

臺灣區域性對流層延遲修正模式之介紹

The Introduction of Regional Tropospheric Correction Model over Taiwan

吳曉雯¹ 楊名² 李孟穎³ 江凱偉⁴
Hsiao-Wen Wu Ming Yang Meng-Ying Li Kai-Wei Chiang

摘要

對流層延遲誤差是衛星定位主要的誤差來源之一，對流層誤差根據其特性可以進一步分為乾分量及濕分量，透過全球經驗模式配合精確的地面氣象量測值，可獲得公厘精度等級之天頂方向之對流層乾延遲估值。濕延遲量則與水汽含量的多寡有關，水汽含量較多時，濕延遲量也相對較高。然而，水汽在空間及時間上具有快速變化之特性，因此限制了濕延遲量估計之精度。本文說明臺灣區域性對流層延遲模式使用之相關資料，資料內容主要包含 2009 年臺灣國土測繪中心之全球定位系統衛星追蹤站 (e-GPS) 觀測資料以及中央氣象局之地面氣象觀測網數據，並且說明此區域性模式相關公式以及使用方法。結合氣象觀測網數據、GPS 觀測網及克利金方法所推估之 e-GPS 氣象量做為乾延遲計算之輸入值，成果分析顯示 14 個檢核站之平均 RMS 約為 $\pm 0.23\text{cm}$ 。另一分析則是將區域模式與使用標準大氣參數之全球經驗模式相比，結果顯示以此技術所發展出的區域性模式更能表現出臺灣地區對流層延遲量的季節變化趨勢。此外，將此區域性模式與 GPS 實測資料兩者相比，藉由分析 14 個均勻分布的獨立檢核點相關數據，其精度可達到 $\pm 4.77\text{ cm}$ 。藉由檢核成果說明了結合氣象觀測網與 GPS 觀測資料可以輔助建立一個精度良好的區域性對流層修正模式。

關鍵詞：地面氣象觀測；絕對天頂對流層延遲；區域性對流層延遲模式

ABSTRACT

Tropospheric delay is one of the major error sources while positioning. According to the characteristics of tropospheric delay, it can be divided into two parts, dry and wet component. By adopting global tropospheric delay model and surface meteorological data, the accuracy of dry component in the zenith direction can reach to mm level. While the wet delay is related to the amount of water vapor, the accuracy of estimating wet delay is limited due to the quickly spatial and temporal changes of water vapor. In this study, we also introduce the regional tropospheric delay model developed via data from GPS observation and meteorological data in 2009. The GPS observation

¹ 國立成功大學 測量及空間資訊學系 碩士/研究助理

² 國立成功大學 測量及空間資訊學系 教授/系主任

³ 國立成功大學 測量及空間資訊學系研究助理教授

⁴ 國立成功大學 測量及空間資訊學系副教授

sites (e-GPS) were set up by National Land Surveying and Mapping Center (NLSC) and the meteorological surface station were set up by the Central Weather Bureau (CWB). Formulas and the process of using this regional tropospheric model are also introduced in this study. By combining the meteorological data, GPS data and Kriging method, the average of RMS among 14 check stations can reach to ± 0.23 cm. The regional model shows the seasonal variation and consists with the GPS-estimated ZTD by comparing to the global models that using standard atmosphere. The overall accuracy of the model is ± 4.77 cm, as is evaluated at 14 evenly distributed check points. According to the results, it is a feasible technique to develop an accurate regional tropospheric delay model by using the meteorological data and GPS data.

Keyword : Surface meteorological measurement, absolute zenith tropospheric delay, regional tropospheric delay model

一、背景

對流層延遲量可分成兩部分，分別為流體靜力延遲(hydrostatic delay)部分，又稱為乾延遲(dry delay)以及濕延遲(wet delay)部分 (Saastamoinen, 1972)。乾延遲量佔總延遲量中 90%，是由大氣中乾燥空氣造成會隨地表面壓力改變而變化，隨時間變化較為緩慢。天頂對流層乾延遲量(zenith hydrostatic delay, ZHD)可透過地表壓力及溫度模式化，精度可達 2-5%(Leick, 1995)。濕延遲量約佔總延遲量 10%，其大小與 GPS 訊號傳播路徑中水汽含量多寡有關，約呈線性關係 (Askne and Nordius, 1987)。但水汽在空間及時間上的變化較為快速，因此難以透過地表溫度及壓力量測值準確地預估或模式化。目前所使用的對流層延遲誤差修正方法主要有經驗氣象模式(empirical meteorological models)、參數估計(parameter estimation)以及外部改正(external correction)三種方法 (Bock and Doerflinger, 2001)。

使用全球經驗模式如 Saastamoinen 模式時，可採用地面氣象觀測量輸入經驗模式，以期望可以獲得精度良好之天頂對流層延遲量(zenith tropospheric delay, ZTD)模式值，但是並非所有 GPS 站都設置有氣象觀測儀器可提供氣象觀測資料。雖然多數的 GPS 解算軟體中也可經由大地水準面或平均海水面上標準大氣參數進一步計算對流層延遲量，但是由於標準大氣參數並不會隨時間改變，因此以此方法計算之 ZTD 亦不會隨時間改變，也就是隨時間變化而維持定值。相較之下，採用地面氣象觀測值便能夠真實地反映測站的大氣狀況，例如氣溫就會因為季節不同而有高低溫之變化。根據中央氣象局統計顯示在臺灣夏季期間八月份的最高平均溫度為 28.9°C ，冬季期間一月份的最高平均溫度為 20.7°C ，此統計值亦會因所在地點在高山而降低。

在臺灣針對無法獲得氣象觀測值但又必須獲得 ZTD 值的導航使用者而言，若能利用臺灣地區氣象參數之經驗值配合對流層模式便能夠進行計算任一位置

之 ZTD 值並且輔助導航定位提升其定位精度。由於臺灣目前已經具有相當完整且分布均勻之 e-GPS 觀測網，若能進一步配合精密單點定位 (Precise Point Positioning, PPP) 技術 (Kouba and Héroux, 2001)，我們便能估計所有 e-GPS 站之絕對 ZTD 值。

考量乾、濕分量在空間及時間上之變化特性不同，建模時必須分別建立乾、濕模型，其中建立乾模型所需要的氣象資料受限於 e-GPS 觀測網上並非所有測站皆具有氣象觀測儀器。因此，在建立區域性對流層修正模式的過程中採用了中央氣象局氣象網之觀測資料以及克利金方法，以克服氣象觀測儀器之限制。透過結合臺灣地區實際氣象量測值與絕對天頂對流層延遲觀測量之技術以協助發展一個能顯示真實絕對 ZTD 變化之臺灣區域性對流層延遲修正模式，並且藉由不同的分析來驗證此區域性模型之精度(楊名、江凱偉，2010)。

