

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

以全球定位系統構建台灣地區電離層模型之研究(I)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC91-2211-E-004-001-

執行期間：91年08月01日至92年07月31日

執行單位：國立政治大學地政學系

計畫主持人：林老生

計畫參與人員：賴品劭 王奕均 李孝偉 賴君怡

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 92 年 9 月 19 日

## 一、中英文摘要及關鍵詞

### (一) 中文摘要及關鍵詞

在精密全球定位系統(GPS)定位及導航應用方面,電離層延遲為 GPS 觀測量的主要誤差來源之一。電離層延遲的大小,與從 GPS 人造衛星至接收機電磁波路徑沿線之全電子含量(Total Electron Content, TEC)有密切關係。而 TEC 的變化量又跟很多變數有關,例如,太陽黑子的數目、磁場的活動狀況、觀測的季節、觀測的時間、觀測的地點及方向等。由雙頻 GPS 接收機的觀測量,經過處理後,可以估計當時的 TEC。因此,利用此特性,可以將多部的雙頻 GPS 接收機佈設在一特定區域,即時的估計電離層延遲,並構建區域性的電離層模型,提供單頻 GPS 接收機使用,以消除電離層延遲,提高單頻 GPS 接收機導航、定位之精度。

由雙頻接收機的 L1 和 L2 觀測量,可以估計由接收機與各被觀測 GPS 衛星間的 TEC。然而,如果欲求得無偏差之 TEC 絕對估值,必須事先估算各類 GPS 人造衛星與各接收機之 L1/L2 差分延遲。因此,如欲構建區域性的電離層模型,除了必須事先估算 GPS 人造衛星與接收機之 L1/L2 差分延遲外,還要驗證 GPS 測 TEC 的效能、探討構建區域性電離層模型的演算法。因此,本研究案的主要目的就是利用台灣地區的 GPS 資料,以研究構建台灣區域電離層模型有關的議題:(1) 以一種屬於單站模型技術的演算法,估計每一顆 GPS 人造衛星與各接收機之差分延遲量的總合;(2) 用改正後的 GPS 估算之 TEC 值,與其他方法獲取之 TEC 觀測值(如電離層探測儀, ionosonde)或預測值(如國際參考電離層, IRI)比較分析,以驗證 GPS 測 TEC 的效能;(3) 以改良的網格式演算法,構建台灣地區區域的電離層模型。

關鍵詞:全球定位系統、電離層延遲、全電子含量、網格式演算法、人造衛星與接收機 L1/L2 差分延遲

### (二) 英文摘要及關鍵詞

The ionospheric delay is one of the main sources of error in precise GPS positioning and navigation. The magnitude of the ionospheric delay is related to the Total Electron Content (TEC) along the radio wave path from a GPS satellite to the ground receiver. The TEC is a function of many variables, including long and short term changes in solar ionising flux, magnetic activity, season of the year, time of day, user location and viewing direction. A dual-frequency GPS receiver can eliminate (to the first order) the ionospheric delay through a linear combination of L1 and L2 observables. However, the majority of civilians use low-cost single-frequency GPS receivers that cannot use this option. Consequently, it is beneficial to estimate ionospheric delays over the region of interest, in real-time, in support of single-frequency GPS positioning and navigation applications.

A dual-frequency GPS receiver can eliminate the ionospheric delay through a linear combination of the L1 and L2 observations. One of the challenging problems in making absolute ionospheric delay measurements using the dual-frequency observations to the GPS satellites is to estimate satellite and receiver L1/L2 differential delays. In addition, the issues, such as the verification of GPS-based TEC accuracy, the selection of suitable algorithm to generate a regional ionospheric modeling need to be studied in order to generate a regional ionospheric modeling over

a region. Hence, the main object of this proposal is to study the related issues to generate a real-time ionospheric modeling over Taiwan region: (1) an algorithm which can estimate the sum of the satellite and receiver L1/L2 differential delays of each tracked GPS satellite using a single-site modeling technique, (2) verifying the performance of GPS-based TEC values with those values derived from ionosonde or IRI, (3) an alternative grid-based algorithm to improve the performance of real-time regional ionospheric modeling over Taiwan region.

