

# Una strategia semplice per la GPS Seismology e i sistemi di early warning per gli tsunami denominata VADASE

di M. Branzanti, G. Colosimo, M. Crespi, A. Mazzoni e T. Dautermann

I recenti avvenimenti legati al fortissimo terremoto avvenuto in Giappone lo scorso 11 marzo 2011 e al tragico e devastante tsunami ad esso conseguente hanno, una volta di più, posto all'attenzione della comunità internazionale la necessità di disporre sistemi di *early warning* per gli tsunami sempre più efficienti. I sistemi GNSS, se utilizzati in modo adeguato, possono dare un grande contributo come nel caso della tecnica VADASE qui esposta.

Sebbene sia ben noto che lo scopo principale della Geomatica non è certamente quello di indagare su cause e fenomeni fisici legati a eventi sismici, è importante sottolineare che, negli ultimi anni, essa ha acquisito un ruolo fondamentale nel monitoraggio e nella descrizione di fenomeni legati a tali eventi grazie alle continuamente nuove disponibilità e potenzialità tecnologiche.

In particolare, questo lavoro espone lo stato dell'arte del contributo che il GPS e, più in generale i GNSS (Global Navigation Satellite Systems quali Glonass e, in futuro, Galileo e

Compass) possono offrire alla sismologia (GPS Seismology) e presenta una metodologia innovativa di trattamento dei dati (VADASE – Variometric Displacements Analysis Stand-Alone Engine) interamente concepita e sviluppata presso l'Area di Geodesia e Geomatica dell'Università di Roma "La Sapienza" e recentemente (ottobre-novembre 2010) premiata nell'ambito della *European Satellite Navigation Competition 2010* con due riconoscimenti: il *DLR Special Topic Prize* assegnato da DLR (German Aerospace Center) ([http://www.galileo-masters.eu/index.php?anzeige=special10\\_dlr](http://www.galileo-masters.eu/index.php?anzeige=special10_dlr)

html) e il *First Audience Award*, assegnato all'idea più votata (tra le 105 presentate) dalla comunità internazionale (<http://galileo-masters.eu/index.php?anzeige=top3.php>) (Colosimo et Al., 2010).

Questo nuovo approccio consente la stima accurata in tempo reale degli spostamenti cosismici e delle forme d'onda di un terremoto, utilizzando semplicemente i prodotti usualmente trasmessi dai satelliti nel messaggio navigazionale e le osservazioni di fase acquisite ad alta frequenza di campionamento (uguale o maggiore di 1 Hz) da un unico ricevitore GPS.

Il VADASE può quindi rappresentare una significativa risorsa per la GPS Seismology, e fornire un contributo nei sistemi di *early warning* per gli tsunami, tenendo presente che lo sviluppo tecnologico ha permesso di realizzare ricevitori GPS in grado di acquisire osservazioni ad altissima frequenza di campionamento (fino a 100 Hz).

Per comprendere come si sia giunti all'idea del VADASE e prima di presentarne alcuni risultati è però necessario fare un po' di storia.

## Motivazioni e sfide attuali

Come abbiamo già ricordato, il fortissimo terremoto che ha colpito l'isola di Honshu in Giappone lo scorso 11 marzo 2011 (Magnitudo M=9.0, <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2011/usc0001xgp/>), generando uno sconvolgente tsunami, ha nuovamente focalizzato l'attenzione verso i sistemi di *early warning* per questi eventi catastrofici.

The screenshot shows the website for the VADASE project. At the top, there is a navigation menu with links like 'About', 'How to participate', 'Regional Prizes', 'Special Topic', 'Prototyping Prize', 'Audience Award', and 'Media'. Below the menu, there is a banner for the 'EUROPEAN SATELLITE NAVIGATION COMPETITION 2011' with a 'log in or register here!' button and a countdown timer: '75 days 01 hour 11 minutes ...until the closing of the database on June 30th, 12:00pm CET'. A row of logos for sponsoring partners (ESA, DLR, NAVTEO, TRIGEA, ITRI, InsideGNSS, schmitz) is displayed. The main content area features the DLR logo and the authors' names: 'Gabriele Colosimo | Mattia Crespi | Augusto Mazzoni: VADASE (Variometric Approach for Displacements Analysis Stand-alone Engine)'. Below this is a photograph of the three authors. On the right side, there is a 'Events 2011' calendar listing various events from April to November, including 'Kick-Off Hesse', 'Kick-Off Brazil', 'Kick-Off Switzerland', 'Kick-Off Czech Republic', 'International Kick-Off', 'Innovation Forum Europe', 'Transport Logistic Trade Fair', 'Kick-Off Arab World at Global Space & Satellite Forum', 'Kick-Off Nice', 'Closing Database', 'iMOVE 360°', and 'Awards Ceremony'.

