

# RICOSTRUZIONE DI MOVIMENTI RAPIDI IN TEMPO REALE CON OSSERVAZIONI GNSS DA SMARTPHONE ANDROID

## REAL-TIME FAST MOVEMENT DETECTION WITH ANDROID GNSS RAW MEASUREMENTS

M. Fortunato

Area di Geodesia e Geomatica, Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale - Università di Roma La Sapienza

**PAROLE CHIAVE:** Android GNSS Raw Measurements, Xiaomi Mi 8, Variometria GNSS, movimenti rapidi ad alta frequenza

**KEY WORDS:** Android GNSS Raw Measurements, Xiaomi Mi 8, GNSS variometry, high-frequency fast movements

**Questo articolo è stato presentato al Premio Giovani Autori SIFET 2019.**

### RIASSUNTO

La *release* dell'API (*Application Programming Interface*) Android GNSS (*Global Navigation Satellite System*) *raw measurement*, avvenuta nel corso del 2016, ha avviato una rivoluzione all'interno del mondo dei ricevitori GNSS *mass-market*. Questa API di Google, compatibile con *Android Nougat* e versioni successive del sistema operativo, permette di ricostruire, a partire dalle misure grezze GNSS, le osservabili tradizionali: misure di codice, fase, doppler e rapporto segnale-rumore. La disponibilità di osservazioni GNSS permette ai ricercatori, non solo di incrementare l'accuratezza nel posizionamento utilizzando algoritmi tradizionali e consolidati, ma anche di identificare nuovi campi di applicazione per questi dispositivi. Questo articolo analizza la possibilità di studiare e ricostruire movimenti rapidi, caratterizzati da ampiezza e frequenza confrontabili con onde sismiche, utilizzando osservazioni GNSS provenienti da uno Xiaomi Mi 8. L'algoritmo utilizzato per analizzare le osservazioni GNSS è il VADASE (*Variometric Approach for Displacements Analysis Stand-alone Engine*), sviluppato nell'Area di Geodesia e Geomatica della "Sapienza" Università di Roma. Questa metodologia permette di stimare velocità e spostamenti in tempo reale con accuratezza, rispettivamente, di pochi mm/s e di 1-2 cm utilizzando ricevitori GNSS di classe geodetica. In questo articolo, l'attenzione è stata inizialmente rivolta alla definizione della rumorosità delle velocità variometriche stimate a partire da osservazioni Android acquisite con uno Xiaomi Mi 8: in condizioni statiche e di elevata visibilità sono stati ottenuti diversi mm/s per le componenti orizzontali e circa 1 cm/s in direzione verticale. Passando alle analisi eseguite in condizioni cinematiche, sono stati eseguiti test acquisendo osservazioni su una tavola vibrante in grado di imprimere un moto monodirezionale allo smartphone. Il confronto con le soluzioni di riferimento, ottenute a partire da un ricevitore di classe geodetica, mostra accuratezza dell'ordine di 0.011 m/s e 0.002 m nella stima, rispettivamente, di velocità e spostamenti di un fenomeno periodico di frequenza compatibile con una rappresentazione attraverso un campionamento ad 1 Hz.

### ABSTRACT

The release of the Android GNSS raw measurements API, during the 2016, is rapidly changing the world of GNSS mass-market receivers. This Google API, running on Android devices with Nougat version or higher, enables the reconstruction, based on GNSS raw measurements, of the traditional GNSS observables: pseudorange, carrier-phase, doppler and signal-to-noise ratio. The availability of GNSS observables outside the internal chip allows the researchers to increase the location accuracy using traditional GNSS algorithms and to find innovative applications for these devices. This paper investigates the possibility of detecting and retrieving fast movements, with amplitude and frequency similar to the characteristics of seismic waves, using GNSS measurements from a Xiaomi Mi 8. The algorithm used to analyze GNSS measurements is VADASE (*Variometric Approach for Displacements Analysis Stand-alone Engine*), developed within the Geodesy and Geomatics Division of the University of Rome "La Sapienza". It allows the real-time estimation of velocities and coseismic displacements with accuracy of few mm/s and 1-2 cm with geodetic receivers. Firstly, the noise level of the variometric velocities estimated on Android measurements from Xiaomi Mi 8 is investigated: few mm/s for the horizontal components and of about 1 cm/s for the vertical component were obtained in static condition and open sky environment. Moving on tests executed in kinematic scenario, experimental tests on observations data collected from the Xiaomi Mi8 placed over a vibrating table, able to work in one direction, were carried out. The comparison with reference values, obtained using a geodetic class receiver, shows accuracy of 0.011 m/s and 0.02 m in the estimation of velocities and displacements of a periodic movement compatible with 1 Hz observation rate.

## 1. INTRODUZIONE

Negli ultimi anni il mondo dei ricevitori GNSS *mass-market* sta subendo significativi cambiamenti in seguito allo sviluppo tecnologico messo in atto da *Google* e *Android* che ha portato, in brevissimo tempo, smartphone e *Internet-of-Things* (IoT) al centro di attività di ricerca da parte della comunità GNSS. La rivoluzione nasce, per quanto riguarda gli smartphone, a maggio 2016 con l'annuncio di *Google* della *release* di *Android GNSS Raw Measurements API* (Fig.1) che permette, su device con *Android 7.0* o più recenti, di accedere, non solo alla soluzione *PVT* (*Position-Velocity and Time*) calcolata internamente dal chip GNSS, ma anche alle misure GNSS grezze acquisite dallo stesso (*Google*, 2016). Queste ultime garantiscono la ricostruzione di osservazioni GNSS tradizionali: pseudorange, fase, doppler e rapporto segnale/rumore.

