

L'USO DI STRUMENTI GNSS A BASSO COSTO PER APPLICAZIONI DI MONITORAGGIO

LOW COST GNSS INSTRUMENTS FOR MONITORING APPLICATIONS

Luca Poluzzi, Luca Tavasci, Francesco Corsini, Maurizio Barbarella, Stefano Gandolfi

Università di Bologna, DICAM, Italy

PAROLE CHIAVE: GNSS, Monitoraggio, Basso costo

KEYWORDS: GNSS, Monitoring, Low-cost

Questo articolo è il sunto tradotto in italiano della versione sottomessa allo Special Issue “The Impact of Innovative and Emerging Technologies on the Surveying Activities” della rivista APPLIED GEOMATICS collegato al convegno SIFET 2018.

RIASSUNTO

Tra le diverse tecniche che possono essere utilizzate per applicazioni di monitoraggio la tecnologia GNSS offre attualmente un'ampia scelta di soluzioni. Le migliori prestazioni si ottengono utilizzando ricevitori di classe geodetica a doppia frequenza, in grado di mantenere elevate precisioni anche per il monitoraggio su larga scala, ma negli ultimi anni sono state commercializzate soluzioni tecnologiche a basso costo con caratteristiche tecniche tali da essere considerabili anche per attività di monitoraggio di piccoli movimenti. In questo lavoro si riportano i principali risultati di una sperimentazione relativa all'impiego di strumentazione GNSS a basso costo per il monitoraggio di infrastrutture insistenti su alvei fluviali. Per tale ricerca sono stati installati su un ponte due ricevitori GNSS, a circa 50 m l'uno dall'altro, acquisendo dati alla frequenza di 1Hz. Le soluzioni sono state calcolate sia in post elaborazione, attraverso due diversi software gratuiti e open source, sia utilizzando il modulo RTK incorporato nel ricevitore GNSS a stesso. La sperimentazione intende valutare le prestazioni del sistema nell'ipotesi che possa essere utilizzato per scopi di monitoraggio. I risultati ottenuti dai test mostrano come tale strumentazione possa essere utilizzata per individuare movimenti di ordine centimetrico.

ABSTRACT

Among several instruments and techniques that can be used for monitoring purposes, the GNSS technology is under fast evolution and provides a large choice of solutions. The best performances can be achieved by using double frequency geodetic receivers, capable to maintain high precisions even for wide scale monitoring. Nevertheless, in the recent years several interesting solutions were presented in the low-cost market. In this work, a monitoring system based on a couple of low cost GNSS receivers has been developed and tested on the field. The two receivers were positioned about 50 meters from each other and data were acquired at 1 Hz frequency. The position solutions were calculated both in post processing, through two different free and open-source software, and using the embedded RTK processor. The analysis aims to assess the capability of the system to perform the monitoring of slow displacements with the best possible precision. The precisions evidenced by the tests show that such low-cost instrumentation can be used for many monitoring purposes, especially considering the cost, which is about a tenth of the price for geodetic instruments.

1. INTRODUZIONE

L'interesse per i sistemi di monitoraggio delle strutture e del territorio è in costante aumento negli ultimi anni. La capacità di effettuare il monitoraggio in continuo di frane o strutture come ponti, dighe o grattacieli dovrebbe costituire un elemento fondamentale per prevenire potenziali situazioni di emergenza e salvare vite umane, specialmente in aree sismiche come l'Italia.

La tecnologia GNSS si è dimostrata uno degli strumenti più flessibili ed efficaci per il monitoraggio (Hudnut & Behr 1998; Celebi & Sanli 2002; Squarzone et al. 2005). Di norma vengono utilizzati ricevitori di classe geodetica che consentono di raggiungere precisioni anche sub-centimetriche quando si considerano intervalli di tempo di osservazione molto lunghi. Nonostante il costo degli strumenti sia in diminuzione, queste strumentazioni sono ancora piuttosto costose se paragonate ad altri sensori utilizzati per l'ingegneria strutturale, come inclinometri, estensimetri etc. Tuttavia, negli ultimi anni, una nuova classe di ricevitori GNSS di precisione

a basso costo è divenuta disponibile sul mercato e molti test sono stati condotti dalla comunità scientifica per valutare le loro prestazioni reali (Takasu & Yasuda 2009; Wiśniewski et al. 2013; Cina & Piras 2015; Caldera et al. 2016; Manzini et al. 2018).