In questo caso, sfortunatamente, a causa dell'intensità del terremoto e della vicinanza dell'epicentro alla costa giapponese, molto difficilmente si sarebbe potuto limitare ulteriormente il grande numero di vittime e le ingentissime conseguenze, tra le quali spicca purtroppo il grave incidente avvenuto nella centrale nucleare di Fukushima.

Nonostante ciò, i sistemi di *early warning* per gli tsunami costituiscono infrastrutture fondamentali per la protezione e la sicurezza della popolazione in molte zone del mondo, soprattutto lungo le coste dell'Oceano Pacifico e dell'Oceano Indiano; ne è dimostrazione il fatto che in queste aree già sono operative due importanti infrastrutture preposte a tale scopo. Tali sistemi sono stati sviluppati dopo il grande terremoto di Sumatra (M=9.1, 26 dicembre 2004, <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2004/us2004slav/>) e sono gestiti dallo United States NOAA Pacific Marine Environmental Laboratory (<http://www.pmel.noaa.gov/>) e da una unità congiunta nata dalla collaborazione tra Germania ed Indonesia (<http://www.gitews.org/index.php?id=5&L=1>).

Nel frattempo, negli ultimi anni, numerosi studi scientifici hanno mostrato come l'analisi di dati GPS permette di determinare le forme d'onda superficiali causate da un terremoto ed i relativi spostamenti cosismici con accuratezze variabili tra alcuni millimetri e pochi centimetri (Blewitt et Al., 2009; Bock et Al., 2000; Kouba, 2005; Larson et Al., 2009).

Questo contributo è di particolare rilevanza dal momento che la conoscenza delle forme d'onda superficiali consente di modellare i meccanismi di rottura della faglia ove si è generato il terremoto e di calcolare importanti parametri sismici come il momento sismico e la magnitudo, evitando i problemi di saturazione che invece affliggono frequentemente i sismometri che si trovano nelle vicinanze degli epicentri di grandi terremoti (Bock, 2010, [http://www.unavco.org/community\\_science/science\\_highlights/2010/M7.2-Baja-SesimicGPSDisplacements.pdf](http://www.unavco.org/community_science/science_highlights/2010/M7.2-Baja-SesimicGPSDisplacements.pdf)).

Tali studi sono stati svolti principalmente *off-line*, utilizzando dati GPS acquisiti durante forti terremoti e sviluppando strategie di analisi (*single precise point positioning* e *differential kinematic positioning*) volte a diminuire il più possibile la latenza tra l'evento sismico e la stima degli spostamenti cosismici e delle forme d'onda superficiali.

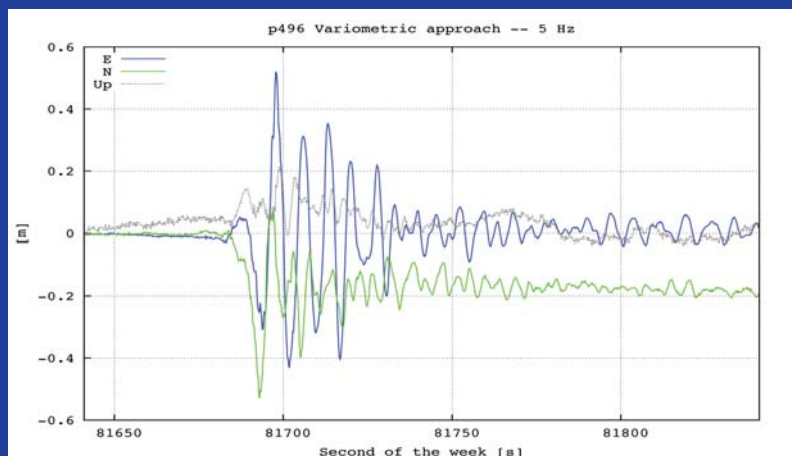


Figura 1: P496 – Soluzioni VADASE su un intervallo di 200 secondi 22:40:40-22:44:00, 4 aprile 2010 (DOY 094) tempo GPS, finalizzate ad un confronto qualitativo con i risultati ottenuti da Kristine Larson, University of Colorado at Boulder (USA) (Baha – P496).

