

**ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITÀ DI BOLOGNA**

---

**SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA**

**D.I.C.A.M.**

Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali

**CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE**

**TESI DI LAUREA**

in

*Controllo e collaudo delle strutture e del territorio M*

**ANALISI DI SENSIBILITÀ DI STRUMENTAZIONE  
GNSS A BASSO COSTO  
ED  
ELABORAZIONE DATI MEDIANTE SOFTWARE  
LIBERO GOGPS**

**CANDIDATO:**

**Alberto Sorge**

**RELATORE:**

**Chiar.mo Prof. Stefano Gandolfi**

**CORRELATORI:**

**Dott. Ing. Luca Poluzzi**

**Dott. Ing. Luca Tavasci**

**Anno Accademico 2016/2017**

---

**Primo Periodo**

## Sommario

<b>Introduzione</b> .....	<b>3</b>
<b>1 - Cenni Storici del Posizionamento Satellitare</b> .....	<b>5</b>
<b>2 - Monitoraggio strutturale</b> .....	<b>10</b>
<b>2.1 - Stato dell'arte del monitoraggio strutturale GNSS low-cost</b> .....	<b>11</b>
<b>3 - Hardware</b> .....	<b>13</b>
<b>3.1 Ricevitori</b> .....	<b>13</b>
3.1.1 – Ricevitore a Basso Costo C94-M8P .....	13
3.1.2 – Ricevitore di Classe Geodetica Leica GX1230GG.....	14
<b>3.2 - Antenne</b> .....	<b>15</b>
3.2.1 Antenne a Basso Costo.....	15
3.2.2 Antenna di Classe Geodetica .....	17
<b>4 – Software</b> .....	<b>19</b>
<b>4.1 - Software di Terze Parti</b> .....	<b>19</b>
4.1.1 – goGPS.....	19
4.1.1 – TEQC .....	22
<b>4.2 - Software creati nel lavoro di Tesi</b> .....	<b>23</b>
4.2.1 - Automatizzazione del lancio delle analisi con goGPS .....	23
4.2.2 - Analisi delle soluzioni di goGPS .....	28
<b>5 – La sperimentazione ed i risultati</b> .....	<b>32</b>
<b>5.1 - Fase I (Ripetibilità al Variare della Lunghezza della Base Considerata)</b> .....	<b>32</b>
<b>5.2 - Fase II (Studio della Capacità di Individuazione dei Movimenti)</b> .....	<b>44</b>
5.3 Confronti Base-Corta Fase I vs Fase II.....	50
<b>5.4 Risultati Individuazione e Rimozione Outliers</b> .....	<b>57</b>
<b>6 – Conclusioni</b> .....	<b>60</b>
<b>8.1 Sviluppi futuri</b> .....	<b>62</b>
<b>Bibliografia</b> .....	<b>64</b>

<b>Sitografia.....</b>	<b>66</b>
<b>Appendici.....</b>	<b>67</b>
<b>Lancio goGps in loop .....</b>	<b>67</b>
<b>Tipico Codice Estrazione Dati.....</b>	<b>68</b>
<b>Preparazione dati e lancio pulizia 3σ .....</b>	<b>68</b>
<b>Ricerca e Rimozione Outliers Normalizzata - Metodo 3σ .....</b>	<b>69</b>
<b>Script Realizzazione Grafici Esempio tipo.....</b>	<b>70</b>

## Introduzione

Il presente lavoro di tesi si inserisce all'interno del progetto INFRASAFE, patrocinato principalmente dall'Unione Europea Fondo per lo Sviluppo Regionale e dalla Regione Emilia Romagna. Il progetto INFRASAFE si propone di sviluppare una piattaforma multidisciplinare per la fornitura alle imprese di tecnologie e *know-how*, atte al monitoraggio e alla gestione delle infrastrutture idrauliche e dei rischi ad esse connessi. Facendo riferimento a due attraversamenti fluviali, viene infine messo a punto un sistema di allerta che, tramite l'elaborazione in tempo reale dei messaggi ricevuti dai sottosistemi monitorati, segnala l'eventuale allerta e l'origine della criticità. Il CIRI-ICT (Centro Interdipartimentale per la Ricerca Industriale – Information and Communication Technology ha come responsabilità lo sviluppo di un sistema basato sulla tecnologia GNSS per lo studio dei piccoli movimenti della struttura mediante strumentazione a basso costo.

Questa tesi ha affrontato la parte riguardante l'ottimizzazione del processo di gestione dei dati di posizionamento satellitare per il monitoraggio di ponti con strumentazione a basso costo. L'obiettivo principale è sperimentare un sistema di allerta che lavori in tempo reale o quasi-reale.

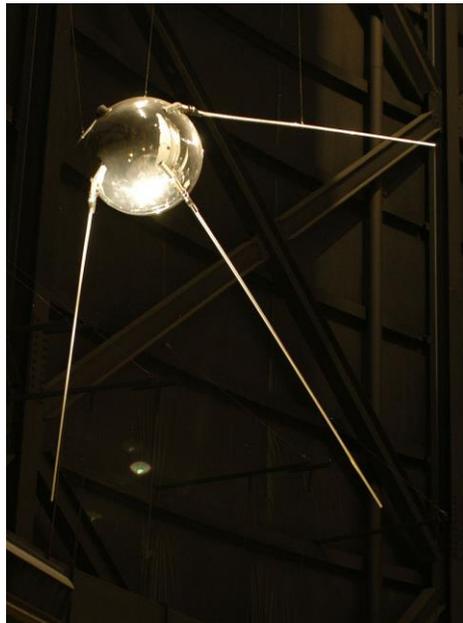
Il sistema che si vuol sviluppare consentirà il monitoraggio sia di lungo periodo come ad esempio cedimenti dovuti a viscosità dei materiali da costruzione e del terreno ma anche fenomeni rapidi quali il traffico ferroviario ed eventi sismici o intensi fenomeni metereologici (*early warning*).

Nello specifico il lavoro di questa tesi è incentrato sulla valutazione sperimentale della capacità di un sistema GNSS, operante in modalità statica e approccio differenziato, in grado di evidenziare lo spostamento del ricevitore *rover* in diverse configurazioni di lavoro. La prerogativa principale del sistema analizzato è l'utilizzo di strumentazione a basso costo che, se opportunamente utilizzata, può raggiungere precisioni comparabili a strumentazioni di classe geodetica il cui costo è dieci volte maggiore. L'obiettivo finale che ha il Dipartimento D.I.C.A.M.-Topografia, con il quale è stato affrontato questo lavoro, è di trasferire il prototipo del sistema su una struttura individuata per la sperimentazione. Sono stati effettuati

molteplici test in differenti configurazioni *hardware* e *software* in modo da individuare le metodologie ottimali ai fini preposti. Per la sperimentazione sono state valutate differenti variabili tra cui la frequenza di acquisizione, il costo computazionale e la precisione del sistema. L'obiettivo di questo lavoro è stato quello di individuare le condizioni ottimali di funzionamento entro le quali il sistema è in grado di operare prima della messa in opera. I dati grezzi dei ricevitori sono stati elaborati con il software freeware e open source goGPS, sviluppato dal Laboratorio di Geomatica del Politecnico di Milano in collaborazione con l'università di Osaka (Giappone). GoGPS è in grado di fornire soluzioni derivanti da strumentazioni *low-cost*. Essendo il monitoraggio il fine principale di questo lavoro di tesi, si è cercato di automatizzare il processo, creando un *software* in ambiente MatLab in grado di ottimizzare il processo di elaborazione del dato nell'ottica di automatizzare il più possibile il monitoraggio strutturale continuo di punti notevoli.

## 1 - Cenni Storici del Posizionamento Satellitare

La storia del posizionamento satellitare ha inizio il 4 ottobre 1957, in piena guerra fredda, con il lancio da parte dei sovietici dello Sputnik, nome che può essere tradotto dal russo in due modi: compagno di viaggio o banalmente satellite. Lo Sputnik 1 è stato il primo satellite artificiale ad orbitare attorno al nostro pianeta.



*Figura 1 Replica Sputnik 1 primo satellite artificiale in orbita*

Il primo problema di posizionamento satellitare che mente umana abbia mai pensato è stato proposto da due ricercatori americani, William Guier and George Wiefenbach, del Johns Hopkins Applied Physics Laboratory (APL) di Baltimora che si immaginarono, per l'uso che oggi si fa del posizionamento satellitare, il problema inverso, ovvero misurare la posizione dello Sputnik tramite la misura delle variazioni in frequenza di una trasmissione radio sfruttando l'effetto Doppler. Molti anni dopo a questa idea un altro scienziato di APL, Frank McClure, realizzò che sfruttare la conoscenza dell'orbita di un satellite che trasmetta un segnale radio

avrebbe permesso di determinare la posizione di un punto sulla superficie terrestre, invertendo così il problema proposto dai suoi due colleghi e facendo nascere quello che è oggi il posizionamento satellitare terrestre.

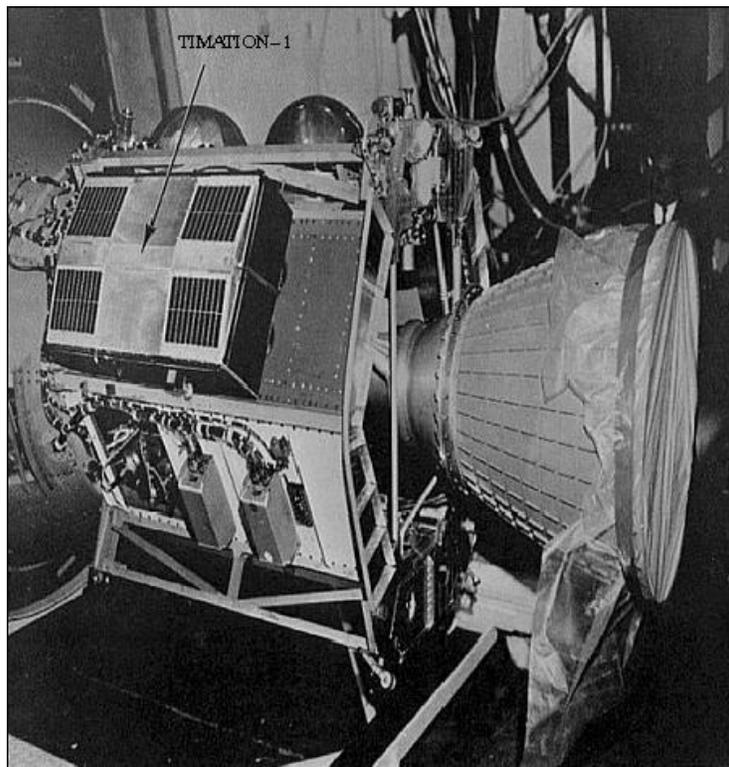
Come si può facilmente immaginare il primo utilizzo venne proposto da McClure fu per scopi militari, ovvero utilizzare i satelliti per identificare la posizione dei sottomarini nucleari. Il primo sistema di posizionamento satellitare, TRANSIT, con una costellazione di 5 satelliti, iniziò ad operare nel 1964 ed era in grado di determinare la posizione di un sottomarino in 6-10 minuti con una precisione di 25m.



*Figura 2 TRANSIT primo sistema posizionamento satellitare*

Successivamente si creò una sorta di competizione tra i ricercatori appartenenti a due agenzie governative americane. Il Naval Research Laboratory della marina statunitense mise in orbita due satelliti, il primo nel 1967 e il secondo nel 1969,

dotati di orologi al quarzo aventi precisione di una parte per milione all'interno del programma TIMATION.



*Figura 3 The TIMATION-1 spacecraft on the launcher (image credit: NRL)*

Il TIMATION, grazie all'utilizzo di orologi di grande precisione, permise di aumentare sensibilmente l'accuratezza del posizionamento ma essendo un progetto della marina militare era in grado di risolvere la posizione soltanto in due dimensioni poiché, è facile intuire che, la componente altimetrica non era di loro interesse. L'altra agenzia che prese parte alla ricerca sul posizionamento satellitare fu la Air Force, a cui ovviamente interessava anche l'aspetto altimetrico, con il programma 621B che impiegava un segnale radio pseudo casuale in grado di resistere ai disturbi radio intenzionali (*radio jamming*) capace di fornire la posizione nelle tre componenti spaziali.



*Figura 4 Aerospace Corporation Engineer Al Gallegly (left) e Grumman engineer M. Moore test a transmitter per il sistema 621B a White Sands Missile Range, New Mexico, in 1972*

Tutti e 3 i sistemi avevano limiti: il TRANSIT poteva essere aggiornato solo dalle quattro alle sei volte al giorno e se fossero stati lanciati più satelliti di sarebbero disturbati l'uno con l'altro da un punto di vista della trasmissione radio, il TIMATION era facilmente disturbabile e quindi non adatto a scopi militare e per altro limitato alle due dimensioni e infine il 621B necessitava di un segnale continuo da terra per operare.

Il sistema *Global Positioning Satellite* (GPS) /NAVSTAR, approvato il 17 dicembre 1973, unisce le migliori caratteristiche dei sistemi TRANSIT, TIMATION e 621B.



*Figura 5 Artist's conception of GPS Block II-F satellite in Earth orbit*

Dal sistema TIMATION, l'idea di utilizzare orologi di grande precisione e dal sistema TRANSIT le orbite e il metodo di predizione orbitale e dal 621B la struttura del segnale radio. L'utilizzo civile del sistema GPS/NAVSTAR fu concesso per la prima volta dal Presidente Ronald Reagan in risposta all'abbattimento di un aereo di linea coreano, con a bordo 269 persone di cui 62 americane, che per un errore di navigazione entrò nello spazio aereo sovietico e fu abbattuto da due missili. Dal 1973 a oggi l'evoluzione tecnologica (*hardware* e *software*), il miglioramento delle conoscenze scientifiche (soprattutto in termini di modellistica atmosferica, satellitare ma non solo) ha collocato la tecnologia GPS come quasi imprescindibile per applicazioni di posizionamento e di rilievo di precisione.

A seguito dell'introduzione di altre costellazioni tra cui quella GLONASS (1982-2016 messa in orbita dalla Russia per usi sia militari che civili), BEIDOU (China) e GALILEO (2011-oggi: di proprietà dell'Unione Europea per usi esclusivamente civili), oltre che ad un'estensione del numero di satelliti utilizzabili per scopi civili sono state sviluppate numerose tecniche di utilizzo dei dati sia in tempo reale che utilizzati in post-elaborazione.

## 2 - Monitoraggio strutturale

Il monitoraggio è per definizione il controllo di una quantità significativa tramite misure ripetute nel tempo.

Il monitoraggio strutturale rappresenta, dunque, un aspetto emergente nel campo dell'ingegneria civile.

In particolare si sta affermando come uno strumento gestionale fondamentale per garantire la sicurezza in servizio delle strutture e per consentire una programmazione economica ed efficace degli interventi di manutenzione. Una delle principali finalità, dunque, è quella di seguire l'evoluzione nel tempo dello stato di salute di una costruzione. Questa esigenza nasce in risposta al continuo ed incessante degrado subito nel tempo da tutte le opere di ingegneria civile [Hong-Na Li et al., 2004]. Il monitoraggio delle opere civili non riguarda solo l'identificazione di danni improvvisi o progressivi ma anche l'osservazione continua delle prestazioni delle stesse nelle condizioni di esercizio o durante particolari condizioni ambientali quali i terremoti [Mufti, 2001].

Le quantità che possono essere misurate ai fini del monitoraggio possono essere divise principalmente in due macro categorie:

- Quantità di natura statica
- Quantità di natura dinamica

Un sistema di monitoraggio strutturale statico, contrariamente a quello dinamico, può essere utilizzato anche in fase di costruzione dell'opera, (ad esempio per controllare fasi di carico). Le caratteristiche dinamiche della struttura dipendono essenzialmente dalla distribuzione della massa e quindi darebbero informazioni sulla struttura incompleta contrariamente alle principali caratteristiche statiche che dipendono principalmente da caratteristiche reologiche.

Di tutt'altra tipologia sono le tecnologie che consentono di monitorare strutture e che possono essere suddivisi in:

- trasduzione elettronica o meccanica
- acquisizione automatica o manuale
- lettura strumentazione in loco o da remoto
- misure distruttive o non distruttive

Automatizzando le misure, oltre ad evitare errori grossolani in fase di misurazione, si ha la possibilità di disporre di una quantità di informazioni inimmaginabile prima dell'avvento dei computer.

Senza entrare nel merito legale e umano riguardo le tragedie, che nei mesi in cui si stava svolgendo questo lavoro di tesi, hanno preso spazio nelle prime pagine di quotidiani nazionali raccontando una serie di crolli di viadotti sulla rete autostradale italiana, si può affermare che i sistemi di monitoraggio strutturale, come quello in esame, avrebbero potuto fornire indicazioni estremamente utili e probabilmente evitare l'accaduto.

## 2.1 - Stato dell'arte del monitoraggio strutturale GNSS low-cost

In letteratura molti hanno affrontato lo studio di sistemi GNSS a basso costo per il monitoraggio delle strutture, per il controllo di strutture in elevazione e per la stabilità di pendii. Le caratteristiche che contraddistinguono questi sistemi, oltre ai costi bassi, sono:

- il basso consumo energetico
- il piccolo ingombro (e il peso ridotto)

Il primo punto è principalmente rivolto a garantire che una volta messo in opera il sistema sia autosufficiente da un punto di vista energetico e che quindi si presti ad operare *off-grid* [al di fuori della rete elettrica N.d.R.] alimentato ad esempio da pannelli fotovoltaici. Le dimensioni e peso ridotti oltre ai più elementari benefici di

trasporto e facilità di messa in opera possono anche risultare utili circa il controllo di punti difficili da raggiungere.

Altro vantaggio dei sistemi di posizionamento *low-cost* è che possono essere utilizzati, se necessario, accettando un rischio maggiore che questi vengano distrutti in situazioni di gravi instabilità. Ad esempio potrebbero essere impiegati nelle fasi immediatamente successive ad un sisma in modo che i soccorritori possano lavorare in maggiore sicurezza.

Molte sono state le sperimentazioni condotte da ricercatori di tutto il mondo. Sono state testate moltissime combinazioni di funzionamento del sistema variando il metodo di posizionamento, la distanza e la tecnologia di comunicazione *rover-master*. In generale i risultati hanno sempre evidenziato una sensibilità di questi sistemi dall'ordine di pochi millimetri a quello dei centimetri. Risultati alquanto incredibili poiché in un mero bilancio *costi/precisione* questi sistemi a basso costo sono un buon compromesso o comunque degni di confronto rispetto a ricevitori di classe geodetica.

## 3 - Hardware

Si presenta in questo capitolo tutto il materiale hardware utilizzato, senza entrare nello specifico della sperimentazione e del perché delle scelte compiute. Quindi per comodità di lettura nei prossimi paragrafi sarà esposto un elenco di tutta la strumentazione e le relative caratteristiche tecniche principali. I seguenti paragrafi distinguono la strumentazione utilizzata nella sperimentazione in relazione al fatto che siano a basso costo o di classe geodetica.

### 3.1 Ricevitori

#### 3.1.1 – Ricevitore a Basso Costo C94-M8P

Il ricevitore oggetto di questa tesi è nello specifico il C94-M8P (*Figura 6*) prodotto da U-BLOX. La casa produttrice lo vende come parte di un *kit* di valutazione. Il costo del *kit* è all'incirca di 360,00€ e comprende:

- 2 schede madri C94 (entrambe con il modulo ad alta precisione NEO M8P)
- 2 antenne UHF esterne (collegamento radio)
- 2 antenne GNSS esterne *patch*
- 2 piatti di metallo per migliorare la ricezione dell'antenna
- 2 cavi micro USB

La serie di moduli NEO-MP8 aggiungono ai prodotti UBLOX la modalità RTK, che nelle versioni precedenti a questa non era implementata. Sono pertanto dotate di un collegamento UHF che permette di accoppiare due ricevitori in modo che il primo (*master*) invii le correzioni a quello che sta valutando la posizione del punto d'interesse (*rover*). Nel suo complesso la C94-MP8 non è ancora un vero e proprio prodotto finito ma un *kit* di valutazione, un prototipo.