Lo scopo di questo articolo è quello di mostrare i livelli di ripetibilità delle misure svolte con strumenti GNSS a basso costo, ottenibili su una base corta (50m) all'aumentare della lunghezza della finestra di acquisizione considerando anche differenti software per il calcolo delle posizioni relative.

Il sito scelto per la sperimentazione è il ponte Motta di Cavezzo (MO) che attraversa il fiume Secchia dove due ricevitori sono stati installati rispettivamente sulla mezzeria e sulla spalla del ponte.

Per quanto attiene l'elaborazione dei dati sono state considerate due opzioni: l'elaborazione dei dati grezzi mediante software esterni e l'uso delle soluzioni calcolate in

tempo reale dal modulo RTK *embedded* del ricevitore considerato.

Nella prima sezione di questo lavoro è descritto il caso di studio, con alcuni dettagli riguardanti l'assemblaggio delle

componenti hardware che costituiscono il prototipo di monitoraggio. Nella sezione successiva vengono descritti i software e le metodologie per l'elaborazione dei dati ed infine si riportano i risultati ottenuti attraverso consolidati parametri statistici campionari.

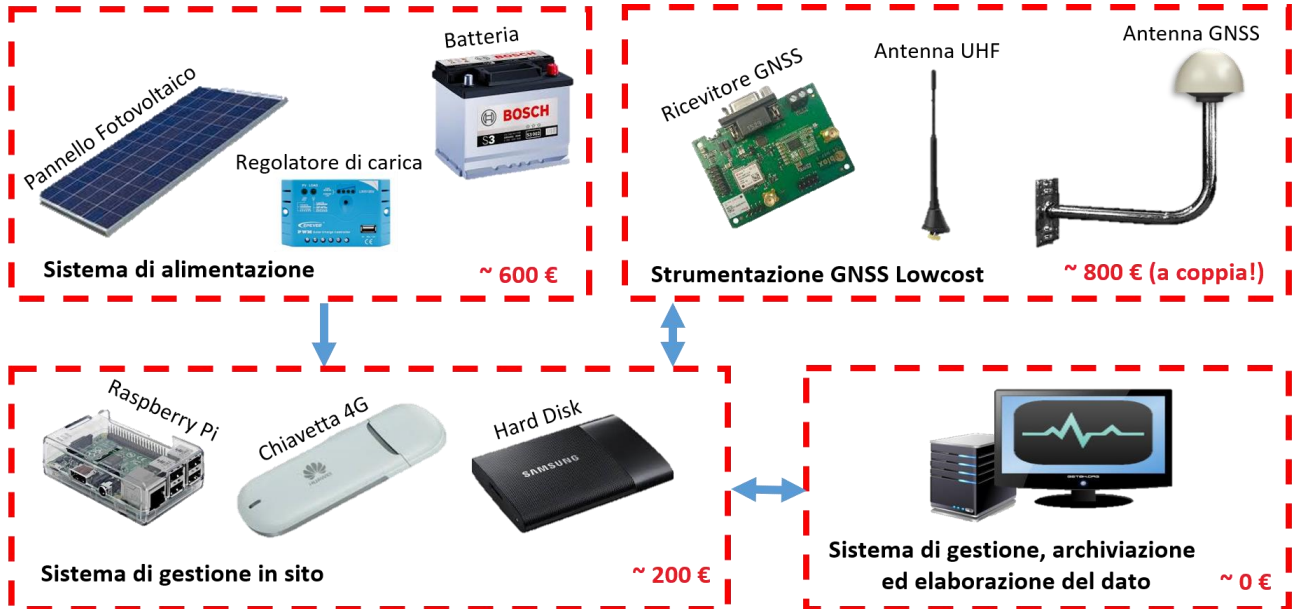


Figura 1. Principali elementi costituenti il prototipo di stazione GNSS con indicazione sui costi



Figura 2. Il sito test (Ponte Motta di Cavezzo – MO) con collocazione dei sensori