A tale proposito, durante il Real Time GPS Science Requirements Workshop tenutosi a Leavenworth (Washington, USA) nel settembre 2007, è stata lanciata la sfida per il raggiungimento di 1 cm di accuratezza nel calcolo degli spostamenti cosismici e delle forme d'onda superficiali con tecniche GNSS, in un sistema di riferimento globale, entro 3 minuti dal verificarsi dell'evento sismico (Blewitt et Al., 2009).

### Stato dell'arte della GPS Seismology: potenzialità e svantaggi

Come già detto, sono due gli approcci principalmente usati nella *GPS Seismology*: il *single precise point positioning* ed il *differential kinematic positioning*. Il primo necessita di prodotti (orbite, orologi, parametri di orientamento terrestre) che ad oggi non sono regolarmente disponibili in tempo reale con la dovuta accuratezza. Questo approccio utilizza osservazioni a doppia frequenza acquisite da un singolo rice-

vitore GNSS e fornisce spostamenti in un sistema di riferimento globale.

Il secondo approccio si avvale di una complessa infrastruttura di rete (rete permanente GPS) al fine di ottenere un'elevata accuratezza in tempo reale (*Instantaneous Positioning*). Tale approccio necessita sia di un'infrastruttura di rete in cui la massima interdistanza tra le stazioni non superi alcune decine di chilometri, sia di un centro di analisi che elabori i dati acquisiti. Sebbene questa tecnica sia capace di garantire livelli di accuratezza che possono arrivare fino ad 1 cm, tuttavia presenta lo svantaggio di fornire solo differenze di posizioni rispetto ad una stazione permanente appartenente alla rete e assunta come riferimento. Pertanto, poiché tale approccio consente solo un posizionamento relativo, nei casi di forti terremoti che possono coinvolgere l'intera area coperta dalla rete permanente, anche la stazione di riferimento si sposta in seguito al

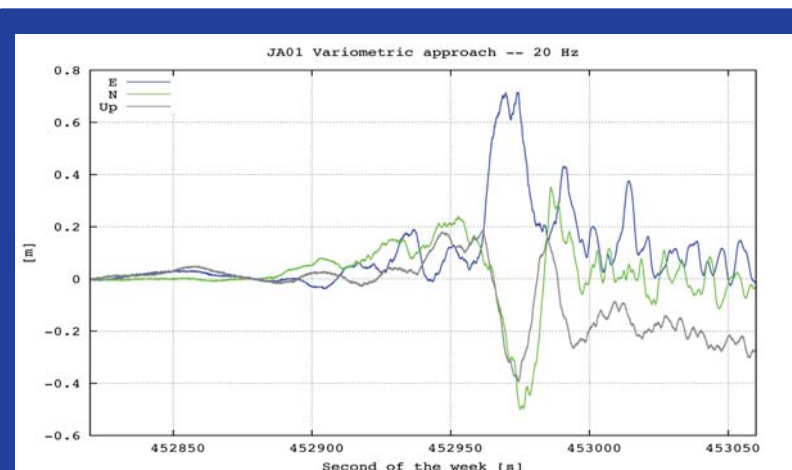


Figura 2: Soluzioni VADASE su un intervallo di 240 secondi 05:47:00-05:51:00, 11 marzo 2011 (DOY 070) tempo GPS.

terremoto e quindi diventa possibile determinare in tempo reale solo la differenza degli spostamenti cosismici delle stazioni e non gli spostamenti in un sistema di riferimento globale. Per ovviare a questo problema sarebbe necessaria una stazione di riferimento esterna alla zona interessata all'evento sismico, ottenendo dunque interdistanze maggiori con una conseguente riduzione di accuratezza.

**La terza via verso la sismologia GPS in tempo reale: il VADASE**

In questa sede presentiamo un nuovo approccio, denominato VADASE (*Variometric Approach for Displacements Analysis Standalone Engine*), con il quale è possibile determinare in maniera accurata spostamenti cosismici e forme d'onda in tempo reale, utilizzando i prodotti (orbite e orologi) usualmente trasmessi dai satelliti nel messaggio navigazionale e le osservazioni di fase acquisite con continuità ad alta frequenza di campionamento (uguale o maggiore di 1 Hz) da un unico ricevitore GPS.