Figura 6 Scheda Madre C94-M8P

### 3.1.2 – Ricevitore di Classe Geodetica Leica GX1230GG

Nel corso della sperimentazione si è utilizzato il ricevitore di classe geodetica Leica GX1230GG (Figura 7) già in possesso del dipartimento.

Le caratteristiche di principale interesse escludendo particolari estremamente tecnici e non rilevanti ai fini di questa tesi e dichiarati da Leica sono:

- Ricevitore universale per tutte le applicazioni
- 14L1+14L2→GPS  
12L1+12L2→GLONASS
- Registrazione dati
- Opera in RTK e DGPS
- Utilizzabile come *rover* o stazione di riferimento(*master*)



Figura7 Leica GX1230GG

Il ricevitore è integrato in un sistema interno al dipartimento in grado di trasmettere i dati acquisiti ad un unico server per la loro registrazione. In questo modo è possibile elaborare i dati sia in post-processing sia in real-time.

## 3.2 - Antenne

### 3.2.1 Antenne a Basso Costo

La prima ha nome commerciale ANN-MS (*Figura 8*) ed è l'antenna con la quale viene fornito il *kit* di valutazione della U-Blox. Ha un costo se comprata singolarmente di circa 10€. Il suo valore commerciale la fa entrare di diritto nella categoria *low-cost* ma è importante dire che si rimane nella categoria anche con spese nell'ordine di qualche centinaio di euro. Le caratteristiche principali sono le seguenti:

- Solo costellazione GPS
- *Plug&Play* non sono richieste impostazioni antenne.
- Base calamitata

- GPS L1 1575.  $\pm 3$ MHz



*Figura 8 Antenna ANN-MS*

La seconda antenna presa in esame è “Bullet™ 360 Antenna” (*Figura 9*) prodotta da Trimble le cui caratteristiche principali sono:

- Multi costellazione
- Il montaggio segue lo standard degli strumenti topografici
- Copertura Elevazione 0°-90°
- Copertura Azimut 360°
- Frequenze GPS L1 1575.42  $\pm 3$ MHz BDS B1 1561  $\pm 3$ MHz GLO G1 1602  $\pm 3$ MHz

Trimble dichiara che è progettata specificatamente per ambienti urbani. Una delle problematiche di tutti i sistemi GNSS in ambiente cittadino è il *multipath*, ovvero la ricezione di segnali non ricevuti direttamente dal satellite ma tramite la riflessione ad opera delle superfici dei palazzi adiacenti all’antenna. Ha un valore commerciale di circa 100€.



*Figura 9 Coppia Antenne Trimble Bullet 360°*

### 3.2.2 Antenna di Classe Geodetica

La terza antenna e ultima è di classe geodetica e di comprovata affidabilità e già in possesso del dipartimento che ha nome commerciale: Leica AX1202GG (*Figura 10*). Ha un valore commerciale intorno ai 700€ e pertanto non rientra nella categoria *low-cost*.



*Figura 10 Antenna Leica AX1202GG*

Le specifiche principali sono:

- Multi-costellazione GPS e GLONASS
- Doppia frequenza L1 e L2
- Il montaggio segue lo standard degli strumenti topografici

In conclusione a questo capitolo. si vuol sottolineare al lettore che la strumentazione, sommariamente descritta, è stata utilizzata in quasi tutte le combinazioni disponibili. Al fine di poter disporre del maggior numero di informazioni per effettuare confronti su strumentazioni *low-cost* adottando come riferimento la strumentazione di classe geodetica.

Questo genere di confronti sono necessari per giustificare, ad un eventuale committente, la scelta di adottare strumentazione a basso costo.

## 4 – Software

### 4.1 - Software di Terze Parti

Come già accennato il *software* principale che è stato utilizzato è goGPS che è sia *freeware* che *open-source*, aspetti di importanza fondamentale poiché essendo *freeware* rientra perfettamente nell'idea di utilizzarlo in un sistema *low-cost* e il fatto che sia *open-source* permette di poterlo modificare a piacere in funzione delle proprie esigenze. Rimane solo da analizzarne gli aspetti tecnici come il costo computazionale e il grado di affidabilità della soluzione.

Il lavoro principale di programmazione di questa tesi è stato di creare un *software* in grado di automatizzare il lancio di goGPS, l'elaborazione della soluzione.

#### 4.1.1 – goGPS

Dal lancio della versione standard di goGPS si apre un'interfaccia grafica in grado di elaborare una singola *baseline*. Finché aperta e anche durante l'elaborazione, l'ambiente MatLab, in cui goGPS opera risulta “*Busy*” e pertanto non è possibile modificare o anche solo vedere variabili salvate precedentemente, aspetto particolarmente rilevante poiché l'elaborazione di alcuni RINEX può essere molto lunga (in media 10min ad a singola *baseline*). Oltre alla versione standard è possibile lanciare goGPS anche da terminale utilizzando un *file batch.m* che può essere reperito nel sito di goGPS in cui tutte le funzionalità e opzioni sono rese disponibili in stringhe di comando MatLab.

**Per comodità di lettura ogni impostazione preliminare che seguirà sarà riferita all'interfaccia grafica del programma.**

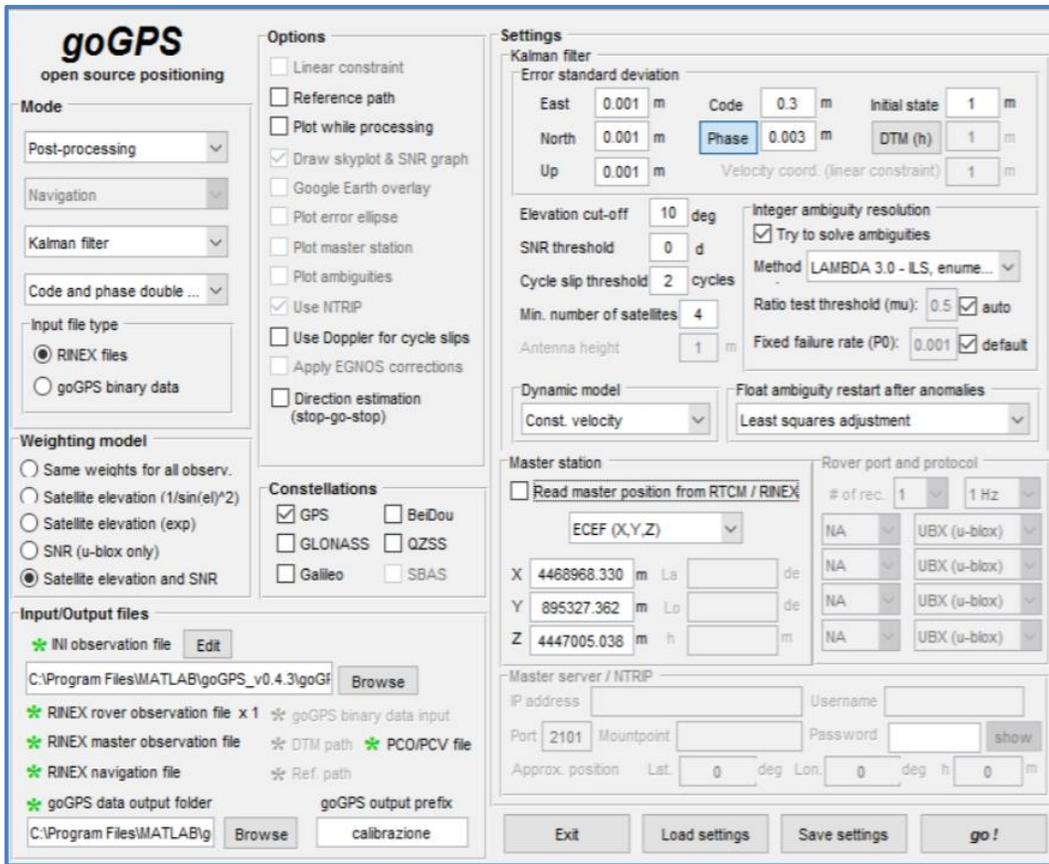


Figura 11 Interfaccia grafica goGPS

La U.I. (User Interface, Figura 11), come si può osservare in figura, è suddivisa in zone dedicate ad aspetti specifici. Queste zone si attivano o disattivano in funzione delle singole scelte. Questo aspetto limita notevolmente le possibilità di errore e al contempo aiuta ad ottimizzare il tempo di settaggio del programma.

Gli aspetti principali del programma su cui si è lavorato o che sono di particolare interesse sono i seguenti:

<p><b>Mode</b></p> <p>È richiesto all'operatore di definire se si tratta di un'elaborazione in <i>post-processing</i> o in <i>real time</i>. Nel caso di questa tesi si è lavorato in <i>post-processing</i> del dato, impostazione che offre la scelta del metodo di ricerca della soluzione, basata sui minimi quadrati o sul filtro di Kalman.</p>
---

### Input & Output

L'allocazione dei *file* viene esplicitata in un *file .ini* avente una sintassi ben precisa, difficile da sbagliare poiché è presente un editor che facilita questa operazione. Nel *file .ini* devono essere esplicitate le posizioni dei RINEX di *rover, master* e del *file* di navigazione corrispondente all'interno dell'elaboratore. I dati in *output* verranno salvati con il nome e posizione a discrezione dell'operatore. Sono accettati in *input* sia RINEX che *files* binari. I *files* che vengono prodotti in *output* sono molteplici, infatti ad esecuzione conclusa si avranno a disposizione *report* in formato *.pdf e .txt e .kml* per la visualizzazione su cartografia, oltre ovviamente, alla terna di coordinate di soluzione.

### Master Station

Il programma offre la possibilità di inserire le coordinate precise della stazione *master*, se disponibili, per migliorare la precisione della soluzione. Il menu a tendina permette di scegliere tra i sistemi di riferimento più usati al fine di facilitare l'utilizzo del programma.

### Options

Zona dell'*User Interface* che fornisce il parziale controllo sulla quantità di finestre che verranno aperte durante l'elaborazione e sulla tipologia e quantità dei dati in *output*. D'interesse perché riducendo al minimo la creazione di *files* e l'apertura di finestre il tempo di elaborazione si riduce notevolmente. Da sottolineare che per gli obiettivi che si pone questo lavoro è sufficiente la terna di coordinate della soluzione.

Dynamic Mode
Essendo un monitoraggio si è lavorato in statico. L'opzione è selezionabile in questa zona della UI e va a disattivare la zona dove è possibile impostare l'errore della deviazione standard sulle velocità.

Ai fini del monitoraggio strutturale è necessaria soltanto una stringa contenente: data e ora, la posizione trovata e varianze e covarianze associate. La generazione di *files* di soluzione è molto completa, in media per ogni punto di soluzione ottenuto, goGPS produce una decina di *files* di *report* in vari formati (.pdf .kml .txt .bin) occupando circa 70MiB di memoria. I *files* che non sono di interesse non possono essere controllati nella loro generazione. La struttura del programma è molto complessa con migliaia di richiami di variabili all'interno dei 700 *files.m* che costituiscono goGPS. Manca una guida all'utilizzo che permetta la piena consapevolezza di ogni parametro e/o *files.m*.

#### 4.1.1 – TEQC

Per la preparazione dei *files* RINEX è stato utilizzato il *software freeware* TEQC (*Translation, Editing and Quality Checking*), sviluppato da UNAVCO. Questo software è disponibile per sistemi operativi UNIX/LINUX sia che per il più comune Windows. È stata utilizzata la funzione di *time windowing* e di *file splicing* dei *file* RINEX.

Il *software* che non è *open-source* è eseguibile solo da terminale e pertanto necessita la conoscenza della sintassi adeguata.

I comandi principali che sono stati utilizzati riguardano, come già accennato, il *time windowing* e *file splicing*, nel dettaglio:

- `teqc -O.int[erval,sec] sampling interval, in seconds`
- `teqc -tbin hour mytbinfile inputdatafile`

Il primo comando consente di passare a RINEX con frequenza di acquisizione minore. Nello specifico si sono utilizzati RINEX campionati a 1s (1 Hz), 5s(0.2Hz) e 30s (0.034 Hz). Il secondo comando serve a suddividere un *file* contenente 24h di osservazioni in più *files* contenenti informazioni per un numero minore di ore. Quindi il numero di *files* per ogni giorno di analisi cambia al variare del *file splicing* d'interesse.

## 4.2 - Software creati nel lavoro di Tesi

Tutti i codici sono stati creati in ambiente MatLab e pertanto d'ora in avanti si farà riferimento a questo linguaggio di programmazione.

I codici creati hanno avuto i seguenti scopi:

- Il lancio automatizzato delle analisi.
- La pulizia dei risultati e la rappresentazione degli stessi.

Come si è già accennato nel paragrafo “Software di Terze Parti”, il lancio di goGPS è possibile farlo da interfaccia grafica quanto, in maniera del tutto equivalente ai fini della soluzione, in modalità *batch*. La modalità *batch* è la “traduzione” in righe di comando dell'interfaccia grafica (a meno dei pulsanti e delle finestre) e quindi se opportunamente modificato non ci sono differenze di soluzione. Ogni lancio di goGPS permette di analizzare una sola osservazione e quindi si è creato attorno al *batch* un altro programma e metodo di archiviazione dei *files* che permetta di analizzare in blocco un generico numero di analisi.

### 4.2.1 - Automatizzazione del lancio delle analisi con goGPS

Si è partiti da un *file batch.m* modificato in ricerche precedenti a questa tesi e lo si è adeguato maggiormente al problema del monitoraggio.

La modifica principale consente di estrarre e scrivere tutte le soluzioni calcolate da goGps in un *file .txt* all'interno della cartella di soluzione. Questa funzione,

apparentemente banale, non è prevista nel set di *files* standard di soluzione proposti dalla *software-house* poiché ogni analisi è considerata indipendente e viene scritta come tale. Essendo il fine ultimo di questa tesi il monitoraggio le soluzioni devono essere archiviate tutte insieme in maniera da poterle gestire come serie temporale. Anche se l'obiettivo rimuovere la supervisione di un operatore nel processo di ricerca della soluzione, è comunque utile, nel caso si voglia vedere se tutto sta procedendo nella maniera corretta avere la possibilità di farlo.

GoGPS di *default* fornisce degli *output* a video in fase di analisi non molto dettagliati e se il processo di soluzione non va a buon fine il programma non mostra il motivo in maniera esaustiva. Quindi si è cercato di risolvere al meglio questo aspetto aggiungendo al *file batch.m* e in alcuni *script* interni a goGPS, parti di codice che consentano di avere maggiori informazioni sul processo di analisi.

Per automatizzare il processo di analisi il *file batch.m* è stato inserito in un ciclo *for* che consente di elaborare in blocco un set di osservazioni. L'automatizzazione è possibile grazie ad uno standard di archiviazione dei *files* da analizzare.

Il *file batch.m* richiede diverse informazioni in *input* e all'interno dello stesso, per essere eseguito correttamente. Le informazioni che sono richieste in *input* sono le seguenti:

<b>Variabile Input</b>	<b>Descrizione</b>
<b>year</b>	Anno in cui è stata eseguita la misura.
<b>doy_start e doy_end</b>	Giorno di inizio e fine delle misure
<b>markerR</b>	Sigla del <i>Rover</i>
<b>markerM</b>	Sigla del <i>Master</i>
<b>sessionR</b>	Sessione del <i>Rover</i>
<b>sessionM</b>	Sessione del <i>Master</i> .

<b>idN</b>	Identificativo <i>files</i> di navigazione
<b>sessionN</b>	Sessione del <i>files</i> di navigazione
<b>OUT</b>	Cartella di output
<b>FILE</b>	Cartella contenente i <i>files</i> .ini
<b>pos_R_rcd</b>	Coordinate approssimate del <i>Rover</i>
<b>ss</b>	Scalare da 1 a numero dei <i>files</i> disponibili per le 24h

Tabella 1 Descrizione dei parametri in input di *goGPS.batch.m*

Tutti i parametri appena elencati sono essenziali per il corretto utilizzo e funzionamento del *batch* e sono alla base del programma di lancio automatico. Queste informazioni vengono estratte dai nomi dei *files* da analizzare, rinominati in maniera che contengano ordinatamente tutte le informazioni sopra elencate. Questo ha richiesto di trovare e definire una notazione di archiviazione dei *file* capace di contenere tutte le informazioni necessarie e allo stesso tempo *user-friendly*.

Di particolare importanza è il parametro *ss*. Questo parametro varia da 1 a 24 e rappresenta il numero di *files* da analizzare per un giorno di misura.

Lo si ricava:

$$ss = \frac{24h}{time\ span}$$

Ad esempio se il *time span* è 3h ore allora *ss* vale 8, numero che corrisponde al numero di *files* per ogni 24h di misurazione. Quindi per ogni giornata di misura il *file batch.m* deve essere eseguito *ss* volte. Il parametro *ss* è inserito nel nome dei *files* da analizzare.

Ad esempio:

*boga2107.16o* con finestra temporale a 2h

Il *file* citato rappresenta:

- *boga* = nome stazione che ha effettuata la misura.
- 210 = il numero del giorno. Il giorno 210 corrisponde al 29/07
- 7 = Con una finestra temporale a 2 ore si hanno in totale 12 *files*, per ogni giorno di misura, contenenti 2 ore di osservazioni ciascuno. Quindi il settimo *file* sono le misure effettuate dalle ore 12 alle ore 14
- 16 = indica le ultime due cifre dell'anno 2016
- = o(bservation). Estensione per il *files* di osservazione

Riassumendo il *file* con una finestra temporale a 2h *boga2107.16o* corrisponde alle misure effettuate dalla stazione BOGA il 29/07/2016 dalle ore 12 alle ore 14.

I parametri all'interno del *file batch.m* di maggiore interesse o che sono stati modificati sono i seguenti:

- *sessionM = sessionR = ss* questa condizione è essenziale per il corretto funzionamento del ciclo *for* in cui è lanciato il *file batch.m* e non è parte del *file* standard che si trova *online*. Grazie a questa condizione il programma è in grado di prendere i *files* di *master* e *rover* corrispondenti alle stesse ore di misura.
- *mode = goGNSS.MODE\_PP\_KF\_CP\_DD* dicitura che all'interno del GNSS.m (*file* facente parte di goGPS) va a richiedere come modalità di funzionamento del *software*: *Post-Processing* utilizzo del filtro di Kalman su codice e fase con doppie differenze.

Oltre alla corretta impostazione del codice per eseguire il programma è necessario creare un *file .ini*. I *files* con estensione *.ini* sono *files* testuali di inizializzazione utilizzati da molti *software* per immagazzinare le opzioni di funzionamento dei programmi stessi. Nel caso di goGPS il *file .ini* serve per l'individuazione dei *files* da analizzare all'interno del disco rigido. Pertanto sono un mero elenco di indirizzi

in cui sono collocati rispettivamente i *files* di osservazione del *master*, del *rover*, i *files* di navigazione e i *files* di calibrazione dell'antenna.

```
# define RINEX paths and file names
[Navigational]
isSP3 = 0
data_path = "C:\Users\Abe\Desktop\TESI\RINEX\210_216\Rinex 01H_01s\Navigazione"
#file_name = "bol12181.16n"

[Master]
data_path = "C:\Users\Abe\Desktop\TESI\RINEX\210_216\Rinex 01H_01s\BOGA"
#file_name = "boga2181.16o"

[Receivers]
nRec = 1
data_path = "C:\Users\Abe\Desktop\TESI\RINEX\210_216\Rinex 01H_01s\UBXC"
#file_name = "ublox2181.16o"

[Bin]
data_path = ""
file_prefix = "UBXC"

[PCO_PCV_file]
data_path = "C:\Users\Abe\Desktop\TESI\goGPS_Borelli\data\stations\"
file_name = "I08.ATX"

#[RefPath]
data_path = "/Volumes/Expansion_memory/"
#file_name = ""
```

Figura 12 File .ini tipo

Una volta eseguito il *file batch.m* modificato salverà all'interno di un *file .txt* tutte le soluzioni ottenute.