2. IMPLEMENTAZIONE DEL SISTEMA DI MONITORAGGIO

La sperimentazione condotta su un caso reale ha imposto, in fase di realizzazione, di considerare alcuni aspetti non prettamente scientifici ma fondamentali. In generale sulle strutture come i ponti non sono presenti né sistemi di alimentazione elettrica (e qualora siano presenti, ad esempio ponti ferroviari, difficilmente vengono poi resi disponibili) né sistemi di trasmissione dati. Il primo aspetto considerato è

stato quello di realizzare un sistema di monitoraggio in grado di acquisire ed inviare dati GNSS in continuo anche in aree in cui non sono disponibili né sistemi di alimentazione né sistemi di trasmissione dati mediante linea telefonica o fibra ottica. Il fatto di disporre di un sistema svincolato, in termini di alimentazione, dalle infrastrutture presenti in sito può essere un valore aggiunto nell'ipotesi di eventi catastrofici che potrebbero isolare elettricamente alcune aree consentendo di continuare ad acquisire il dato almeno localmente. La componente hardware del pacchetto di monitoraggio è quindi

costituita da tre parti: l'alimentazione, la strumentazione GNSS e il sistema di trasmissione dati.

Per quanto riguarda il sistema di alimentazione, è stato progettato un prototipo completamente autonomo per fornire l'alimentazione necessaria in qualsiasi situazione operativa costituito da un pannello fotovoltaico, un regolatore di carica e una batteria al piombo. Tutto è stato progettato per fornire energia sufficiente anche nei periodi di scarsa illuminazione considerando la posizione geografica del sito. La strumentazione GNSS utilizzata è costituita da una coppia di ricevitori a singola frequenza u-blox C94-M8P, ciascuno associato a un'antenna Trimble Bullet 360. Questi ricevitori includono anche un modulo radio UHF per la comunicazione tra Master-Rover. La tipologia del ricevitore è stata individuata mediante una accurata indagine di mercato e considerando anche la letteratura scientifica disponibile. Il sistema di trasmissione dati è stato realizzato mediante l'accoppiamento di un *Raspberry Pi 3* ed un *USB-Dongle 4G*. Inoltre, è stato inserito un Hard Disk esterno per consentire la memorizzazione locale dei dati grezzi (per scopi di backup). Il costo complessivo del sistema è contenuto in meno di 1800€. Un riepilogo dei componenti che formano il sistema di monitoraggio è mostrato in Figura 1, insieme al loro costo approssimativo (estate 2017). In questa analisi non è considerato il costo del Personal Computer utilizzato per l'elaborazione dei dati.

Il sito test per la sperimentazione è il Ponte Motta a Cavezzo (MO), un ponte di 94 metri costruito nel 1888 e costituito da cinque campate lunghe 16 metri, mostrate in Figura 2. Il ponte è uno dei pochi attraversamenti del fiume Secchia nella zona nord di Modena, una zona periodicamente allagata con straordinarie portate d'acqua che generano carichi elevati sui pilastri del ponte. Inoltre, il terremoto dell'Emilia-Romagna del 2012 ha causato gravi danni strutturali, pertanto nel corso del 2017 sono stati effettuati lavori di consolidamento, attraverso la realizzazione di micropali e barre d'acciaio sotto le arcate. Tuttavia, in assenza di eventi straordinari non ci si può aspettare un movimento significativo per una struttura così rigida. In Figura 2 viene anche descritta l'installazione del sistema, eseguita nel settembre 2017. Il dataset utilizzato è costituito da acquisizioni svolte in due diversi periodi, entrambi costituiti da 31 giorni. L'uso di due diversi set di dati è dovuto ad un limite tecnico del sistema considerato che, se viene configurato per poter lavorare con il modulo RTK *embedded* non consente la contemporanea registrazione dei dati grezzi. Un confronto diretto tra le soluzioni di post-elaborazione e quelle ottenute dalla configurazione mediante modulo RTK *embedded* non è quindi possibile. Tuttavia, i dati possono essere ritenuti comparabili essendo numerosi ed acquisiti nello stesso sito, in due periodi contigui e della stessa durata temporale (dicembre 2017, gennaio 2018).

3. ELABORAZIONE DEI DATI E TRATTAMENTO DELLE SOLUZIONI

Come anticipato nell'introduzione la sperimentazione ha l'obiettivo di valutare, in termini di ripetibilità delle misure, l'efficacia del sistema di monitoraggio. Come noto le osservabili GNSS non costituiscono il risultato finale ma devono necessariamente essere elaborate da codici di calcolo. Questi per via di differenti scelte implementative e dell'utilizzo di modelli leggermente differenti, non forniscono risultati identici pur partendo dagli stessi dati. In questo lavoro si è quindi voluto indagare la precisione di questi sistemi considerando anche differenti codici di calcolo disponibili. In particolare, sono stati considerati codici di calcolo *open-source* e gratuiti quali RTKLIB e GoGPS.