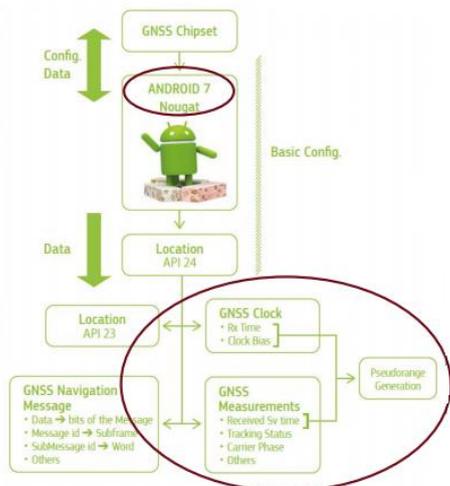


Figura 1 Caratteristiche della *Location API 24* disponibile a partire da *Android 7.0*

Dal 2016 ad oggi il numero di smartphone compatibili con questa API è cresciuto rapidamente passando da smartphone multi-GNSS a singola frequenza, come Samsung S8 e Huawei P10, a smartphone multi-GNSS a doppia frequenza, come Xiaomi Mi 8. La data di rilascio di quest'ultimo, il 31 Maggio 2018, ha rappresentato una pietra miliare nell'ambito dei ricevitori GNSS *mass-market* perché il chip GNSS *Broadcom BCM47755*, utilizzato al suo interno, rappresenta il primo ricevitore GNSS a basso costo in grado di acquisire osservazioni sulle frequenze L1/E1 e L5/E5 per GPS e Galileo. La disponibilità di osservazioni su frequenza L5/E5 garantisce una maggiore tracciabilità del segnale in ambiente urbano e una maggiore resistenza a fenomeni di *multipath* ed interferenze (*Roberts*, et al., 2018), che fortemente inficiano l'accuratezza raggiungibile con questi dispositivi (*Banville* et al., 2016) (*Robustelli* et al., 2019).

La disponibilità di osservazioni GNSS da smartphone apre la possibilità all'utilizzo di algoritmi tradizionali originariamente sviluppati per applicazioni basate su ricevitori di costo elevato – ad esempio monitoraggio o navigazione in tempo reale – anche su strumentazione GNSS a basso costo con l'obiettivo principale di incrementare l'accuratezza del posizionamento. Infatti, *Real-Time Kinematic* (RTK) e *Precise Point Positioning* (PPP), basandosi su osservazioni di codice e di fase, sono ampiamente

utilizzate per esplorare la massima accuratezza possibile da questi dispositivi (*Realini* et al., 2017) (*Roberts* et al., 2018) (*Privat* et al., 2018). Se l'utilizzo di procedure di posizionamento molto accurate offre un contributo significativo soprattutto nell'ambito della navigazione in tempo reale, sia pedestre che di veicoli, la *release* di *Android GNSS raw measurements API* rappresenta un punto di partenza per individuare nuovi campi di applicazione per quello che sarà lo strumento GNSS più diffuso nel prossimo futuro. Un contributo significativo in questa direzione è offerto dall'*European GNSS Agency* (GSA) tramite la *GNSS Raw Measurements Task Force* (GSA, 2017) che, fondata nel 2017, conta oggi circa 100 membri internazionali tra agenzie, università, centri di ricerca e società private. La disponibilità di misure GNSS da smartphone permette di esplorare possibili applicazioni nel campo delle Geoscienze: la ricostruzione delle vibrazioni del terreno indotte da fenomeni sismici o il monitoraggio troposferico e/o ionosferico rappresentano solo degli esempi. Diversi algoritmi sono stati sviluppati negli ultimi anni presso l'Area di Geodesia e Geomatica della "Sapienza Università di Roma" per applicazioni in ambito geofisico di osservazioni GNSS principalmente da ricevitori di classe geodetica. L'algoritmo preso in esame in questo lavoro è il *VADASE* (*Variometric Approach for Displacements Analysis Stand-alone Engine*) che, basandosi sull'approccio variometrico, permette di stimare con elevata accuratezza, in tempo reale e utilizzando un unico ricevitore, velocità e spostamenti di fenomeni molto rapidi legati, ad esempio, ad attività sismica (*Colosimo* et al., 2011).

Questo articolo rappresenta uno studio di fattibilità per l'utilizzo di osservazioni GNSS derivanti da smartphone *Android*, in particolare dallo *Xiaomi Mi 8*, nella ricostruzione di fenomeni geofisici che interessano il globo terrestre. L'obiettivo di questo lavoro è valutare la possibilità di caratterizzare con uno smartphone *Android* movimenti molto rapidi con frequenze di vibrazione e ampiezza confrontabile con i parametri caratteristici di onde sismiche. Questa introduzione è seguita dalla descrizione (Paragrafo 2) dei benefici derivanti dall'utilizzo di smartphone per la descrizione di fenomeni geofisici. Successivamente, la metodologia (Paragrafo 3), le analisi eseguite (Paragrafo 4) e i risultati ottenuti (Paragrafo 5) verranno introdotti e descritti.

## 2. SMARTPHONE E GEOSCIENZE

La possibilità di descrivere alcuni fenomeni geofisici attraverso l'utilizzo del segnale GNSS è oramai consolidata: diverse ricerche sono state seguite negli anni per lo studio di terremoti, eventi meteorologici intensi o brusche variazioni ionosferiche (*Colosimo* et al., 2011) (*Mascitelli* et al., 2011) (*Savastano* et al., 2017). Nei principali progetti di ricerca l'attenzione è focalizzata su ricevitori GNSS di classe geodetica e *low-cost*; tuttavia, gli sviluppi tecnologici che stanno interessando il mondo dei ricevitori GNSS *mass-market*, come descritto nel Paragrafo 1, permettono di individuare negli smartphone *Android* un supporto ulteriore per il mondo delle Geoscienze per diversi motivi.