2016/07/31	01:59:59.000	4468935.5866	895419.0035	4447013.5791	14	-	5.310e-04	1.635e-03	5.589e-04	5.748e-04	3.293e-04	3.587e-04
2016/08/01	01:59:59.000	4468935.5870	895418.9509	4447013.5771	14	-	5.349e-04	1.504e-03	5.415e-04	5.501e-04	3.237e-04	3.535e-04
2016/08/02	01:59:59.000	4468935.6900	895419.3536	4447013.6638	14	-	9.545e-04	2.797e-03	9.680e-04	1.093e-03	6.166e-04	8.366e-04
2016/08/03	01:59:59.000	4468935.6475	895419.1621	4447013.6322	14	-	8.485e-04	2.252e-03	8.230e-04	9.088e-04	5.289e-04	6.856e-04
2016/07/28	02:59:59.000	4468935.6130	895418.9535	4447013.5835	14	-	7.401e-04	1.304e-03	6.309e-04	5.578e-04	4.429e-04	4.666e-04
2016/07/29	02:59:59.000	4468935.5819	895418.8357	4447013.5491	14	-	6.378e-04	9.166e-04	5.383e-04	-8.739e-05	3.214e-04	-1.253e-04
2016/07/30	02:59:59.000	4468935.5822	895418.8325	4447013.5539	14	-	6.039e-04	8.271e-04	5.059e-04	-2.253e-04	3.116e-04	-1.588e-04
2016/07/31	02:59:59.000	4468935.5978	895418.8493	4447013.5615	14	-	6.219e-04	8.997e-04	5.162e-04	-1.579e-04	3.542e-04	2.331e-04
2016/08/01	02:59:59.000	4468935.5826	895418.8460	4447013.5571	14	-	6.332e-04	8.064e-04	5.101e-04	-3.473e-04	3.607e-04	-1.029e-04
2016/08/02	02:59:59.000	4468936.3987	895418.6708	4447013.7574	14	-	2.536e-03	2.978e-03	2.219e-03	-6.418e-04	9.530e-04	-1.119e-03
2016/08/03	02:59:59.000	4468935.7006	895418.8302	4447013.6170	14	-	1.259e-03	1.264e-03	1.029e-03	-7.660e-04	8.424e-04	-4.985e-04
2016/07/28	03:59:59.000	4468935.5948	895418.8055	4447013.5760	14	-	8.802e-04	1.216e-03	7.923e-04	-7.719e-04	5.589e-04	-1.640e-04
2016/07/29	03:59:59.000	4468935.5696	895418.8136	4447013.5648	14	-	7.154e-04	1.037e-03	6.475e-04	-6.526e-04	4.535e-04	-1.078e-04
2016/07/30	03:59:59.000	4468935.5559	895418.8346	4447013.5683	14	-	7.158e-04	1.073e-03	6.527e-04	-6.617e-04	4.489e-04	1.014e-04
2016/07/31	03:59:59.000	4468935.5705	895418.8367	4447013.5706	14	-	7.188e-04	1.109e-03	6.513e-04	-6.800e-04	4.454e-04	5.064e-05
2016/08/01	03:59:59.000	4468935.5802	895418.8236	4447013.5803	14	-	7.135e-04	1.142e-03	6.254e-04	-6.860e-04	4.190e-04	1.562e-04
2016/08/02	03:59:59.000	4468935.5766	895418.8266	4447013.5722	14	-	7.146e-04	1.181e-03	6.149e-04	-6.978e-04	4.078e-04	1.767e-04
2016/08/03	03:59:59.000	4468935.6111	895418.9013	4447013.6263	14	-	1.185e-03	1.926e-03	9.847e-04	-1.111e-03	6.358e-04	4.335e-04
2016/07/28	04:59:59.000	4468936.4541	895418.9503	4447013.9947	14	-	3.069e-03	2.514e-03	1.680e-03	-1.300e-03	1.924e-03	2.765e-04
2016/07/29	04:59:59.000	4468935.5832	895418.8369	4447013.5665	14	-	7.741e-04	1.087e-03	4.446e-04	-5.496e-04	3.831e-04	1.175e-04
2016/07/30	04:59:59.000	4468935.5974	895418.8416	4447013.5668	14	-	8.016e-04	1.033e-03	4.360e-04	-5.296e-04	3.970e-04	7.296e-05
2016/07/31	04:59:59.000	4468935.6541	895418.8269	4447013.5800	14	-	1.065e-03	9.906e-04	4.638e-04	-5.708e-04	5.308e-04	-1.251e-04

Figura 13 Esempio del Contenuto del .txt di soluzione

gg/mm/yy	h:min:sec	X	Y	Z	Mod	$\sigma_{xx}$	$\sigma_{yy}$	$\sigma_{zz}$	$\sigma_{xy}$	$\sigma_{xz}$	$\sigma_{yz}$
----------	-----------	---	---	---	-----	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------

Tabella 2 Generalizzazione delle colonne nel file.txt contenente tutte le soluzioni

In Tabella 2 il formato della soluzione di ogni riga del *file.txt* ottenuto alla fine di ogni analisi.

Le colonne in ordine da sinistra a destra indicano rispettivamente:

- Data della misurazione
- Orario della misurazione
- Coordinata X
- Coordinata Y
- Coordinata Z
- La voce *Mod* indica la modalità nella quale è stata ottenuta la soluzione e per le impostazioni scelte poteva essere 4 o 14. In un elenco interno a goGPS delle modalità di analisi, rappresentano rispettivamente *Post-Processing* senza e con filtro di Kalman. Le soluzioni che sono state ottenute senza il filtro di Kalman differiscono di alcuni metri in modulo da quelle in cui goGPS è riuscito ad applicare il filtro di Kalman.
- Varianza in X associata alla misura
- Varianza in Y associata alla misura
- Varianza in Z associata alla misura
- Covarianza in XY associata alla misura
- Covarianza in XZ associata alla misura
- Covarianza in YZ associata alla misura

#### 4.2.2 - Analisi delle soluzioni di goGPS

Lo script *MAIN.m*, script creato in questo lavoro di tesi e che gestisce tutte le varie funzioni implementate, richiede essenzialmente il percorso di allocazione delle

soluzioni e che queste siano nominate in modo da poter aver a disposizione le informazioni su quali risultati si stanno elaborando.

Nella fattispecie:

*Sol hh ss DoyStartDoyEnd Flag.txt*

In cui i termini d'interesse sono:

- *hh* = *time windowing* (finestra temporale)
- *ss* = acquisizione di misure in secondi (diverso dal parametro *ss* citato precedentemente)
- *DoystartDoyEnd* = giorni di inizio e fine delle misure espressi in numeri (3=3 Gennaio).
- *Flag* = eventuale flag di massimo 3 caratteri per diversificare eventuali *files* a stesso prefisso.

Una volta salvati i *files* di soluzione di goGPS con questo standard, lo *script MAIN.m* esegue, per ogni *file* presente nella cartella di soluzione, le seguenti operazioni:

1. Conversione delle coordinate del *rover* in un sistema di coordinate geodetiche locali.
2. Costruzione della serie temporale a media nulla (si lavora sui residui).
3. Individuazione e rigetto degli *outliers* con metodo  $3\sigma$  iterativo.
4. Salvataggio dei dati elaborati in *file .txt*
5. Costruzione della parte grafica.

Di particolare interesse è la procedura di individuazione e rimozione degli outliers con metodo  $3\sigma$  iterativo. Tale metodo viene generalmente eseguito in modo iterativo e nella fattispecie è applicato secondo quanto riportato di seguito.

1. *Files* di *input* (serie temporale dei residui a media nulla)

2. Calcolo di  $\sigma$  per ogni singola componente (errore quadratico medio della distribuzione)
3. Normalizzazione dei residui di ogni componente rispetto a  $\sigma$  ad essa associata (i residui vengono divisi per  $\sigma$ )
4. Ricerca, del residuo massimo in valore assoluto e rigetto della misura corrispondente in caso di superamento della soglia pari a 3
5. Rimando al punto 2
6. Il programma si ferma se non esistono punti fuori dall'intervallo di confidenza  $3\sigma$ .

Il diagramma di flusso dell'algorithm è il seguente:

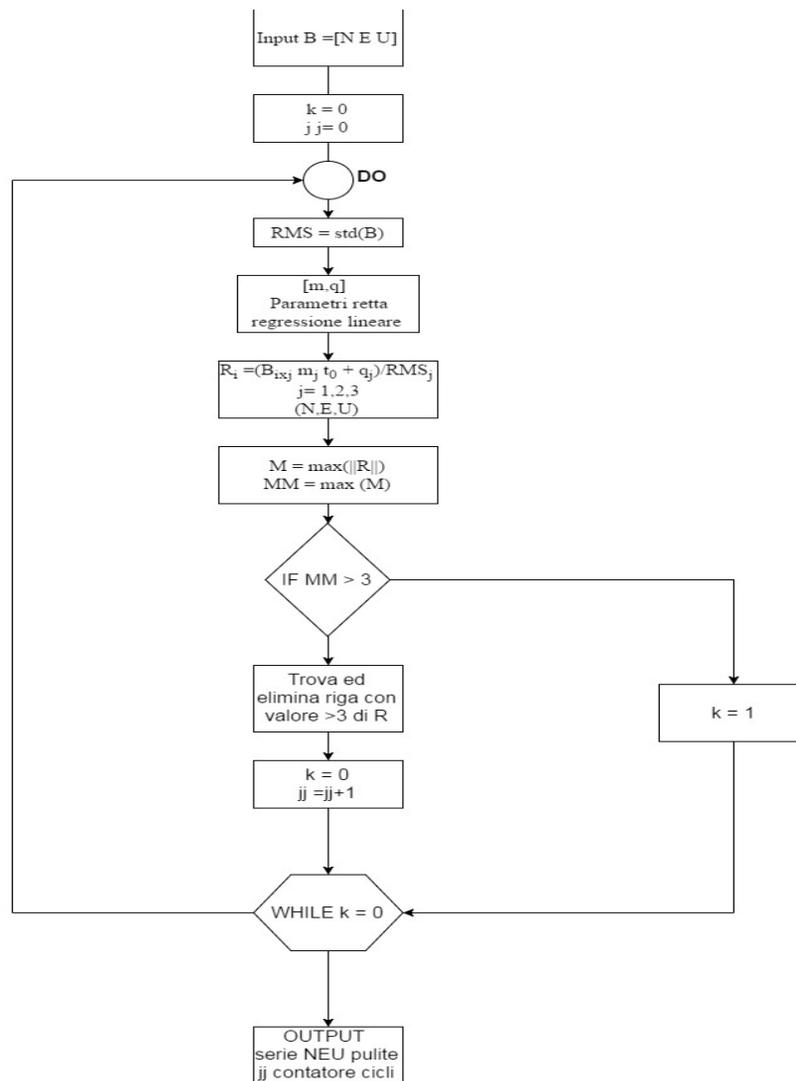


Figura 14 Diagramma di Flusso Algorithm Pulizia 3sigma

Questo algoritmo effettua una pulizia de-correlata ovvero vengono tolti tutti i punti che sono fuori dal cubo di lato  $3\sigma$  non tenendo in considerazione la covarianza delle coordinate. Esistono approcci iterativi simili a quello che stato implementato che tengono in considerazione la covarianza delle coordinate e quindi l'intervallo di confidenza è limitato da un ellissoide invece che un cubo. Questa considerazione è sicuramente un punto per migliorare la precisione del sistema di monitoraggio e quindi da considerarla un lavoro per chi continuerà questa ricerca.

## 5 – La sperimentazione ed i risultati

La sperimentazione è stata centrata sulla valutazione della precisione del sistema di posizionamento *GNSS* a basso costo al variare principalmente di due aspetti:

- la lunghezza della *baseline master-rover*
- la strumentazione utilizzata

Il primo punto è utile per comprendere qual è il limite di funzionamento ottimale del sistema in modo da facilitare la ricerca delle zone in cui è possibile monumentare le stazioni.

Il secondo punto ha il fine di comprendere i limiti tecnici attuali delle strumentazioni *low-cost* rispetto a quelle geodetiche tradizionali.

Si è confrontato un sistema misto *low-cost/classe geodetica* con uno interamente a basso costo.

Quindi è possibile suddividere l'intera sperimentazione in due fasi principali all'interno delle quali sono presenti numerosi test studiati per evidenziare gli aspetti appena spiegati.

### 5.1 - Fase I (Ripetibilità al Variare della Lunghezza della Base Considerata)

Nella prima fase si è scelto di valutare la precisione del sistema utilizzando come stazioni *master*, ricevitori e antenne di classe geodetica già a disposizione del dipartimento DICAM (dettagli tecnici significativi nel Capitolo 3).

Si sono utilizzate due stazioni *master* poste a distanze notevolmente diverse rispetto all'unica stazione *rover* ma comunque ad una distanza che per i rilievi *GNSS* è considerabile come “corta” al punto da non richiedere l'utilizzo di ricevitori a doppia frequenza.

Le due stazioni *master* (Figura 15) sono nel dettaglio:

- a 80m di distanza dal *rover* posizionata sul tetto della Scuola di Ingegneria e Architettura di Bologna che non ha particolari ostacoli che possono inficiarne la ricezione. (*BOL1*)
- a circa 1600m di distanza dal *rover* sul tetto della Torre Garisenda. La stazione della Garisenda (*BOGA*), data la vicinanza della Torre degli Asinelli (molto più alta e a sud della Garisenda) è quindi suscettibile di mancata ricezione satellitare e *multi-path*

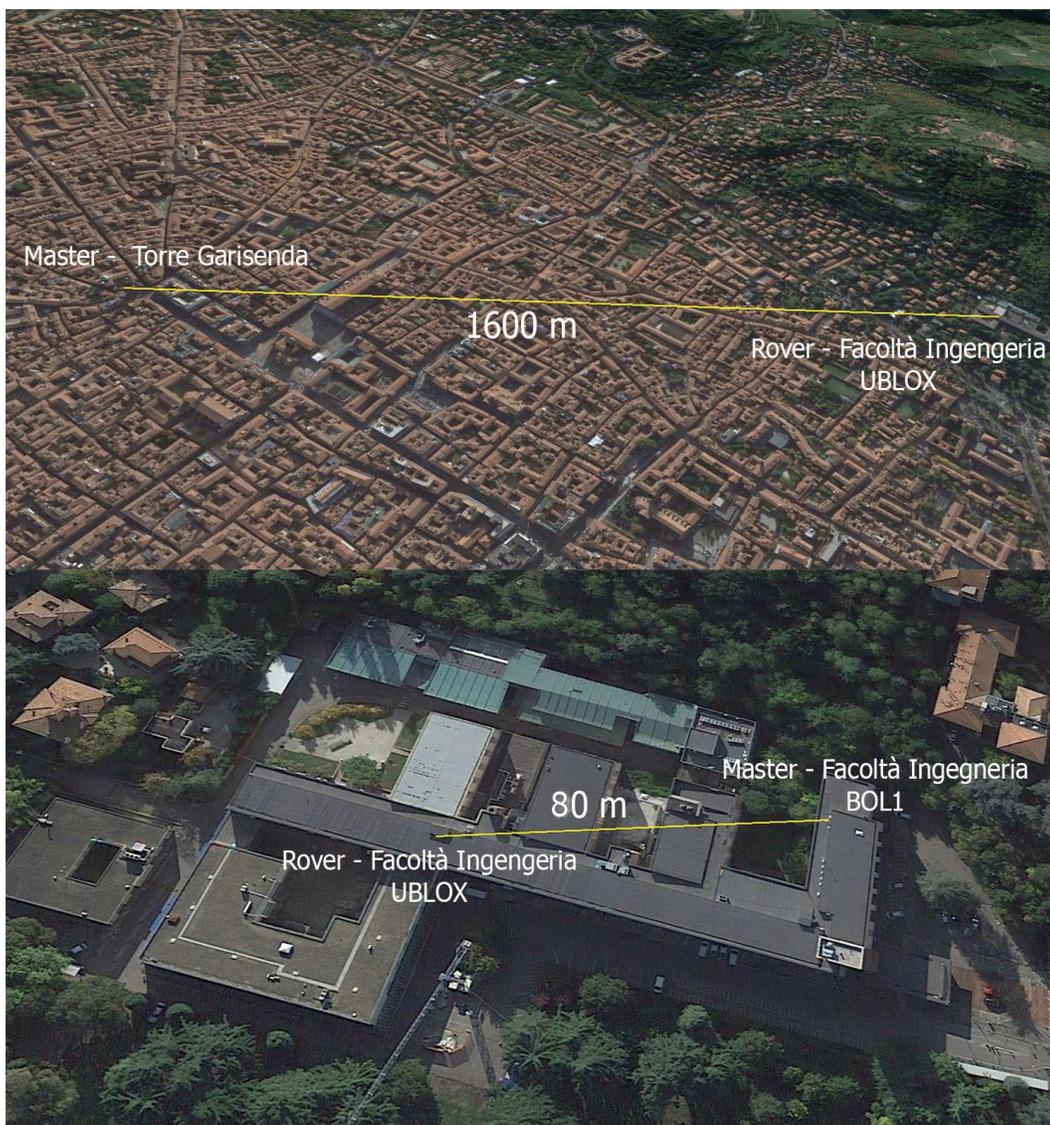


Figura 15 Le Baseline Rover Master Utilizzate



Figura 16 Antenna BOLI



Figura 17 Antenna BOGA

Le analisi eseguite in questa prima fase sono diverse sia per quanto attiene la lunghezza della finestra di osservazione sia per il tempo di campionamento e sia per la tipologia di antenna:

	<b>Antenna Classe Geodetica</b>	<b>Antenna Low-Cost Patch</b>
<b>Base Lunga BOGA</b>	24h 30s 12h 30s 06h 05s 03h 05s 02h 05s 01h 01s	24h 30s 12h 30s 06h 05s 03h 05s 02h 05s 01h 01s
<b>Base Corta BOLI</b>	24h 30s 12h 30s 06h 05s 03h 05s 02h 05s 01h 01s	24h 30s 12h 30s 06h 05s 03h 05s 02h 05s 01h 01s

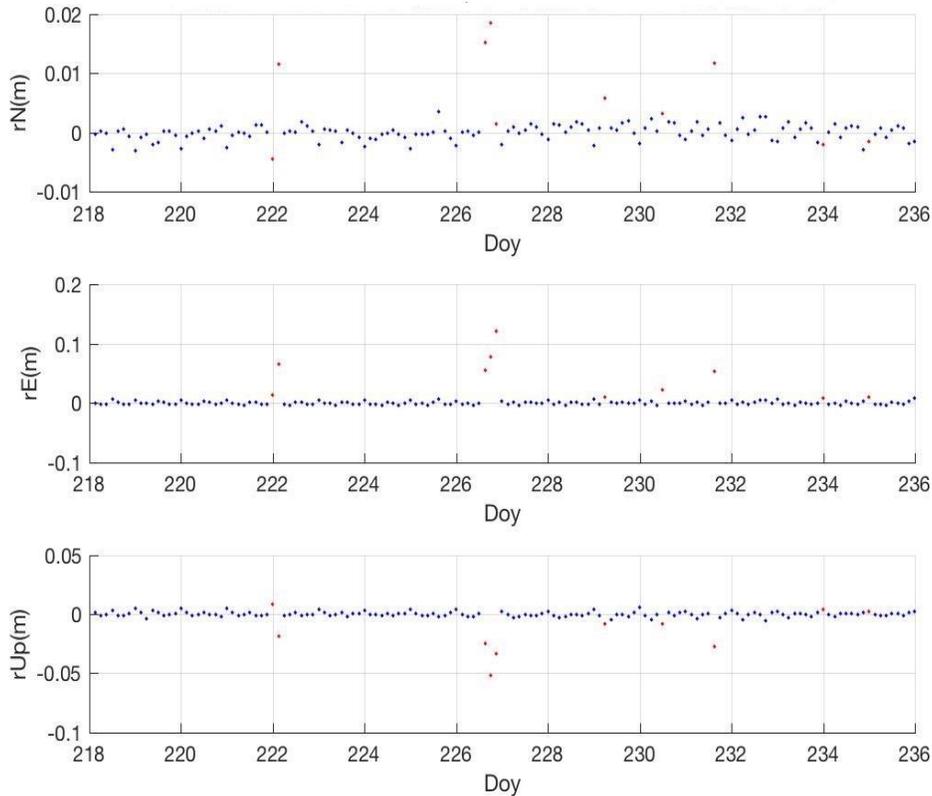
Tabella 3 Sintesi dettagliata delle analisi condotte in Fase I,

In Tabella 3 la dicitura *XXhYYs* ha il seguente significato:

- *XX* costituisce la durata della finestra di acquisizione e il termine
- *YY* la frequenza di campionamento.