Il pacchetto goGPS è stato sviluppato in ambiente Matlab dal Politecnico di Milano e l'Università di Osaka (Herrera et al. 2015). E' progettato per il posizionamento GNSS sia per applicazioni di post-processing che in tempo reale (utilizzando il protocollo NTRIP). goGPS può essere utilizzato tramite un'interfaccia grafica o in modalità batch attraverso *script* in ambiente Matlab. Per il test, è stata preferita la modalità batch poiché può essere automatizzata, risultando più adeguata al calcolo di numerose soluzioni.

Il pacchetto RTKLIB è stato invece sviluppato da Tomoji Takasu (Takasu et al. 2007; Takasu 2007) e consiste in diverse librerie e file eseguibili. Anche in questo caso, il programma può essere eseguito mediante interfaccia grafica oppure eseguendo i singoli AP CUI (gli eseguibili) all'interno di script.

Entrambi i software sono stati utilizzati in modalità statica e in Tabella 1 sono riassunti i principali parametri utilizzati.

PARAMETRI	RTKLIB	goGPS
Versione	2.4.3 b8	0.4.3
Constellations	GPS, GLONASS	GPS, GLONASS
Elevation Mask	10°	10°
Correzione Ionosfera	Klobuchar	Klobuchar
Correzione Troposfera	Saastamoinen	Saastamoinen
Orbite	Broadcast	Broadcast
Risoluzione ambiguità di fase	Algoritmo Fix and Hold (utilizzando il metodo LAMBDA)	LAMBDA 3.0 - Integer rounding
Modello Dinamico	Kinematic	Variable

Tabella 1. Principali parametri utilizzati in ciascun software nell'elaborazione in modalità statica delle osservabili GNSS L1

Come anticipato nella sezione precedente il ricevitore utilizzato, a differenza di molti altri, consente anche di usufruire di un modulo di elaborazione *embedded* che invia direttamente sulla porta seriale del ricevitore *rover* le posizioni in tempo reale già elaborate (RTK). Quando si opta per questa modalità l'azienda non consente di impostare o modificare alcun parametro di elaborazione e le soluzioni generate sono solo quelle in tempo reale. Non è quindi nemmeno possibile chiedere al sistema di produrre una soluzione media per un certo intervallo temporale predefinito, rapido-statica o statica. Al fine di calcolare una soluzione che consideri un tempo di acquisizione superiore alla singola epoca, si è ritenuto ragionevole calcolare una soluzione mediando le posizioni generate dal sistema con la frequenza di 1 Hz, ed associarvi un parametro di varianza campionaria.

La sperimentazione si è dovuta sviluppare necessariamente in due fasi di lunghezza uguale in termini di estensione temporale ma consecutive. In una prima fase (pari a un mese) sono stati registrati i dati grezzi giornalieri con campionamento a 1Hz e si è proceduto al calcolo mediante i software precedentemente indicati. Successivamente, modificando le impostazioni

dell'hardware, si è proceduto con l'acquisizione per un periodo di pari lunghezza delle soluzioni generate dal modulo RTK *embedded*.

Disponendo di un dataset consistente si sono volute indagare le precisioni ottenibili da tali apparati non solo su finestre temporali di 24 ore, che dovrebbero consentire di raggiungere le precisioni migliori, ma anche su intervalli temporali più brevi. Tale scelta si giustifica principalmente considerando due aspetti, il primo legato al fatto che riducendo la lunghezza della finestra temporale sarebbe possibile disporre di più posizioni all'interno della stessa giornata e quindi aumentare la frequenza del monitoraggio. Il secondo aspetto è legato ad una scelta operativa in cui si preferisca non utilizzare in continuo tali sistemi ma di impiegarli con cadenza, per esempio, di una soluzione al giorno e con una finestra temporale ridotta. Tale scenario potrebbe rendersi necessario per ridurre il carico di dati da trasferire oppure per ridurre il tempo di funzionamento e quindi l'assorbimento energetico del sistema.