Keywords: Global Positioning System (GPS), Ionospheric Delay, Total Electron Content (TEC), Grid-Based Algorithm, Satellite and Receiver L1/L2 Differential Delays

## 二、報告內容

### (一) 前言

人類賴以生存的日地空間中，有厚約數百公里的大氣層包圍著地球，在離地約 60 公里以下為對流層，60 公里以上為電離層，它們的存在不僅提供了人類及其它生物生存所需要的氧氣，而且還阻擋了紫外線及其它宇宙射線和微粒流的災害性影響，其中電離層還為人類提供了遠距離通訊的電磁波傳播條件，使我們有可能享受今天色彩斑斕的人類文明。對於高頻率的電磁波（如全球定位系統 (Global Positioning System, GPS) 人造衛星訊號），則可以穿透電離層。然而，當電磁波自 GPS 人造衛星傳送到地面接收機，會受到電離層的影響，產生所謂的電離層延遲，進而影響定位及導航的精度。因此，電離層延遲為精密 GPS 定位及導航的主要誤差來源之一，其大小與從 GPS 人造衛星至接收機電磁波路徑沿線之「全電子含量」(Total Electron Content, TEC) 有密切關係。

雙頻 GPS 接收機，其可藉由 L1/L2 觀測量的線性組合，而消除大部份的電離層延遲，然而，單頻 GPS 接收機則不具有此項功能。因此，為了提高單頻 GPS 接收機定位及導航的精度，有必要利用區域內（如台澎金馬地區）的雙頻接收機，即時的估計電離層延遲，TEC，並構建區域性的電離層模型（如所謂的 GPS 廣域增強系統，Wide Area Augmentation System, WAAS），供單頻 GPS 接收機使用，有效消除電離層延遲。

原則上，如果有雙頻接收機的 GPS 觀測量，可以求得觀測當時接收機對被觀測的 GPS 人造衛星視線方向的 TEC 估值。然而，如果要利用雙頻接收機以 GPS 觀測量求得無偏差之 TEC 絕對估值，有許多問題必須先克服，如虛擬距離多路徑效應的消除、載波相位觀測量錯誤偵查與修復、估算各 GPS 人造衛星與接收機之 L1/L2 差分延遲。此外，該用何種演算法（如網格式演算法）來構建區域性的電離層模型？

理論上，由 GPS 人造衛星廣播的雙頻 (L1/L2) 電碼應該是同步的。事實上，要達到絕對同步是不可能的；因此，雙頻電碼的傳送時間就不相同，由此所產生的時間差，稱為「人造衛星 L1/L2 差分延遲」(satellite L1/L2 differential delay)，或簡稱「人造衛星差分延遲」(satellite differential delay)。每一顆 GPS 人造衛星，都有它單獨的人造衛星差分延遲。上述雙頻間的差分延遲現象，也會發生在 GPS

接收機上，因為 L1 和 L2 訊號在接收機的內部必須走過不同的硬體路徑或電子電路，因此，產生所謂的「接收機 L1/L2 差分延遲」(receiver L1/L2 differential delay)，或簡稱「接收機差分延遲」(receiver differential delay)。每一部 GPS 接收機，都有它單獨的接收機差分延遲。基本上，GPS 人造衛星差分延遲與接收機差分延遲，皆屬於硬體方面的系統誤差，會對於由 GPS 觀測量所估算之 TEC 造成偏差。根據研究結果顯示，如果不改正 GPS 人造衛星差分延遲，會造成利用 GPS 觀測量所估計的 TEC 值含有  $\pm 3$  ns ( $\pm 9$  TECU) 的誤差。另一方面，如果不改正接收機差分延遲，會造成利用 GPS 觀測量所估計的 TEC 值含有  $\pm 10$  ns ( $\pm 30$  TECU) 的誤差。其中，1 ns (nanosecond) 的差分延遲相當於 2.852 TECU (TEC units)，而 1 TECU 會對 L1 訊號造成 16.2 cm 的距離誤差。

筆者在澳洲新南威爾斯大學博士進修期間，主要就是研究利用 GPS 觀測量即時估計電離層延遲的相關研究，因此，針對上述問題也有部份的研究成果，並發表於相關的期刊或研討會中。然而，必須特別指出的是，在博士研究當中所用的 GPS 資料大部份是來自澳洲地區、日本地區及少部份來自美國地區，換言之，這些實驗區資料大部份是位於電離層的中緯度地區 (Mid-Latitude Region)。然而，台灣地區是位於電離層的赤道地區 (Equatorial Region)。與中緯度地區相比較，電離層在赤道地區比較不穩定。所以如果要構建台灣地區的電離層模型，那麼，有關的電離層延遲估計的演算法，如各 GPS 人造衛星與接收機之 L1/L2 差分延遲的估算、網格式電離層模型演算法的構建等，則有必要利用台灣地區的 GPS 衛星追蹤站資料加以研究確認。