Ottenute le serie temporali grezze è stata poi applicata la procedura per la rimozione di *outliers* mediante il metodo  $3\sigma$  tramite il codice MatLab descritto nel paragrafo 4.2.2.

Si riporta a titolo di esempio un'immagine con 3 serie temporali, rispettivamente rappresentanti le componenti i residui delle componenti Nord, Est e Up, riferiti al sistema geodetico locale, in cui in rosso sono evidenziati i punti eliminati dall'algorithmo (*Figura 18*).

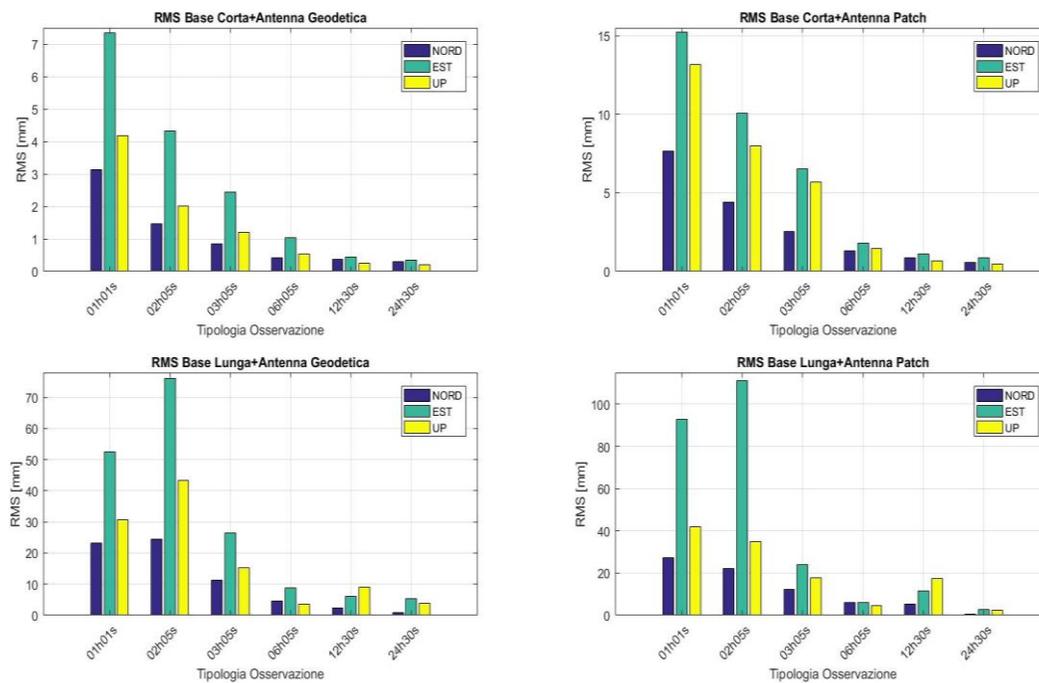


*Figura 18 Serie Temporale Tipo con outliers*

Di seguito si riportano soltanto grafici dei residui a media nulla in valore assoluto a *01h 01s* e *24h 30s* per facilitare la comprensione ed evitare ridondanza di esposizione dato che i risultati a *01h 01s* sono sempre le soluzioni peggiori e quelle a *24h 30s* sono sempre le migliori. Si ricordano le configurazioni *hardware* a cui si farà riferimento:

- *Master classe geodetica e rover+antenna geodetica*
- *Master classe geodetica e rover+antenna patch.*

Gli istogrammi in *Figura 20* rappresentano per ogni componente (Nord, Est, Up) i valori di *RMS (Root Mean Square)* delle 24 serie temporali pulite ottenute.



*Figura 19* Istogrammi RMS Base Lunga VS Base Corta al Variare della Classe di Antenna

Dalla *Figura 20* risulta evidente, che il valore massimo dei grafici a base corta è di circa *15mm* e quello a base lunga di circa *100mm*. Quindi per un rapporto uno a venti sulla distanza *master-rover* si ha un rapporto in termini di RMS di circa uno a dieci. All'interno di ogni singolo gruppo di istogrammi (sinistra e destra) si ha il comportamento previsto di diminuzione del valore di RMS all'aumentare del valore della finestra temporale. Unica anomalia nei risultati è il valore di RMS della componente EST relativamente ad un confronto con la UP che risulta peggiore. L'anomalia risiede nel fatto che i sistemi GNSS sono generalmente più precisi in planimetria che in quota. Probabilmente questa anomalia è dovuta al *software* utilizzato per trovare le soluzioni (goGPS) poiché si presenta sistematicamente e non si è riusciti ad ottenere cambiamenti significativi cambiando i parametri di analisi. In goGPS si possono modificare agevolmente i parametri del filtro di Kalman per la modalità dinamica ma rimane una scatola nera riguardo i parametri relativi a Kalman per la modalità statica. Gli stessi risultati sono adesso riportati in

forma tabellare (*Tabelle 4 e 5*) dove si può ritrovar conferma di quanto appena detto ed fare altre considerazioni.

RMS[mm]	<b>Master 1600m+Patch</b>			<b>Master 1600m+Geodetica</b>		
	NORD	EST	UP	NORD	EST	UP
<b>01h01s</b>	27.46	92.66	41.91	23.14	52.61	30.67
<b>02h05s</b>	22.19	111.09	34.91	24.48	76.04	43.23
<b>03h05s</b>	12.31	23.86	17.80	11.36	26.53	15.26
<b>06h05s</b>	6.11	5.88	4.58	4.48	8.85	3.54
<b>12h30s</b>	5.33	11.47	17.27	2.42	6.18	9.01
<b>24h30s</b>	0.58	2.77	2.27	0.87	5.28	3.75

*Tabella 4 Valori RMS[mm] Base Lunga*

RMS[mm]	<b>Master 80m+Patch</b>			<b>Master 80m+ Geodetica</b>		
	NORD	EST	UP	NORD	EST	UP
<b>01h01s</b>	7.65	15.25	13.15	3.14	7.34	4.18
<b>02h05s</b>	4.41	10.07	7.98	1.46	4.33	2.01
<b>03h05s</b>	2.54	6.51	5.67	0.85	2.45	1.21
<b>06h05s</b>	1.31	1.80	1.46	0.43	1.03	0.53
<b>12h30s</b>	0.85	1.12	0.68	0.38	0.45	0.26
<b>24h30s</b>	0.55	0.85	0.49	0.30	0.34	0.19

*Tabella 5 Valori RMS [mm] Base Corta*

Osservando i valori delle *Tabelle 4 e 5* si possono fare le seguenti affermazioni:

- In base corta (80m) con antenna geodetica per finestre temporali maggiori o uguali a 6h ore si hanno RMS inferiori al millimetro
- Solo le analisi di base corta (80m) con antenna geodetica con finestra temporale maggiore o uguale a 2h hanno RMS compatibili con il monitoraggio strutturale  $\leq 1\text{ cm}$
- In base lunga (1600m) non si raggiunge mai precisione inferiore al millimetro (nell'analisi a 24h le componenti Nord sono inferiori ma le altre due sono dalle 5 alle 6 volte maggiori)
- L'utilizzo dell'antenna *patch* a parità di distanza amplifica gli RMS di 1,5 a 2 volte la soluzione rispetto a quella geodetica.

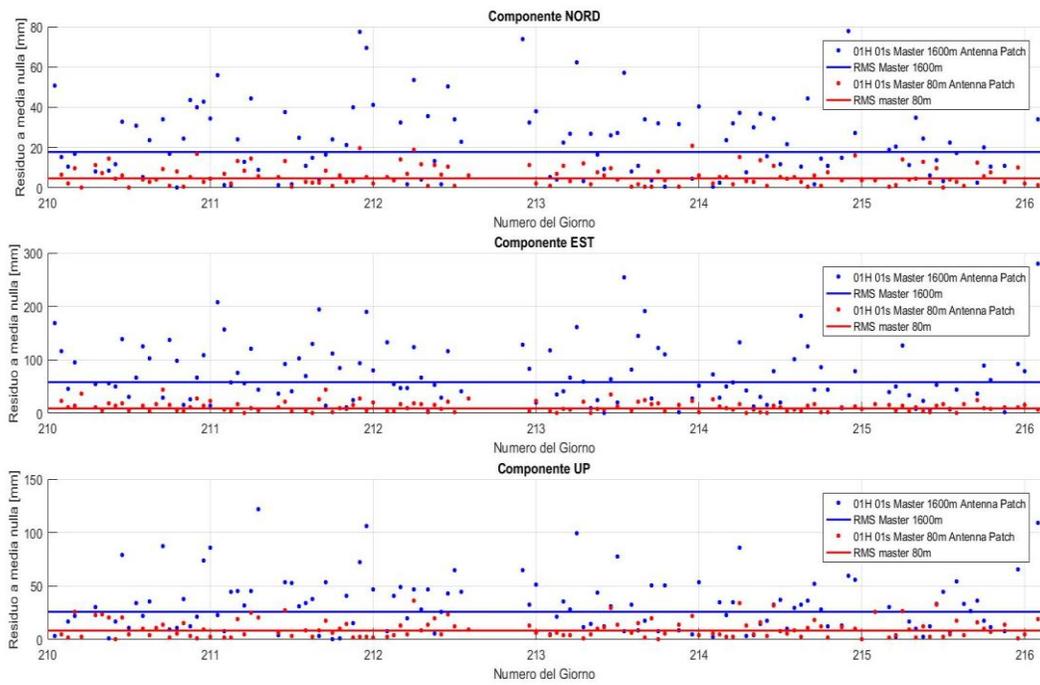


Figura 20 Serie Temporalì 01h01s Antenna Patch: Confronti Base Lunga VS Base Corta

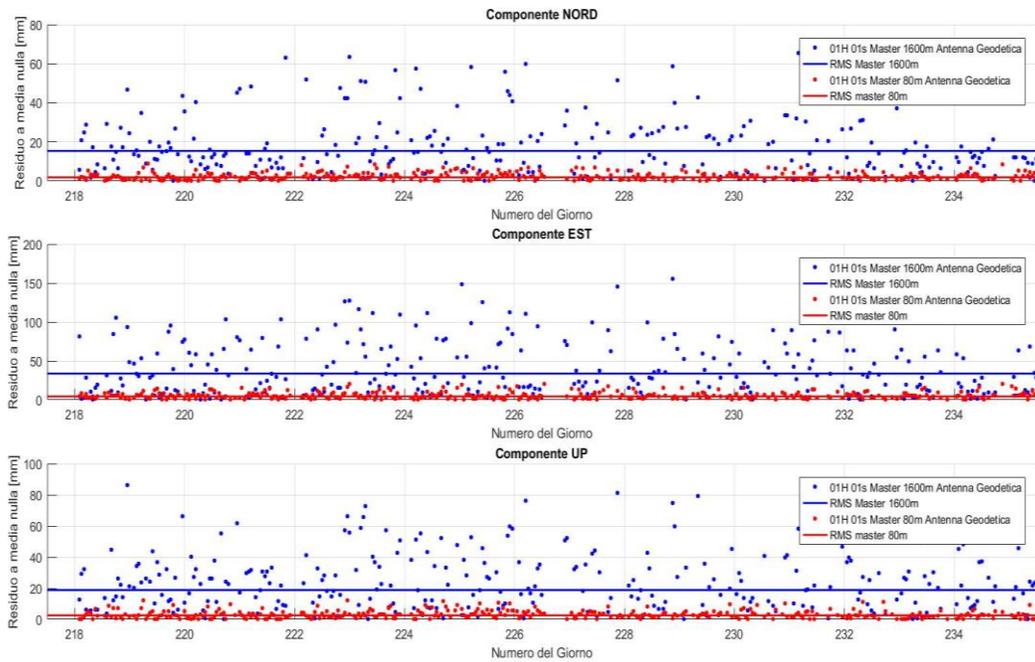
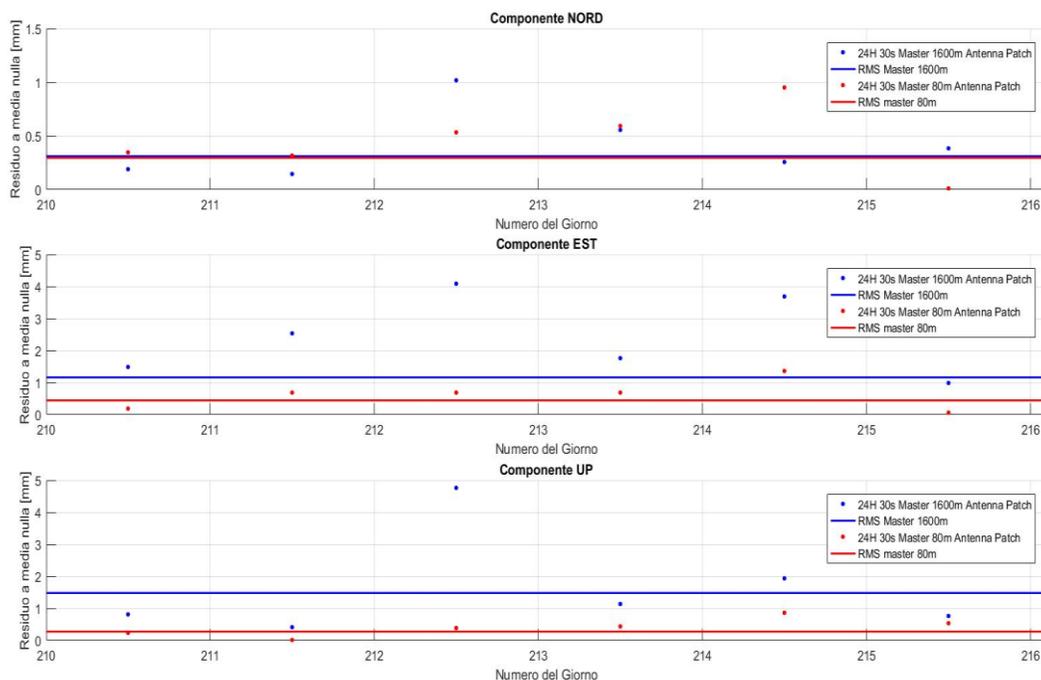


Figura 21 Serie Temporalì 01h01s Antenna Geodetica: Confronti Base Lunga VS Base Corta

Il numero di punti in *Figura 21* è inferiore a quello in *Figura 22* per il semplice fatto che la durata delle misure è rispettivamente di 7 e 18 giorni. C'è da prestare attenzione alla scala dei valori in ordinata che è diversa per ogni componente ma per motivi di rappresentazione a causa della grande variabilità è stato necessario imporlo diverso per ogni componente. Arrivando a valutazioni riguardo la sensibilità strumentali si nota la maggiore dispersione intorno allo zero dei punti relativi alla base lunga (in blu) rispetto alla base corta (in rosso). Questa è la tendenza riscontrata per ogni finestra di acquisizione (2h, 3h, 6h e 12h).

Anche per le serie a 24h 30s si nota la forte dipendenza del sistema in funzione della distanza rover-master. Come si vede nelle serie riportate in *Figura 23 e 24*.



*Figura 22 Serie Temporalì 24h30s Antenna Patch: Confronti Base Lunga VS Base Corta*

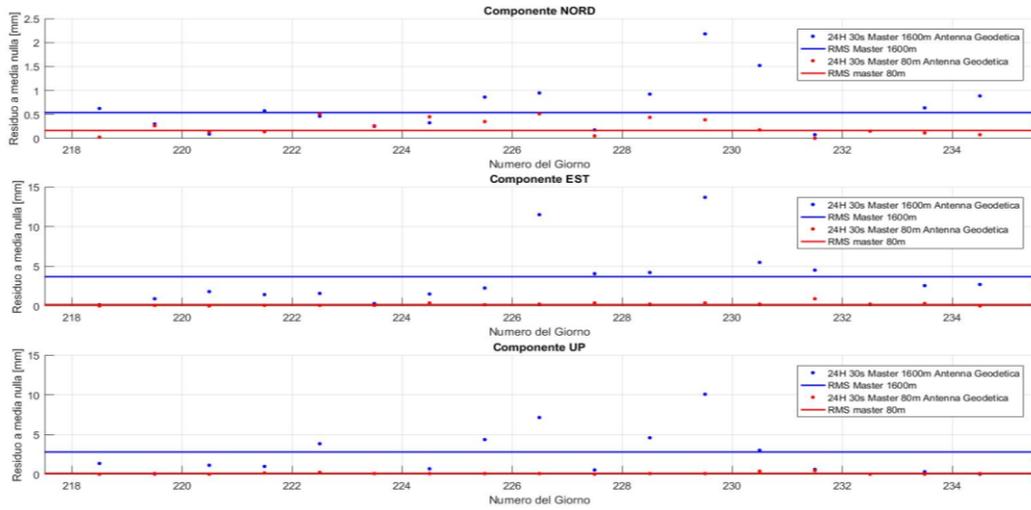


Figura 23 Serie Temporali 24h30s Antenna Geodetica: Confronti Base Lunga VS Base Corta

Per finestre temporali a 24h c'è da considerare che anche con una base *rover-master* lunga gli RMS sono sempre sotto i 5mm. Per raggiungere questo grado di precisione considerando la base-line lunga implica avere un solo aggiornamento al giorno sulle condizioni della struttura.

