

Alma Mater Studiorum – Università di Bologna

DOTTORATO DI RICERCA IN

**Ingegneria Civile, Ambientale, Chimica e dei
Materiali**

Ciclo XXVIII

Settore Concorsuale di afferenza: 08/A4 - Geomatica

Settore Scientifico disciplinare: ICAR/06 – Topografia e Cartografia

**Monitoraggio in continuo di strutture e del territorio
mediante la tecnologia GNSS**

Presentata da: Luca Poluzzi

Coordinatore Dottorato

Relatore

Prof. Alberto Lamberti

Prof. Stefano Gandolfi

Esame finale anno 2016

*Alla mia Famiglia:
Tonino, Pierina, Ilenia
e a Martina*

Ringraziamenti

Grazie ai miei genitori che hanno sempre supportato le mie scelte.

Grazie a tutti i professori del DICAM sezione Geomatica ed in particolar modo a Maurizio per gli insegnamenti che mi hanno trasmesso in questi tre anni di dottorato.

Grazie a Stefano, il mio mentore, per i tanti consigli che ha dispensato e perché mi ha spronato a crescere sotto tanti punti di vista.

Grazie ai “regaz” del dipartimento perché mi hanno permesso di staccare la spina quando ne avevo bisogno.

Infine grazie a Martina per la pazienza che ha avuto nel sopportarmi in quest’ultimo periodo particolarmente complesso.

Parole chiave

- Monitoraggio
- GNSS
- Torre Garisenda
- Gipsy OASIS II
- RTKLIB
- Serie Temporali
- Raspberry Pi
- Filtri sequenziali
- Sistema di Riferimento

Indice

1.	Introduzione.....	1
2.	Il problema del monitoraggio	4
2.1.	Perché monitorare	4
2.2.	Cosa monitorare	6
2.3.	Come monitorare.....	7
2.3.1.	Quadro delle tecniche attualmente utilizzate per il monitoraggio di strutture o del territorio.....	10
3.	La tecnologia GNSS	18
3.1.	Breve introduzione	18
3.1.1.	Diffusione del GNSS per rilievi di precisione	18
3.2.	Tipologie di elaborazione.....	21
3.2.1.	Statico – Cinematico	22
3.2.2.	Approccio differenziato VS Approccio non differenziato (PPP).....	24
3.2.3.	Software di elaborazione dati.....	25
3.2.3.1.	Software Scientifici	26
3.2.3.2.	Software Commerciali	29
3.2.3.3.	Software Commerciali per il Monitoraggio	31
3.2.3.4.	Software Open source.....	32
4.	Il caso di studio: La torre Garisenda.....	39
4.1.	Breve introduzione storica	39
4.2.	Stato attuale su monitoraggio Garisenda.....	41

5.	Aspetto Tecnologico	44
5.1.	La strumentazione GNSS.....	44
5.2.	La telecomunicazione	47
5.2.1.	Introduzione al problema dell'invio dei dati.....	47
5.2.2.	Situazione iniziale.....	47
5.2.2.1.	Connessione via cavo: Lantronix UDS 100	48
5.2.2.2.	Connessione via rete telefonica: Siemens TC65	50
5.2.2.2.1.	Problematiche riscontrate	53
5.2.3.	Possibilità studiate: dispositivo smart and full use	54
5.2.3.1.	Raspberry Pi	55
5.2.3.2.	3G USB Dongle: Huawei E3251	58
5.2.3.3.	Adattatore USB-RS232	58
5.2.3.4.	Configurazione del Raspberry Pi	59
5.2.3.5.	Serial to TCP/IP	60
5.3.	Server di raccolta dei dati	62
5.3.1.	GNSS Spider.....	62
5.3.2.	Alternativa opensource	63
6.	Monitoraggio della struttura per analisi di stabilità	65
6.1.	Problema geodetico: definizione del sistema di riferimento.....	66
6.2.	Dataset e stazioni di riferimento utilizzate per lo studio.....	68
6.3.	Ipotesi di stabilità del riferimento	70
6.3.1.	Primi risultati	72
6.4.	Rigetto ipotesi di stabilità	75
6.4.1.	Generazione del modello	75
6.4.2.	Risultati finali e discussione	79
7.	Confronto con dati di altri strumenti	83

7.1.	Analisi correlazione con dati temperatura.....	83
7.2.	Analisi correlazione con dati inclinometro	85
8.	Monitoraggio di strutture per possibili applicazioni nell'ambito dell' <i>early warning</i>	90
8.1.	Sperimentazione del metodo di calcolo	91
8.2.	Scelta del software	99
8.3.	Risultati grezzi	100
8.4.	Autocorrelazione	101
8.5.	Filtri sequenziali.....	103
8.5.1.	Introduzione	103
8.5.2.	Procedura di creazione dei filtri	106
8.5.3.	Risultati finali e discussione.....	109
9.	Conclusioni.....	115
10.	Sviluppi futuri.....	119
10.1.	Il monitoraggio con strumentazioni a basso costo	119
10.2.	Monitoraggio in tempo reale: Modulo di RTKLIB	120
11.	Appendice.....	121
A.	Dal sistema GSM all'UMTS.....	121
B.	Network Address Translation	124
C.	GTS pack (GNSS Time Series).....	126
	GTS shaper	126
	GTS find discontinuity	128
	GTS discontinuity.....	128
	GTS frequency.....	128
	GTS direction	129
	GTS sketcher	130

D. Serial to TCP/IP	133
Bibliografia.....	144
Siti Web	149

Indice Figure

Figura 2.1- Mappa globale tettonica delle placche	4
Figura 2.2 - Mappa subsidenza Emilia Romagna	5
Figura 2.3 - Esempio di frana	6
Figura 2.4 - Esempio di materializzazione di punti	8
Figura 2.5 - Total Station	11
Figura 2.6 - Autolivello	12
Figura 2.7 – Esempio di strisciata fotogrammetrica	12
Figura 2.8 – Laserscanner	13
Figura 2.9 - Livello zenitale.....	13
Figura 2.10 - Filo a piombo diritto	14
Figura 2.11 - Filo a piombo rovesciato.....	14
Figura 2.12 - Estensimetro.....	15
Figura 2.13 - Fessurimetro.....	15
Figura 2.14 – Inclinatori di bassa e alta fascia.....	16
Figura 2.15 - Accelerometro	17
Figura 3.1 – Ricevitori GNSS installati per Regione.....	19
Figura 3.2 – Impiego dei sistemi GNSS nei diversi settori	19
Figura 3.3 - Interfaccia grafica Trimble Total Control.....	30
Figura 3.4 - Interfaccia grafica Topcon Tools	31
Figura 3.5 - Interfaccia grafica Polifemo.....	32
Figura 3.6 - Interfaccia grafica di RTKLIB	33
Figura 3.7 - Interfaccia grafica RTKPLOT	33
Figura 3.8 - Interfaccia grafica RTKCONV	34
Figura 3.9 - Interfaccia grafica STRSVR	34
Figura 3.10 - Interfaccia grafica RTKPOST.....	35
Figura 3.11 - Interfaccia grafica NTRIP Browser	36
Figura 3.12 - Interfaccia grafica RTKGET.....	36

Figura 3.13 - Interfaccia grafica RTKNAVI	37
Figura 3.14 - Interfaccia grafica goGPS	37
Figura 4.1 – Immagine storica delle torri presenti a Bologna	39
Figura 4.2 - Immagine d'epoca delle due torri di Bologna	40
Figura 4.3 – Documento che attesta la vendita della torre Garisenda	41
Figura 4.4 - Foto due torri di Bologna.....	42
Figura 5.1 – Materializzazione della stazione GNSS sulla torre Garisenda.....	45
Figura 5.2 – Antenna LEIAX 1202GG e ricevitore SYSTEM 1230GG.....	46
Figura 5.3 - Schema funzionamento ricevitore	46
Figura 5.4 - Lantronix UDS-100	48
Figura 5.5 - Schema funzionamento Lantronix	49
Figura 5.6 – Problemi di ricezione dati	53
Figura 5.7 - Esempio di soft handover	54
Figura 5.8 – Raspberry Pi.....	55
Figura 5.9 – 3G Dongle Huawei E3251	58
Figura 5.10 – Adattatore LEMO–RS232 e adattatore RS232–USB	59
Figura 5.11 – Schema funzionamento Serial to TCP/IP - versione 1.....	61
Figura 5.12 – Schema funzionamento Serial to TCP/IP - versione 2.....	61
Figura 5.13 - Schema funzionamento STR2SVR.....	64
Figura 5.14 - Schema funzionamento RTKCONV	64
Figura 6.1– Mappa tettoniche delle placche dell'Italia.....	66
Figura 6.2 - Problematiche relative alla stabilità del riferimento	67
Figura 6.3– Mappa posizione della torre Garisenda (MS) e delle quattro RS.....	69
Figura 6.4 – Serie temporali di BOGA con ipotesi di riferimento costante	72
Figura 6.5 - Serie temporale della stazione BOLG con modello.....	77
Figura 6.6 - Serie temporale della stazione BOL1 con modello	78
Figura 6.7 - Serie temporale della stazione BO01 con modello.....	78
Figura 6.8 - Serie temporale della stazione BLGN con modello.....	79
Figura 6.9 – Serie temporali di BOGA considerando modelli delle RS	80
Figura 7.1 - Stazione Meteorologica installata dall'impresa Tecno In	83
Figura 7.2 - Grafico confronto temperatura e serie temporale GNSS.....	84
Figura 7.3 - Inclino metro Dual Axys mdello ELS-XX-V	85

Figura 8.4 - Prospetto posizione inclinometri nella torre Garisenda	86
Figura 7.5 - Schema trave incastrata per il calcolo degli spostamenti.....	88
Figura 7.6 - Schema rotazione assi della Torre per portarli nelle direzioni N-E.....	88
Figura 7.7 - Grafico confronto spostamenti da inclinometri e serie GNSS	89
Figura 8.1 – Immagine baseline BOGA e BOL1.....	91
Figura 8.2- Immagine dello skyplot e grafico del multipath, SNR, elevazione	92
Figura 8.3 - Serie RTKLIB - Confronto angoli di cut-off	93
Figura 8.4 - Serie Trimble Total Control - Confronto angoli di cut-off.....	93
Figura 8.5 - Stazione di Calibrazione su piattaforma micrometrica XYZ.....	94
Figura 8.6 - Test calibrazione goGPS con modello statico.....	95
Figura 8.7 - Test calibrazione goGPS con modello a velocità costante	95
Figura 8.8 - Serie grezza Gipsy OASIS II	97
Figura 8.9 - Serie grezza RTKLIB.....	97
Figura 8.10 - Serie grezza GNSS Solutions.....	98
Figura 8.11 - Serie grezza Trimble Total Control	98
Figura 8.12 - Serie grezza goGPS.....	99
Figura 8.13 – Serie temporale pulita dei 15 giorni analizzati.....	100
Figura 8.14 – Esempio di correlazione tra differenti giorni	101
Figura 8.15 – Grafico della funzione di autocorrelazione	102
Figura 8.16– Esempio di antenna choke ring	103
Figura 8.17 - Immagine riassuntiva di tutti i parametri calcolati da RTKLIB	106
Figura 8.18 – Istogramma % di miglioramento serie filtrate rispetto serie pulita ...	113
Figura 8.19 - Esempio di applicazione del filtro	114
Figura 10.1 - Esempio di strumentazione GNSS low cost	119
Figura 10.3 - Screenshot RTKNAVI e RTKPLOT	120
Figura 11.1 - Tipologie di Multiple Access.....	122
Figura 11.2 - Schema funzionamento GTS shaper	127
Figura 11.3 - Schema funzionamento GTS frequency	129
Figura 11.4 - Grafico serie serie discontinua.....	130
Figura 11.5 - Grafico serie grezza: le stelle rosse rappresentano gli outliers	130
Figura 11.6 - Grafico serie con sovrimpresso il segnale sinusoidale calcolato	131
Figura 11.7 – Grafico Periodogramma	132

Indice Tabelle

Tabella 3.1 – Tabella descrizione delle orbite	21
Tabella 5.1 – Caratteristiche Leica GX1230GG	45
Tabella 5.2 – Caratteristiche Lantronix	49
Tabella 5.3 – Caratteristiche Siemens TC65 Terminal.....	52
Tabella 5.4 - Caratteristiche Raspberry Pi.....	56
Tabella 6.1 – Caratteristiche di ogni RS e relative distanze dalla MS	70
Tabella 6.2 – Velocità medie di BOGA con le RS assunte stabili	73
Tabella 6.3–Coefficienti di Pearson delle serie con RS assunte stabili.....	74
Tabella 6.4 – Velocità medie delle RS calcolate in PPP con i relativi SQM	76
Tabella 6.5 – Velocità medie di BOGA considerando i modelli delle RS	80
Tabella 6.6 – Coefficienti di Pearson delle serie con modello RS	81
Tabella 6.7 – Velocità residue della torre Garisenda.....	82
Tabella 8.1 - Valori della deviazione standard delle serie grezze	96
Tabella 8.2 - Tabella riassuntiva di confronto tra i software GNSS.....	96
Tabella 8.4 – Valori dello SQM relativi alla serie pulita, filtrata.....	111
Tabella 8.5 – Percentuali di miglioramento dei SQM delle serie filtrate	112

Acronimi

3GPP: 3rd Generation Partnership Project

3UD: 3G USB Dongle

ADSL: Asymmetric Digital Subscriber Line

AIUB: Astronomical Institute of the University of Bern

CDMA: Code Division Multiple Access

CODE: Center for Orbit Determination in Europe

CSH: C-shell

DGPS: Differential GPS

DICAM: Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale Chimica e dei Materiali

DOP: Dilution of Precision

DTM: Digital Terrain Model

DNS: Domain Name Service

DYNDNS: Dynamic Domain Name Service

EDGE: Enhanced Data Rates for GSM Evolution

EGSA: European GNSS Agency

EKF: Extended Kalman filter

EPN: EUREF Permanent Network

ETRF: European Terrestrial Reference Frame

ETRS: European Terrestrial Reference System

EUREF: European Reference Frame

FDMA: Frequency-Division Multiple Access

FKP: Flachen Korrektur Parameters

FORTRAN: Formula Translation

FTA: Full Type Approved

GIS: Geographic Information System

GLONASS: Global Navigation Satellite System

GMF: Global Mapping Function

GNSS: Global Navigation Satellite System
GPRS: General Packet Radio Services
GPS: Global Positioning System
GPT: Global Pressure and Temperature
GSM: Global System for Mobile
GTS: GNSS Time Series
GUI: Graphical User Interface
HTML: Hyper Text Markup Language
IGbYY: realizzazione “b” del frame IGSYY
IGS: International GNSS Service
IMP-NG: Information Mobile Profile NG
INGV: Istituto Nazionale Di Geofisica E Vulcanologia
ITRFYY: International Terrestrial Reference Frame
ITRS: International Terrestrial Reference System
JPL: Jet Propulsion Laboratory
LAN: Local Area Network
LBS: Location-Based Service
LSA: Least Square Approach
LSP: Lomb SCargle Periodogram
LTE: Long Term Evolution
M2M: machine to machine
MAC: Master–Auxiliary Concept
MIT: Massachusetts Institute of Technology
MLE: Maximum Likelihood Estimation
MS: Stazione di Monitoraggio
NASA: National Aeronautics and Space Administration
NAT: Network Address Translation
NMEA: National Marine Electronics Association
NRTK: Network RTK
NTRIP: Networked Transport of RTCM via Internet Protocol
OTA: Over the Air
OTF: On the Fly

PPP: Precise Point Positioning
QoS: Quality of Service
RINEX: Receiver Independent Exchange Format
RNC: Radio Network Controller
RS: stazione di riferimento
RS232: Recommended Standard 232
RTCM: Radio Technical Commission for Maritime Services
RTK: Real Time Kinematic
SBAS: Satellite-Based Augmentation System
SINEX: Solution Independent Exchange
SLR: Satellite Laser Ranging
SNR: Signal Noise Ratio
SoC: System-on-a-chip
STEC: Slant Total Electron Content
TCP/IP: Transmission Control Protocol / Internet Protocol
TDMA: Time Division Multiple Access
TEQC: Translate Edit Quality Check
TTC: Trimble Total Control
UMTS: Universal Mobile Telecommunication System
UNIX: Uniplexed Information and Computing Service
USB: Universal Serial Bus
UTRAN: Universal Terrestrial Radio Access Network
VLBI: Very Long Baseline Interferometry
VMF: Vienna Mapping Function
VRS: Virtual Reference Station
WIFI: Wireless Fidelity
ZTD: Zenith Tropospheric Delay

Abstract

Al giorno d'oggi, la tecnologia GNSS può essere uno strumento utile, non solo in ambito di navigazione, ma anche per applicazioni di posizionamento di precisione come il monitoraggio di strutture o del territorio. Questa tecnica permette un controllo in continuo, anche da remoto, e ha un costo relativamente basso sia per quanto riguarda le strumentazioni che per gli aspetti di materializzazione e mantenimento. Nell'ottica di utilizzare la tecnologia GNSS per applicazioni di monitoraggio, il problema, nella sua interezza, può essere suddiviso in due grandi ambiti: l'ambito tecnologico (strumentazioni e apparati da adottare per un problema di monitoraggio anche in tempo reale) e l'ambito scientifico legato al problema del trattamento del dato che può, o deve, essere separato a sua volta in due aree legate alla tipologia di monitoraggio che si intende compiere. Il monitoraggio di movimenti lenti per analisi di stabilità (volto principalmente allo studio dell'evoluzione del quadro deformativo nel lungo periodo) o il monitoraggio per possibili applicazioni nell'ambito dell'*early warning* (che richiedono la valutazione di un movimento in tempo reale). Per le sperimentazioni sia di natura tecnologica che di trattamento del dato sono stati individuati due siti su cui sono stati installate stazioni permanenti GNSS di classe geodetica. Il primo sito è collocato sul tetto della scuola di Ingegneria ed Architettura dell'Università di Bologna, il secondo sito è la sommità della Torre Garisenda di Bologna (oggetto di particolare rilevanza culturale). Sul tetto di Ingegneria è stata collocata anche una slitta micrometrica che ha consentito l'imposizione di movimenti calibrati nelle tre direzioni. Per ciascun aspetto sono stati compiuti numerosi test sperimentali volti ad individuare le tecniche migliori per il monitoraggio con GNSS a partire dalle problematiche di trasferimento dati e finendo con lo sviluppo di particolari algoritmi per migliorare le prestazioni del sistema in condizioni di monitoraggio statico.

1. Introduzione

Il monitoraggio di strutture e del territorio rappresenta attualmente un argomento di grande interesse soprattutto su un territorio come quello italiano soggetto a fenomeni dinamici di diversa scala: dai meccanismi geodinamici passando per la subsidenza (scala regionale) fino ad arrivare ai fenomeni franosi (scala locale).

In un'ottica di prevenzione risulta importante se non fondamentale il monitoraggio di zone o edifici a rischio. In questa tesi sono state indagate le potenzialità della tecnologia GNSS a partire da un caso di studio riguardante uno dei beni culturali più importanti della città di Bologna, la torre Garisenda. Su di essa è stata infatti installata una stazione GNSS permanente direttamente collegata ad un server collocato nella Scuola di Ingegneria ed Architettura dell'Università di Bologna, che riceveva, in tempo reale le osservazioni della stazione permanente con la frequenza di 1 Hz. A seguito di tale configurazione sono stati condotti studi sia riguardanti la stabilità della torre, mediante osservazioni a 24 ore, sia riguardanti metodi per il monitoraggio in tempo reale finalizzato a problematiche di *early warning*.

La tesi è costituita da un capitolo introduttivo, e generale, sul monitoraggio (Capitolo 2) dove si inquadrano alcuni aspetti legati al monitoraggio ed in particolare le motivazioni che portano alla istituzione di un sistema di monitoraggio, l'individuazione degli oggetti che possono essere posti sotto monitoraggio ed infine le modalità di monitoraggio. In questa sezione vengono anche elencate a livello bibliografico le principali tecniche e strumentazioni (anche non prettamente topografiche) che possono o vengono attualmente utilizzate.

Il Capitolo 3 riguarda la tecnologia GNSS, a partire da una breve introduzione storica sullo sviluppo e impiego del sistema, proseguendo con una illustrazione delle differenti

tipologie di elaborazione dati o di approcci al calcolo attualmente esistenti, indicando, per completezza, i principali software esistenti in ambito scientifico, commerciale e open source.

Nel Capitolo 4 viene illustrato il caso di studio, ed oggetto principale della tesi, rappresentato dalla torre Garisenda a partire da una breve introduzione storica dell'edificio e proseguendo con la descrizione dello stato attuale del sistema di monitoraggio attivo in forma stabile dal 2009.

Lo studio condotto durante i tre anni di dottorato si concretizza a partire dal Capitolo 5 in cui viene illustrato il problema del monitoraggio GNSS sotto il punto di vista tecnologico, anche nell'ottica di un utilizzo di tale tecnica per applicazioni in tempo reale. In particolare, in questo capitolo sono stati affrontate le tre fasi che portano alla realizzazione di un sistema di monitoraggio GNSS ossia la scelta della strumentazione GNSS, la componente di telecomunicazione, cioè l'apparato di trasmissione dati in tempo reale ed il server di archiviazione dati.

Il Capitolo 6 affronta il problema del monitoraggio GNSS nell'ottica di studiare l'evoluzione dei movimenti della struttura su un lungo periodo. Per questa parte il dato è stato trattato a partire da files a 24 ore ed elaborati in modalità statica. Particolare attenzione è stata data al problema relativo alla stabilità del sistema di riferimento scelto per eseguire questo tipo di monitoraggio.

Il Capitolo 7 contiene alcuni confronti tra la serie temporale GNSS giornaliera e quelle relative a due differenti dati: la temperatura e lo spostamento calcolato integrando i dati degli inclinometri installati sulla torre

Il Capitolo 8 invece affronta il problema del monitoraggio GNSS nell'ottica di realizzare un sistema di *early warning*. In tale contesto sono stati quindi condotti studi preliminari sulle precisioni ottenibili da differenti codici di calcolo utilizzati in modalità cinematica, anche *Open Source*, e successivamente viene proposto un metodo per il miglioramento delle soluzioni da potersi applicare in questi ambiti. Tale metodo è costituito dalla creazione di filtri siderali e la generazione successiva di filtri sequenziali. Tutto il Capitolo 8 ha avuto come base 15 giorni di osservazioni e lo studio è stato condotto in modalità post-processing, tuttavia, l'intera sequenza proposta si presta in modo relativamente semplice ad essere implementata anche per un suo utilizzo in tempo reale.

Infine nel Capitolo 9 vengono illustrati possibili sviluppi futuri, che riguardano l'impiego di strumentazione GNSS a basso costo e applicazione dei filtri sequenziali per il posizionamento in tempo reale.

2. Il problema del monitoraggio

Il monitoraggio viene definito come: “*L’osservazione, a scopo di controllo, di una grandezza variabile (o di più grandezze), eseguita mediante appositi strumenti*” (enciclopedia Treccani).

In ambito geodetico, ciò si traduce nella misura dello spostamento di punti di controllo, appartenenti a oggetti o superfici, rispetto a punti di riferimento posti in zone stabili, rilevato in successivi intervalli di tempo.

Tali misure, basate su tecniche geodetiche, vengono eseguite al fine di controllare i movimenti o le deformazioni dell’oggetto posto sotto monitoraggio e che possono essere causati da fattori naturali o antropici.

2.1. Perché monitorare

Poiché la terra subisce movimenti e deformazioni di vario tipo, è importante effettuare un monitoraggio a diverse scale. Molto interessante è quello a scala globale in quanto, attraverso la geodesia, è possibile quantificare i meccanismi geodinamici, rappresentati dal moto delle placche continentali (Figura 2.1), che generano fenomeni

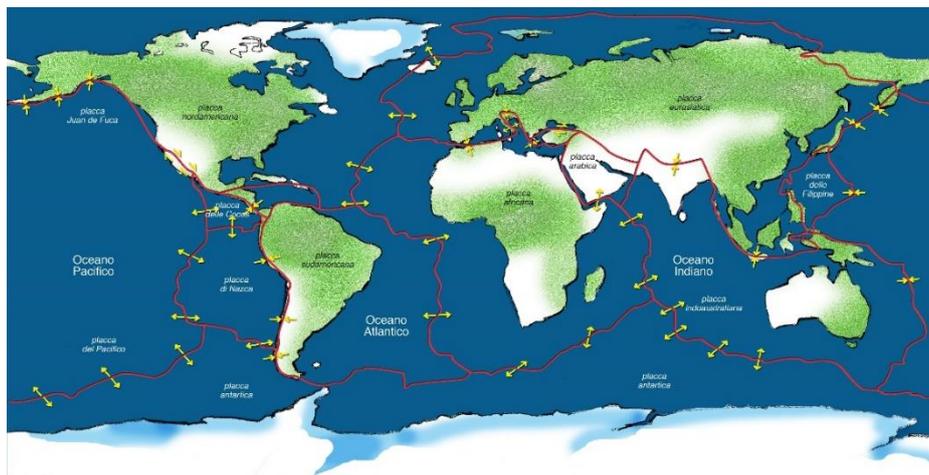


Figura 2.1- Mappa globale tettonica delle placche

di subduzione e trascorrenza, in corrispondenza dei quali è possibile individuare le zone sismiche e vulcaniche.

Su scala regionale invece, possono essere individuati fenomeni geofisici e geologici su vaste aree: spesso questi fenomeni hanno grande dipendenza da quelli a scala globale e non è possibile descriverli senza prima inquadrarli in un contesto più ampio. In questa categoria si possono inserire: la subsidenza (Figura 2.2), le attività sismiche, vulcaniche e geotermiche.

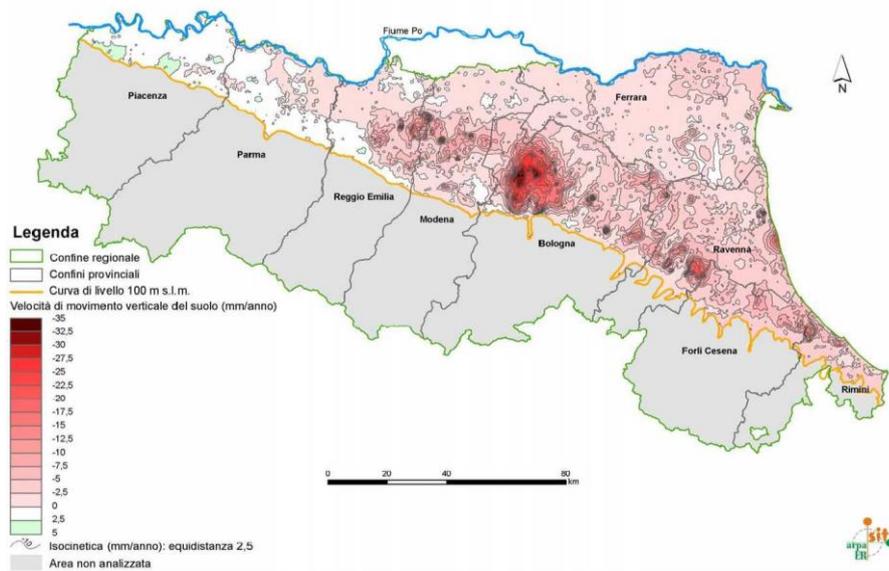


Figura 2.2 - Mappa subsidenza Emilia Romagna (<http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/>)

Infine c'è la scala locale, alla quale si riconducono i fenomeni franosi naturali (Figura 2.3), quelli indotti da fattori antropici (scavi, estrazioni, ...) o il monitoraggio di

strutture. A seconda dello spostamento atteso dell'oggetto da monitorare, è richiesta una precisione differente.

Per questo motivo è necessario monitorare correttamente qualsiasi tipo di oggetto, sia esso una struttura o il territorio, al fine di interpretare correttamente il fenomeno



Figura 2.3 - Esempio di frana

dinamico.

2.2. Cosa monitorare

In generale, al fine di approcciare al problema del monitoraggio, l'oggetto di studio viene sintetizzato mediante un numero discreto di punti ritenuti rappresentativi e significativi dell'oggetto da monitorate. Il monitoraggio si concretizza quindi con lo studio dell'evoluzione spaziotemporale di quei punti. Solitamente tali punti possono essere naturali o materializzati ad hoc, e la loro conservazione è di fondamentale importanza per una corretta interpretazione del monitoraggio. Nel caso del monitoraggio di strutture o del territorio, lo spostamento dei punti può tradursi in:

- Movimento rigido, quando i punti si spostano come se fossero un unico oggetto rigido rispetto un sistema di riferimento esterno ad esso. Se il sistema fosse solidale infatti, lo spostamento non sarebbe percepibile.
- Deformazione dovuta a movimenti relativi all'interno dell'oggetto preso in considerazione che comportano un cambiamento della forma e/o dimensione

dell'oggetto. In questo caso il sistema di riferimento, anche se solidale, osserva comunque movimenti di parte di esso.

Questi fenomeni possono essere causati da fattori naturali o antropici.

Esistono diversi ambiti di interesse, dai quali dipende la tecnica di rilievo da utilizzare: ingegneristico (edifici, strutture...), geofisico (moto delle placche o delle deformazioni crostali, ecc.), geologico (frane, smottamenti, stabilità pendii, subsidenza, ecc.) e infine architettonico (monumenti, beni culturali, ecc.).

I tipi di movimenti monitorati possono essere solo altimetrici, come ad esempio per la subsidenza, solo planimetrici, oppure tridimensionali.

Questa considerazione è valida anche per i metodi di elaborazione e trattamento dei dati.

2.3. Come monitorare

Il monitoraggio deve essere eseguito seguendo una serie di fasi operative. Per prima cosa è necessario uno studio accurato dell'oggetto da monitorare, che ne consenta una delimitazione precisa su diversi aspetti. In particolare è utile, ai fini della progettazione di un sistema di monitoraggio, avere indicazioni sulle possibili cause alla base delle deformazioni, sulle entità in gioco e sulla corretta identificazione dell'estensione dell'area da porre sotto monitoraggio. Inoltre nella fase di progettazione ha particolare importanza anche la scelta del sistema di riferimento che si utilizza per osservare l'evoluzione del fenomeno. Tale sistema di riferimento identificato con punti materializzati ad hoc deve essere preferibilmente monumentato in prossimità dell'area da monitorare che sia stabile (ossia non coinvolta dai movimenti che si vogliono monitorare e allo stesso tempo non influenzata da fenomeni di altra natura). Noto il movimento atteso, è necessario scegliere poi la strumentazione e la metodologia più adatta alle precisioni che si vogliono ottenere. Lo step successivo è l'identificazione dell'insieme di punti notevoli che meglio rappresenta l'oggetto: ad esempio, per monitorare solo il movimento basterà un solo punto, se invece si vuole indagare il quadro deformativo allora sarà necessario un numero di punti superiore.

Dopo aver scelto tali punti, la loro successiva materializzazione rappresenta una fase molto delicata della procedura, in quanto, se non correttamente effettuata, potrebbe portare alla lettura di spostamenti non dovuti all'oggetto del monitoraggio. È necessario infatti, che lo strumento di misura, ma anche i segnali di collimazione e i prismi retro riflettenti, possano essere ricollocati sullo stesso punto, a distanza di tempo, con un piccolissimo scarto. Conviene utilizzare allora sistemi di posizionamento "a centramento forzato", che garantiscano il riposizionamento dello strumento o del contrassegno, con variazioni dell'ordine del decimo di mm. Nei rilievi di controllo va posta la massima cura nella realizzazione dei capisaldi e della segnalizzazione.

Analogo discorso vale per i punti di riferimento esterni all'area, che devono ovviamente essere ben vincolati e stabili rispetto il sistema di riferimento. Alcuni esempi di materializzazione di punti sono rappresentati da pilastrini in calcestruzzo con centramento forzato, adattatori in acciaio, viti, staffe, ecc...



Figura 2.4 - Esempio di materializzazione di punti

A seconda dell'oggetto da monitorare, ma anche dalla metodologia scelta, si procederà poi alla definizione del sistema di riferimento. Utilizzando strumenti topografici tradizionali, questo sarà di tipo geodetico locale, mentre se la scelta ricade su ricevitori GNSS, il sistema di riferimento sarà geocentrico (globale). È comunque possibile, a posteriori, eseguire una rototraslazione che consente il passaggio al sistema geodetico locale.

Terminata questa fase preliminare, comincia il monitoraggio vero e proprio che consiste nell'esecuzione di misure ripetute nel tempo. La frequenza con la quale viene

ripetuto il rilievo dipende dalla dinamica del fenomeno. Quando è possibile, è preferibile un monitoraggio continuo che può prevedere, nel caso il sistema di elaborazione dati avvenga in tempo reale, anche la creazione di sistemi di *early warning*.

Successivamente si esegue il trattamento delle osservazioni, ovvero il calcolo dei movimenti grezzi a partire dai dati strumentali, seguito, in caso di misure sovrabbondanti, da una compensazione.

Dopodiché si procede all'analisi della significatività degli spostamenti calcolati, attraverso una valutazione di tipo statistico. La presenza comunque di errori di misura ineliminabili, portano a risultati differenti tra due rilievi successivi, anche se non si è verificato alcun movimento o deformazione.

Il rilevatore deve valutare se le differenze di coordinate, tra due rilievi dello stesso oggetto, sono significative e dovute a reali spostamenti verificatisi nell'intervallo tra i due rilievi, o se queste sono solo causate dalla variabilità insita nelle operazioni di misura. Se le differenze di coordinate sono notevolmente grandi rispetto alla sensibilità strumentale o alla precisione raggiungibile per quel tipo di rilievo, non sussistono dubbi sul fatto che ci sia stato un movimento (salva l'ipotesi di errori grossolani che dovrebbero essere comunque individuabili e rimovibili se il sistema di monitoraggio è ben progettato).

Se le differenze sono modeste invece, è difficile distinguere gli effetti degli errori di misura da movimenti reali.

In genere, bisogna applicare criteri statistici per stabilire una certa probabilità che sia intervenuto o meno un movimento, e solo quando si riconosce la significatività statistica dello spostamento, ha senso passare all'interpretazione fisica del movimento e delle sue cause.

Infine, si eseguono le stime dei movimenti o delle deformazioni con l'analisi delle incertezze associate.

I rilievi possono essere ripetuti, in modo discreto o continuo, con strumenti e metodi adeguati all'entità del fenomeno che si vuole osservare. Per questo motivo i parametri importanti nel monitoraggio sono rappresentati da numero ripetizioni, frequenza e durata.

L'intervallo di tempo tra due rilievi successivi dipende dalla dinamica e dalla pericolosità del oggetto da monitorare e dal tempo necessario per l'esecuzione del rilievo stesso. Fenomeni con una dinamica rapida richiedono frequenze maggiori e la durata del rilievo deve essere tale che l'oggetto non subisca spostamenti in corso di esecuzione del rilievo.

Il monitoraggio in continuo, invece, si realizza con l'acquisizione di osservazioni in modo ininterrotto. In questo caso la rete è costituita da un numero di punti, materializzati mediante stazioni permanenti, che funzionano con continuità e possono essere controllate da remoto. Esistono sistemi di gestione di monitoraggi in continuo che permettono di definire avvisi o azioni, a mezzo di attuatori, nel caso in cui i valori misurati superino delle soglie fissate. Questa modalità è consigliabile quando il fenomeno da monitorare presenta rischi importanti o un'evoluzione veloce.

2.3.1. Quadro delle tecniche attualmente utilizzate per il monitoraggio di strutture o del territorio

La scelta della tecnica di monitoraggio più idonea ad un determinato monitoraggio costituisce un aspetto fondamentale. Essa è spesso legata alle dimensioni e alle precisioni necessarie per descrivere il fenomeno da controllare. Ad esempio, per controllare uno spostamento, che avviene prevalentemente in una sola direzione, si possono impiegare strumenti di rilievo diversi rispetto a quelli usati per fenomeni descritti nelle due o tre dimensioni.

La precisione richiesta dipende sia all'entità dello spostamento, sia dalla sua derivata, cioè la velocità con cui evolve il fenomeno oggetto del controllo. Pertanto precisioni elevate permettono di misurare spostamenti di piccola entità e quindi di individuare più facilmente un movimento o una deformazione.

Le strumentazioni, utilizzabili in ambito di monitoraggio di strutture o del territorio, sono descrivibili in base alla tipologia:

- Strumentazioni di tipo topografico:

- Total Station: consente la misura di angoli (azimutali e zenitali) e distanze. È costituito da un teodolite con un distanziometro accoppiato quasi sempre coassialmente; lo stesso distanziometro può essere del tipo tradizionale, cioè necessita del prisma riflettente per effettuare la misura distanziometrica, oppure del tipo laser, che rileva la distanza senza l'ausilio del prisma, molto utile in caso di punti inaccessibili. Consente precisioni angolari inferiori al secondo.



Figura 2.5 - Total Station

- Livello ottico: consente la misura di dislivelli con precisioni elevate, fino al centesimo di mm. In commercio esistono livelli ottici meccanici, che obbligano l'operatore ad effettuare una lettura manuale, e livelli ottici digitali, che, con il supporto di apposite stadie contenenti un codice a barre, consentono una lettura automatica, tramite tecniche di *image matching*. Tutti questi modelli sono dotati di un dispositivo compensatore che ha la funzione di rendere orizzontale l'asse di collimazione dello strumento (retta che unisce il centro del reticolo con il centro dell'obbiettivo) in modo automatico, minimizzando quindi gli errori da parte dell'operatore. È costituito da un sistema di prismi, un sistema pendolare, e uno smorzatore di oscillazioni. L'errore di chiusura è calcolato come $E(mm) = \pm k\sqrt{L(km)}$, con k che varia tra 2 e 10, in base al livello di precisione considerato.



Figura 2.6 - Autolivello

- Fotocamera per Fotogrammetria (dei vicini, aerea e satellitare): Lo strumento è costituito da una fotocamera calibrata che permette di acquisire dei dati metrici di un oggetto (forma e posizione) tramite l'acquisizione e l'analisi di una coppia di fotogrammi stereometrici. La precisione delle coordinate rilevate dipende dai seguenti fattori:
 - risoluzione intrinseca del rilievo;
 - esatta individuazione dei punti da rilevare;
 - individuazione dei punti corrispondenti, se si tratta di coppie stereometriche di fotogrammi.

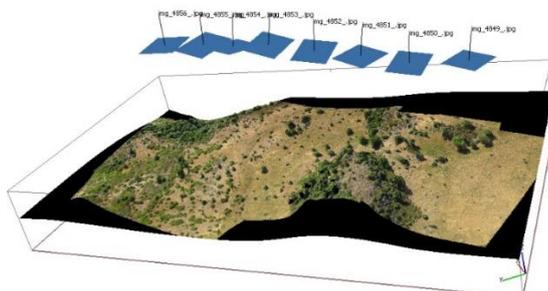


Figura 2.7 – Esempio di strisciata fotogrammetrica (<http://www.geotecnologie.unisi.it>)

- Laser Scanner (terrestre, aereo e satellitare): consente l'acquisizione, ad altissima velocità, di centinaia di migliaia di punti che definiscono la superficie degli oggetti circostanti. Può essere considerato come un distanziometro laser motorizzato ad elevata automazione. Il principio su cui si basa è il calcolo del tempo di volo di un impulso laser, ossia l'intervallo di tempo che intercorre tra l'impulso trasmesso e l'impulso ricevuto, che consente di individuare la distanza di ogni singolo punto rilevato. A seconda delle metodologie di rilievo, si può distinguere in:
 - Laser scanner terrestre;

- Laser scanner aereo;
- Laser scanner satellitare.



Figura 2.8 – Laserscanner (<http://www.spar3d.com/>)

Le precisioni dipendono dal tipo di strumento e dalla distanza di acquisizione e arrivano anche sotto il cm per distanze inferiori ai 300m.

- GNSS (solitamente utilizzato per rilievi di grandi dimensioni): consente la misura della posizione di un punto in un sistema di riferimento globale. Le precisioni dipendono dal tipo di rilievo e dal tempo di acquisizione (verrà affrontato più in dettaglio nel successivo capitolo).
- Strumentazioni non strettamente topografiche:
- Livelli zenitali: hanno un funzionamento analogo ai livelli tradizionali “orizzontali”; la differenza principale consiste nel fatto che la linea di mira, come dice il nome, è zenitale cioè verticale. Inoltre non viene utilizzata una stadia per la lettura dei dislivelli, ma il segnale rimbalza su un apposito prisma riflettente, solitamente montato sulla sommità dell’edificio.

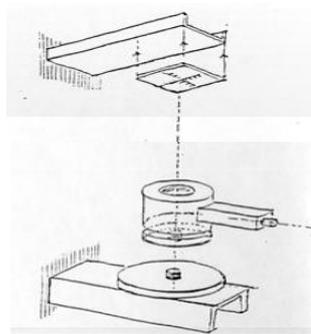


Figura 2.9 - Livello zenitale

- Filo a piombo dritto: consente la misura di spostamenti relativi a punti posti a una diversa quota, inizialmente allineati lungo la stessa verticale. Tale strumento è costituito da:
 - Sistema aggancio superiore;
 - Piastra guida;
 - Filo (di nylon);
 - Attacco inferiore al peso (circa 30 kg);
 - Smorzatore ad olio.

Attualmente sono disponibili fili a piombo laser, dispositivi elettronici con il puntamento a laser che presentano vantaggi di rapidità e praticità, e che non richiedono l'uso di filo flessibile.

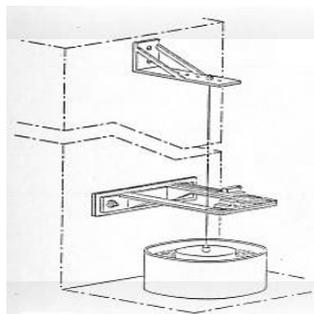


Figura 2.10 - Filo a piombo dritto

- Filo a piombo rovesciato: si tratta di un filo a piombo che funziona al rovescio e cioè come un galleggiante ancorato in basso. Le dighe sono il tipo di manufatto sul quale viene più frequentemente usato, a causa delle deformazioni che subiscono durante l'invaso e lo svaso.

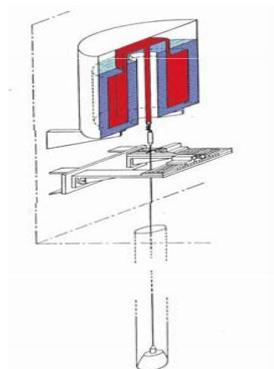


Figura 2.11 - Filo a piombo rovesciato

In questo caso il pendolo rovescio può essere osservato al suo culmine e si possono misurare i piccoli movimenti del coronamento (cioè la parte più alta

del manufatto) rispetto al piano di fondazione, o addirittura rispetto al più profondo letto roccioso su cui è posata. La vasca che contiene il galleggiante è ripiena di un liquido (olio siliconico) con una viscosità maggiore dell'acqua e che serve da smorzatore. I micro movimenti del filo sulla testa del pendolo vengono osservati mediante sistemi di rilevazione automatica che inviano regolarmente le loro letture ad una centralina di registrazione e controllo.

- Estensimetri: sono sensori che rilevano deformazioni meccaniche trasformandole in variazioni di resistenza. Esso è costituito da un elemento sensibile (di materiale metallico o semiconduttore), la cui resistenza varia a seguito di deformazioni, a causa di variazioni della geometria. In generale, quando la distanza tra i due punti è dell'ordine di pochi metri, si utilizzano gli estensimetri a barra; invece con distanze significative (superiori a 5 metri) si utilizzano quelli a filo. Gli estensimetri a barra possono essere:
 - Monodirezionali;
 - Bidirezionale;
 - Tridirezionali.



Figura 2.12 - Estensimetro

- Fessurimetri: sono strumenti costituiti da due parti che si posizionano a cavallo della fessura da monitorare e che possono scorrere reciprocamente.

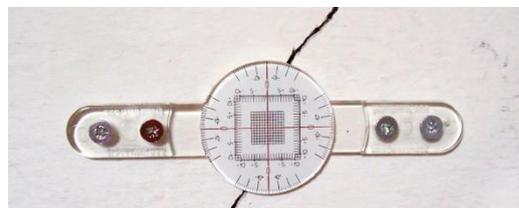


Figura 2.13 - Fessurimetro

Nella zona di sovrapposizione si realizza un reticolo con maglia di 1 mm su cui, mediante l'indice fisso, è possibile leggere con incertezze di inferiore al mm. Tali strumenti possono essere di vario tipo:

- Fessurimetri lineari;
 - Fessurimetri elettrici;
 - Misuratori di giunto monoassiali;
 - Misuratori di giunto elettrici.
- **Inclinometri:** sono strumenti elettronici finalizzati al controllo della deviazione laterale. Lo schema dello strumento è semplice, infatti è costituito da un tubo guida che viene infisso nel terreno sino alla profondità che si desidera indagare; all'interno del tubo guida scorre un sensore eccitato dalla forza di gravità che, generando un segnale, comunica alla centralina di controllo il valore dell'angolo α formato tra l'asse del tubo con la verticale. Gli inclinometri sono disponibili in diverse tipologie e configurazioni:
- Tubi inclinometrici;
 - Inclinometri direzionali;
 - Inclinometri biassiali
 - Clinometri fissi o removibili;

Il problema principale di questi sistemi, basati su sensori elettronici, è la deriva che subiscono le misurazioni; è necessario quindi effettuare delle calibrazioni frequenti.



Figura 2.14 – Inclinometri di bassa e alta fascia

- **Accelerometri:** si basano sulla rilevazione dell'inerzia di una massa quando viene sottoposta ad un'accelerazione. La massa viene sospesa ad un elemento elastico, mentre un sensore ne rileva lo spostamento rispetto alla struttura fissa del dispositivo. In presenza di un'accelerazione, la massa si sposta dalla propria posizione di riposo in modo proporzionale all'accelerazione rilevata.

