



Doctoral Thesis

Analysis and corrections of non-hydrostatic effects and GNSS antenna errors for accurate GPS and GALILEO IWV estimates

Author(s):

Scirè Scappuzzo, Francesca

Publication Date:

2009

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005886911> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH N° 18289

**ANALYSIS AND CORRECTIONS OF
NON-HYDROSTATIC EFFECTS AND GNSS ANTENNA ERRORS
FOR ACCURATE GPS AND GALILEO IWV ESTIMATES**

DISSERTATION

Submitted to the

SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ETH ZÜRICH

for the degree of

DOCTOR OF SCIENCES

by

FRANCESCA SCIRÈ SCAPPUZZO

Laurea in Ingegneria Elettrotecnica, Università di Catania, Italy
Master of Science, Massachusetts Institute of Technology, USA

born on April 27, 1965

citizen of Italy

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Hans-Gert Kahle, examiner
Prof. Dr. Bruce T. Anderson, co-examiner
Dr. Beat Bürki, co-examiner
Prof. Dr. Alan Geiger, co-examiner

2009

Abstract

The presence of water vapor in the atmosphere strongly affects weather and climate: water vapor is the source of all forms of precipitation (e.g. rain, snow, and hail); it regulates Earth's surface temperature by absorbing and reflecting incoming short-wave solar radiation and absorbing Earth's emission of long-wave radiation; and it is a source of latent heat that can be transported over great distance. Moreover, water vapor is the most abundant greenhouse gas and plays a key role in global climate change. Therefore, although atmospheric water is only a very small fraction of Earth's total water budget, its role in climate and weather is substantial for both regional and global scales. Hence, accurate, frequent, and dense water vapor measurements are crucial in atmospheric science studies.

When the microwave signal emitted by satellites of the Global Positioning System (GPS) constellation propagates through the atmosphere, the tropospheric refractivity causes a delay in the arrival of the signal to the GPS user receiver. This delay can be decomposed into a dry and a wet component: the wet component is coupled with the integrated precipitable water vapor in the atmosphere above the GPS receiver. While the refraction effect due to the presence of a certain concentration of water vapor in the atmosphere causes an undesired error in GPS positioning that needs to be corrected, it is possible to use the relative GPS signal delay to determine spatial and temporal distribution of the water vapor in the troposphere. This is the focus of the field of GPS Meteorology.

In GPS Meteorology, Integrated Water Vapor (IWV) is conventionally derived using hydrostatic models of the tropospheric delay (Zenith Hydrostatic Delay, ZHD, and Zenith Wet Delay, ZWD) as function of atmospheric parameters such as surface pressure and temperature measured at the GPS station. The Global Positioning System can effectively provide estimates of the Integrated Water Vapor with about 1 mm accuracy, as required for general use in atmospheric sciences studies. Moreover the GPS estimates of IWV are continuous in time and densely distributed in space.

The first part of this thesis focuses on the effects of non-hydrostatic equilibrium on GPS positioning and IWV estimates from GPS observations. A modified model of the ZHD is developed for GPS measurements acquired at stations located on mountainous regions affected by severe weather, where non-hydrostatic conditions are likely to occur. This ZHD model includes a correction that takes into account the non-hydrostatic conditions associated with the orographic wind as it relates to the particular topography of the mountain. This non-hydrostatic correction needs some input parameters related with the topography and atmospheric conditions at the GPS station: the wind speed, the atmospheric stability, and the mountain topography. From the knowledge of these parameters it is possible to estimate the pressure deviation from hydrostatic equilibrium.

The pressure deviation from hydrostatic equilibrium is here computed modeling mountain waves and lee-wave dynamics using a linear analysis of the steady flow over a mountain, where the linear approximation permits analytically exact solutions. Following this procedure the pressure deviation along a 2-D Gaussian mountain (with cross section on the x - z plane) is computed as a function of the x coordinate (horizontal distance from the summit). This

pressure deviation model is implemented for the estimation of the ZHD at the GPS station JUJO (Jungfrauoch), located in the Swiss Alps, in the Bernese Oberland. Jungfrauoch hosts a high altitude weather station (3,470 m, average annual pressure ~ 655 hPa, in mid-troposphere) that often experiences exceptionally high winds. The observations at JUJO often exhibit unexpected high GPS positioning errors and considerable IWV estimate errors.

For the typical non-hydrostatic effect associated with dynamic flow over the topography of Jungfrauoch, from the proposed non-hydrostatic model it emerges that the error in the Precipitable Water estimate is approximately > 1.0 mm for wind speeds of about 18-20 m/s. The error increases with increasing wind speed, and depends on the atmospheric stability at the time of observations. High winds speeds over 18 m/s are observed on Jungfrauoch approximately 20% of the time in winter. Therefore, the proposed non-hydrostatic correction needs to be applied to at least 20% of the IWV estimates at Jungfrauoch during winter in order to obtain meaningful data for atmospheric sciences studies. Indeed, 1 mm error in the estimate of IWV is particularly important at high altitude stations, where the IWV is generally quite small, between ~ 0.5 mm and 2 mm on Jungfrauoch.