Una dettagliata descrizione di un fenomeno fisico e/o dei suoi effetti necessita di un'informazione densa che, nel caso di sensori GNSS di classe geodetica, è limitata per ragioni economiche. Gli smartphone, invece, rappresentano uno strumento estremamente comune e il numero di dispositivi da cui è possibile estrarre le osservazioni grezze aumenta giorno dopo giorno. Pertanto, la possibilità di densificare l'informazione GNSS derivante da reti di stazioni permanenti utilizzando misure GNSS acquisite da smartphone *Android* è oggi una soluzione concreta che può essere

seguita. Inoltre, la disponibilità di segnali provenienti da diverse costellazioni - soprattutto Galileo e BeiDou - e su più frequenze - nei modelli equipaggiati con un *chip* BCM47755 - permettono di incrementare l'accuratezza, non solo nel posizionamento, ma nelle soluzioni GNSS in generale. Questa è una prerogativa necessaria per utilizzare gli smartphone in ambito geofisico poiché fenomeni di *multipath* ed interferenze con altre sorgenti di segnali vengono proiettati nella ricostruzione del fenomeno di interesse pregiudicandone l'affidabilità. *Multipath*, interferenze e *cycle slip*, infatti, hanno un impatto notevole sulle osservazioni GNSS acquisite da smartphone a causa dell'antenna GNSS di basso costo, polarizzata linearmente e condivisa con altri sistemi di comunicazione (WiFi, Bluetooth etc.) (Pesyna et al., 2014). Nonostante ciò, la nuova generazione di *chip Broadcom* è in grado di offrire una resistenza maggiore a queste problematiche ed un ulteriore miglioramento è atteso con le future generazioni di chip GNSS che le aziende saranno in grado di produrre.

Infine, è importante considerare che all'interno degli smartphone, accanto al chip GNSS, sono presenti IMU (*Inertial Measurements Units*) dai quali è possibile registrare i valori delle rispettive grandezze misurate con opportune indicazioni temporali. Ciò permette di ottenere misure indipendenti di uno stesso fenomeno: ad esempio, la possibilità di lavorare con misure GNSS e accelerometriche permette di validare e ottimizzare la ricostruzione di velocità e spostamenti causati da un evento sismico.

### 3. METODOLOGIA

La metodologia di analisi dei dati GNSS utilizzata in questo articolo è l'approccio variometrico sviluppata e implementata nell'Area di Geodesia e Geomatica della "Sapienza Università di Roma" all'interno dell'algoritmo VADASE. Tale approccio, basato sull'analisi delle differenze singole tra epoche consecutive delle osservazioni di fase acquisite sulla medesima frequenza, permette di stimare direttamente la velocità e, per integrazione, gli spostamenti ai quali è soggetto il ricevitore (Colosimo et al., 2011). L'equazione di osservazione di fase per la frequenza  $i$ , ricevitore R e satellite S può essere espressa come segue:

$$Li_R^S = \lambda \Phi i_R^S = \rho_R^S + c(dt_R - dt^S) - Ii_R^S + T_R^S + \lambda i N i_R^S + p_R^S + m_R^S + \varepsilon_R^S \quad (1)$$

$\Phi_R^S$  rappresenta l'osservazione di fase del ricevitore rispetto al satellite espressa in numeri di cicli;  $\lambda$  è la lunghezza d'onda del segnale;  $\rho_R^S$  è la distanza geometrica ricevitore-satellite;  $c$  è la velocità della luce;  $dt_R$  e  $dt^S$  sono gli offset degli orologi ricevitore satellite,  $I_R^S$  e  $T_R^S$  rappresentano il disturbo ionosferico e troposferico sulla linea di vista ricevitore-satellite;  $N_R^S$  è l'ambiguità iniziale di fase,  $p_R^S$  rappresenta la somma di effetto relativistico, variazioni del centro di fase delle antenne di ricevitore e satellite e *phase-wind up* (Hofmann-Wellenhof et al., 2008);  $m_R^S$  e  $\varepsilon_R^S$  rappresentano il *multipath* ed il rumore dell'osservazione.

Differenziando le osservazioni di due epoche consecutive, l'equazione variometrica può essere facilmente ottenuta.

$$\Delta Li_R^S = \lambda \Delta \Phi i_R^S = \Delta \rho_R^S + c(\Delta dt_R - \Delta dt^S) - \Delta Ii_R^S + \Delta T_R^S + \Delta p_R^S + \Delta m_R^S + \Delta \varepsilon_R^S \quad (2)$$

È importante considerare che l'equazione è ottenuta in assenza di *cycle slip*. Ciò permette, infatti, di rimuovere le incognite di ambiguità di fase presenti all'interno delle equazioni di osservazione di fase. Nell'ipotesi che il ricevitore subisca uno spostamento  $\Delta \xi_R$  (t, t+1) in un sistema di riferimento Earth Centred Earth Fixed (ECEF) nell'intervallo di tempo (t, t+1), questo viene proiettato sulla linea di vista ricevitore-satellite e l'equazione di osservazione variometrica può essere riscritta come segue. È doveroso sottolineare che gli spostamenti, divisi per l'intervallo di tempo (t, t+1), riconducono alle velocità medie sull'intervallo stesso.

$$\Delta Li_R^S = \lambda \Delta \Phi i_R^S = \Delta \rho_R^S + e_R^S \cdot \Delta \xi_R + c(\Delta dt_R - \Delta dt^S) - \Delta Ii_R^S + \Delta T_R^S + \Delta p_R^S + \Delta m_R^S + \Delta \varepsilon_R^S \quad (3)$$