Poiché non sono necessarie altre osservazioni oltre a quelle di un unico ricevitore, l'algoritmo può essere inserito direttamente nel firmware del ricevitore stesso. In questo modo, aggiungendo un semplice sistema di trasmissione dati, il ricevitore avrebbe la possibilità di comunicare spostamenti superiori ad una soglia di allerta opportunamente stabilita. Con tale configurazione, in caso di terremoto, le forme d'onda si renderebbero disponibili in tempo reale con accuratezza a livello centimetrico e potrebbero essere trasmesse istantaneamente ad un centro di controllo remoto, cui spetterebbe quindi la decisione di diramare l'allarme per un possibile tsunami.

Fino ad oggi, comunque, il software è stato utilizzato solo in modalità di post-processamento, prendendo come dati in ingresso osservazioni e prodotti trasmessi nel formato standard RINEX. Questo passaggio, provvisorio rispetto all'applicazione ultima per cui il software è stato pensato, si è dimostrato necessario per provare le funzionalità dell'algoritmo e confermare il suo basso costo computazionale e, di conseguenza, la possibilità di funzionare all'interno del firmware di un ricevitore.

L'efficienza del VADASE è stata dimostrata attraverso sue applicazioni nell'elaborazione dei dati relativi al terremoto di Baja California-Mexico (M=7.2, 4 Aprile 2010, [http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/](http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/recenteqsww/Quakes/ci14607652.php)

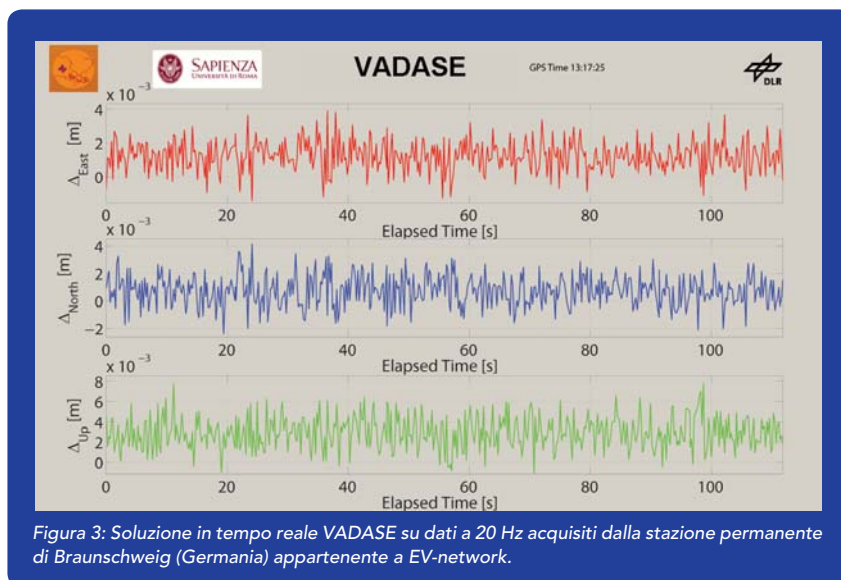


Figura 3: Soluzione in tempo reale VADASE su dati a 20 Hz acquisiti dalla stazione permanente di Braunschweig (Germania) appartenente a EV-network.

considerando le osservazioni della stazione P496 (5 Hz) dell'UNAVCO-Plate Boundary Observatory (Figura 1), e quelli relativi al già più volte citato terremoto di Honshu-Giappone, considerando le osservazioni alla frequenza di 20 Hz acquisite della stazione JA01 (nella città di Chofu, a 370 Km dell'epicentro), gestita da JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) e DLR (Figura 2).

Per quanto riguarda il terremoto di Honshu, è importante sottolineare che il VADASE è stato anche applicato in modalità *off-line* anche sulle osservazioni (1 Hz) acquisite delle stazioni MIZU (Mizusawa, a 140 Km dall'epicentro) e USUD (Usuda, 430 Km dall'epicentro), non appena queste sono state rese disponibili pubblicamente sul sito dello International GNSS Service (IGS). In tale ambito, i risultati ottenuti con il VADASE in termini di spostamenti cosismici e forma d'onda superficiali sono stati i primi a essere diffusi all'interno della comunità scientifica internazionale, appena poche ore dopo il verificarsi dell'evento sismico (<http://supersites.earthobservations.org/honshu.php#Sat0>).