目前，國內已有內政部維護的八個 GPS 衛星追蹤站，分布在台澎金馬地區。這些追蹤站都裝設雙頻 GPS 接收機，24 小時接收 GPS 資料。此外，尚有其他單位如中央研究院、成功大學、中央大學、中正理工學院、政治大學等皆設有 GPS 衛星追蹤站。如果能夠將這些追蹤站的資料加以處理，將可以即時的構建台灣地區的電離層模型。一方面，此一電離層模型，可以即時的將電離層延遲傳播給單頻接收機使用，以提高導航定位精度；另一方面，透過 TEC 的觀測，可以供研究台灣區之電離層變化。

## (二) 研究目的

本案為三年期的研究計畫，其主要目的是以筆者對電離層的相關研究當基礎，逐年以台灣地區的 GPS 衛星追蹤站資料，探討構建台灣地區電離層模型的相關演算法，包含：(1) 估算各 GPS 人造衛星與接收機之 L1/L2 差分延遲的演算法，(2) 用 GPS 雙頻資料估計 TEC，並與其他 TEC 觀測結果 (如電離層探測儀，ionosonde) 比較，(3) 區域電離層模型構建演算法，如網格式演算法 (Grid-Based Algorithm)。更具體的說，本案將先以政治大學的兩個 GPS 衛星追蹤站所蒐集的資料，探討估算各 GPS 人造衛星與政治大學兩部接收機之 L1/L2 差分延遲的演算法。如果經驗證後，該演算法適用於台灣地區的電離層，則將以該演算法估算內政部的八個 GPS 衛星追蹤站的接收機之 L1/L2 差分延遲。經過應用所推求的 L1/L2 差分延遲系統誤差改正後，將可由 GPS 觀測量求得無偏差之 TEC 絕對估值，並與其他 TEC 觀測結果相比較，以進一步驗證 GPS 觀測 TEC 的能力。最後，則是探討以改良網格式演算法構建台灣區域電離層模型的效能。

## (三) 文獻探討

在 TEC 的研究方面，曾清涼、劉正彥 (2000)，利用內政部八個 GPS 衛星追蹤站及成功大學衛星追蹤的資料，研究 TEC 對 GPS 測量精準度的影響。李振濤、陳春盛(1999)，採用 IGS 之 TAIW 測站資料計算 TEC，以三角函數為運算元，應用時間系列理論，以適應修整法建立 TEC 預測模式，研究顯示利用此模式提供超過 80% 的修正效益。林老生 (1998)，提出用強健卡爾曼濾波演算法，即時的偵測及修復 GPS 載波相位觀測量的錯誤，提高 GPS 即時估計電離層延遲精度。張東和、曹沖、甄衛民(1995)，研究 GPS 接收機測量電離層 TEC 的數據處理方法。Ephishov et. al. (2000)，研究 GPS 估計的 TEC 值與國際參考電離層 (IRI) 的估值做比較。Walter et. al. (2000)，研究用 GPS 估計的 TEC 值偵測電離層的異常等。

在估計 GPS 人造衛星與接收機之 L1/L2 差分延遲演算法的研究方面，林老生(2001)，提出利用單站法，以 24 小時的 GPS 資料，估計 GPS 人造衛星與接收機 L1/L2 差分延遲的總量。Yinger et. al. (1999)，研究比較 JPL 推導的 GPS 人造衛星 L1/L2 差分延遲與廣播星曆提供的人造衛星 L1/L2 差分延遲的差別。

在構建區域電離層模型的研究方面，林老生，克利思·理哲思 (1999)，提出一種改良的網格式演算法，構建即時的區域電離層模型。Skone (2000)，研究以網格式演算法，構建低緯度區域的電離層模型。

#### (四) 研究方法

本案為三年期研究計畫的第一 年子計畫，故本年度的研究目標是以林老生 (2001) 所提出的演算法為基礎，探求一種適用於台灣地區電離層特性的演算法，以估計各 GPS 人造衛星與接收機之 L1/L2 差分延遲，以便後續改正 GPS 估計 TEC 值的系統誤差。初期，實驗區資料，將以政治大學的兩個 GPS 衛星追蹤站所蒐集的資料為主。