二、臺灣區域性對流層延遲修正模式介紹

2.1 建模資料

由於此區域性模式是建立於日模型的基礎上，因此每日僅一筆估計值。實際建模時，雖然 GPS 所獲得之 ZTD 取樣頻率為 30 秒，氣象資料為每小時一筆，但是我們可透過計算其日平均值將兩種資料相互對應使用。

● GPS 資料

我們所使用的是 52 個國土測繪中心衛星追蹤站(e-GPS)觀

測資料輔助建模工作，首先須以 PPP 技術完成 2009 年 GPS 站絕對 ZTD 估計，再將乾分量部分移除，便能夠獲得天頂對流層濕延遲量。e-GPS 站分布可參考圖 1，由圖 1 中可看出其分布相當均勻，但外島地區如金門、澎湖和馬祖共 14 個測站因距離台灣本島過大，其資料便不納入建模。但為了使每日 GPS 觀測站數達到一定之數量，便使用 40 個 CGS(Central Geological Survey)測站來增加測站數量。而具有氣象觀測設備的 14 個 e-GPS 站，其資料可以提供模型精度檢核之用，因此這些測站資料在建模過程中並不納入計算。各類型 GPS 測站數統計表可參考表 1，總站數共有 120 站，扣除距離過遠的外島 14 站後，對流層建模與檢核工作共使用 106 站之觀測資料。

GPS 資料以日為單位進行每日連續資料計算，各月份所處理之 GPS 站資料站數如圖 2，由圖 2 可看出每日處理 50 個以上 GPS 站之資料，自 DOY200 後數量降至 70 站左右是因為無法取得 CGS 資料所導致。但是，並不是所有 GPS 站都設置有氣象觀測儀器可以提供氣象參數計算乾分量，因此 GPS 站氣象參數主要採用克利金空間推估方法(Krige, 1951)由中央氣象局氣象站觀測資料推估獲得。水汽分壓參數則是由臺灣地區

e-GPS 站上天頂對流層濕延遲

量透過非線性迴歸計算獲得。

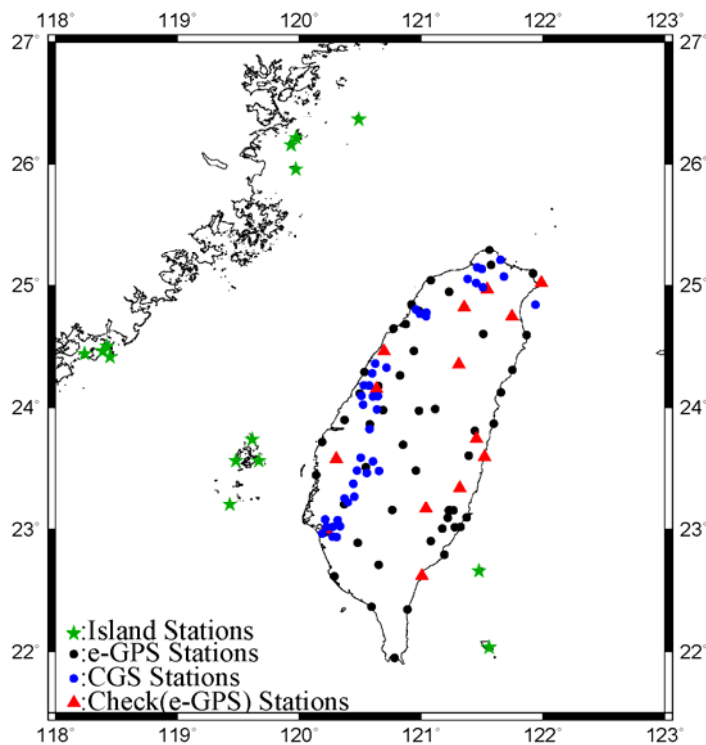


圖 1 GPS 站位置分布圖

表 1 GPS 測站類型與站數統計表(總站數: 120 站)

測站類型	站數
e-GPS Stations	52
CGS Stations(地調所測站)	40
Check Stations(檢核站)	14
Island Stations(外島站)	14

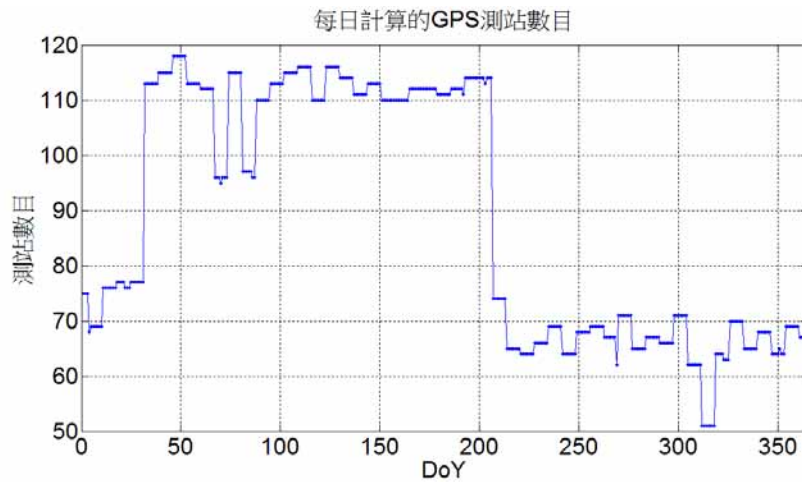


圖 2 2009 年每日 e-GPS 站天頂對流層總延遲量估計之站數

● 氣象資料

由於並非所有 GPS 觀測站上都設置氣象觀測儀器，因此我們使用由中央氣象局局屬觀測站以及自動氣象站所觀測之氣象資料進行建模，所有氣象資料皆下載自臺灣大學大氣科學系所建立的大氣研究資料庫(Data Bank for Atmospheric Research, DBAR)，共約有 179 站，外島站如金門、澎湖、馬祖及綠島等則不納入建模，其分布如圖 3，其中局屬觀測站主要為人工觀測，所記錄之氣象參數項目齊全；而自動氣象站是經由儀器自動觀測，觀測項目為累積雨量、平均氣溫、平均風速風向、