$e_R^S$  rappresenta il versore tra il satellite ed il ricevitore all'epoca t e il simbolo  $\cdot$  indica il prodotto scalare tra i due vettori. Nell'equazione (3) i termini incogniti sono rappresentati dalle 3 componenti della velocità e dalla variazione dell'offset di orologio del ricevitore ( $\Delta dt_R$ ). I termini contenenti le variazioni temporali della distanza geometrica ricevitore-satellite ( $\Delta \rho_R^S$ ), dell'offset di orologio satellitare ( $\Delta dt^S$ ), dei disturbi atmosferici ( $\Delta I_R^S$  e  $\Delta T_R^S$ ) e di ulteriori errori di entità minore ( $\Delta p_R^S$ ) sono termini noti che possono essere calcolati a partire dalla conoscenza dei parametri d'orbita, di orologio e con gli opportuni modelli atmosferici. Ulteriori termini di disturbo, soprattutto lavorando in ambiente urbano con strumentazione GNSS di basso costo, sono la variazione temporale del *multipath* ( $\Delta m_R^S$ ) e del rumore intrinseco ( $\Delta \varepsilon_R^S$ ) che caratterizza l'osservazione.

L'algoritmo VADASE nasce e si afferma nell'ambito della GNSS *seismology*, ovvero quel ramo di applicazioni GNSS mirate all'analisi dello stato tensionale della crosta terrestre. Il suo successo deriva da notevoli vantaggi rispetto ai tradizionali algoritmi, come RTK e PPP, utilizzati per la ricostruzione di velocità e spostamenti cosismici (Colosimo, 2013). Queste tecniche, infatti, permettono di ottenere spostamenti cosismici con accuratezza centimetrica solamente in presenza di un'infrastruttura in grado di supportare un posizionamento differenziale oppure di prodotti precisi – come orbite, orologi e EOP (*Earth Orientation Parameters*) – non disponibili in tempo reale con le necessarie accuratezze. Il VADASE, invece, si basa solamente su osservazioni broadcast disponibili in tempo reale e, non necessitando di algoritmi di fissaggio dell'ambiguità di fase, permette di stimare istantaneamente velocità e spostamenti cosismici con accuratezza equiparabile a risultati ottenuti con approcci tradizionali utilizzando ricevitori GNSS di classe geodetica (Branzanti et al., 2013) (Benedetti et al., 2014) (Fratarcangeli et al., 2018).

La disponibilità di osservazioni grezze da smartphone Android permette l'estensione dell'approccio variometrico anche all'analisi dei dati acquisiti da questa nuova categoria di ricevitori mass-market. I risultati ottenuti nel caso di ricostruzione di tracce cinematiche e *gesture* utilizzando misure GNSS da smartphone (Pirazzi et al., 2017) incoraggiano ulteriori analisi anche mirate alla ricostruzione di movimenti periodici e caratterizzati da frequenze maggiori.

#### 4. ANALISI DEI DATI

Per valutare la possibilità di caratterizzare movimenti rapidi ed improvvisi attraverso l'approccio variometrico applicato ad osservazioni GNSS acquisite da uno Xiaomi Mi 8 sono stati eseguiti test in differenti scenari. L'acquisizione delle osservazioni da smartphone in formato RINEX 3.03 è stata eseguita attraverso *rinex ON*. Questa, rispetto alle altre app presenti su *Google Play Store*, è l'unica attualmente disponibile in grado di decodificare osservazioni GNSS e messaggio navigazionale fornendo, quindi, tutti i dati necessari per l'utilizzo del VADASE.

L'analisi attraverso l'approccio variometrico, descritto nel Paragrafo 3, è stata eseguita considerando le osservazioni GPS e Galileo acquisite su frequenza L1/E1 utilizzando un angolo di *cut-off* pari a 15°. Come sottolineato nel Paragrafo 1, gli smartphone utilizzano un'antenna GNSS di bassissimo costo che, quindi, è meno resistente a *cycle slip* e fenomeni di *multipath*. Per garantire elevati livelli di accuratezza è stato pertanto necessario utilizzare un algoritmo per l'identificazione di *cycle slip* (Colosimo, 2013) e ricercare ricorsivamente *outliers* nelle osservazioni attraverso la tecnica del *Leave-One-Out Cross Validation* (Fratarcangeli et al., 2018).

Sebbene lo Xiaomi Mi 8 sia in grado di acquisire osservazioni su frequenza L1 ed L5 per le costellazioni GPS e Galileo, sono state utilizzate solamente le osservazioni acquisite sulla frequenza L1 in questo articolo. Ciò è dovuto, in primo luogo, al numero sensibilmente inferiore di osservazioni L5 acquisite dal ricevitore che determina una bassa ridondanza nel processo di stima (Fig. 2). Infatti, nella costellazione GPS solamente i satelliti afferenti al blocco IIF sono in grado di trasmettere osservazioni su frequenza L5.

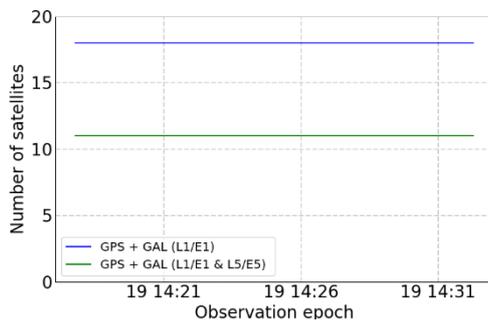


Figura 2 Esempio di satelliti GPS e Galileo contenenti osservazioni su L1 (blue) e su L1 ed L5 (verde).

Inoltre, la numerosità degli smartphone dotati di un chip multi-GNSS a singola frequenza non può essere trascurata. In definitiva, l'utilizzo dell'approccio variometrico basato sulle osservazioni acquisite su L1 garantisce una compatibilità della metodologia con un maggior numero di dispositivi attualmente in uso.