Il sensore trasforma questo spostamento in un segnale elettrico che viene acquisito dai moderni sistemi di misura. Possono essere:

- Monodirezionali;
- Bidirezionale;
- Tridirezionali.

Si possono inoltre distinguere in:

- Accelerometri piezoelettrici, cioè sfruttano, come principio per la rilevazione dello spostamento della massa, il segnale elettrico generato da un cristallo piezoelettrico quando è sottoposto ad una compressione;
- Accelerometri capacitivi, cioè sfruttano, come principio per la rilevazione dello spostamento della massa, la variazione della capacità elettrica di un condensatore al variare della distanza tra le sue armature.

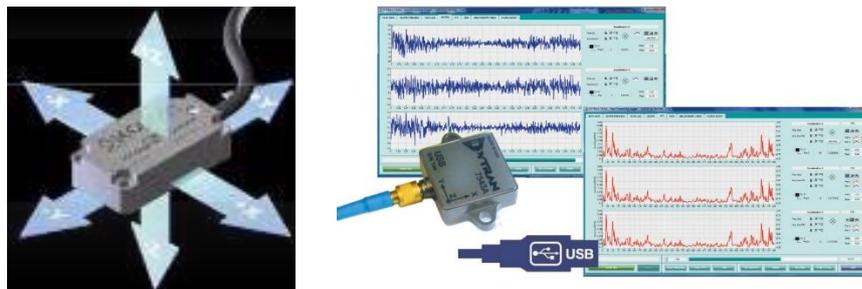


Figura 2.15 - Accelerometro

3. La tecnologia GNSS

3.1. Breve introduzione

A partire dagli anni '80 sono disponibili nuove tecniche per il posizionamento, basate sull'emissione di segnali in radiofrequenza da parte di una costellazione di satelliti artificiali. Sebbene in questi ultimi anni, la costellazione satellitare sia stata principalmente identificata con quella americana, si sta assistendo ad un'evoluzione continua dei sistemi. Con l'attivazione della costellazione GALILEO e l'ammodernamento del sistema GLONASS e GPS ci si sta dirigendo ad una concezione più ampia del rilievo stesso tanto che sembra anacronistico parlare di rilievo GPS in luogo di un più appropriato rilievo definito come GNSS (Global Navigation Satellite System).

Con il trascorrere del tempo, le reti di stazioni permanenti GNSS, sono diventate sempre più un valido supporto alle tecniche di rilevamento. Infatti tale sistema ha rivoluzionato il rilievo, tanto da costituire un'alternativa ai metodi tradizionali e rappresenta uno dei principali strumenti di indagine geodetica.

3.1.1. Diffusione del GNSS per rilievi di precisione

Il mercato GNSS può essere suddiviso in tre grandi categorie: commerciale, non commerciale e militare. Le applicazioni della tecnologia GNSS si stanno rapidamente sviluppando nei settori commerciali e non; l'*European GNSS Agency* (EGSA) ha stimato che il numero di dispositivi utilizzati aumenterà di oltre tre volte nel giro di una decina di anni, passando dai quasi tre miliardi di unità del 2013, fino ad arrivare agli oltre nove miliardi del 2023, ovvero quasi un ricevitore per ogni persona.

Attualmente la tecnologia GNSS può essere applicata per aumentare la produttività, consentendo benefici economici che comprendono il risparmio su tempi e addirittura la sostituzione della componente umana, come per esempio nel caso di veicoli a guida autonoma utilizzati in diversi ambiti. (EGSA 2015)

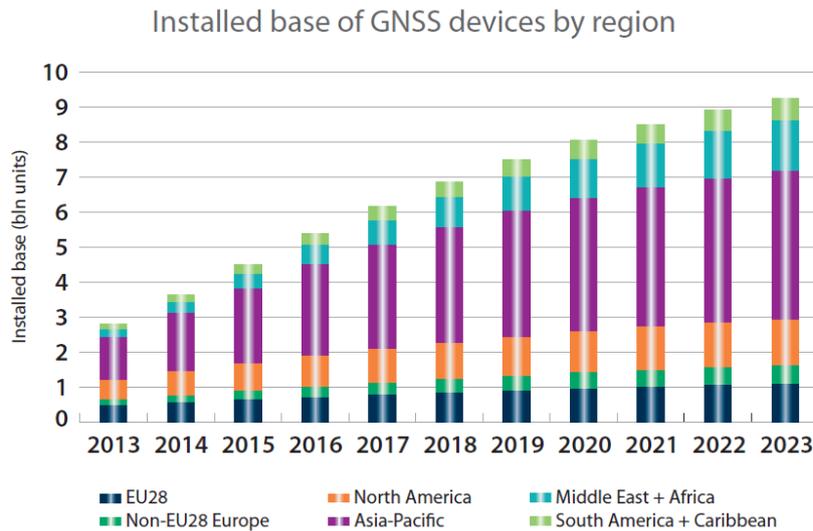


Figura 3.1 – Ricevitori GNSS installati per Regione (GNSS Market Report. – issue 4)

Lo sviluppo di questo mercato ha permesso la diffusione del posizionamento satellitare in vari settori. A prevalere sono i servizi basati sulla localizzazione (LBS: Location-Based Service), accessibili tramite i dispositivi mobili quali *smartphone*, che rappresentano oltre il 50% del mercato, a seguire si trovano i servizi di navigazione stradale, con quasi il 40%, infine la restante parte del mercato è suddivisa in piccole parti, tra le quali i servizi per l’aviazione (1%), il trasporto su rotaia (0.2%), la sincronizzazione temporale (0.1%), il rilievi (4.5%) e i servizi per l’agricoltura (1.9%).

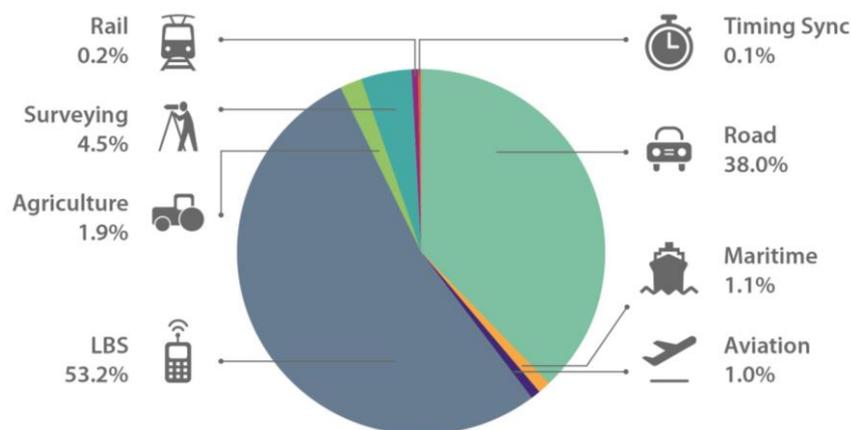


Figura 3.2 – Impiego dei sistemi GNSS nei diversi settori (GNSS Market Report. – issue 4)

Le applicazioni in ambito di rilevamento sono state tra le prime ad adottare la tecnologia GNSS, che è risultato un valore aggiunto perché complementare alle altre differenti tecniche di rilievo, come il rilievo tradizionale con Total Station, la fotogrammetria o il rilievo Lidar con Laser Scanner.

Le principali applicazioni geodetiche comprendono:

- Rilievi catastali: hanno lo scopo di stabilire i confini delle proprietà. Le politiche fiscali, come la tassazione sui terreni, fanno molto affidamento su questa misurazione.
- Rilievi di Costruzioni: ricoprono le diverse fasi di costruzione di un edificio o di un progetto di ingegneria civile. Inoltre, le applicazioni GNSS al controllo delle macchine automatizzano le attività di costruzione.
- Mapping: il GNSS è utilizzato per definire la posizione di specifici punti di interesse ai fini cartografici, ambientali e della pianificazione urbana.
- Estrazione: il rilievo all'interno di miniere coinvolge misurazioni e calcoli in ogni fase di sfruttamento della miniera stessa, tra cui il controllo della sicurezza.
- Rilievi marini: comprendono una vasta gamma di attività, tra cui l'esplorazione dei fondali, la modellizzazione delle maree e delle correnti, rilievi offshore i cui risultati sono importanti per la navigazione marittima.

È da sottolineare come la riduzione dei prezzi dei ricevitori GNSS, graduale e costante negli ultimi 20 anni, ha reso più accessibile la strumentazione rendendola competitiva rispetto ad altre tipologie di strumentazione. Inoltre, è aumentato il livello di precisione grazie a vari fattori, tra i quali: il miglioramento dei modelli atmosferici e di calibrazione delle antenne, la copertura sempre più ampia di satelliti (grazie all'introduzione di Galileo), il miglioramento della precisione dei prodotti GNSS (effermeridi e clock) resi disponibili dagli enti preposti (Kouba 2009). Quest'ultimo fattore è confermato dai risultati pubblicati nel 2012 dall'IGS, in Tabella 3.1, nella quale sono messi a confronto con quelli pubblicati qualche anno prima, è possibile osservare i dati riguardanti la precisione dei differenti tipi di orbite.

GPS Satellite Ephemerides	Accuracy		Latency	Updates	Sample Interval
	2007	2012			
Broadcast	~260 cm	~100 cm	real time	/	daily
Ultra-Rapid (Predicted)	~25 cm	~5 cm	real time	4 times a day	15 min
Rapid	~5 cm	~2.5 cm	17 – 41 hours	daily	15 min
Final	< 5 cm	~2.5 cm	12 – 18 days	weekly	15 min

Tabella 3.1 – Tabella descrizione delle orbite (<http://igschb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>)

3.2. Tipologie di elaborazione

Il progresso tecnologico sempre crescente della strumentazione GNSS e il forte sviluppo di strategie per l'elaborazione dei dati hanno permesso, in particolari condizioni operative, di raggiungere precisioni anche inferiori al centimetro. Attualmente, esistono due differenti approcci per il calcolo dei dati GNSS, che dipendono dal numero di ricevitori che l'utente decide di utilizzare in fase di acquisizione e calcolo dei dati. Nel caso di un solo ricevitore l'approccio che ne deriva è quello non differenziato e nello specifico, se si vogliono ottenere precisioni elevate, il Precise Point Positioning (PPP). Se invece vengono utilizzati più ricevitori contemporaneamente mediante un approccio di rete, il dato GNSS viene elaborato attraverso il più conosciuto metodo differenziato. Allo stesso tempo tali approcci possono essere associati a differenti modalità di acquisizione del dato, che sono essenzialmente riconducibili a diversi schemi di rilievo, i quali dipendono, a loro volta, dalla durata delle sessioni e dalla dinamica dei ricevitori. Tali modalità sono quella statica e quella cinematica, che verranno approfondite nel successivo paragrafo.

3.2.1. Statico – Cinematico

È definita statica la modalità in cui i ricevitori sono tenuti in posizione ferma per un lasso di tempo di almeno mezz'ora e l'incognità del rilievo è la posizione del punto assunta invariante per l'intero periodo di osservazione. Questa modalità consente di ottenere una precisione elevata, anche inferiore al centimetro, in funzione della durata della sessione di acquisizione del dato (Eckl et al. 2001). Inoltre, occorre sottolineare che, nell'approccio differenziato, per baseline di lunghezza limitata (<15Km) sono sufficienti ricevitori monofrequenza e sessioni dell'ordine dei 20÷ 30 minuti. Per quelle di media lunghezza (15 ÷ 500 Km) sono invece necessari ricevitori a doppia frequenza (che consentono la modellazione della ionosfera) e sessioni più lunghe, cioè almeno di 1 ora. Infine, per baseline lunghe (> 500 Km) è necessario sostituire il messaggio di navigazione trasmesso con dei valori precisi post-processati, per esempio dall'International GNSS Service (IGS), noti come orbite “*sp3*”.

Un sottogruppo dell'elaborazione in modalità statica è il metodo statico rapido (fast-static), che si differenzia dal precedente per l'arco di tempo di stazionamento, il quale può variare dai cinque ai trenta minuti, anche in funzione del numero dei satelliti in vista e della diluizione della precisione (parametri DOP: Dilution of Precision). La precisione ottenibile è comparabile con la modalità statica, l'unico vincolo è la lunghezza della baseline che non deve superare i 10 km.

La soluzione finale è solitamente ottenuta attraverso le differenze triple che consentono la rimozione degli errori legati agli orologi dei satelliti e dei ricevitori, ma anche l'eliminazione delle ambiguità di fase, che vengono poi calcolate attraverso un procedimento a ritroso, ottenendo così una soluzione chiamata “*fixed*”.

La modalità cinematica si differenzia da quella statica in quanto uno dei due ricevitori (Master) è mantenuto fisso in stazione su un estremo delle baseline, mentre l'altro (Rover) viene spostato sui punti che si vogliono determinare. La precisione raggiungibile è dell'ordine dei centimetri. In questa modalità è però necessaria un'operazione preliminare, prima dall'acquisizione delle misure, che consiste nell'inizializzazione del rilievo, necessaria per la risoluzione delle ambiguità di fase iniziali sulla prima baseline. Se, durante la sessione di lavoro, si verificano cycle-slips, dovuti al tramonto di uno o più satelliti, tali da diminuire, al di sotto di quattro, il

numero dei satelliti ricevuti contemporaneamente dai due apparati, deve essere ripetuta l'inizializzazione. Tale procedura viene eseguita perchè nella modalità cinematica non è possibile ottenere la soluzione per differenze triple, in quanto entrambi i ricevitori non sono tenuti fissi. In alternativa, è possibile effettuare l'inizializzazione direttamente in modalità cinematica attraverso l'impiego di algoritmi denominati on-the-fly (OTF), con i quali si ottiene una posizione approssimata di codice, migliorata successivamente con una stima ai minimi quadrati sequenziali o con l'uso del filtro di Kalman, si osservi però che per il fissaggio dell'ambiguità in modalità OTF il numero minimo di satelliti visibili è cinque e non quattro.

Per ottenere precisioni superiori, mantenendo però il principio di funzionamento precedente, può essere utilizzata la modalità cinematica definita stop-and-go. In questo caso il ricevitore mobile staziona nei punti da determinare per un tempo maggiore rispetto a quello indispensabile per le misure (anche 30 secondi). Ovviamente, anche in questo caso è necessaria prima la procedura di inizializzazione per il fissaggio delle ambiguità.

Infine vi è un'ultima modalità cinematica chiamata RTK (Real Time Kinematic), che consente di ottenere le coordinate dei punti rilevati in tempo reale, con precisione centimetrica. Sono necessari ricevitori a doppia frequenza muniti di apparati radio o GSM, che permettono il collegamento e l'invio delle correzioni dalla stazione master a quella rover.

Un'evoluzione di questa modalità è quella denominata NRTK (Network RTK), nella quale il ricevitore master viene sostituito da una rete di stazioni permanenti che, grazie ad un centro di controllo, inviano una serie di correzioni che l'utente può scegliere tra:

- NEAREST l'utente riceve la correzione dalla stazione più vicina;
- VRS (Virtual Reference Station) il software NRTK genera una correzione calcolata in base alla posizione del Rover; emula infatti una stazione, detta per questo virtuale, posta in prossimità dell'utente;
- FKP (Flachen Korrektur Parameters) il software NRTK genera una correzione calcolata in base alla posizione del Rover, con parametri di correzione medi calcolati per interpolazione tra le stazioni circostanti della rete;
- MAC (Master-Auxiliary Concept) il software NRTK genera una correzione calcolata in base ai dati di una stazione assunta come master (di solito la più

- vicina all'utente), corretti in base ai dati di altre stazioni della rete considerate ausiliarie;
- DGPS servizio di correzione di solo Codice per ricevitori portatili ad uso GIS (Geographic information system).

3.2.2. Approccio differenziato VS

Approccio non differenziato (PPP)

L'approccio differenziato, come detto in precedenza, prevede l'acquisizione contemporanea da due o più ricevitori dei dati GNSS e in particolar modo delle frequenze portanti. In questo modo si possono ottenere precisioni elevate, che con l'utilizzo del solo codice non sarebbe possibile. Questo perché si va ad operare su un segnale di lunghezza d'onda molto inferiore (19 cm per la fase L1 o 24 cm per la fase L2 anziché 30 m sul codice P o 300 m sul codice C/A).

L'osservazione di fase è ottenuta misurando lo sfasamento tra il segnale della portante proveniente dal satellite, demodulato dai codici sovrapposti, e la replica dello stesso generato dal ricevitore. Agganciato il segnale del satellite, il ricevitore registra anche il numero intero di lunghezze d'onda che cambia in funzione del movimento relativo tra il satellite ed il ricevitore, memorizzando la variazione della distanza ricevitore-satellite dall'inizio dell'acquisizione del segnale.

Inoltre utilizzando strumenti che lavorano in doppia frequenza, è possibile eliminare l'effetto di alcuni sistematismi che perturbano le soluzioni, attraverso algoritmi di differenziazione delle osservazioni e combinazioni lineari delle portanti.

Un valida alternativa ai metodi differenziati per le applicazioni di alta precisione è il Precise Point Positioning (PPP) che utilizza le osservazioni di un unico ricevitore satellitare (sia l'osservabile di fase che di codice), e sostituisce il messaggio di navigazione trasmesso con valori precisi post-processati, per esempio dall'International GNSS Service (IGS) o dalla JPL. Il PPP è molto conveniente poiché non vi è alcun bisogno di dati da stazioni permanenti GNSS locali o regionali e, utilizzando appropriati modelli funzionali e stocastici, la precisione potenziale è comparabile con i metodi differenziati. L'approccio di calcolo PPP è stato introdotto

inizialmente per applicazioni statiche (Zumberge & Heflin 1997), ma negli ultimi anni è stato modificato per lavorare anche in applicazioni cinematiche (Kouba and Héroux, 2001), dove è possibile raggiungere precisioni centimetriche.

Nel posizionamento PPP, gli errori comuni non possono essere eliminati, ma solamente modellati. I principali sono ad esempio i fenomeni geofisici, come il moto delle placche tettoniche e le maree terrestri, gli effetti di troposfera e ionosfera ed altri errori insiti nel tipo di misura effettuata, legati sia al satellite che al ricevitore quali l'errore dell'orologio o la variazione del centro di fase. La soluzione in PPP, essendo un metodo non differenziato, richiede quindi che i singoli contributi di errore vengano stimati (Witchayangkoon, 2000). Ipotizzando di disporre di un ricevitore GNSS a doppia frequenza, è possibile considerare come osservazione, la combinazione iono-free, in maniera da ridurre l'effetto legato alla ionosfera.

La stima del gradiente troposferico è vantaggiosa sia per il posizionamento GNSS che per la stima del ritardo troposferico (Bar-Sever et al., 1998). Inoltre è possibile applicare il modello di Saastamoinen per modellare il ritardo idrostatico nello zenit (Saastamoinen 1972) e differenti funzioni mappanti della troposfera come la Niell Mapping Function (Niell, 1996) e la Vienna Mapping Function (Kouba, 2008).

Il vettore sconosciuto nell'elaborazione in PPP include:

- tre parametri delle coordinate di posizione
- un parametro di offset dell'orologio del ricevitore
- un parametro della componente umida del ritardo troposferico zenitale
- due parametri del gradiente troposferico
- i termini float delle ambiguità nelle combinazioni iono-free (pari al numero di satelliti utilizzati nella stima).

3.2.3. Software di elaborazione dati

Esistono numerosi software per l'elaborazione dei dati GNSS, che si differenziano in base al tipo di approccio di calcolo ma anche in base alla categoria di utenti che ne usufruiscono.

Si va infatti da software commerciali, utilizzati per lo più da professionisti per il calcolo di reti per l'esecuzione di rilievi tecnici, fino ad arrivare ai software scientifici

che sono utilizzati in ambito di ricerca e dagli enti preposti alla definizione dei sistemi di riferimento. Quest'ultimi permettono di avere gradi di flessibilità più alti sull'impostazione dei modelli e degli approcci di calcolo, ma sono meno immediati nel loro utilizzo. Negli ultimi anni sono però in ascesa alcuni software *open-source*, creati in ambito scientifico, grazie ai quali è possibile ottenere prestazioni equiparabili a quelli commerciali.

Di seguito si riporta una breve introduzione ai principali software di calcolo scientifici, commerciali e *open-source* attualmente disponibili. Molti di questi sono stati utilizzati nel presente elaborato di tesi.

3.2.3.1. Software Scientifici

GIPSY

Gipsy–Oasis II è un pacchetto software sviluppato al Jet Propulsion Laboratory (JPL, NASA), verso la fine degli anni novanta, che utilizza come approccio di calcolo il Precise Point Positioning. La posizione è determinata utilizzando osservazioni di fase e di codice e le orbite precise, fornite dal repository del JPL, sono caratterizzate da una precisione centimetrica. Tali orbite sono disponibili in due differenti tipologie: orbite fiduciali e non fiduciali. Le prime sono calcolate vincolandole al sistema di riferimento globale dato dalle stazioni a terra, mentre le seconde sono calcolate senza vincoli.

Nel repository sono anche contenuti molti altri tipi di file necessari all'elaborazione di Gipsy, tra cui i file *wlpb* che consentono la risoluzione delle ambiguità di fase iniziali (Bertiger et al. 2010). Ricorrendo ad adeguati modelli di correzione si riduce l'influenza sul posizionamento di una serie di fattori, quali: gli effetti relativistici, gli effetti sistematici dovuti allo spostamento del sito (movimenti delle placche tettoniche, maree terrestri solide, oceaniche e polari, ecc.) e gli errori legati all'assetto del satellite (offset tra centro di massa del satellite e centro di fase dell'antenna, progressivo aumento della fase dovuto alla rotazione relativa tra le antenne del satellite e del ricevitore). Gli altri sistematismi, quali i ritardi di propagazione del segnale in atmosfera, vengono invece stimati durante la fase di elaborazione dati: la troposfera viene calcolata imponendo un random walk e un gradiente per la componente umida, inoltre è possibile applicare un modello troposferico tra la Niell Mapping Function

(Niell, 1996) e la VMF-1 (Kouba, 2008). La ionosfera è possibile stimarla attraverso il modello al secondo ordine International Reference Ionosphere Model (Kedar, 2003). Le soluzioni finali saranno nello stesso sistema di riferimento delle orbite, per cui se sono state utilizzate orbite fiduciali si avranno soluzioni inquadrare globalmente nel sistema IGB08. Se invece si ha a disposizione una rete di stazioni permanenti, è possibile inquadrare regionalmente la soluzione, che in questo caso dovrà essere calcolata senza vincoli con le orbite fiduciali. Questa scelta porta a un notevole miglioramento della dispersione della soluzione (Gandolfi et al., 2015).

BERNESE

Il Bernese è un software scientifico di alta precisione per l'elaborazione in post-processing di dati GNSS, sviluppato dall'Istituto Astronomico dell'Università di Berna (AIUB). È utilizzato dal Centro per la Determinazione delle Orbite in Europa (CODE) per le loro attività internazionali (IGS) ed europee (EUREF/EPN). Il software è in continuo sviluppo e miglioramento e attualmente è rilasciata la versione 5.2. È disponibile su tutte le principali piattaforme (Unix, Mac, Windows) ed è composto da GUI facili da utilizzare assieme ad un sistema di aiuto in HTML. Il pacchetto ha grande flessibilità derivante da una progettazione modulare che consente inoltre elaborazioni in parallelo.

Il Bernese permette una serie di operazioni a partire dall'analisi preliminare del file RINEX che comprende la verifica del marker name, del tipo di antenna e del radome e le relative correzioni del centro di fase. Inoltre ha un sistema automatico di esclusione delle stazioni nelle quali vi è un cambiamento della strumentazione. Terminata la fase di analisi del dato, segue quella di pre-processing, che comprende:

- il rilevamento delle incongruenze tra codice e fase relativi all'orologio del ricevitore
- la determinazione dei numeri di frequenza GLONASS sconosciuti
- la selezione delle baseline che favoriscono la risoluzione delle ambiguità
- l'individuazione e ripristino di interruzioni nell'acquisizione del segnale (Cycle Slip) eliminando outlier ed inserendo nuove ambiguità una volta riscontrate interruzioni significative
- la rimozione dei satelliti con elevati problemi.

La terza fase è relativa alla risoluzione delle ambiguità, la quale è raggiungibile mediante l'applicazione di diversi algoritmi che operano a seconda della lunghezza della baseline. Successivamente viene eseguito il processamento vero e proprio, calcolando la soluzione della rete con le doppie differenze (Dach et al. 2015) attraverso lo script RNX2SNX oppure utilizzando il Precise Point Positioning. La stima delle coordinate delle stazioni si ottiene quindi utilizzando la combinazione lineare L3 ad ambiguità fissate, il modello della ionosfera, tra cui le correzioni di ordine superiore, la funzione mappante a scelta tra VMF1 o GMF/GPT, il modello di ocean loading, i modelli di calibrazione assoluta del centro di fase delle antenne. In questo modo si ottiene la stima dei parametri troposferici per ogni stazione e per ogni ora del giorno. Nell'ultimo step viene infine definito il datum geodetico, inquadrando le soluzioni a partire da un set di coordinate note in un certo frame, come ad esempio l'ITRF08.

GAMIT e GLOBK

GAMIT e GLOBK formano una suite completa di programmi per l'analisi e l'elaborazione dei dati GPS con lo scopo principale di studiare le deformazioni crostali. Il software è stato sviluppato dal MIT (Massachusetts Institute of Technology), Scripps Institution of Oceanography, e l'Università di Harvard, con il sostegno della National Science Foundation. Il software può essere ottenuto gratuitamente da università ed enti pubblici per scopi non-commerciali.

GAMIT è la raccolta di programmi in grado di elaborare dati di fase, per stimare le posizioni relative tridimensionali delle stazioni a terra e le orbite dei satelliti, i ritardi atmosferici zenitali e i parametri di orientamento terra (EOP). Il software è progettato per funzionare in qualsiasi sistema operativo UNIX.

GLOBK è invece una suite che utilizza un filtro di Kalman per combinare diverse soluzioni geodetiche come il GPS, VLBI (Very Long Baseline Interferometry) (Beasley et al. 1995), e SLR (Satellite Laser Ranging) (Christodoulidis & Smith 1983). Accetta come dati, o "quasi-osservazioni", le stime e le matrici di covarianza per le coordinate della stazione, i parametri di orientamento della terra, i parametri orbitali e le posizioni di origine generate dall'analisi delle osservazioni principali. Le soluzioni di input sono generalmente eseguite con basse incertezze a priori, assegnate a tutti i

parametri globali, in modo che i vincoli possono essere applicati uniformemente alla soluzione combinata.

È possibile eseguire ogni modulo separatamente o in batch e quest'ultima soluzione è preferibile in quanto più efficiente, perché consente di risparmiare tempo in fase di calcolo.

La tipica procedura di calcolo prevede l'utilizzo di osservazioni di fase acquisite nell'arco delle 24 ore (sessione giornaliera), con un passo di campionamento di 30 secondi. L'uso di questo tipo di osservabili consente di raggiungere, nella stima delle posizioni, precisioni dell'ordine del millimetro, ma in fase di calcolo si impone la stima di ulteriori parametri, come le ambiguità di fase e i salti di ciclo (Teunissen and Kleusberg 2012). Le soluzioni saranno riferite nello stesso sistema delle orbite utilizzate in fase di calcolo, per cui andrà eseguito l'inquadramento attraverso il pacchetto Glog (Herring et al. 2015) mediante una trasformazione di similarità, utilizzando un numero di parametri da un minimo di 3 ad un massimo di 14, secondo le indicazioni dell'utente.

3.2.3.2. Software Commerciali

TRIMBLE TOTAL CONTROL

Trimble Total Control è un pacchetto software per l'elaborazione di dati GNSS e di dati provenienti da un rilievo topografico con total station. È realizzato dalla Trimble Navigation, una delle maggiori società a livello globale che si occupano di strumenti per la geomatica. L'interfaccia grafica è composta da una finestra all'interno della quale si trovano: la barra del menu, la barra di progetto, la barra di elaborazione e visualizzazione planimetrica del rilievo. È un software user-friendly semplice da utilizzare e gestire, ma purtroppo non è più stato sviluppato e aggiornato, per cui ci sono una serie di banchi in quanto il programma è ormai datato. Tra questi il fatto di non poter inserire le orbite precise GLONASS visto che TTC richiede in input solo orbite precise non compresse (sp3a), non disponibili o convertibili per la costellazione russa. L'elaborazione viene eseguita importando le osservazioni e le effemeridi, fissando le coordinate di una o più stazioni master e selezionando i parametri di elaborazione tra: frequenza (L1, L2, LC), modello delle antenne (Trimble Calibration,

US National Geodetic Survey, Institute for Geodesy Absolute Calibration), angolo di cut-off, approccio di calcolo (Statico, OTF, Stop & Go, GPS differenziale, GPS differenziale smoothed, Super smoothed, GIS), modello troposferico (Goad & Goodman, Hopfield classico, Yionoulis, Lanyi, Davis, Saastamoinen, Black, Niell). Inoltre TTC consente anche la compensazione del rilievo 1D, 2D o 3D nella quale è possibile scegliere la tipologia tra compensazione libera, biased e nazionale biased.

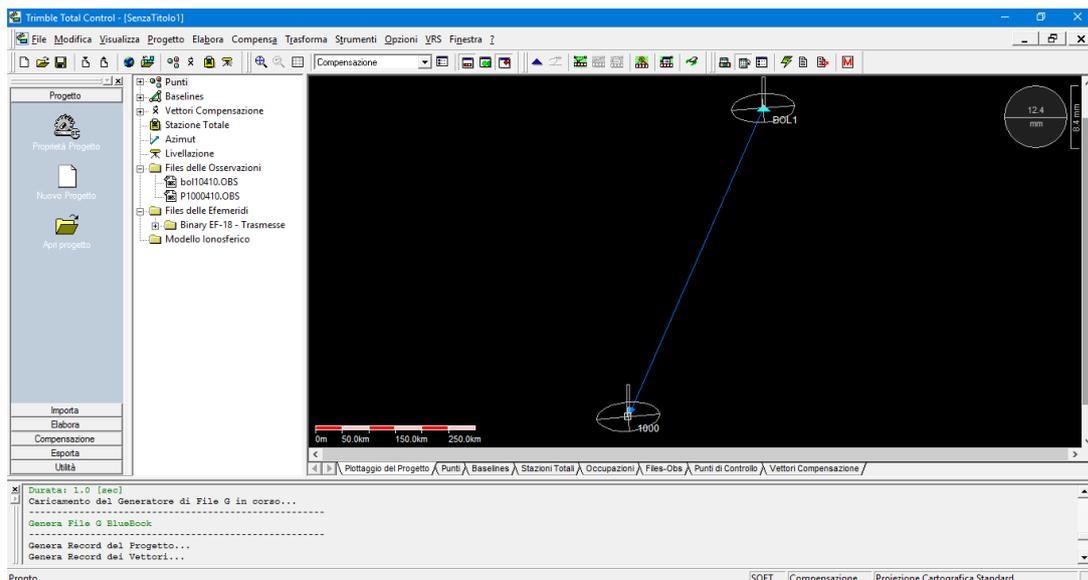


Figura 3.3 - Interfaccia grafica Trimble Total Control

TOPCON TOOLS

Topcon Tools fornisce una potente soluzione software per la post-elaborazione, l'analisi e la compensazione delle reti, con un'interfaccia utente intuitiva e facile da utilizzare. Anch'esso è in grado di elaborare dati provenienti da strumentazione GNSS ma anche da Stazione Totale. Il software include i moduli relativi a: Stazione Totale (con funzioni per l'importazione, la visualizzazione, la compensazione, l'esportazione e la trasmissione dei dati raccolti con stazioni totali), RTK (include funzionalità per l'importazione, la visualizzazione, la compensazione, l'esportazione e la trasmissione dei dati RTK), Post-elaborazione (comprende il motore per la post-elaborazione e la compensazione dati GPS+PP), GIS (per il processamento dati DGPS, una versione leggermente meno precisa e meno sofisticata del modulo GPS+ PP), Progettazione e

Imaging (con funzionalità per lavorare con le immagini, stereocoppie, e sessioni di scansione).

Per quanto attiene l'elaborazione, anche per Topcon Tools sono necessarie le solite operazioni di importazione dei file delle osservazioni e delle effemeridi ma, a differenza di TTC, ha poche opzioni per il processamento selezionabili: l'angolo di cut-off, la costellazione, il calcolo dei parametri DOP, e l'abilitazione del calcolo in cinematico continuo o in stop-and-go. Anche in questo software è possibile eseguire le operazioni di compensazione impostando il livello di confidenza e i criteri di rigetto.

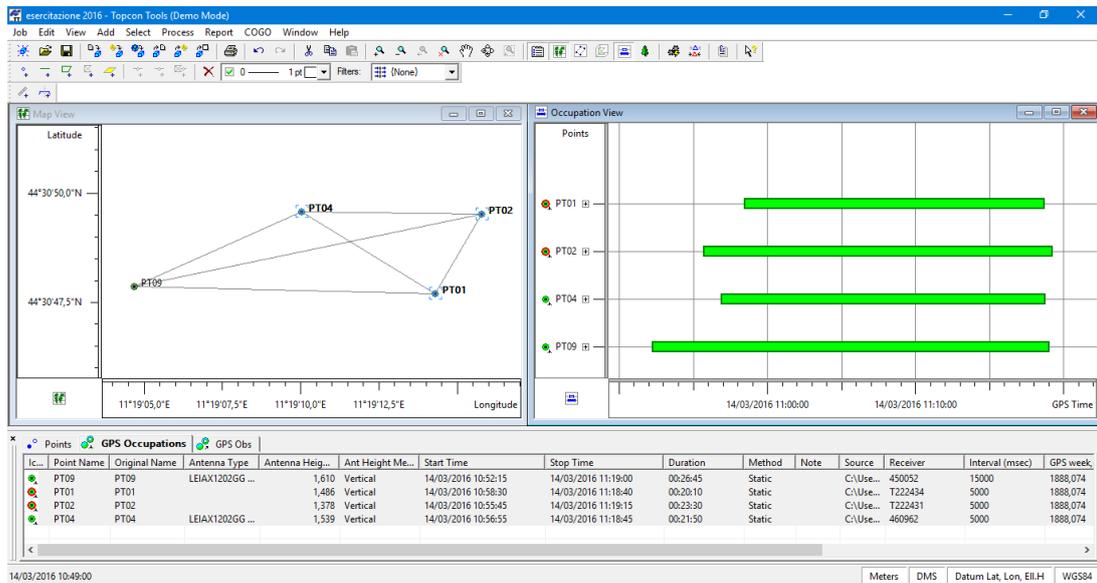


Figura 3.4 - Interfaccia grafica Topcon Tools

3.2.3.3. Software Commerciali per il Monitoraggio

POLIFEMO

Polifemo è un software prodotto dalla Topcon per la gestione del monitoraggio in continuo. E' composto da un'interfaccia di servizio, che esegue il monitoraggio ed invia gli allarmi, e un'interfaccia grafica, che visualizza i risultati numerici e grafici. Il motore di calcolo, ovvero il cuore del sistema, esegue il ciclo di misura, l'elaborazione dei dati e il calcolo degli spostamenti; è inoltre in grado di inviare allarmi, di produrre report automatici ed di esportare i dati ed i grafici in diversi formati. La potente interfaccia grafica permette all'utente la configurazione del progetto e dei sensori, la

visualizzazione del flusso dei dati, dei grafici degli spostamenti e delle misure. Il software permette di gestire nello stesso progetto i dati di tutti i tipi di sensori utilizzati per il monitoraggio. Polifemo consente infatti di interfacciarsi con vari modelli di Stazioni Totali e di monitorare punti, tramite ricevitori GNSS. Inoltre permette di integrare le misure effettuate da altri strumenti, come centralina meteo, inclinometri e sensori tilt.

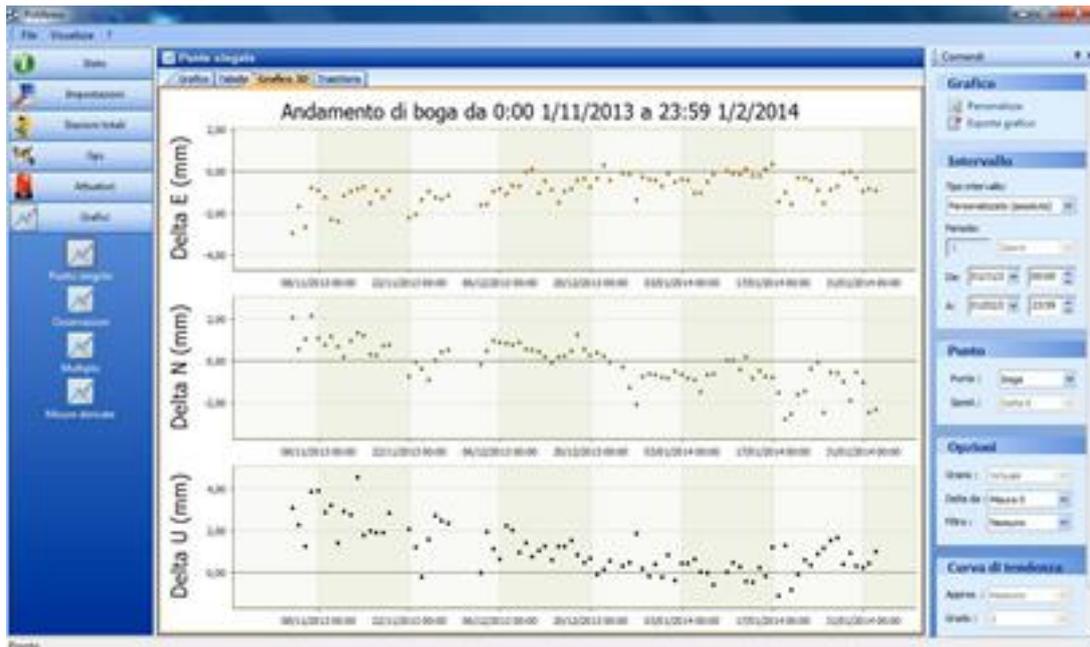


Figura 3.5 - Interfaccia grafica Polifemo

GNSS SPIDER

GNSS Spider è una suite di software integrata per il controllo centralizzato di stazioni permanenti e reti GNSS di riferimento. È modulare e scalabile e può essere adattata per soddisfare vari tipi di rilevamento GNSS, ad esempio per scopi sismici o applicazioni per il monitoraggio strutturale.

La soluzione Spidernet avanzata fornisce una rete NRTK ad alta precisione e a lungo raggio e la distribuzione centralizzata dei dati. Il portale Spider Business center consente la gestione dell'accesso potente e sicuro.

3.2.3.4. Software Open source

RTKLIB

RTKLIB è un pacchetto software open–source per il posizionamento GNSS standard e di precisione creato da Tomoji Takasu (T.Takasu and N.Kubo, 2007). Consiste in una libreria di programmi e una serie di file eseguibili che utilizzano questa libreria. È possibile usare il pacchetto RTKLIB attraverso l’interfaccia grafica o eseguendo le singole CUI APs (eseguibili) attraverso terminale o all’interno di script.

In Figura 3.6 è mostrato il “main program”, chiamato RTKLAUNCH, il quale richiama gli altri eseguibili disponibili nel pacchetto:

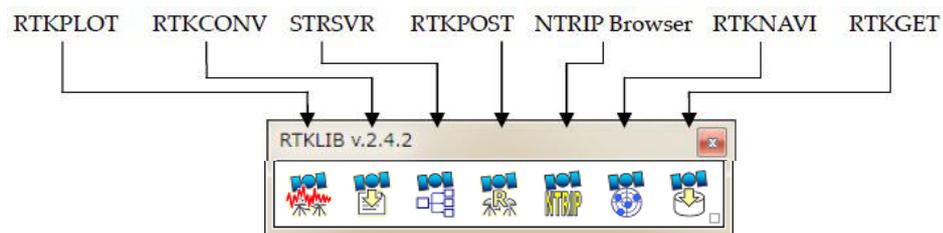


Figura 3.6 - Interfaccia grafica di RTKLIB

RTKPLOT è il modulo per la visualizzazione delle soluzioni di RTKLIB. Consente il plot non solo delle posizioni ma anche delle velocità, accelerazioni, numero dei satelliti, il ground tracking (cioè i movimenti planimetri a terra), e alcuni parametri che caratterizzano la qualità della soluzione, tra cui il DOP, il numero dei satelliti utilizzati e il Signal Noise Ratio. L’utilizzo combinato di TEQC (Estey & Meertens 1999) permette anche il calcolo del quality control.

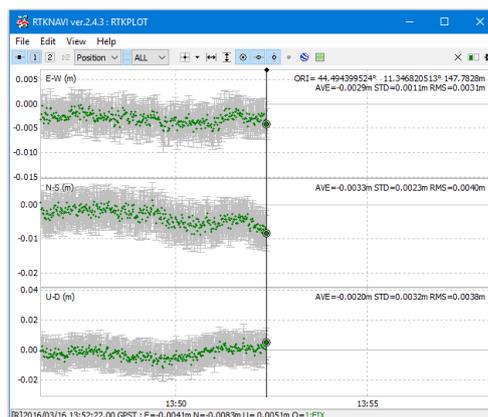


Figura 3.7 - Interfaccia grafica RTKPLOT

RTKCONV è il modulo per la conversione in RINEX (Gurtner, 2013) dei file raw contenenti osservazioni GNSS, anch’esso utilizza TEQC. I file che riconosce sono nei

formati: RTCM 2.0 e 3.0, NovAtel OEM e Superstar II, u-blox, Hemisphere, SkyTraq, Furuno, Javad, NVS, BINEX e RINEX.

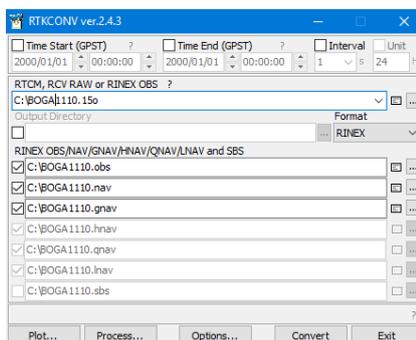


Figura 3.8 - Interfaccia grafica RTKCONV

STRSVR è il modulo che fa da stream server con il quale l'utente può configurare il flusso di dati in input (serial, TCP Client e Server, NTRIP Client, file, FTP, HTTP) e output (serial, TCP Client e Server, NTRIP Client, file).

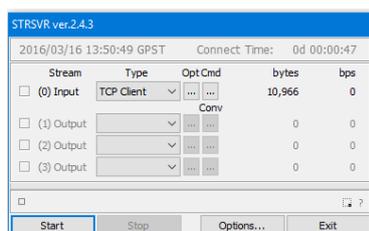


Figura 3.9 - Interfaccia grafica STRSVR

RTKPOST è il modulo per il post processamento dei dati GNSS che necessita in input i file *RINEX* (contenenti le osservazioni ma anche quelli di navigazione e se disponibili anche le orbite precise) e restituisce in output il file delle soluzioni formato “.pos”. È possibile impostare numerose opzioni all'interno di questo programma, a partire dalla modalità di posizionamento, cioè l'approccio di calcolo tra: single point positioning (approccio assoluto), DGNSS (approccio differenziato di codice), statico, cinematico, baseline mobile, rover fisso (approcci relativi di fase), Precise Point Positioning statico e cinematico. Attualmente non è possibile elaborare più punti con approccio di rete. Altre impostazioni selezionabili (in base anche al tipo di approccio scelto) sono: le frequenze da utilizzare (L1, L1+L2, L1+L2+L5), il tipo di filtro (Forward, Backward, Combined), la maschera di elevazione (cioè l'angolo di cut-off), la maschera per il SNR (signal noise ratio), le costellazioni da utilizzare nel calcolo (GPS, GLONASS, Galileo, QZSS, SBAS, BeiDou), le correzioni delle maree terrestri. È possibile impostare una serie di modelli per la correzione della ionosfera: il modello broadcast,

il modello SBAS, la combinazione lineare “iono-free” (solo se vengono utilizzate entrambe le frequenze L1e L2), i parametri ionosferici stimati STEC (contenuto totale di elettroni inclinato), i dati IONEX TEC. Le correzioni della troposfera possono essere invece eseguite attraverso: il modello Saastamoinen, il modello SBAS, la stima dei parametri ZTD (ritardo totale zenitale), stima dei parametri ZTD assieme al

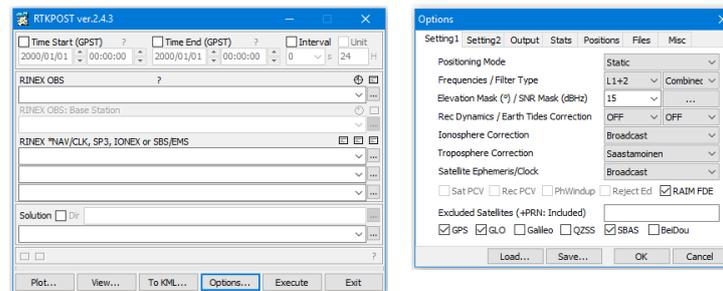


Figura 3.10 - Interfaccia grafica RTKPOST

gradiente orizzontale. È inoltre possibile selezionare la strategia per la risoluzione delle ambiguità di fase, che per la costellazione GPS può essere: stima e risoluzione delle ambiguità intere in maniera statica e continua, stima della ambiguità intere epoca per epoca, risoluzione e stima delle ambiguità intere in maniera continua con il vincolo dei valori risolti. Per il GLONASS, il fissaggio può avvenire solo se i ricevitori (mater e rover) sono dello stesso tipo, in caso contrario si avrebbe un IFB (inter-frequency bias) che non può essere eliminato con le doppie differenze. In alternativa si può utilizzare una auto-calibrazione, in cui i termini di bias inter-channel, vengono stimati come una interpolazione lineare delle frequenze. I file di output contenenti le soluzioni possono contenere a scelta: le coordinate geografiche (lat, lon, h), le coordinate cartesiane geocentriche (X, Y, Z), baseline (E, N, h), il messaggio NMEA0183. Se si vogliono massimizzare le precisioni finali delle soluzioni è possibile inserire in input i file di calibrazione delle antenne (file ATX) e i file contenenti il modello del geode. Le operazioni di post processamento possono essere eseguite anche da terminale o all'interno di script, attraverso il file eseguibile RNX2RTK che rappresenta il “motore” del modulo RTKPOST. Per questo motivo è necessario inserire come argomenti gli stessi parametri elencati in precedenza, che definiscono i file di input e output e il tipo di elaborazione con i vari parametri e modelli da utilizzare. In alternativa è possibile creare un file di testo contenente tutte le configurazioni del programma.