#### (五) 結果與討論

要使用雙頻 GPS 觀測量，求得無偏差之 TEC 絕對估值之前，有一些挑戰性問題必須先克服。其中之一，就是估算各 GPS 人造衛星與接收機之 L1/L2 差分延遲 (Coco 1991; Bishop et al., 1992; Klobuchar et al., 1993)。根據研究結果顯示，每一部接收機的 L1/L2 差分延遲 (BR) 和每一顆人造衛星的 L1/L2 差分延遲 (BS) 都不一樣。此外，這些 L1/L2 差分延遲值，會隨著時間改變 (Feltens et al., 1996)。因此，為了有效利用 GPS 雙頻接收機，遙測電離層 TEC，必須尋找一種演算法，可以適時估計各 GPS 人造衛星的 BS 與接收機之 BR。

按照電離層的特性，電離層的地理分布區域，約可以分成三個區域：赤道區 (Equatorial Region)、中緯度區 (Mid-Latitude Region) 與極區 (Polar Region) (Bishop et al., 1991; Wanninger, 1994)。其中，中緯度區的電離層比較穩定，另外兩區則否。

筆者曾經提出一種單站法，可以估計各 GPS 人造衛星的 BS 與該測站接收機之 BR 的總和 (SPR)，並以其處理美國的 PGGA、日本的 GSI 與澳洲的 ARGN 等觀測網的 GPS 資料 (Lin, 1998; Lin, 2001; 林老生, 2001)。上述 PGGA、GSI、ARGN 等區域，約位於電離層的中緯度區。然而，台灣地區約位於電離層的赤道區，電離層電子密度變化甚為劇烈。因此，在利用台灣地區 GPS 資料估計電

離層 TEC 的實驗中發現，如果以前述單站法估計各人造衛星之 SPR 值，經標準化處理，並與其它機構估算成果比較分析後，有些人造衛星的 BS 估值差異值超過可接受值甚多（如 1 ns）（註：根據 Feltens et al.(1996)研究分析，發現各機構估算的人造衛星 BS 估值，經標準化處理後，其差異值的中誤差約在 1 ns 左右）。

所以，對於這些人造衛星而言，無法直接使用單站法估計的 SPR 值，改正 TEC 值的系統誤差。因此，本研究的目的，是針對台灣地區的電離層 TEC 變化狀況，提出一種演算法，用以估算各 GPS 測站之接收機 L1/L2 差分延遲 (BR)。然後，加上美國 JPL (Jet Propulsion Laboratory) 所估算的人造衛星 L1/L2 差分延遲 (BS)，用以改正 GPS 觀測量推導的 TEC 估值。

## 1、估計 GPS 接收機 L1/L2 差分延遲演算法的基本原理

本案針對台灣地區的電離層 TEC 狀況，提出一種估算 GPS 接收機差分延遲，BR，的演算法。所提演算法的基本原理為：(1) 假設 JPL 估算的各顆 GPS 人造衛星差分延遲(BS) (Yinger, et al., 1999) 是正確的。(2) 以單站法，估計某一測站至所有觀測到的 GPS 人造衛星的 SPR 值。(3) JPL 與本文估計的各顆 GPS 人造衛星的 BS 值，經標準化後，逐一的比較其差值的絕對值是否小於 1ns？如果是，則該人造衛星的 SPR 估值與由 JPL 所估計的 BS 值，將被用以估計測站接收機的 BR 值。(4) 將估算的 BR 值，加上 JPL 估算的各顆人造衛星 BS 值，則可得改正後的 SPR 估值，其可用以改正 TEC 估值。

## 2、估計 GPS 接收機 L1/L2 差分延遲的 步驟

步驟一：以單站法估計人造衛星與接收機差分延遲總和  $SPR^K$

由雙頻 GPS 觀測量，利用所謂的相位水準技術，計算每一曆元  $i$ ，由接收機至每一追蹤到的人造衛星  $K$ ，在視線方向之斜向 TEC，STEC。這些 STEC 估值，事實上包含真正的斜向 TEC、人造衛星差分延遲 ( $BS^K$ )、以及接收機差分延遲 (BR) 等三個值，將該方程式重寫如後（其中，以 15-term 的多項式，代表位於 IPP 處的垂直 TEC， $VTEC_i^K$ ）：

$$STEC_i^K = S(E) \times VTEC_i^K + BR + BS^K \quad (1)$$

將每一測站的 24-小時觀測資料，分成 8 個時段 (session)，每個時段為 3 小時。每一時段，由觀測資料及相關方程式計算、組成觀測方程式，並用最小自乘法，分別估計每一追蹤的人造衛星的  $BS^K$  與接收機之 BR 總和 ( $SPR^K$ )，和  $VTEC_i^K$  的 15 個多項式係數。最後將各時段所估算之  $SPR^K$ ，加權平均後，求得當天觀測到的每一顆人造衛星的  $SPR^K$  平均值（為簡化，仍以  $SPR^K$  代表  $SPR^K$  平均值）。以上為單站法估計各人造衛星  $SPR^K$  的方法，單站法有關細節，請參考相關文獻（如：Lanyi & Roth, 1988; Lin, 1998; 林老生，2001）。