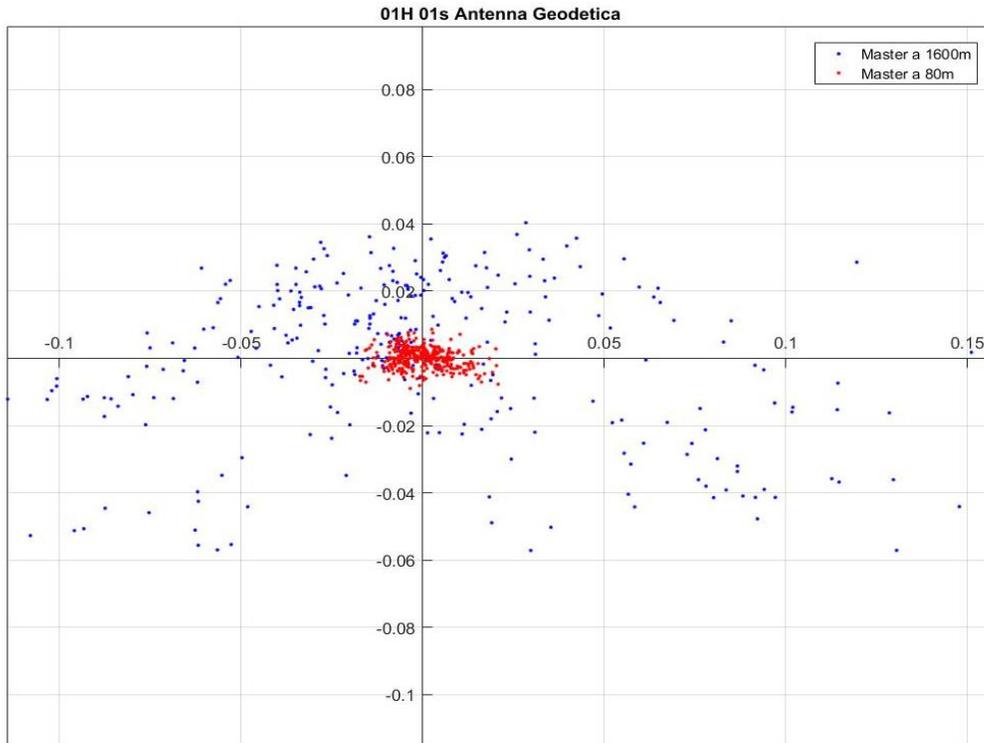


Figura 24 Analisi 01h01s Antenna Geodetica. Componenti Planimetriche al variare della distanza

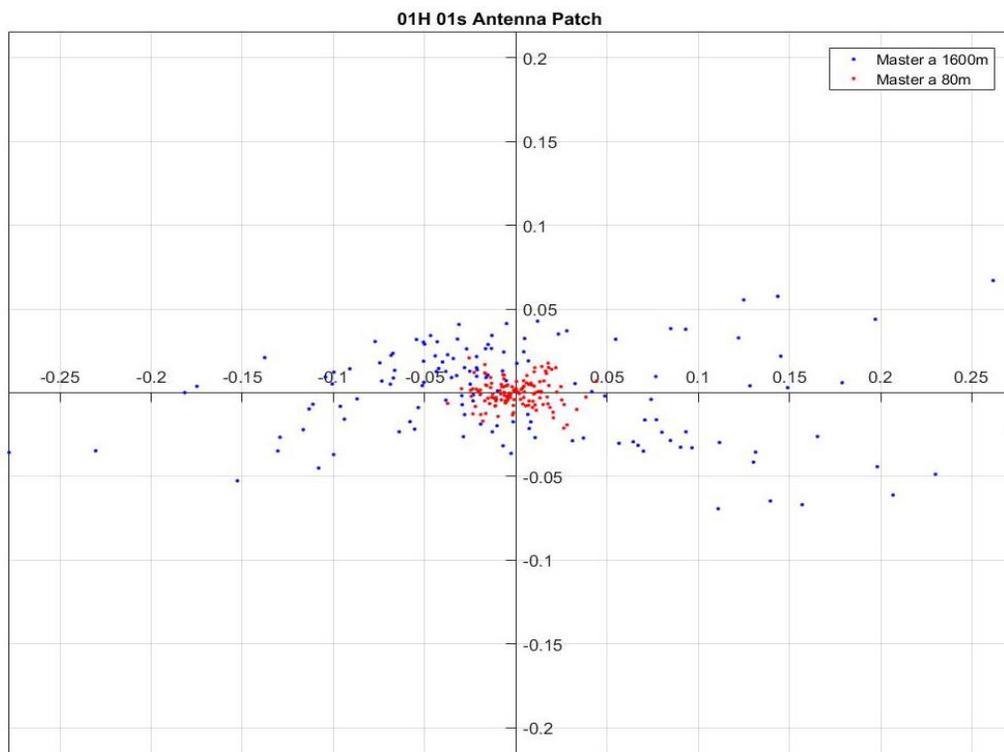


Figura 25 Analisi 01h01s antenna Patch. Componenti Planimetriche al variare della distanza

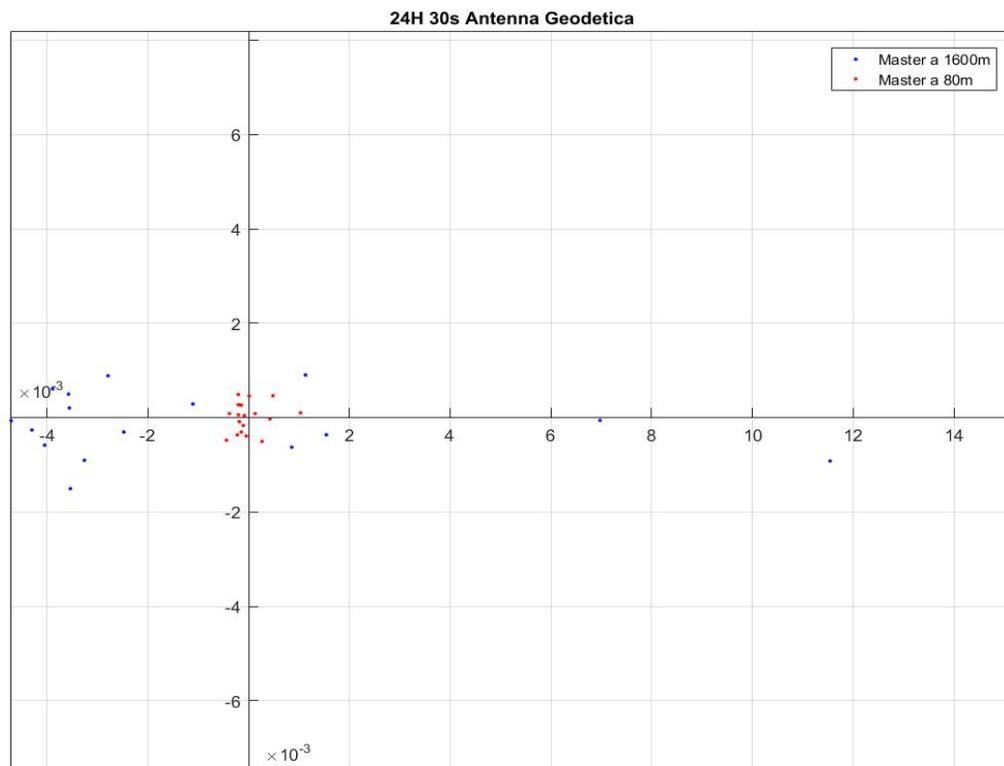


Figura 26 Analisi 24h30s antenna Geodetica. Componenti Planimetriche al variare della distanza

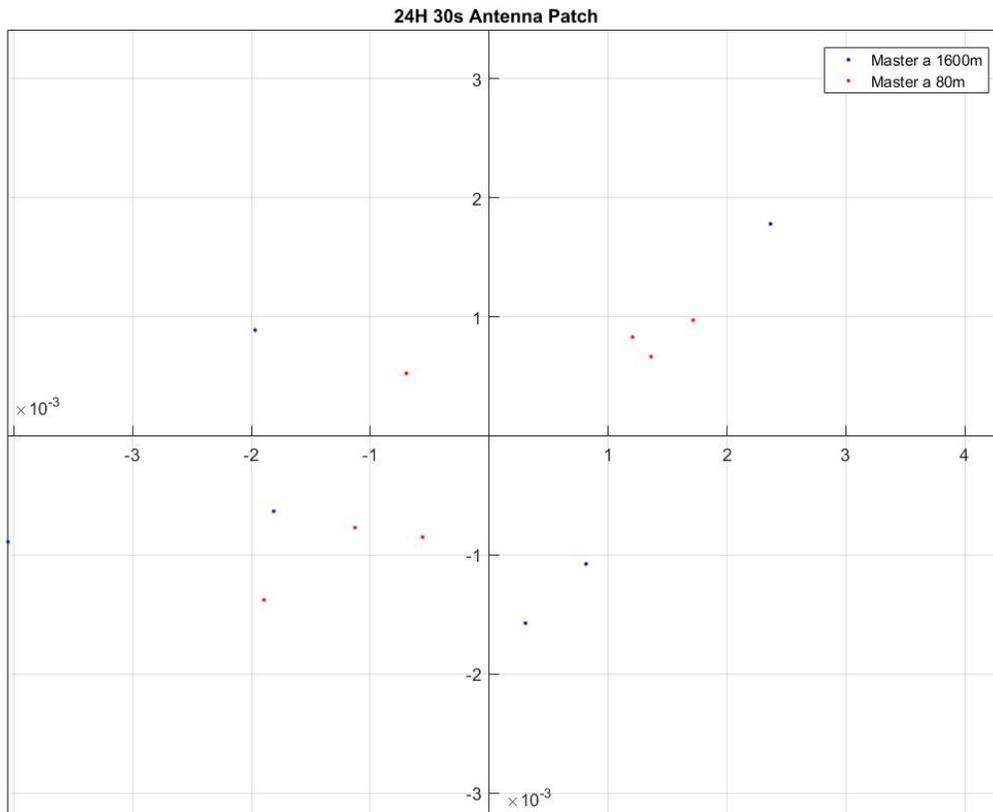


Figura 27 Analisi 24h30s antenna Patch. Componenti Planimetriche al variare della distanza

Per aver più chiara la variabilità dei risultati in funzione della distanza si riportano anche gli stessi dati in planimetria (da Figura 24 a Figura 27), ovvero solo le componenti Nord e Est.

I grafici, delle Figure da 24 a 27, sono riferiti al sistema geodetico locale centrato nel rover. Questa rappresentazione planimetrica (piano Est-Nord) mostra molto bene la differente qualità del dato in funzione dell'antenna montata sul rover. Con antenna geodetica i punti, sia per base corta che lunga, sono poco dispersi attorno all'origine mostrando un miglior livello di ripetibilità di misura rispetto alle soluzioni ottenute con il rover associato all'antenna patch.

Questa fase della sperimentazione ha messo in luce i seguenti aspetti:

- La relazione inversa tra distanza e precisione strumentale.
- La scelta della finestra temporale influisce in modo importante sulla precisione dei risultati

Tali risultati non consentono di definire in modo chiaro i limiti di applicabilità della tecnologia in termini di distanza massima ma mostrano solo l'enorme decadimento della precisione all'aumentare di quest'ultima.

Il secondo punto, in elenco, riguarda maggiormente il problema del monitoraggio. Si è notato come confrontando tutte le analisi al variare della finestra temporale cambi notevolmente la dispersione dei risultati attorno all'origine. Una soluzione a 24h implica una sola informazione al giorno e, ai fini del monitoraggio, se si vuol usare tale finestra temporale, questo grado di informazione deve essere compatibile con le problematiche della struttura. Avere una sola informazione al giorno estremamente precisa sullo stato della struttura potrebbe essere compatibile con movimenti lenti come ad esempio un cedimento graduale dell'impalcato. Se si è interessati al monitoraggio a frequenze superiori, ad esempio per applicazioni legate all'*early warning*, allora la frequenza delle soluzioni deve essere più alta e probabilmente si deve passare da una soluzione post-elaborata ad una in tempo reale o tempo quasi-reale.

## 5.2 - Fase II (Studio della Capacità di Individuazione dei Movimenti)

Per questa sperimentazione sono stati eseguiti test anche utilizzando piattaforma *xyz* ma utilizzando differenti combinazioni di strumentazione rispetto la fase precedente. In particolare, se per le sperimentazioni precedenti la stazione *master* era sempre costituita da un ricevitore ed antenna geodetico di alta gamma, ora i test si sono concentrati anche sull'uso di coppie di ricevitori *low cost* e l'uso di antenne di fascia intermedia (sempre *low cost* ma di qualità superiore rispetto all'antenna *patch*).

Per la prima volta si è testato anche un sistema completamente a basso costo dove sia le antenne che i ricevitori di *master* e *rover* rientrano in tale fascia di prezzo.

In relazione ai risultati della fase precedente si è scartata l'idea di continuare ad impostare la sperimentazione in funzione anche della distanza tra *rover* e *master*. Ci si è di concentrarsi maggiormente sulla base corta poiché dai risultati di Fase I ha mostrato avere un maggior grado di ripetibilità, nell'ipotesi di stabilità del punto da monitorare.

La sperimentazione non è stata basata sulla sola ripetibilità delle soluzioni, ma si sono condotti test imponendo uno spostamento calibrato mediante slitta *xyz* andando così ad analizzare la capacità del sistema nella stima di tali movimenti.

La basetta di calibrazione adottata è dotata di viti micrometriche con le quali, prima in planimetria e successivamente in quota è stato imposto uno spostamento di *1cm*. Quindi il modulo dello spostamento finale imposto, come si può vedere dalla cronistoria dei movimenti riportata in *Tabella 6* sono:

In planimetria, piano X-Y:

$$\Delta_{xyz} = \sqrt{0.7^2 + 0.7^2} \cong 1 \text{ cm}$$

Nelle tre dimensioni:

$$\Delta_{xyz} = \sqrt{0.7^2 + 0.7^2 + 1^2} \cong 1.41 \text{ cm}$$

Un aspetto considerato nell'imposizione dei movimenti è quello relativo al fatto che gli assi di traslazione della slitta non erano perfettamente allineati con gli assi del sistema geodetico locale, pertanto, prima di iniziare le operazioni di spostamento della slitta si è dovuto stimare, essenzialmente per le componenti planimetriche, l'angolo di rotazione tra il sistema locale della slitta e quello geodetico (Figura 29 e 30).



*Figura 28 Basetta di Calibrazione*

<b>Evento</b>	<b>Data</b>
Inizio acquisizione dati	10/3/2017
+0.7 cm in X e +0.7cm in Y	20/3/2017
+1 cm in Z	29/3/2017
Reset Configurazione	7/4/2017
Fine acquisizione dati	15/4/2017

*Tabella 6 Cronistoria degli spostamenti imposti alla base di calibrazione*

Anche per questa tipologia di sperimentazione sono stati acquisiti dati con l'intervallo di campionamento di 1Hz ma successivamente i dati sono stati poi pretrattati mediante Teqc ed elaborati con il codice GoGPS seguendo la stessa prassi dei test precedenti e quindi riportata in *Tabella 3*.

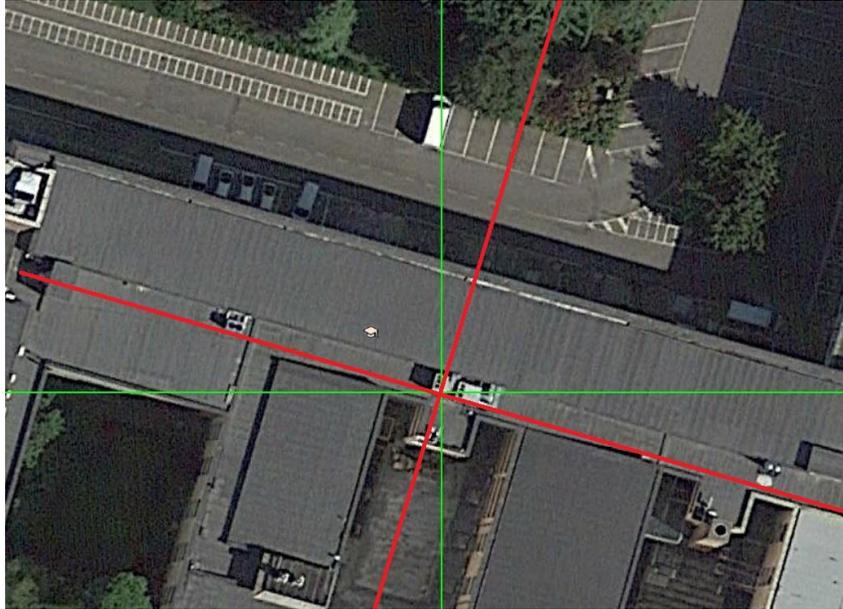


Figura 29 Assi In verde il piano Nord-Est in rosso il piano identificato dagli assi della base di calibrazione

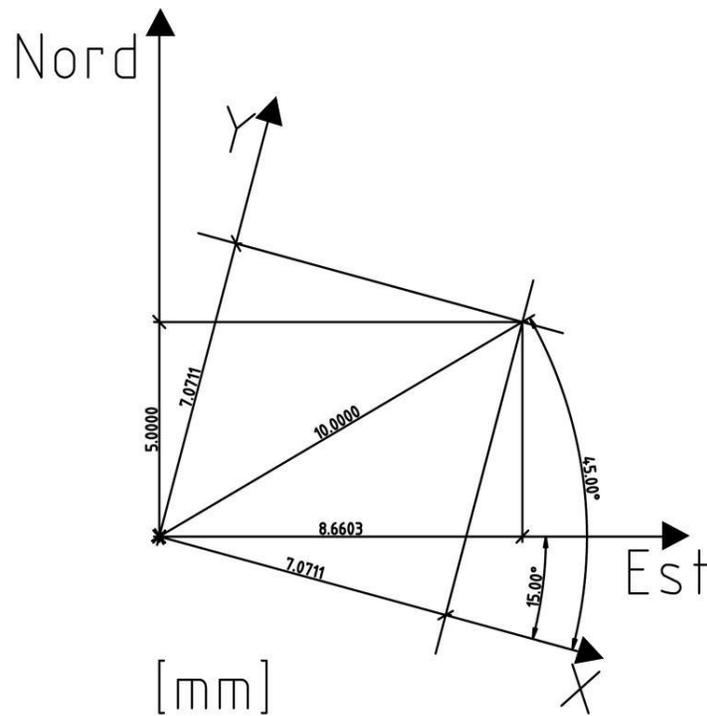


Figura 30 Rotazione Sistema di Riferimento

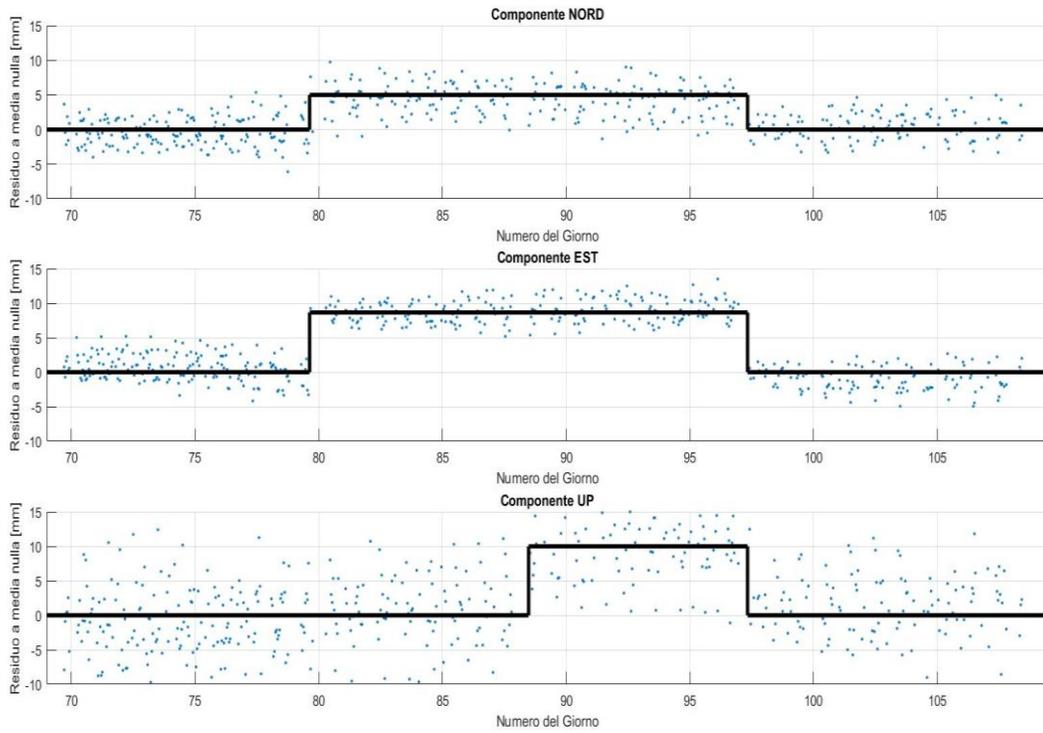


Figura 31 Serie Temporale a 01h01s Sistema Interamente low-cost con spostamenti imposti in nero