NTRIP Browser è il modulo per la connessione ai server NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) (Weber et al., 2005) che crea un protocollo di interscambio dei dati raw GNSS.

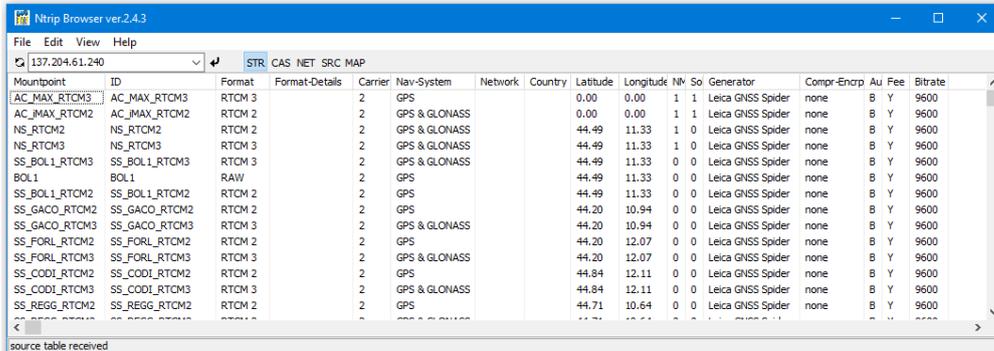


Figura 3.11 - Interfaccia grafica NTRIP Browser

RTKNAVI è il modulo per il posizionamento in tempo reale. Analogamente a RTKPOST è possibile impostare l'approccio di calcolo e i parametri da utilizzare. L'unica differenza riguarda ovviamente i dati in input, che non saranno più i file RINEX, ma un flusso dati in formato a scelta tra: RTCM 2.0 e 3.0, NovAtel OEM e Superstar II, u-blox, Hemisphere, SkyTraq, Furuno, Javad, NVS, BINEX, Trimble RT17. Il flusso di dati può provenire da una delle seguenti strutture: porta seriale, TCP Client, TCP Server, NTRIP Client, file.

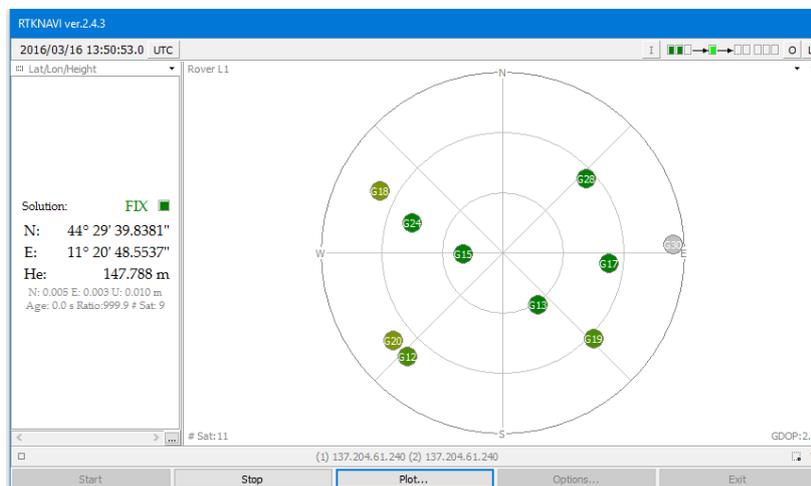


Figura 3.12 - Interfaccia grafica RTKGET

RTKGET è il modulo per il download dei file ancillari necessari all'elaborazione di precisione, come le orbite precise, i file contenenti il clock, i file *atx* contenenti le calibrazioni assolute delle antenne GNSS e molti altri.

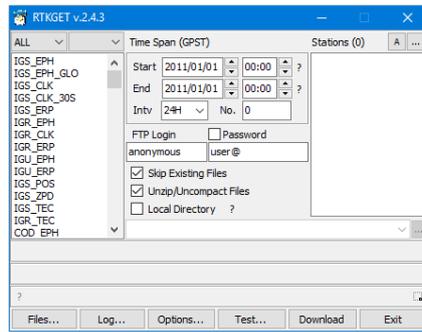


Figura 3.13 - Interfaccia grafica RTKNAVI

GOGPS

goGPS è un pacchetto software open source per il posizionamento satellitare sviluppato in ambiente MATLAB a partire dal 2007 dal Politecnico di Milano, in collaborazione con altre università, con l'obiettivo di fornire una piattaforma collaborativa per scopi di ricerca (Herrera et al., 2015). È stato pubblicato nel 2009 e da allora sono in corso numerosi progetti correlati relativi al suo aggiornamento. L'obiettivo è quello di ricercare strategie per migliorare l'accuratezza di ricevitori a singola frequenza GNSS a basso costo, principalmente attraverso un posizionamento relativo rispetto ad una stazione base e mediante l'utilizzo di una compensazione ai minimi quadrati (LSA), o di un filtro di Kalman esteso (EKF), lavorando direttamente sulla misura di codice e fase.

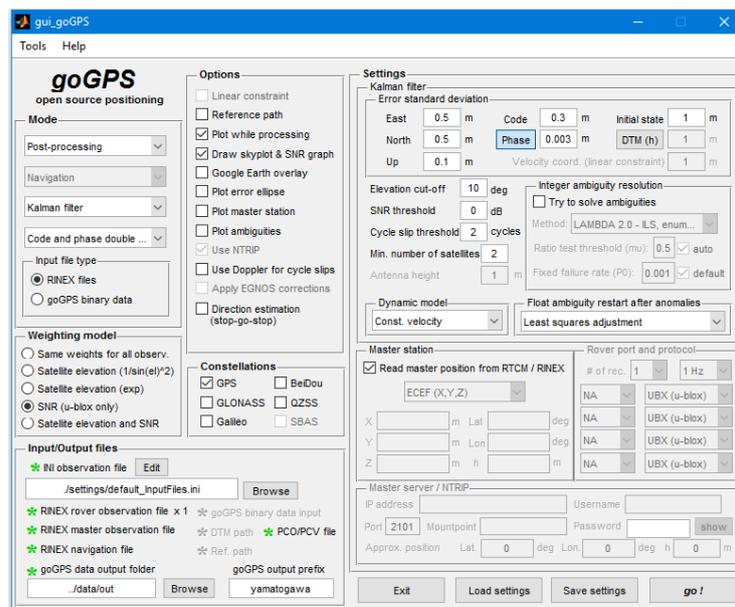


Figura 3.14 - Interfaccia grafica goGPS

L'elaborazione dei dati GNSS può avvenire eseguendo la GUI in Matlab (con il vincolo di poter elaborare un solo file per volta) oppure attraverso uno script che richiede la creazione di un file con le impostazioni del programma (quest'ultima opzione permette di poter elaborare più file). I settaggi che goGPS rende disponibili sono: la selezione della modalità di calcolo (Post-Processing, Tempo Reale), la strategia di miglioramento della soluzione (Filtro di Kalman, Minimi quadrati), le osservabili da utilizzare (codice non differenziato, doppie differenze codice, codice e fase non differenziato, doppie differenze codice e fase), il tipo di file in input (RINEX, file binario formato goGPS), il modello dei pesi (stesso peso per tutte le osservazioni, elevazione dei satelliti, SNR Signal Noise Ratio, elevazione e SNR), la costellazione (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS), le coordinate della stazione master, l'indirizzo e le credenziali del master server NTRIP (nel caso sia selezionata la modalità in tempo reale). Nel caso sia scelto l'EKF come strategia di miglioramento della soluzione, è possibile impostare ulteriori parametri. Tra questi si possono trovare una serie di deviazioni standard (SD) usate come pseudo-osservazione: del modello dinamico del EKF nelle componenti geodetiche (N, E, h), delle osservazioni di codice e di fase, della posizione iniziale del EKF, del modello digitale del terreno (DTM). Inoltre è presente la selezione dell'angolo di cut-off, la soglia del SNR, la soglia dei salti di ciclo, il numero minimo di satelliti, il settaggio per la risoluzione delle ambiguità di fase nel quale può essere scelto uno dei tanti metodi LAMBDA presenti nel programma (ILS enumeration, ILS search and shrink, integer rounding, integer bootstrapping, partial ambiguity resolution), e infine il modello dinamico che può essere a velocità costante, ad accelerazione costante, statico e variabile.

4. Il caso di studio: La torre

Garisenda

4.1. Breve introduzione storica

Uno dei simboli più rappresentativi della città di Bologna sono sicuramente le due torri: la torre degli Asinelli e la Garisenda. Situate all'incrocio tra le vie che portavano alle cinque porte dell'antica cerchia di mura “dei torresotti”, esse fanno parte di circa 180 torri (Figura 4.1), 22 delle quali sono tutt'ora presenti, che caratterizzavano lo skyline della città a partire dal XII secolo. Le torri costituivano allo stesso tempo un sistema di protezione e un simbolo di potere e prestigio sociale per le ricche famiglie bolognesi.

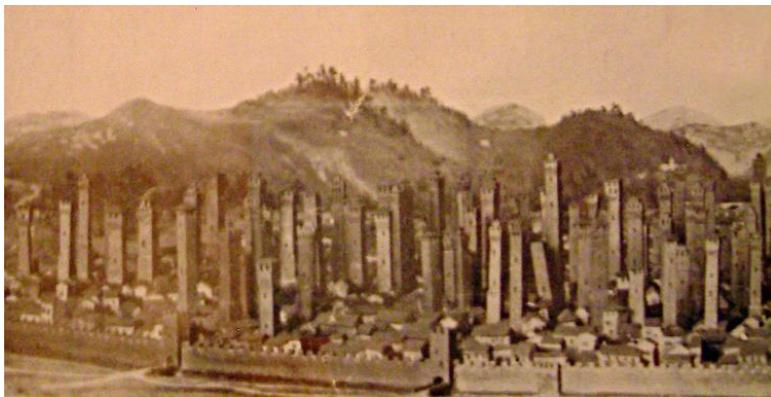


Figura 4.1 – Immagine storica delle torri presenti a Bologna

La torre Garisenda, situata in Piazza Ravegnana, fu costruita contemporaneamente a quella degli Asinelli fra il 1109 e il 1119 e probabilmente avrebbe dovuto raggiungere la stessa altezza. Prese il nome dalla famiglia dei Garisendi, che la fece innalzare. Nel XIV secolo fu realizzata una passerella posta a trenta metri da terra che univa la torre Garisenda con la torre Asinelli. La passerella fu voluta dall'allora duca di Milano Giovanni Visconti, divenuto anche signore di Bologna, per tenere meglio d'occhio il

Mercato di Mezzo (oggi via Rizzoli) e poter sedare per tempo eventuali rivolte. Tale passerella fu distrutta da un incendio (1398).

Nel 1351, arrivata a 61 metri, la torre cominciò ad inclinarsi per un cedimento della fondazione (forse provocato da un terremoto) ed i lavori furono interrotti e anzi venne parzialmente mozzata di circa 13 metri su mandato di Giovanni Oleggio, che governava la città in quell'epoca. Per questo motivo è anche chiamata la torre "mozza".

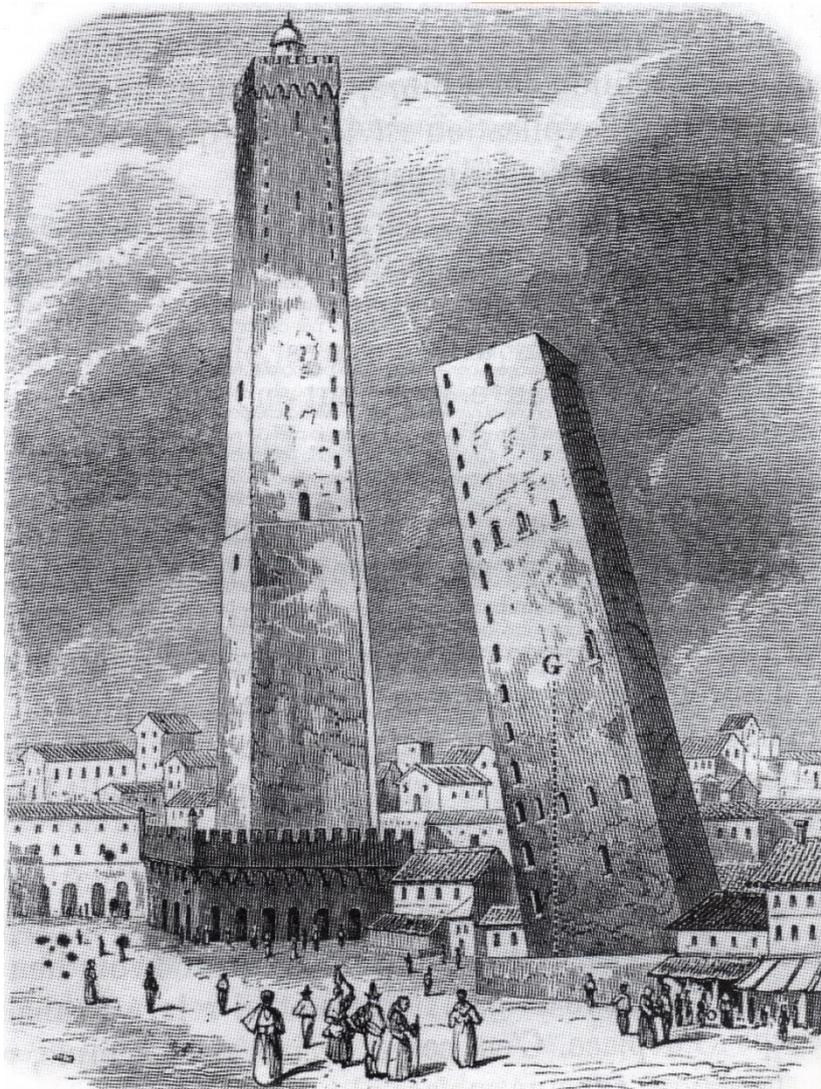


Figura 4.2 - Immagine d'epoca delle due torri di Bologna

Nel secolo XV la torre fu acquistata dalla Corporazione dei Drappieri, che avevano la loro sede proprio di fronte (Palazzo degli Strazzaroli) e che nella piazza antistante

tenevano mercato. Alla base della torre vennero poi costruiti altri edifici a servizio dei venditori e anche una chiesetta intitolata a Santa Maria delle Grazie. Nel 1804, durante il periodo napoleonico, la proprietà della torre passò alla famiglia Ranuzzi a seguito della soppressione delle corporazioni. In questo periodo la torre viene liberata dalle cassette che le erano state addossate e risarcita, alla base, con una nuova zoccolatura in blocchi di selenite. Per vie ereditarie giunse poi alla famiglia Malvezzi Campeggi, che il 27 agosto 1904, la vendettero al barone Raimondo Franchetti. Il nuovo proprietario, la donò poi al Comune di Bologna, che si impegnò a curarne la manutenzione.

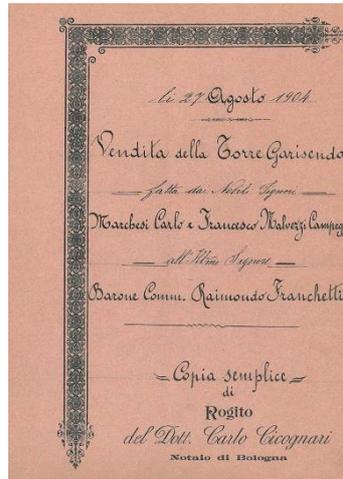


Figura 4.3 – Documento che attesta la vendita della torre Garisenda

4.2. Stato attuale su monitoraggio

Garisenda

La Garisenda oggi è alta 48 m, ha una sezione quadrata di 7.5 m di lato ed uno strapiombo di 3,4 m in direzione Est (Figura 4.4). Fin dai primi anni del '900, il professor Francesco Cavani eseguì numerosi studi riguardanti la pendenza, la stabilità ed i movimenti in sommità della Garisenda (Cavani 1903; Cavani 1917; Cavani 1919). A metà anni ottanta, il Consiglio Comunale di Bologna ha costituito una commissione tecnica col compito di creare un programma d'indagini per verificare e tenere sotto controllo la situazione dal punto di vista strutturale. Tali indagini, eseguite

successivamente al 1993 dal dipartimento DICAM dell'Università di Bologna, comprendono rilievi di livellazione geometrica di altissima precisione, indagini sperimentali con rilievi georadar, carotaggi, endoscopie, prove meccaniche e rilievi fotogrammetrici. Tra il 1998 e il 2000 sono state inoltre eseguite importanti opere di restauro alle superfici murarie esterne e quasi contemporaneamente è stata eseguita una prima fase di consolidamento delle murature.

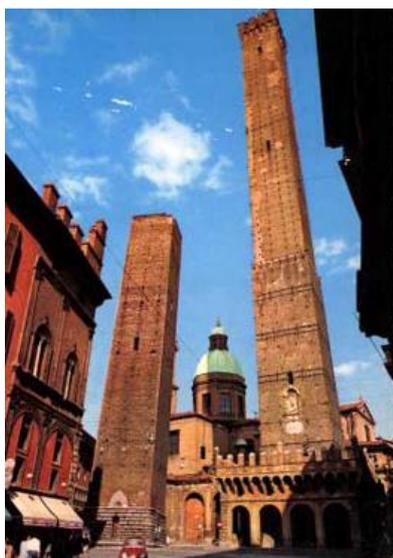


Figura 4.4 - Foto due torri di Bologna: torre Garisenda a sinistra e Asinelli a destra

A fine lavori, nel 2009 è stato installato un sistema di monitoraggio. Ad oggi, il sistema di acquisizione della torre Garisenda è composto da:

- Quattro sensori deformometrici a filo invar posti sulla muratura;
- Cinque sensori deformometrici posti a cavaliere su altrettante lesioni;
- Quattro estensimetri posti sulle cinture metalliche;
- Sei sensori inclinometrici biassiali;
- Tre sensori distanziometrici laser puntati sulla torre Prendiparte, sulla Cupola della chiesa S. Maria della Vita e sulla torre Asinelli;
- Una stazione gonioanemometrica;
- Una stazione meteorologica;
- Due sensori di temperatura.

Più recentemente, a seguito dei sismi che hanno colpito l'Emilia Romagna nel 2012, il Comune di Bologna ha richiesto l'esecuzione di un monitoraggio sismico delle due torri. L'I.N.G.V. è stato quindi incaricato di installare un sistema di monitoraggio

dinamico provvisorio affiancato al sistema permanente sopra descritto. Sono quindi state installate due stazioni sismometriche triassiali in acquisizione continua.

Il monitoraggio ha avuto una durata di circa tre mesi a partire da metà Giugno 2012. I dati hanno fornito una verifica sperimentale dei modelli teorici creati a seguito dei rilievi preliminari ai lavori di restauro statico conclusi nel 2010. Sono state riconosciute ciclicità giornaliere nell'oscillazione che possono essere messe in relazione con l'attività antropica che si svolge nelle vicinanze dei due monumenti. Inoltre, sono state individuate correlazioni fra l'ampiezza delle oscillazioni e l'intensità del vento e sono state riscontrate variazioni, seppur minime, della frequenza di risonanza al variare della temperatura.

5. Aspetto Tecnologico

Una componente di fondamentale importanza in ambito di monitoraggio è la parte hardware e software relativa a:

- Strumentazione GNSS
- Telecomunicazione
- Server di raccolta dei dati.

Senza scegliere adeguatamente ciascuno di questi componenti non sarebbe possibile eseguire correttamente un monitoraggio in continuo.

In questo capitolo verrà descritto inizialmente il problema della trasmissione dei dati GNSS dal sito monitorato al server di archiviazione.

Successivamente verranno indicati gli strumenti GNSS utilizzati nell'ambito di questa sperimentazione ed infine verrà realizzata una breve descrizione del software di gestione e archiviazione dei file delle osservazioni.

5.1. La strumentazione GNSS

Il 2 ottobre 2013, è stato installato dal dipartimento DICAM – sezione geomatica un sistema GNSS sulla torre Garisenda con lo scopo di monitorare il comportamento della struttura. Tale stazione permanente GNSS è stata denominata BOGA.

Il sistema GNSS per il monitoraggio è composto da:

- Un'antenna GNSS ancorata alla struttura tramite l'ausilio di un adattatore in acciaio zincato appositamente progettato (Figura 5.1, a sinistra).

- Un ricevitore GNSS posto nel sottotetto della torre (Figura 5.1, a destra).



Figura 5.1 – Materializzazione della stazione GNSS sulla torre Garisenda

Gli strumenti scelti per la realizzazione del sistema di monitoraggio sono di classe geodetica e fanno parte della serie *Leica System 1200*, strumenti già in possesso del dipartimento.

Nel dettaglio l'antenna è del tipo *Leica AX1202 GG*, mentre il ricevitore è un *Leica GX1230GG* (Figura 5.2 e 5.3) le cui principali caratteristiche sono riassunte nella Tabella 5.1.

GNSS GX 1230 GG	
Tecnologia GPS / GNSS	Smart Track +
Canali	12L1+12L2 GPS 12L1+12L2 WAAS GLONASS/EGNOS
RTK	Si, Smartcheck
Porte	1 porta di potenza, 3 porte seriali, 1 porta controller, 1 porta antenna
Antenna	SmartTrack + AX1202 GG Ground plane incorporato

Tabella 5.1 – Caratteristiche Leica GX1230GG



Figura 5.2 – Antenna Leica LEIAX 1202GG e ricevitore Leica SYSTEM 1230GG

Il ricevitore è stato impostato selezionando la modalità “Reference Station” con la quale vengono inviati pacchetti dei dati GNSS in formato RTCM 3.1 sulla porta di uscita RS232.

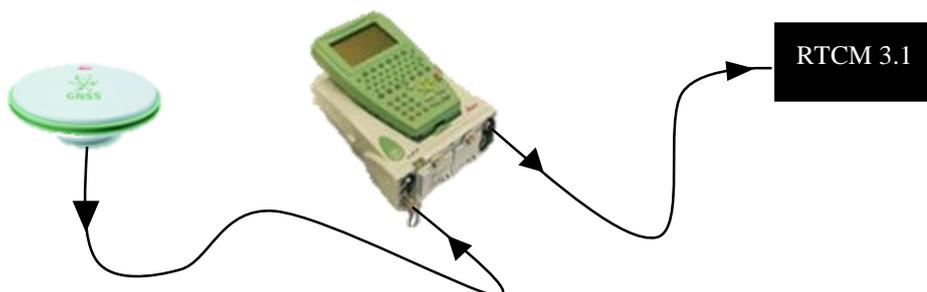


Figura 5.3 - Schema funzionamento ricevitore

La scelta di una strumentazione di classe geodetica non è comunque fondamentale in ambito di monitoraggio in quanto l’aspetto importante è avere uno strumento che consenta di avere in uscita un dato facilmente convertibile nel formato standard *RINEX* (Gurtner 2013). È infatti un argomento di grande interesse la sperimentazione di strumenti monofrequenza lowcost.

5.2. La telecomunicazione

5.2.1. Introduzione al problema dell'invio dei dati

Quando si parla di rilievi GNSS, l'invio dei dati è una fase che spesso viene trascurata o data per scontata in quanto nella maggior parte dei casi non si ha la necessità di inviare dei dati e tanto meno in tempo reale per cui basta semplicemente salvare le osservazioni all'interno della memoria del ricevitore GNSS e, una volta terminato il rilievo, scaricarli comodamente in ufficio. Quando invece si parla di monitoraggio in continuo e in tempo reale è chiaro che non è possibile utilizzare questa strategia. È necessario, infatti, che i dati vengano inviati nella maniera più opportuna in base agli strumenti e alle interfacce di telecomunicazione intese come tipo di connessione disponibile (LAN, WIFI, rete mobile).

5.2.2. Situazione iniziale

La sezione di geomatica del dipartimento DICAM dell'Università di Bologna ha sperimentato una serie di modalità di invio dati in diversi ambiti di ricerca, costituiti per lo più da tesi di laurea al fine di creare una stazione permanente GNSS autonoma. Per tale ragione, le basi di partenza di questo lavoro di tesi sono gli approfondimenti effettuati in precedenti studi (Meffe 2008). Occorre inoltre sottolineare che la strumentazione GNSS attualmente a disposizione al dipartimento è per lo più sprovvista di uscita ethernet, quindi sono necessarie apparecchiature esterne che svolgano la funzione di invio dati. Esistono infatti due differenti condizioni nelle quali è possibile inviare i dati GNSS che dipendono dalla presenza o meno di una connessione via cavo (LAN). Nel caso sia presente, come nella maggior parte dei casi, l'invio dei dati avviene attraverso un'apparecchiatura collegata al ricevitore che svolge la funzione di "serial to TCP/IP" attraverso la porta ethernet, cioè riceve i dati da una porta seriale e li invia in rete utilizzando il protocollo TCP/IP. Nello specifico in queste sperimentazioni è stato utilizzato il Lantronix UDS100. Nel caso invece che non sia

presente una connessione via cavo, l'invio dei dati viene eseguito attraverso un device che esegue le stesse operazioni, ma a differenza del precedente, la connessione e il successivo invio dei dati avviene attraverso un modem GSM. Nella specifica sperimentazione è stato usato il Siemens TC65 (Meffe 2008).

5.2.2.1. Connessione via cavo:

Lantronix UDS 100

Il device port-server Lantronix UDS-100 fornisce un modo rapido, semplice e conveniente per l'accessibilità dei dati e la gestione remota di apparati che necessitano di essere connessi alla rete. Grazie a questo strumento qualsiasi dispositivo provvisto di una porta seriale può essere aggiunto alla rete



Figura 5.4 - Lantronix UDS-100

in pochi passaggi. Utilizzando un metodo chiamato tunneling seriale, l'UDS-100 incapsula dati seriali in pacchetti e li trasporta sulla rete ethernet. Utilizzando due UDS-100, collegati ad una rete, possono essere estese connessioni seriali virtuali in tutto il mondo. Così da poter gestire l'attrezzatura praticamente da qualsiasi luogo tramite Ethernet o Internet.

Il software di configurazione è basato su Windows e semplifica l'installazione e la configurazione. L'UDS-100 può anche essere impostato a livello locale attraverso la porta seriale, o in remoto su una rete utilizzando il comando Telnet o un browser Web. Lo strumento include anche un web server integrato, che può essere utilizzato per la configurazione, o per la risoluzione dei problemi.

In modalità di emulazione modem, l'UDS-100 può essere usato per sostituire i modem dial-up. L'unità accetta comandi AT (standard per la configurazione di modem) sulla porta seriale, quindi stabilisce una connessione di rete al dispositivo finale, sfruttando connessioni di rete e la larghezza di banda per eliminare il modem e linee telefoniche dedicate.

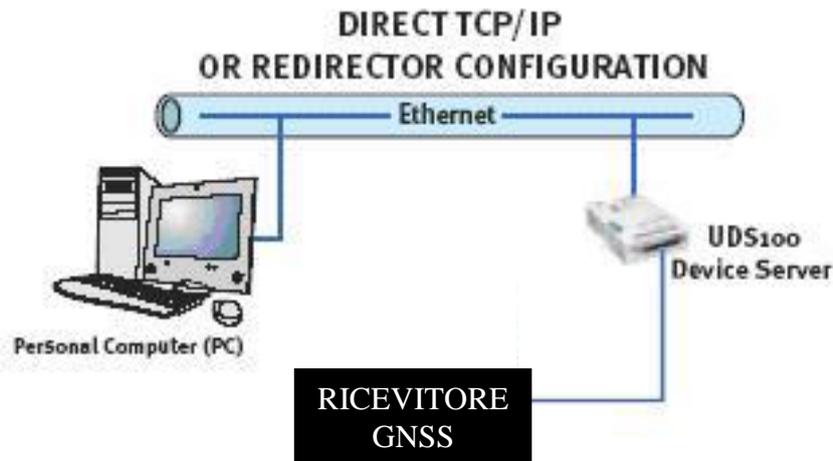


Figura 5.5 - Schema funzionamento Lantronix

Le principali caratteristiche del device sono riassunte nella seguente tabella:

Protocols Supported	ARP, UDP, TCP, Telnet, ICMP, SNMP, DHCP, TFTP and HTTP
Device Support	Supports any asynchronous serial device with 7 or 8-bit data, with or without parity requiring Ethernet access
Network Interface	RJ45 (10Base-T or 10Base-T/100Base-TX) Ethernet
Serial Interface	DB25F, RS-232/RS-422/RS-485 serial port with DCE configuration
Data Rates	Serial speeds 300 bps to 115Kbps
Model Controls	RTS, CTS, DSR, DCD, DTR
Flow Control	Software XON/XOFF Hardware CTS/RTS
Management	Internal HTTP server SNMP (read only) Serial login Telnet login
Firmware	Flash ROM standard; downloadable from a TCP/IP host (TFTP) or over the serial port
LED	Good link (green) Network transmit/receive data (yellow) Collisions (red) Diagnostic (red) Status (green)
Power Requirements	Power input via standard barrel connector or DB25 serial connector Input Range: 9 to 30 VDC or 9 to 24 VAC @ 250mA
Environmental	Operating: 5° to 50° C (41° to 122° F) Storage: -40° to 66° C (-40° to 151° F)
Packaging	Dimensions (LxWxH): 9.0 x 6.4 x 2.3 cm (3.5 x 2.5 x 0.9 in) Weight: .8 lbs (.35 Kg)
Agency Approvals	CE, FCC B, TUV, C/UL

Tabella 5.2 – Caratteristiche Lantronix

5.2.2.2. Connessione via rete telefonica: Siemens TC65

Il Siemens TC65 terminal è un dispositivo che consente l'invio di dati mediante connessione su rete telefonica. La scelta di questo apparecchio è stata intrapresa dal dipartimento nell'ambito di una tesi riguardante la sperimentazione di una stazione di riferimento temporanea GNSS (Meffe 2008).

In seguito verrà eseguita una breve descrizione dell'apparato nella quale sono riassunte le principali caratteristiche.

Il modem TC65 terminal ha creato uno standard senza precedenti nel campo della comunicazione machine-to-machine. Basato sull'avanzato modulo TC65, la versione Terminal combina la più potente ed universalmente accettata piattaforma software Java con una vasta gamma di interfacce industriali, producendo un'elegante soluzione plug & play per un crescente mercato M2M. È un dispositivo Quad band e GPRS classe 12 dalle caratteristiche molto particolari. Essendo dotato dell'ultimo Information Mobile Profile NG (IMP-NG) offre l'opportunità di controllare applicazioni M2M usando le risorse interne, come il potente processore¹ così come la capacità di semplificare gli upgrades software Over-the-air (OTA) per affidabili operazioni di e-maintenance. Ciò significa che inviando un particolare tipo di SMS è possibile fare in modo che il dispositivo si connetta ad un particolare server e scarichi il nuovo software da eseguire, il tutto in maniera automatica.

Inoltre è in grado di elaborare dati a velocità sostenute grazie al processore integrato ARM7, la memoria necessaria è fornita dalla Flash memory da 1,7MB e dalla RAM da 400KB.

Lo standard permette trasmissioni dati sicure usando la crittografia HTTPS e PKI. La tecnologia Quad-band permette applicazioni utilizzabili ovunque nel globo. La piattaforma Java, l'housing compatto e robusto, la dotazione di Sim card holder e le

¹ Le caratteristiche hardware del dispositivo erano considerate il top di gamma al momento dell'uscita (2007). Attualmente non si può dire lo stesso visto la grande evoluzione degli apparati hardware informatici

interfacce standard di cui dispone lo rendono senza alcun dubbio la scelta ideale e vincente per soluzioni plug & play nei diversi settori del M2M come quello della sicurezza, vending machine, gestione flotte, telelettura e controllo remoto.

Inoltre, lo stack TCP/ IP integrato permette l'invio dei dati (relativi ad esempio a sensori e attuatori) direttamente ai server della rete internet.

Le caratteristiche offerte dal TC65 portano ad un abbattimento dei costi grazie al risparmio delle risorse impiegate ed alla riduzione dei tempi di sviluppo. Il TC65 è conforme alle direttive UE che prevedono restrizioni sull'uso di sostanze pericolose impiegate per gli apparecchi elettronici (RoHS) ed è infatti lead-free (cioè non contiene piombo).

Come tutti i moduli Siemens, TC65 è full type approved (FTA) quindi è conforme ai seguenti standard: R&TTE, FCC, UL, IC, GCF e PTCRB ed inoltre è certificato dai maggiori network GSM/GPRS a livello mondiale. Proprio grazie a questi vantaggi gli sviluppatori di applicazioni possono risparmiare su questo tipo di attività e lanciare le loro nuove applicazioni sul mercato globale in modo più competitivo.

Grazie a tutti questi vantaggi chi deve creare una nuova applicazione riesce a risparmiare notevolmente sulle omologazioni e a lanciare in tempi più brevi e competitivi il prodotto sul mercato.

Frequenza operativa	Quad-Band GSM 850/900/1800/1900
	Compatible GSM phase 2/2+
Potenza di uscita	Classe 4 (2W) EGSM850/900
	Classe 1 (1W) GSM1800/1900
Controllo	Attraverso comandi AT
Specifiche trasmissione dati	GPRS multislott Classe 12
	CSD fino a 14.4kbps
	Supporto USSD
	Modalità non trasparente
	V.110
Stack TCP/IP	Gestione stack TCP/IP attraverso comandi AT
Protocolli internet	TCP, UDP, HTTP, FTP, SMTP, POP3
Specifiche Fax	Group 3, Class 1
Specifiche SMS	Point to Point Mobile Originated
	Point to Point Mobile Terminated
	SMS Cell Broadcast

	Testi e modalità Protocol Data Unit
Specifiche Audio	Triple-rate codec for HR, FR, and EFR
	Adaptive multi-rate AMR
	Basic hands-free operation
	Cancellazione eco
	Riduzione rumore
Open application resources	ARM© Core, Blackfin© DSP
	Memoria: 400KB RAM, 1.7MB Flash
	Modalità di risparmio energetico avanzate
Specifiche Java™	CDLC 1.1HI
	J2ME™ profile IMP-Ng
	Trasmissione dati sicura con prot. HTTPS e PKI
Aggiornamento Over-the-air	SW applicativo: OTAP
	Firmware: FOTA (compatibile OMA)
Interfacce	Ingresso alimentazione
	Mini-SIM card 3V, 1.8V
	Conn. Antenna SMA-F 50Ohm
	Audio Handset
	RS232 su conn. 9 poli sub-D femmina
	Connettore 24 pin Micro-N-Lok
	I2C bus and SPI bus 2*input analogici (ADC) Alimentazione (2.9V) Multiplo GPIO
ON/OFF Switch	
Indicatori di stato	LED stato operativo
Alimentazione	Tensione: 8-30Vdc Power down: 50uA Sleep mode: 3.0mA Speech mode: 300mA (average) GPRS class 12: 600mA (average)
Ambiente	Temperatura di esercizio: da -30 a +70°C
	Temperatura di stoccaggio: from -40 to +85°C
Dimensioni e peso	Dimensioni: 90 mm L x 130 mm W x 38 mm H
	Peso: 190g
Approvazioni	R&TTE, FCC, IC, GCF, PTCRB, e-mark, CE

Tabella 5.3 – Caratteristiche Siemens TC65 Terminal

5.2.2.2.1. Problematiche riscontrate

Durante la fase di testing del dispositivo, è emersa una problematica spinosa, cioè lo spegnimento improvviso del device dopo qualche giorno di funzionamento. Il motivo è tutt'ora incognito ma per fortuna tale problema è stato superato installando firmware più aggiornato, il quale incorpora nel dispositivo una nuova funzione, chiamata "watchdog". La suddetta funzione rappresenta un sistema di temporizzazione hardware che permette alla CPU di rilevare eventuali loop infiniti o situazioni di deadlock, consentendo reset del sistema in maniera automatica. Superato questo scoglio, e verificata la stabilità del dispositivo, si è provveduto alla sua installazione sulla torre Garisenda. Qui purtroppo è comparsa una nuova difficoltà: infatti, osservando il software che gestisce e archivia i dati GNSS, si è notato che il flusso subiva numerose interruzioni concentrate in orario lavorativo, quindi tra le 9 e le 17 (Figura 5.6).

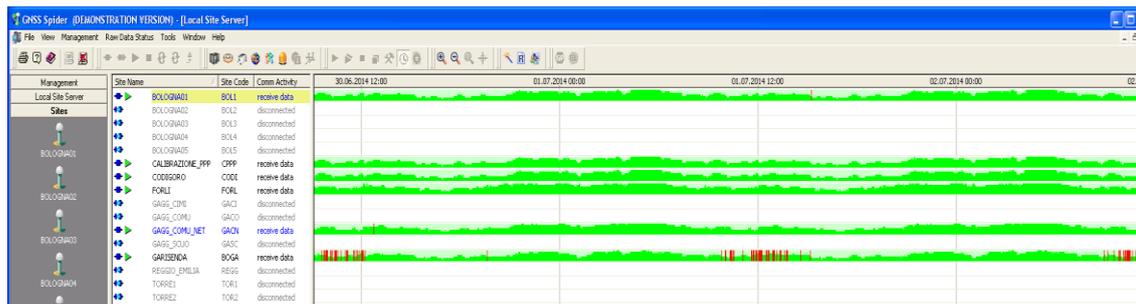


Figura 5.6 – Problemi di ricezione dati

Per questo motivo sono stati coinvolti i colleghi di telecomunicazione, i quali hanno eseguito test approfonditi in cima alla torre per verificare la potenza del segnale telefonico. I risultati dimostrano che gli strumenti hanno registrato una potenza del segnale molto elevata.

Per questa ragione la causa più plausibile della mancanza di segnale può essere solo l'eccessivo traffico telefonico nelle celle. Infatti dato che il TC65 è uno strumento ormai datato, utilizza la tecnologia 2G e non le più recenti tecnologie UMTS (3G) o la nuovissima LTE (4G).

Questa tecnologia ha rilevato problemi di hard handover cioè: se un dispositivo è connesso ad una cella per molto tempo, e questa cella è molto trafficata, allora viene dato un timeout al dispositivo. In questo modo il dispositivo si disconnette e a quel

punto cerca una nuova cella dove connettersi. Questo passaggio da una cella ad un'altra avviene previa disconnessione del dispositivo. La tecnologia 3G (e superiori) è stata realizzata più intelligentemente, nel senso che se un dispositivo rimane connesso per molto tempo ad una cella e, se questa cella è molto trafficata, verrà comunque inviato un timeout al dispositivo, ma prima di disconnetterlo, il dispositivo si aggancia ad un'altra cella in modo da non perdere la continuità del segnale. Questa operazione è chiamata soft handover (vedi Appendice A).

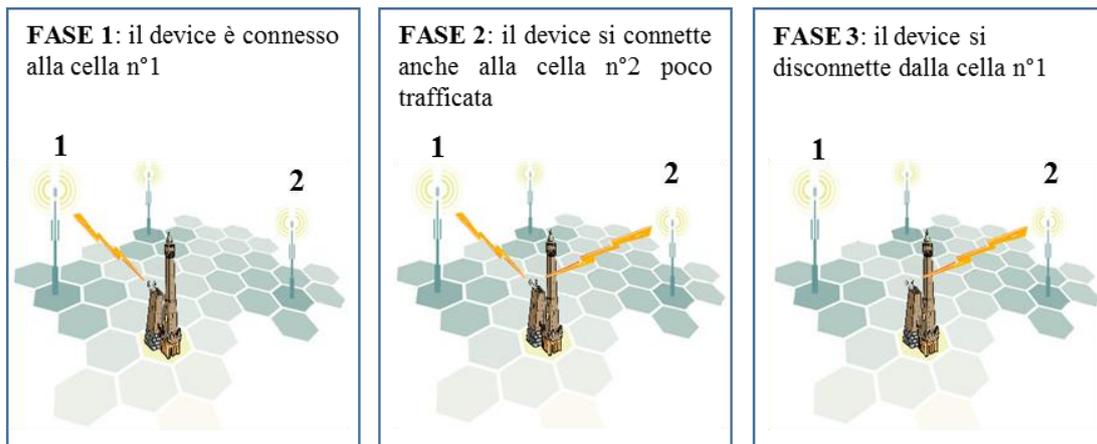


Figura 5.7 - Esempio di soft handover

5.2.3. Possibilità studiate: dispositivo smart and full use

Al fine di risolvere il problema delle suddette interruzioni di segnale si è proceduto alla ricerca di un dispositivo che, oltre a risolvere tale problema, potesse allo stesso tempo funzionare in qualsiasi condizione operativa sostituendo tutti i differenti dispositivi sperimentati fino a questo momento.

Il dispositivo che ha risposto a tutte queste caratteristiche, oltre ad avere un costo estremamente ridotto, è risultato il Raspberry Pi associato ad una 3G Dongle e un adattatore USB-RS232.

5.2.3.1. Raspberry Pi

Il Raspberry Pi (Figura 5.8) è un single-board computer (un calcolatore implementato su una sola scheda elettronica) sviluppato nel Regno Unito dalla Raspberry Pi Foundation. Il suo lancio al pubblico è avvenuto alla fine del mese di febbraio 2012. Ad oggi, ne sono state prodotte cinque versioni denominate Model: A, B, A+, B+, 2) vendute ad un costo che si aggira tra 20 e i 35 dollari statunitensi.



Figura 5.8 – Raspberry Pi

L'idea di base del progetto è la realizzazione di un dispositivo economico, concepito per stimolare l'insegnamento di base dell'informatica e della programmazione nelle scuole.

Il device è costituito da un System-on-a-chip (SoC) Broadcom BCM2835, che incorpora un processore ARM1176JZF-S a 700 MHz, una GPU VideoCore IV, e 256 o 512 Megabyte di memoria. Per il boot e per la memoria non volatile viene utilizzata semplicemente una scheda SD (non sono previsti infatti né hard disk né una unità a stato solido), questo permette un ripristino veloce in caso di errori o malfunzionamenti in quanto basta semplicemente formattare la SD e reinserire il sistema operativo.

La scheda è stata inizialmente progettata per ospitare sistemi operativi basati su un kernel Linux o RISC OS, mentre nell'ultima versione è possibile installare anche Windows 10.

Le prime concezioni del Raspberry Pi, nel 2006, si basavano sul microcontrollore Atmel ATmega644 sviluppato da un'organizzazione di beneficenza registrata

successivamente nel 2009 presso la *Charity Commission for England and Wales* chiamata *Raspberry Pi Foundation*. Essa promuoveva principalmente l'apprendimento nel linguaggio di programmazione Python, ma anche l'uso del BBC BASIC, del C e del Perl. L'amministratore Eben Upton mise insieme un gruppo di insegnanti, accademici e appassionati di computer, per concepire un oggetto capace di incoraggiare i bambini, fornendo loro know-how e ispirazione.

Attualmente esistono 5 modelli distribuiti dalla fondazione e le principali caratteristiche sono riassunte nella Tabella 5.4.

	Model A+	Model A	Model B	Model B+	Model gen.2 B
Prezzo di offerta:	USD 25 (GBP 16)		USD 35 (GBP 22)		USD 35 (GBP 22)
SoC:	Broadcom BCM2835 (CPU + GPU + DSP + SDRAM)				Broadcom BCM2836 ARM (Cortex A7)
CPU:	BMC2835 700 MHz ARM1176JZF-S core (famiglia ARM11)				BCM2836 900 MHz ARM (Cortex A7)
GPU:	Broadcom VideoCore IV, OpenGL ES 2.0, 1080p30 H.264 high-profile decode				
Memory (SDRAM):	256 Megabytes (condivisa con la GPU)	256 o 512 Megabytes (condivisa con la GPU)		1 Gigabyte LPDDR2	
USB 2.0 ports:	1	2 (attraverso un hub USB integrato)		4	
Output video:	Connettore RCA per il video composito, HDMI				
Output audio:	3,5 mm jack, HDMI				
Memoria:	microSD	SD / MMC / SDIO card slot		micro SD	
Collegamenti di rete:	Nessuno		Ethernet 10/100 (RJ-45)		
Periferiche di basso livello:	40xGPIO, HAT	2x13 header pins for GPIO, SPI, I ² C, UART, +3,3 Volt, +5 Volt		40xGPIO	
Real-time clock	No clock or battery				
Corrente (potenza) assorbita:		300 mA (1,5 W)	600 mA (3,0 W)	700 mA (3,5 W)	600 mA (3,0 W)
Alimentazione:	5 V via MicroUSB o GPIO header				
Dimensioni:	65mmx54mm	85 mm × 56 mm (3.355 inch × 2.203 inch)			
Sistemi operativi supportati:	Debian GNU/Linux, Fedora, Arch Linux, Gentoo, FreeBSD e RISC OS (shared source), Windows 10 IoT (model B2)				
Sistemi operativi non supportati:	Windows, Mac OS X, iOS, Android				Mac OS X, iOS, Android

Tabella 5.4 - Caratteristiche Raspberry Pi

Il Raspberry PI non è fornito di un real-time clock, così per avere accesso a data e ora per la marca temporale, un sistema operativo deve usare un network time server, o chiedere l'ora all'utente al bootstrap. Tuttavia è facile aggiungere un real time clock (come il DS1307) con batteria tampone, attraverso l'interfaccia I²C. Nel nostro caso

non è stato necessario questo dispositivo in quanto l'accesso alla data avviene grazie alla connessione a internet.