步驟二：計算對所有人造衛星  $SPR^K$  的平均值  $\overline{SPR}$

某一接收機對某一追蹤到的 GPS 人造衛星 K 的  $SPR^K$ ，可以用下式表示之 (Coco et al., 1991)：

$$SPR^K = BR + I_C + BS^K + M^K + I^K \quad (2)$$

式中， $BS^K$ ，代表人造衛星 K 的人造衛星差分延遲； $M^K$ ，代表多路徑造成的誤差（針對人造衛星 K 的影響）； $I^K$ ，代表不正確電離層模型所造成的誤差（針對人造衛星 K 的影響）； $I_C$ ，代表不正確電離層模型所造成的誤差（對所有人造衛星的影響量相同）； $BR$ ，代表接收機的差分延遲（對所有人造衛星的影響量相同）。

每一天，計算所有人造衛星之  $SPR^K$  的平均值， $\overline{SPR}$ 。事實上，由方程式 (2) 可見， $\overline{SPR}$  值包含真正接收機差分延遲 (BR) 以及不正確電離層模型所造成的誤差 ( $I_C$ ) (Coco et. al., 1991)。如果使用多天的觀測量，則可以先針對每一顆衛星，根據多天觀測的  $SPR^K$ ，求其平均值， $\overline{SPR^K}$ ；然後，再把所有衛星的  $\overline{SPR^K}$  加總後取其平均值，則可得  $\overline{SPR}$ 。

步驟三：估計人造衛星差分延遲估值  $\overline{BS^K}$

針對每一顆人造衛星，計算其  $SPR^K$  估值與  $\overline{SPR}$  的差值，得到該顆人造衛星差分延遲估值  $\overline{BS^K}$ 。由方程式 (2) 知，人造衛星差分延遲估值  $\overline{BS^K}$ ，其實包含真正人造衛星 K 的差分延遲  $BS^K$ 、多路徑造成的誤差（針對人造衛星 K 的影響） $M^K$ 、以及不正確電離層模型所造成的誤差（針對人造衛星 K 的影響） $I^K$  等三項資料。

步驟四：計算由 JPL 估算的標準化人造衛星差分延遲  $\hat{T}_{gd}^K$  與本文所估算的標準化人造衛星差分延遲估值  $\hat{T}_{gd}^K$  的差值  $\Delta^K$

由方程式 (2) 可知，人造衛星的差分延遲估值，可能含有上述  $I_C$ 、 $M^K$ 、 $I^K$  等誤差。因此，為了比較不同研究機構所估算出來之人造衛星差分延遲成果，必須先做一些資料處理。首先，確定那些 GPS 人造衛星，同時出現在兩個機構的成果中。假設有 27 顆人造衛星資料，同時出現在兩個機構的成果中。然後，計算每一研究機構對這 27 顆所人造衛星差分延遲估值的算術平均值，Sat-Mean (Coco et al., 1991; Bishop et al., 1994)。最後，將各機構算出之人造衛星差分延遲估值減掉其對應之 Sat-Mean，得到所謂「標準化人造衛星差分延遲」(Bishop et al., 1994)。

因此，根據 Yinger, et al. (1999) 所發表的 JPL 估算的 27 顆人造衛星差分延遲  $T_{gd}^K$  成果（註：本文實驗資料，CUA1 與 CUA2 站也觀測到此 27 顆人造衛星），計算得其 Sat-Mean 為 -4.31 ns，由此，再計算其標準化人造衛星差分延遲  $\hat{T}_{gd}^K$ 。同理，本文所估算之人造衛星差分延遲  $\overline{BS^K}$ ，經處理後，亦可得到標準化人造衛

星差分延遲  $\hat{i}_{gd}^K$ 。然後，計算每一顆衛星之  $\hat{T}_{gd}^K$  與  $\hat{i}_{gd}^K$  的差值  $\Delta^K$ 。