測站氣壓、日照時數、濕度。本文使用上述測站所提供之氣壓及氣溫資料計算 e-GPS 站推估值以及 ZHD，氣象資料觀測頻率約每小時一次，建模時需要進一步計算每日氣象量之平均值。考量模型對於一般情況下之適用性，氣象資料預處理時，若氣象資料變化劇烈便不採用，如 2009 年 DOY218 至 DOY221 因受到莫拉克颱風的影響，此期間氣象資料便不納入建模，主要是因颱風侵襲時，各測站並不具有週期性之變化，而是隨著颱風路徑各氣象站氣壓觀測值快速地變化，其餘天數資料則全數納入建模。

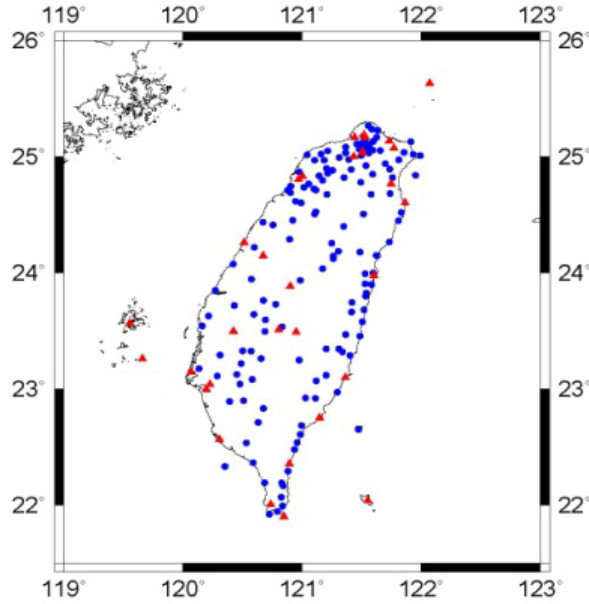


圖 3 中央氣象局氣象站分布圖，約 179 站
(●:自動氣象站、▲:局屬觀測站)

2.2 臺灣區域性對流層延遲修正模式 計算方法

本節將介紹臺灣區域性對流層延遲修正模式相關公式以及使用方法，透過本節將可以更清楚的了解如何使用此模式計算 ZTD 估計值。大地水準面上氣象量模式值可表示成與氣象量年平均、週期函數之振幅、相位及時間 (DOY, Day of Year) 有關，如式(1) (Niell, 1996)

$$\xi = \xi_{avg} - \xi_{amp} \cdot \cos\left(2\pi\left(\frac{DOY - 28}{365.25}\right)\right) \quad (1)$$

其中

ξ : 代表大地水準面上氣向量模式值，為大地水準面上氣溫量或氣壓量

ξ_{avg} : 大地水準面上氣象量年平均

ξ_{amp} : 大地水準面上氣象量週期函數之

振幅

DOY : 時間變數，Day Of Year

由於大地水準面上氣溫量不僅隨時間而改變亦隨著空間而有所變化，全球氣溫平均值隨著緯度遞減，而年變化之大小也與測站緯度有關(Pidwirny, 2006)。因此臺灣區域性對流層延遲修正模式在大地水準面上氣象量時空模式中其自變數除了考慮時間因素外，亦加入空間變異之考量使其模式之參數含時空因子之特性。每日的大地水準面上氣溫模式值可由式(2)表示(吳曉雯，2010)：

$$T_0 = (a_1 \cdot \varphi + a_2) - (a_3 \cdot \varphi + a_4) \cdot \cos\left(2\pi\left(\frac{DOY - 28}{365.25}\right)\right) \quad (2)$$

其中

T_0 : 大地水準面上氣溫量模式值

a_i : 經驗係數, 經由非線性迴歸後得

$a_1 = -0.8295, a_2 = 44.4101, a_3 = 0.7618,$

$a_4 = -12.4038$

φ : 測站緯度(度)

DOY : 時間變數(日), Day Of Year

而每日的大地水準面上氣壓模式值

可由下式(3)表示(吳曉雯, 2010):

$$P_0 = b_1 - b_2 \cos\left(2\pi\left(\frac{DOY - 28}{365.25}\right)\right) \quad (3)$$

其中

P_0 : 大地水準面上氣溫量模式值

b_i : 經驗係數, 經由非線性迴歸後得

$b_1 = 1015.9, b_2 = -6.5621$

DOY : 時間變數, Day Of Year

大地水準面上水汽分壓時空模式與氣溫量、氣壓量相同, 可表示為與時間有關的週期函數, 如式(4):

$$e_0 = c_1 - c_2 \cos\left(2\pi\left(\frac{DOY - 28}{365.25}\right)\right) \quad (4)$$

其中

e_0 : 大地水準面上水汽分壓模式值

c_i : 大地水準面上水汽分壓模式之係數, 經由迴歸後得

$c_1 = 28.7013(\text{hPa}), c_2 = 10.5448(\text{hPa})$

天頂對流層濕延遲量由 e-GPS 測站透過 q_{ZWD} 值轉換至大地水準面上, 可表示如式(5) (Schüler, 2001):

$$ZWD_{GPS,0} = \frac{ZWD_{GPS,SL}}{\exp\left(-\frac{H - H_0}{q_{ZWD}}\right)} \quad (5)$$

其中

q_{ZWD} : 天頂對流層濕延遲量高度修正因子, 可經由迴歸後得

$q_{ZWD} = 3.1547(\text{km})$

$ZWD_{GPS,0}$: GPS 站位置大地水準面上

ZWD

$ZWD_{GPS,SL}$: GPS 站之 ZWD

臺灣區域性對流層延遲修正模式使用方法可以用

圖 4 流程圖說明, 圖中年積日(DOY)、測站緯度(φ)及測站正高(H)必須由使用者依據其所在位置資訊提供, 再進一步由式計算大地水準面上氣象量(t_0, P_0, e_0)。乾分量計算部分, 必須經由測站正高將大地水準面上氣溫及氣壓轉換至測站高度面上, 此方法可參考圖 5 之示意圖; 接著由 Modified Hopfield 模式 (Goad and Goodman, 1974) 中的乾模式計算 ZHD。濕分量部分則是經由式(2)及式(4)計算大地水準面上氣溫及水汽分壓模式值並且帶入 Modified Hopfield 模式 (Goad and Goodman, 1974) 中的濕模式進行計算, 接著將大地水準面上 ZWD 以及 q_{ZWD} 透過式(5)計算測站高度上 ZWD。由上述方法, 便能透過臺灣區域性對流層延遲修正模式分別計算使用者測站高度上天頂對流層乾、濕分量, 使用者也可視個人需求而進一步計算天頂對流層總延遲量。

