

Progetto di ricerca:

Titolo: Stima e modellazione del ritardo troposferico da osservazioni GNSS per applicazioni integrate GNSS/SAR

Contesto

Le osservazioni dei sistemi di navigazione satellitare GNSS rappresentano uno strumento fondamentale per il posizionamento preciso e il monitoraggio del territorio, ma offrono anche la possibilità di studiare l'atmosfera. Durante la propagazione, i segnali subiscono un ritardo legato alla pressione, alla temperatura e al contenuto di vapore acqueo lungo il percorso attraversato. La stima di questo contributo, comunemente indicato come ritardo troposferico, consente di migliorare l'accuratezza delle misure geodetiche e di ricavare informazioni sulla variabilità atmosferica.

Le reti di stazioni GNSS permanenti forniscono osservazioni continue che possono supportare altre tecniche satellitari, tra cui l'interferometria radar ad apertura sintetica (InSAR), nella quale gli effetti atmosferici possono sovrapporsi ai segnali di deformazione del suolo. La ricerca approfondirà i metodi di stima del ritardo zenitale totale (*Zenith Total Delay*, ZTD), delle sue componenti idrostatica (ZHD) e umida (ZWD) e dei corrispondenti ritardi lungo la direzione satellite-ricevitore (*slant*). Nelle elaborazioni GNSS, i parametri troposferici zenitali vengono stimati dalle osservazioni lungo le diverse direzioni, attraverso funzioni di mappatura (funzioni mappanti) che collegano le componenti zenitali ai rispettivi contributi slant. Generalmente, la componente idrostatica viene modellata a partire dalla pressione atmosferica, mentre quella umida viene stimata dalle osservazioni. I gradienti orizzontali invece descrivono parte della variabilità azimutale. Saranno approfonditi il modello di Saastamoinen e le funzioni VMF1/VMF3, valutando l'influenza dei dati meteorologici e delle strategie di elaborazione sulla qualità delle stime (Saastamoinen, 1972; Landskron e Böhm, 2018).

La ricerca

La sperimentazione utilizzerà le stazioni GNSS della Rete Dinamica Nazionale (RDN) e le stazioni permanenti di proprietà dell'Università di Bologna, integrando le osservazioni delle stazioni appartenenti alle reti EUREF Permanent Network (EPN) e International GNSS Service (IGS), nonché quelle disponibili attraverso l'infrastruttura EPOS. Particolare attenzione sarà rivolta all'Emilia-Romagna, con confronti estesi al territorio italiano. Sarà inoltre valutato un raffittimento mediante le stazioni della Rete Integrata Nazionale GNSS (RING) dell'INGV, per migliorare la copertura spaziale e analizzare l'effetto della densità della rete sulla ricostruzione del ritardo. Saranno selezionati siti e periodi rappresentativi di differenti condizioni altimetriche e meteorologiche.

L'attività valorizzerà l'esperienza già consolidata presso l'Università di Bologna nell'utilizzo pacchetti software come GipsyX e PRIDE PPP-AR. I due software costituiranno la base per elaborazioni in modalità *Precise Point Positioning*, confrontando stime troposferiche, gradienti e residui utili alla ricostruzione dei ritardi slant. Saranno esaminati modelli, parametrizzazioni temporali, prodotti e possibilità di sviluppo, anche attraverso il codice aperto di PRIDE PPP-AR. A questi strumenti potranno essere affiancati software come RAI-DER, per ottenere stime del ritardo da modelli atmosferici lungo le direzioni radar e disporre di una metodologia complementare di confronto. ([Gipsy/GipsyX](#); [PRIDE PPP-AR](#); [RAI-DER](#)). Particolare

attenzione sarà dedicata al calcolo del ritardo troposferico lungo le singole direzioni satellite-ricevitore, per ciascuna epoca di osservazione, distinguendo la componente idrostatica da quella umida. L'obiettivo sarà valutare quanto questa descrizione, che tiene conto della geometria di ciascun collegamento GNSS, consenta di rappresentare le variazioni atmosferiche nello spazio e nel tempo e di migliorare le mappe di ritardo rispetto all'impiego dei soli valori zenitali. Il confronto tra le diverse strategie di calcolo permetterà di individuarne accuratezza, limiti e condizioni di applicabilità nell'integrazione con le osservazioni SAR (Kačmařík et al., 2017). Saranno infine prodotte mappe di ritardo alle epoche delle acquisizioni SAR, confrontando interpolazione degli ZTD, ricostruzioni basate sull'informazione slant e integrazione di modelli atmosferici. Il trasferimento alla geometria radar terrà conto delle diverse direzioni GNSS e SAR. Le mappe ottenute saranno confrontate per valutarne la coerenza e individuare le differenze legate ai metodi di calcolo, alle condizioni atmosferiche e alla distribuzione delle stazioni. Sarà inoltre esaminato il loro contributo alla correzione delle osservazioni SAR e alla distinzione tra effetti atmosferici e deformazioni del suolo. L'attività consentirà di definire una procedura di elaborazione consolidata, individuando le strategie più adatte e i relativi limiti nell'impiego congiunto di dati GNSS e SAR (Yu et al., 2018).