步驟五：估計接收機差分延遲  $\overline{BR}$

如果某一顆衛星之  $\hat{T}_{gd}^K$  與  $\hat{i}_{gd}^K$  差值  $\Delta^K$  的絕對值小於某一設定值，如 1 ns，那麼其  $SPR^K$  值與 JPL 所估算的人造衛星差分延遲  $T_{gd}^K$  的差值，即為利用 K 號人造衛星資料，所求得之接收機差分延遲估值， $BR^K$ 。將所有合乎上述條件所估算之各  $BR^K$  加總平均後，求得該測站之 GPS 接收機差分延遲的估值， $\overline{BR}$ 。

步驟六：計算  $\overline{BR}$  與 JPL 的人造衛星差分延遲  $T_{gd}^K$  的總和  $\overline{SPR}^K$

將上述方法求得的接收機差分延遲  $\overline{BR}$ ，加上 JPL 所估算的人造衛星差分延遲  $T_{gd}^K$ ，就可以求得該測站對每一顆人造衛星之人造衛星與接收機差分延遲的總和， $\overline{SPR}^K$ ，並以其改正 TEC 估值的系統誤差。

### 3、實驗結果與討論

#### (1) 實驗資料

本實驗採用國立政治大學綜合院 館樓頂上的兩個觀測站，CUA1 與 CUA2 之 GPS 資料。上述兩觀測站，平面距離約 77 公尺，而且皆裝設 Ashtech Z-XII 接收機，每 30 秒採樣一次，24 小時觀測，垂直角截止角為 10°。CUA1 站，用以實驗的資料涵蓋時間為 2002 年 2 月 22 日至 3 月 12 日（共 20 天）。CUA2 站，用以實驗的資料涵蓋時間為兩個時期，分別為 2000 年 12 月 1 日至 12 月 7 日（共 7 天）及 2002 年 2 月 22 日至 3 月 12 日（共 20 天）。

#### (2) 實驗結果與討論

表 1 所示者，為測站 CUA2，在 2002 年 3 月 3 日，所有觀測到的 GPS 人造衛星 PRN 編號與弧段數。從表 1 顯示測站 CUA2 於 3 月 3 日總共觀測到 28 顆 GPS 衛星，大部份的衛星只有 1 弧段，而最多為 3 弧段。

表 2 所顯示者，為 CUA2 測站觀測 PRN 4、7、14、24 等四顆衛星有關的統計資料。表中， $W_{\max}$  與  $W_{\min}$  分別代表地理緯度的極大與極小值， $J_{\max}$  與  $J_{\min}$  分別代表地理經度的極大與極小值， $J_{cr_{\max}}$  與  $J_{cr_{\min}}$  分別代表地方時的極大與極小值， $E_{\max}$  代表垂直角的極大值，以上資料皆以度為單位。 $STEC_{\max}$  與  $STEC_{\min}$  分別代表斜向 TEC 的極大與極小值，以 ns 為單位。

利用演算法估計步驟一，可以估計每一測站對各顆 GPS 人造衛星的人造衛星與接收機差分延遲總和  $SPR^K$ ；以步驟二及三可以估計人造衛星差分延遲估值



$\overline{BS}^K$ 。表 3 所示者為 CUA2 測站，於 2002 年 3 月 3 日估計對每一顆人造衛星之  $SPR^K$  與  $\overline{BS}^K$ ，兩者皆以 ns 為單位。當天所有  $SPR^K$  的平均值  $\overline{SPR}$  約為 3.99ns。將  $SPR^K$  值減去  $\overline{SPR}$ ，則得各 PRN 衛星的人造衛星差分延遲估值  $\overline{BS}^K$ 。從表 3 中，明白的顯示每一顆人造衛星有不同的  $\overline{BS}^K$ ，所以其  $SPR^K$  估值也不同。