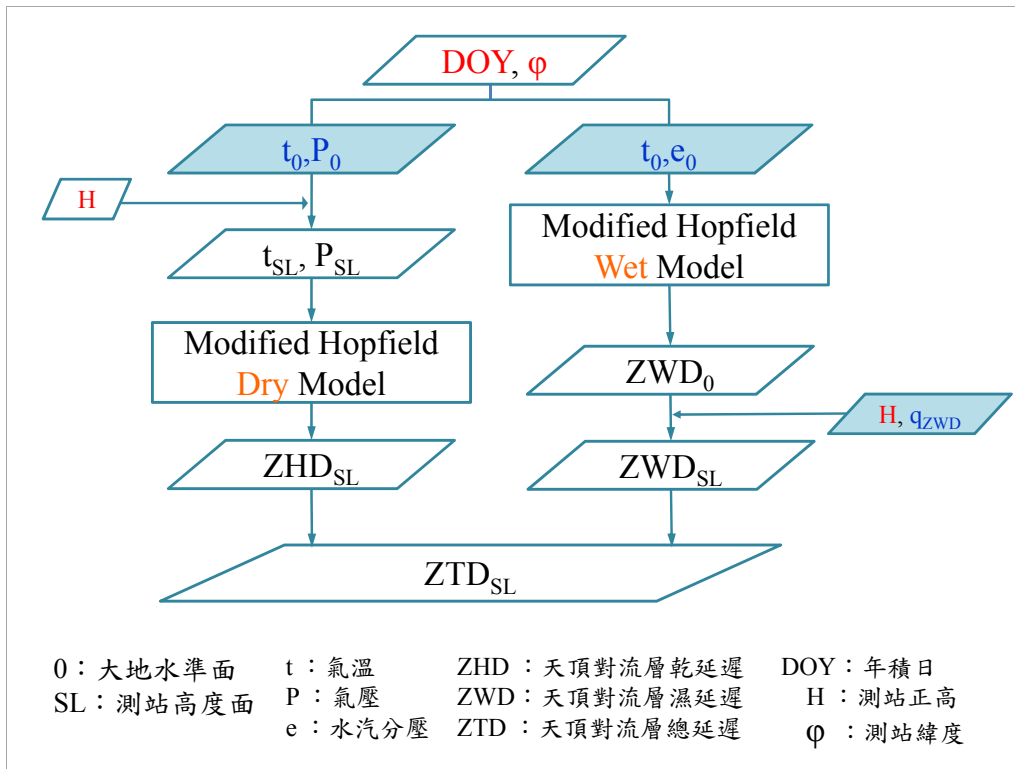


圖 4 臺灣區域性對流層延遲修正模式計算方法流程圖(吳曉雯, 2010)

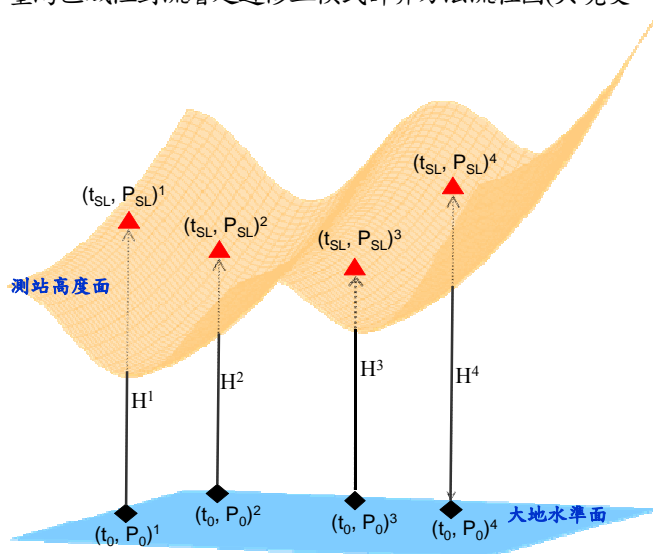


圖 5 乾延遲模式計算所需之氣溫量(t)及氣壓量(P)轉換示意圖

三、臺灣區域性對流層延遲修正模式成果與精度分析

本章將所建立之臺灣區域性對流層延遲修正模式之精度與檢核站資料各項分析及比較，主要比較有氣象資料推估

成果、ZTD 精度比較及與全球模式比較，而透過比較分析可以更進一步了解此模式之適用性以及建模方式是否得宜。

3.1 以氣象資料推估 e-GPS 站天頂對

流層乾延遲量之精度

結合氣象觀測網之氣象資料與 PPP 技術所估計之絕對 ZTD 發展區域性對流層延遲修正模式時，我們將乾分量與濕分量分別建模。因此，要獲得較精確之濕延遲模型必須考慮在建模過程中由總延遲量所扣除的乾分量之精度是否足夠，一旦扣除的乾分量足夠精確，才能使得濕分量具有足夠的精度。計算天頂對流層總延遲量所使用的模式為 Modified Hopfield 對流層模式(Goad and Goodman, 1974)，其中與乾延遲量有關的氣象參數為氣溫及氣壓，而氣象資料便來自於中央氣象局之氣象網。

驗證乾延遲分量精度的方法就是選取具有氣象觀測且均勻分布於全臺的 e-GPS 站當作檢核點，由於檢核點設置有氣象儀器，因此可提供實際氣象資料作為計算各測站 ZHD，並且與經由克利金方法(Krige, 1951)獲得

e-GPS 站之 ZHD 進一步進行驗證與比較。14 個檢核站分布如圖 6 所示，其順序是依照測站正高所排列。

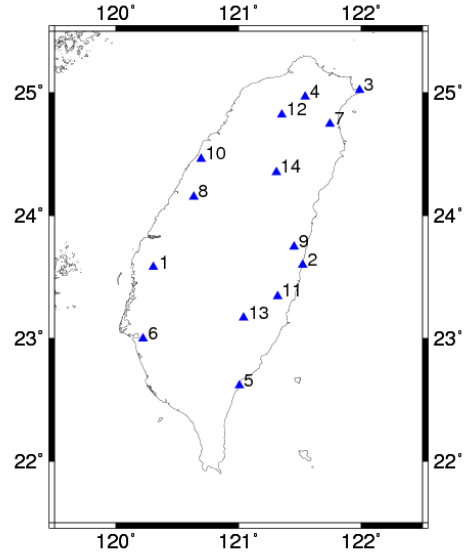


圖 6 檢核點分布圖

如圖 7 所示，各檢核站推估之 ZHD 相較於由實際觀測資料所計算之 RMS 為 0.15 ~ 0.45cm，圖中各測站由左而右依測站高度排列，可以看出其精度大小與測站高程並無存在明顯的相關性。