##### 4.1 Scenario statico

E' oramai noto che il VADASE è caratterizzato da una rumorosità di pochi mm/s se utilizzato in combinazione con ricevitori GNSS di classe geodetica. Tuttavia, a causa delle strumentazione GNSS di basso costo tipica di ricevitori *mass-market* come gli smartphone, la rumorosità dell'approccio variometrico in

condizioni indisturbate deve essere valutata per poter comprendere quali sono i fenomeni che possono essere identificati e quelli che, essendo contenuti nella soglia di rumore, non sono visibili quando si decide di investigare le capacità di questi nuovi ricevitori GNSS.

Pertanto, 15 minuti di osservazioni a 1Hz sono state acquisite in condizioni statiche e di elevata visibilità attraverso uno Xiaomi Mi 8. Il confronto con le velocità variometriche ottenute, per le stesse epoche di acquisizione, su un ricevitore di classe geodetica posizionato nelle vicinanze permette di confrontare immediatamente l'effetto, sulla soluzione finale, della differente qualità delle osservazioni di partenza (Fig. 3). Per eseguire il confronto è stata scelta la stazione permanente MOSE, caposaldo delle reti IGS/EUREF, che si trova a una distanza di circa 100 m dallo smartphone. Ciò ha permesso di considerare condizioni troposferiche e ionosferiche analoghe per i due ricevitori in esame.

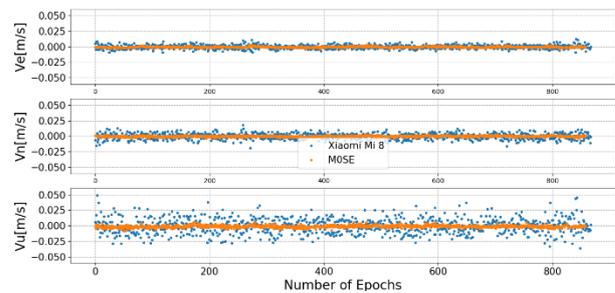


Figura 3 Soluzione variometrica ottenuta in condizioni statiche lavorando con osservazioni ad 1Hz acquisite da MOSE (arancio) e Xiaomi Mi 8 (blu)

L'analisi statistica dei residui rispetto al valore medio della componente di velocità investigata permette di definire la rumorosità, esprimibile attraverso il *Root Mean Square Error* (RMSE), dell'algoritmo per il ricevitore GNSS in questione (Tab. 1).

	RMSE [m/s]		
	$V_E$	$V_N$	$V_{UP}$
Xiaomi Mi 8	0.003	0.007	0.012
MOSE	0.001	0.001	0.002

Tabella 1 RMSE ottenuti per le 3 componenti di velocità stimate con il VADASE per i due ricevitori GNSS considerati

L'analisi della Tab.1 mette in evidenza una maggiore rumorosità delle soluzioni ottenute con gli smartphone in cui il valore di RMS è di diversi mm/s per le componenti planimetriche e dell'ordine del cm/s per la componente verticale della velocità. Sebbene la rumorosità delle soluzioni ottenute sia ben più elevata dei risultati ottenuti dai dati acquisiti dalla stazione permanente, tali valori mostrano come l'approccio variometrico permetta, in condizioni ambientali indisturbate, di caratterizzare i parametri di moto di fenomeni rapidi con velocità planimetriche maggiori del cm/s.

##### 4.2 Piastra vibrante con oscillazioni ad elevata frequenza

I risultati ottenuti in condizioni statiche hanno incoraggiato la realizzazione di un esperimento basato sull'utilizzo di una tavola vibrante (Fig. 4) su cui sono stati fissati uno smartphone Xiaomi

Mi 8 e un ricevitore di classe geodetica (STONEX S900A). La piastra è stata posizionata in condizioni di elevata visibilità per garantire l'acquisizione dei dati in assenza di condizionamenti ambientali (ad esempio *multipath* o interferenze).



Figura 4 Tavola vibrante utilizzata nell'esperimento.

La tavola vibrante è in grado di sollecitare i ricevitori GNSS installati con un movimento periodico unidirezionale, che simula parzialmente le sollecitazioni indotte da un'onda sismica, con un periodo di circa 1 secondo e un'ampiezza di 8 cm. Se la frequenza di acquisizione delle osservazioni per uno smartphone è pari ad 1Hz e non può essere modificata, lo STONEX S900A è in grado di acquisire osservazioni con frequenza fino a 10Hz. L'acquisizione dei dati è stata eseguita alternando condizioni statiche e cinematiche.

Le osservazioni acquisite a 10 Hz sono state utilizzate per ricostruire i parametri di moto e valutare l'efficacia della metodologia scelta per la descrizione del fenomeno periodico in esame (Fig. 5).

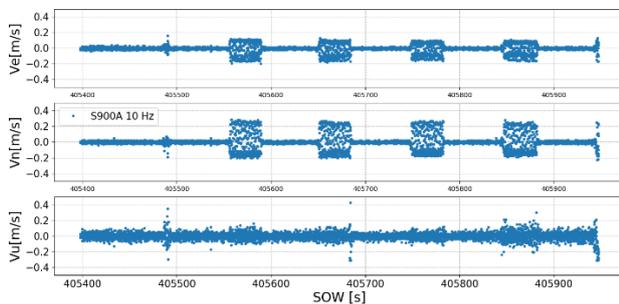


Figura 5 Variazione temporale delle velocità variometriche nelle tre componenti (E, N e UP) ottenute a partire da acquisizioni a 10 Hz con il ricevitore STONEX S900A.

L'analisi di Figura 5 mette in luce come, a meno degli *outliers* presenti, la metodologia sia in grado di ricostruire sia le condizioni statiche che dinamiche della piastra. Evidente a tal riguardo è l'assenza di variazioni significative per la componente verticale della velocità dal momento che il fenomeno periodico è interamente planimetrico.