根據估計步驟，為了估計接收機差分延遲  $\overline{BR}$ ，必須由步驟四，計算由 JPL 估算的標準化人造衛星差分延遲， $\hat{T}_{gd}^K$ ，與本文所估算的標準化人造衛星差分延遲估值， $\hat{i}_{gd}^K$ ，的差異  $\Delta^K$ 。Yinger, et al. (1999)發表 JPL (Jet Propulsion Laboratory) 估算的人造衛星差分延遲  $T_{gd}^K$ ，與標準化人造衛星差分延遲  $\hat{T}_{gd}^K$ ，如表 4 所示。表 4 中，JPL 估算之所有 27 顆人造衛星差分延遲的算術平均值，Sat-Mean 為 -4.31ns；每一顆衛星之  $T_{gd}^K$  減去 Sat-Mean 後得到其標準化人造衛星差分延遲  $\hat{T}_{gd}^K$ 。至於本文所估算之人造衛星差分延遲  $\overline{BS}_K$ ，經處理後也可得到標準化人造衛星差分延遲  $\hat{i}_{gd}^K$ 。然後，計算每一顆衛星之  $\hat{T}_{gd}^K$  與  $\hat{i}_{gd}^K$  差值  $\Delta^K$ 。最後，按估計步驟五，估計測站之 GPS 接收機差分延遲  $\overline{BR}$ 。

表 5 所示者，為 JPL 估算之標準化人造衛星差分延遲  $\hat{T}_{gd}^K$  與 2000 年 CUA2 測站 7 天 GPS 資料，利用本文所提演算法，所估算之標準化人造衛星差分延遲  $\hat{i}_{gd}^K$  之比較表， $\Delta^K$  為  $\hat{T}_{gd}^K$  與  $\hat{i}_{gd}^K$  的差值， $\Delta^K$  的標準差為 0.69 ns。表 6 所示者，為用 2002 年 CUA1 測站 20 天 GPS 資料， $\hat{T}_{gd}^K$  與  $\hat{i}_{gd}^K$  之比較表， $\Delta^K$  的標準差為 0.92 ns。表 7 所示者，為用 2002 年 CUA2 測站 20 天 GPS 資料， $\hat{T}_{gd}^K$  與  $\hat{i}_{gd}^K$  之比較表， $\Delta^K$  的標準差為 1.06 ns。請注意：上述實驗結果，是根據  $|\Delta^K| < 1.78$  ns 的條件，來估計 GPS 接收機差分延遲  $\overline{BR}$ 。

表 8 所示者，為利用不同時期 GPS 資料，計算之 CUA1 與 CUA2 測站接收機差分延遲估值  $\overline{BR}$ 。利用 2000 年資料估算 CUA2 站之接收機差分延遲為 6.46 ns，如以 2002 年資料估算 CUA1 與 CUA2 之接收機差分延遲，分別為 4.73 ns 與 5.67ns。由此實驗結果顯示：(1) 每一部接收機的接收機差分延遲  $\overline{BR}$  皆不同，(2) 同一部接收機，不同的時期有不同的接收機差分延遲，以本實驗 CUA2 測

站為例，相隔約 15 個月，接收機差分延遲改變約為 0.79 ns。

求得每一測站的接收機差分延遲  $\overline{BR}$  後，針對每一顆 GPS 人造衛星，按照步驟六，求得該測站對每一顆人造衛星的人造衛星與接收機差分延遲的總和， $\overline{\overline{SPR}}^K$ 。例如，2002 年資料估算 CUA2 的  $\overline{BR}$  為 5.67 ns (詳如表 8)，JPL 估算 PRN 1 的  $T_{gd}^K$  為 -3.21 ns (詳如表 4)，則 CUA2 對 PRN 1 的  $\overline{\overline{SPR}}^K$  為 2.46 ns。表 9 所示者，為 CUA1 與 CUA2 對各 GPS 人造衛星的  $\overline{\overline{SPR}}^K$  比較表。表 9 中， $\overline{\overline{SPR}}^K_{Cu1-2002}$  代表測站 CUA1，用 2002 年 GPS 資料估算的結果； $\overline{\overline{SPR}}^K_{Cu2-2000}$ ， $\overline{\overline{SPR}}^K_{Cu2-2002}$  則分別代表測站 CUA2 用 2000 年及 2002 年資料所估算的結果。

如果人造衛星與接收機差分延遲皆已知，則可求得改正後之斜向 STEC。再由人造衛星的垂直角，計算映射函數  $S(E)$ ，因此，可由方程式(3)計算 VTEC，式中下標  $j$  及上標  $k$  分別代表接收機與衛星的編號。

$$VTEC_j^k = \frac{\left( STEC_j^k - \overline{\overline{SPR}}_j^k \right)}{S_j^k(E)} \quad (3)$$