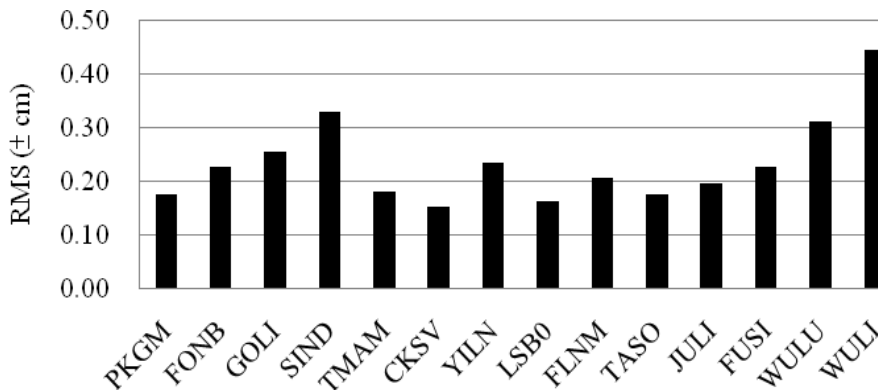


圖 7 天頂對流層乾延遲量(ZHD)推估值與檢核點精度直方圖

此成果顯示 ZHD 推估值與檢核點實際觀測值之差異為數 mm 等級，整體平均 RMS 約為 $\pm 0.23\text{cm}$ 。因此，利用克利金方法 (Krige, 1951) 可由中央氣象局氣象站資料推估各 GPS 站上精確之氣象量，而成果也說明 e-GPS 檢核站之 ZHD 具有 mm 等級之精度；如此一來，才能更進一步準確地計算 ZWD，並且提供 ZWD 做為建立 ZWD 模型之用。

3.2 e-GPS 站天頂對流層總延遲量推估之精度比較

在 3.1 節中，藉由比較檢核站上由實際氣象資料所計算之 ZHD 與利用臺灣區域性對流層延遲修正模式計算 14 個檢核站之 ZTD 延遲模式值，我們驗證了 ZHD 之推估精度。當完成 ZWD 模式建立時，也代表此區域性對

流層修正模式已完整建立。因此，將於本節中將臺灣區域性對流層延遲修正模式與 PPP 所估計之 ZTD 真實觀測值進行比較，以驗證此區域性對流層延遲修正模式之精度。

成果檢核是採用同樣 14 個具有氣象觀測資料且均勻分布之 e-GPS 站作為 ZTD 空間推估檢核點，分布如圖 6。此 14 個檢核點除了具有測站上實際氣象觀測值外，也同時接收 GPS 觀測資料，因此我們使用 PPP 技術計算各檢核站之 ZTD 並且將其視為真值做為檢核模式精度之依據。檢核點精度比較成果如圖 8 所示，各個測站 RMS 與正高沒有存在明顯的系統性誤差，各站詳細成果可參考表 2，14 個檢核站推估精度之平均值約為 $\pm 4.77\text{cm}$ 。

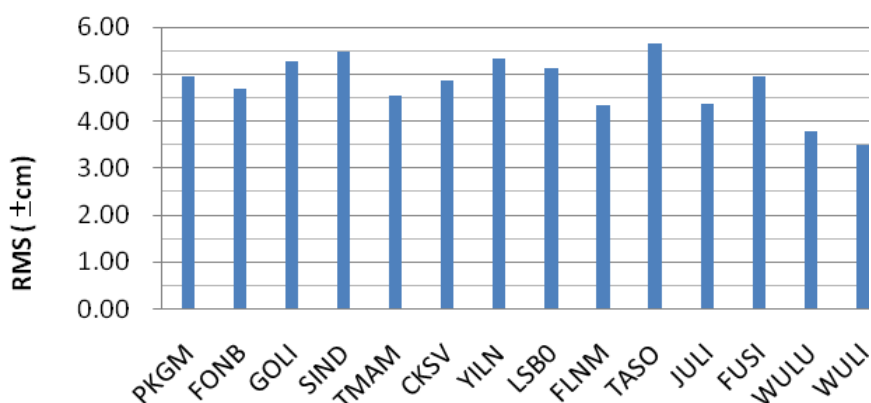


圖 8 天頂對流層總延遲量檢核精度直方圖

表 2 檢核站天頂對流層總延遲量檢核精度比較表

Station	PKGM	FONB	GOLI	SIND	TMAM	CKSV	YILN
		北港	豐濱	貢寮	新店	太麻里	成大測量
Elevation (m)	22.79	24.45	25.22	34.48	34.53	39.35	43.47

RMS (\pm cm)	4.94	4.69	5.28	5.48	4.53	4.88	5.32
-----------------	------	------	------	------	------	------	------

Station	LSB0	FLNM	TASO	JULI	FUSI	WULU	WULI
	測繪中心	鳳林	通霄	玉里	復興	霧鹿	武陵
Elevation (m)	102.37	114.66	132.29	152.09	480.75	900.75	1764.40
RMS (\pm cm)	5.12	4.34	5.65	4.37	4.95	3.77	3.49

3.3 臺灣區域性對流層延遲修正模式與全球模式比較

目前所廣泛使用之全球模式包含 Hopfield 模式、Modified Hopfield 模式以及 Saastamoinen 模式，這些模式在計算 ZTD 時大多會要求使用者輸入氣象參數，當使用者無法提供氣象參數時，在 GPS 解算軟體中可採用標準大氣模式做為氣象參數輸入值以計算 ZTD。因此，除了在 3.2 節中分析檢核站上 ZTD 模式值與實測資料之精度之外，本節將比較三種全球模式之間的精度以及於檢核站上進行臺灣區域性對流層延遲修正模式與

三種全球模式精度檢核。

三種全球模式的分析方法是於不同測站高程下 ZTD 值進行模擬與比較，而利用模式計算 ZTD 時其氣象參數是透過大地水準面上之標準大氣模式所計算，並且轉換至測站高度。圖 9 是採用標準大氣模式計算的三種全球性模式於不同模擬高度之 ZTD 比較圖，因臺灣地區山區最高高度不超過 4000m，因此模擬高度為 0 至 4000m，每 100m 計算一筆 ZTD。如圖 9 所示三種模式 ZTD 值在各高度下幾乎一致，顯示各差異量在 mm 等級。