La Raspberry Pi Foundation ha messo a disposizione per il download una serie di immagini che possono essere caricate sulla SD Card per eseguire un sistema operativo.

Le possibilità sono:

- Noobs: che in realtà non è un sistema operativo ma solo il programma che ne consente l'installazione.
- Raspbian: è il sistema operativo ufficialmente supportato dalla Fondazione. Contiene numerosi software per l'istruzione, la programmazione e l'utilizzo generale.
- Arch Linux: è un noto sistema operativo
- Fedora: è un noto sistema operativo

Nella ultimissima versione del Raspberry, caratterizzata da un hardware più performante, sono disponibili ulteriori sistemi operativi come:

- Ubuntu Mate: è il sistema operativo basato su Ubuntu armhf
- Snappy Ubuntu core: è un recente sistema operativo Ubuntu
- Windows 10 IOT core: è la versione di Windows costruita per dispositivi di tipo embedded
- Pinet: è un sistema operativo progettato per le scuole
- Risc OS: è un sistema operativo molto veloce e performante non basato su Linux nato quasi 30 anni fa

Oppure sistemi operativi che trasformano il dispositivo in un media center come:

- Osmc
- Openelec
- XBian
- RaspBMC

Nel caso in esame, avendo acquistato un Raspberry Pi Model B, si è optato per l'installazione del sistema operativo Raspbian.

5.2.3.2. 3G USB Dongle: Huawei E3251

I criteri di scelta per l'acquisto della 3G USB Dongle (3UD) sono stati molteplici: innanzitutto doveva essere compatibile con il Raspberry Pi, per questo motivo sono stati selezionati solo device che fossero già stati sperimentati in accoppiamento con il pocket computer; altri criteri sono stati il costo che ovviamente non doveva risultare troppo eccessivo ed infine l'ultimo, ma non banale, era la semplicità di installazione ed utilizzo.

Dopo una breve ricerca di mercato e grazie ai consigli dei colleghi di telecomunicazione, si è scelto di acquistare la 3G USB Dongle Huawei E3251 con relativo kit comprensivo di antenna esterna.



Figura 5.9 – 3G Dongle Huawei E3251

5.2.3.3. Adattatore USB–RS232

I dati GNSS in uscita vengono messi a disposizione nella maggior parte dei ricevitori attraverso la porta LEMO, nella quale può essere collegato un cavo che la trasforma in seriale del tipo RS232. Essendo però il Raspberry sprovvisto della suddetta interfaccia, è stato necessario l'acquisto di un ulteriore cavo adattatore del tipo USB–RS232.



Figura 5.10 – Adattatore LEMO–RS232 e adattatore RS232–USB

5.2.3.4. Configurazione del Raspberry Pi

In questo paragrafo sono state riassunte le principali operazioni di configurazione del Raspberry Pi a partire dal sistema operativo fino ad arrivare ai software per il riconoscimento e il funzionamento della 3G USB Dongle.

In questa fase è stato di fondamentale aiuto l'affiancamento dell'ingegnere informatico Marco Mengoli il quale ha dato un grande sostegno nella configurazione del Raspberry ma soprattutto ha creato un codice in linguaggio C per l'invio dei dati (paragrafo successivo).

Prima di tutto è stato installato sulla scheda SD il sistema operativo Raspbian (Thompson & Green 2014). Una volta eseguita tale operazione si è proceduto alla installazione dei tre applicativi necessari al corretto funzionamento della 3UD con il sistema operativo stesso:

- PPP (point to point protocol): è un protocollo di rete comunemente usato per stabilire connessioni dirette tra due nodi. Nel nostro caso è utilizzato per collegare il Raspberry a internet mediante l'utilizzo della 3UD.
- Usb Mode Switch: questa applicazione permette al Raspberry Pi di riconoscere correttamente come modem la 3UD la quale, in caso contrario, sarebbe stata riconosciuta come dispositivo di archiviazione. Dopo l'installazione di questa applicazione va poi settato correttamente il file di configurazione inserendo i corretti "Vendor ID" e "Product ID" relativi alla 3UD.
- Wvdial: è un dialer intelligente per PPP a riga di comando per la gestione della connessione a Internet tramite modem, cellulare e internet key. In altre parole

è il software che comanda la 3UD, consentendo la vera e propria connessione del Raspberry Pi. Fortunatamente, in questo caso questa applicazione è stata in grado di autoconfigurarsi quindi non è stata necessaria la conoscenza di ulteriori parametri.

Infine sono state create regole (Rules) per il riconoscimento e l'identificazione forzata di tutte le periferiche collegate al Raspberry (adattatore USB-RS232 e 3UD) per evitare problemi e malfunzionamenti.

5.2.3.5. Serial to TCP/IP

Come detto nel precedente paragrafo, è stato creato un codice in linguaggio C per la gestione e l'invio dei dati GNSS dal Raspberry Pi al server di archiviazione. Per maggiori informazioni sul codice fare riferimento all'appendice D.

Durante i primi due anni di sperimentazione di tale sistema per l'invio dei dati, sono state necessarie diverse modifiche alla struttura del codice. Le suddette modifiche sono state causate da una serie di cambiamenti della politica dei provider dei servizi telefonici che hanno deciso di “nattare” la rete (si veda appendice B), cioè non hanno messo più a disposizione gli IP di tipo pubblico agli utenti privati (in realtà alcuni provider li mettono ancora a disposizione mediante contratti speciali).

Per questa ragione la configurazione iniziale in cui era possibile utilizzare ancora gli IP pubblici prevedeva la possibilità di collegarsi in remoto al Raspberry per poter eseguire qualsiasi tipo di verifica: dall'interrogazione della potenza del segnale ricevuto, fino al controllo della temperatura della CPU. Come detto in precedenza, anche il software di invio dati ha subito molte modifiche in questi anni di sperimentazione.

La “versione 1” consentiva il solo invio dei dati dalla porta seriale ad un certo indirizzo IP e porta, attraverso il protocollo TCP/IP, quindi la connessione era monodirezionale. Il Raspberry in realtà non si interfacciava direttamente con il server di archiviazione (Spider), in quanto esso necessita di un indirizzo IP di tipo statico, mentre i provider di rete forniscono generalmente IP dinamici. Per questo motivo veniva utilizzato un computer che faceva da “bridge” il quale riceveva i dati dal Raspberry Pi su una certa

porta e li rendeva disponibili su un'altra. In questo modo Spider andava a richiedere i dati sull'IP statico e la porta del computer "bridge".

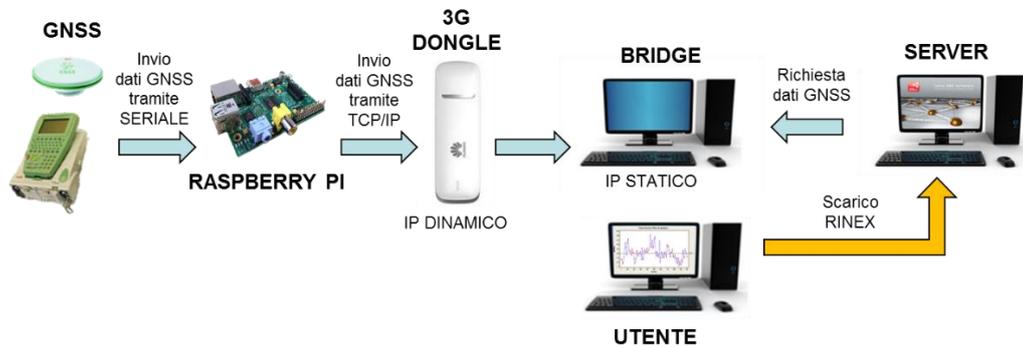


Figura 5.11 – Schema funzionamento Serial to TCP/IP - versione 1

La "versione 2" è quella più articolata, con la quale è stato possibile creare un collegamento diretto tra il Raspberry e il software Spider (connessione bidirezionale). Tutto questo grazie all'introduzione del DYNDNS che ha permesso di identificare in modo univoco gli indirizzi IP assegnati al dispositivo che, pur essendo pubblici, risultavano dinamici, cioè ad ogni reset della connessione il provider assegnava un IP differente dal precedente. In questo modo Spider può fare richiesta dei dati ad un indirizzo statico relativo al Raspberry.

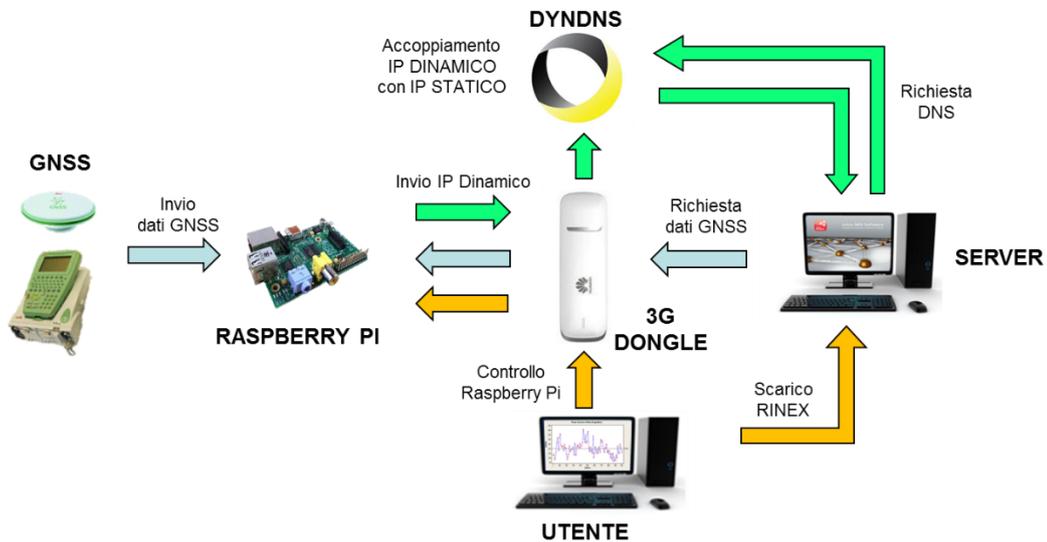


Figura 5.12 – Schema funzionamento Serial to TCP/IP - versione 2

Nel novembre 2014, anche il provider TIM così come tutti gli altri, ha cessato la distribuzione gratuita di IP pubblici. È stato quindi necessario un downgrade del

software, in quanto non era più possibile rendere rintracciabile il dispositivo all'esterno della rete. A valle di questo si è deciso di utilizzare la “versione 1”.

5.3. Server di raccolta dei dati

5.3.1. GNSS Spider

Il software utilizzato per l'archiviazione dei dati è Leica GNSS Spider. Tale applicazione è in realtà una suite di software per la gestione, il funzionamento e il monitoraggio in continuo di stazioni permanenti GNSS e reti di stazioni NRTK per la distribuzione delle correzioni. È un sistema modulare con un'architettura client server che comprende:

- Spider Client: è l'interfaccia grafica (GUI) che consente di configurare e monitorare il funzionamento del server
- Spider Server, costituito a sua volta da 4 parti differenti:
 - o Site Server che esegue tutte le operazioni standard delle stazioni di riferimento in modo continuo e automatico tra cui: il controllo dei ricevitori; download e streaming dei dati; controllo, conversione, compressione, archiviazione e distribuzione dei dati; monitoraggio dell'intero server; esecuzione dei calcoli di Spider Positioning.
 - o Network Server che esegue la gestione di tutte le reti, in particolare: dei flussi dei dati dai server di uno o più siti che vengono assegnati al server per il calcolo della rete; dei dati raw in streaming dal Site Server al Cluster Server
 - o Cluster Server che esegue in tempo reale il calcolo delle correzioni di rete per cui può essere definito come il motore di SpiderNet. Non ha una interfaccia grafica e viene configurato attraverso il Network Server dopodiché riceve i dati raw direttamente dal Site Server e quindi esegue le attività di calcolo della rete

- RTK Proxy Server che si occupa della distribuzione in tempo reale dei dati e come tale è l'interfaccia degli utenti sul campo di SpiderNet. Anch'esso non ha un'interfaccia grafica e viene configurato attraverso il Network Server.
- Spider Business Center che è una soluzione sicura e integrata per la sottoscrizione e gestione online di tutti i servizi di rete GNSS.
- Spider SQL Database: i server e i client accedono a questo database per condividere le informazioni di configurazione e stato del sistema per: il sito, i dati ricevuti, le connessioni attive e i prodotti GNSS finali (file di RT, file Rinex, file .mdb,...). Questi ultimi non sono archiviati nel database ma sono salvati in locale sul computer quindi raggiungibili anche se Spider non è in esecuzione.
- Spider Data Dispatcher (DD): assicura la connessione e sincronizzazione tra i server e i client, così le modifiche apportate attraverso un client saranno immediatamente disponibili a tutti gli altri client connessi o allo stesso server

Nello specifico per quanto riguarda il funzionamento sono disponibili due licenze di utilizzo sotto forma di moduli:

- SpiderNet è il modulo per l'analisi di una rete di stazioni permanenti in tempo reale e la modellazione degli errori. Consente un'elevata precisione e un miglioramento delle prestazioni RTK su un'intera rete regionale, con grandi distanze tra le stazioni di riferimento.
- Spider Positioning è il modulo specifico per la gestione real-time e/o post-processing di stazioni GNSS e applicazioni di monitoraggio.

5.3.2. Alternativa opensource

Il software Spider così come altre applicazioni commerciali non sono le uniche alternative per potersi creare un server di archiviazione. Infatti mettendo insieme basilari conoscenze informatiche e utilizzando due eseguibili del pacchetto RTKLIB è possibile creare questo tipo di server del tutto gratuitamente. Ovviamente con esso non è possibile avere le medesime potenzialità dei software commerciali, ma se lo scopo è la semplice archiviazione dei dati delle osservabili, allora funziona senza problemi.

Le operazioni da eseguire per la creazione di questo piccolo server sono principalmente due:

- il collegamento del flusso di dati e il suo successivo salvataggio
- la conversione di questi file contenenti i dati raw in formato standard RINEX

Per prima cosa bisogna salvare il flusso di dati RTCM 3.0 localmente in un file, attraverso l'esecuzione del software STRSVR (o l'eseguibile STR2STR)

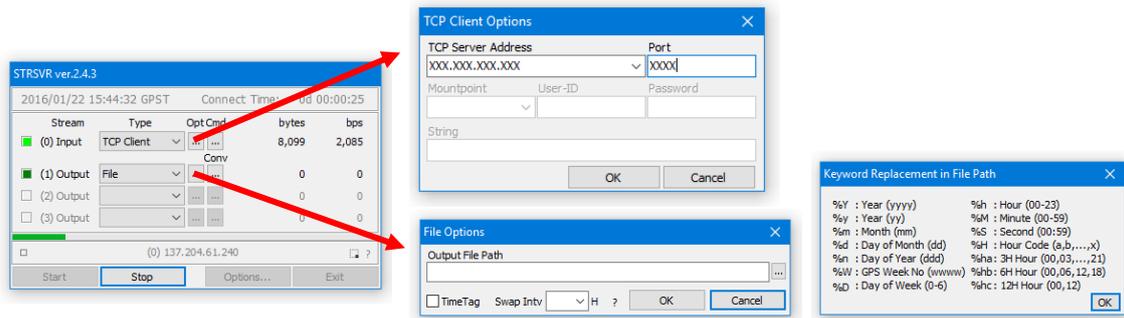


Figura 5.13 - Schema funzionamento STR2SVR

In questo modo si crea un archivio di file binari RTCM difficilmente utilizzabili. Per questa ragione il secondo passaggio consiste nella conversione di questi file in formato standard RINEX attraverso RTKCONV (o l'eseguibile CONVBIN)

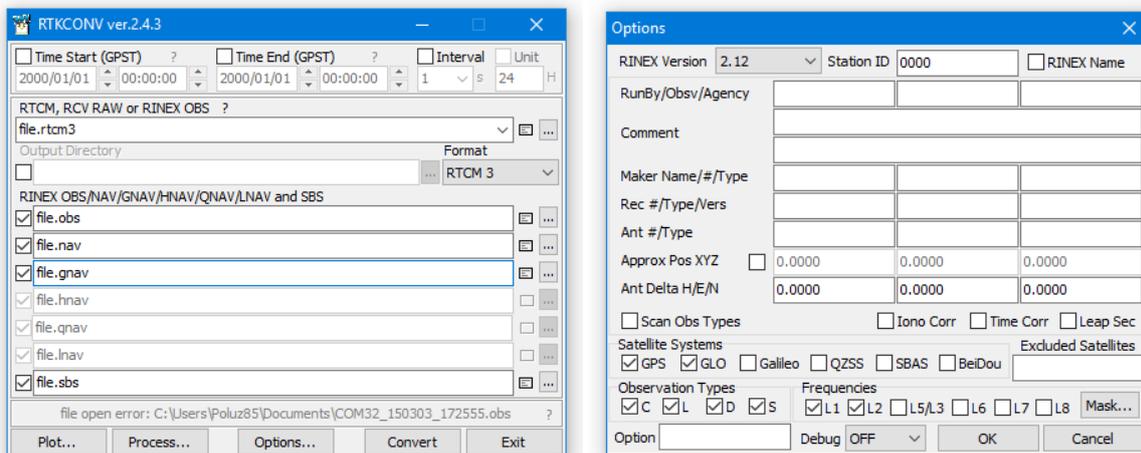


Figura 5.14 - Schema funzionamento RTKCONV

6. Monitoraggio della struttura per analisi di stabilità

L'approccio tradizionale nel monitoraggio con tecnica GNSS è basato sul posizionamento relativo tra una stazione di riferimento (RS) e una, o più, stazioni di monitoraggio (MS). La ripetibilità e l'accuratezza del posizionamento relativo GNSS dipende dalla distanza tra RS e MS. Quando i movimenti attesi sono molto piccoli e lenti, al fine di ottenere una elevata precisione anche utilizzando ricevitori monofrequenza, una RS deve essere materializzata il più vicino possibile alla MS.

Il monitoraggio continuo viene eseguito sulla base della stima della posizione giornaliera, producendo una serie temporale che può essere utile per studi di stabilità delle strutture. La serie temporale della MS è ottenuta dal posizionamento della singola base, a partire da una RS la cui posizione è conosciuta e assunta come stabile. L'ipotesi di stabilità della RS consiste nel considerare che eventuali suoi movimenti sarebbero interamente attribuiti alla MS. Pertanto, le serie temporali della MS possono potenzialmente rappresentare non solo i movimenti della struttura monitorata, ma anche eventuali movimenti delle RS.

Per studiare come la scelta delle RS e l'ipotesi iniziale della loro stabilità influenzino i risultati della MS, può essere considerato uno scenario con una sola MS, definita dal caso di studio BOGA (paragrafo 5.1) e più RS, rappresentate da 4 stazioni permanenti GNSS situate in un'area di circa 2 km dalla torre.

6.1. Problema geodetico: definizione del sistema di riferimento

Per poter eseguire un qualsiasi tipo monitoraggio è necessario definire un sistema di riferimento stabile rispetto al quale calcolare gli spostamenti. In particolar modo, in questi casi, è più corretto parlare di sistema di riferimento locale.

In base al tipo di approccio di calcolo utilizzato può essere più o meno semplice determinare questa tipologia di riferimento.

Infatti quando si elaborano dati GNSS con l'approccio non differenziato e in particolare con il Precise Point Positioning, le soluzioni ottenute sono solitamente riferite nel sistema internazionale IGB08. Successivamente è possibile inquadrare tali soluzioni nel sistema di riferimento europeo ETRF00, mediante l'applicazione di 14 parametri di similarità (Boucher & Altamimi 2011a) che consentono di depurare la velocità media della placca euroasiatica.



Figura 6.1– Mappa tettoniche delle placche dell'Italia

L'Italia però è situata nella zona di confine tra la placca euto-asiatica e quella africana (Figura 6.1), per cui permangono delle velocità residue differenti da zona a zona. Di conseguenza nasce la necessità di instaurare un sistema di riferimento stabile che può essere definito principalmente in due differenti modi: se la zona di studio è molto ristretta allora basta calcolare un modello locale delle velocità; se invece la zona è molto estesa (come per esempio l'intero territorio italiano) sarà necessario calcolare

14 nuovi parametri di Helmert, fissando le coordinate di una serie di stazioni permanenti GNSS ben distribuite sul territorio. Se invece si elaborano i dati con l'approccio differenziato allora il sistema di riferimento sarà automaticamente realizzato dalla stazione master. Pertanto se tale stazione si ipotizza stabile, allora il problema è risolto e le soluzioni che si ottengono dal calcolo delle basi rappresentano l'effettivo movimento della stazione monitorata. Se invece l'ipotesi di stabilità non è valida e quindi la stazione master è affetta da un moto proprio allora sarà opportuno definire il modello di tale movimento mediante il calcolo delle soluzioni del master con approccio PPP.

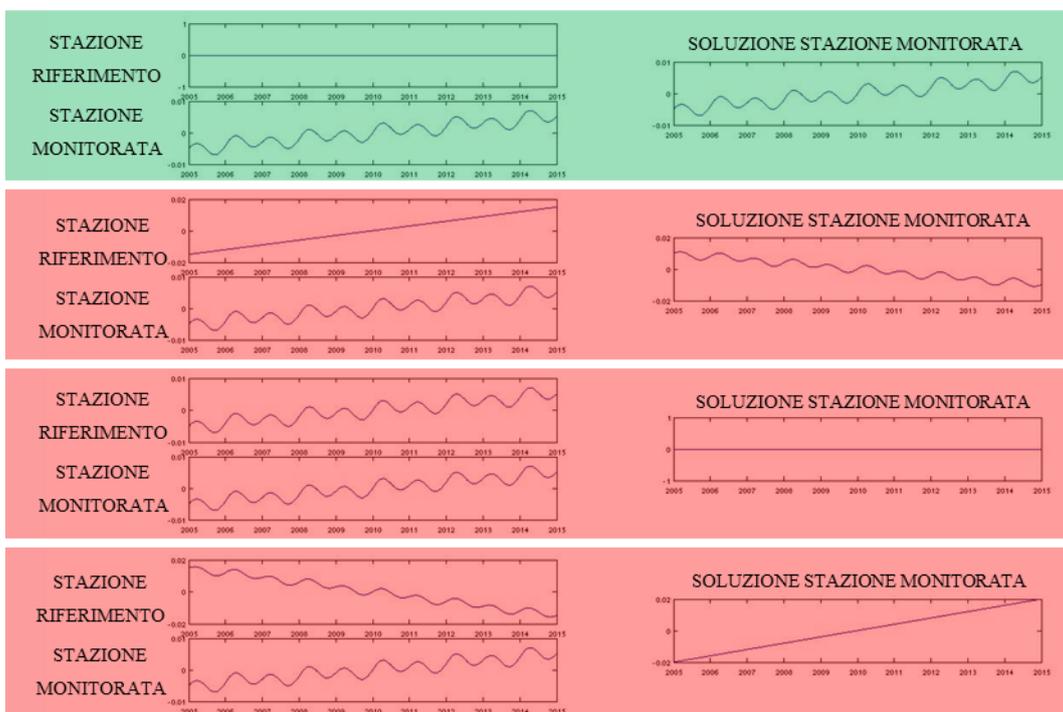


Figura 6.2 - Problematiche relative alla stabilità del riferimento

La Figura 6.2 mostra le possibili problematiche che possono presentarsi nel caso in cui non si tenga conto del modello del moto della stazione di riferimento; nella prima colonna sono rappresentati i movimenti reali del riferimento e della stazione monitorata, mentre nella seconda colonna è riportata la soluzione derivante dalla baseline. La prima striscia verde rappresenta il caso ottimale in cui il riferimento è stabile (ossia il movimento che si vuole studiare è molto più grande del possibile movimento del sistema di riferimento), quindi la soluzione sarà effettivamente rappresentativa del movimento reale della stazione monitorata. Le successive tre

strisce rosse mostrano come il riferimento non stabile in termini di velocità, di segnale, o di entrambe le componenti porti a un errato calcolo della soluzione. Come precedentemente anticipato, questa tipologia di problema si manifesta solo quando l'ordine di grandezza dei movimenti che si vogliono rilevare è particolarmente piccola e le problematiche relative alla stabilità del sistema di riferimento sono quindi confrontabili con i movimenti attesi.

6.2. Dataset e stazioni di riferimento utilizzate per lo studio

Come accennato in precedenza, l'approccio tradizionale per il monitoraggio GNSS si basa su posizionamento differenziato tra una stazione di riferimento (RS) e una o più stazioni di monitoraggio (MS). La posizione della MS viene misurata da una RS, assunta come stabile. È anche noto che la ripetibilità e l'accuratezza del posizionamento GNSS, con approccio differenziato, dipendono dalla distanza tra RS e MS. Per questo motivo, in casi come monitoraggio strutturale, quando i movimenti attesi sono di solito molto piccoli e lenti, la RS deve essere materializzata il più vicino possibile dalla MS.

Nel caso preso in esame, è stata sfruttata la disponibilità dei dati di quattro stazioni permanenti GNSS a doppia frequenza, situate nelle vicinanze della torre Garisenda.

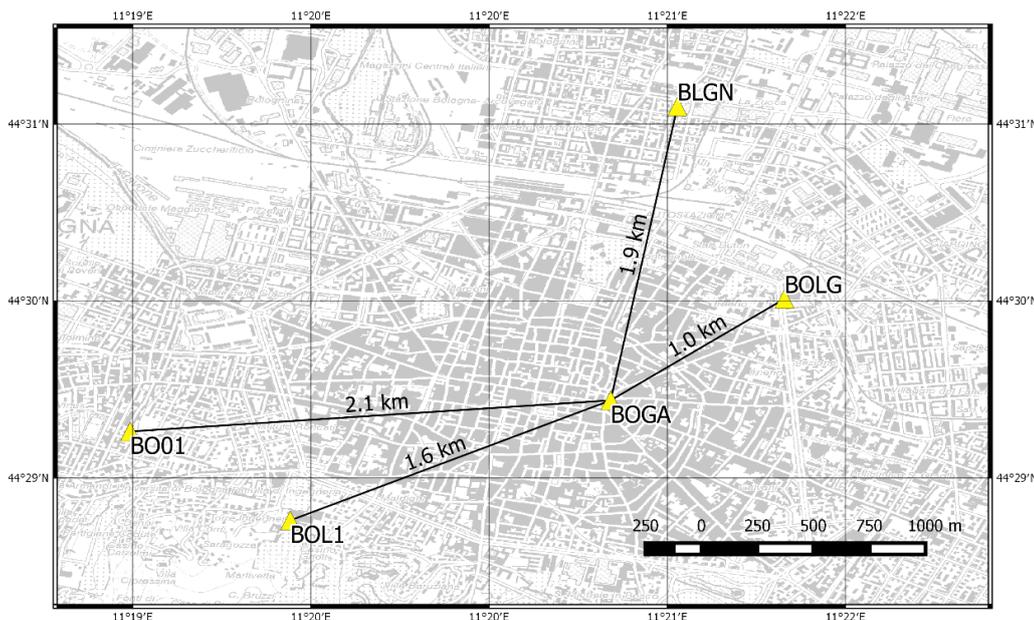


Figura 6.3– Mappa posizione della torre Garisenda MS (BOGA) e delle quattro RS

Le quattro stazioni permanenti considerate come RS, materializzate in tempi diversi e per diverse applicazioni sono:

- BOL1: stazione GNSS permanente geodetica a doppia frequenza installata nel 2004 sul tetto della Scuola di Ingegneria e Architettura per il Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali (DICAM) dell'Università di Bologna, per applicazioni di posizionamento in tempo reale.
- BOLG: stazione GNSS permanente geodetica a doppia frequenza installata dal Dipartimento di Fisica e Astronomia (DIFA) dell'Università di Bologna nel 2005 e parte del EUREF Permanent Network (EPN).
- BLGN: stazione GNSS permanente geodetica a doppia frequenza installata dall'Istituto Nazionale Italiano di Geofisica e Vulcanologia (INGV) nel 2008, in primo luogo per gli studi di geodinamica.
- BO01: stazione GNSS permanente geodetica a doppia frequenza installata nel 2012 da una società privata per applicazioni di posizionamento preciso in Emilia Romagna (Italia).

Le quattro RS (Figura 6.3) si trovano a una distanza di circa 2 km dalla MS sulla torre Garisenda e le loro principali caratteristiche sono elencate nella Tabella 6.1.

Stazioni di	Receiver	Antenna Type	Distanza da
-------------	----------	--------------	-------------

Riferimento	Type	e Radome	BOGA (km)
BOL1	Leica GX1230GG	LEIAX1202GG – NONE	1.6
BOLG	LeicaSR9500	LEIAT302+GP – NONE	1.0
BO01	Trimble 5700	TRM41249.00 – TZGD	2.1
BLGN	Leica SR520	LEIAX1202 – NONE	1.9

Tabella 6.1 – Caratteristiche di ogni RS e relative distanze dalla MS.

I dati acquisiti dalla stazione GNSS sulla torre Garisenda (Ricevitore: Leica GX1230GG, Antenna: LEIAX 1202GG, radome: NONE), attiva dal 2 ottobre 2013, sono quindi disponibili da circa 2 anni (2013,7–2.015,7).

6.3. Ipotesi di stabilità del riferimento

I dati GNSS acquisiti dalla stazione della Garisenda (BOGA), durante il periodo dei 2 anni precedentemente indicato, sono stati elaborati con i dati acquisiti da ogni RS, utilizzando RTKLIB, mediante l'esecuzione del posizionamento a singola base. RTKLIB è un pacchetto software open source, che presenta diverse modalità di calcolo. Le RS sono state assunte come stabili e sono state assegnate loro delle coordinate ITRF2008 fissate ad una certa epoca (2014.0). I principali parametri di calcolo adottati per la elaborazione dei dati, sono elencati di seguito:

- Costellazioni: GPS + GLONASS
- Osservabili: Carrier Phase
- Frequenze: L1 + L2
- Modalità di posizionamento: Statico
- Tipo filtro: Forward
- Ionosfera Correzione: Broadcast
- Correzione troposferico: Saastamoinen
- Satellite Ephemeris / Clock: Broadcast
- Campionamento dei dati: 30 secondi

È stato implementato uno script Perl per automatizzare le fasi di elaborazione dei dati con gli eseguibili di RTKLIB. I risultati sono stati poi analizzati mediante l'utilizzo del software GTS_shaper.pl, facente parte del pacchetto denominato GTS pack (creato

nel corso dei tre anni di dottorato) scritto in Perl, Fortran, C-shell, GMT (Appendice C) che consente la creazione, l'analisi statistica e numerose altre operazioni delle serie temporali.

Per quanto riguarda i criteri di pulizia, sono di seguito descritti i principi utilizzati dal software.

Per ogni serie temporale, è stata calcolata una regressione lineare utilizzando un approccio classico ai minimi quadrati pesati, con il peso dato dall'inverso dell'errore formale derivante dall'elaborazione. Definiti m_i e q_i come la pendenza e l'intercetta della regressione lineare (dove $i = \Delta N, \Delta E, \Delta h$), e t_j è il tempo corrispondente alla j -esima epoca, è possibile calcolare la serie residua come differenza tra la serie originale S_{ij} e la retta di regressione mediante la relazione:

$$v_{ij} = S_{ij} - [q_i + t_j * m_i]$$

Quindi si può definire σ_k come lo scarto quadratico medio dei residui:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m v_{ij}^2}$$

Per rimuovere gli outliers è stata adottata una procedura iterativa, mettendo in relazione l'outliers con il valore assoluto più grande e la deviazione standard. Una soluzione giornaliera è considerata outliers quando:

$$\max \{|v_{ij}|\} > 3\sigma_i$$

A valle di tale operazione sono state ottenute quattro serie temporali della MS, ciascuna derivante dalle diverse RS.

Per separare le componenti piane dalla quota, sono stati rappresentati tutti i risultati ed i grafici in un sistema di riferimento geodetico locale.

Per rendere più comprensibile la lettura delle soluzioni, viene definita $BOGA_{BOL1}$ la serie temporale della MS BOGA ottenuta dalla stazione di riferimento BOL1; le serie temporali di BOGA ottenute dalle altre RS sono chiamate $BOGA_{BOLG}$, $BOGA_{B001}$, $BOGA_{BLGN}$.

6.3.1. Primi risultati

Le quattro serie temporali della MS, depurate dagli outliers, sono state rappresentate in un unico grafico (Figura 6.4), in modo da confrontare i risultati ottenuti dalle diverse RS. Per ogni serie temporale sono state stimate le velocità medie (nelle tre componenti) della MS. Poiché lo scopo principale del presente lavoro non è la determinazione della posizione assoluta di un punto noto ma bensì il monitoraggio del punto stesso, le serie temporali mostrate sono state traslate di un valore fisso sull'asse y. Questo permette una migliore visualizzazione dei risultati e, in particolare:

- evidenzia le differenze tra i valori medi di velocità
- permette di valutare la presenza di segnali
- descrive la dispersione di ciascuna soluzione.

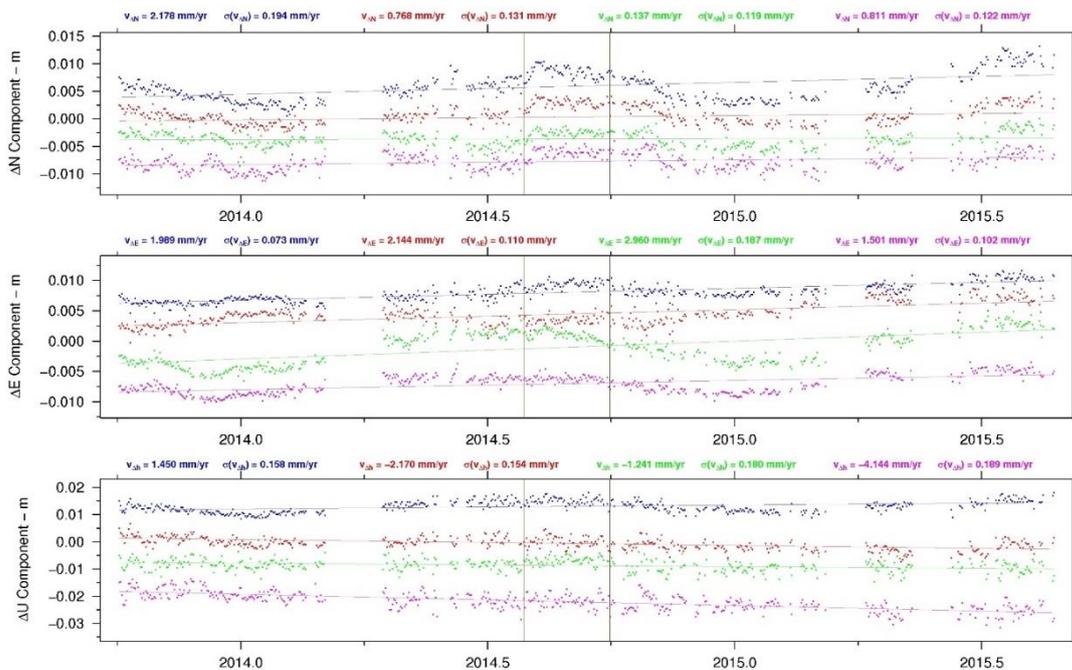


Figura 6.4 – Serie temporali di BOGA con ipotesi di riferimento costante, nelle component geodetiche locali, derivate dalle RS assunte stabili. Le serie temporali sono rappresentate in differenti colori: BOGA_{BOL1} in blu, BOGA_{BO01} in rosso, BOGA_{BOLG} in verde and BOGA_{BLGN} in magenta

I buchi nella serie temporale, evidenti nei grafici, sono stati causati da interruzioni della trasmissione dei dati della MS. Le due linee verticali, dopo l'epoca 2014,5, rappresentano l'intervallo di tempo in cui il ricevitore della MS BOGA è stato sostituito con un altro dello stesso tipo, per consentire un aggiornamento del firmware.

La Figura 6.4 illustra le quattro serie temporali di BOGA in cui si possono notare alcune differenze, sia in termini di velocità media stimata della MS che della presenza di segnali.

Per una migliore comparazione dei risultati, sono elencate nella Tabella 6.2 la velocità media di BOGA e l'RMS; quindi per ogni componente geodetica (ΔN , ΔE , Δh) è stata calcolata la media ponderata delle velocità. È stato assunto come peso l'inverso del quadrato degli RMS.

Time Series	\bar{V}_N (mm/y)	$\sigma_{\bar{V}_N}$ (mm/y)	\bar{V}_E (mm/y)	$\sigma_{\bar{V}_E}$ (mm/y)	\bar{V}_U (mm/y)	$\sigma_{\bar{V}_U}$ (mm/y)
BOGA_{BLGN}	0.82	0.12	1.50	0.10	-4.14	0.19
BOGA_{B001}	0.77	0.13	2.14	0.11	-2.17	0.15
BOGA_{BOL1}	2.18	0.19	1.99	0.07	1.45	0.16
BOGA_{BOLG}	0.14	0.12	2.96	0.19	-1.24	0.18
weighted average	0.75		1.97		-1.34	
RMS	0.90		0.60		2.33	

Tabella 6.2 – Velocità medie stimate e SQM associato per le serie temporali tra BOGA e le quattro RS assunte stabili, nelle tre componenti geodetiche.

La posizione della MS dovrebbe essere indipendente dalle RS considerate nella singola base e le quattro serie temporali risultanti BOGA dovrebbero fornire risultati che sono coerenti l'uno con l'altro. Per valutare il livello di accordo tra le serie temporali delle soluzioni sono stati calcolati i coefficienti di correlazione di Pearson (Pearson, 1895), ipotizzando la soluzione **BOGA_{BOL1}** come riferimento (Tabella 6.3).

Time Series	ρ_N	ρ_E	ρ_U
BOGA_{BOLG}	0.62	0.70	0.03
BOGA_{B001}	0.90	0.65	0.29

$BOGA_{BLGN}$	0.59	0.64	-0.28
MEDIA	0.70	0.66	0.02

Tabella 6.3–Coefficienti di Pearson calcolati assumendo $\{BOGA\}_{BOL1}$ come riferimento per le serie calcolate dalle RS assunte stabili

La Figura 6.4 e la Tabella 6.2 mostrano alcune differenze significative tra le velocità medie della MS, stimate per la quattro serie temporali. In particolare, nella componente Est si può notare come la soluzione $BOGA_{BOLG}$ (disegnata in verde) sia caratterizzata da un segnale molto differente dalle altre soluzioni. La Tabella 6.2 mostra che il valore della media ponderata della velocità stimata nella componente altimetrica è inferiore rispetto quello relativo al RMS. Questa variabilità viene confermata dai coefficienti di correlazione nella Tabella 6.3 i quali indicano che i risultati ottenuti dai quattro RS, assunti come stabili e situati nelle vicinanze della MS, sono discordanti, con valori molto bassi del coefficiente di correlazione.

Molto probabilmente, queste differenze sono in parte dovute all'ipotesi iniziale di stabilità della RS. Con la sola elaborazione dei dati di base utilizzati, eventuali movimenti di una RS sarebbero attribuiti interamente alle MS, inducendo così interpretazioni potenzialmente errate dei risultati.

Al fine di ottenere i reali movimenti locali ed i segnali della MS, è stato elaborato l'intero set di dati considerando i movimenti locali di ogni RS, per mezzo dei modelli delle serie temporali delle RS, ottenuti mediante l'approccio Precise Point Positioning (PPP).

6.4. Rigetto ipotesi di stabilità

È stata eseguita una seconda elaborazione dei dati, nella quale sono state calcolate le quattro serie temporali della MS applicando un modello sintetico per ciascuna RS; come detto in precedenza, i modelli delle RS sono stati definiti utilizzando un approccio PPP utilizzando il software Gipsy OASIS II. Le RS sono state installate prima della MS e la serie GNSS delle RS sono tutti più lunghe dei 2 anni utilizzati per il calcolo delle soluzioni di BOGA. Per ogni RS è stato definito il modello utilizzando tutti i dati disponibili. Per basi lunghe, l'approccio PPP fornisce risultati comparabili con quelli di altri pacchetti software scientifico-differenziati, ma riferiti al frame globale (Gandolfi et al. 2015).

6.4.1. Generazione del modello

Per ottenere un modello sintetico per ogni RS senza introdurre alcuna cross-correlazione diretta tra le stazioni si è scelto di elaborare i dati delle RS utilizzando l'approccio PPP. Nel corso degli ultimi anni, il PPP ha raggiunto livelli di prestazioni paragonabili a quelli ottenibili attraverso l'approccio di differenziato (Griffiths & Ray 2009; Bisnath & Gao 2009), in particolare per le stazioni permanenti GNSS. È noto che PPP fornisce soluzioni riferite al sistema delle orbite, che costituisce l'unico vincolo al sistema di riferimento. Utilizzando questo approccio, ogni RS può essere elaborata separatamente dalle altre e il risultato è una serie temporale riferita nel sistema delle orbite (attualmente IGB08). In questo reference frame, un punto situato sulla placca eurasiatica si muove con una velocità media di circa 2,5 cm / anno in direzione Nord-Est. Questo movimento medio può essere rimosso utilizzando una trasformazione di similarità di Helmert (Boucher & Altamimi 2011b), che sposta la soluzione dall'ITRS all'ETRS. In questo sistema di riferimento, realizzato mediante il frame ETRF2000, un punto in Italia è caratterizzata da una velocità residua di pochi mm / anno (Barbarella et al. 2013).

È stata eseguita quindi l'elaborazione dei dati delle quattro RS utilizzando il software GIPSY OASIS II e ogni soluzione è stata inquadrata in ETRF2000.

Successivamente è stata realizzata la pulizia delle serie temporali e l'analisi statistica esposta in precedenza, ottenendo così i parametri di regressione lineare e le precisioni globali delle serie (Paragrafo 6.3).

Sono state stimate le velocità medie di ogni RS con il metodo descritto; i valori sono riportati in Tabella 4 e saranno utilizzati per alcune analisi successive.

GNSS Reference Stations	\bar{V}_N (mm/y)	$\sigma_{\bar{V}_N}$ (mm/y)	\bar{V}_E (mm/y)	$\sigma_{\bar{V}_E}$ (mm/y)	\bar{V}_U (mm/y)	$\sigma_{\bar{V}_U}$ (mm/y)
BLGN	2.18	0.04	1.91	0.03	2.46	0.15
BO01	2.83	0.05	1.14	0.05	3.74	0.17
BOL1	2.54	0.06	1.49	0.03	-0.48	0.11
BOLG	3.20	0.06	0.77	0.07	1.41	0.17
weighted average	2.60		1.51		1.29	
RMS	0.44		0.53		1.87	

Tabella 6.4 – Velocità medie delle RS calcolate in PPP con i relativi SQM, nelle 3 componenti geodetiche locali

Per questo tipo applicazioni, nel quale si vogliono investigare movimenti molto ridotti, assumere il solo movimento lineare nella definizione del riferimento non è una scelta così ottimale poiché occorre modellare il movimento del punto, comprensivo del moto non lineare.

Come è ben noto (Dong et al. 2002; Mao, Christopher G A Harrison, et al. 1999), le serie temporali GNSS possono essere rappresentate con un moto composto da un andamento lineare e delle componenti periodiche. Inoltre, la maggior parte delle serie temporali GNSS sono caratterizzate spesso dalla mancanza di dati, per cui le serie si dicono non equamente distanziate. Uno dei metodi più noti per effettuare analisi spettrali su tali serie si basa sul Periodogramma di Lomb-Scargle (LSP) (Lomb 1976; Scargle 1982) accoppiato ai criteri di Massima Verosimiglianza (MLE). Con il LSP è possibile valutare le componenti periodiche statisticamente più probabili, e quindi calcolare le relative ampiezze di questi segnali mediante la MLE.

A partire dalle serie pulite, per ogni RS, viene prima effettuata la detrendizzazione dalla retta di regressione e quindi eseguita la GTS frequency (Appendice C) che consente il calcolo del periodogramma di Lomb-Scargle con all'interno la funzione di frequenza-potenza. Quindi sono state selezionate le prime cinque frequenze identificate dai picchi più potenti e valutate le relative ampiezze A e B mediante un approccio MLE. Dopo aver completato questa fase, il modello di ciascuna serie temporale delle RS può essere rappresentato dalla seguente equazione:

$$mod_i(t) = q_i + t * m_i + \sum_{k=1}^5 [A_i^k \sin(2 \pi f_i^k * t) + B_i^k \cos(2 \pi f_i^k * t)]$$

con: q intercetta, t tempo, m velocità, A e B ampiezze del segnale sinusoidale, f frequenza.

Il modello $mod_i(t)$ rappresenta il movimento reale della stazione nella componente (i), comprendente sia il contributo lineare che quello periodico. Nelle Figure 6.5-8 sono mostrati i grafici delle serie temporali assieme ai relativi modelli delle 4 RS calcolati con il suddetto approccio.