In order to validate the results of the proposed non-hydrostatic model correction, the theoretical estimates were compared with estimates from the non-hydrostatic numerical local atmospheric Alpine Model (aLMo), with radiometric data acquired on Jungfrauoch by the Precise Filter Radiometer (PFR), and with atmospheric parameters measured at the station. This validation analysis shows good agreement between the theoretical estimates and the actual pressure deviations from hydrostatic equilibrium observed on Jungfrauoch in very high wind conditions, when the non-hydrostatic wave regime is expected to take place. While the non-hydrostatic deviation can be captured by the theoretical model adopted in this thesis the 7 km resolution grid of aLMo is not fine enough to capture these deviations over Jungfrauoch. Future versions of aLMo –aLMo2- have a 2 km resolution grid and should be able to detect orographic wind effects with sufficient accuracy to provide useful pressure deviation estimates. Until then, the theoretical methods derived in this thesis remain one of a few ways to estimate the small-scale non-hydrostatic pressure deviations on Jungfrauoch needed to correct the GPS IWV values. Finally, because the PFR cannot operate under high winds or overcast weather conditions, it was not possible to validate the non-hydrostatic model for wind speeds over 15 m/s due to lack of PFR data. This confirms again the importance of accurate IWV estimates from GPS observation on high altitude stations, since GPS can still provide useful information when other sensors fail to work under severe weather conditions.

The non-hydrostatic correction method can be applied to a multitude of GPS stations located in mountainous areas affected by orographic wind. Examples of eligible sites in the USA include: Mt. Washington, Mt. Olympus, Johnston Ridge, and Cheek Peak (Neah Bay). These sites often experience high winds and have topography suitable for the model adopted.

From additional studies performed on Jungfrauoch it emerged that the errors in IWV estimates introduced by the GPS receiving antenna on Jungfrauoch are systematic, between 1.0 – 2.0 mm, i.e. in average larger than the errors introduced by the non-hydrostatic condition for moderate winds.

The objective of this thesis is the improvement of the IWV estimates from GPS data, especially on high altitude stations affected by severe weather. One way to improve the IWV estimates is to introduce a non-hydrostatic correction (Part I). Another way is to enhance the

GPS receiving antenna performance (Part II). Therefore, the second part of this thesis is focused on improvements of the GPS antenna design. The errors introduced by the GPS antenna on the GPS measurements are mainly due to three basic factors: 1. the multipath error; 2. the antenna radome and snow accumulation over the radome; and 3. the antenna phase center variation.

Properly designing a multipath rejection ground plane, optimizing the radome, and stabilizing the phase center all contribute to achieve improved GPS accuracy. Moreover, using additional satellite systems (Modernized GPS + GALILEO) the accuracy can be enhanced by the availability of more satellites, and therefore, better constellation geometry (that improves the Dilution of Precision). Moreover, the improved GALILEO signals quality allow better ambiguity resolution, reduced tracking noise, and intrinsic increased multipath rejection.

In this research, a novel low multipath wideband GNSS antenna for reception of Modernized GPS and Galileo was modeled, designed, simulated, fabricated, and tested in anechoic chamber. The tests are in good agreement with the simulations, and show excellent multipath rejection and overall antenna performance in the whole bandwidth between 1.15 GHz and 1.60 GHz that will be used by the future Modernized GPS and GALILEO.

Using a novel GNSS low multipath antenna and a non-hydrostatic correction for the ZHD from aLMo2 (or equivalent non hydrostatic mesoscale numerical weather models) will provide sub-millimeter accuracy in IWV estimates on Jungfraujoch as well as on all those stations requiring especially high accuracy estimates of the IWV from GPS observations.

Sommario

La presenza di vapore acqueo nell'atmosfera influenza notevolmente le condizioni meteorologiche ed il clima: il vapore acqueo è all'origine di tutte le forme di precipitazione (come pioggia, neve, e grandine); regola la temperatura della superficie terrestre assorbendo e riflettendo le radiazioni solari ad onde corte e assorbendo le radiazioni ad onde lunghe emesse dalla crosta terrestre; ed è una delle cause del calore latente che può essere trasportato per grandi distanze. Inoltre, il vapore acqueo è il più abbondante dei gas che producono l'effetto serra. Pertanto, anche se il contenuto dell'acqua nell'atmosfera è solo una piccola frazione del bilancio totale dell'acqua sul nostro pianeta, il vapore acqueo ha un ruolo importante per il clima e per le condizioni meteorologiche. Accurate, frequenti, e dense misure del vapore acqueo sono fondamentali per studi riguardanti le scienze atmosferiche.