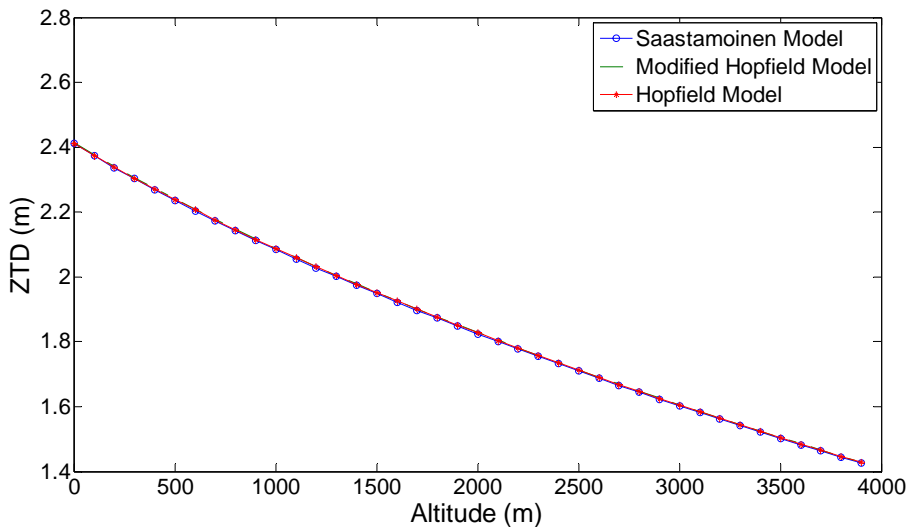


圖 9 三種全球性對流層模式於不同高度 ZTD 值比較圖

若計算三種模式差異，分別為 Modified Hopfield 模式與 Saastamoinen 模式差值以及 Modified Hopfield 模式與 Hopfield 模式差值，如圖 10。Modified Hopfield 模式與 Saastamoinen 模式差值在測站高度小於 1000m 時，差值會隨測站高度增加；當測站高程大於 1000m 時，差值隨測站高度增加而降低，兩種模型最大不超過 0.5cm。另外，圖 10 中顯示 Modified Hopfield 模式與 Hopfield 模式兩者差值隨著測站高度增加而降低，呈現線性遞減，最大差值在接近海平面處，其值不超過 0.15cm。而臺灣區 e-GPS 測站高度最高不超過

2000m，因此由此可知對於臺灣地區 e-GPS 站而言，使用這三種模式配合標準大氣模式值差異不大。

由 14 個檢核站中我們挑選四個高度明顯不同的檢核站將臺灣區域性對流層延遲修正模式與全球模式所計算之 ZTD 值進行比較，成果如圖 11 所示。由圖 11 看出全球模式如 Hopfield 模式、Modified Hopfield 模式以及 Saastamoinen 模式因為採用大地水準面上標準大氣模式之氣象參數作為輸入值，使得 ZTD 在任何時刻皆為定值，而且三種全球模式之間差異並不大，差異大約在幾個 mm 以內，因此圖 11 中各站 ZTD 全球模式值非常接近。