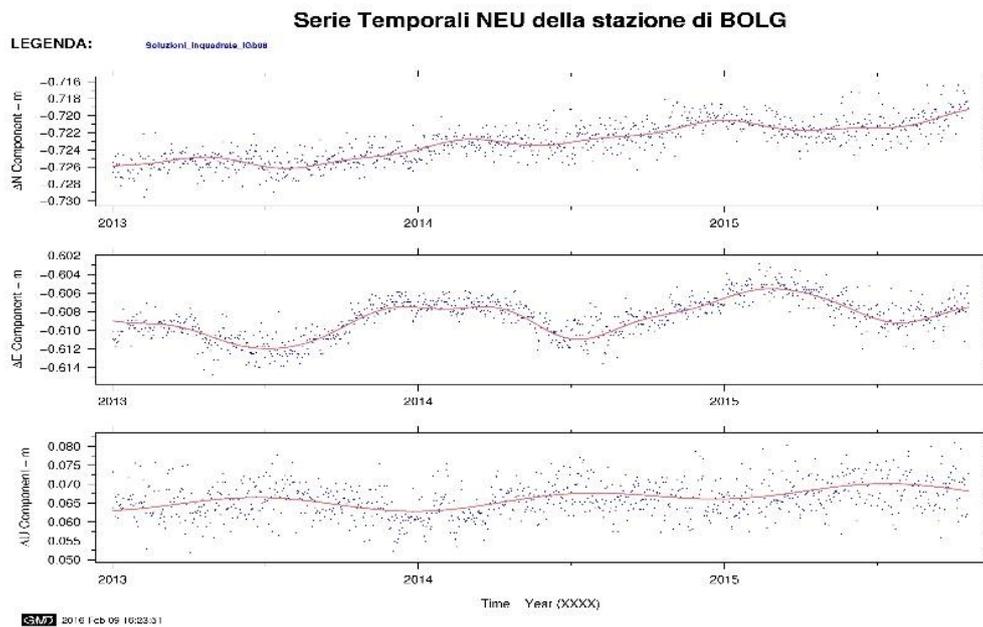


Figura 6.5 - Serie temporale della stazione BOLG con modello sovrapposto (rosso)

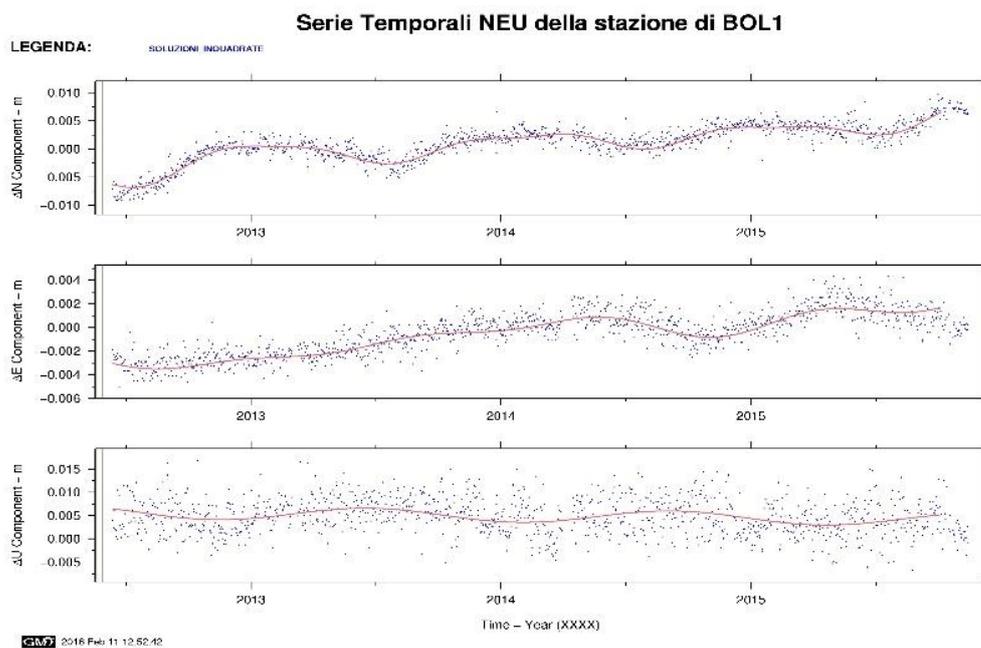


Figura 6.6 - Serie temporale della stazione BOL1 con modello sovrapposto (rosso)

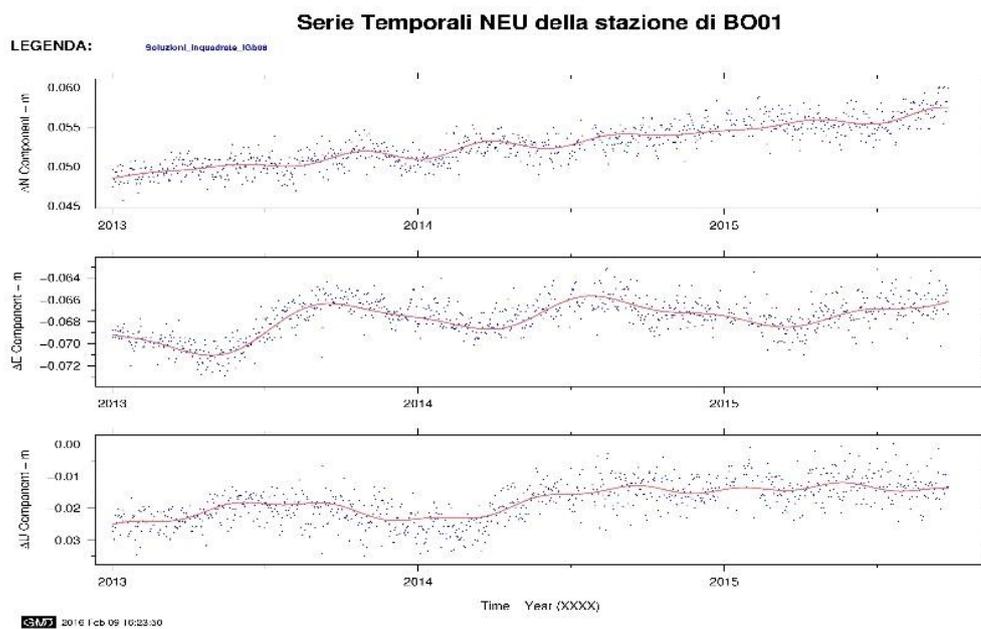


Figura 6.7 - Serie temporale della stazione BO01 con modello sovrapposto (rosso)

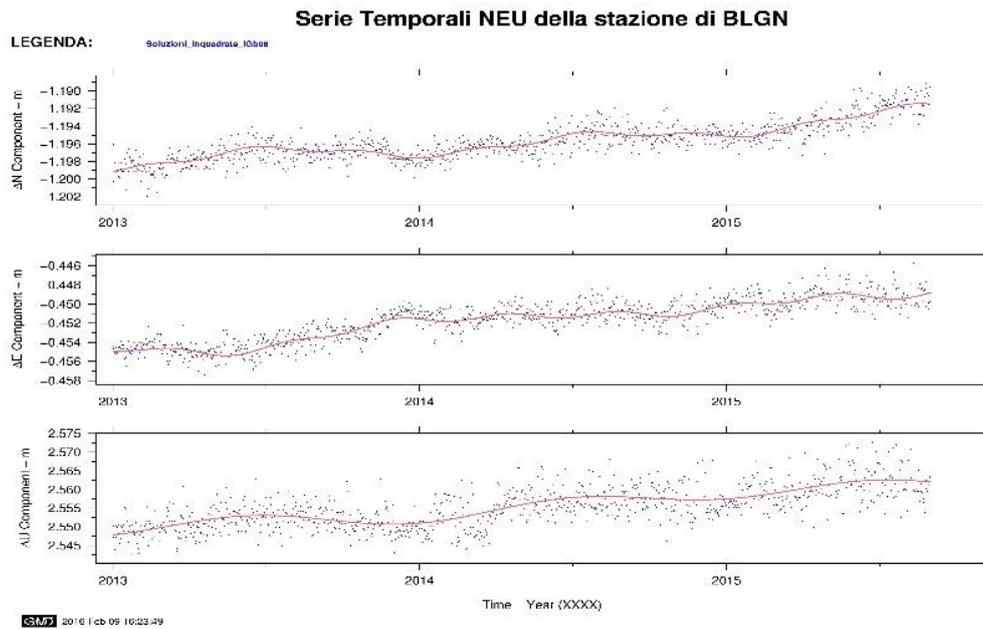


Figura 6.8 - Serie temporale della stazione BLGN con modello sovrapposto (rosso)

6.4.2. Risultati finali e discussione

I modelli completi delle RS, descritti nel paragrafo precedente (6.4.1), sono stati applicati alle serie temporali ottenute dalla elaborazione assumendo le RS come stabili. I risultati di questo secondo calcolo sono quattro nuove serie temporali, le quali dovrebbero considerare solo i movimenti locali e segnali della MS depurati da quelli delle RS. Al fine di valutare l'influenza dei modelli delle RS sui risultati della MS, le nuove serie temporali di BOGA sono state rappresentate nel sistema geodetico locale e analizzate come le serie precedenti, calcolando le velocità medie e coefficienti di correlazione. Le nuove serie temporali sono state rappresentate nello stesso grafico (Figura 6.9). Nella Tabella 6.5 sono elencati la stima delle velocità medie della MS e i loro rispettivi valori di RMS, sono anche riportate le medie ponderate dei valori delle velocità per ogni componente. La tabella 6.6 mostra i coefficienti di correlazione di Pearson, calcolati come in precedenza assumendo la soluzione $BOGA_{BOL1}$ come riferimento.

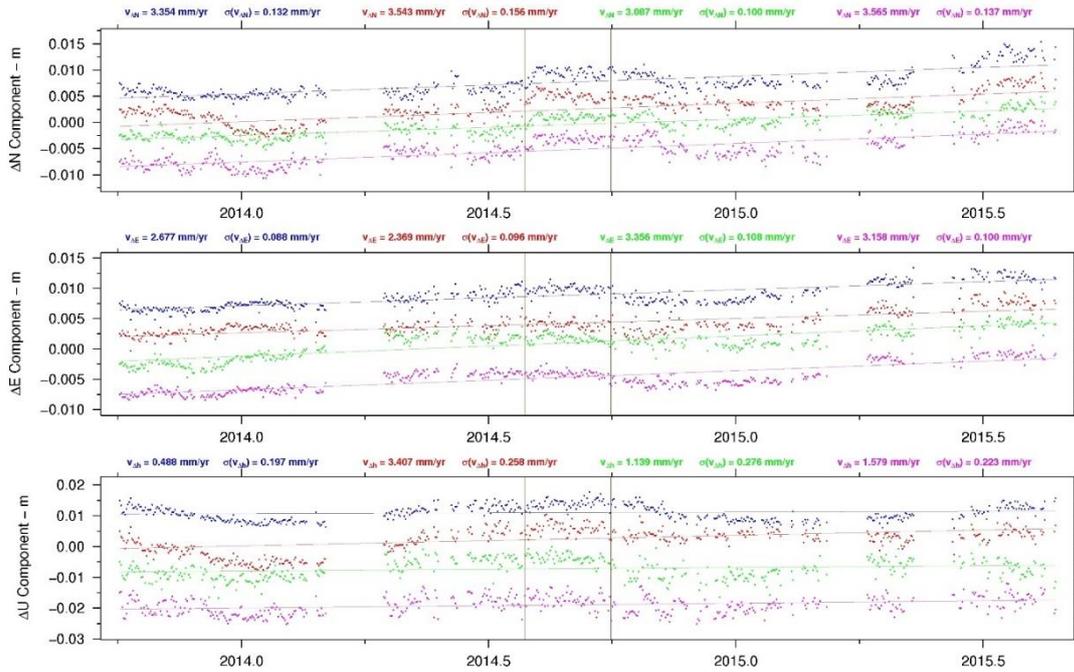


Figura 6.9 – Serie temporali di BOGA calcolate a partire dalle 4 RS e considerando i relativi modelli. Le serie temporali sono rappresentate in differenti colori: $BOGA_{BOL1}$ in blu, $BOGA_{BO01}$ in rosso, $BOGA_{BOLG}$ in verde e $BOGA_{BLGN}$ in magenta

Time Series	\bar{V}_N (mm/y)	$\sigma_{\bar{V}_N}$ (mm/y)	\bar{V}_E (mm/y)	$\sigma_{\bar{V}_E}$ (mm/y)	\bar{V}_U (mm/y)	$\sigma_{\bar{V}_U}$ (mm/y)
$BOGA_{BOL1}$	3.35	0.13	2.68	0.09	0.49	0.20
$BOGA_{BLGN}$	3.56	0.14	3.16	0.10	1.58	0.22
$BOGA_{BO01}$	3.54	0.16	2.37	0.10	3.41	0.26
$BOGA_{BOLG}$	3.09	0.10	3.36	0.11	1.14	0.28
weighted average	3.32		2.85		1.49	
RMS	0.23		0.45		1.27	

Tabella 6.5 – Velocità medie di BOGA, stimate dalle serie temporali ottenute considerando i modelli delle RS e gli SQM associati nelle 3 componenti geodetiche locali

Time Series	ρ_N	ρ_E	ρ_U
$BOGA_{BOLG}$	0.82	0.81	0.39
$BOGA_{B001}$	0.88	0.90	0.68
$BOGA_{BLGN}$	0.81	0.88	0.37
Average	0.84	0.86	0.48

Tabella 6.6 – Coefficienti di Pearson calcolati dalle serie ottenute applicando il modello delle RS, ottenuti assumendo come riferimento $BOGA_{BOL1}$

Le velocità medie di BOGA (Tabella 6.5) sono state stimate considerando modelli delle RS riferiti nel ETRF2000; per questo motivo, i valori delle velocità medie risultano di alcuni mm/anno.

Rispetto alle velocità medie della Tabella 6.2, i valori indicati nella Tabella 6.5 sono più conformi tra loro e, l'RMS della media ponderata delle velocità per ogni componente risulta inferiore, soprattutto per il componente N e h.

Come accennato in precedenza, le soluzioni della MS dovrebbero essere indipendenti dalle RS considerate e ogni serie temporale dovrebbe dare gli stessi risultati per la stazione BOGA. La Tabella 6.6 mostra i valori del coefficiente di correlazione che sono, in generale superiori a quelli relativi ai precedenti risultati (Tabella 6.3), in particolare nella componente h. Tale aumento suggerisce che tenendo in considerazione i modelli delle RS, e i movimenti e segnali di esse, è possibile ottenere un miglioramento del grado di accordo fra le quattro soluzioni.

Ovviamente, si sottolinea che questi risultati (Tabella 6.5) non rappresentano i movimenti reali della struttura in cui si trova la MS, ma rappresentano movimenti della struttura sommati alla velocità residua del sistema ETRF2000 nell'area di studio. Per questa ragione non può essere definita una procedura rigorosa per rimuovere la velocità residua dell'ETRF2000. Tuttavia, considerando le rispettive posizioni delle RS e della MS, può essere calcolata una media ponderata della velocità delle RS (Tabella 6.4); questi valori di velocità delle RS possono essere sottratti dalle velocità della MS in Tabella 6.5 e possono essere stimate delle velocità quasi residue della struttura (Tabella 6.7).

Time Series	\bar{V}_N (mm/y)	$\sigma_{\bar{V}_N}$ (mm/y)	\bar{V}_E (mm/y)	$\sigma_{\bar{V}_E}$ (mm/y)	\bar{V}_U (mm/y)	$\sigma_{\bar{V}_U}$ (mm/y)
<i>BOGA</i>_{BOL1}	0.76	0.46	1.16	0.54	-0.81	1.88
<i>BOGA</i>_{BLGN}	0.97	0.47	1.64	0.54	0.28	1.89
<i>BOGA</i>_{BO01}	0.95	0.47	0.86	0.54	2.11	1.89
<i>BOGA</i>_{BOLG}	0.49	0.46	1.84	0.54	-0.16	1.89
Weighted Average	0.78		1.37		0.36	
RMS	0.22		0.45		1.25	

Tabella 6.7 – Velocità residue della torre Garisenda

7. Confronto con dati di altri strumenti

7.1. Analisi correlazione con dati temperatura

Per cercare di dare un significato fisico agli spostamenti rilevati con la strumentazione GNSS si è pensato di incrociare i dati di queste serie temporali con i valori di altri sensori, come per esempio la temperatura rilevata mediante la stazione meteo (Figura 7.1).



Figura 7.1 - Stazione Meteorologica installata dall'impresa Tecno In

Sono stati quindi scaricati i dati della temperatura dal sito della TECNOIN, impresa

che installato il sistema di monitoraggio sulle due torri costituito da una serie di strumenti (si veda il Capitolo 4.2).

Successivamente sono state create le serie temporali della temperatura e quindi confrontate con la serie GNSS statica con soluzioni giornaliere nelle tre componenti geodetiche locali (Figura 7.2). Risulta evidente come i segnali periodici che caratterizzano le due tipologie di serie siano esattamente in fase con frequenza pari ad un anno. Ciò porta ad affermare che una delle principali cause dei movimenti della struttura possa essere attribuita alle variazioni della temperatura.

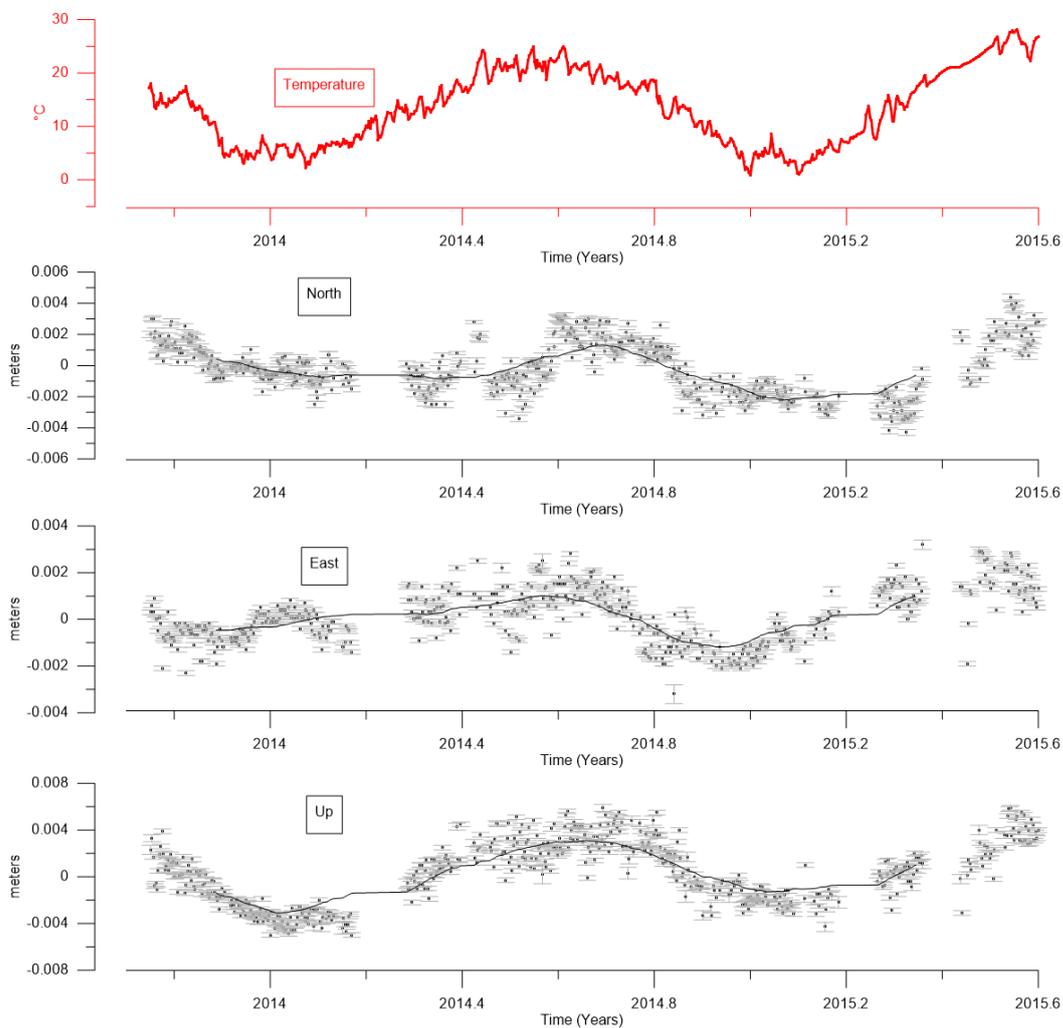


Figura 7.2 - Grafico confronto temperatura e serie temporale GNSS

7.2. Analisi correlazione con dati inclinometro

In secondo luogo è stato eseguito un ulteriore confronto con i dati degli inclinometri a doppio asse installati sulla torre Garisenda.



Figura 7.3 - Inclinometro Dual Axis modello ELS-XX-V

Di seguito sono brevemente elencate le principali caratteristiche tecniche di tali strumenti:

- Range di Misura $\pm 10^\circ \pm 5^\circ$
- Tensione di alimentazione 20-30 VDC
- Compensazione in temperatura $-20 + 70^\circ\text{C}$
- Alta resistenza agli shock meccanici
- Protezione IP67
- Housing in alluminio
- Connettore militarizzato MIL5015
- Resinatura interna dei componenti
- Opzioni uscita 4-20 mA o RS232

Gli inclinometri sono situati su 2 diversi lati della torre (Est e Sud) in tre quote differenti, per cui sono stati calcolati gli spostamenti a partire da i dati di inclinazione dei due lati.

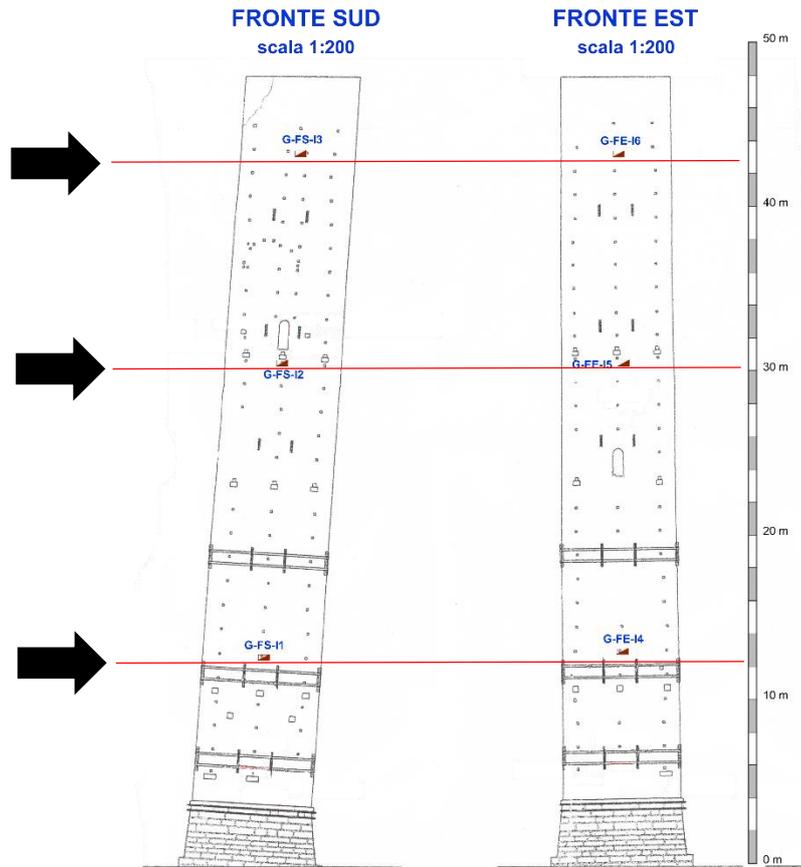


Figura 7.4 - Prospetto posizione inclinometri nella torre Garisenda

Per il calcolo si è ipotizzata la teoria del corpo elastico e sono state utilizzate le formule della scienza delle costruzioni. In particolare è stata immaginata la torre Garisenda come una mensola incastrata nella quale vengono applicate a seconda dei casi:

- 3 forze concentrate
- 3 momenti concentrati
- 1 carico distribuito.

Partendo dal primo caso con tre forze applicate è noto che la rotazione è data dalla equazione:

$$\varphi = \frac{FL^2}{2EJ}$$

con:

- F forza applicata
- L braccio cioè distanza tra gli inclinometri

- E modulo di Young o di elasticità
- J momento d'inerzia

Da tale relazione è possibile ricavare la forza F:

$$F = \frac{2\varphi EJ}{L^2}$$

Quindi, nota F e sapendo che gli spostamenti sono dati dall'equazione:

$$v = \frac{FL^3}{3EJ}$$

È possibile ottenere gli spostamenti in relazione ai dati di inclinazione e alle distanze tra gli inclinometri stessi:

$$v = \frac{2}{3}\varphi L$$

La Figura 7.5 mostra come è stato calcolato lo spostamento in corrispondenza dell'ultimo inclinometro situato a quota di circa 43m, quindi 5m al di sotto dell'antenna GNSS.

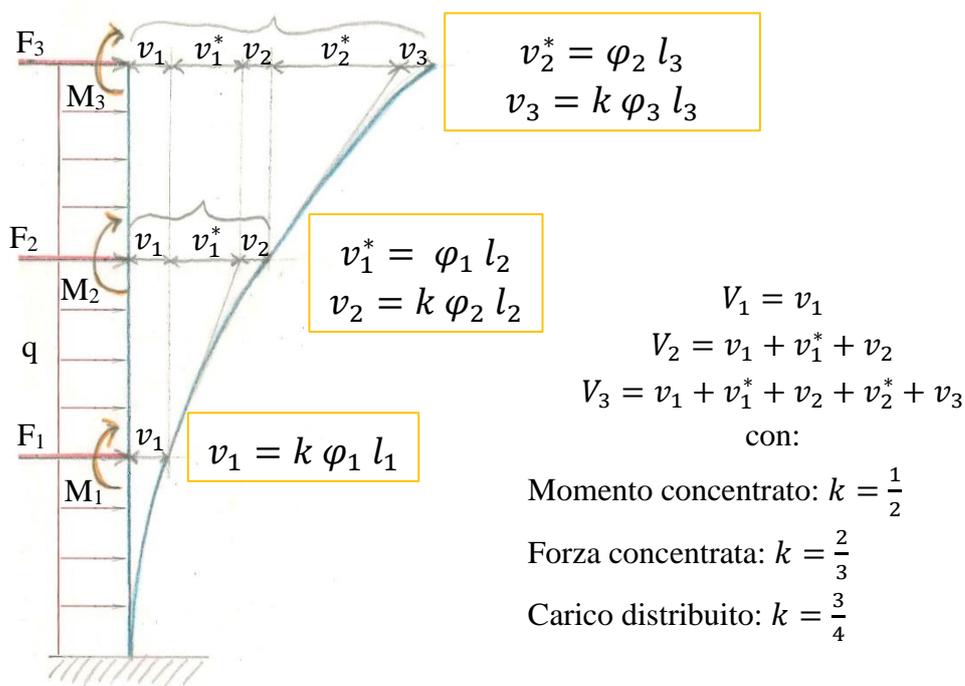


Figura 7.5 - Schema trave incastrata per il calcolo degli spostamenti a partire dai dati di inclinazione

Per poter confrontare questi dati con la serie temporale GNSS è necessario definire un sistema di riferimento univoco. È stato perciò calcolato l'angolo di rotazione tra il sistema di riferimento degli inclinometri (definito dalle direzioni delle pareti della torre) e il sistema geodetico locale a cui sono riferiti i dati GNSS.

Una volta determinato tale angolo α sono stati moltiplicati i vettori di spostamento, ottenuti dagli inclinometri, per la seguente matrice di rotazione:

$$R = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}$$

In questo modo anche spostamenti rilevati sono riferiti alle



le serie temporali degli dagli inclinometri direzioni Nord-Est.

Figura 7.6 - Schema rotazione assi della Torre per portarli nelle direzioni N-E

Successivamente è stata eseguita l'analisi del dominio delle frequenze mediante il Periodogramma di Lomb Scargle, che ha portato al calcolo delle prime cinque frequenze e le relative ampiezze così come è stato fatto per la serie GNSS. In questo

modo è stato possibile rappresentare il modello delle onde sinusoidali rappresentative degli spostamenti rilevati dagli inclinometri relative alle due direzioni Est e Nord, alle quali sono state sovrapposte le onde relative alla serie GNSS.

Visti i valori degli spostamenti calcolati a partire dagli inclinometri (ampiezze del segnale sinusoidale pari a 2.5 cm in Est e 5 cm in Nord) è stato necessario moltiplicare per un coefficiente pari a 7 la serie GNSS per poter essere confrontabile con la serie degli inclinometri.

La possibile motivazione di questa grande differenza tra le due serie può essere cercata nelle ipotesi postulate in partenza, cioè la supposizione che la torre Garisenda si comporti come un corpo elastico e nello specifico come una trave a mensola incastrata.

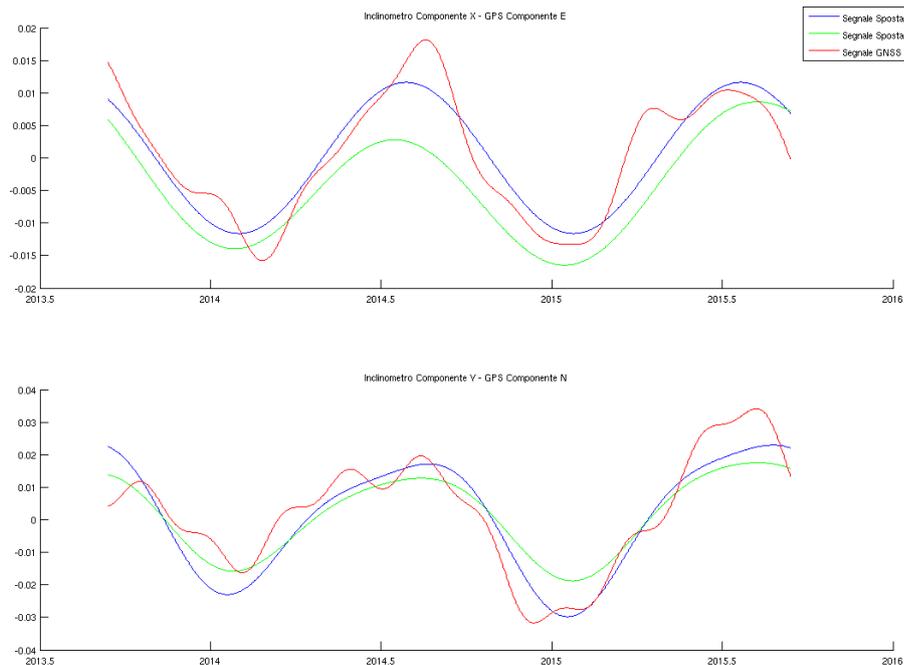


Figura 7.7 - Grafico confronto spostamenti calcolati con inclinometri e serie temporale GNSS

8. Monitoraggio di strutture per applicazioni nell'ambito dell'*early warning*

In questo capitolo si descrive una possibile tecnica per il monitoraggio di strutture per applicazioni nell'ambito *dell'early warning* eseguita attraverso l'elaborazione dei dati GNSS in modalità cinematica. A tale fine è necessario un sistema in grado di fornire posizioni in tempo reale e nel quale l'entità critica di spostamento è certamente individuabile dal sistema di monitoraggio.

Se le condizioni al contorno (visibilità satelliti, SNR, parametri DOP, presenza di ostacoli nelle vicinanze) fossero ottimali, allora le soluzioni calcolate rappresenterebbero già la miglior descrizione possibile del fenomeno studiato. Nella maggior parte dei casi reali purtroppo non si hanno tali condizioni favorevoli per cui le soluzioni calcolate sono spesso affette da sistematismi localizzati in particolari momenti della giornata e dovute a quanto sopra riportato.

Non solo, da alcuni test riportati in questo capitolo, si è riscontrato come il codice di calcolo utilizzato per la stima delle soluzioni possa giocare un ruolo importante ed inoltre, anche i parametri al contorno utilizzati per l'elaborazione dati possano portare a variazioni significative nelle soluzioni. Per questa ragione la prima parte del capitolo si focalizza sulle *performance* ottenibili da differenti codici di calcolo disponibili sul mercato, con particolare attenzione a quelli la cui applicazione sia possibile anche in modalità tempo reale. In questa sezione, per ogni codice si sono cercate le condizioni al contorno ottimali per ottenere una soluzione capace di seguire in modo soddisfacente movimenti, anche repentini, mantenendo però livelli di ripetibilità accettabili.

Una volta individuato, per il caso considerato, quale fosse il codice preferibile per un'applicazione di questa natura, si è passati all'analisi delle soluzioni per verificare l'eventuale possibilità di un ulteriore miglioramento a partire da quei possibili sistematismi di cui sopra. In particolare, nelle soluzioni ottenute, è stata riscontrata una periodicità pari ad un giorno siderale. Tale caratteristica delle soluzioni ha portato alla realizzazione di filtri sequenziali a partire da filtri siderali.

8.1. Sperimentazione del metodo di calcolo

Come detto nel paragrafo 3.2.3, esistono molti software per l'elaborazione dei dati GNSS in modalità cinematica. Nell'ambito del dottorato sono stati testati diversi software che utilizzano: un approccio di calcolo non differenziato (PPP) come Gipsy OASIS II, o un approccio differenziato come GNSS Solutions, Trimble Total Control, GoGPS e RTKLIB. Di seguito sono illustrati i risultati delle elaborazioni relativi ai differenti software. Il dataset utilizzato per questa sperimentazione è costituito da 15 giorni di dati RINEX (acquisiti ad 1 Hz) relativi al ricevitore GNSS posto sulla torre Garisenda. La baseline (Figura 8.1), di lunghezza pari ad 1,6 Km circa, viene calcolata a partire dalla stazione permanente BOL1 situata sul tetto del dipartimento di Geomatica (DICAM).



Figura 8.1 – Immagine baseline tra la stazione permanente BOGA posta sulla torre Garisenda e la stazione di riferimento BOL1 posta sul tetto del dipartimento

Nello specifico sono stati scelti i dati dal 15 al 29 dicembre 2013 (compreso) perchè, essendo non affetti da problemi di mancanza di segnale GSM in orario lavorativo (Paragrafo 5.2.2.2.1.), sono caratterizzati da una buona continuità di flusso.

Per ricercare le migliori soluzioni possibili, sono state effettuate numerose prove con i software geodetici sopracitati. In particolare, è emerso che il parametro che influenza maggiormente la qualità e la precisione dei risultati è l'angolo di *cut-off* e la scelta della frequenza portante. Le prove effettuate con *TTC* (Figura 8.4) ma soprattutto con *RTKLIB* (Figura 8.3) hanno dimostrato che la maschera di elevazione (cut-off) è un parametro in grado di cambiare significativamente, in particolari condizioni al contorno, sia l'accuratezza che la dispersione delle soluzioni. Ad esempio, quando la presenza di ostacoli limita la visibilità del cielo e produce effetti di multipath. La Figura 8.2 mostra a sinistra la visuale dei satelliti (Skyplot) dell'antenna GNSS situata sulla torre Garisenda dove è possibile notare la presenza di cycle slip (punti rossi) situati nella parte sud della mappa. A destra invece è rappresentato un grafico contenente i valori del multipath, il rapporto segnale rumore (SNR) e i gradi di elevazione del satellite. Si può notare come sia presente una forte correlazione tra il multipath e il SNR.

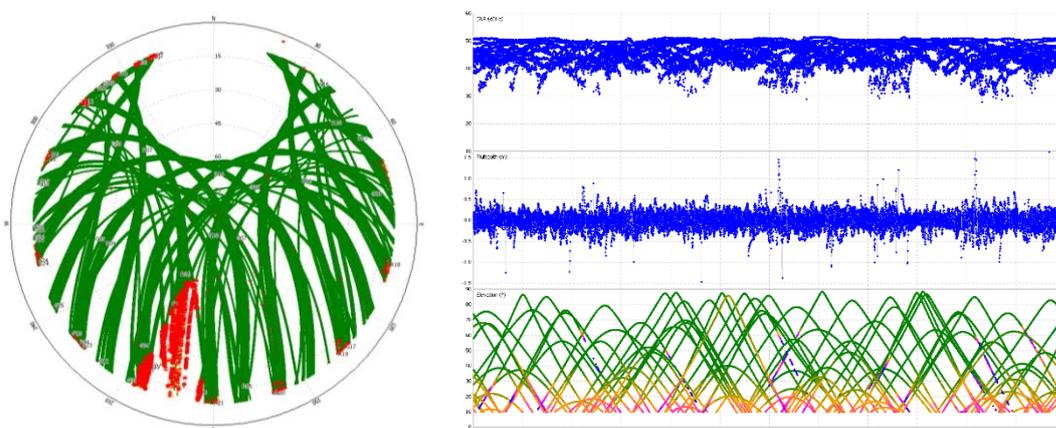


Figura 8.2- Immagine dello skyplot (a sinistra) e grafico dei valori di multipath, SNR, elevazione (a destra)

Per cui la soglia di elevazione che è risultata un compromesso tra un'alta precisione e un numero elevato di soluzioni calcolate è pari a 10° .

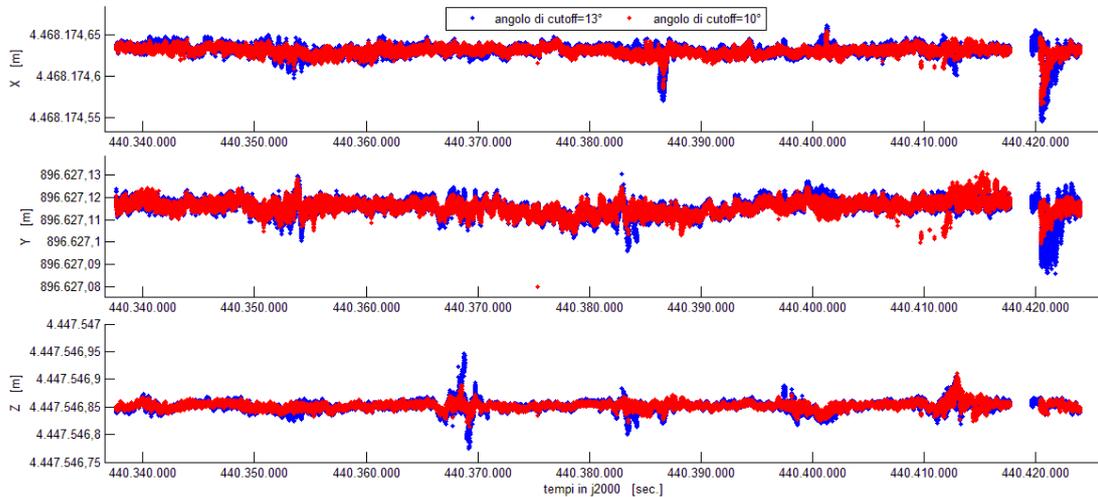


Figura 8.3 - Serie RTKLIB - Confronto angoli di cut-off

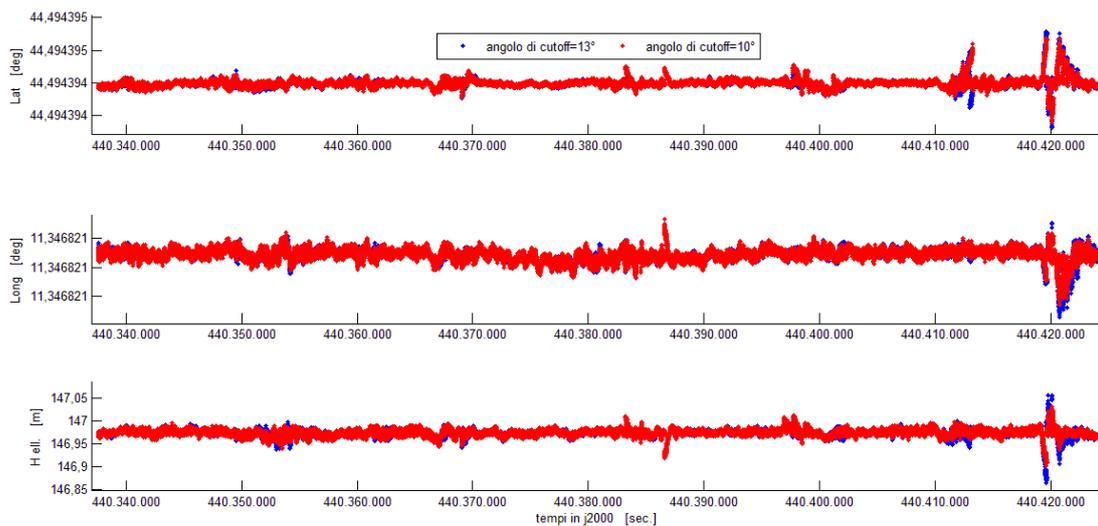


Figura 8.4 - Serie Trimble Total Control - Confronto angoli di cut-off

Per quanto riguarda le frequenze della portante, sono stati eseguiti differenti test confrontando la soluzione L1 rispetto la L1 + L2. Questo test ha dimostrato come l'utilizzo della sola frequenza L1 permetta di avere un maggior numero di soluzioni stabili (+ 10%), ma allo stesso tempo un RMS superiore (+ 22% in media). Per questa ragione si è deciso di utilizzare la combinazione L1 + L2.

Sono stati valutati ulteriori parametri all'interno del software goGPS e in particolar modo relativi al filtro di Kalman, rappresentati dal modello dinamico e dalla relativa

deviazione standard. Al fine di determinare tali parametri, è stato eseguito un test sperimentale utilizzando una stazione di calibrazione situata sul tetto del DICAM, sezione Geomatica (Figura 8.5).



Figura 8.5 - Stazione di Calibrazione materializzata mediante piattaforma micrometrica XYZ

Tale stazione è dotata di una piattaforma micrometrica XYZ su cui è possibile imporre spostamenti calibrati con una precisione del decimo di millimetro e consente di eseguire movimenti massimi di 7 centimetri nelle tre componenti XYZ (Sistema di riferimento locale).

Il test ha previsto l'imposizione di spostamenti pari a un centimetro in determinati orari ed l'analisi della sensibilità del software *goGPS* nel percepire in maniera precisa tali spostamenti.

Nel primo test è stato valutato l'impatto del modello statico sulla soluzione. Nella Figura 8.6, rappresentante la serie temporale, è chiaro come la soluzione non individua istantaneamente i movimenti ma lo fa asintoticamente dopo qualche ora. Ciò è spiegabile in quanto all'interno del filtro di Kalman il modello di previsione presenta un notevole peso rispetto alla posizione istantanea stimata.

L'utilizzo di questo modello non può quindi essere utilizzato come sistema di early warning in quanto, nonostante l'elevatissima ripetibilità dei risultati, non è in grado di "seguire" in modo corretto e in breve tempo eventuali movimenti.

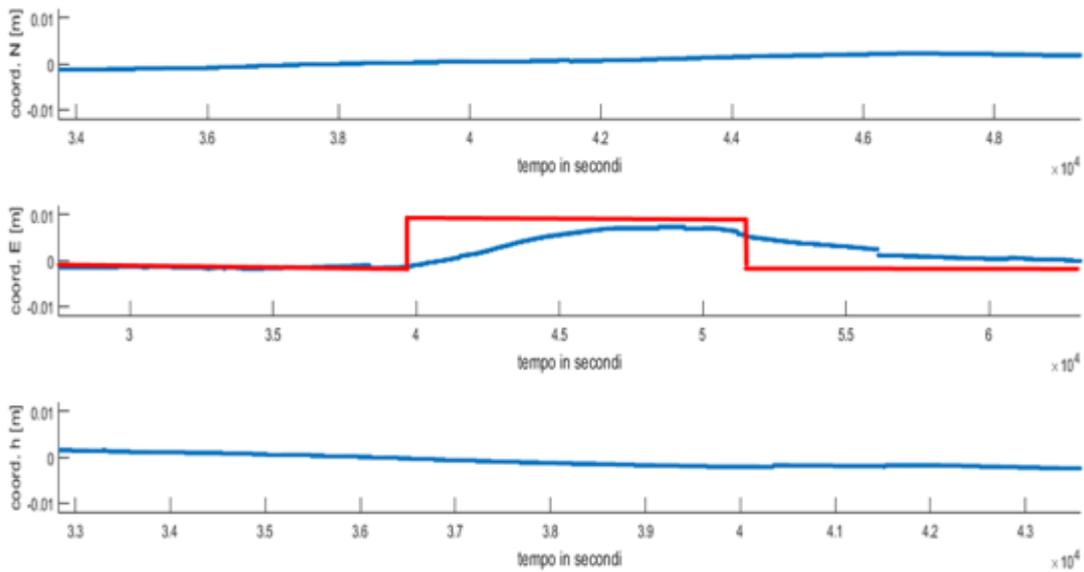


Figura 8.6 - Test calibrazione goGPS con modello statico - Confronto serie teorica (rossa) e serie calcolata (blu)

È stata eseguita quindi una seconda prova, impostando il modello dinamico a velocità costante, nella quale è emerso che tale approccio risulta migliore rispetto a quello precedente. Contemporaneamente, al fine di ottenere delle soluzioni sempre più precise, sono state condotte altre prove riducendo il valore della deviazione standard del modello (10^{-3} fino a 10^{-7}) nelle tre componenti geodetiche N,E,h.

Come si può osservare dalla Figura 8.7, la soluzione appare sempre più pulita al diminuire della deviazione standard.