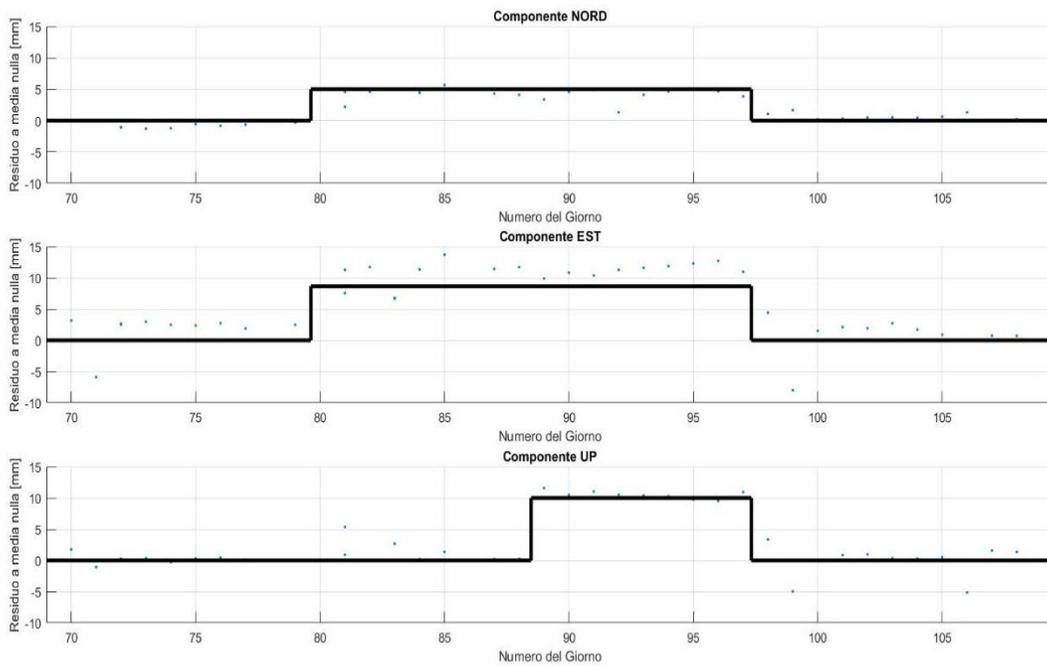


Figura 32 Serie Temporale a 24h30s Sistema Interamente low-cost con spostamenti imposti in nero

Nelle *Figure 31 e 32* si riportano, a titolo di esempio, solo le serie temporali a *01h* e a *24h* a meno degli *outliers* rimossi con metodo  $3\sigma$  poiché rappresentative del peggiore e migliore punto di funzionamento del sistema. Per ogni componente è rappresentato il valore dello spostamento teorico imposto (gradino nero). Dai grafici si nota come lo spostamento in planimetria sia stato rilevato correttamente dal sistema anche se scomposto in maniera sbilanciata, nelle due componenti Nord ed Est. Da sottolineare è la più grande dispersione per la finestra temporale a *01h* rispetto a quella a *24h* soprattutto per quanto concerne la componente UP. Infatti quasi non si riesce a comprendere se sia stato rilevato o meno lo spostamento. Per la soluzione a *24h* in tutte le componenti i punti misurati seguono gli spostamenti imposti. Dai dati in funzione del tempo per le altre finestre temporali si nota semplicemente un miglioramento della soluzione tra la peggiore a *01h01s* e la migliore a *24h30s*, che sono quelle che sono state appena commentate.

Passando ad un'altra visualizzazione degli stessi dati, ovvero rappresentandoli come punti nello spazio (*Figure 33 e 34*). Si nota la stessa dispersione in termini di quota e nelle componenti planimetriche è evidente che i punti misurati si siano effettivamente spostati. Nelle figure sono presenti due vettori di colore diverso che rappresentano rispettivamente il vettore teorico di spostamento (in nero) e il vettore ottenuto tramite la media di tutte le misure in verde. La poca differenza tra il vettore teorico e quello della media, anche se in quota il sistema è stato molto più dispersivo, è comunque un dato confortante e non intelligibile dai dati esposti in serie temporale.

Si ricorda che tali risultati sono derivati dall'uso di una coppia di ricevitori U-Blox C94-M8P + antenna Trimble Bullet 360.

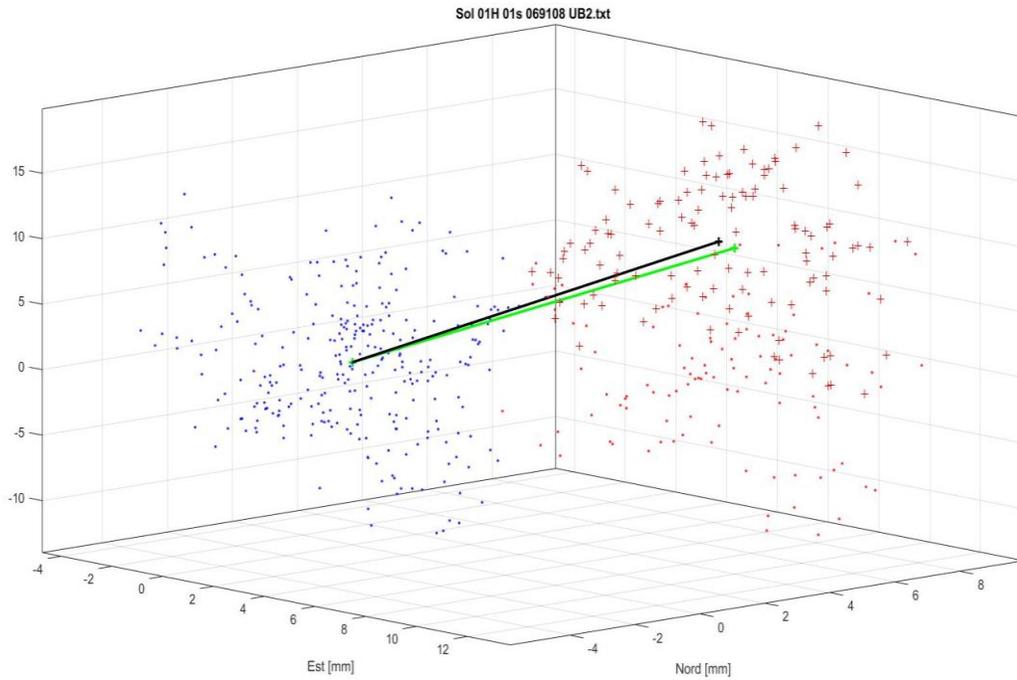


Figura 33 Risultati analisi 01h01s in 3-D in nero vettore spostamento teorico in verde quello medio

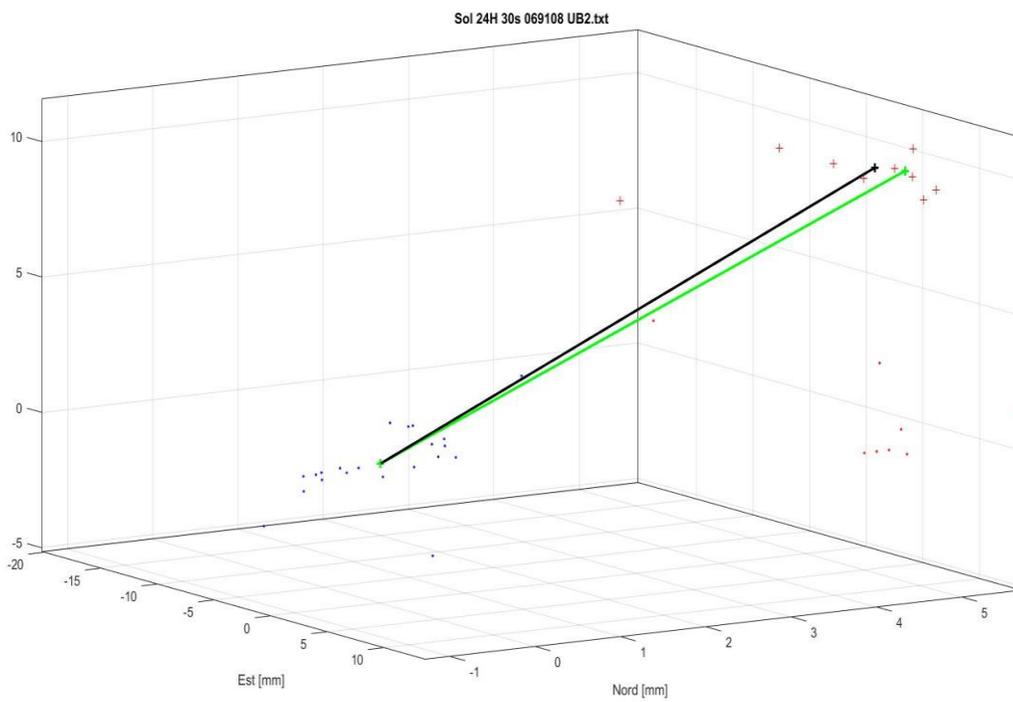


Figura 34 Risultati analisi 24h30s in 3-D in nero vettore spostamento teorico in verde quello medio

### 5.3 Confronti Base-Corta Fase I vs Fase II

Avendo a disposizione, anche se riferiti a un periodo temporale differente, i dati della sperimentazione relativi alla Fase I per la stessa *baseline*, in questo paragrafo si è proceduto ad una analisi comparata, rimuovendo gli spostamenti imposti in modo da rendere confrontabili, i risultati di Fase II (slitta di calibrazione *xyz*) con quelli della Fase I (analisi al variaria della distanza *rover-master*).

Si riportano in questo confronto tutti e sei le finestre temporali (*Tabella 3*) poiché dal confronto si è ottenuto un risultato inaspettato ed è quindi necessario mostrare i risultati in maniera dettagliata.

Il risultato inaspettato è un RMS di ordine confrontabile per il sistema *low-cost*, per quanto riguarda le finestre temporali minori, rispetto al sistema con master di classe geodetica e *rover* con antenna geodetica. Avvicinandosi alla finestra temporale *24h* le soluzioni tornano ad avere il comportamento atteso dovuto alla notevole differenza di qualità *hardware*.

Nelle *Figure* da 35 a 39 si riportano le serie temporali ottenute, per ogni finestra temporale analizzata.

In particolare vengono confrontati

- il sistema interamente *low-cost*
- il sistema a *master* BOL1 (ricevitore e antenna di classe geodetica) e *rover* (ricevitore *low-cost* e antenna di classe geodetica) che è la miglior configurazione *hardware* utilizzata: composta da strumentazione di classe geodetica al 75% - 3 parti su quattro. Che verrà denominato *sistema misto* fino a fine capitolo.

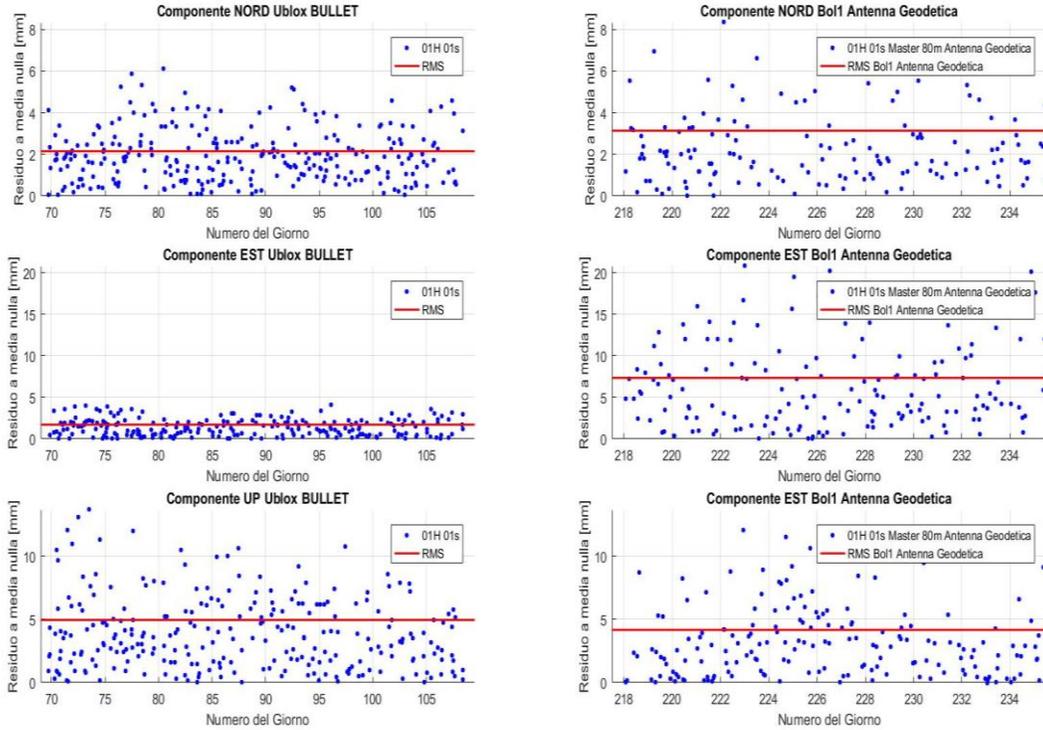


Figura 35 Serie temporali analisi 01h01s. Base corta confronto tra il sistema interamente low-cost (colonna sinistra) con sistema misto low-cost/antenna classe geodetica

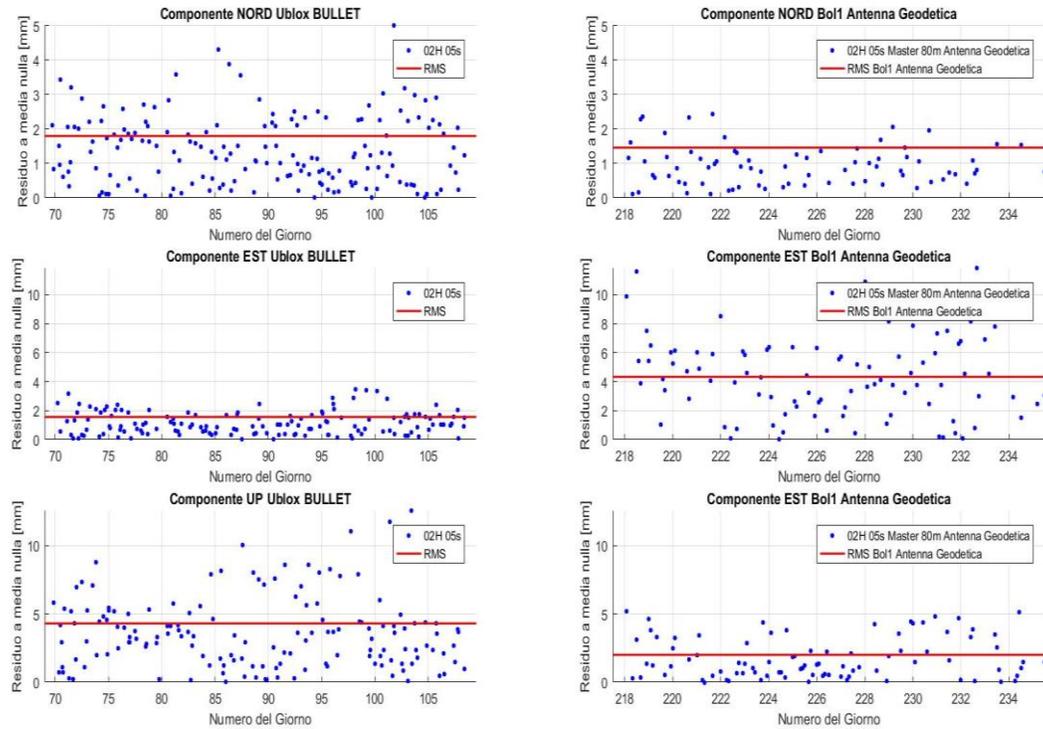


Figura 36 Serie temporali analisi 02h05s. Base corta confronto tra il sistema interamente low-cost (colonna sinistra) con sistema misto low-cost/antenna classe geodetica

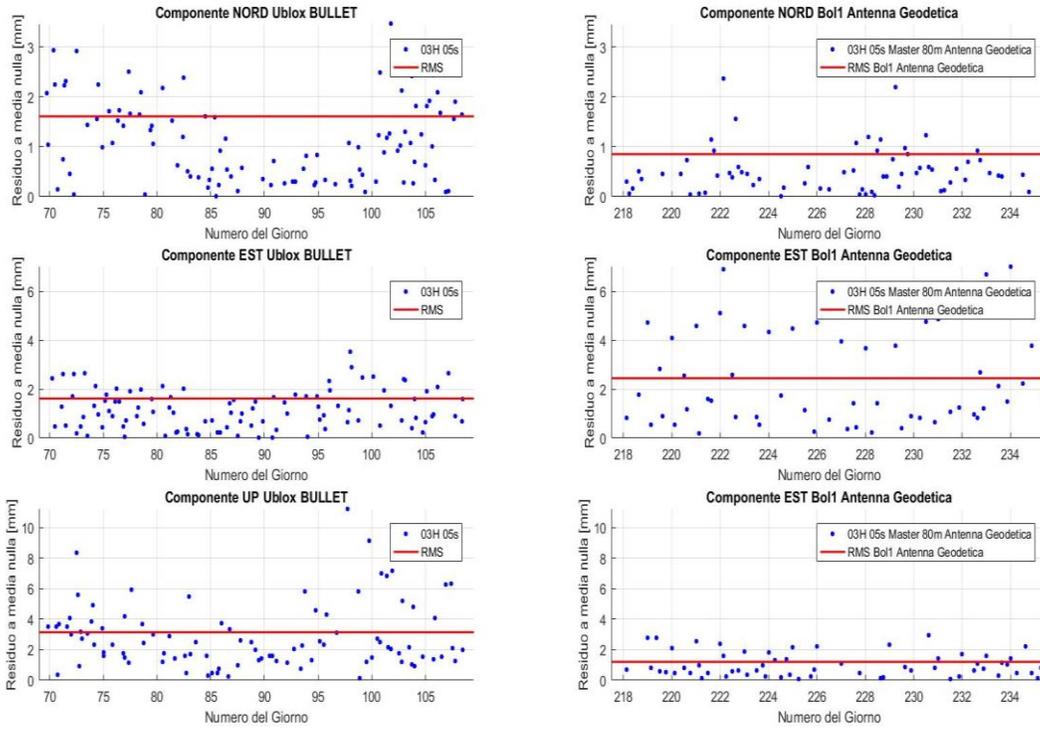


Figura 37 Serie temporali analisi 03h05s. Base corta confronto tra il sistema interamente low-cost (colonna sinistra) con sistema misto low-cost/antenna classe geodetica