I dati GNSS a 1 Hz acquisiti da entrambi i ricevitori sono stati quindi convertiti da formato binario u-blox in formato standard *RINEX* e successivamente, con l'obiettivo di simulare sessioni di osservazione indipendenti più brevi rispetto a quelle di 24 ore, ogni file *RINEX* è stato suddiviso in diversi intervalli di tempo e con intervalli di campionamenti differenti (Gandolfi et al. 2016). La scelta sull'intervallo di campionamento associato a ciascuna sessione di misura è avvenuta eseguendo preliminarmente alcuni test e considerando anche noto il fatto che l'incremento della frequenza di campionamento non produce nessun beneficio laddove la lunghezza della finestra temporale è grande. Si noti infatti che anche nell'ambito degli studi più sofisticati, ad esempio per la definizione, o il mantenimento, dei sistemi di riferimento globali con l'utilizzo di strumentazione geodetica GNSS di alta gamma, il campionamento, per sessioni giornaliere, non supera mai una osservazione ogni 30 secondi (questo è di fatto anche lo standard di archiviazione dei principali *repository* internazionali).

N° file	Durata (h)	Campionamento (s)
1	24	30
2	12	30
4	6	5
8	3	5
12	2	5
24	1	1

Tabella 2. Elenco dei file elaborati nelle diverse finestre temporali

Il processo di suddivisione dei file *RINEX* giornalieri in file a lunghezza variabile è stato eseguito mediante il software TEQC (Estey & Meertens 1999) ottenendo, per ogni *RINEX* giornaliero, i file elencati in Tabella 2. Tale operazione ha consentito di ottenere quindi un dataset costituito da:

- 31 file giornalieri
- 62 file con lunghezza 12 ore

- 124 file con lunghezza 6 ore
- 248 file con lunghezza 3 ore
- 372 file con lunghezza 2 ore
- 744 file con lunghezza 1 ora

Ogni file *RINEX* è stato quindi elaborato utilizzando entrambi i pacchetti software *open-source* sopra menzionati.

Le soluzioni sono state organizzate in serie temporali, una serie per ciascuno degli intervalli di tempo considerato, tutte espresse in un sistema geodetico locale per separare le componenti Nord, Est e quota (NEU).

In prima battuta è stata calcolata la media m , il valore di s.q.m. σ e i residui (dati dalla differenza tra la soluzione e il valore medio) per ciascuna componente della serie, ipotizzando quindi la stabilità della struttura su un breve periodo di acquisizione. Su periodi più lunghi o in sospetta presenza di una dinamica in atto, la stessa analisi va compiuta in riferimento alla regressione lineare della serie temporale.

Per individuare possibili outliers si è proceduto ad un 'data snooping': il residuo più elevato in valore assoluto è stato confrontato con il valore di soglia pari a 3σ , e la relativa soluzione è stata considerata anomala se il residuo superava la soglia stessa. In tal caso la soluzione relativa all'epoca è stata rimossa da tutte e tre le componenti NEU e la stessa procedura è stata ripetuta, quindi ricalcolando μ , σ e i residui. Queste iterazioni sono state eseguite fino a quando non sono risultati più presenti valori anomali nelle serie temporali. Gli ultimi valori di σ per ciascuna componente NEU sono stati quindi considerati come i parametri finali che rappresentano le precisioni delle soluzioni. Le percentuali di soluzioni rigettate col criterio descritto si attestano nell'intervallo 1-3%, senza significative differenze dovute ai software usati.

Per quanto attiene il secondo dataset, essendo soluzioni fornite direttamente dallo strumento, non è stato necessario operare alcuna elaborazione ma è stato possibile passare direttamente alla fase di analisi. Si è quindi proceduto semplicemente ad eseguire medie (con associate stime di RMS) di blocchi di soluzioni su periodi di durata variabile (esattamente seguendo lo schema di Tabella 2). È opportuno sottolineare che in questa fase gli spezzoni temporali di cui alla Tabella 2 sono figli di un'unica registrazione per la quale le ambiguità sono fissate inizialmente e mantenute per l'intero arco temporale. Ciò implica che, per le finestre temporali estratte, non vi sia al loro interno una fase di fissaggio delle ambiguità.

4. RISULTATI

Per tutte le serie temporali, ciascuna legata ad un certo intervallo di tempo della sessione di osservazione, sono stati calcolati gli RMS per ogni componente. È bene precisare che nonostante i risultati siano coordinate calcolate rispetto alla posizione della stazione master, rilevata preliminarmente mediante tecnica NRTK, in tale lavoro non vengono discussi e riportati test legati alle accuratezze. Infatti, essendo lo scopo del sistema quello di monitorare eventuali variazioni nella posizione del ricevitore rover, l'informazione relativa alla posizione esatta del ricevitore non è influente, mentre risulta fondamentale la precisione delle coordinate ottenute.