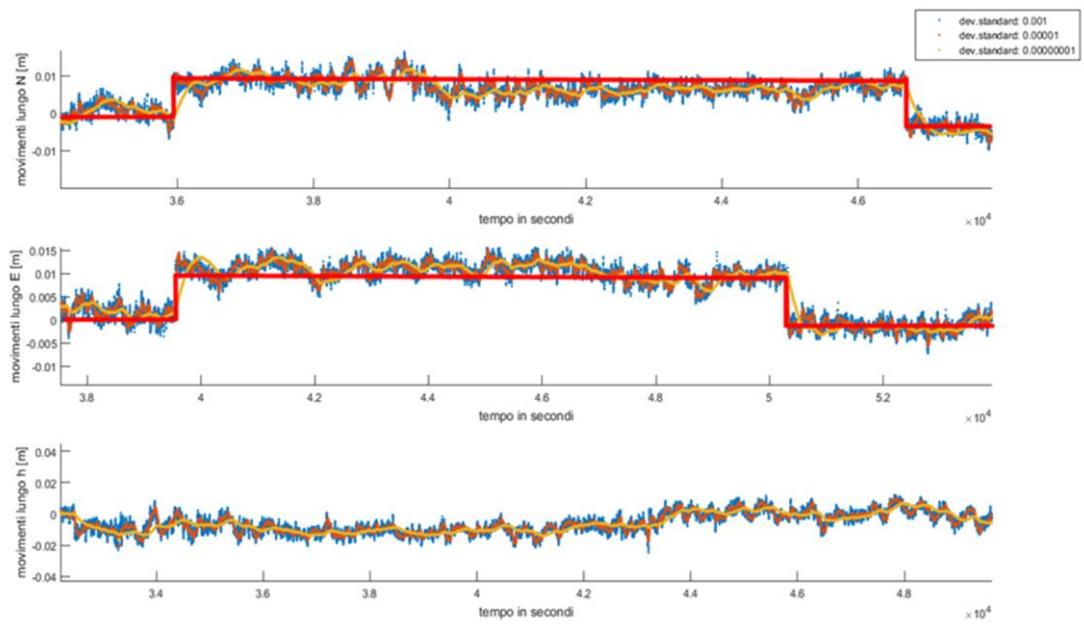


Figura 8.7 - Test calibrazione goGPS con modello a velocità costante

A valle di questi test sperimentali, si mostrano di seguito le tabelle di confronto tra i differenti software di calcolo GNSS (Tabella 7.1, 7.2) e le serie temporali grezze migliori, ottenute impostando i parametri di calcolo più performanti dei 15 giorni scelti (Figure 8.8-12).

SOFTWARE	STD Componente N (mm)	STD Componente E (mm)	STD Componente h (mm)
Gipsy-Oasis	6.7	4.1	8.6
RTKLIB	4.9	3.1	7.1
GNSS Solutions	497.1	342.7	704.3
TTC	7.5	3.5	22.6
goGPS	7.8	6	8.9

Tabella 8.1 - Valori della deviazione standard delle serie grezze dei diversi software di calcolo GNSS

SOFTWARE GNSS	Calcolo Automatico	Costellazioni GNSS	Outliers	Spike	Ripetibilità	Tempo Reale
Gipsy OASIS II	Si, in ambiente Linux	Solo GPS	Quasi assenti; Poco distanti dal valore medio della soluzione;	Presenti soprattutto nella componente Nord; Ricorsivi; Poco marcati;	Buona	No
RTKLIB	Si, in ambiente Linux e Windows	GPS, Glonass Galileo, QZSS, BeiDou	Presenti; Distanti al massimo 10 cm dal valore medio della soluzione;	Presenti soprattutto nelle componenti Nord e Quota; Ricorsivi; Marcati;	Molto Buona	Si, tramite TCP/IP, NTRIP, Seriale
GNSS Solutions	No	GPS, Glonass	Presenti in quantità eccessiva; Molto distanti dal valore medio della soluzione;	Presenti in tutte le componenti; Non ricorsivi; Molto marcati;	Pessima	No
Trimble Total Control	No	GPS, Glonass	Presenti in quantità limitata; Non eccessivamente distanti dal valore medio della soluzione;	Presenti in tutte le componenti; Ricorsivi; Molto marcati;	Buona	No
goGPS	Si, in ambiente Matlab	Solo GPS	Presenti; A volte molto distanti dal valore medio della soluzione;	Presenti; Ricorsivi; Poco marcati	Buona	Si, sono tramite NTRIP

Tabella 8.2 - Tabella riassuntiva di confronto tra i software GNSS

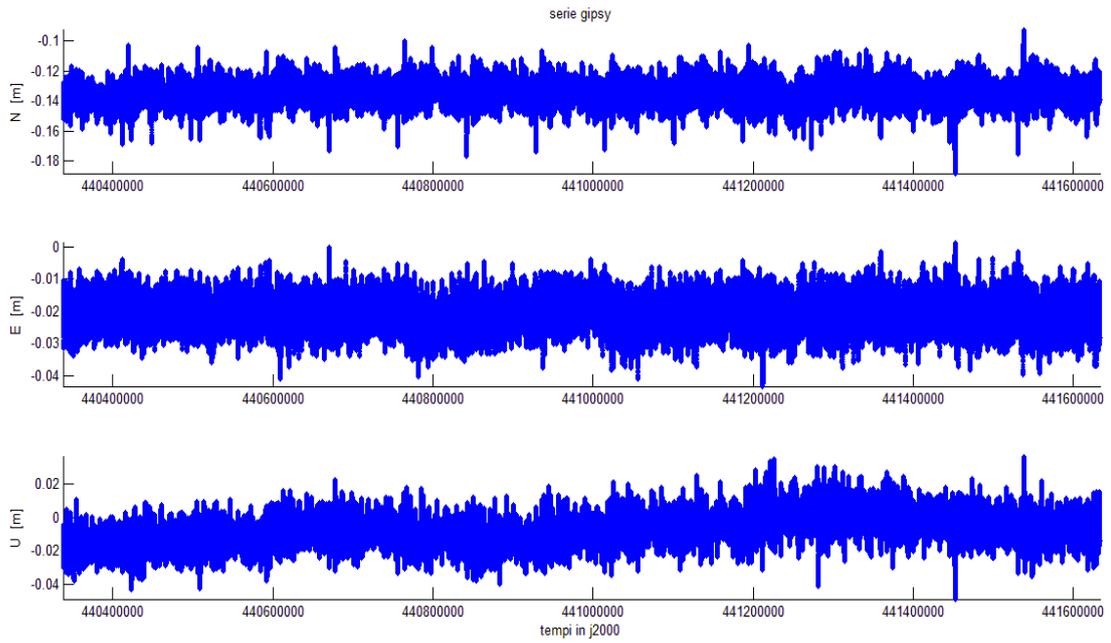


Figura 8.8 - Serie grezza Gipsy OASIS II

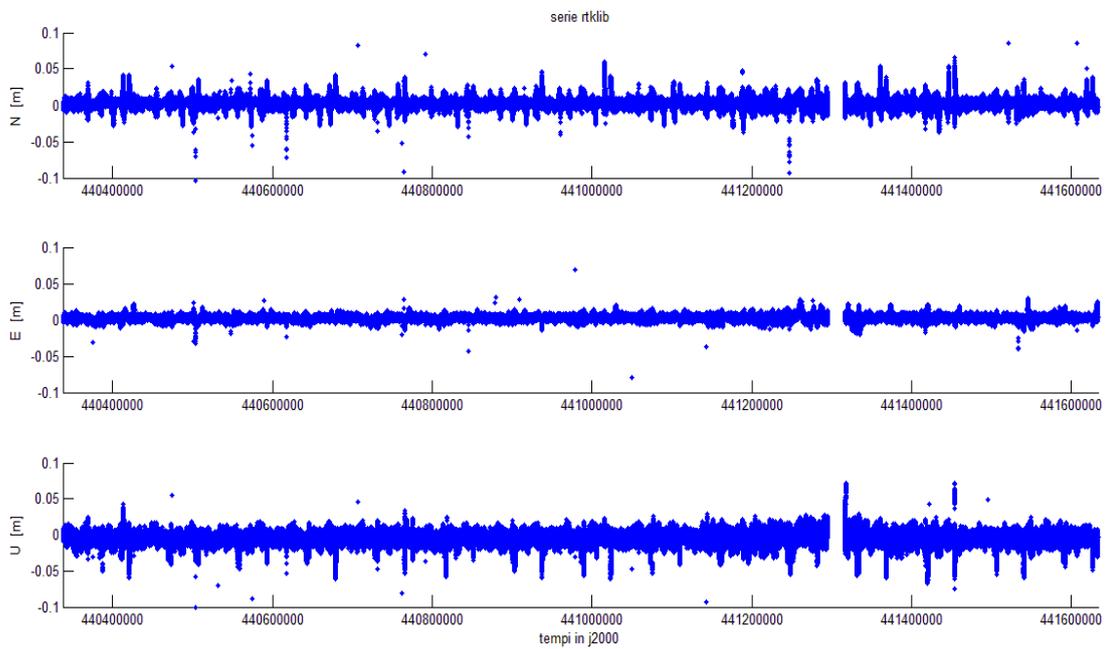


Figura 8.9 - Serie grezza RTKLIB

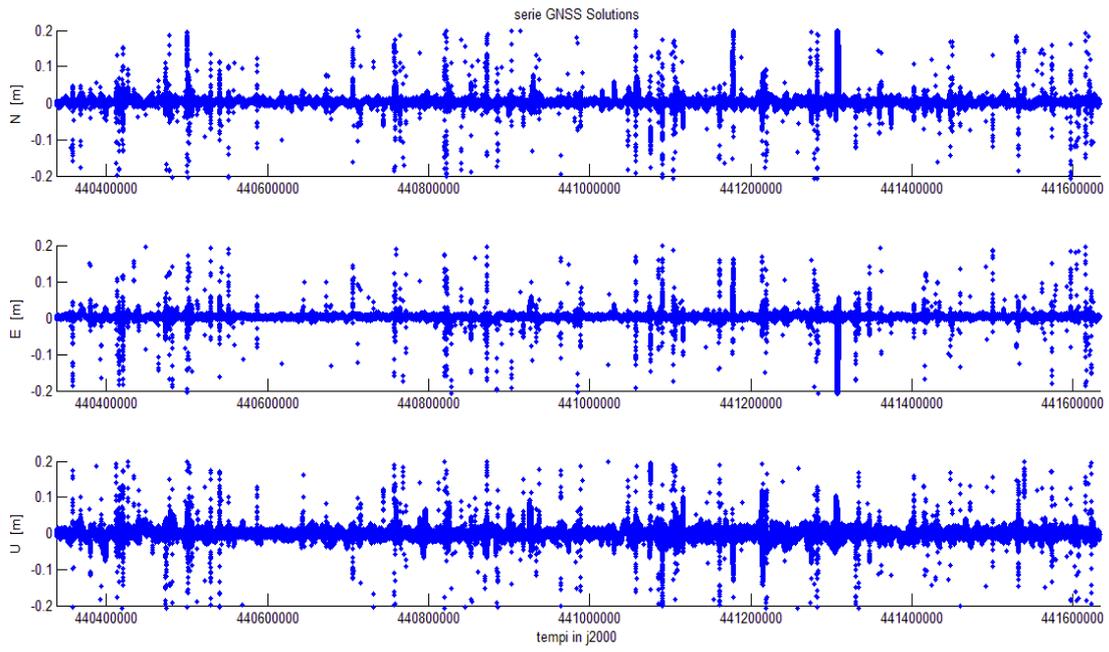


Figura 8.10 - Serie grezza GNSS Solutions

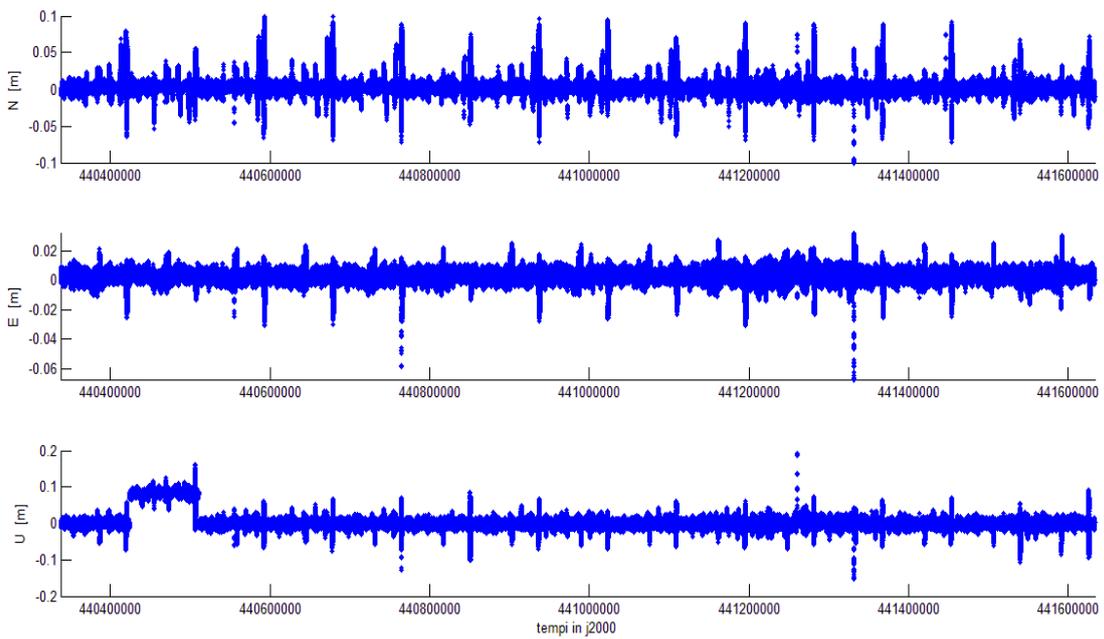


Figura 8.11 - Serie grezza Trimble Total Control

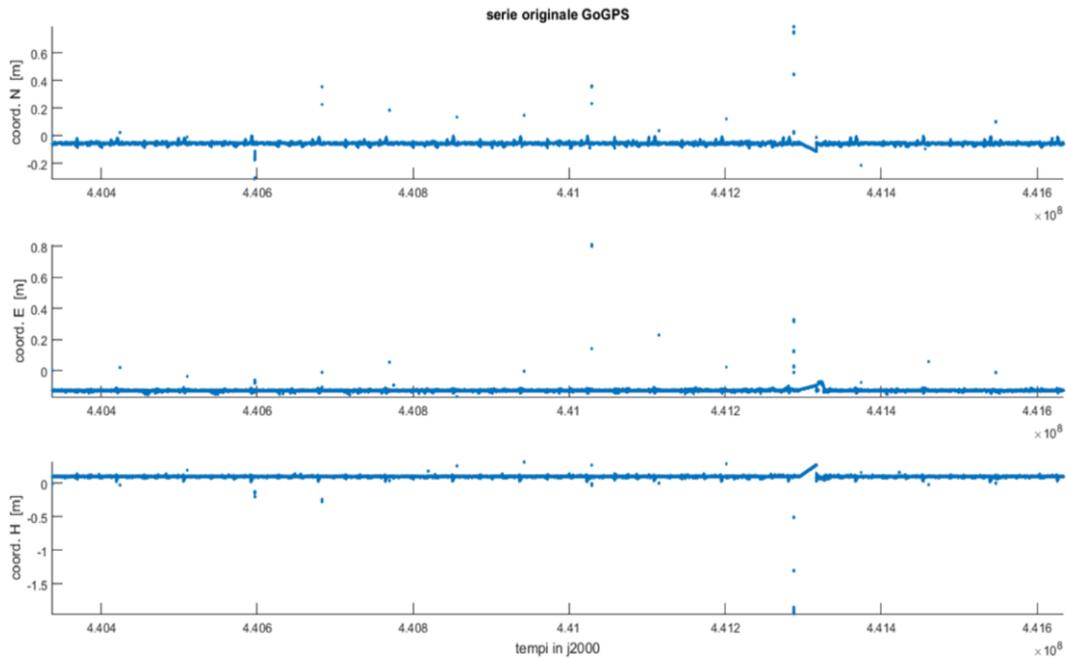


Figura 8.12 - Serie grezza goGPS

8.2. Scelta del software

Terminata la fase di confronto fra i differenti software, e noti i risultati soprattutto in termini di precisione, si è scelto di utilizzare RTKLIB per la sperimentazione dei filtri sequenziali. L'elaborazione dei dati è avvenuta mediante uno script Perl creato appositamente che richiama l'eseguibile *RNX2RTK* necessario al calcolo (Paragrafo 3.2.3.4).

A partire dalle considerazioni fatte nel paragrafo precedente (7.1), di seguito sono riportati i principali parametri adottati nel calcolo:

- Costellazioni: GPS+GLONASS
- Osservabili: Carrier Phase
- Frequenze: L1+L2
- Modalità di Posizionamento: kinematic (approccio differenziato)
- Tipo di Filtro: Forward
- Ionosfera: Broadcast
- Correzione della Troposfera: Saastamoinen

- Satellite Effemeridi/Clock: IGS Precise
- Campionamento dei Dati: 1Hz
- Angolo di cut-off: 10°

8.3. Risultati grezzi

Tutti i risultati ed i grafici sono stati rappresentati in un sistema di riferimento geodetico locale, dove l'origine è stata definita calcolando la media delle soluzioni statiche dei 15 giorni. La ragione di questa scelta è dovuta all'esigenza di separare le componenti planimetriche da quelle altimetriche, per una migliore interpretazione dei dati.

In Figura 8.13 è riportata la serie temporale dei 15 giorni analizzati nelle tre componenti geodetiche, nelle quali sono evidenti alcuni effetti sistematici ricorsivi, già osservati nel paragrafo 7.1. È improbabile che essi rappresentino un reale movimento della struttura. Per questa ragione, sono state studiate in dettaglio le soluzioni ed è stata valutata la possibilità che i problemi di stima delle coordinate possano essere dovuti alla configurazione delle costellazione dei satelliti.

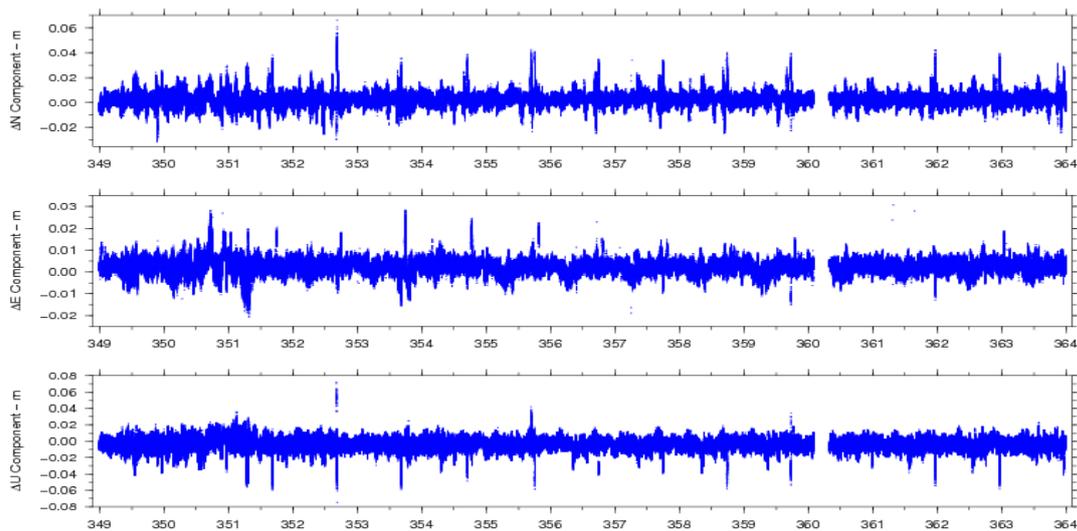


Figura 8.13 – Serie temporale pulita dei 15 giorni analizzati

Un altro risultato interessante riguarda la dispersione delle soluzioni che appare superiore nella componente Nord rispetto a quella Est. Tale fenomeno è piuttosto

inusuale per il posizionamento con tecnica GNSS, ma potrebbe essere spiegato considerando l'ostacolo costituito dalla torre Asinelli situata a Sud rispetto la torre Garisenda.

8.4. Autocorrelazione

Come detto in precedenza, sono evidenti i picchi presenti nella serie dei 15 giorni elaborati. La Figura 8.14 mostra la sovrapposizione di 3 giorni siderali dove risulta chiaro il comportamento ricorsivo delle serie. Per questo motivo è stata studiata con metodi statistici la presenza di tali picchi regolari all'interno della serie temporale completa mediante l'applicazione della funzione di autocorrelazione (Cliff & Ord 1973).

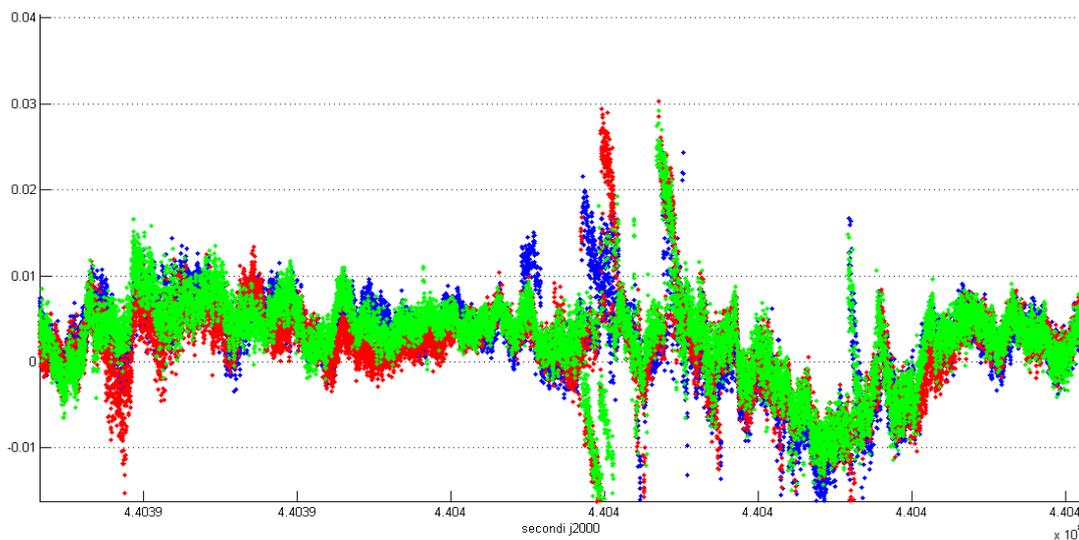


Figura 8.14 – Esempio di correlazione tra differenti giorni

La suddetta funzione viene usata generalmente nella teoria dei segnali per l'analisi delle serie storiche. Essa è la correlazione incrociata (cross-correlazione) del segnale con se stesso; in altri termini, il valore del segnale ad un certo istante t viene confrontato con un altro valore di se stesso ritardato di una quantità pari a τ per verificare quanto ne sia affine all'aumentare del tempo. L'autocorrelazione è definita dalla seguente formula:

$$R_x(\tau) = \sum_{t=-\infty}^{\infty} X(t) * X(t + \tau)$$

In cui:

- “ τ ” è lo sfasamento della serie su se stessa;
- X sono i valori della funzione e in questo caso X rappresenta l'insieme delle coordinate di cui si vuole calcolare l'autocorrelazione;
- “t” è l'epoca associata alla coordinata di cui si vuole calcolare l'autocorrelazione.

In Figura 8.5 viene mostrato il grafico della funzione applicata alla serie totale, dove si possono vedere che i picchi più grandi sono situati a circa 86164 secondi l'uno dall'altro. Tale periodo rappresenta il giorno siderale (Radovanovic 1998), cioè il tempo che un satellite GPS impegna a ritornare nella stessa posizione.

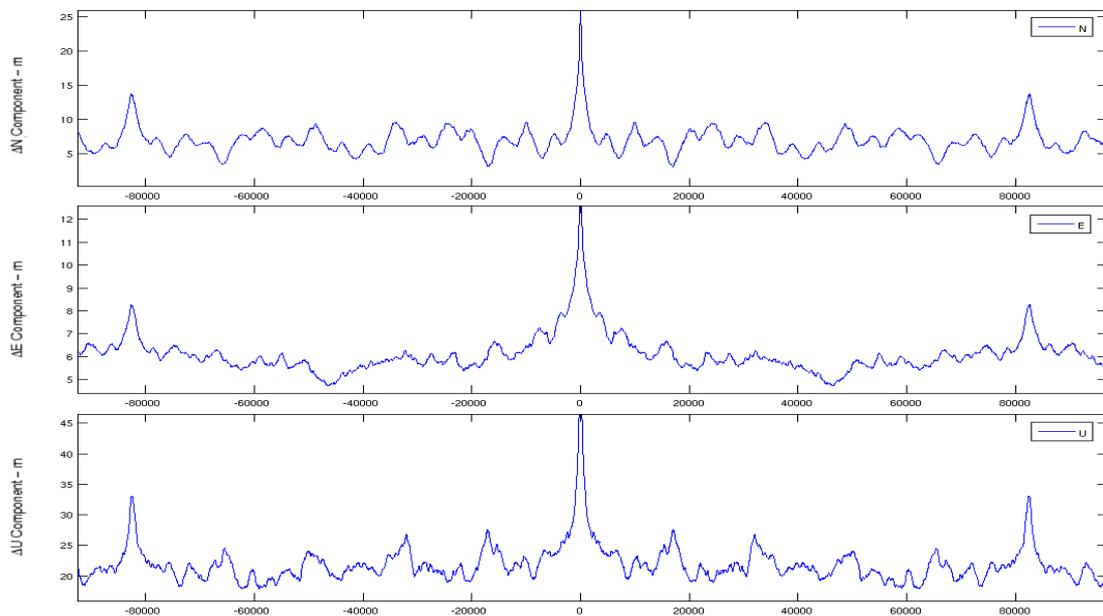


Figura 8.15 – Grafico della funzione di autocorrelazione nelle 3 componenti geodetiche locali

8.5. Filtri sequenziali

8.5.1. Introduzione

Come è noto, le tecniche di elaborazione dei dati GNSS consentono l'eliminazione di numerosi errori spazialmente correlati, sfruttando la differenziazione o la combinazione delle fasi. Tali errori influenzano in modo analogo zone limitrofe della superficie e sono rappresentati dagli errori: d'orbita dei satelliti, ionosferici e troposferici.

Gli effetti non spazialmente correlati (errori sulla posizione dei centri di fase delle antenne, riflessioni multiple o multipath, errori residui sull'orologio del ricevitore, noise del ricevitore) possono essere parzialmente ridotti mediante l'utilizzo di antenne di classe geodetica con certificato di calibrazione, antenne choke ring (Figura 8.16) o ricevitori contenenti algoritmi di attenuazione del multipath.



Figura 8.16– Esempio di antenna choke ring

Un'alternativa che agisce in fase di post elaborazione e della quale sono stati condotti numerosi studi, riguarda i metodi di indagine su questi effetti a partire dalle soluzioni dei giorni precedenti. Come è noto, diversi lavori hanno definito differenti tecniche per la mitigazione degli effetti del multipath a partire dalle coordinate calcolate (Bock et al. 2000; Forward et al. 2003; Ragheb et al. 2007). Partendo dallo stato dell'arte la presente tesi propone un metodo per ridurre gli effetti periodici a partire da un modello

generato utilizzando una serie di soluzioni calcolate nei precedenti giorni di acquisizione. Tutti i risultati sono stati applicati al caso di studio della Torre Garisenda nella quale vi è un tipico esempio di problematiche di multipath e occlusione di una parte della costellazione satellitare dovuta alla vicinanza della torre Asinelli.

Per capire quale correlazione intercorre tra i picchi della serie e alcuni parametri statistici stimati in fase di calcolo, è stata realizzata una immagine (Figura 8.17) che ha messo in relazione questi termini:

- I–III riga: la serie temporale nelle 3 componenti geodetiche (E, N, h)
- IV–VI riga: il rapporto segnale rumore (SNR), i valori del multipath, l’elevazione dei satelliti con rappresentato il SNR tramite la gradazione di colore (verde per SNR elevato e rosso per SNR basso) per la frequenza L1
- VII–IX riga: stessi parametri precedenti ma relativi alla frequenza L2
- X riga: il numero di satelliti in vista
- XI riga: parametri DOP (dilution of precision) che forniscono una misura della bontà della configurazione satellitare, con GDOP (linea gialla), PDOP (linea fuxia), VDOP (linea rossa), HDOP (linea blu)

Ricordando che i parametri DOP si calcolano a partire dalla seguente matrice:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{(x_1 - x)}{R_1} & \frac{(y_1 - y)}{R_1} & \frac{(z_1 - z)}{R_1} & -1 \\ \frac{(x_i - x)}{R_i} & \frac{(y_i - y)}{R_i} & \frac{(z_i - z)}{R_i} & -1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{(x_n - x)}{R_n} & \frac{(y_n - y)}{R_n} & \frac{(z_n - z)}{R_n} & -1 \end{bmatrix}$$

Dove:

- (x_i, y_i, z_i) sono le coordinate del satellite “i”;
- (x, y, z) sono le coordinate dell’antenna a terra;
- $R_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}$ è il vettore che collega l’antenna con ogni i-esimo satellite.

Successivamente si calcola la matrice varianza–covarianza:

$$C = (A^T A)^{-1} \sigma^2 = \begin{bmatrix} \sigma_N^2 & \sigma_{NE} & \sigma_{Nh} & \sigma_{Nt} \\ \sigma_{NE} & \sigma_E^2 & \sigma_{Eh} & \sigma_{Et} \\ \sigma_{Nh} & \sigma_{Eh} & \sigma_h^2 & \sigma_{ht} \\ \sigma_{Nt} & \sigma_{Et} & \sigma_{ht} & \sigma_t^2 \end{bmatrix} = D \sigma^2$$

Da cui si possono ricavare i vari parametri utilizzando le seguenti espressioni:

$$PDOP = \frac{\sqrt{\sigma_N^2 + \sigma_E^2 + \sigma_h^2}}{\sigma} = \sqrt{D_{11} + D_{22} + D_{33}}$$

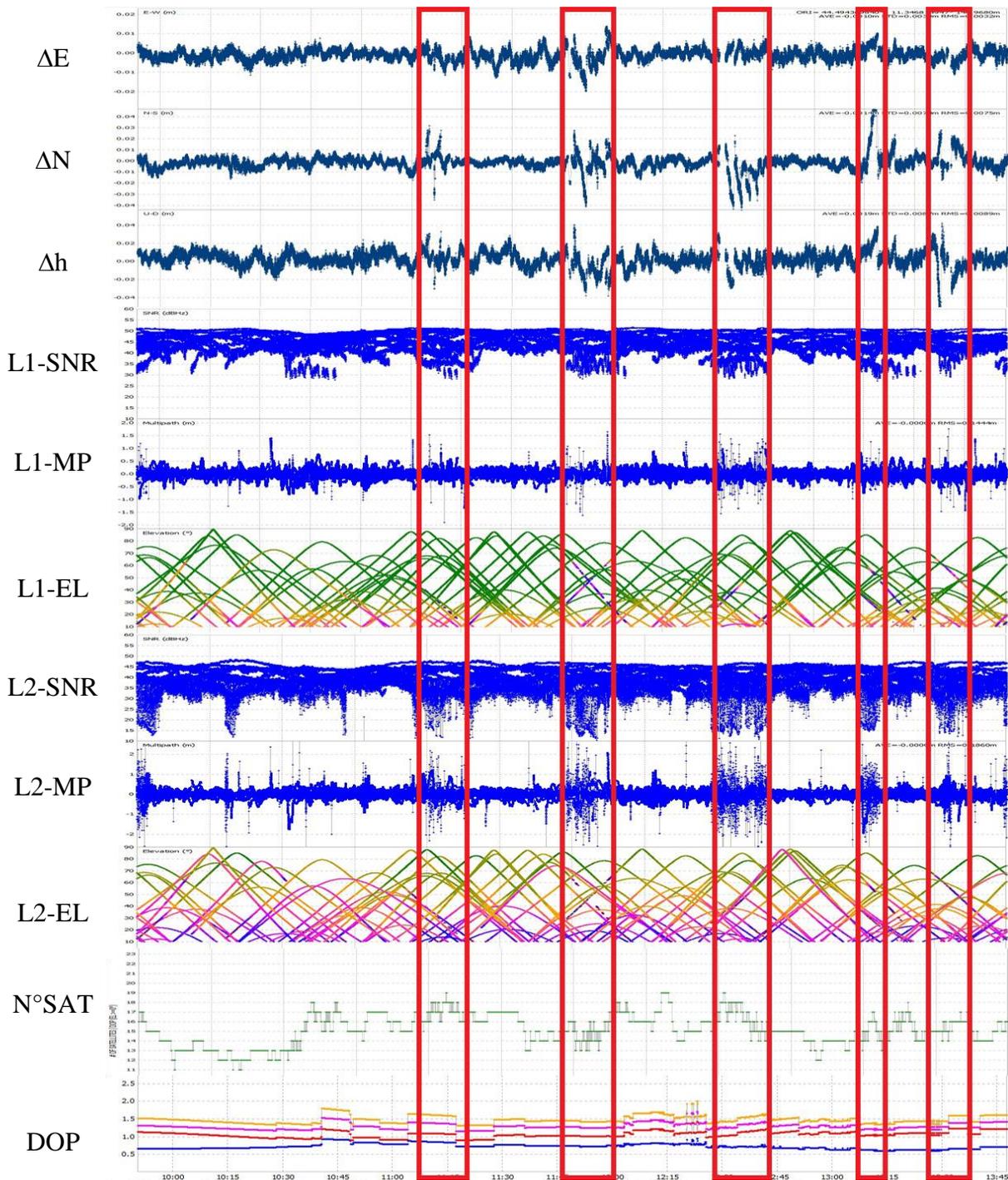
$$TDOP = \frac{\sqrt{\sigma_t^2}}{\sigma} = \sqrt{D_{44}}$$

$$GDOP = \sqrt{PDOP^2 + TDOP^2}$$

$$HDOP = \frac{\sqrt{\sigma_N^2 + \sigma_E^2}}{\sigma} = \sqrt{D_{11} + D_{22}}$$

$$VDOP = \frac{\sqrt{\sigma_h^2}}{\sigma} = \sqrt{D_{33}}$$

Si può osservare dalla Figura 8.17 che la frequenza L2 sia nettamente più rumorosa rispetto la L1 come è noto dalla letteratura (Teunissen et al. 1998). Inoltre è stata evidenziata la correlazione tra gli spike della serie temporale, i valori bassi di del rapporto segnale-rumore e i valori elevati (positivi e negativi) di multipath.



8.5.2. Procedura di creazione dei filtri

Figura 8.17 - Immagine riassuntiva di tutti i parametri calcolati da RTKLIB

I risultati ottenuti applicando la funzione di autocorrelazione evidenziano un effetto ricorsivo con ampiezza pari ad un giorno siderale. Questo effetto non è dovuto ai movimenti della struttura e può essere ridotto mediante la creazione di un modello.

Tale modello si basa sulle soluzioni relative a giorni precedenti e dovrà quindi avere una lunghezza equivalente ad un giorno siderale.

Per crearlo devono essere eseguiti diversi passaggi. Il primo consiste nel rigetto dei valori anomali. Quest'operazione è stata eseguita per mezzo di un procedimento iterativo basato sull'ipotesi di moto lineare della soluzione per una finestra temporale molto corta. La serie temporale viene divisa in piccole parti soprattutto per preservare il modello principale di andamento della serie e rimuovere solamente i singoli valori anomali. Per fare questo, ogni giorno è stato suddiviso in 30 periodi, costituiti da 2880 secondi ciascuno, e successivamente è stata calcolata la regressione lineare per ogni componente, utilizzando il classico approccio ai minimi quadrati pesati (weighted least square approach).

È stato ipotizzato come peso per il calcolo l'inverso della varianza formale derivante dall'elaborazione. In questo modo sono stati ottenuti per ciascun periodo la pendenza m^i e l'intercetta q^i dell'asse y della regressione lineare consentendo così il calcolo dei residui $v^i(t)$:

$$v^i(t) = S^i(t) - [q^i + m^i * t]$$

dove $S^i(t)$ rappresenta la soluzione della i-esima componente (ΔN , ΔE , Δh) al tempo t.

Un ciclo iterativo è stato usato per cercare e rimuovere l'outlier più grande rispetto i residui massimi, sapendo che σ è la deviazione standard, calcolata come:

$$\sigma^i = \sqrt{\frac{\sum_n v^i(t)^2}{n}}$$

Dove n è il numero di soluzioni per ogni blocco (max {n} = 2880).

Si assume che una soluzione viene considerata come anomala quando una delle tre componenti dei residui associati è più grande di 3 volte rispetto la deviazione standard

associata. Quindi se una soluzione viene considerata come outlier e perciò rimossa dalla serie, allora tutta la sequenza, comprensiva del calcolo della regressione e rigetto dei valori anomali, dovrà essere rieseguita nuovamente.

Tale serie senza outliers ($C^i(\tau)$) sarà successivamente utilizzata per la generazione del filtro siderale. A partire da questa serie giornaliera pulita, vengono poi creati file giornalieri siderali (caratterizzati da una lunghezza temporale pari ad un giorno siderale – 86164 secondi). Da questi file viene quindi creato un modello giornaliero siderale mediante l'applicazione della media mobile ponderata con ampiezza pari a $2r + 1$ secondi. Per le prime e le ultime r epoche di ogni giorno siderale, sono stati presi i dati del giorno siderale precedente o successivo in modo da creare un modello che contenga anche le code.

Il parametro r è stato scelto effettuando numerosi test nei quali è risultato che il valore che permette la creazione di un miglior modello è per $r = 101$ secondi. In questo test sono stati sperimentati valori tra 31 e 401 secondi e si è visto come per valori troppo piccoli non vi è una completa rimozione del rumore bianco, mentre per valori eccessivamente elevati non è possibile modellare i movimenti rapidi.

Per ogni blocco di dimensione pari a $2r + 1$ secondi è stato quindi calcolato il valore della media mobile ponderata utilizzando la seguente equazione:

$$m^i(t^*) = \frac{\sum_{\tau=i-r}^{i+r} \frac{C^i(\tau)}{(\sigma^i(\tau))^2}}{\sum_{\tau=i-r}^{i+r} \frac{1}{(\sigma^i(\tau))^2}}$$

Con:

$$t^* = \frac{\sum_{\tau=i-r}^{i+r} \tau}{2r + 1}$$

Dove $\sigma^i(\tau)$ rappresenta l'errore formale associato alla soluzione $C^i(\tau)$, $m^i(t^*)$ rappresenta il valore del modello per la i -esima componente al tempo t^* e t^* rappresenta il tempo medio dei valori considerati.

In caso di mancanza di dati nella serie pulita, il valore della media mobile sarà situato per definizione al tempo medio rispetto i dati considerati. In questo modo il modello

creato non sarà equamente spaziato con valori del tempo interi. Al fine di normalizzare quest'aspetto, è stato eseguito un ricampionamento del modello mediante una interpolazione lineare, generando così il modello finale costituito da 86164 valori interi (secondi siderali).

Viene infine assunto m^{ik} come modello finale ricampionato per il k-esimo giorno e la i-esima componente. È importante sottolineare che con questo metodo i modelli siderali sono sempre pieni e quindi può essere stimato un modello per ogni giorno siderale. Il modello di lisciamiento per la soluzione cinematica del generico k-esimo giorno potrebbe essere costruito utilizzando una media di più modelli di (d) giorni precedenti. Definito questo modello di lisciamiento M^{ikd} come:

$$M^{ikd} = \frac{m^{i(k-1)} + \dots + m^{i(k-d)}}{d}$$

La soluzione filtrata sarà calcolata come:

$$F^{ikd}(t) = C^{ik}(t) - [M^{ikd}(t) - \bar{M}]$$

con \bar{M} media del modello M^{ikd}

Vista l'assenza di movimenti strutturali nel periodo dei dati elaborati, possono essere presi in considerazione la deviazione standard della serie temporali $C^{ik}(t)$ e $M^{ikd}(t)$ per valutare la ripetibilità delle soluzioni.

8.5.3. Risultati finali e discussione

La Tabella 7.4 mostra i valori delle precisioni, definite mediante la deviazione standard, delle serie cinematiche giornaliere. Particolare attenzione è stata prestata alla valutazione del parametro d che rappresenta il numero di giorni utilizzati per la creazione del filtro sequenziale. In questo caso di studio sono stati considerati modelli con d variabile tra 1 e 8 giorni. Ovviamente non ci sono le statistiche del primo giorno in quanto non è stato possibile applicare nessun tipo di modello. Discorso analogo fino

all'ottavo giorno, in quanto si può applicare un modello pari a $d = k - 1$. Si è scelto di mostrare tutte le statistiche dei 15 giorni ma evidenziando in maniera differente (colore blu) i giorni in cui era possibile applicare tutti i tipi di filtri (dal nono giorno in poi). Per ragioni di spazio la tabella è stata divisa in due parti riportando sempre i valori di riferimento dati dalla serie pulita. In rosso sono stati evidenziati invece i valori delle serie filtrate utilizzando modelli precedenti da quello selezionato. Infine sono stati inseriti i valori medi di ogni componente e il valore medio totale di ogni serie analizzata, per avere un quadro riassuntivo del funzionamento di ogni filtro rispetto la serie pulita di partenza.

k	Serie Pulita			d = 1			d = 2			d = 3			d = 4		
	N	E	h	N	E	h	N	E	h	N	E	h	N	E	h
2	5,50	3,16	7,21	3,41	2,06	5,17	3,41	2,06	5,17	3,41	2,06	5,17	3,41	2,06	5,17
3	6,07	2,98	7,23	3,58	1,97	5,31	3,17	1,86	4,62	3,17	1,86	4,62	3,17	1,86	4,62
4	6,11	2,84	7,55	3,57	2,07	4,99	3,53	1,90	4,82	3,53	1,87	4,81	3,53	1,87	4,81
5	6,11	3,16	7,78	3,61	2,12	5,56	3,21	2,01	5,16	3,21	1,98	5,11	3,13	2,00	5,07
6	5,49	2,88	6,97	3,32	2,51	5,95	3,32	2,32	5,29	3,26	2,21	5,09	3,25	2,23	5,04
7	5,76	2,75	7,36	3,68	2,45	5,77	3,47	2,17	5,26	3,33	2,03	4,88	3,33	2,02	4,79
8	6,26	3,19	7,93	4,06	2,49	5,88	3,93	2,32	5,66	3,89	2,26	5,59	3,89	2,20	5,56
9	5,69	2,88	6,94	3,95	2,57	6,10	3,40	2,23	5,39	3,27	2,17	5,13	3,24	2,20	5,12
10	6,21	3,55	8,62	4,43	3,35	7,50	4,33	3,19	7,02	4,24	3,06	6,89	4,23	3,00	6,91
11	7,02	4,65	10,48	6,78	4,46	10,62	6,21	4,03	9,59	6,00	3,97	9,19	5,89	3,92	9,10
12	7,28	3,73	10,49	6,93	5,20	11,70	5,84	4,20	9,65	5,48	3,81	9,08	5,20	3,60	8,75
13	6,18	2,63	7,60	6,73	3,70	9,13	5,05	2,82	7,52	4,70	2,56	6,84	4,47	2,37	6,48
14	5,79	3,01	7,73	4,49	2,51	6,41	4,60	2,52	6,14	4,28	2,52	5,95	4,08	2,42	6,03
15	6,34	3,44	8,47	4,78	3,39	7,72	4,24	3,07	7,13	4,42	3,33	7,29	4,38	3,05	7,25
16	4,90	2,11	4,01	4,17	1,91	5,54	3,34	1,83	3,53	3,20	1,81	3,20	3,03	1,72	3,32
MEDIA TOT	6,05	3,13	7,76	4,50	2,85	6,89	4,07	2,57	6,13	3,96	2,50	5,92	3,88	2,43	5,87
		5,64			4,75			4,26			4,13			4,06	
MEDIA ultimi 9 giorni	6,18	3,25	8,04	5,28	3,39	8,09	4,63	2,99	7,00	4,45	2,90	6,70	4,31	2,78	6,62
		5,82			5,59			4,87			4,68			4,57	

Giorno	Serie Pulita			d = 5			d = 6			d = 7			d = 8		
	N	E	h	N	E	h	N	E	h	N	E	h	N	E	h
2	5,50	3,16	7,21	3,41	2,06	5,17	3,41	2,06	5,17	3,41	2,06	5,17	3,41	2,06	5,17
3	6,07	2,98	7,23	3,17	1,86	4,62	3,17	1,86	4,62	3,17	1,86	4,62	3,17	1,86	4,62
4	6,11	2,84	7,55	3,53	1,87	4,81	3,53	1,87	4,81	3,53	1,87	4,81	3,53	1,87	4,81
5	6,11	3,16	7,78	3,13	2,00	5,07	3,13	2,00	5,07	3,13	2,00	5,07	3,13	2,00	5,07
6	5,49	2,88	6,97	3,25	2,25	5,06	3,25	2,25	5,06	3,25	2,25	5,06	3,25	2,25	5,06
7	5,76	2,75	7,36	3,34	2,03	4,85	3,39	2,06	4,89	3,39	2,06	4,89	3,39	2,06	4,89
8	6,26	3,19	7,93	3,89	2,17	5,53	3,90	2,18	5,58	3,94	2,21	5,63	3,94	2,21	5,63
9	5,69	2,88	6,94	3,29	2,21	5,14	3,28	2,21	5,09	3,28	2,24	5,11	3,32	2,27	5,13
10	6,21	3,55	8,62	4,22	2,96	6,87	4,23	2,98	6,88	4,28	2,96	6,89	4,30	2,99	6,90
11	7,02	4,65	10,48	5,83	3,91	9,10	5,87	3,91	9,17	5,85	3,92	9,16	5,86	3,94	9,12
12	7,28	3,73	10,49	5,11	3,53	8,63	5,07	3,48	8,54	5,08	3,47	8,50	5,14	3,45	8,51

13	6,18	2,63	7,60	4,31	2,31	6,29	4,22	2,25	6,14	4,17	2,24	6,07	4,18	2,26	6,06
14	5,79	3,01	7,73	3,95	2,34	5,94	3,99	2,29	5,84	3,97	2,27	5,79	3,96	2,26	5,80
15	6,34	3,44	8,47	4,30	3,03	7,25	4,29	3,00	7,16	4,27	2,98	7,11	4,25	2,96	7,06
16	4,90	2,11	4,01	2,92	1,67	3,16	2,93	1,65	3,18	2,93	1,65	3,23	2,97	1,64	3,27
MEDIA	6,05	3,13	7,76	3,84	2,41	5,83	3,84	2,40	5,81	3,84	2,40	5,81	3,85	2,40	5,81
TOT	5,64			4,03			4,02			4,02			4,02		
MEDIA	6,18	3,25	8,04	4,24	2,74	6,55	4,24	2,72	6,50	4,23	2,72	6,48	4,25	2,72	6,48
ultimi 9	5,82			4,51			4,48			4,48			4,48		
giorni															

Tabella 8.3 – Valori dello SQM relativi alla serie pulita, e alla serie filtrata utilizzando n (da 1 a 8) giorni precedenti, nelle 3 componenti geodetiche locali. In rosso sono evidenziati i valori dei filtri precedenti a quello selezionato e in rosa le statistiche dei 9 giorni su cui possono essere applicati tutti i tipi di filtri

Analizzando la Tabella 7.4 si può notare come in planimetria la componente Nord sia meno precisa rispetto a quella Est, nonostante quest'ultima sia generalmente la più "debole" per il posizionamento con tecnica GNSS. Ciò è probabilmente dovuto alla posizione specifica del ricevitore sulla Garisenda che, avendo la torre Asinelli a sud, subisce un'occlusione parziale del cielo influenzando principalmente la determinazione della componente Nord. Le successive tabelle mostrano invece la percentuale di miglioramento dovuta all'applicazione dei filtri rispetto la soluzione di partenza (serie pulita).