Quando il segnale a microonde emesso dai satelliti della costellazione del Global Positioning System (GPS) si propaga attraverso l'atmosfera, la rifrazione troposferica produce un ritardo nell'arrivo del segnale al ricevitore GPS. Questo ritardo può essere decomposto in una parte che non contiene acqua, (dry) e una parte che la contiene (wet). La parte che contiene acqua è associata al contenuto di vapore acqueo nella colonna atmosferica (IWV) in corrispondenza del ricevitore GPS. Mentre la rifrazione dovuta ad una certa concentrazione di vapore acqueo nell'atmosfera causa un errore indesiderato nella localizzazione del ricevitore GPS che deve essere compensato, è possibile utilizzare il ritardo del segnale GPS per determinare la distribuzione spaziale e temporale del vapore acqueo nell'atmosfera. Così, il GPS è potenzialmente uno strumento importante in Meteorologia.

In applicazioni meteorologiche del GPS, l'IWV è derivato convenzionalmente utilizzando modelli idrostatici del ritardo troposferico (Zenith Hydrostatic Delay, ZHD, and Zenith Wet Delay, ZWD) in funzione di parametri atmosferici quali la pressione superficiale e la temperatura misurate in corrispondenza della stazione GPS. Il Global Positioning System può fornire in modo efficace stime dell'IWV con un'accuratezza di circa un millimetro, necessaria per applicazioni in scienze dell'atmosfera. Inoltre, le stime dell'IWV acquisite da dati GPS sono continue e geograficamente densamente distribuite.

La prima parte di questa tesi è focalizzata sugli effetti della deviazione dall'equilibrio idrostatico nel posizionamento GPS e nella stima dell'IWV da dati GPS. Un modello modificato dello ZHD è sviluppato nella tesi per misure GPS acquisite in corrispondenza di stazioni localizzate in regioni montane spesso affette da maltempo, dove spesso condizioni di equilibrio idrostatico possono non verificarsi. Questo modello dello ZHD include una correzione che tiene conto delle condizioni non-idrostatiche associate con il vento orografico causato dalla particolare topografia della montagna. Questa correzione non-idrografica richiede alcuni parametri di input legati alla topografia ed alle condizioni atmosferiche alla stazione GPS: la velocità del vento, la stabilità atmosferica, e la topografia della montagna. Dalla conoscenza di questi parametri è possibile effettuare la stima della deviazione dalla pressione in condizioni idrostatiche.

La deviazione della pressione dal valore in equilibrio idrostatico è calcolata attraverso la modellizzazione di onde montane e della dinamica di onde "lee", attraverso un'analisi lineare del flusso costante su una montagna, dove l'approssimazione lineare permette una soluzione analitica esatta. Seguendo questa procedura la deviazione della pressione lungo una montagna di sezione Gaussiana (con sezione trasversale sul piano $x-z$) è calcolata in funzione della coordinata x (distanza orizzontale dalla sommità della montagna). Questa deviazione di

pressione è applicata alla stima dello ZHD per la stazione GPS sullo Jungfrauoch (JUJO), che si trova sulle Alpi Svizzere, nella Bernese Oberland. Lo Jungfrauoch è sede di una stazione atmosferica d'alta quota (3.470 m, con pressione annuale media di circa 655 hPa nella troposfera media) che spesso è affetta da venti eccezionalmente alti. Le osservazioni acquisite da JUJO spesso mostrano inaspettati considerevoli errori nel posizionamento GPS e nelle stime dell'IWV.

Per il tipico effetto non-idrostatico associato con il flusso dinamico sulla topografia dello Jungfrauoch, dal modello non-idrostatico qui sviluppato si può osservare che l'errore nella stima dell'IWV è circa $> 1,0$ mm per velocità del vento di circa 18-20 m/s. L'errore aumenta per velocità superiori e dipende dalla stabilità atmosferica durante le misure. Considerevoli venti superiori a 18 m/s sono stati misurati sullo Jungfrauoch circa 20% del tempo in inverno. Pertanto, la correzione non-idrostatica qui proposta dovrebbe essere applicata almeno al 20% delle stime di IWV sullo Jungfrauoch in inverno al fine di ottenere dati rilevanti per scienze atmosferiche. Un errore di circa 1 mm è particolarmente importante per stazioni d'alta quota, dove il valore dell'IWV è abbastanza piccolo, approssimativamente fra 0.5 mm e 2.0 mm su Jungfrauoch.