I risultati ottenuti attraverso la post-elaborazione con goGPS e RTKLIB sono mostrati nella Figura 3. Si può notare che le precisioni sono sempre migliori di 2 mm in termini di RMS

nelle componenti planimetriche, anche con finestre temporali pari ad un'ora. L'RMS nella componente altimetrica è inferiore ai 5 mm per le sessioni di osservazione più brevi, ma diminuisce fino a valori attorno al millimetro per le soluzioni giornaliere. Confrontando i due software utilizzati, non sono evidenti differenze significative considerando le sessioni inferiori alle 6 ore. Diversamente, per i file *RINEX* con osservazioni oltre le 6 ore, il software RTKLIB precisi maggiori in planimetria rispetto a goGPS, ma inferiori nella componente altimetrica.

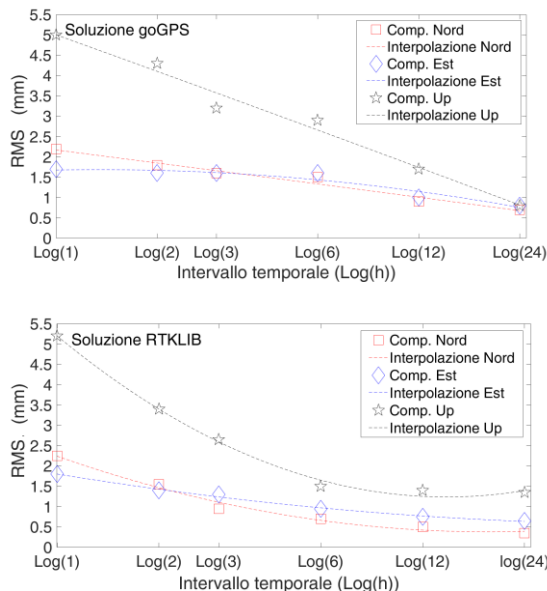


Figura 3. RMS delle soluzioni ottenute dall'elaborazione con goGPS (in alto) e RTKLIB (in basso) nelle componenti NEU col le relative funzioni interpolanti espresse con tempi in scala logaritmica.

Le soluzioni calcolate tramite il modulo RTK embedded mostrate in Figura 4 sono più precise rispetto a quelle post-elaborate se si considerano le sessioni di osservazione più brevi. Questo tipo di andamento è ragionevole in quanto il fissaggio delle ambiguità delle soluzioni RTK con il modulo *embedded* è stato mantenuto per tutto il periodo considerato, mentre le soluzioni post-elaborate hanno necessitato del periodo di convergenza per ogni file *RINEX*, il che ha impattato sulla precisione in particolar modo nelle sessioni brevi. Si può anche notare che, per soluzioni RTK *embedded*, la componente Nord risulta essere la più precisa in assoluto anche considerando le osservazioni giornaliere. Probabilmente questo comportamento è dovuto al filtro di Kalman utilizzato nell'algoritmo di elaborazione dei dati in tempo reale.

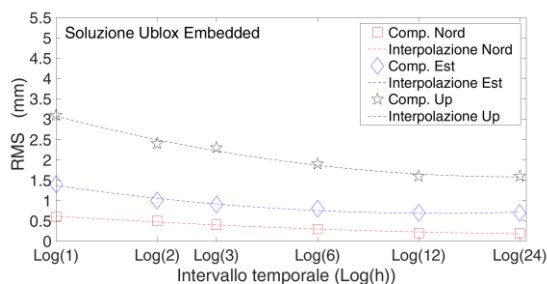


Figura 4. RMS delle soluzioni ottenute dall'elaborazione del modulo RTK embedded nelle componenti NEU

5. CONCLUSIONI

È stato realizzato un prototipo di sistema di monitoraggio, utilizzando strumenti GNSS a basso costo con l'obiettivo di fornire dati a 1 Hz 24 ore al giorno. Il prototipo è stato installato sul Ponte Motta a Cavezzo (MO) realizzando una *baseline* tra i ricevitori master (spalla del ponte) e rover (mezzeria) pari a circa 50 metri. I dati GNSS sono stati acquisiti alla frequenza di 1Hz, sia in termini di osservabili grezze che di soluzioni fornite dal modulo RTK *embedded* del ricevitore scelto per il test.