L'accuratezza con cui il fenomeno è stato ricostruito può essere ottenuta isolando un ciclo di moto e caratterizzandolo statisticamente. La variazione temporale della velocità nella direzione del moto e gli spostamenti, ottenuti per integrazione, nel periodo di compreso tra 16:39:15 GPST e 16:39:49 GPST del 21/03/2019 sono riportati, rispettivamente, in Figura 6 e Figura 7.

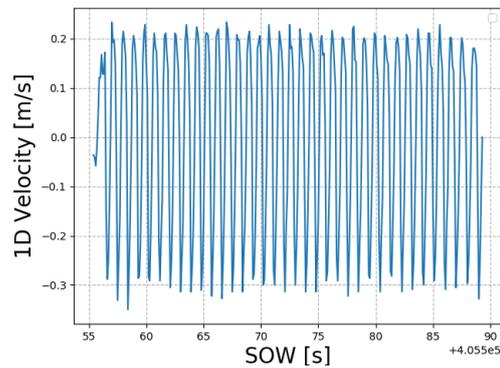


Figura 6 Variazione temporale delle velocità nella direzione di moto per le epoche comprese tra 16:39:15 GPST e 16:39:49 GPST del 21/03/2019

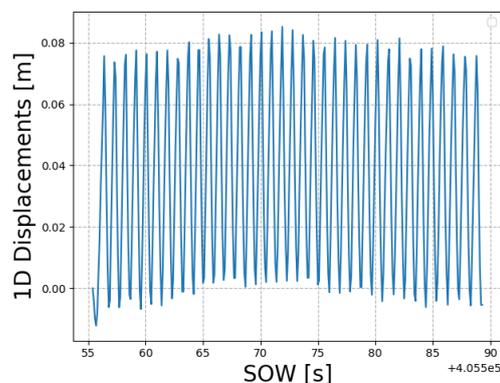


Figura 7 Variazione temporale degli spostamenti nella direzione di moto per le epoche comprese tra 16:39:15 GPST e 16:39:49 GPST del 21/03/2019

L'analisi statistica eseguita sui cicli di moto, definiti attraverso il metodo dello *zero-crossing*, porta ad una stima di ampiezza massima dello spostamento pari a 0.081 m con una deviazione standard di 0.002 m rispetto ad uno spostamento massimo misurato pari ad 0.08 m. Inoltre, la velocità massima stimata è pari a 0.26 m/s con una deviazione standard pari a 0.022 m/s ed è rappresentativa del fenomeno periodico impresso dalla tavola vibrante. Quindi, i risultati ottenuti a partire da osservazioni acquisite con una frequenza di 10 Hz confermano la possibilità di caratterizzare movimenti rapidi e periodici derivanti dall'utilizzo di una tavola vibrante attraverso l'approccio variometrico.

Come sottolineato in precedenza, GNSS *Raw Measurements* API non permette di modificare la frequenza di acquisizione delle osservazioni che rimane, invece, fissato ad 1Hz. Pertanto, per costruire delle soluzioni di riferimento con cui confrontare e valutare le performance raggiungibili con lo Xiaomi Mi 8, le osservazioni acquisite con STONEX S900A sono state decimate ad 1Hz. Le soluzioni ottenute utilizzando questi due dataset sono sovrapposte alle soluzioni ottenute con osservazioni a 10 Hz in Figura 8.

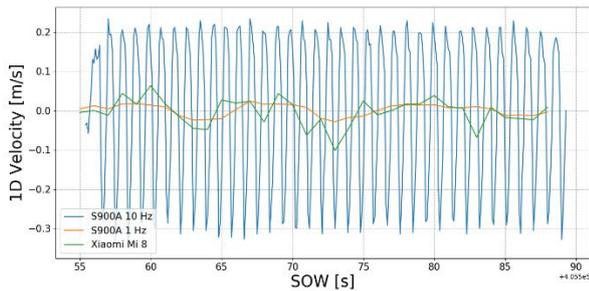


Figura 8 Variazione temporale degli spostamenti nella direzione di moto per le epoche comprese tra 16:39:15 GPST e 16:39:49 GPST del 21/03/2019. Nel grafico sono riportate le soluzioni per dati acquisiti a 10 Hz (blue) e 1Hz da STONEX S900A (arancio) e 1Hz da Xiaomi Mi 8 (verde)

L'analisi di Fig. 8 porta ad un risultato atteso: le velocità variometriche stimate a partire da acquisizioni a 1Hz sono affette da effetti di *aliasing*. Infatti, non è possibile ricostruire un fenomeno periodico caratterizzato da una frequenza di oscillazione circa pari a 1Hz con osservazioni acquisite a frequenza comparabile.

#### 4.3 Piastra vibrante con oscillazioni a bassa frequenza

Con lo scopo di ricreare un moto periodico che possa essere ricostruito con una frequenza di campionamento pari ad 1 Hz, la piastra è stata modificata per poter sollecitare i due ricevitori GNSS con un movimento caratterizzato da un periodo circa pari a 10 secondi ed un'ampiezza di 0.125 m. E' bene sottolineare che, per le modifiche apportate, il moto periodico non è regolare ma ciò non pregiudica i risultati ottenuti in questo esperimento.

Le stime di velocità ottenute da osservazioni a 10 Hz ed 1Hz (Fig. 9) sottolineano come il movimento possa essere ricostruito utilizzando sia lo smartphone che il ricevitore di classe geodetica. Inoltre, a causa della bassa frequenza di oscillazione della piastra vibrante, un' alta frequenza di campionamento porta ad una ricostruzione più rumorosa del fenomeno.