Al fine di validare i risultati del modello per la correzione degli effetti non-idrostatici, le stime teoriche sono confrontate con 1. le stime numeriche ottenute dal modello locale non-idrostatico aLMo (Alpine Model), 2. con i dati radiometrici acquisiti su Jungfrauoch con il radiometro Precise Filter Radiometer (PFR), e 3. con parametri atmosferici estratti da ANETZ misurati alla stazione. Quest'analisi di convalida mostra buon accordo fra le stime basate sul modello teorico e la deviazione della pressione dall'equilibrio idrostatico osservata su Jungfrauoch durante condizioni di vento considerevole, quando il regime non-idrostatico ha alta probabilità di verificarsi. È interessante notare che questa deviazione non-idrostatica può essere stimata dal modello teorico usato in questa tesi, ma non dal modello numerico, perché la griglia di risoluzione di aLMo è 7 km ed è troppo larga perché sia in grado di modellizzare deviazioni in pressione dovute a fenomeni di dimensioni più piccole. La futura versione di aLMo – aLMo2- ha una griglia di risoluzione di 2 km e dovrebbe essere in grado di modellizzare gli effetti del vento orografico con sufficiente accuratezza. Fino a quando aLMo2 non è disponibile, il modello teorico sviluppato in questa tesi rimane uno dei pochi metodi validi per la stima di deviazioni della pressione in equilibrio idrostatico su Jungfrauoch, necessari per correggere le stime dell'IWV da dati GPS. Infine, poiché il PFR non è in grado di funzionare durante condizioni atmosferiche con alto vento e nuvole, non è stato possibile verificare il modello non-idrostatico per vento superiore a 15 m/s a cause di mancanza di dati radiometrici. Questa mancanza di dati durante maltempo conferma l'importanza di stime accurate dell'IWV estratte a dati GPS su stazioni ad alta quota. Infatti, i dati GPS sono disponibili anche durante il maltempo, quando altri sensori sono inoperabili.

La correzione non-idrostatica può essere applicata ad una moltitudine di stazioni GPS localizzate in aree montagnose dove ha luogo l'effetto del vento orografico. Esempi di stazioni GPS che potrebbero usufruire delle correzioni qui proposte sono (negli Stati Uniti d'America): Mt. Washington, Mt. Olympus, Johnston Ridge, e Cheek Peak (Neah Bay). Queste stazioni sono localizzate in aree colpite da venti considerevoli e hanno una topografia ideale per il modello proposto.

Da studi su Jungfrauoch trovati in letteratura emerge che gli errori introdotti nella stima dell'IWV dovuti all'antenna GPS ricevente sono sistematici, circa 1.0 – 2.0 mm, e sono

quindi più elevati degli errori introdotti dalla condizione di equilibrio non-idrostatico per venti moderati.

L'obiettivo di questa tesi è il miglioramento delle stime dell'IWV estratte da dati GPS, specialmente su stazioni ad alta quota. Un modo per perfezionare queste stime è l'introduzione di una correzione non-idrostatica (Parte I). Un altro modo è la modifica ed il miglioramento delle prestazioni dell'antenna GPS ricevente (Parte II). Pertanto, la seconda parte di questa tesi è focalizzata sul miglioramento del design dell'antenna GPS. Gli errori introdotti dall'antenna GPS sono causati principalmente da tre fattori: 1. errore dovuto a riflessioni multiple; 2. radome dell'antenna e accumulazione di neve; e 3. variazione dell'antenna phase center.

Un design appropriato che elimini riflessioni multiple, un'ottimizzazione del radome, e la stabilizzazione del phase center dell'antenna, contribuiscono al miglioramento dei dati GPS. Inoltre, usando sistemi satellitari aggiuntivi (Modernized GPS e Galileo) l'accuratezza delle misure può essere innalzata attraverso la disponibilità di più satelliti, e quindi, una migliore geometria della costellazione satellitare (che migliora Dilution of Precision). Peraltro, i segnali emessi dai satelliti del sistema Galileo avranno una qualità superiore a quelli esistenti, e permettono di migliorare la risoluzione dell'ambiguità, ridurre il rumore di monitoraggio, ed eliminare ulteriormente le riflessioni multiple.

Nella seconda parte della tesi è stata sviluppata, costruita, e testata, una nuova antenna con ampia larghezza di banda per ricezione di Modernized GPS e Galileo. I risultati dei test in camera anecoica sono in accordo con le simulazioni numeriche e validano le prestazioni dell'antenna in tutta la banda, fra 1.15 GHz e 1.60 GHz.

L'uso di una nuova antenna GNSS e l'introduzione di una correzione non-idrostatica per il modello dello ZHD da aLMo2 (o altri equivalenti modelli atmosferici locali non-idrostatici) saranno in grado di fornire un'accuratezza di almeno un millimetro per la stima dell'IWV su Jungfraujoch ed altre stazioni che richiedono alta risoluzione per il monitoraggio di vapore acqueo da dati GPS.