Il sistema ha fornito soluzioni statiche giornaliere le cui precisioni, in termini di RMS, sono state inferiori a 1 mm per le componenti planimetriche e 1-1,5 mm per la quota. Gli RMS sono aumentati nelle sessioni più brevi ma rimangono comunque entro i 2 mm in planimetria anche utilizzando 1 ora di osservazione. Nella componente altimetrica l'RMS è arrivato a 5 mm per osservazioni di 1 ora.

Un confronto con i due software RTKLIB e goGPS ha mostrato risultati migliori per il primo, specialmente considerando la componente Nord, mentre goGPS ha fornito una maggiore precisione solo per la componente altimetrica quando sono state utilizzate osservazioni di 24 ore. Le soluzioni calcolate tramite il modulo *embedded* appaiono leggermente migliori di quelle ottenute con i software open-source, soprattutto per quanto attiene le finestre temporali più brevi. Si rammenta però che in questo caso non viene eseguito il fissaggio delle ambiguità per ogni soluzione, il che influenza positivamente soprattutto i risultati relativi alle finestre di osservazione più brevi.

In conclusione, il sistema di monitoraggio a basso costo qui presentato sembra fornire prestazioni molto competitive. Infatti, è possibile ottenere precisioni inferiori ai 2 mm in planimetria su intervalli temporali al di sotto delle 6 ore ed inferiori ai 5 mm per la componente altimetrica. Utilizzando invece intervalli temporali più lunghi è possibile raggiungere precisioni inferiori al millimetro. Visto l'elevato livello di precisione ottenuto, si può affermare che tali strumenti possono utilizzati anche per il monitoraggio delle strutture nei casi in cui sia possibile posizionare i ricevitori a distanze non troppo elevate.

6. BIBLIOGRAFIA

- Caldera S, Realini E, Barzaghi R, Reguzzoni M, Sansò F. 2016, Experimental study on low-cost satellite-based geodetic monitoring over short baselines. *J Surv Eng.* 142:04015016.
- Celebi M, Sanli A. 2002, GPS in Pioneering Dynamic Monitoring of Long-Period Structures. *Earthq Spectra* [Internet]. [cited 2018 Sep 4]; 18, pp. 47–61.
- Cina A, Piras M. 2015, Performance of low-cost GNSS receiver for landslides monitoring: test and results. *Geomatics, Nat Hazards Risk* [Internet]. 6, pp. 497–514.
- Estey L, Meertens C. 1999, TEQC: the multi-purpose toolkit for GPS/GLONASS data. *GPS Solut* [Internet]. [cited 2016 Mar 16]; 3(1), pp. 42–49.
- Gandolfi S, Tavasci L, Poluzzi L. 2016, Study on GPS-PPP precision for short observation sessions. *GPS Solut.* 21(3), pp. 887–896.
- Herrera AM, Suhandri HF, Realini E, Reguzzoni M, de Lacy MC. 2015, goGPS: open-source MATLAB software. *GPS Solut.*

Hudnut K, Behr J. 1998, Continuous GPS monitoring of structural deformation at Pacoima Dam, California. *Seismol Res Lett.* 69, pp. 299–308.

Manzini N, Orcesi A, Thom C, Botton S, Clement A. 2018, Use of low-cost GNSS receivers for Structural Health Monitoring. *40th IABSE Symp Tomorrow's Megastructures.*

Squarzoni C, Delacourt C, Allemand P. 2005, Differential single-frequency GPS monitoring of the La Valette landslide (French Alps). *Eng Geol.*

Takasu T. 2007, RTKLIB: An open source program package for GNSS positioning.

Takasu T, Kubo N, Yasuda A. 2007, Development, Evaluation and Application of RTKLIB: A program library for RTK-GPS. *GPS/GNSS Symp 2007*, pp. 213–218.

Takasu T, Yasuda A. 2009, Development of the low-cost RTK-GPS receiver with an open source program package RTKLIB. [place unknown].

Wiśniewski B, Bruniecki K, Moszyński M. 2013, Evaluation of RTKLIB's Positioning Accuracy Using low-cost GNSS Receiver and ASG-EUPOS. *TransNav - Int J Mar Navig Saf Sea Transp.* 7(1), pp. 79–85.