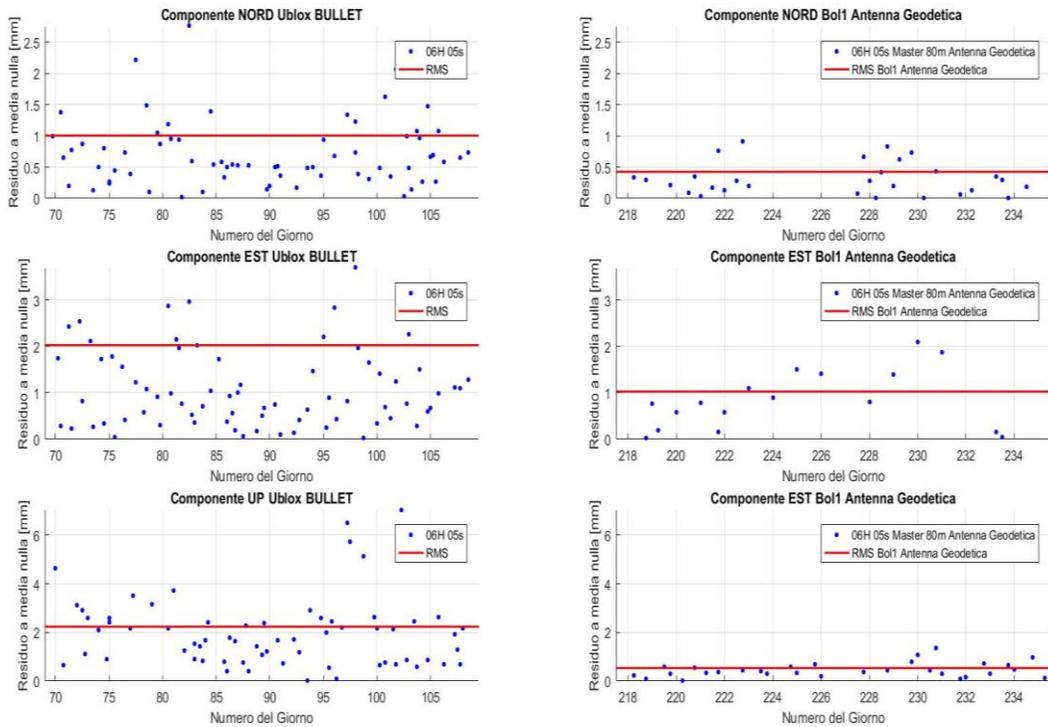


Figura 38 Serie temporali analisi 06h05s. Base corta confronto tra il sistema interamente low-cost (colonna sinistra) con sistema misto low-cost/antenna classe geodetica

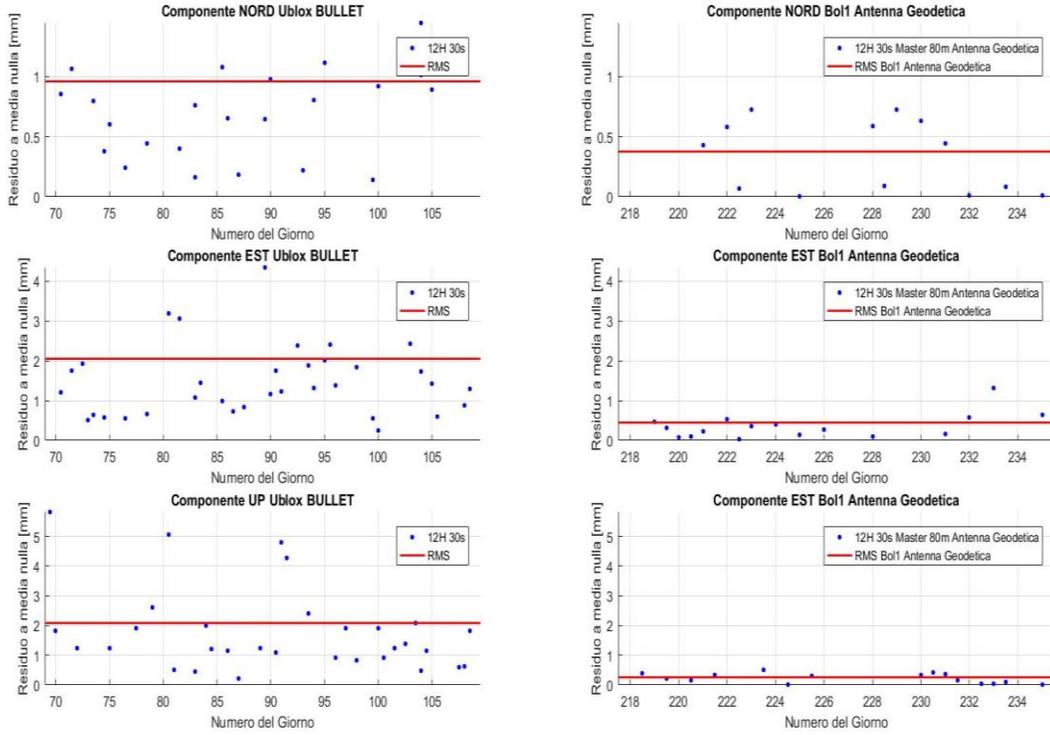


Figura 39 Serie temporali analisi 12h30s. Base corta confronto tra il sistema interamente low-cost (colonna sinistra) con sistema misto low-cost/antenna classe geodetica

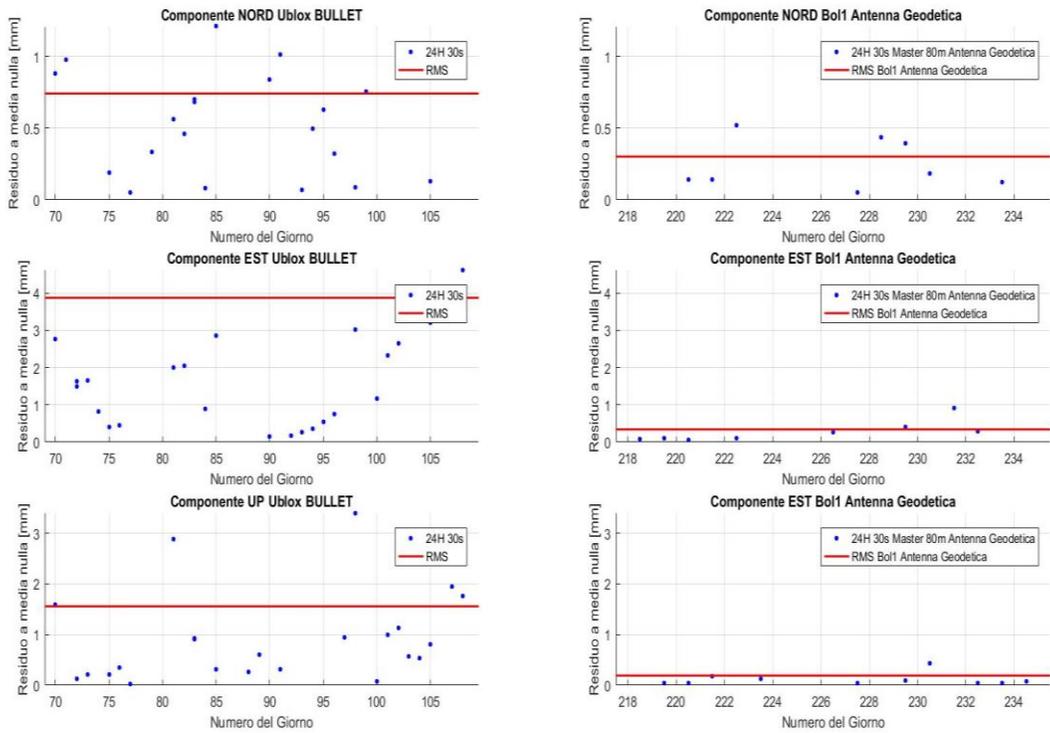
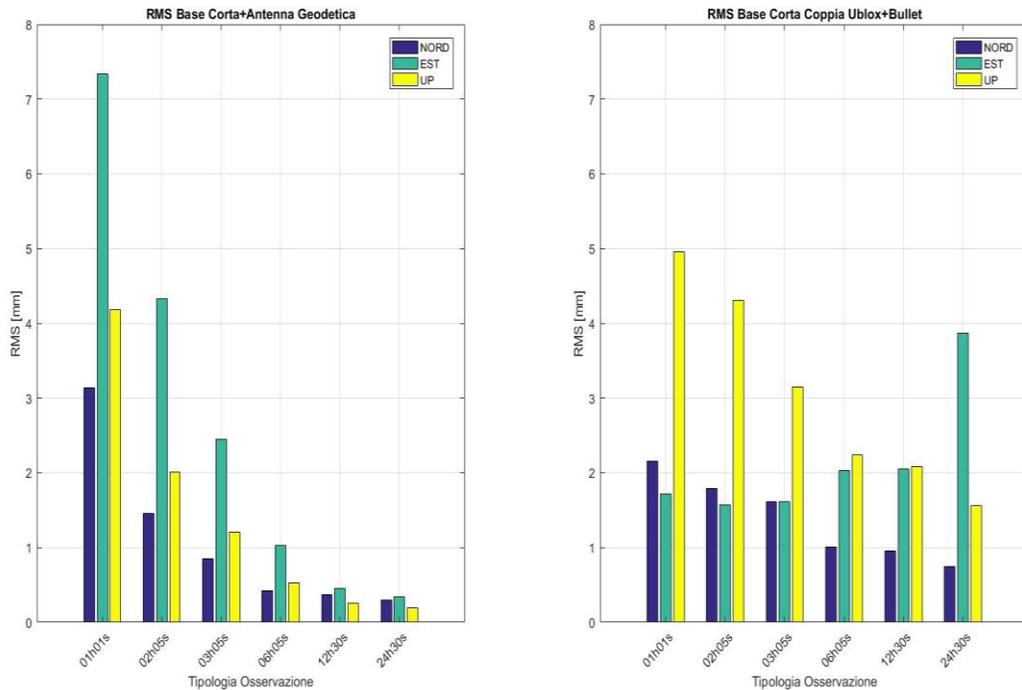


Figura 40 Serie temporali analisi 24h30s. Base corta confronto tra il sistema interamente low-cost (colonna sinistra) con sistema misto low-cost/antenna classe geodetica

L'analisi comparata contenuta nelle *Figure* da 35 a 40 non sempre indica nel *sistema misto* il sistema migliore, in termini di ripetibilità ed in alcuni casi, come per esempio nelle *Figure* 35 e 36 (componente Est), la ripetibilità ottenuta con la coppia di ricevitore e antenna *low-cost* sia evidentemente migliore rispetto al *sistema misto*. Tale fenomeno non è di semplice interpretazione e comunque non può essere ritenuto esaustivo un unico test perché questo sia da considerarsi generalizzabile.

Quello che certamente si può però concludere è che i due sistemi anche per finestre temporali più alte mantengano livelli di ripetibilità comparabili.

Per completezza di trattazione si riportano anche i valori di RMS, rappresentati in istogrammi, mantenendo lo stesso confronto visto nelle serie temporali precedenti (*Figura 41*). Nei seguenti grafici si nota con ancor più facilità il risultato questo risultato inatteso. Infatti, visivamente, gli istogrammi a destra, del sistema interamente *low-cost* sono alti circa la metà rispetto quelli di sinistra che rappresentano il *sistema misto* migliore.



*Figura 41* Istogrammi degli RMS di tutte le finestre temporali. Sistema misto *low-cost/ geodetic*(sx) VS Sistema interamente *low-cost* (dx)

Lo stesso fenomeno si è verificato anche con la configurazione mista *master* geodetico e *rover* con antenna *patch* (Figura 42). In questo caso è più di facile comprensione poiché la qualità dell'antenna fornita dalla casa è sicuramente inferiore all'antenna di classe geodetica (il valore commerciale ha un rapporto tra le due di circa: 1:70) e anche rispetto all'antenna Bullet del sistema interamente *low-cost*. I grafici in serie temporale per questa serie di analisi (antenna *patch*) non aggiungono molto a quanto si può vedere dagli istogrammi degli RMS.

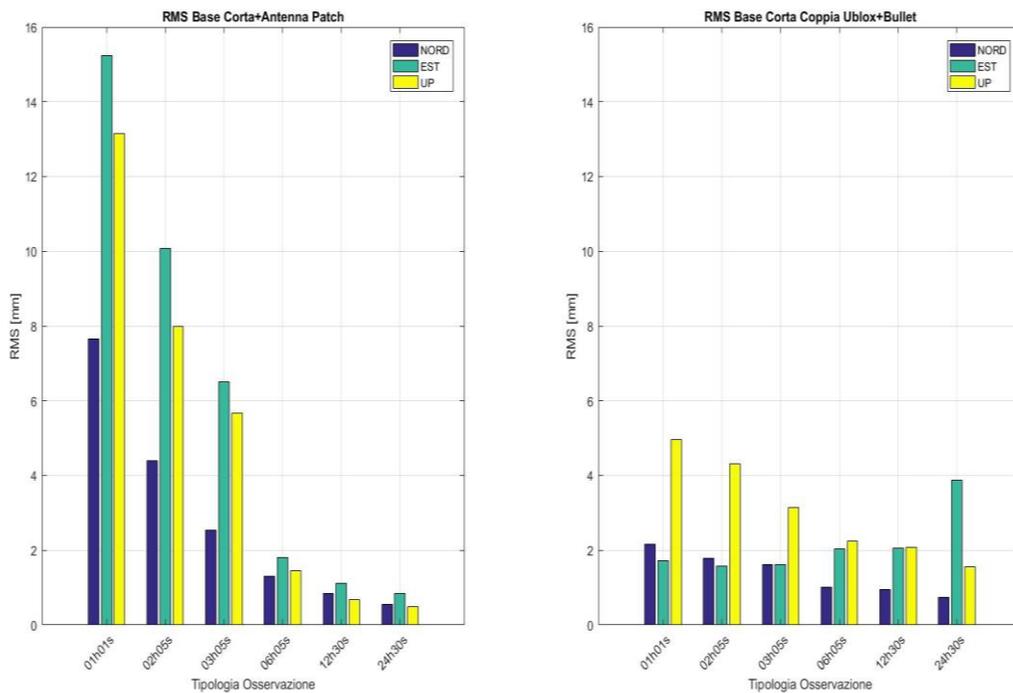


Figura 42 Istogrammi degli RMS di tutte le finestre temporali. Sistema misto *low-cost/ geodetico(sx)* VS Sistema interamente *low-cost (dx)*

In estrema sintesi i dati riportati in *Tabella 7* mostrano i risultati sommari ottenuti dalle tre configurazioni sperimentate a base corta.

Sia dagli istogrammi (Figure 41 e 42) che dai dati numerici, riportati in *Tabella 7*, il sistema interamente *low-cost* (Doppio Ublox) ha gli RMS tutti inferiori ai 5mm e quindi si può affermare che è utilizzabile ai fini del monitoraggio strutturale sia di *early-warning* che di lungo periodo. Inoltre il sistema interamente *low-cost* risulta essere poco sensibile alla variazione della finestra temporale come si nota dagli

istogrammi, che sono all'incirca tutti della stessa altezza. Questa è senza dubbio un'ottima informazione poiché permette di avere un'informazione sufficientemente ripetibile anche ad intervalli di un'ora.

RMS [mm]	Bol1 + <i>Rover</i> antenna <i>Patch</i>			Bol1 + <i>Rover</i> antenna <i>Geodetica</i>			Doppio Ublox + Bullet		
	N	E	U	N	E	U	N	E	U
<b>01h01s</b>	7.65	15.25	13.15	3.14	7.34	4.18	2.16	1.72	4.96
<b>02h05s</b>	4.41	10.07	7.98	1.46	4.33	2.01	1.80	1.57	4.31
<b>03h05s</b>	2.54	6.51	5.67	0.85	2.45	1.21	1.61	1.62	3.15
<b>06h05s</b>	1.31	1.80	1.46	0.43	1.03	0.53	1.01	2.03	2.24
<b>12h30s</b>	0.85	1.12	0.68	0.38	0.45	0.26	0.96	2.05	2.09
<b>24h30s</b>	0.55	0.85	0.49	0.30	0.34	0.19	0.74	3.87	1.56

*Tabella 7 RMS[mm] delle Analisi a Base Corta*

## 5.4 Risultati Individuazione e Rimozione Outliers

Si riportano due grafici (*Figura 43*) che riassumono i risultati della rimozione degli outliers dai data set utilizzando il metodo  $3\sigma$  implementato in questo lavoro di tesi. Data la complessità dovuta al gran numero di analisi, è necessario introdurre in maniera esaustiva la lettura dei due grafici.

Nel dettaglio:

- Grafico in alto (*Figura 43*) **Master Classe geodetica + Rover Ublox con antenna Patch** a confronto con **Ublox-Bullet**.
- Grafico in basso (*Figura 43*) **Master Classe geodetica + Rover Ublox con antenna classe geodetica** a confronto con **Ublox-Bullet**.

Il motivo di questa scelta risiede nel fatto che il sistema Ublox-Bullet è il sistema interamente *low-cost* a cui si mira per la messa in opera.

Rispetto all'utilizzo delle antenne *patch* ci si aspetta migliori prestazioni poiché con l'integrazione dell'antenna Trimble Bullet 360 da un punto di vista *hardware* è sicuramente superiore all'antenna *patch* fornita nel kit di valutazione U-Blox C94-M8.

In *Figura 43* le linee continue rappresentano le percentuali dei punti rimasti dopo la rimozione degli *outliers* con il metodo  $3\sigma$  e quelle tratteggiate le percentuali dei punti rigettati. Quindi la “forbice” che si crea quantifica la percentuale di dati dentro l'intervallo di confidenza  $3\sigma$ .

Dai grafici di *Figura 43* si nota che il sistema U-Blox-Bullet è quello che rispetto agli altri ha lavorato peggio poiché disegna la forbice più stretta ma si deve considerare il fatto che è l'unica configurazione interamente *low-cost* poiché nelle altre c'è sempre almeno il *master* di classe geodetica.

Osservando grafico relativo all'antenna *patch* (*Figura 43* superiore) si può affermare che rispetto al sistema *rover* con antenna geodetica è meno stabile, relativamente al fatto che all'aumentare del valore della finestra temporale il

sistema con *rover* con antenna geodetica migliora in modo più ordinato rispetto al sistema con antenna *patch*. Inoltre come era atteso si ha un numero di rigetti maggiori su base lunga (in blu *Figura 43*) rispetto alla base corta (in rosso *Figura 43*).

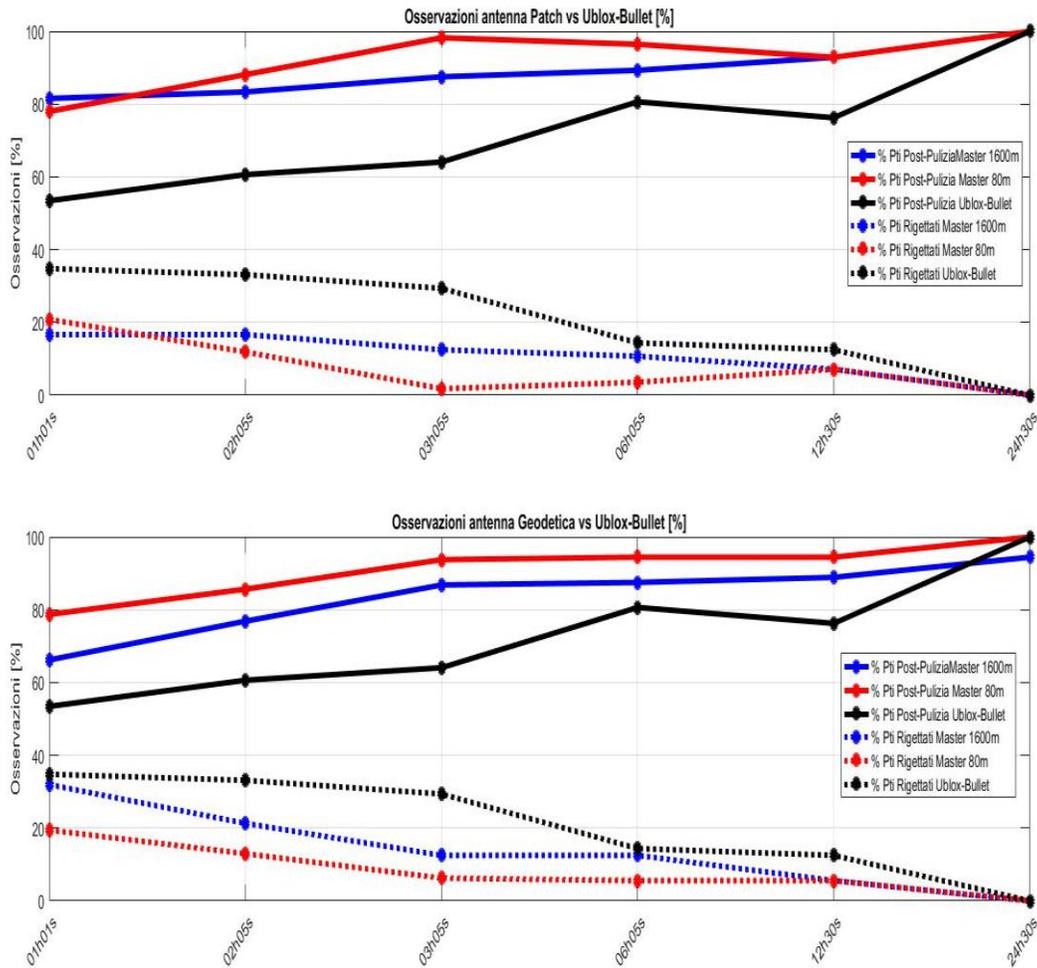


Figura 43 Sintesi dei Risultati di individuazione e pulizia delle serie temporali

Gli stessi risultati in forma tabellare:

Rigetti [%]	Master 1600m + Patch	Master 80m + Patch	Master 1600m + Geodetica	Master 80m + Geodetica	Doppio Ublox 80m + Bullet
01h01s	16.97	21.08	32.55	19.81	39.43
02h05s	16.67	11.90	21.70	13.15	35.33
03h05s	12.50	1.79	12.59	<b>6.25</b>	<b>31.44</b>
06h05s	10.71	3.57	12.50	<b>5.56</b>	<b>15.13</b>

<b>12h30s</b>	7.14	7.14	5.88	<b>5.56</b>	<b>14.08</b>
<b>24h30s</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

*Tabella 8 Percentuali degli Outliers per ogni anali e configurazione Master-Rover*

La *Figura 43* e la *Tabella 8* rappresentano gli stessi dati. Oltre ad una mera quantificazione delle percentuali di dati rimasti o rimossi dopo l'applicazione dell'algoritmo  $3\sigma$  ci fornisce nel suo insieme un'indicazione della affidabilità delle soluzioni nelle configurazioni *hardware* testate in relazione alle finestre temporali.