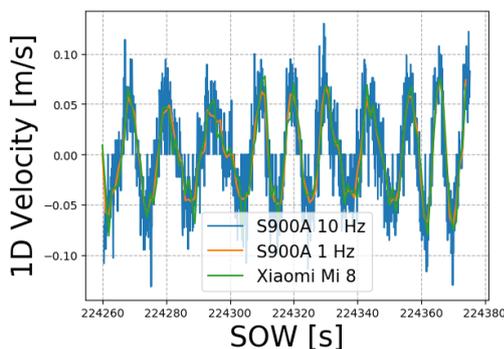


Figura 9 Variazione temporale della velocità nella direzione di moto per le epoche comprese tra 14:17:40 GPST e 14:19:35 GPST del 02/04/2019. Nel grafico sono riportate le soluzioni per dati acquisiti a 10 Hz (blue) e 1Hz da STONEX S900A (arancio) e 1Hz da Xiaomi Mi 8 (verde)

L'accuratezza che le osservazioni GNSS da Xiaomi Mi 8 offrono nella ricostruzione del movimento della piastra può essere valutata caratterizzando statisticamente i residui, sia in termini di velocità (Fig. 10) che di spostamenti (Fig. 11) nella direzione del

moto, rispetto alla soluzione ottenuta con osservazioni ad 1Hz acquisite da STONEX S900A.

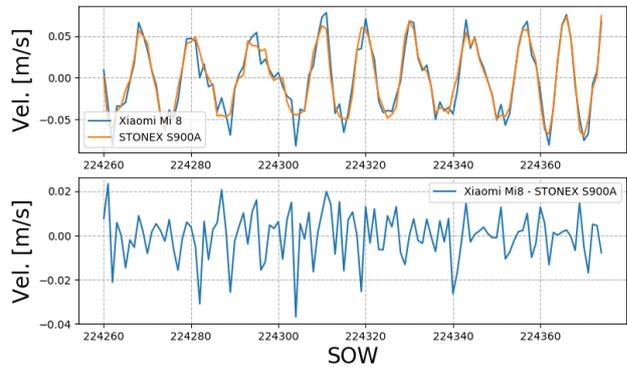


Figura 10 Variazione temporale delle velocità nella direzione di moto per le epoche comprese tra 14:17:40 GPST e 14:19:35 GPST del 02/04/2019 e residui ottenuti tra le due soluzioni: Xiaomi Mi 8 (blue) e STONEX S900A ad 1 Hz (arancio)

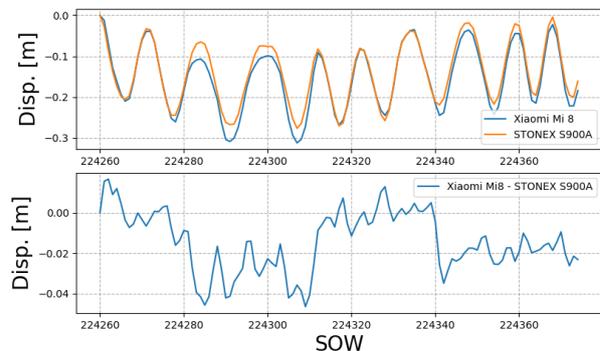


Figura 11 Variazione temporale degli spostamenti nella direzione di moto per le epoche comprese tra 14:17:40 GPST e 14:19:35 GPST del 02/04/2019 e residui ottenuti tra le due soluzioni: Xiaomi Mi 8 (blue) e STONEX S900A ad 1 Hz (arancio)

RMSE pari 0.011 m/s e pari a 0.021 m, ottenuti analizzando i residui riportati in Figura 10 ed in Figura 11 rispettivamente, permettono di affermare che le osservazioni GNSS acquisite da smartphone, in combinazione con l'approccio variometrico, sono in grado di riprodurre il fenomeno periodico in esame con elevata accuratezza. Inoltre, un'attenta analisi di Fig. 10 evidenzia come le osservazioni acquisite da Xiaomi Mi 8 portino a una sovrastima delle velocità nei picchi, sia positivi che negativi, rispetto ai valori di riferimento. A tal riguardo, è utile sottolineare come i ricevitori GNSS siano dotati di algoritmi di "predizione" delle osservazioni che permettono di ricostruire il valore delle osservazioni epoca per epoca. Un trend come quello individuato in Figura 10 potrebbe essere indicativo di differenze negli algoritmi utilizzati all'interno dei diversi ricevitori GNSS.

## 5 CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

La disponibilità di misure grezze acquisite da smartphone Android unitamente ai notevoli sviluppi tecnologici che stanno interessando il mondo dei ricevitori GNSS *mass-market* hanno permesso di investigare l'utilizzo di questa nuova categoria di ricevitori GNSS anche per applicazioni diverse dalla pura localizzazione del dispositivo. In questo articolo è stata analizzata

la possibilità di riprodurre movimenti molto rapidi, caratterizzati da ampiezza ed oscillazione confrontabili con segnali sismici, attraverso osservazioni GNSS acquisite da uno Xiaomi Mi 8. La metodologia di analisi scelta per investigare le performance dello smartphone nel campo di applicazione considerato è l'approccio variometrico implementato all'interno del VADASE, sviluppato e brevettato all'interno dell'Area di Geodesia e Geomatica della "Sapienza Università di Roma".

I valori di rumorosità ottenuti in condizioni statiche – diversi mm/s in planimetria e circa 1 cm/s per la componente verticale – suggeriscono la possibilità di descrivere movimenti molto rapidi caratterizzati da velocità planimetrica maggiori di 1 cm/s con uno Xiaomi Mi 8. Infatti, l'utilizzo di una tavola vibrante ha permesso di ricostruire un moto periodico monodirezionale con elevata accuratezza: RMSE di 0.011 m/s e di 0.02 m sono stati ottenuti per i residui di velocità e spostamenti rispetto ad un ricevitore di classe geodetica. Se il rate di acquisizione fissato a 1Hz per gli smartphone ha rappresentato una limitazione alla ricostruzione del fenomeno simulato attraverso la piastra vibrante, è importante sottolineare che le onde sismiche sono caratterizzate da periodi che possono raggiungere valori tra 6 e 7 secondi non pregiudicando, quindi, una loro ricostruzione con frequenze di campionamento pari ad 1 Hz.