In seguito all'assegnazione del DLR Special Topic Prize è recentemente (marzo 2011) iniziata una feconda collaborazione con lo *Institute of Communications and Navigation* del DLR volta allo studio di possibili migliorie del VADASE. Gli obiettivi di questa cooperazione contemplano, in particolare, la sua estensione alla costellazione GALILEO e il pieno sfruttamento delle sue capacità di elaborazione dati in tempo reale.

Risultati preliminari derivanti da tale collaborazione sono relativi all'analisi di un flusso di dati provenienti da una delle stazioni permanenti della rete

gestita da DLR (*EV-network*). La Figura 3 mostra gli spostamenti di tale stazione ottenuti in tempo reale, in un breve intervallo temporale.

**Conclusioni**

I risultati presentati in questo articolo conducono facilmente a due principali conclusioni: da un lato confermano le potenzialità del VADASE nella determinazione di spostamenti cosismici e forme d'onda superficiali in tempo reale, in particolare se l'approccio fosse direttamente implementato nel firmware di un ricevitore GNSS; dall'altro, sottolineano l'esigenza di realizzare una rete di ricevitori GPS capaci di acquisire ad alta frequenza di campionamento. A tal riguardo, con il GPS diventa possibile fornire un reale contributo sia nella stima di lente deformazioni della crosta terrestre (pre-terremoto e post-terremoto) sia nella determinazione di forma d'onda superficiali e spostamenti cosismici.

Infine, è importante notare che il VADASE è, in linea di principio, in grado di fornire contributi significativi anche in altri campi, come il monitoraggio di grandi strutture ed infrastrutture (ponti, grattacieli, torri). Sperimentazioni in tali settori sono in corso di progettazione.

**Ringraziamenti e note**

Gli Autori riconoscono il ruolo fondamentale dello International GNSS Service (IGS) nella distribuzione di dati GNSS in tempo quasi reale.

Il VADASE è protetto da una domanda di brevetto da parte dell'Università di Roma "La Sapienza".



## Note biografiche degli autori

**Mara Branzanti** è ingegnere per l'ambiente e il territorio. Ha conseguito la laurea presso la Facoltà di Ingegneria Civile e Industriale dell'Università di Roma "La Sapienza" con una tesi sulle applicazioni del VADASE a ricevitori GPS *low-cost*.

**Gabriele Colosimo** è dottorando di ricerca alla Facoltà di Ingegneria Civile e Industriale all'Università di Roma "La Sapienza". La sua ricerca è volta principalmente ad analisi di dati GNSS con particolare interesse verso la sismologia GNSS e i modelli troposferici; la sua tesi finale di dottorato verterà sullo sviluppo del nuovo algoritmo/software VADASE. La sua formazione è avvenuta nel campo dell'Ingegneria ambientale, ove ha conseguito la laurea presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Roma "La Sapienza" con una tesi sulla generazione e validazione di modelli digitali del terreno da immagini satellitari ad alta risoluzione; la tesi ha ricevuto ex-aequo il Premio Ventura 2009 della Fondazione Sapienza per la migliore tesi in Ingegneria Civile e Ambientale dell'anno.

**Mattia Crespi** è professore ordinario di *Positioning e Geomatica* alla Facoltà di Ingegneria Civile e Industriale dell'Università di Roma "La Sapienza". I suoi principali argomenti di ricerca attuali sono: sismologia GNSS, modelli troposferici e ionosferici, controllo di qualità nei servizi di posizionamento GNSS in tempo reale, generazione di modelli digitali del terreno da immagini satellitari ottiche e SAR ad alta risoluzione e monitoraggio di grandi infrastrutture.

**Augusto Mazzoni** è assegnista di ricerca alla Facoltà di Ingegneria Civile e Industriale all'Università di Roma "La Sapienza". Ha ricevuto il titolo di Dottore di Ricerca in Infrastrutture e Trasporti con una tesi su "GNSS Permanent Stations Networks for Positioning Services", che ha ricevuto il Premio AUTeC 2009 per la migliore tesi di dottorato nel settore della Geomatica dell'anno. I suoi attuali argomenti di ricerca riguardano la sismologia GNSS, l'analisi di dati GNSS per il posizionamento in tempo reale e il monitoraggio con GNSS.

**Thomas Dautermann** ha conseguito la laurea di primo livello alla Technical University of Kaiserslautern, Germania, e un Master con Dottorato di Ricerca alla Purdue University, West Lafayette, Indiana (USA). Attualmente è occupato all'interno del German Aerospace Center (DLR), ad Oberpfaffenhofen, Germania, come ricercatore in GBAS e trattamento delle osservazioni.

