo segni diffusi di degrado sia all'interno che all'esterno (figura 7), prodotti da corrosione, vibrazioni, vento, ecc.

Nel corso di un recente intervento di conservazione straordinaria e messa in sicurezza dell'opera, si è deciso di attivare, in forma permanente, un'attività di controllo statico-dinamico attraverso un'unità Rover (Leica), collocata in sommità e in collegamento WLAN con la stazione Master di UniBg, integrata da dispositivi di misura termo-barometrica, anemometrica e accelerometrica.



Figura 7 – La struttura metallica realizzata dalla Dalmine, con il suo basamento.

Considerazioni e prospettive

Lo sviluppo dei sistemi GNSS, tuttora in grande evidenza, sta portato all'introduzione di una serie di miglioramenti tecnologici che coinvolgono e coinvolgeranno tutti i *segmenti* del sistema satellitare, da quello spaziale, a quello di controllo e a quello dell'utenza; in particolare:

- il mantenimento, l'arricchimento e l'ampliamento delle attuali costellazioni satellitari; dal 2020 quattro costellazioni GNSS saranno pienamente operative (USA, Russia, Europa e Cina), così che almeno un centinaio di segnali saranno contemporaneamente ricevibili in ogni istante e in qualsiasi punto della Terra;
- la disponibilità di efemeridi (per la descrizione delle orbite dei satelliti) di elevata attendibilità metrica;
- la realizzazione di ricevitori sempre più veloci, ad altissima frequenza (100Hz?), versatili, compatti ed economici;
- il progressivo affinamento degli algoritmi di elaborazione delle coordinate, in particolare nel calcolo delle ambiguità di fase;
- l'evoluzione dei modelli matematici per la riduzione degli effetti sistematici presenti nelle osservazioni;
- il miglioramento continuo dei modelli di geoidi terrestri, sia globali sia locali, utili per l'informazione altimetrica.

Si deve considerare, altresì, che l'approccio metrologico è oggi orientato verso tecnologie di misura senza contatto, integrabili con altre più tradizionali (variometriche, ecc.) e caratterizzate da elevata automazione, trasferibilità telematica dei dati e governabilità da postazione remota.

In questo nuovo contesto tecnologico, i sistemi di controllo GNSS non potranno che assumere un ruolo operativo (statico-dinamico) sempre maggiore, sia per l'incremento preventivabile della precisione e del rating della tecnologia e per la sua semplicità d'uso, sia infine per la possibilità di realizzare operazioni (discrete o continue) di posizionamento tridimensionale ovunque, incluse aree urbane, spazi coperti e interni, per le valutazioni del rischio e la gestione dell'emergenza.

Ringraziamenti

A Leica Geosystems Italia e a tutti i collaboratori del laboratorio di Tecnologie Geomatiche dell'Università di Bergamo.

Riferimenti bibliografici

- Colombo L., Marana B. (2007). *La tecnologia GPS per il monitoraggio continuo di strutture*, Rivista dell'Agenzia del Territorio, 2: 3-10.
- Y. Kalkan, R. M. Alkan and S. Bilgi (2010). *Deformation Monitoring Studies at Atatürk Dam*. FIG Congress 2010, 11-16 April, Sydney (Australia).
- Dai L., Wang, J., Rizos, C., Han, S. (2001). *Pseudo-satellite applications in deformation monitoring*. GPS solutions, 3: 80-87.
- Figurski M., Galuszkiewicz M., Wrona M. (2009). *An investigation of using high rate GNSS data in structural monitoring process*. Bulletin of Geodesy and Geomatics, 1.
- Gikas, V., Sakellariou, M. (2008). *Horizontal deflection analysis of a large earthen dam by means of geodetic and geotechnical methods*. 13th FIG Symposium on Deformation Measurement and Analysis/4th IAC Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, 12-15 May, Lisbon (Portugal).