Per la finestra temporale di un'ora dove si hanno avuti il numero maggiore di rigetti, e per quella a *24h* tutte le soluzioni trovate sono rientrate all'interno del limite  $3\sigma$ .

I migliori punti di funzionamento, se si vuol considerare il sistema operante sul campo e in tempo reale, sono a 3h, 6h e 12h (in grassetto *Tabella 8*). Questa considerazione deriva dalle seguenti evidenze numeriche trovate:

- il numero di punti rigettati è inferiore al *30%*
- in caso di reale utilizzo, questi tre time-span sono abbastanza rappresentativi da poter considerare il monitoraggio per strutture caricate regolarmente (ponti stradali e ferroviari) o per movimenti lenti (argini, frane e spalle di ponte). Ovvero al fine di fornire informazioni sulla struttura ad intervalli da tre a dodici ore. Anche se si considera la peggiore delle ipotesi, 3 punti ogni 10 sono outliers, si possono avere da una(12h) a 5 o 6(3h) informazioni quotidianamente.

## 6 – Conclusioni

Il lavoro di questa tesi è stato finalizzato alla valutazione del funzionamento e alla messa in opera di un sistema GNSS a basso costo da voler impiegare come sistema di monitoraggio strutturale.

Per questo scopo sono state utilizzate differenti configurazioni *hardware*, differenti lunghezze di base e anche una slitta *xyz* su cui era possibile imporre spostamenti calibrati. L'unico aspetto che, per l'intera sperimentazione, è stato mantenuto invariato è il codice di elaborazione dati GPS. I dati sono stati infatti elaborati mediante codice *freeware* e *open source* GoGPS che lavora in ambiente Matlab.

I risultati ottenuti sono molteplici e di seguito si procede ad una sintesi.

Nella prima fase di sperimentazione si è osservato che la distanza tra *rover* e *master* influisce sensibilmente sulla precisione del sistema a parità di strumentazione impiegata.

Al fine della messa in opera di questo sistema, la precedente considerazione ha consigliato di restringere l'analisi a sole basi corte in quanto le basi lunghe generavano livelli di ripetibilità non sufficienti ad un sistema di monitoraggio che vede nell'ordine del centimetro l'entità del movimento da volersi apprezzare.

La ricerca si è quindi spostata sull'aspetto strumentale della miglior collocazione della antenna del *master* rispetto all'antenna *rover*. Questo è un limite abbastanza forte poiché la scelta di un punto o di un altro implica altri problemi sia di natura tecnica e/o amministrativa.

I problemi di natura tecnica sono legati principalmente a:

- garantire alimentazione elettrica
- monumentazione del punto
- elaborazione dei dati in loco e/o in remoto

I problemi di natura amministrativa che possono insorgere sono legati ai permessi da richiedere a privati, enti pubblici non coinvolti direttamente nella struttura da monitorare.

Nella seconda fase di sperimentazione si è potuto osservare che un sistema interamente composto da strumentazione a basso costo è in grado di rilevare senza particolari problemi spostamenti nell'ordine del centimetro e, in alcune circostanze, anche inferiori. Inoltre, a parità di condizioni operative, non sempre i risultati ottenuti con strumentazione geodetica di alta fascia hanno generato livelli di ripetibilità superiore rispetto a quelli geodetici. Si vuole però sottolineare l'importanza dell'antenna utilizzata. Tali risultati sono stati ottenuti con ricevitori *low-cost* ma non con l'antenna *patch* (in dotazione) ma bensì con una antenna L1 di qualità superiore anche se appartenente alla famiglia delle antenne a basso costo.

Questi risultati supportano la possibilità di utilizzo di strumentazione a basso costo ai fini del monitoraggio strutturale

Durante i test, particolare attenzione è stata posta anche sulla ripetibilità delle soluzioni al variare della finestra temporale considerata. Tale aspetto, come già detto, è rilevante al fine di definire quale debba essere la frequenza massima utilizzabile per queste applicazioni. Dai test condotti è emerso che le finestre pari a *3h*, *6h* e *12h* siano quelle più utilizzabili.

Quest'ultima considerazione deriva dai risultati di seguito sinteticamente riportati:

- Gli RMS ottenuti sono confrontabili con quelli del *sistema misto 75%* geodetico (ossia costituito da *master*: Leica GX1230GG + antenna Leica AX1202GG – *rover*: C94-M8P + antenna Leica AX1202GG).
- Garantiscono una frequenza di informazione sul punto di misura compatibile con molte tipologie di strutture che necessitano monitoraggio. Da 2 (*12h*) a 8 (*3h*) informazioni sulle condizioni della struttura al giorno
- Il numero di *outliers* è inferiore al 30%

Tutte le precedenti considerazioni riguardano esclusivamente la comprensione dei limiti di funzionamento della strumentazione utilizzata.

Questo risultato ovviamente porta ad avere nella configurazione a *3h*, 8 soluzioni giornaliere che non possono costituire un sistema in tempo reale ma un sistema in tempo *quasi reale*.

Sono sempre possibili soluzioni anche a 1Hz, non analizzate in questa sede, in quanto i livelli di dispersione sono comunque di almeno un ordine di grandezza superiore.

Per quanto attiene il *software* di calcolo utilizzato in questa tesi, la scelta è caduta su goGPS, il quale presenta le caratteristiche di essere *freeware* e *open source* e quindi in linea con la filosofia *low-cost* di questo progetto.

GoGPS è un *software* eseguibile sia mediante interfaccia grafica che mediante riga di comando. Sfruttando quest'ultima possibilità è quindi anche possibile automatizzarlo scrivendo degli *script* in ambiente MatLab fondamentali in un contesto di monitoraggio continuo. Nell'ipotesi che tale codice sia utilizzabile per le finalità di monitoraggio è però importante sottolineare alcuni aspetti:

- Tempo di elaborazione medio di ogni singola osservazione è nell'ordine di 10/15 minuti con un minimo di 1 minuto (per finestre di osservazioni di 1 ora) fino ad un massimo di 35 minuti (per finestre di 24 ore). Tempi riferiti ad un elaboratore con capacità di calcolo in linea con le medie oggi in commercio. In ambiente *Windows* con processore Intel i7 e 8GiB di memoria RAM. Le elaborazioni sono state effettuate con avviati il minimo numero di processi attivi per il funzionamento del computer ed è risultato che durante l'esecuzione di goGPS si utilizzava più del 65% della memoria disponibile.

Quindi la messa in opera del sistema al momento questa opzione, ovvero l'utilizzo di goGPS, richiede ancora molto sviluppo.

### *8.1 Sviluppi futuri*

Ricollegandosi alle ultime considerazioni appena esposte se si volesse scegliere goGPS come software di elaborazione per il sistema finale si deve cercare di ridurre

il costo computazionale richiesto per l'analisi dei dati soprattutto se si volessero lanciare le analisi in sito con elaboratori *low-cost* tipo Raspberry Pi

In questa tesi si è lavorato effettuando misure per alcuni giorni e finita la fase di acquisizione si sono analizzati i dati. In una vera configurazione di monitoraggio strutturale, ogni informazione dello stato della struttura arriva in tempo reale (in relazione alla finestra temporale adottata) ed è l'ultima informazione di cui si dispone. Questo implica il fatto che, se quest'ultima informazione affermasse lo spostamento del punto, da un solo dato di spostamento non si è in grado di distinguere uno spostamento reale da un *outliers*. Quindi è necessario implementare algoritmi di *change detection*, che basandosi su informazioni pregresse e aspettando una nuova informazioni, valutino, in termini probabilistici, se c'è stato un cambiamento o solo un errore di misura.

## Bibliografia

- S. Gandolfi, *Dispense del Corso di Controllo e collaudo delle strutture e del territorio M*, Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile, A.A. 2013/2014;
- L. Vittuari, *Dispense del Corso di Topografia T*, Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Civile, A.A. 2010-2011
- G. Planta, *Analisi delle prestazioni di un codice di calcolo open-source per l'elaborazione dati gnss in modalità cinematica finalizzata al monitoraggio di strutture e applicazione di filtri sequenziali*, Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile, Alma Mater Studiorum - Università di Bologna, A.A. 2014/2015
- Meffe, *Realizzazione di una stazione di riferimento temporanea GNSS per l'impiego in reti RTK*, Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile, Alma Mater Studiorum - Università di Bologna, A.A. 2007/2008
- L. Zhang, M. Stange, V. Schwieger, *Automatic low-cost GPS monitoring system using WLAN communication*.
- M. Lytvyn, C. Pollabauer, M. Troger, K. Landfahrer, L. Hormann, C. Steger, *Real-time landslide monitoring using single frequency PPP: proof of concept*.
- B. Wisniewski, K. Bruniecki, M. Moszyrski, *Evaluation of RTKLIB's positioning accuracy using low-cost GNSS receiver and ASG-EUPOS*.
- A. Cina, A. Piras, H. I. Bendea, *Monitoring of landslides with mass market GPS: an alternative low-cost solution*.
- M. Piras, G. Marucco, K. Charqane, *Statistical analysis of different low-cost GPS receivers for indoor and outdoor positioning*.
- L. Estey, C. Meertens *TEQC: the multi-purpose toolkit for GPS/GLONASS data*.
- L. Fornari, *Storia delle ingegneria e delle scienze connesse*, Guerra Edizioni.
- G. Dragoni, S. Bergia, G. Gottardi, *Dizionario biografico degli scienziati e dei tecnici*, Zanichelli 1999
- G. Fabbrocino, C. Rainieri, G. M. Verderame, *L'analisi dinamica sperimentale e il monitoraggio delle strutture esistenti*. Università degli Studi del Molise, Consorzio ReLUIIS, Università degli Studi "Federico II"

di Napoli, Consorzio ReLUIS.

- Binda, L., Saisi, A. (2003). *Il ruolo delle indagini nella diagnostica strutturale*. DIS Dipartimento ingegneria strutturale, Politecnico di Milano.
- B. Glisic, D. Inaudi, A. Del Grosso, F. Lanata, (2003). *Monitoraggio a breve e a lungo termine*, SMARTEC SA & Dipartimento ingegneria strutturale e geotecnica, Genova.

## Sitografia

Valida al 12/07/2017

- By U.S. Air Force photo - <http://www.nationalmuseum.af.mil>; exact source, <http://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=5932035>
- By Почта СССР. Номер ЦФА 3496 - RaySys, <http://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=10699257>
- By Bruce Carlson - <http://www.nro.gov/news/speeches/2011/2011-01.pdf>, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=16257767>
- By the Aerospace Corporation <http://timeandnavigation.si.edu/multimedia-asset/testing-the-621b-system>
- A brief history of satellite navigation, Stanford University 06/13/95 <http://news.stanford.edu/pr/95/950613Arc5183.html>
- image credit: NRL [http://directory.eoportal.org/image/image\\_gallery?img\\_id=212953&t=1340024508246](http://directory.eoportal.org/image/image_gallery?img_id=212953&t=1340024508246)
- By NASA - <http://www.navcen.uscg.gov/ftp/gps/ggeninfo/gps-iif.tif> [dead link], Public Domain,
- <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=564265>
- <http://www.trimble.com/timing/bullet-360-antenna.aspx>
- <http://leica-geosystems.com/>
- <http://www.u-blox.com/en/product/ann-ms>
- <http://retegnssveneto.cisas.unipd.it/Web/page.php?pid=db&n=13&link=Guida&chain=6.5>
- <https://www.unavco.org/software/data-processing/data-processing.html>
- [http://www.uni.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=4748%3Alinee-guida-per-il-monitoraggio-strutturale&catid=171&Itemid=2612](http://www.uni.com/index.php?option=com_content&view=article&id=4748%3Alinee-guida-per-il-monitoraggio-strutturale&catid=171&Itemid=2612)
- <http://www.regione.emilia-romagna.it/fesr>

## Appendici

### Lancio goGps in loop

```
addpath('goGPS_Sorge\goGPS\');
analisiesequire= ['Elab_069to108_24H_30s'];
Lung_lista=size(analisi_da_eseguire);
n_nav=0;

%ins Directory di salvataggio delle soluzioni
OUT='C:\Users\Abe\Desktop\TESI\Prova\';

%inserire Directory dei file .ini
%Elaborazione Sorge
percorso_ini='D:\INI\Elab_069to108_24H_01s.ini';
year = 2017;

for i = 1:(Lung_lista(1))

    lung_oss=str2num(analisiesequire(i,29:30));
    nn = 24/lung_oss;
    doy_start=str2num(analiseseguire(i,20:22));
    doy_end=str2num(analisiesequire(i,25:27));
    FILE = analisi_da_eseguire(i,:);

    for ss = 1:nn

        SORGE(year,start,end,'ubxR','ubxM','ubxN',ss,OUT,...
            FILE, n_nav, perc_ini)

    end

end
```

In questo script si esegue l'analisi a 24h30s relativa ai giorni, "doy", da 69 a 108.

La funzione SORGE(...) è il batch di goGPS opportunatamente impostato nei suoi parametri. Probabile fonte di errore sono i percorsi dei *files*.

## Tipico Codice Estrazione Dati

```
clear all
close all
clc
addpath 'fun'
addpath 'extraction_txt'
format bank
warning('off','all');
% Cartella Soluzioni GoGPS
cd('C:\Users\Abe\Desktop\TESI\extraction_txt')

% Estrazione Lista File
lista = dir('*.txt');
lista = extractfield(lista, 'name');
nome= char(extractBefore(lista, '.txt'));
```

Caricamento in ambiente MatLab dei *file .txt* contenenti le soluzioni di goGPS. Fare attenzione al tipo di variabile estratta, se numerica o stringa.

## Preparazione dati e lancio pulizia $3\sigma$

```
% Coordinata Master
for i=1:24
    if mod(i,2)==1
        p=[4468175.04384      896626.70839
4447546.54306]; %BOGA
    else
        p=[4468968.73999      895326.94476
4447004.71561];%BOL1
    end
    lla = ecef2lla(p); %conv. coordinata master
    [A,B,C,doy_dec]=preparazione(lista,i);
    %Dati pre-pulizia
    b = [B,doy_dec];
    %Pulizia
    [B,C,R,jj(i),doy]=puliziaNesseNorm(B,C,doy_dec);
```

Conversione coordinate del *master* in latitudine, longitudine e altitudine. Lancio della funzione pulizia  $3\sigma$  nell'ultima riga.

## Ricerca e Rimozione *Outliers* Normalizzata - Metodo $3\sigma$

```
function [B,C,R0,jj,doy_dec]=puliziaNesseNorm(B,C,d)
% [A,B,C,R,jj,d] gli output sono le serie pulite
% d = doy
% C = matrici varianze
% B =matrice serie da pulire
k=0; %il ciclo while viene eseguito finchè k=0
jj=0; % contatore % rigetti
while k==0

    %RMS la comp Nord, Est ed Up
    RMS = std(B);
    %Costruzione serie temporale a media nulla
    [mN,qN] = FIT1D(doy,B(:,1),d(1),C(:,1));
    [mE,qE] = FIT1D(doy,B(:,2),d(1),C(:,2));
    [mU,qU] = FIT1D(doy,B(:,3),d(1),C(:,3));
    % residui rispetto retta di regres. lineare
    % normalizzato
    R(:,1)=(B(:,1)-(mN*(d-doy(1))+qN))/RMS(1);
    R(:,2)=(B(:,2)-(mE*(d-doy(1))+qE))/RMS(2);
    R(:,3)=(B(:,3)-(mU*(d-doy(1))+qU))/RMS(3);
    % Pulizia Serie con metodo r-sigma
    R0=R.*RMS_prepulizia;
    Rabs=abs(R);
    [M,I]=max(Rabs); % max in N E U
    [MM, II]= max(M); % il max delle tre comp.ti
    %il valore da eliminare I(II) se MM>3
    if MM > 3
        B(I(II),:)=[];
        R(I(II),:)=[];
        C(I(II),:)=[];
        R0(I(II),:)=[];
        doy_dec(I(II))=[];
        k=0;
        jj=jj+1;
        clear RMS_prepulizia M MM I II
    else
        k=1;
    end
end
end
```

## Script Realizzazione Grafici Esempio tipo

```
title('Osservazioni antenna Patch vs Ublox-Bullet [%]')
hold on
grid on
box on

plot([1:6],100*ptiBogaPatch./ossPatch,'b-
o','MarkerSize',5,'MarkerEdgeColor','blue','MarkerFaceCol
or','blue','LineWidth',3)
plot([1:6],100*ptiBollPatch./ossPatch,'r-
o','MarkerSize',5,'MarkerEdgeColor','red','MarkerFaceColo
r','red','LineWidth',3)
plot([1:6],100*ptiub./ossUb,'k-
o','MarkerSize',5,'MarkerEdgeColor','black','MarkerFaceCo
lor','black','LineWidth',3)

plot([1:6],100*jjBogaPatch./ossPatch,'b:o','MarkerSize',5
,'MarkerEdgeColor','blue','MarkerFaceColor','blue','LineW
idth',3)
plot([1:6],100*jjBollPatch./ossPatch,'r:o','MarkerSize',5
,'MarkerEdgeColor','red','MarkerFaceColor','red','LineWid
th',3)
plot([1:6],100*jjub./ossUb,'k:o','MarkerSize',5,'MarkerEd
geColor','black','MarkerFaceColor','black','LineWidth',3)

legend('% Pti Post-PuliziaMaster 1600m','% Pti Post-
Pulizia Master 80m','% Pti Post-Pulizia Ublox-Bullet','%
Pti Rigettati Master 1600m','% Pti Rigettati Master
80m','% Pti Rigettati Ublox-Bullet')
set(gca,'Xtick',1:6,'XtickLabel',lab1,'XTickLabelRotation
',45)
ylabel('Osservazioni [%]')
grid on
hold on
grid on
```

Il codice non è completo. Valido solo per una componente. Si ripete con le opportune modifiche per le altre due.