## Abstract

### Co-seismic Displacement Estimation. Improving Tsunami Early Warning Systems

The great earthquake ( $M=9.0$ ) which hit the Island of Honshu (Japan) on March 11, 2011 and generated a tremendous tsunami raised once more the attention towards tsunami early warning systems.

In this respect, during the last years, several studies demonstrated that GPS can be used effectively for estimating coseismic displacement waveforms (so called GPS seismology), with accuracies ranging from a few millimeters to a few centimeters. These studies were mainly developed off-line, re-analysing the GPS data acquired during strong earthquakes and well known processing strategies (Precise Point Positioning and Independent Positioning) were developed to lower the latency between the earthquake occurrence and the coseismic displacement waveforms estimation as much as possible. In this regard, during the Real Time GPS Science Requirements Workshop held in September 2007 in Leavenworth (Washington, USA) the goal of achieving 1 cm real-time GNSS displacement accuracies in the global reference frame within 3 minutes following an earthquake was adopted.

It is in this frame that here we present a novel approach named VADASE, with which we are able to estimate accurate co-seismic displacement waveforms in real-time, just using the standard broadcast products (orbits and clocks) and the high-rate (1Hz or more) carrier phase observations continuously collected by a GPS receiver. Since no other data than those routinely collected by a stand-alone GPS receiver are needed the algorithm can, in principle, be directly embedded into the receiver firmware.

VADASE was recognized a simple and promising approach towards the fulfillment of the mentioned goal and it was awarded with the DLR Special Topic Prize and with the First Audience Award within the European Satellite Navigation Competition 2010.

The effectiveness of VADASE is here shown through its application to the Baja California (Mexico) earthquake ( $M_w=7.2$ , April 4, 2010) and to the great Honshu (Japan) earthquake ( $M=9.0$ , March 11, 2011).

## Autori

MARA BRANZANTI  
MARABRA87@YAHOO.IT,  
GABRIELE COLOSIMO  
MATTIA CRESPI  
AUGUSTO MAZZONI  
<GABRIELE.COLOSIMO,MATTIA.  
CRESPI,AUGUSTO.MAZZONI>@UNIROMA1.IT  
DICEA - AREA DI GEODESIA E GEOMATI-  
CA, UNIVERSITÀ DI ROMA "LA SAPIENZA"  
VIA EUDOSSIANA, 18 - 00184 ROME, ITALY

THOMAS DAUTERMANN  
THOMAS.DAUTERMANN@DLR.DE

INSTITUTE OF COMMUNICATIONS AND  
NAVIGATION, GERMAN AEROSPACE CENTER  
(DLR)  
OBERPFAFFENHOFEN - 82234 WESSLING,  
GERMANY

## Parole chiave

GPS, TEMPO REALE, TERREMOTI, TSUNAMI,  
EARLY WARNING SYSTEMS

## Bibliografia

G. Blewitt, W.C. Hammond, C. Kreemer, H. P. Plag, S. Stein, E. Okal, GPS for real-time earthquake source determination and tsunami warning systems, *J. Geod.* 83, 335–343, doi:10.1007/s00190-008-0262-5 (2009).

Y. Bock, R.M. Nikolaidis, P. de Jonge, Instantaneous geodetic positioning at medium distances with the Global Positioning System, *J. Geophys. Res.* 105, No.B12, 28,223–28,253 (2000).

G. Colosimo, M. Crespi, A. Mazzoni, European Satellite Navigation Competition 2010, [http://www.galileo-masters.eu/index.php?anzeige=special10\\_dlr.html](http://www.galileo-masters.eu/index.php?anzeige=special10_dlr.html)

J. M. Dow, R. E. Neilan, C. Rizos, The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems, *J. Geod.* 83,191–198, doi: 10.1007/s00190-008-0300-3 (2009).

J. Kouba, A possible detection of the 26 December 2004 Great Sumatra-Andaman Islands Earthquake with solution products of the International GNSS Service, *Studia Geophysica et Geodetica* 49, 463–483 (2005).

K. Larson, GPS Seismology, *J. Geod.* 83, 227–233, doi:10.1007/s00190-008-0233-x (2009).

QUESTO ARTICOLO È STATO PROPOSTO DA GEOMEDIA PER LA PUBBLICAZIONE IN LINGUA INGLESE SULLA RIVISTA GIM-INTERNATIONAL NUMERO 5 2011.