Bibliografia

- Saastamoinen, J. (1972). Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging satellites. *Geophysical Monograph Series*, 15, 247–251. DOI: [10.1029/GM015p0247](https://doi.org/10.1029/GM015p0247).
- Landskron, D., Böhm, J. (2018). VMF3/GPT3: refined discrete and empirical troposphere mapping functions. *Journal of Geodesy*, 92, 349–360. DOI: [10.1007/s00190-017-1066-2](https://doi.org/10.1007/s00190-017-1066-2).
- Kačmařík, M. et al. (2017). Inter-technique validation of tropospheric slant total delays. *Atmospheric Measurement Techniques*, 10, 2183–2208. DOI: [10.5194/amt-10-2183-2017](https://doi.org/10.5194/amt-10-2183-2017).
- Yu, C., Li, Z., Penna, N. T. (2018). Interferometric synthetic aperture radar atmospheric correction using a GPS-based iterative tropospheric decomposition model. *Remote Sensing of Environment*, 204, 109–121. DOI: [10.1016/j.rse.2017.10.038](https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.10.038).

English version

Research project

Title: Estimation and Modelling of Tropospheric Delay from GNSS Observations for Integrated GNSS/SAR Applications

Background

Global Navigation Satellite System (GNSS) observations are a fundamental tool for precise positioning and land monitoring, while also providing valuable information for atmospheric studies. During propagation, GNSS signals experience delays related to atmospheric pressure, temperature, and water vapour content along the signal path. Estimating this contribution, commonly referred to as tropospheric delay, improves the accuracy of geodetic measurements and provides information on atmospheric variability.

Networks of permanent GNSS stations provide continuous observations that can support other satellite-based techniques, including synthetic aperture radar interferometry (InSAR), in which atmospheric effects may be superimposed on ground-deformation signals. The research will investigate methods for estimating the *Zenith Total Delay* (ZTD), its hydrostatic (ZHD) and wet (ZWD) components, and the corresponding delays along the satellite–receiver line of sight (*slant delays*). In GNSS data processing, zenith tropospheric parameters are estimated from observations collected along different directions using mapping functions that relate the zenith components to their corresponding slant contributions. The hydrostatic component is generally modelled from atmospheric pressure, whereas the wet component is estimated from the observations. Horizontal gradients account for part of the azimuthal variability. Particular attention will be devoted to the Saastamoinen model and the VMF1/VMF3 mapping functions, with the aim of assessing the influence of meteorological data and processing strategies on the quality of the estimates (Saastamoinen, 1972; Landskron and Böhm, 2018).

Research Activities

The experimental work will use GNSS stations belonging to the Italian National Dynamic Network (*Rete Dinamica Nazionale*, RDN) and permanent stations operated by the University of Bologna. These observations will be integrated with data from stations belonging to the EUREF Permanent GNSS Network (EPN) and the International GNSS Service (IGS), as well as with data available through the EPOS infrastructure. Particular attention will be devoted to the Emilia-Romagna region, while comparative analyses will be extended to the entire Italian territory. The potential benefits of increasing the network density by including stations from the INGV National Integrated GNSS Network (*Rete Integrata Nazionale GNSS*, RING) will also be assessed to improve spatial coverage and investigate how network density affects delay reconstruction. Sites and periods representative of different elevation and meteorological conditions will be selected.

The study will build on the expertise already established at the University of Bologna in using software packages such as GipsyX and PRIDE PPP-AR. These two packages will provide the basis for *Precise Point Positioning* processing, allowing comparisons among tropospheric

estimates, gradients, and residuals useful for reconstructing slant delays. Models, temporal parameterisations, products, and opportunities for further development will be investigated, including through the open-source code of PRIDE PPP-AR. These tools may be complemented by software such as RAiDER, which derives atmospheric-delay estimates from weather models along radar lines of sight and therefore provides a complementary methodology for comparison ([Gipsy/GipsyX](#); [PRIDE PPP-AR](#); [RAiDER](#)).

Particular attention will be devoted to calculating the tropospheric delay along each individual satellite–receiver line of sight at every observation epoch, while distinguishing between the hydrostatic and wet components. The objective will be to assess the extent to which this representation—which accounts for the geometry of each GNSS link—can describe atmospheric variations in space and time and improve delay maps compared with the use of zenith-delay estimates alone. Comparing the different computational strategies will make it possible to identify their accuracy, limitations, and conditions of applicability in their integration with SAR observations (Kačmařík et al., 2017).

Finally, delay maps will be generated for the SAR acquisition epochs by comparing ZTD interpolation, reconstructions based on slant-delay information, and the integration of atmospheric models. The transformation into radar geometry will account for the different GNSS and SAR viewing directions. The resulting maps will be compared to assess their consistency and identify differences related to the computational methods, atmospheric conditions, and station distribution. Their contribution to correcting SAR observations and distinguishing atmospheric effects from ground deformation will also be investigated. The study will ultimately establish a robust processing procedure and identify the most suitable strategies, together with their limitations, for the joint use of GNSS and SAR data (Yu et al., 2018).

References:

Saastamoinen, J. (1972). Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging satellites. *Geophysical Monograph Series*, 15, 247–251. DOI: [10.1029/GM015p0247](#).

Landskron, D., Böhm, J. (2018). VMF3/GPT3: refined discrete and empirical troposphere mapping functions. *Journal of Geodesy*, 92, 349–360. DOI: [10.1007/s00190-017-1066-2](#).

Kačmařík, M. et al. (2017). Inter-technique validation of tropospheric slant total delays. *Atmospheric Measurement Techniques*, 10, 2183–2208. DOI: [10.5194/amt-10-2183-2017](#).

Yu, C., Li, Z., Penna, N. T. (2018). Interferometric synthetic aperture radar atmospheric correction using a GPS-based iterative tropospheric decomposition model. *Remote Sensing of Environment*, 204, 109–121. DOI: [10.1016/j.rse.2017.10.038](#).

17/09/02026

Prof. Stefano Gandolfi

Firmato digitalmente da

Stefano Gandolfi

2026-09-17 19:34:37 +0200