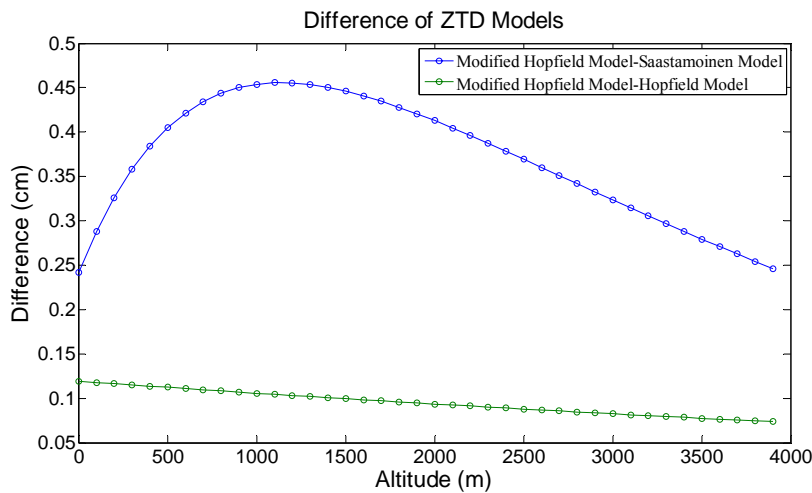


圖 10 三種全球性對流層模式於不同高度 ZTD 差值比較

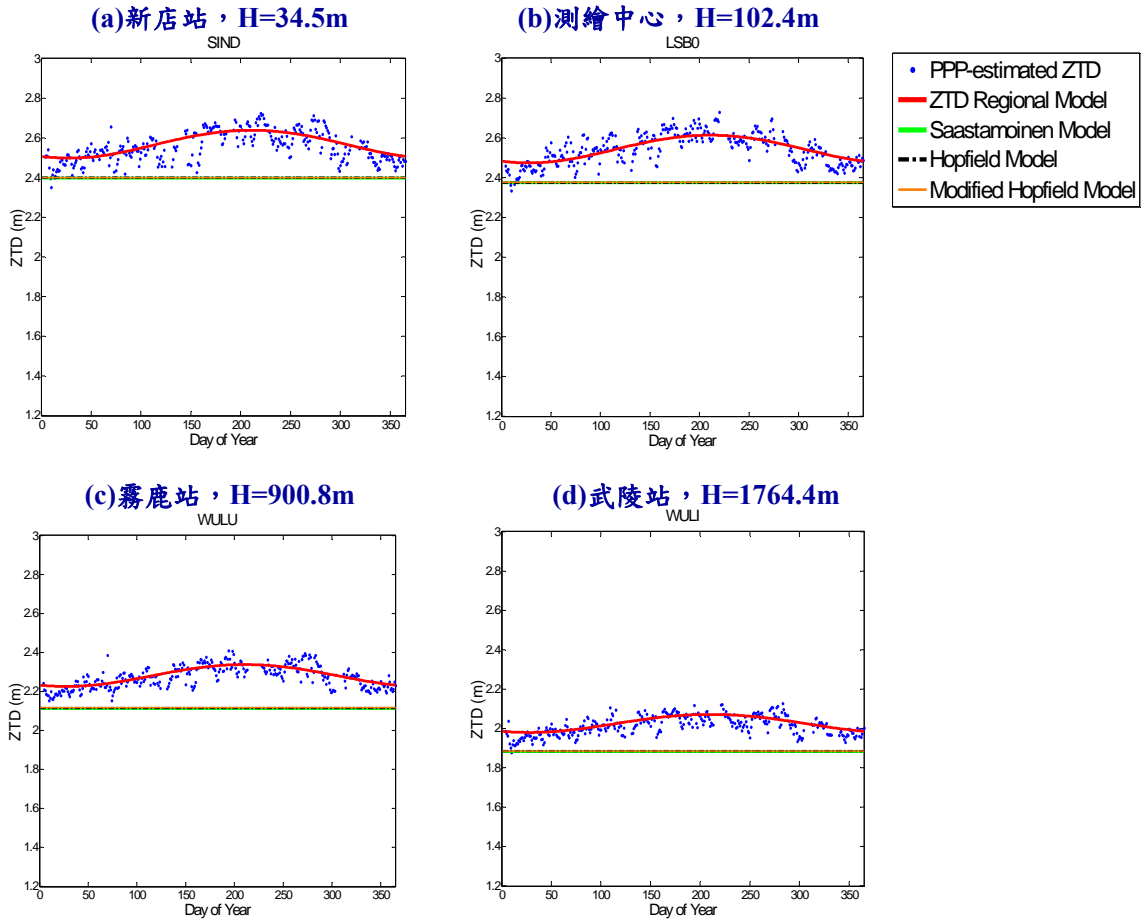
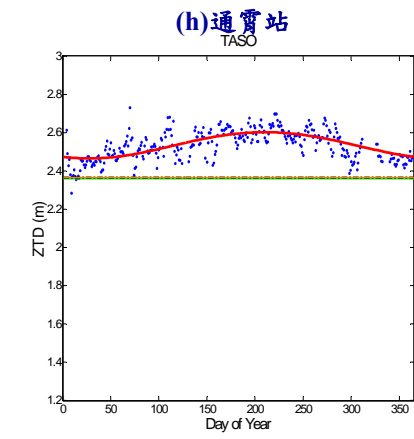
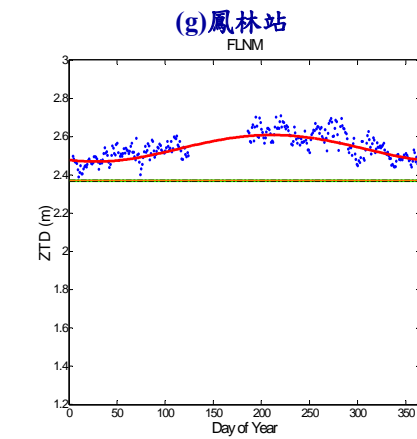
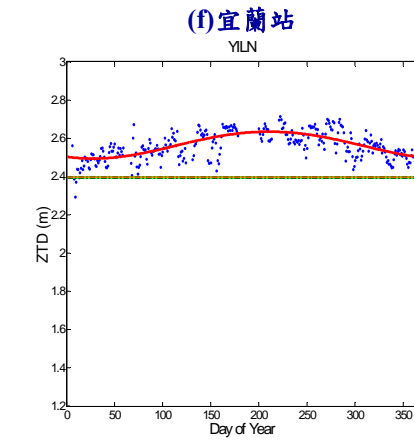
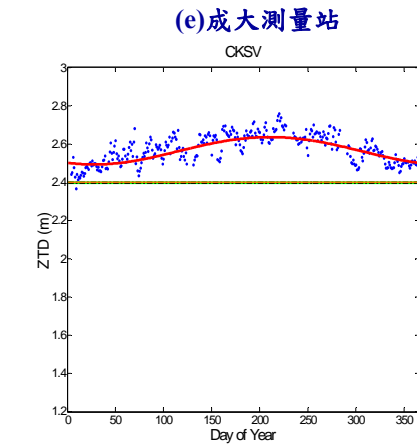
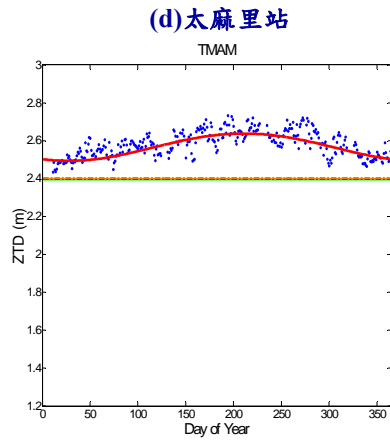
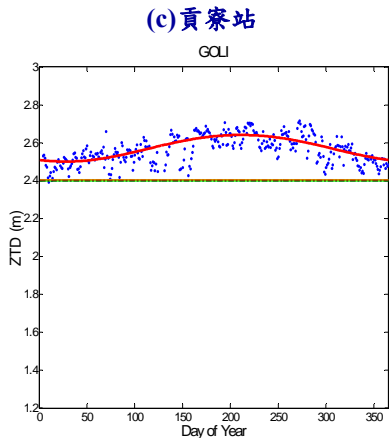
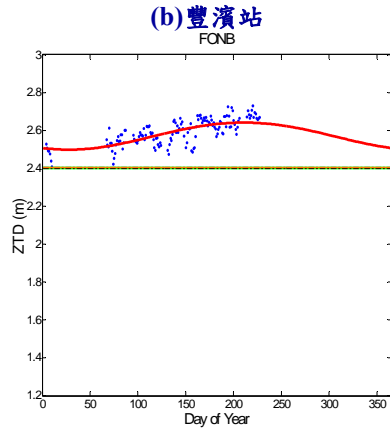
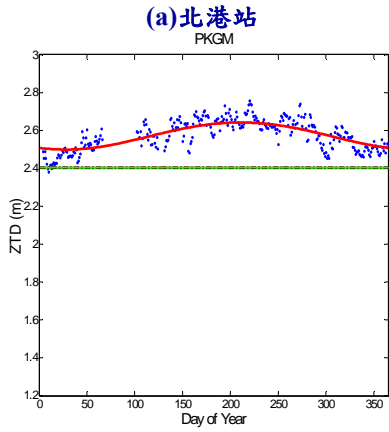


圖 11 檢核點上各種對流層延遲修正模式與 PPP 估計之 ZTD 比較圖
 (a)為新店站、(b)為測繪中心、(c)為霧鹿站、(d)為武陵站

區域性模式及全球模式計算 ZTD 時，其氣象參數則是透過來自於大地水準面上氣象參數並且進一步藉由測站正高將 ZTD 換算至測站高度上，因此圖 11 中各檢核站之間由於測站高度不同，導致區域性及全球性 ZTD 模式值也同樣會因高程不同而有高低變化，由各檢核站成果顯示當隨著測站正高上升其 ZTD 會隨之下降。圖 11(d)武陵站因為其正高為 1764.4m 為四站中最高站，其 ZTD 值則為最低，不超過 2.2m。與 PPP 所估計之 ZTD 相比