È possibile notare come ci siano evidenti peggioramenti nei primi tre filtri dal dodicesimo giorno in poi. Tale andamento è dovuto principalmente alla elevata mancanza di soluzioni nel dodicesimo giorno (circa 5 ore mancanti), che porta ad una errata modellizzazione del filtro causata dalla interpolazione. In questi casi è quindi preferibile non eseguire l'interpolazione lasciando l'intervallo senza modello. Tale modifica alla procedura di creazione dei filtri sequenziali è in corso di applicazione. Ad ogni modo è chiaro come il peso di un singolo giorno con poche osservazioni calcolate, quindi affetto da problemi di qualche tipo, sia mano a mano mitigato mediante l'applicazione della media con altri giorni.

Giorno	d = 1			d = 2			d = 3			d = 4		
	N	E	h	N	E	h	N	E	h	N	E	h
2	38,0	34,8	28,3	38,0	34,8	28,3	38,0	34,8	28,3	38,0	34,8	28,3
3	41,0	33,8	26,5	47,8	37,4	36,1	47,8	37,4	36,1	47,8	37,4	36,1
4	41,6	27,2	33,9	42,3	33,0	36,1	42,2	34,2	36,2	42,2	34,2	36,2
5	40,9	33,1	28,6	47,4	36,3	33,7	47,5	37,2	34,4	48,8	36,9	34,9
6	39,5	12,7	14,6	39,4	19,3	24,1	40,6	23,3	26,9	40,7	22,5	27,7
7	36,0	10,8	21,6	39,8	21,2	28,4	42,1	26,0	33,6	42,2	26,5	34,9
8	35,1	22,0	25,9	37,2	27,3	28,7	37,9	29,2	29,5	37,9	31,2	29,9
9	30,5	11,0	12,1	40,2	22,7	22,3	42,5	24,9	26,1	43,0	23,9	26,2

10	28,7	5,5	13,0	30,2	10,1	18,6	31,8	13,6	20,1	31,9	15,4	19,9
11	3,4	4,0	-1,3	11,5	13,4	8,5	14,6	14,6	12,3	16,1	15,7	13,2
12	4,9	-39,7	-11,5	19,8	-12,6	8,1	24,7	-2,2	13,5	28,7	3,5	16,6
13	-8,9	-40,9	-20,1	18,3	-7,4	1,1	24,0	2,7	10,0	27,7	9,7	14,8
14	22,5	16,7	17,1	20,5	16,4	20,5	26,1	16,4	23,0	29,5	19,5	22,0
15	24,7	1,5	8,8	33,2	10,7	15,9	30,3	3,2	14,0	31,0	11,4	14,5
16	15,0	9,9	-38,0	31,8	13,5	11,9	34,7	14,5	20,2	38,2	18,8	17,4
MEDIA TOT	26,2	9,5	10,6	33,2	18,4	21,5	35,0	20,7	24,3	36,2	22,8	24,8
		15,4			24,3			26,6			27,9	
MEDIA ultimi 9 giorni	15,1	-4,0	-2,5	25,7	8,3	13,3	28,6	11,0	17,4	30,8	14,7	18,1
		2,9			15,8			19,0			21,2	

Giorno	d = 5			d = 6			d = 7			d = 8		
	N	E	h	N	E	h	N	E	h	N	E	h
2	38,0	34,8	28,3	38,0	34,8	28,3	38,0	34,8	28,3	38,0	34,8	28,3
3	47,8	37,4	36,1	47,8	37,4	36,1	47,8	37,4	36,1	47,8	37,4	36,1
4	42,2	34,2	36,2	42,2	34,2	36,2	42,2	34,2	36,2	42,2	34,2	36,2
5	48,8	36,9	34,9	48,8	36,9	34,9	48,8	36,9	34,9	48,8	36,9	34,9
6	40,8	21,8	27,4	40,8	21,8	27,4	40,8	21,8	27,4	40,8	21,8	27,4
7	41,9	26,2	34,1	41,1	25,0	33,5	41,1	25,0	33,5	41,1	25,0	33,5
8	37,9	32,0	30,3	37,8	31,6	29,6	37,0	30,8	29,0	37,0	30,8	29,0
9	42,2	23,5	25,9	42,3	23,2	26,6	42,4	22,4	26,4	41,7	21,4	26,1
10	32,0	16,4	20,3	31,8	16,1	20,2	31,0	16,4	20,2	30,8	15,8	20,0
11	16,9	16,0	13,2	16,4	16,0	12,6	16,7	15,7	12,6	16,5	15,3	13,0
12	29,9	5,3	17,8	30,3	6,5	18,6	30,2	6,9	19,0	29,4	7,5	18,9
13	30,2	12,2	17,3	31,7	14,4	19,2	32,5	14,7	20,2	32,4	14,0	20,2
14	31,7	22,2	23,1	31,0	24,1	24,4	31,4	24,7	25,0	31,5	25,0	24,9
15	32,2	11,9	14,3	32,4	12,9	15,5	32,6	13,5	16,1	33,0	13,9	16,7
16	40,4	21,2	21,1	40,2	22,1	20,8	40,1	22,0	19,6	39,5	22,5	18,5
MEDIA TOT	36,9	23,5	25,3	36,8	23,8	25,6	36,9	23,8	25,6	36,7	23,8	25,6
		28,6			28,7			28,8			28,7	
MEDIA ultimi 9 giorni	32,0	16,1	19,1	32,0	16,9	19,7	32,1	17,0	19,9	31,9	16,9	19,8
		22,4			22,9			23,0			22,9	

Tabella 8.4 – Percentuali di miglioramento dei SQM delle serie filtrate rispetto la serie pulita di partenza. In rosso sono evidenziati i valori dei filtri precedenti a quello selezionato e in rosa le statistiche dei 9 giorni su cui possono essere applicati tutti i tipi di filtri

Come mostrato nella Tabella 7.5, la maggiore percentuale di miglioramento della deviazione standard viene raggiunta mediamente nella componente Nord. In particolar modo si nota come ci sia un generale miglioramento utilizzando i filtri con d che varia tra 5 e 8. Tuttavia la scelta migliore per questo contesto risulta il filtro a 7 giorni. È comunque importante sottolineare che la scelta del tipo di filtro da applicare alla serie dipende sempre dal dataset e dalle condizioni al contorno. Per questo motivo non è

possibile definire a priori il tipo di filtro ma solo dopo un'analisi approfondita del comportamento della serie.

In Figura 8.18 è raffigurato l'istogramma che riassume il funzionamento degli 8 filtri sperimentati esprimendo il miglioramento percentuale per ogni componente geodetica (ΔN , ΔE , Δh) e il relativo valore medio.

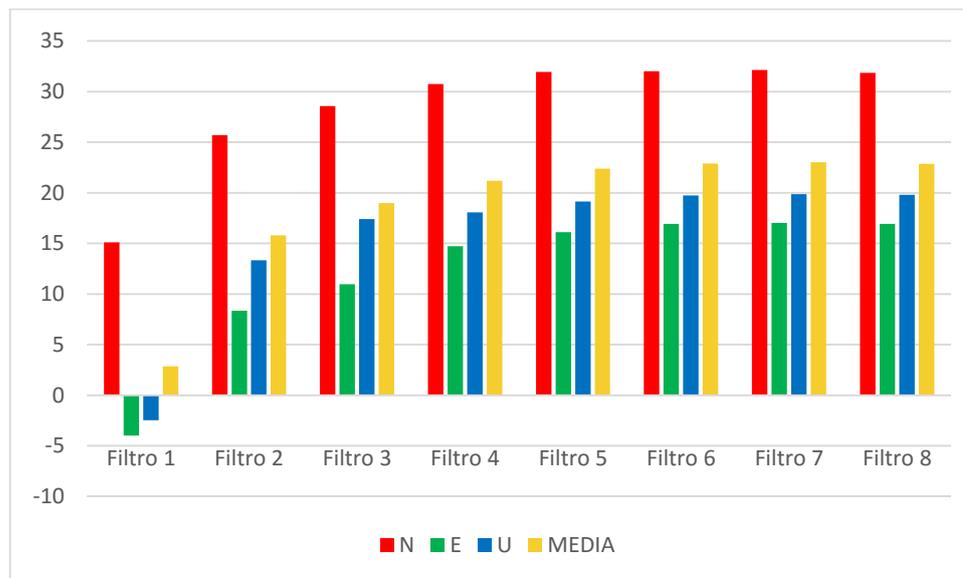


Figura 8.18 – Iistogramma riassuntivo delle percentuali di miglioramento delle serie filtrate rispetto la serie pulita

In Figura 8.19 è invece rappresentato un esempio di applicazione del filtro sequenziale sulla serie di un giorno: in blu è rappresentata la serie pulita iniziale, in verde il filtro a 7 giorni e in rosso la serie filtrata. Risulta evidente come ci sia un forte smorzamento degli spike che rende la serie più stabile.

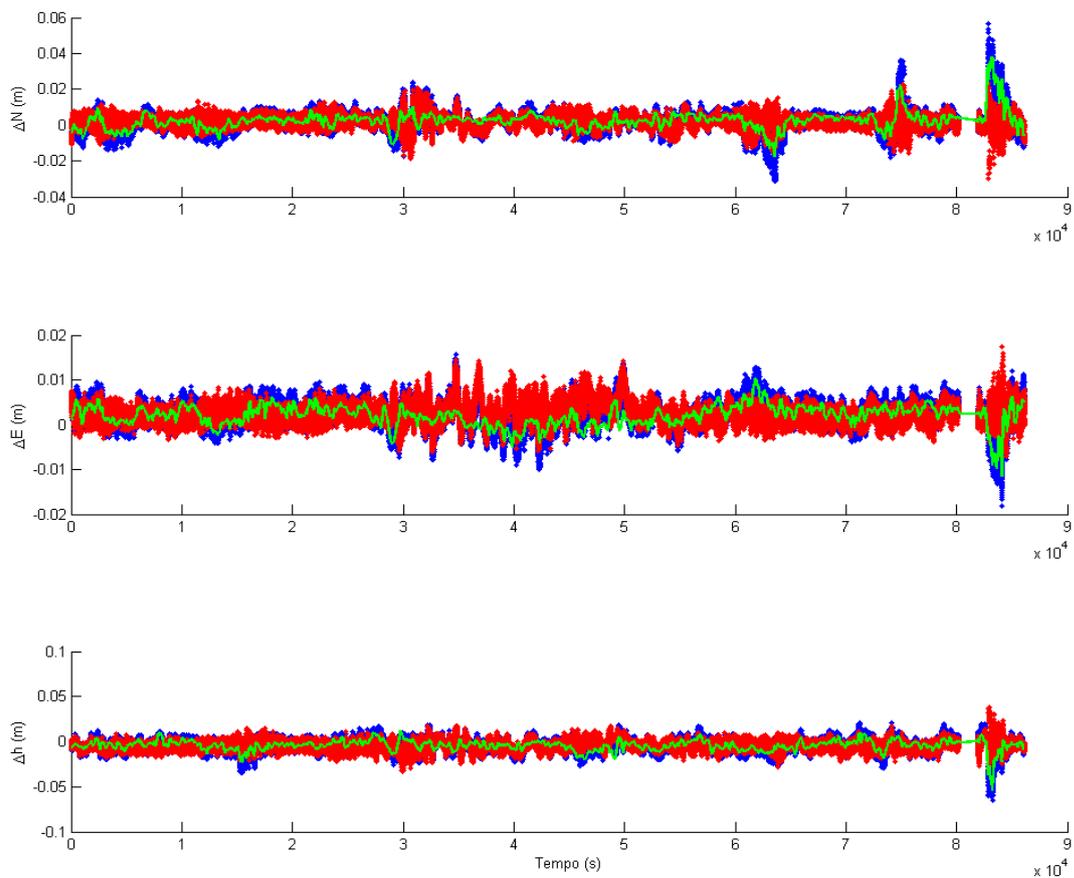


Figura 8.19 - Esempio di applicazione del filtro: in blu è rappresentata la serie pulita, in rosso la serie filtrata e in verde il modello applicato

9. Conclusioni

Nel elaborato di tesi è stato affrontato il problema del monitoraggio in continuo di strutture e del territorio mediante la tecnologia GNSS a partire dal caso di studio della torre Garisenda.

Il lavoro ha previsto un primo studio sulla parte tecnologica del problema, cioè quella relativa alla strumentazione GNSS, all'apparato di trasmissione dati in tempo reale alla frequenza di 1 Hz e all'archiviazione. Per quanto riguarda la parte di invio dati, è stato realizzato un pacchetto "smart" in grado di funzionare in qualsiasi condizione operativa, ma allo stesso tempo low cost. Tale pacchetto è costituito da un "single-board computer" Raspberry Pi e, equipaggiato con un sistema di trasmissione che, a seconda del contesto nel quale si opera, può essere collegato, direttamente tramite cavo ethernet, alla rete LAN, oppure, in caso di assenza di presa RJ45, un dongle 3G o WIFI per la connessione *wireless*.

Una volta realizzato il sistema e installata la stazione permanente sulla torre Garisenda si è passati alla parte più prettamente scientifica rappresentata dallo studio di tecniche e procedure di elaborazione e post trattamento dei dati GNSS al fine di indagare due tipologie di movimenti: quelli per analisi di stabilità, definiti da una soluzione giornaliera e quelli ai fini di applicazioni nell'ambito dell'*early warning* descritti da una soluzione cinematica ad 1 Hz.

Per quanto riguarda il monitoraggio dei movimenti lenti quindi molto piccoli, un aspetto di grande importanza è la stabilità del sistema di riferimento. Il contesto nel quale si è operato, caratterizzato dalla presenza di quattro stazioni permanenti GNSS a doppia frequenza nelle vicinanze della torre (< 2km) ha permesso l'analisi particolarmente approfondita di tale aspetto. Le quattro stazioni sono state considerate come stazioni di riferimento (RS) ed elaborate con approccio differenziato calcolando le singole basi da esse alla stazione posta sulla torre (MS). In questo modo sono state ottenute quattro serie temporali della MS. Tali soluzioni avrebbero dovuto, in linea

teorica, essere *coerenti* tra loro. Sotto l'ipotesi di stabilità delle RS, i risultati però hanno mostrato differenze significative, sia in termini di velocità media che in termini di variabilità interna (segnali periodici). Tali differenze sono state anche supportate da bassi valori del coefficiente di correlazione di Pearson, calcolati tra la serie temporale ottenuta a partire da una stazione di riferimento e confrontata con ognuna delle altre 3 soluzioni. Questi risultati hanno evidenziato come l'ipotesi iniziale di stabilità delle RS non fosse corretta. Al fine di prendere in considerazione questo aspetto, i dati di ogni RS sono stati elaborati con approccio PPP e successivamente sono stati calcolati i modelli sintetici mediante regressione lineare e analisi dello spettro delle frequenze utilizzando il Periodogramma di Lomb Scargle. Ogni modello è stato applicato alla serie temporale della MS ottenuta dal primo calcolo. Le nuove serie temporali hanno mostrato miglioramenti sia in termini di velocità media che di segnale. A supporto di questi risultati è stato riscontrato anche un aumento dei coefficienti di correlazione di Pearson ricalcolati come sopra. Poiché i modelli sono stati però generati da una soluzione PPP, per evitare di considerare correlazioni dirette tra ciascuna RS, i modelli sintetici ottenuti erano riferiti al sistema di riferimento ITRS e successivamente inquadrati nel sistema ETRS, applicando parametri di trasformazione. Nel sistema ETRF2000, le coordinate non sono caratterizzate da una velocità nulla, ma da una velocità media che rappresenta la velocità intraplacca residua della zona. Pertanto, la MS è caratterizzata da una velocità che può essere vista come somma vettoriale delle due componenti: il movimento eventuale della struttura e quello residuo di intraplacca. In questo caso, la velocità della MS è di circa 3.3, 2.8 1.4 mm/y nelle componenti ΔN , ΔE e Δh rispettivamente ed è coerente con la velocità residua intraplacca.

Ai fini di isolare l'eventuale movimento della struttura dal movimento residuo di placca è stata calcolata e successivamente rimossa dalla MS la velocità media ponderata di tutte le RS. A valle di questo calcolo, i risultati ottenuti indicano che la velocità della struttura non è da ritenersi statisticamente significativa. In altri termini dall'analisi dei dati la struttura appare stabile o i movimenti sono inferiori alla sensibilità della tecnica. Si sottolinea in questo contesto come, essendo il dataset ancora limitato in termini temporali a circa 2 anni, le stime sulle velocità medie della stazione non sono da ritenersi ancora del tutto attendibili. Dalla letteratura infatti è noto come la presenza di rumori colorati nelle serie geodetiche GNSS possa produrre

errori nella stima della velocità media e dell'errore quadratico medio ad essa associato se le serie temporali non presentano una durata di oltre 3 anni (Mao, Christopher G. A. Harrison, et al. 1999).

L'approccio adottato può essere particolarmente importante quando è necessaria un'indagine relativa a movimenti lenti e molto piccoli. Quando invece l'entità dei movimenti è molto elevata queste considerazioni costituiscono un problema di secondo ordine.

Per quanto riguarda il monitoraggio di strutture ai fini di applicazioni nell'ambito dell'*early warning* sono stati testati numerosi software commerciali, geodetici e *open source*. In particolare sono state effettuate numerose prove per ricercare i parametri ottimali che consentissero di massimizzare la precisioni ottenibili ai fini del monitoraggio. È emerso come l'angolo di cut-off ed il modello dinamico del filtro di Kalman hanno un grande impatto sul calcolo delle soluzioni cinematiche. A valle di questi test si è proceduto all'elaborazione del dataset scelto come campione rappresentato da 15 giorni di dati a 1Hz. I suddetti dati sono influenzati da effetti di multipath e la ridotta visibilità dei satelliti, i quali generano bias ricorsivi che si ripetono quotidianamente nel calcolo delle soluzioni cinematiche. Per questo motivo, in questa tesi è stata valutata una strategia per migliorare la ripetibilità di una soluzione GNSS per scopi di monitoraggio. Questa strategia si basa sull'applicazione di un modello empirico basato su un filtro sequenziale da applicare alle soluzioni cinematiche. Il modello può essere stimato a partire dalle n soluzioni giornaliere precedenti. I risultati ottenuti mostrano come sia possibile migliorare le soluzioni di oltre il 28% in termini di dispersione utilizzando i filtri superiori a 4 giorni. La deviazione standard della serie temporale filtrata migliore (cioè quella relativa a 7 giorni) raggiunge rispettivamente i 4.2, 2.7, 6.5 mm nelle componenti ΔN , ΔE e Δh ; rispetto ai 6.1, 3.1, 7.7 mm della soluzione non filtrata. Questi risultati consentono al sistema di monitoraggio di essere più sensibile nella definizione di una soglia minima di movimento significativo rilevabile, rendendolo così più performante.

In particolare, dai risultati ottenuti sembra che il sistema sia in grado di poter rilevare movimenti nelle 3 componenti di circa 1 cm in planimetria e 2 cm in quota. Considerando infatti gli errori quadratici medi e una ipotesi alternativa di

significatività del movimento a 3σ si raggiungono rispettivamente valori di soglia pari a 12.7, 8.2, 19.4 mm per le componenti ΔN , ΔE e Δh .

Infine è bene riportare alcune considerazioni: i metodi proposti possono migliorare le soluzioni specialmente in presenza di condizioni al contorno non ottimali, ma la definizione del numero di giorni utilizzati per generare i modelli e il numero di epoche considerate nella media mobile ponderata devono essere distinti caso per caso.

Come conclusione al lavoro svolto si può affermare che attualmente le tecnologie a disposizione consentono di poter utilizzare la tecnica GNSS per applicazioni di monitoraggio geodetico. Se il monitoraggio è volto a studiare l'evoluzione di un fenomeno nel tempo allora l'uso di stazioni GNSS permanenti sembra costituire uno strumento efficace anche per movimenti sub-centimetrici. Laddove questa tecnica fosse impiegata nell'ambito dell'*early warning*, le precisioni attualmente ottenibili, anche a valle di particolari operazioni di post-analisi, non scendono sotto il livello centimetrico che comunque costituisce un livello di soglia particolarmente interessante.

Quanto ottenuto sulla torre Garisenda, sia per quanto attiene le precisioni raggiunte sia per le problematiche legate allo studio della stabilità dei sistemi di riferimento, può essere tranquillamente applicato anche a contesti differenti come il monitoraggio di frane o parti del territorio.

10. Sviluppi futuri

10.1. Il monitoraggio con strumentazioni a basso costo

Con molta probabilità saranno sperimentati strumenti GNSS low cost in ambito di monitoraggio (Figura 10.1). L'obiettivo sarà quello di affiancare la strumentazione di classe geodetica già presente sul caso di studio (la torre Garisenda) per confrontare le performance di questi dispositivi in grande ascesa ed evoluzione.



Figura 10.1 - Esempio di strumentazione GNSS low cost

Verrà inoltre utilizzata la slitta micrometrica (esposta nel paragrafo 7.1) per valutare la sensibilità degli strumenti e delle metodologie di calcolo utilizzate. In altre parole verranno imposti dei bias noti a priori all'antenna GNSS e successivamente verrà verificato qual è il minimo spostamento che si è in grado di misurare a partire da una certa strumentazione e utilizzando un certo tipo di software.

10.2. Monitoraggio in tempo reale: Modulo di RTKLIB

Come già accennato nel Capitolo 3.2.3.4, RTKLIB consente il posizionamento anche in tempo reale mediante l'esecuzione dello script chiamato RTKNAVI. Una volta selezionato il tipo di posizionamento (con tutti i parametri che ne derivano) e il flusso in input è possibile ottenere un posizionamento in tempo reale.

È in fase di studio la possibilità di implementare i filtri sequenziali esposti nel Capitolo 7, all'interno di questo programma.

L'obiettivo è quello di creare un sistema di "early warning" a costo zero.

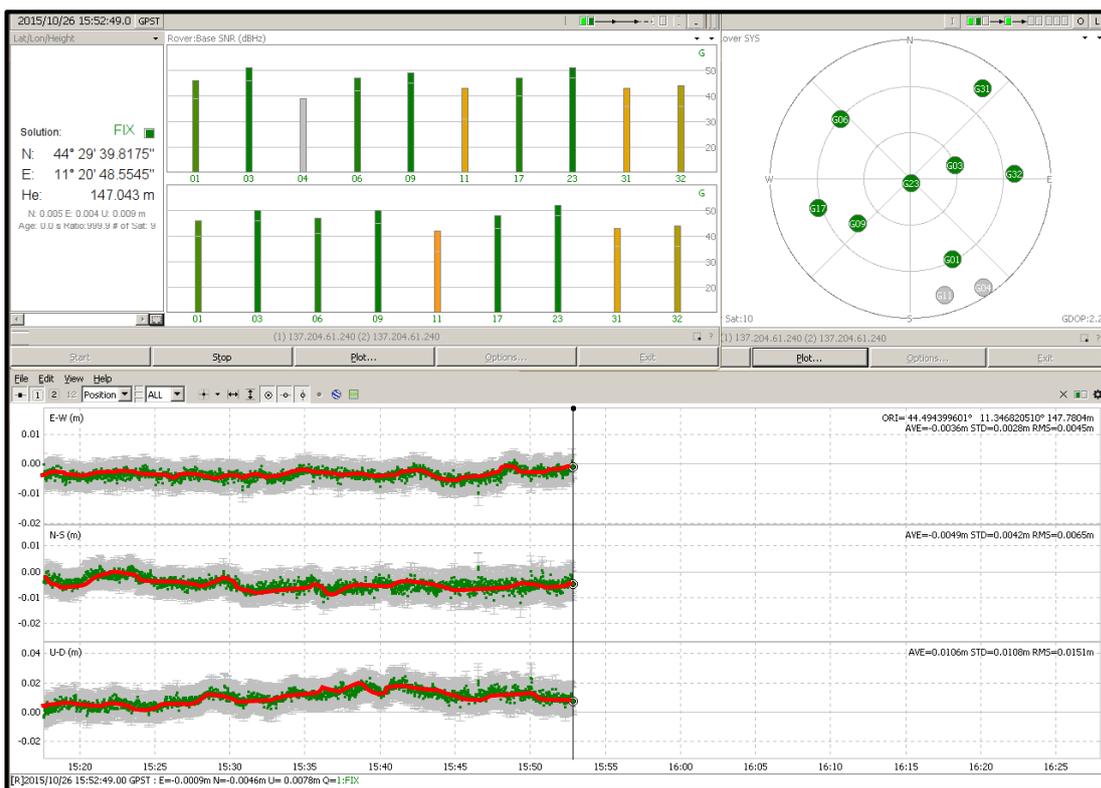


Figura 10.2 - Screenshot RTKNAVI e RTKPLLOT. In rosso è rappresentato il modello che si vorrebbe applicare in tempo reale alla serie temporale

11. Appendice

A. Dal sistema GSM all'UMTS

Negli anni novanta viene lanciato il sistema di seconda generazione GSM chiamato in gergo 2G. Il sistema è basato su una tecnica ibrida TDMA/FDMA e offre la possibilità di trasmissione dati, dando vita ai primi servizi multimediali ed introducendo un sistema di accesso ai dati contenuti nella rete internet. Per far fronte alle esigenze di maggiori velocità nella trasmissione dati, la seconda generazione si è evoluta verso la generazione 2,5G. Un esempio è l'introduzione del GPRS sulle reti GSM. Con questo sistema è possibile realizzare delle trasmissioni in modalità "Always On", ovvero si rimane sempre connessi alla rete fintanto che il terminale è acceso. Rispetto al sistema GSM tradizionale, un collegamento dati GPRS utilizza le risorse di rete solamente quando i dati vengono effettivamente trasmessi, ed un utente potrà quindi avere tariffe orientate verso la quantità dei dati trasmessi indipendentemente dal tempo effettivo della connessione.

Una evoluzione del GPRS è il sistema EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution) che, utilizzando un più efficiente tipo di modulazione (8-PSK), consente di raggiungere una velocità di trasmissione dati di 384 kbit/s. Questo sistema si integra completamente sulle odierne reti GSM, ma è incompatibile con gli attuali terminali mobili che devono quindi essere sostituiti.

Il progressivo passaggio da "commutazione a circuito" a "commutazione a pacchetto", insieme alla crescente richiesta di velocità di trasmissione e di nuovi servizi, ha portato all'avvento della terza generazione (3G).

Questi sistemi permettono una elevata velocità di trasmissione (fino a 2Mbit/s), a costi più contenuti, e con possibilità di traffico simmetrico e asimmetrico. In Europa l'ente responsabile della realizzazione di uno standard è la 3GPP (3rd Generation Partnership Project) e lo standard proposto è l'UMTS (Universal Mobile Telecommunication System), basato su tecnica CDMA.

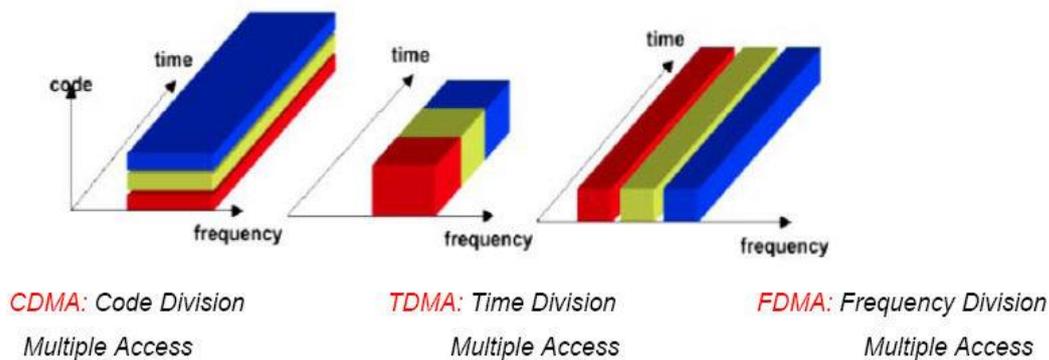


Figura 11.1 - Tipologie di Multiple Access

La procedura di Handover è la funzionalità radio che dà continuità di servizio in mobilità. Quando l'UE (user equipment), con una connessione radio attiva, si sposta verso un'altra cella e raggiunge la zona di confine di quella servente, l'UTRAN (Universal Terrestrial Radio Access Network) deve attivare un collegamento radio del nuovo settore per non creare interruzioni di servizio. In aggiunta a quanto detto, Handover può essere anche utilizzato per distribuire il traffico quando, per esempio, alcune celle raggiungono un elevato carico e questo è il caso della Garisenda.

La decisione presa dall'RNC (Radio Network Controller) scaturisce da diverse ragioni: il mobile si trova a bordo cella e si sposta verso l'altra adiacente, ricevuta meglio oppure l'Handover può essere comandato verso celle di diversa frequenza che coprono la stessa zona ed infine la rete può decidere di effettuare l'Handover per distribuire opportunamente il traffico tra celle dello stesso o di differenti sistemi.

Tale procedura può essere eseguita all'interno di copertura 3G o verso altre tecnologie di accesso, a seconda dei contesti in cui opera il mobile.

Tale funzionalità può essere divisa anche in Hard e Soft/Softer Handover: nel primo caso nel passaggio da una cella all'altra l'UE lascia la connessione radio con il primo settore utilizzando subito dopo il collegamento nella nuova cella e trattandosi di un cambio brusco, si parla di Hard Handover. Nel secondo caso, passando dalla prima alla seconda cella, il terminale mantiene attivi nella zona di transizione due collegamenti e trattandosi di un cambio graduale si parla di Soft (Softer) Handover.

A livello della rete GSM, la modalità di gestione dell'handover è di tipo hard, ovvero prima dell'assegnazione della nuova risorsa, è necessario rilasciare quella in uso (il

fastidioso effetto click negli spostamenti in auto) e quindi la QoS (Quality of Service) è direttamente legata alla velocità con cui viene eseguita l'operazione.

Nelle reti UMTS, invece, sfruttando la funzionalità di Macrodiversità, ovvero la possibilità di ricevere segnali da più celle contemporaneamente (il che produce il vantaggio di poter usare minore potenza in emissione e conseguentemente avere minori problemi di interferenza) si opera il soft – handover, in cui la riallocazione di risorse, avviene senza la necessità di rilascio della risorsa precedente. (Brunner et al. 2006)

B. Network Address Translation

Il NAT (Network Address Translation), detto anche comunemente “mascheramento IP”, è un meccanismo, operato da router (o, meglio, gateway) di confine tra reti private e reti pubbliche, che permette di sostituire gli indirizzi IP dei pacchetti che attraversano il router stesso.

Per capirne meglio il funzionamento basta fare riferimento ad uno scenario tipico di rete casalinga con accesso ADSL a Internet. In questa rete i PC hanno un indirizzo privato, tipicamente appartenente al gruppo 192.168.xxx.xxx, attribuitogli dallo stesso router ADSL. Se si vuole navigare in Internet e aprire la pagina Web di Google, il PC genererà un pacchetto http, che avrà come indirizzo IP sorgente l'indirizzo privato del PC e come indirizzo di destinazione l'indirizzo pubblico del server Web dove è ospitato il sito di Google. Quando il pacchetto arriva al router per essere instradato verso la rete pubblica, questo si preoccuperà di sostituire l'indirizzo IP privato del PC con un indirizzo IP pubblico, assegnato dal Service Provider al momento della connessione a Internet. Il router costruisce un'associazione tra l'indirizzo IP privato che identifica il PC nella rete privata e l'indirizzo IP pubblico che lo identifica, invece, nella rete pubblica. Questa informazione, memorizzata nel database NAT del router, è di fondamentale importanza affinché lo stesso router possa correttamente instradare il pacchetto di ritorno.

Il server Google risponderà alla richiesta generando un pacchetto destinato all'indirizzo IP pubblico che fa capo al router ADSL. Quando il pacchetto arriva al router, il database NAT verrà consultato per sapere a chi è associato quell'indirizzo pubblico; una volta risolta l'associazione, l'indirizzo IP sarà opportunamente modificato e il pacchetto instradato verso la destinazione. Questo meccanismo implica che il router abbia a disposizione un certo numero di indirizzi IP pubblici, così da soddisfare le eventuali richieste di accesso a Internet proveniente da più PC contemporaneamente. Questo procedimento è detto MASQUERADING, ovvero il router maschera all'esterno il vero mittente.

Storicamente il NAT si è affermato come mezzo per ovviare alla scarsità di indirizzi IP pubblici disponibili, soprattutto in quei paesi che, a differenza degli USA, hanno

meno spazio di indirizzamento IP allocato pro-capite. Considerato che spesso gli indirizzi IP pubblici hanno un prezzo, per molti utenti Internet questo costo di indirizzi IP extra non sarebbe stato compensato dai benefici che avrebbero potuto ricavare. Le tecniche utilizzate per risparmiare indirizzi IP pubblici rendono i calcolatori non direttamente raggiungibili da internet, per cui spesso questa configurazione viene scelta per ragioni di sicurezza, anche se il NAT non è stato pensato per funzionare come sistema di protezione, per cui rimane sempre meno efficace rispetto ad un firewall (Srisuresh & Holdrege 1999).

C. GTS pack (GNSS Time Series)

L'idea per la creazione del seguente pacchetto software è nata durante il periodo di tesi magistrale nel 2012, nel quale venne utilizzato un pacchetto analogo (4PG) (Ricucci 2010), scritto in C-shell, che consentiva la sola analisi statistica e la realizzazione dei grafici mediante gnuplot in ambiente UNIX. Durante i tre anni di dottorato, parallelamente al progetto di ricerca, è nata la volontà di realizzare qualcosa di più completo e performante (infatti lavora in multithread) per cui sono iniziati gli studi per lo sviluppo di questo nuovo pacchetto. Attualmente quasi tutti i software sono stati testati ma necessitano di ulteriori perfezionamenti, per questo motivo non sono ancora resi disponibili ma saranno oggetto di una futura pubblicazione. In caso di interesse contattare l'autore (luca.poluzzi5@unibo.it).

Di seguito sono schematizzate le principali operazioni eseguite da ciascun software.

GTS shaper

È il software di partenza che forma la serie temporale in formato numerico ed esegue le analisi statistiche. Accetta in input soluzioni in formato: sinex, stacov, pos (rtklib). Può essere ampliato su richiesta.

- OPERAZIONI ESEGUITE:
 1. Creazione della struttura di cartelle
 2. Conversione dei file delle soluzioni in formato stacov (se non lo sono già) contenenti le coordinate nel sistema geocentrico e la matrice di correlazione associata; esempio: *gipsyYYDOY.stacov*
 3. Inquadramento dei file stacov nel frame europeo ETRF00
 4. Conversione dei file stacov nel formato gd mediante lo script statistics di GIPSY OASIS II. Tali file contengono le coordinate nel sistema geografico a cui è associata la matrice di varianza; esempio: *gipsyYYDOY.gd*
 5. Creazione del file contenente le coordinate dell'origine del sistema geodetico locale relativo ad ogni stazione elaborata
 6. Creazione dei file giornalieri (DAY) che comprendono le soluzioni di tutte le stazioni elaborate per un certo giorno contenenti: l'epoca in formato

- decimale, le coordinate geocentriche, geografiche e geodetiche locali con i relativi SQM associati; esempio: *gipsyYYDOY.day*
7. Creazione dei file (ALL) per ogni sito che rappresentano le serie temporali grezze; esempio: *MEDI.all*
 8. Analisi statistica e rigetto degli outliers ottenendo così: la serie pulita (CLEAR), i punti rigettati (RIG), le statistiche globali della serie (STAT), i parametri di regressione lineare (PREG) e i file ancillari per la realizzazione dei grafici (GMT, RET, BREAK); esempio: *MATE.clear*
 9. Divisione della serie grezza in base alle discontinuità segnalate all'interno di specifici file contenenti le epoche di cambio antenna e le epoche di terremoti; esempio: *ZIMM_2.all*
 10. Analisi statistica e rigetto degli outliers per le serie divise

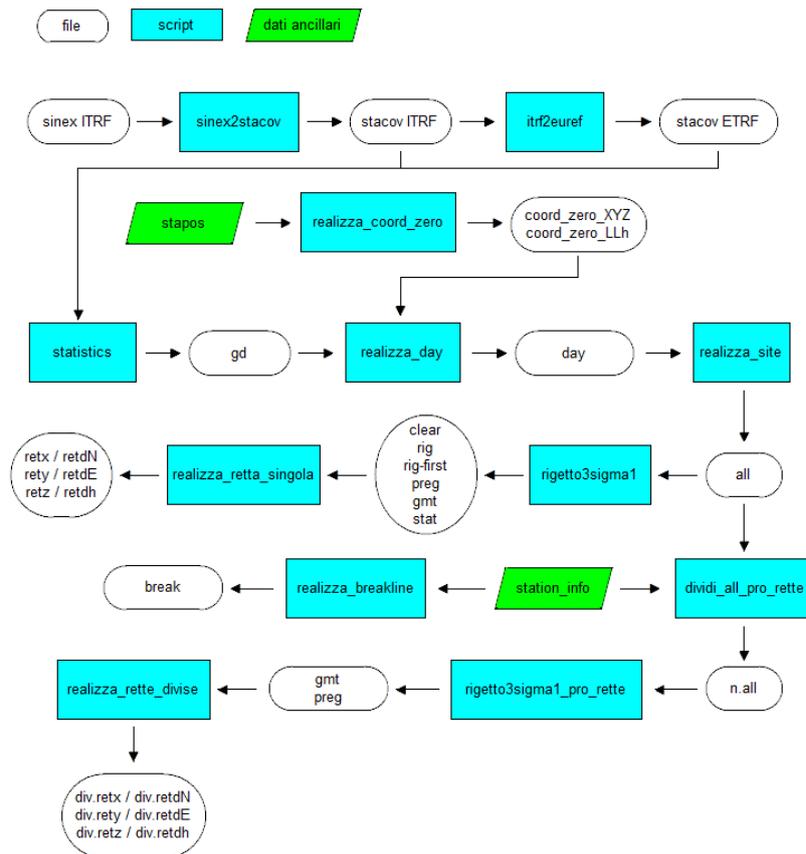


Figura 11.2 - Schema funzionamento GTS shaper

GTS find discontinuity

Rappresenta il software per l'individuazione delle discontinuità. È ancora in fase embrionale e necessita ancora di una serie di accorgimenti e verifiche.

GTS discontinuity

È il software per la valutazione e successiva risoluzione delle discontinuità in cui è nota a priori l'epoca in cui avvengono.

- OPERAZIONI ESEGUITE:
 1. Calcolo della dimensione del salto in base a una serie di criteri che dipendono dalla dimensione delle 2 o più parti di serie. Se le parti di serie sono più piccole (in termini di numero di punti) di una certa soglia allora la discontinuità verrà calcolata a partire dal baricentro di tali punti. Se invece il numero di punti è sufficientemente alto allora viene utilizzata la retta di regressione che verrà propagata all'epoca voluta
 2. Creazione della struttura di cartelle per la nuova soluzione senza discontinuità
 3. Eliminazione delle discontinuità dalle serie grezze
 4. Analisi statistica e rigetto degli outliers per le nuove serie generate

GTS frequency

Costituisce il software per la ricerca di eventuali periodicità. È assolutamente importante risolvere prima tutte le eventuali discontinuità altrimenti, in caso contrario verrebbero individuate basse frequenze non rappresentative del segnale della serie. L'analisi del dominio delle frequenze avviene mediante la creazione del Periodogramma di Lomb Scargle (Lomb 1976; Scargle 1982)(con in ordinata la potenza e in ascissa le frequenze). Una volta scelta la frequenza corrispondente al picco più elevato e verificato statisticamente che tale frequenza non rappresenti un falso picco, si procede al calcolo delle due ampiezze relative al seno e al coseno attraverso una procedura ai minimi quadrati.

- OPERAZIONI ESEGUITE:
 1. Detrendizzazione della serie pulita, vale a dire differenza tra la serie temporale e la retta di regressione lineare. Questa operazione è necessaria in quanto il

Periodogramma di Lomb Scargle per essere creato correttamente richiede una serie temporale a media zero.

2. Calcolo della frequenza corrispondente al picco più potente
3. Calcolo delle relative ampiezze
4. Calcolo differenza tra la serie temporale detrendizzata e il segnale dato dalla frequenza e ampiezze appena calcolate

$$\text{SERIE DETRENDIZZATA} - A \sin(2 \pi f * t) + B \cos(2 \pi f * t)$$

5. Ripetizione dei punti 2-3-4 per n volte in base a quante frequenze (e ampiezze) vogliono essere indagate e ricordando che in input al punto 2 ci andrà la serie senza il segnale calcolato. Il software consente l'analisi fino a dieci frequenze, anche se tipicamente le serie statiche GNSS hanno al massimo cinque frequenze statisticamente rappresentative.
6. Creazione dei file **FREQ** e **AMPI** contenenti le n frequenze e 2n ampiezze

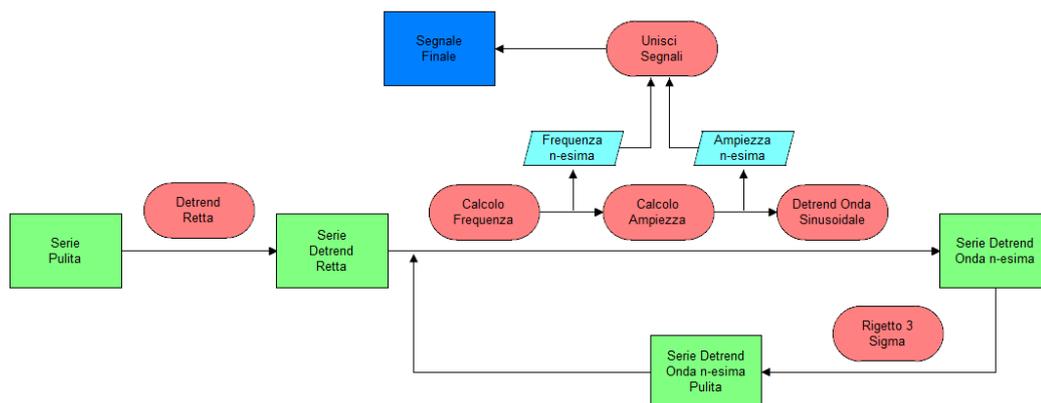


Figura 11.3 - Schema funzionamento GTS frequency

GTS direction

È l'ultimo nato della famiglia GTS pack. Consente di ottenere le direzioni del sistema di riferimento per ottenere la decorrelazione delle tre componenti (Castellani 2015). Anche in questo caso è necessario dare in input al software la serie temporale dopo aver risolto le discontinuità.

- OPERAZIONI ESEGUITE:

1. Calcolo degli autovettori e autovalori mediante la Single Value Decomposition

2. Creo i file ANGLE contenenti i tre angoli di rotazione da applicare rispetto la terna del sistema geodetico locale (NEU) e gli autovalori.
3. Applico gli angoli di rotazione, appena calcolati, alla serie temporale

GTS sketcher

Rappresenta il software per la realizzazione dei grafici mediante GMT delle diverse tipologie di serie temporali, e per rappresentare i Periodogrammi di Lomb Scargle.