I risultati ottenuti in questo lavoro incoraggiano ulteriori esperimenti mirati, innanzitutto, ad investigare il contributo che gli smartphone Android possono offrire nel campo delle Geoscienze in condizioni di utilizzo più realistiche di questi dispositivi. Infatti, tipicamente gli smartphone vengono utilizzati in ambiente urbano dove il segnale GNSS soffre maggiormente di problematiche relative a *multipath*, tracciabilità e *cycle slip*. Inoltre, la possibilità di definire un movimento improvviso con l'utilizzo dello smartphone deve essere verificata anche rimuovendo le ipotesi di *static-start* in modo da riprodurre l'utilizzo tipico dello smartphone da parte degli utenti. Infine, le *performance* dimostrate in questo articolo permettono di identificare ulteriori campi di applicazione per gli smartphone Android: ad esempio, la possibilità di monitorare le condizioni ionosferiche sarà investigata utilizzando l'approccio variometrico implementato nel VARION (Variometric Approach for Real-Time Ionosphere Observation) (Savastano et al., 2017).

Questi ulteriori studi di fattibilità porteranno a valutare i benefici derivanti da un utilizzo proficuo di dati GNSS da smartphone per la descrizione di fenomeni geofisici e, quindi, la possibilità di integrare queste informazioni all'interno di progetti di *big data* volti ad incrementare il grado di conoscenza del nostro Pianeta.

## 6 BIBLIOGRAFIA

Banville, S., & Van Diggelen, F., 2016. Precise positioning using raw GPS measurements from Android smartphones (Vol. 27(11)). *GPS World*.  
 Benedetti, E., Branzanti, M., Biagi, L., Colosimo, G., Mazzoni, A., & Crespi, M., 2014. Global navigation satellite systems seismology for the 2012 M w 6.1 Emilia earthquake: exploiting the VADASE algorithm. *Seismological Research Letters*, 85(3), pp. 649-656.

Branzanti, M., Colosimo, G., Crespi, M., & Mazzoni, A., 2013. GPS near-real-time coseismic displacements for the great Tohoku-oki earthquake. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 10(2), pp. 372-376.  
 Colosimo, G., 2013. *VADASE: A brand new approach to real-time seismology*. Saarbrücken, Germany: Lap Lambert Academic Publishing GmbH & Co KG.  
 Colosimo, G., Crespi, M., & Mazzoni, A., 2011. Real-Time GPS seismology with a stand-alone receiver: A preliminary feasibility demonstration. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 116.B11.  
 Fratarcangeli, F., Savastano, G., D'Achille, M., Mazzoni, A., Crespi, M., Riguzzi, F., Devoti, R., Pietrantonio, G., 2018. VADASE reliability and accuracy of real-time displacement estimation: application to the Central Italy 2016 earthquakes. *Remote Sensing* 10, no. 8, 1201.  
 Google, 2016. *Raw GNSS Measurements*. Tratto da Android Developers: <https://www.developer.android.com/guide/topics/sensors/gnss> (13 Oct. 2019)  
 GSA., 2017. <https://www.gsa.europa.eu/gnss-applications/gnss-raw-measurements>. Tratto da European Global Navigation Satellite Systems Agency: <https://www.gsa.europa.eu/gnss-applications/gnss-raw-measurements> (13 Oct. 2019)  
 Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Wasle, E., 2008. *Global Navigation Satellite Systems*. New York: Springer.  
 Mascitelli, A., Federico, S., Fortunato, M., Avolio, E., Torcasio, R., Realini, E., Mazzoni, A., Transerici, C., Crespi, M., Dietrich, S., 2019. Data assimilation of GPS-ZTD into the RAMS model through 3D-Var: preliminary results at the regional scale. *Measurement Science and Technology*.  
 Pesyna Jr, K., Heath Jr, R., & Humphreys, T., 2014. Centimeter positioning with a smartphone-quality GNSS antenna. *Radionavigation Laboratory Conference Proceedings*.  
 Pirazzi, G., Mazzoni, A., Biagi, L., & Crespi, M., 2017. Preliminary performance analysis with a GPS+ Galileo enabled chipset embedded in a smartphone. In *Proceedings of the ION GNSS*, pp. 101-115.  
 Privat, A., Pascaud, M., & Laurichesse, D., 2018. Innovative smartphone applications for Precise Point Positioning . *2018 SpaceOps Conference*, 2324.  
 Realini, E., Caldera, S., Pertusini, L., & Sampietro, D., 2017. Precise gnss positioning using smart devices. *Sensors*, 17(10), 2434.  
 Roberts, W., Critchley-Marrows, J., Fortunato, M. I., Callewaert, K., Tavares, T., Arzel, L., & Pomies, A., 2018. FLAMINGO - Fulfilling Enhanced Location Accuracy in the Mass-market through Initial Galileo Services. *ION GNSS+*. Miami, USA.  
 Robustelli, U., Baiocchi, V., Pugliano, G., 2019. Assessment of Dual Frequency GNSS Observations from a Xiaomi Mi 8 Android Smartphone and Positioning Performance Analysis. *Electronics*, 8(1), 91.  
 Savastano, G., Komjathy, A., Verkhoglyadova, O., Mazzoni, A., Crespi, M., Wei, Y., Mannucci, A. J., 2017. Real-time detection of tsunami ionospheric disturbances with a stand-alone GNSS receiver: A preliminary feasibility demonstration. *Scientific Reports*, 7, 46607.