較，採用標準大氣參數的全球模式無法反映出臺灣本島區域 ZTD 季節變化，隨時間增加而維持定值。然而，區域性模式計算之 ZTD 則能顯示出季節變化，此變化之趨勢較符合 PPP 所估計的真值。在圖 12 顯示其餘 10 個檢核站成果，從 PPP 所估計之 ZTD 值中可看出 ZTD 全年中最高值出現在夏季，最低值則出現在冬季。而利用區域性模式所估計之 ZTD 最高值也出現在夏季，最低值也同樣出現在冬季，區域性模式與全球模式之平均差值約為 20cm。



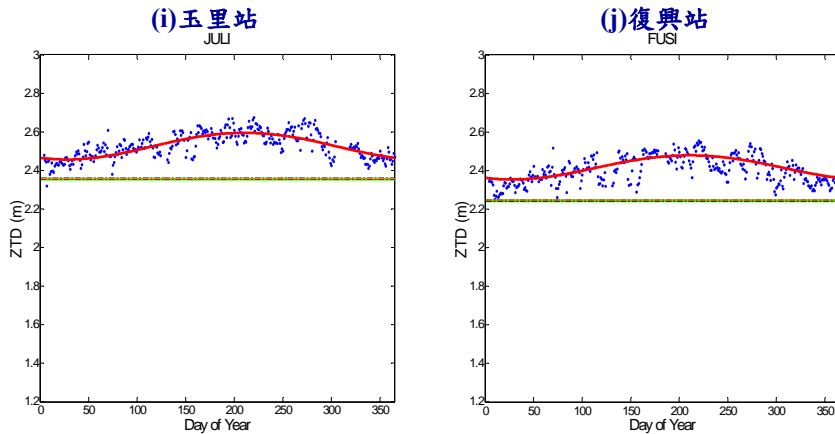


圖 12 檢核點上各種對流層延遲修正模式與 PPP 估計之 ZTD 比較圖
 (a)北港站、(b)豐濱站、(c)貢寮站、(d)太麻里站、(e)成大測量站
 (f)宜蘭站、(g)鳳林站、(h)通霄站、(i)玉里站、(j)復興站

四、結論與建議

透過 3.1 節中與檢核點進行比較，成果顯示利用克利金法進行 ZHD 空間推估，ZHD 推估值與實際觀測值的差異在 mm 等級，14 個檢核站平均精度可以達到 $\pm 0.23\text{cm}$ 。由此成果可知，利用空間推估方法可以獲得準確的 ZHD 估值。在 3.2 節中分析了臺灣區域性對流層延遲修正模式所計算之 ZTD 與利用 PPP 方法所估計之 ZTD 之比較成果，精度檢核成果說明臺灣區域性對流層延遲修正模式日平均在 14 個檢核站上平均精度可達 $\pm 4.77\text{cm}$ 。

由 3.3 節中也在 14 個檢核站上進行臺灣區域性對流層延遲修正模式與三種全球模式比較，其平均差值約為 20cm。由成果也可看出區域性模式比全球模式更能反映出臺灣地區真實 ZTD 之季節變化，其變化趨勢也與檢核站上實際觀測值一致，並且更接近真值。區域性模式之所以能夠符合臺灣地區真實 ZTD 的變化，主要是由於臺灣區域性對流層延遲修正模式建立時考慮了氣象參數在時空

中之變化，而此氣象參數之建立是利用中央氣象局氣象觀測網所提供之資料。

上述成果說明結合精密單點定位估算之臺灣區絕對對流層延遲量以及氣象觀測量空間推估之技術，應用於建立區域性對流層延遲模式是為一個可行的方法。此技術其最大的優點是不需要額外耗費龐大的成本在每一個 GPS 站設置氣象觀測儀器，只要透過現有的氣象觀測網，便能結合 GPS 資料與氣象資料發展區域性對流層修正模式。本文中臺灣區域性對流層修正模式是根據 2009 年 e-GPS 觀測資料以及中央氣象局氣象站資料所發展，若未來需要提升模式的可靠度與代表性，可適度增加觀測資料的時間長度。

五、參考文獻

1. 楊名、江凱偉，2010，發展臺灣區域性對流層延遲估算模式先期研究作業，內政部。
2. 吳曉雯，2010，臺灣區域性對流層延遲模式之發展，國立成功大學碩士論文。

3. Askne, J., and Nordius, H., 1987, Estimation of Tropospheric Delay for Microwaves from Surface Weather Data, *Radio Science*, vol. 22, pp. 379-386.
4. Bock, O., and Doerflinger, E., 2001, Atmospheric Modeling in GPS Data Analysis for High Accuracy Positioning, *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, vol. 26, no. 6-8, pp. 373-383.
5. Goad, C. C., and Goodman, L., 1974, A Modified Hopfield Tropospheric Refraction Correction Model, *Proc. American Geophysical Union Annual Fall Meeting*, CA.
6. Kouba, J., and Héroux, P., 2001, GPS Precise Point Positioning using IGS Orbit Products, *GPS Solutions*, vol. 5, no. 2, pp. 12-28.
7. Krige, D. G., 1951, A Statistical Approach to Some Mine Valuation and Allied Problems on the Witwatersrand, *University of Witwatersrand*, Johannesburg.
8. Leick, A., 1995, *GPS Satellite Surveying*, 2nd edition, John Wiley & Sons, INC, New York, USA.
9. Niell, A. E., 1996, Global Mapping Functions for the Atmospheric Delay at Radio Wavelengths, *Journal of Geophysical Research*, vol. 11, no. B2, pp. 3227-3246.
10. Pidwirny, M., 2006, Daily and Annual Cycles of Temperature, *Fundamentals of Physical Geography*, 2nd Edition, <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/7l.html>.
11. Saastamoinen, J., 1972, Atmospheric Correction for the Troposphere and Stratosphere in Radio Ranging of Satellites, In the Use of Artificial Satellites for Geodesy, *Geophysical Monograph Series*, vol. 15, pp. 247-251.
12. Schüler, T., 2001, On Ground-based GPS Tropospheric Delay Estimation, Munich, *Universitaet der Bundeswher*.