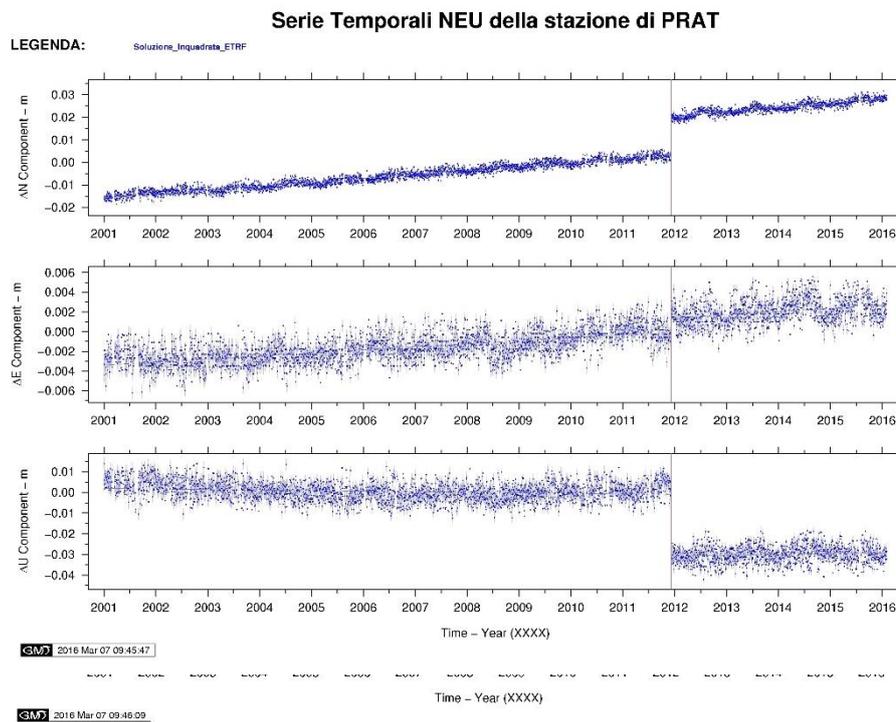


Figura 11.4 - Grafico serie grezza: le stelle rosse rappresentano gli outliers

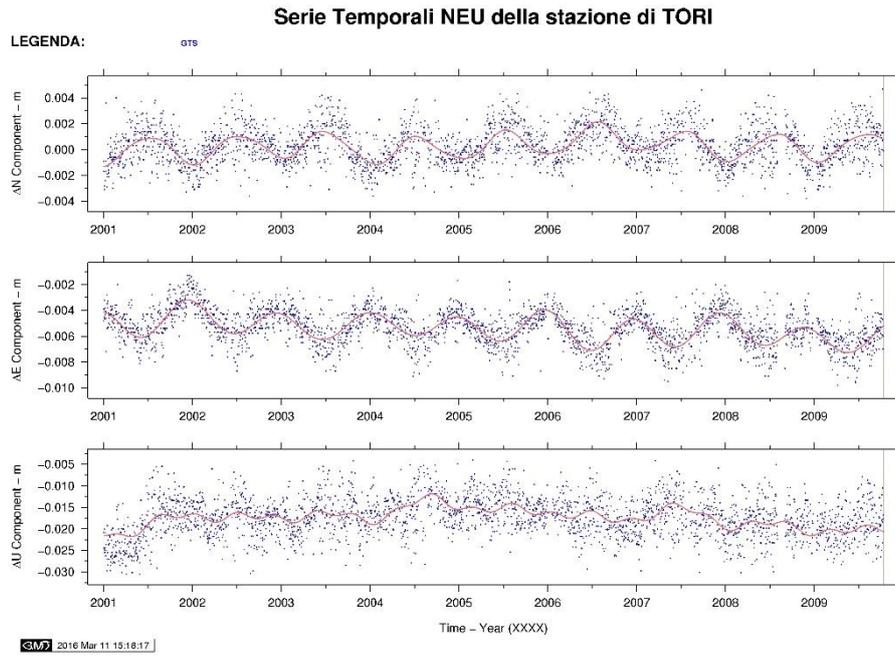


Figura 11.6 - Grafico serie con sovrappreso il segnale sinusoidale calcolato

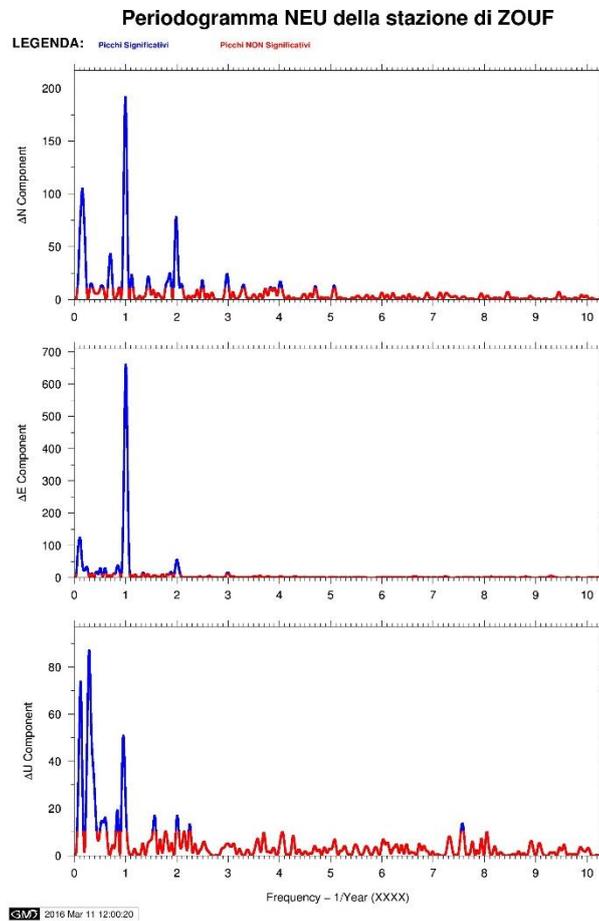


Figura 11.7 – Grafico Periodogramma, in rosso è rappresentata la parte statisticamente non significativa, in blu quella significativa

D. Serial to TCP/IP

```

/**
 * @file STT_thinClntCode.c
 * @version 7.3.1
 * @author Mengoli Marco
 * @date 13-feb-2015
 * @brief This file contains the client and some useful functions.
 */

#define _POSIX_SOURCE
#define _BSD_SOURCE
#include <sys/stat.h>
#include <sys/wait.h>

#include <stdio.h> /* Standard input/output definitions */
#include <stdlib.h> /* Standard library definitions */
#include <unistd.h> /* UNIX standard function definitions */
#include <string.h> /* String function definitions & strerror(int error) function */
#include <errno.h> /* Error number definitions and errno global variable*/
#include <fcntl.h> /* File control definitions */
#include <termios.h> /* POSIX terminal control definitions */
#include <signal.h> /* To manage UNIX signals */
#include <sys/prctl.h> /* To kill child when parent dies */

/* For TCP/IP communication */
#include <sys/types.h> /* This header file contains definitions of a number of data types used in system calls.
These types are used in the next two include files. */
#include <sys/socket.h> /* The header file socket.h includes a number of definitions of structures needed for
sockets. */
#include <netinet/in.h> /* The header file in.h contains constants and structures needed for internet domain
addresses. es. htonl, htons, ntohs, ntohl */
#include <netdb.h> /* The file netdb.h defines the structure hostent, which defines a host computer on the
Internet */
#include <arpa/inet.h> /* The header file arpa/inet.h is useful for converting functions between ascii string
and internet IP address and viceversa */
#include "checkArgs.h"
#include "dateTime.h"
#include "stringUtils.h"

#define SLEEP_SECS_IF_NO_OPEN SOCK_OR_SERIAL 5
#define SIZE_256 256
#define SIZE_512 512
#define MAX_READWRITE_ATTEMPTS 5
#define HOW_OFTEN_CHECK_SERVER_CONN 400
#define SIZE_FILE_NAME 100

/* RS232 parameters */
char rs232Name[] = "/dev/RS232";
int baudrate = 115200;
int bitStop = 1;
int parity=0;
int bit=8;

/* out printing */
int writeOut = 0; /* 1 if write in std OUT, other if no write */

const int backlog = 1; /* number of pending request in TCP queue (waiting for accept)*/
const int on = 1; /* used in setting socket options*/
char zero=0;
int ris, nread, nwrite, len_input=0;
char tempStr[SIZE_512]; /* used as a temporary string*/

/* file descriptors*/
int serialFd = -1; /* serial port file descriptor*/
int fileRawFd = -1; /* serial out raw data file descriptor*/
int fileRawTempFd = -1; /* serial out raw data file descriptor used during the midnight change */
int fileLogFd = -1; /* log file descriptor*/
int socketFd = -1; /* socket server file descriptor*/

/* raw file names */
char currentRawName[SIZE_FILE_NAME];
char newRawName[SIZE_FILE_NAME];

/*functions*/
void closeFiles(); /* closes all files */
void closeTCPclient(); /* closes all sockets */
void closeSerial(); /* closes serial port */
void printConnectionStatus(); /* prints the TCP socket status */
void printMessage(char* message); /* prints a message to stdout and on log file */
void printMessageToFileDescriptor(char* message, int fd); /* prints a message to the specified file descriptor */
void printError(char* message); /* prints an error message to stdout and on log file */
char* getApplicationPath();
char* getFileName(char* prefix, int offsetDays);
int openFile(char* prefix, int offsetDays);
int openLogFile(); /* open (and creates if not existing) the log file*/
int openRawFile(); /* open (and creates if not existing) the raw output file */
int openRawYesterdayFile();
int openAndSetSerial(); /* open the serial device */
int openAndSetTCPclientSocket(); /* open, set and bind of TCP client socket */
void brokenPipeHandler(int signo);
void midnightHandler();

```

```

void newUTC0DayHandlerStart();
void newUTC0DayHandlerStop();
void exitHandler(int signo);

ssize_t writeAll(int fd, void *buffer, size_t n, int nMaxAttempts);
ssize_t readAll(int fd, void *buffer, size_t n, int nMaxAttempts);

void checkTooManyOpenFiles();
void checkAddressAlreadyInUse();
int checkConnectionRefused();

/* socket data */
int serverPort = 7410;
char serverAddressName[64];
struct sockaddr_in serverAddress;
struct hostent *host;
char tmpStr[SIZE_256];

/**
 * It provides client, accepting TCP connections, reading from serial port and writing to TCP server, in raw file
 and log file.
 * @brief It provides client, accepting TCP connections, reading from serial port and writing to TCP server, in raw
 file and log file.
 * @note Process must be stopped only with CTRL+C or kill -2 pid or kill -3 pid or kill -15 pid! NO kill -9 pid or
 other signal numbers
 * @author Mengoli Marco
 * @date May 2014
 */
int main(int argc, char **argv)
{
    /* ARGUMENTS CHECK (USAGE) */
    if(argc != 3)
    {
        printf("Error, usage:\n");
        printf("%s serverAddress serverPort\n", argv[0]);
        exit(-1);
    }

    writeOut=1; /*getPositiveInt(argv[1]);*/
    strcpy(serverAddressName, argv[1]);
    serverPort = getPositiveInt(argv[2]);
    baudrate = 115200;
    bitStop = 1;
    parity=0;
    bit=8;

    /* HANDLING GENERAL SIGNALS */
    /* handling broken pipe signal if server closes connection */
    signal(SIGPIPE, brokenPipeHandler);

    /* INITIALIZE SERIAL */
    serialFd = -1;

    /* INITIALIZE FILES */
    fileLogFd = -1;
    fileRawFd = -1;
    fileRawTempFd = -1;

    /* INITIALIZE TCP */
    socketFd = -1;
    /* setting current and new raw names */
    memset(currentRawName, '\0', SIZE_FILE_NAME);
    memset(newRawName, '\0', SIZE_FILE_NAME);

    /* OPEN LOG & OUT FILE */
    fileLogFd = openLogFile();
    printMessage("STARTING CLIENT\n");

    /* handling SIGINT, SIGQUIT, SIGTERM signal when client quits process */
    signal(SIGINT, exitHandler);
    signal(SIGQUIT, exitHandler);
    signal(SIGTERM, exitHandler);

    int result=-1;

    while( (result=openAndSetSerial()) < 0 ){sleep(SLEEP_SECS_IF_NO_OPEN SOCK_OR_SERIAL);
printMessage("Trying to open serial input.\n");}

    int nTimesCheckServer=0;

    openAndSetTCPClientSocket();

    /* sure to have correct serial and socket */

    while(1)
    {
        /******
        READ DATA FROM SERIAL
        *****/

        char buff[SIZE_256];

        /* reading data from serial port */

```

```

        nread = read(serialFd, buff, SIZE_256);
        if(nread <= 0)
        {
printMessage("Error reading from serial: closing and reopening serial.\n");
            closeSerial();
            while( (result=openAndSetSerial()) < 0
) {sleep(SLEEP_SECS_IF_NO_OPEN SOCK_OR_SERIAL); printMessage("Trying to open serial input.\n");}
                continue;
            }

        /* only to avoid paranoia */
        if(nread > SIZE_256)
        {
            nread=SIZE_256;
        }

        /* ----- WRITE TO SERVER ----- */
        if (socketFd >= 0)
        {
            nwrite = writeAll(socketFd, buff, nread,
MAX_READWRITE_ATTEMPTS);

            if(nwrite < nread)
            {
                /* connection broken, closing the socket, update
                sprintf(tempStr, "Closing connection with server
                printMessage(tempStr);

                close(socketFd);
                socketFd = -1;

                printConnectionStatus();
            }
            }
            else
            {
                /* IF CLIENT IS NOT CONNECTED, WE TRY EVERY
                HOW_OFTEN_CHECK_SERVER_CONN READ CYCLE TO CONNECT,
                TO NOT BLOCK THE READ AND WRITE TO LOG EXECUTION */

                if ( nTimesCheckServer < HOW_OFTEN_CHECK_SERVER_CONN)
                {
                    nTimesCheckServer++;
                }
                else
                {
                    nTimesCheckServer = 0;
                    printMessage("Trying to open TCP connection.\n");
                    openAndSetTCPClientSocket();
                }
            }
        }

    }

/**
 * It handles the broken pipe signal SIGPIPE, which occurs when writing to a closed TCP socket connection.
 * @brief It handles the broken pipe signal SIGPIPE.
 * @param signo signal number
 * @author Mengoli Marco
 * @date May 2014
 */
void brokenPipeHandler(int signo)
{
    printError("Broken TCP connection");
}

/**
 * It handles graceful daemon exiting following an handleable unix closing signal.
 * @brief It handles gracefull daemon exiting following an handleable unix closing signal.
 * @param signo signal number
 * @author Mengoli Marco
 * @date October 2014
 */
void exitHandler(int signo)
{
    printMessage("Shutting down client due to a signal sent by the user\n");
    printConnectionStatus();
    exit(0);
}

/**
 * It closes the current log file and opens the new one
 * @brief It closes the current log file and opens the new one
 * @author Mengoli Marco
 * @date February 2015
 */
void midnightHandler()
{
    printMessage("Closing log file to open the new day one.");
    close(fileLogFd);
}

```

```

fileLogFd = openLogFile();
sprintf(tempStr, "New day's log file opened. File descriptor: %d\n", fileLogFd);
printMessageToFileDescriptor(tempStr, fileLogFd);
}

/**
 * It enables a second raw file writing, so serial data is written in 2 files at the same time. Launched by a
 * SIGUSR1 signal sent by an external process.
 * @brief It enables a second raw file writing due to to SIGUSR1 signal.
 * @author Mengoli Marco
 * @date October 2014
 */
void newUTC0DayHandlerStart()
{
    if(fileRawTempFd < 0) /* only if not existing another raw temp */
    {
        char newName[SIZE_FILE_NAME];

        strcpy(newName, getFile("raw", 0));

        /* checking if the new name would be the same as the old. in that case it means
        that the old is already the new one needed, so don't open a new one */
        if ( strcmp(currentRawName, newName) == 0 )
        {
            printMessage("No new raw file opened, the current raw is already the new
one needed\n");
        }
        else
        {
            fileRawTempFd = openRawFile();
            strcpy(newRawName, newName);

            sprintf(tempStr, "Before new UTC+0 day: creating new raw file and writing
in both new(%s) and old(%s) files\n", newRawName, currentRawName);
            printMessage(tempStr);
        }
    }
}

/**
 * It closes the first (oldest) raw file, so serial data is written only in the newest files. Launched by a SIGUSR2
 * signal sent by an external process.
 * @brief It closes the first (oldest) raw file, due to SIGUSR2 signal.
 * @author Mengoli Marco
 * @date October 2014
 */
void newUTC0DayHandlerStop()
{
    if (fileRawTempFd >= 0) /* if all ok */
    {
        sprintf(tempStr, "After new day: closing old raw file(%s) \n", currentRawName);
        printMessage(tempStr);

        close(fileRawFd);
        fileRawFd = fileRawTempFd;
        fileRawTempFd = -1;

        strcpy(currentRawName, newRawName);
        memset(newRawName, '\0', SIZE_FILE_NAME);
    }
}

/**
 * It prints to log file the TCP connection status.
 * @brief It prints to log file the TCP connection status.
 * @author Mengoli Marco
 * @date October 2014
 */
void printConnectionStatus()
{
    if (socketFd >= 0)
    {
        char s[256];
        sprintf(s, "Connected with server %s, socket descriptor %d\n", serverAddressName
, socketFd);
        printMessage(s);
    }
    else
    {
        printMessage("Currently connected with NO server\n");
    }
}

/**
 * It prints the input message to the log file.
 * @brief It prints the input message to the log file.
 * @param message The message to write
 * @author Mengoli Marco
 * @date October 2014
 */
void printMessage(char* message)
{
    /* WRITE TO OUT*/
    if(writeOut == 1)

```

```

    {
        printMessageToFileDescriptor(message, 1);
    }
    /* WRITE TO LOG IF OPENED*/
    if(fileLogFd >= 0)
    {
        printMessageToFileDescriptor(message, fileLogFd);
    }
}

/**
 * It prints the input message to the specified file descriptor.
 * @brief It prints the input message to the specified file descriptor.
 * @param message The message to write
 * @param fd The file descriptor
 * @author Mengoli Marco
 * @date February 2015
 */
void printMessageToFileDescriptor(char* message, int fd)
{
    char s[SIZE_512];
    strcpy(s, "STToClient - ");
    strcpy(s, getCurrentTime());
    strcat(s, " - ");
    strcat(s, message);
    writeAll(fd, s, strlen(s), MAX_READWRITE_ATTEMPTS);
}

/**
 * It prints the input message, followed by an error message, to the log file.
 * @brief It prints the input message, followed by an error message, to the log file.
 * @param The message to write
 * @author Mengoli Marco
 * @date October 2014
 */
void printError(char* message)
{
    sprintf(tempStr, "%s - Error %d: %s\n", message, errno, strerror(errno));
    printMessage(tempStr);
}

/**
 * It opens a log data file. If file already exists, opens in APPEND mode, if doesn't exist creates it. It also
 * redirects stderr to than file.
 * @brief It opens a log data file and redirects stderr to than file.
 * @return < 0 in case of errors
 * @author Mengoli Marco
 * @date September 2014
 */
int openLogFile()
{
    int file = openFile("log_client", 0);
    if (file >= 0)
    {
        sprintf(tempStr, "Log file opened. File descriptor: %d\n", file);
        printMessageToFileDescriptor(tempStr, file);
        dup2(file, 2); /* redirects stderr to new file. Before redirect, it closes the file with
file descriptor 2 if opened. */
    }
    else
    {
        printMessage("Cannot open log file\n");
    }
    return file;
}

/**
 * It opens the tomorrow log data file. If file already exists, opens in APPEND mode, if doesn't exist creates it.
 * It also redirects stderr to than file.
 * @brief It opens the tomorrow log data file and redirects stderr to than file.
 * @return < 0 in case of errors
 * @author Mengoli Marco
 * @date September 2014
 */
int openLogTomorrowFile()
{
    int file = openFile("log_client", 1);

    if (file >= 0)
    {
        sprintf(tempStr, "Log (day after) file opened. File descriptor: %d\n", file);
        printMessageToFileDescriptor(tempStr, file);
        dup2(file, 2); /* redirects stderr to new file. Before redirect, it closes the file with
file descriptor 2 if opened. */
    }
    else
    {
        printMessage("Cannot open log file of day after\n");
    }
    return file;
}

/**
 * It opens a raw data file. If file already exists, opens in APPEND mode, if doesn't exist creates it.
 * @brief It opens a raw data file.
 * @return < 0 in case of errors
 * @author Mengoli Marco

```

```

* @date September 2014
*/
int openRawFile()
{
    int file = openFile("raw", 0);
    if (file >= 0)
    {
        sprintf(tempStr, "Raw file opened. File descriptor: %d\n", file);
        printMessage(tempStr);
    }
    else
    {
        printMessage("Cannot open raw file\n");
    }
    return file;
}

/**
* It opens the tomorrow raw data file. If file already exists, opens in APPEND mode, if it doesn't exist creates it.
* @brief It opens the tomorrow raw data file.
* @return < 0 in case of errors
* @author Mengoli Marco
* @date September 2014
*/
int openRawTomorrowFile()
{
    int file = openFile("raw", 1);
    if (file >= 0)
    {
        sprintf(tempStr, "Raw (day after) file opened. File descriptor: %d\n", file);
        printMessage(tempStr);
    }
    else
    {
        printMessage("Cannot open raw file of day after\n");
    }
    return file;
}

/**
* It opens the yesterday raw data file. If file already exists, opens in APPEND mode, if it doesn't exist creates it.
* @brief It opens the yesterday raw data file.
* @return < 0 in case of errors
* @author Mengoli Marco
* @date September 2014
*/
int openRawYesterdayFile()
{
    int file = openFile("raw", -1);
    if (file >= 0)
    {
        sprintf(tempStr, "Raw (day before) file opened. File descriptor: %d\n", file);
        printMessage(tempStr);
    }
    else
    {
        printMessage("Cannot open raw file of day before\n");
    }
    return file;
}

/**
* It opens a file specified by input prefix and the current date suffix. If file already exists, opens in APPEND
mode, if it doesn't exist creates it.
* @brief It opens a file specified by input prefix and the current date suffix.
* @param prefix The file prefix string
* @param offsetDays the number of days since today
* @return < 0 in case of errors
* @author Mengoli Marco
* @date September 2014
* @version 7_2_2
*/
int openFile(char* prefix, int offsetDays)
{
    /*
    * O_RDWR|O_CREAT : file mode: read & write, if file doesn't exist, create it
    * O_APPEND : append to the existing file
    * S_IRUSR|S_IWUSR|S_IRGRP|S_IWGRP|S_IROTH|S_IWOTH: file permissions (on creation) to: -USER -> read & write
    *
    * -GROUP -> read & write
    *
    * -OTHER -> read & write
    */
    char fileName[SIZE_256];
    char path[SIZE_256];
    char name[SIZE_256];
    char* appPath;
    int fd;

    appPath = getApplicationPath(); /* returns static array pointer */
    if (!appPath)
    {
        printError("Error on reading file to get the application path");
    }
    strcpy(path, appPath);
    strcpy(name, getFileName(prefix, offsetDays));
}

```

```

sprintf(fileName,"%sout/%s", path, name);
fd = open(fileName, O_RDWR|O_CREAT|O_APPEND, S_IRUSR|S_IWUSR|S_IRGRP|S_IWGRP|S_IROTH|S_IWOTH);
if (fd < 0)
{
    char temp[SIZE_256];
    sprintf(temp, "Error on file %s opening", fileName);
    printError(temp);
    checkTooManyOpenFiles();
    return -1;
}
return fd;
}

/**
 * It returns the file name specified by input prefix and the current date suffix.
 * @brief It returns the file name specified by input prefix and the current date suffix.
 * @param prefix The file prefix string
 * @param offsetDays the number of days since today
 * @return the file name
 * @author Mengoli Marco
 * @date February 2015
 * @version 7_3_1
 */
char* getFileName(char* prefix, int offsetDays)
{
    static char fileName[SIZE_FILE_NAME];
    char date[SIZE_FILE_NAME];
    strcpy(date, getDateSeparators("_", offsetDays));
    sprintf(fileName,"%s_%s.txt", prefix, date);
    return fileName;
}

/**
 * It returns the application path
 * @brief It returns the application path
 * @return string the application path
 * @author Mengoli Marco
 * @date December 2014
 * @version 7_2_2
 */
char* getApplicationPath()
{
    FILE * fp;
    static char path[SIZE_256];
    char* fromFile = "/usr/local/bin/STT/STT_client_path.txt";
    fp = fopen(fromFile, "r");
    if (fp == NULL)
    {
        char temp[SIZE_256];
        sprintf(temp, "Error on opening the file %s to read the application path", fromFile);
        printError(temp);
        checkTooManyOpenFiles();
    }
    else
    {
        char* allOk = fgets(path, SIZE_256, fp);
        if (allOk == NULL)
        {
            char temp[SIZE_256];
            sprintf(temp, "Error on reading the first line of file %s to read the
application path", fromFile);
            printError(temp);
        }
        /*replace the last occurrence of '\n' with '\0', if any*/
        replaceLastChar(path, '\n', '\0');
        fclose(fp);
        return path;
    }
    return NULL;
}

/**
 * It opens TCP client socket.
 * @brief It opens TCP client socket.
 * @return < 0 in case of errors
 * @author Mengoli Marco
 * @date May 2014
 */
int openAndSetTCPClientSocket()
{
    char s[SIZE_512];

    printMessage("Opening TCP socket, proceeding 3 steps:\n");

    /* 1 - SET SERVER TCP STRUCT */
    memset((char *)&serverAddress, 0, sizeof(struct sockaddr_in));
    serverAddress.sin_family = AF_INET;
    host = gethostbyname(serverAddressName);
    if (host == NULL)
    {
        socketFd=-1;
        return -1;
    }

    serverAddress.sin_addr.s_addr=((struct in_addr*) (host->h_addr))->s_addr;
    serverAddress.sin_port = htons(serverPort);
}

```

```

printf(s, "1/3) TCP server address set\n");
printMessage(s);

/* 2 - CREATING TCP SOCKET */
socketFd=socket(AF_INET, SOCK_STREAM, 0);
if (socketFd < 0)
{
    printError("Opening TCP socket");
    checkTooManyOpenFiles();
    socketFd=-1;
    return -1;
}
printf(s, "2/3) TCP socket created, file descriptor: %d\n", socketFd);
printMessage(s);

/* 3 - CONNECT TO SERVER */
//bind operation not explicitly done: it's implicit in connect function
if(connect(socketFd, (struct sockaddr *) &serverAddress, sizeof(struct sockaddr)) < 0)
{
    checkConnectionRefused();
    printError("Error on socket connect");
    close(socketFd);
    socketFd=-1;
    return -1;
}
printf(s, "3/3) TCP socket connected\n");
printMessage(s);
return 1;
}

/**
 * It opens serial port, gets attributes and sets new ones.
 * @brief It opens serial port, gets attributes and sets new ones.
 * @return < 0 in case of errors
 * @author Mengoli Marco
 * @date May 2014
 */
int openAndSetSerial()
{
    /* useful links: http: */ /*trainingkits.gweb.io/serial-linux.html */
    char tempStr[SIZE_256];
    printMessage("Opening serial port, proceeding 3 steps:\n");

    /****** OPEN RS232 PORT *****/
    serialFd = open(rs232Name, O_RDWR| O_NOCTTY);
    if (serialFd < 0)
    {
        printError("Unable to open serial port parameters");
        checkTooManyOpenFiles();

        serialFd=-1;
        sleep(5);
        return -1;
    }

    printf(tempStr, "1/3) Serial opened, file descriptor: %d\n", serialFd);
    printMessage(tempStr);

    /****** SET RS232 PARAMETERS *****/
    struct termios tty;
    memset(&tty, 0, sizeof tty);

    /* Getting default serial attributes in structure termios */
    if( togetattr( serialFd, &tty ) != 0 )
    {
        printError("Unable to get serial port parameters");
        serialFd=-1;
        return -2;
    }

    printMessage("2/3) Serial parameters loaded\n");

    /* Set Baud Rate */
    cfsetospeed(&tty, (speed_t)B115200);
    cfsetispeed(&tty, (speed_t)B115200);

    /* Setting other Port Stuff */ /* Make 8n1 */
    tty.c_cflag &= ~PARENB; /* disables the parity bit (PARENB is enable
parity bit) */
    tty.c_cflag &= ~CSTOPB; /* only one stop bit (CSTOPB means 2 stop bits) */
    tty.c_cflag &= ~CSIZE; /*CSIZE is a mask for all the data size bits, so
anding with the negation clears out the current data size setting */
    tty.c_cflag |= CS8; /* CS8 means 8-bits per work*/

    tty.c_cflag &= ~CRTSCTS; /* no flow control */
    tty.c_cc[VMIN] = 1; /* minimum char to read */
    tty.c_cc[VTIME] = 5; /* amount of time to wait for incoming characters in tenths of seconds
(0 is blocking) */
    tty.c_cflag |= CREAD | CLOCAL; /* turn on READ & ignore ctrl lines */

    /* Make raw */
    cfmakeraw(&tty);
    /*tty.c_lflag &= ~(ICANON | ECHO | ECHOE | ISIG); */

    /* no timeout */

```

```

/*fcntl(serialFd, F_SETFL, 0); */

/* Flush Port, then applies attributes */
tcflush( serialFd, TCIFLUSH );
if ( tcsetattr( serialFd, TCSANOW, &tty ) != 0)
{
    printError("Unable to set serial port parameters");
    serialFd=-1;
    return -3;
}

printMessage("3/3 Serial parameters updated\n");
return serialFd;
} /* openAndSetSerial */

/**
 * It writes n bytes from buffer into specified file descriptor.
 * @brief It writes n bytes from buffer into specified file descriptor.
 * @param fd file descriptor
 * @param buffer the buffer containing data to write
 * @param n the number of bytes to write
 * @param nMaxAttempts the maximum number of attempts to write all bytes in buffer
 * @return number of bytes written (n) or < 0 in case of errors.
 * @author Mengoli Marco
 * @date October 2014
 */
ssize_t writeAll(int fd, void* buffer, size_t n, int nMaxAttempts)
{
    int attempt = 0;
    int nwr=0;
    int written=0;

    if(n <= 0)
    {
        printMessage("Error in writeAll function: n must be >= 0");
        return -2;
    }

    if(nMaxAttempts <= 0)
    {
        nMaxAttempts=5;
    }

    while ( written < n )
    {
        //nwr = write(fd, &buffer[written], n-written);
        nwr = write(fd, buffer+written, n-written);
        attempt++;

        if(nwr < 0)
        {
            char tmpMsg[512];
            sprintf(tmpMsg, "Function write in writeAll returned -1 value: correctly
written only %d of %d bytes after %d attempts\n", written, (int)n, attempt);
            printMessage(tmpMsg);
            break;
        }

        written += nwr;
        if ( attempt >= nMaxAttempts)
        {
            printMessage("Function writeAll exceeded allowed attempts");
            break;
        }
    }
    if(written == 0 && n > 0)
    {
        return -1; // -1 is the default error code to be returned in case of execution errors
    }
    return written;
}

/**
 * It reads n bytes from file descriptor into the buffer.
 * @brief It reads n bytes from file descriptor into the buffer.
 * @param fd file descriptor
 * @param buffer the buffer in which store n bytes
 * @param n the number of bytes to read
 * @param nMaxAttempts the maximum number of attempts to read all bytes in buffer
 * @return number of bytes read (n) or < 0 in case of errors.
 * @author Mengoli Marco
 * @date November 2014
 */
ssize_t readAll(int fd, void *buffer, size_t n, int nMaxAttempts)
{
    int attempt = 0;
    ssize_t nr=0;
    size_t rd=0;
    if(n <= 0)
    {
        printMessage("Error in readAll function: n must be >= 0");
        return -2;
    }

```

```

    }

    if(nMaxAttempts <= 0)
    {
        nMaxAttempts=5;
    }

    while ( rd < n )
    {
        //nr = read(fd, &buffer[rd], n-rd);
        nr = read(fd, buffer+rd, n-rd);
        attempt++;
        if(nr < 0)
        {
            char tmpMsg[512];
            sprintf(tmpMsg, "Function readAll returned -1 value: correctly read %d of
%d bytes\n", (int)rd, (int)n);

            printMessage(tmpMsg);
            break;
        }
        rd += nr;
        if ( attempt >= nMaxAttempts)
        {
            printMessage("Function readAll exceeded allowed attempts\n");
            break;
        }
    }
    if(rd == 0 && n > 0 )
    {
        return -1;
    }
    else
    {
        return rd;
    }
}

/**
 * It closes raw and log files.
 * @brief It closes raw and log files.
 * @author Mengoli Marco
 * @date November 2014
 */
void closeFiles()
{
    close(fileRawFd);
    fileRawFd = -1;

    close(fileRawTempFd);
    fileRawTempFd = -1;

    close(fileLogFd);
    fileLogFd = -1;
}

/**
 * It closes serial device.
 * @brief It closes serial device.
 * @author Mengoli Marco
 * @date November 2014
 */
void closeSerial()
{
    close(serialFd);
    serialFd = -1;
}

/**
 * It closes client sockets.
 * @brief It closes client sockets.
 * @author Mengoli Marco
 * @date November 2014
 */
void closeTCPclient()
{
    close(socketFd);
    socketFd = -1;
}

/*
 * Closes client if too many files opened
 * @brief Closes client if too many files opened
 * @author Mengoli Marco
 * @date December 2014
 */
void checkTooManyOpenFiles()
{
    if (errno == 24) /* too many open files: cannot continue */
    {
        printMessage("CLOSING CLIENT: too many open files.\n");
        exit(1);
    }
}

```

```
/*
 * Closes client if address already in use
 * @brief Closes client if address already in use
 * @author Mengoli Marco
 * @date December 2014
 */
void checkAddressAlreadyInUse()
{
    if (errno == 98) /* address already in use error: cannot continue */
    {
        printf("CLOSING CLIENT: address already in use.\n");
        exit(2);
    }
}

/*
 * Check if the connection is refused
 * @brief Check if the connection is refused
 * @return 1 if connection is refused, else 0
 * @author Mengoli Marco
 * @date May 2015
 */
int checkConnectionRefused()
{
    if (errno == 111) /* server is not ready: retry */
    {
        printf("Server is not responding, retry to contact it.\n");
        return 1;
    }
    return 0;
}
```

Bibliografia

- Barbarella, M. et al., 2013. Il monitoraggio della rete Rete Dinamica Nazionale dal 2009 al 2013. In *Conferenza Nazionale ASITA*. Centro Congressi – Riva del Garda, Italy, pp. 95–102.
- Bar-Sever, Y.E., Kroger, P.M. & Borjesson, J., 1998. Estimating horizontal gradients of tropospheric path delay with a single GPS receiver. *Journal of Geophysical Research*, 103(B3), p.5019. Available at: <http://www.agu.org/pubs/crossref/1998/97JB03534.shtml>.
- Beasley, A., Conway, J. & VLBI, P., 1995. Very Long Baseline Interferometry and the VLBA. *ASP Conf. Ser.*
- Bertiger, W. et al., 2010. Single receiver phase ambiguity resolution with GPS data. *Journal of Geodesy*, 84(5), pp.327–337.
- Bisnath, S. & Gao, Y., 2009. Current state of precise point positioning and future prospects and limitations. *Observing our changing earth*. Available at: http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-85426-5_71 [Accessed December 4, 2015].
- Bock, Y. et al., 2000. Instantaneous geodetic positioning at medium distances with the Global Positioning System. *Journal of Geophysical Research*, 105(B12), p.28223. Available at: <http://dx.doi.org/10.1029/2000JB900268>.
- Boucher, C. & Altamimi, Z., 2011. Memo: Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign.
- Brunner, C. et al., 2006. Inter-System Handover Parameter Optimization. *Ieee Vehicular Technology Conference*, pp.1–6. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4109497>.
- Calais, E., *Plate motions : fundamentals Plate motions : fundamentals*,
- Castellani, A., 2015. *Metodi analitici per lo studio di serie temporali tridimensionali geodetiche*. Scuola di Ingegneria e Architettura, Università di Bologna.
- Cavani, F., 1903. *Pendenza, stabilità e movimenti delle Torri Garisenda e Ghirlandina*,
- Cavani, F., 1919. *Su alcune questioni relative alla pendenza delle torri*

- Cavani, F., 1917. *Sulla pendenza delle principali torri di Bologna, Modena e Pisa*
- Christodoulidis, D. & Smith, D., 1983. The role of satellite laser ranging through the 1990's.
- Cliff, A. & Ord, J., 1973. Spatial autocorrelation. Available at:
<http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=COLPOS.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mfn=011475> [Accessed January 27, 2016].
- Colombo, L., Marana, B. & Galbusera, D., 2011. Monitoraggio di strutture con tecnologia GNSS, pp.683–691.
- Dach, R. et al., 2015. Bernese GNSS Software Version 5.2. Available at:
<http://www.bernese.unibe.ch/docs/DOCU52.pdf> [Accessed February 23, 2016].
- Dong, D. et al., 2002. Anatomy of apparent seasonal variations from GPS-derived site position time series. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978-2012)*, 107(B4), pp.ETG 9–1–ETG 9–16.
- Eckl, M.C. et al., 2001. Accuracy of GPS-derived relative positions as a function of interstation distance and observing-session duration. *Journal of Geodesy*, 75(12), pp.633–640.
- EGSA, 2015. *EGSA GNSS Market Report Issue 4*,
- EGSA, 2012. May 2012 GSA GNSS Market Report – Issue 2. , (2).
- Estey, L. & Meertens, C., 1999. TEQC: the multi-purpose toolkit for GPS/GLONASS data. *GPS solutions*.
- Forward, T., Stewart, M.P. & Tsakiri, M., 2003. Gps Data Stacking for Small Scale Gps Deformation Monitoring Applications.
- Gandolfi, S., Tavasci, L. & Poluzzi, L., 2015. Improved PPP performance in regional networks. *GPS Solutions*, pp.1–13.
- Griffiths, J. & Ray, J.R., 2009. On the precision and accuracy of IGS orbits. *Journal of Geodesy*, 83(3-4), pp.277–287. Available at:
<http://link.springer.com/10.1007/s00190-008-0237-6> [Accessed December 4, 2015].
- GSA, 2013. GNSS Market Report – Issue 3. , (3). Available at:
<http://www.gsa.europa.eu/sites/default/files/GSA -Market Report 2013 new.pdf>.
- Gurtner, W., 2013. *RINEX The Receiver Independant Exchange Format*,

- Herrera, A.M. et al., 2015. goGPS: open-source MATLAB software. *GPS Solutions*. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s10291-015-0469-x>.
- Herring, T.A. et al., 2015. Introduction to GAMIT / GLOBK. *Analysis*, pp.1–50.
- Iperbole, 2010. L'intervento di consolidamento dell'elevazione, p.2193111.
- Iperbole, 2012a. Le Indagini . gli accertamenti ed i rilievi. , p.2193111.
- Iperbole, 2012b. Riferimenti agli studi precedenti condotti dal Prof . Francesco Cavani. , p.2193111.
- Kedar, S., 2003. The effect of the second order GPS ionospheric correction on receiver positions. *Geophysical Research Letters*, 30(May), pp.1144–1146.
- Kouba, J., 2009. a Guide To Using International Gnss Service (Igs) Products.
- Kouba, J., 2008. Implementation and testing of the gridded Vienna Mapping Function 1 (VMF1). *Journal of Geodesy*, 82(4-5), pp.193–205. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s00190-007-0170-0>.
- Kouba, J. & Héroux, P., 2001. Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products. *GPS Solutions*, 5(2), pp.12–28.
- Langley, R.B., 1999. Dilution of Precision. *GPS World*, 10(May), pp.52–59. Available at: http://www.ceri.memphis.edu/people/rsmalley/ESCI7355/gpsworld_may99.pdf.
- Lomb, N.R., 1976. Least-squares frequency analysis of unequally spaced data. *Astrophysics and Space Science*, 39(2), pp.447–462.
- Mao, A., Harrison, C.G.A. & Dixon, T.H., 1999. Noise in GPS coordinate time series. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012)*, 104(B2), pp.2797–2816.
- Meffe, A., 2008. *Realizzazione di una stazione di riferimento temporanea GNSS per l'impiego in reti NRTK*. University of Bologna.
- Niell, a. E., 1996. Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths. *Journal of Geophysical Research*, 101, p.3227.
- Palermo, M. et al., 2015. An approach for the mechanical characterisation of the Asinelli Tower (Bologna) in presence of insufficient experimental data. *Journal of Cultural Heritage*, 16(4), pp.536–543. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S129620741400051X>.

- Park, K.D. et al., 2004. Site-specific multipath characteristics of global IGS and CORS GPS sites. *Journal of Geodesy*, 77(12), pp.799–803.
- Pearson, K., 1895. Note on regression and inheritance in the case of two parents. *Proceedings of the Royal Society of London*. Available at: <http://www.jstor.org/stable/115794> [Accessed February 15, 2016].
- Radovanovic, R.S., 1998. High Accuracy Deformation Monitoring Via Multipath Mitigation by Day-To-Day Correlation Analysis. *Analysis*, pp.35–44.
- Ragheb, A.E., Clarke, P.J. & Edwards, S.J., 2007. GPS sidereal filtering: coordinate- and carrier-phase-level strategies. *Journal of Geodesy*, 81(5), pp.325–335. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s00190-006-0113-1>.
- Realini, E. & Reguzzoni, M., 2013. goGPS: open source software for enhancing the accuracy of low-cost receivers by single-frequency relative kinematic positioning. *Measurement Science and technology*. Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0957-0233/24/11/115010/meta> [Accessed February 15, 2016].
- Ricucci, L., 2010. *Calcolo della posizione di reti di stazioni permanenti*. Facoltà di Ingegneria, Università di Bologna.
- Saastamoinen, J., 1972. Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging satellites. *Geophysical Monograph Series*, 15, pp.247–251. Available at: <http://www.agu.org/books/gm/v015/GM015p0247/GM015p0247.shtml>.
- Scargle, J.D., 1982. Studies in astronomical time series analysis. II - Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. *The Astrophysical Journal*, 263, pp.835–853.
- Sforza, I.G. & Sbaraglia, I.L., 2008. Il monitoraggio strutturale.
- Srisuresh, P. & Holdrege, M., 1999. Network Working Group - Request for Comments: 2663. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53, p.30.
- Takasu, T., 2011. RTKLIB: An open source program package for GNSS positioning. 2011-06 11).[2011-07-20]. <http://www.rtklib.com/prog/> Available at: https://scholar.google.it/scholar?q=Takasu+T.%2C+%282015%29%2C+%E2%80%9CRTKLIB%3A+An+Open+Source+Program+Package+for+GNSS+Positioning%E2%80%9D&btnG=&hl=it&as_sdt=0%2C5#0 [Accessed February 15, 2016].
- Takasu, T., Kubo, N. & Yasuda, A., 2007. Development, Evaluation and Application of RTKLIB: A program library for RTK-GPS. In *GPS/GNSS Symposium 2007*.

- Teunissen, P., Jonkman, N. & Tiberius, C., 1998. Weighting GPS dual frequency observations: bearing the cross of cross-correlation. *GPS Solutions*. Available at: <http://link.springer.com/article/10.1007/PL00000033> [Accessed March 30, 2016].
- Teunissen, P. & Kleusberg, A., 2012. GPS for Geodesy. Available at: [https://books.google.it/books?hl=it&lr=&id=w6QyBwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT19&dq=Teunissen+P.J.G.,+Kleusberg+A.+\(1998\).+GPS+for+geodesy.+New+York:+&ots=qJnbCKwkT_&sig=KmFvaHEPP7AG5t7AS440cLEZO8](https://books.google.it/books?hl=it&lr=&id=w6QyBwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT19&dq=Teunissen+P.J.G.,+Kleusberg+A.+(1998).+GPS+for+geodesy.+New+York:+&ots=qJnbCKwkT_&sig=KmFvaHEPP7AG5t7AS440cLEZO8) [Accessed January 8, 2016].
- Thompson, M. & Green, P., 2014. Raspbian.
- Torre, A.D. & Caporali, A., 2015. An analysis of intersystem biases for multi-GNSS positioning. *GPS Solutions*, 19(2), pp.297–307. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s10291-014-0388-2>.
- Trombetti, T. & Silvestri, S., 2011. Monitoring the structural health of the “Due Torri” in Bologna. *Proc. of the XX ...*. Available at: http://www.researchgate.net/profile/Michele_Palermo/publication/267705094_Monitoring_the_structural_health_of_the_Due_Torri_in_Bologna/links/545b484c0cf2c46f6643d7d9.pdf [Accessed November 7, 2015].
- Vicenzetto, Studio propedeutico alle opere provvisoriale e di consolidamento della Torre Garisenda a Bologna.
- Webb, F.H. & Zumberge, J.F., 1993. An introduction to GIPSY. *OASIS-II, JPL Publ., D-11088*.
- Weber, G. et al., 2005. Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (Ntrip) - IP-streaming for real-time GNSS applications. In *Proceedings of the 18th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, ION GNSS 2005*. pp. 2243–2247. Available at: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-33646596627&partnerID=tZOtx3y1>.
- Witchayangkoon, B., 2000. Elements of gps precise point positioning. *Library*, p.286. Available at: http://c-surveyor.com/uploads/167_0.pdf.
- Zumberge, J. & Heflin, M., 1997. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. ... : *Solid Earth (1978– ...)*, 102(B3), pp.5005–5017. Available at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/96JB03860/pdf>.

Siti Web

Bernese

<http://www.bernese.unibe.ch/>

Gamit

<http://www-gpsg.mit.edu/~simon/gtgk/>

Gipsy OASIS II

<https://gipsy-oasis.jpl.nasa.gov/>

Polifemo e Topcon Tools

<http://www.geotop.it/>

Trimble Total Control

<http://www.trimble.com/>

LEICA GNSS Spider

<http://leica-geosystems.com/>

RTKLIB

<http://www.rtklib.com/>

goGPS

<http://www.gogps-project.org/>

DISPENSE GNSS

http://www.geomaticaeconservazione.it/corsoperfezionamento2009/dispense/aminti_02.pdf

LANTRONIX UDS100

http://www.lantronix.com/wp-content/uploads/pdf/UDS10-UDS100_UG.pdf

SIEMENS TC65

<http://www.elsist.it/WebSite/Html/Italian/Products/Hardware/Obsoletes/DataComm/GSMModems/ItTC65Terminal.php>

<http://www.mc-elettronica.com/77080.php>

<http://www.ele-tec.it/terminali/tc65.html>

HUAWEI E3251

www.4gltemall.com/blog/wp-content/uploads/2012/11/HUAWEI-E3251-Specifications-and-datasheet.pdf

GARISENDA

http://it.wikipedia.org/wiki/Torri_di_Bologna

http://www.vicenzetto.it/oldsite/gfx/case/TORRE_GARISENDA_BOLOGNA.pdf

<http://www.bolognaplanet.it/wiki/letorridibologna/13-torre-garisenda.asp>

<http://www.genusbononiaeblog.it/la-torre-pendente/>

http://www.tecnoinmonitoraggi.it/cms_descrizione_sistema_monitoraggio.html

http://www.comune.bologna.it/duetorri/servizio_singolo/146:10406/

<http://www.urbancenterbologna.it/strategie-progetti-urban-center-bologna/progetti-mostra-urban-center-bologna/337-torri-asinelli-garisenda>