表 10 為利用 CUA2 測站於 2002 年 3 月 3 日的 GPS 資料，估算各人造衛星之  $STEC_j^k$ ，並以方程式(3)計算  $VTEC_j^k$ ，進而求其極大值  $VTEC_{\max}$  與極小值  $VTEC_{\min}$ 。由表 10 中可見，CUA2 測站 於 2002 年 3 月 3 日觀測各 GPS 人造衛星的  $VTEC_j^k$  極大值與極小值分別為 60.7 ns (對應 PRN 7) 與 2.7 ns (對應 PRN 14)。此外，比較表 1 與表 9，CUA2 站在 2002 年 3 月 3 日所觀測到的衛星，與 JPL 的人造衛星延遲結果，相同者有 25 顆。因此，表 10，只列出此 25 顆共同衛星的統計結果。

為了進一步了解本文所提演算法的效果，將以上兩顆衛星 (PRN 7 與 PRN 14)，實施  $\overline{\overline{SPR}}^K$  前後的 VTEC 時間系列比較圖，分別繪出如圖 1 與圖 2，其中，X 軸代表地方時 (小時)，Y 軸為 VTEC(ns)。從表 1 知 PRN 7 與 PRN 14 都是只有一個弧段，從表 2 可以獲得其它相關統計資料。

由分析表 10 與圖 1、2，可得到以下結論：(1) 以  $\overline{\overline{SPR}}^K$  改正前後 VTEC 曲線的差異量，與衛星的垂直角大小成反比，換句話說，垂直角越大，差異量越大 (由方程式 (21) 可證明)；(2) 改正後的 VTEC 的大小，除了與緯度有關外，基本上與 IPP 處的地方時有高度相關，通常在晚上時間 VTEC 較小，如 PRN 14 的狀況；而在下午 2 時後的 VTEC 較大，如 PRN 7 的狀況；(3) 從整體資料分析來看，改正後的 VTEC 值與電離層延遲的特性相符，即 VTEC 應為正值、夜晚時的 VTEC 值約為 5ns 左右、午後 2 時左右的 VTEC 值最大。

### 三、參考文獻

1. 李振濤、陳春盛(1999)，以適應修整法建立區域性 GPS 電離層遲延模式之研究，測量工程，第四十一卷，第四期，中國測量工程學會，第 47-61 頁。
2. 林老生(2001)，以 GPS 觀測量估計 GPS 人造衛星與接收機 L1/L2 差分延遲之研究測量工程，第四十三卷，第四期，中國測量工程學會，第 5-28 頁。
3. 林老生，克利思·理哲思 (1999)，利用 GPS 觀測量構建即時的區域電離層模型之研究，測量工程，第四十一卷，第一期，中國測量工程學會，第 5-32 頁。
4. 林老生 (1998)，提高 GPS 即時估計電離層延遲精度之研究，測量工程，第四十卷，第一期，中國測量工程學會，第 25-46 頁。
5. 吳健、龍其利、權坤海(1998)，新鄉觀測的電離層 TEC 和板厚的統計與建模研究，電波科學學報，第 13 卷第 3 期，第 291-296 頁。
6. 黃運開(1997)，電離層中電波傳播的基礎物理問題，工程物理，第 4 期，第 24-27 頁。
7. 張東和、曹沖、甄衛民(1995)，GPS 接收機測量電離層 TEC 的數據處理方法，電波科學學報，第 10 卷第 3 期，第 84-87 頁。
8. 張孟陽、呂保維、宋文淼(1997)，單頻 GPS 導航定位中的電離層延遲改正方法，電波科學學報，第 12 卷第 3 期，第 254-259 頁。
9. 曾清涼、儲慶美 (1999)，GPS 衛星測量原理與應用，國立成功大學衛星資訊研究中心。
10. 曾清涼、劉正彥 (2000)，電離層全電子含量對全球定位系統精準度的影響，國科會計畫 NSC 89-2211-E-006-041。
11. Bishop G.J, Coco D.S., & Coker C.(1991), Variations in ionospheric range error with GPS look direction, Proceedings of ION GPS-91, Fourth International Technical Meeting of The Satellite Division of The Institute of Navigation, September 11-13, Albuquerque, New Mexico, pp.1045-1054.
12. Bishop G.J, Coco D.S., Coker C., Fremouv E.J., Secan J.A., Greenspan R.L. & Eyring D.O. (1992), GPS application to global ionospheric monitoring: requirements for a ground-based system, Proceedings of ION GPS-92, Fifth International Technical Meeting of The Satellite Division of The Institute of Navigation, September 16-18, Albuquerque, New Mexico, pp.339-353.
13. Brown, A. & Jovancevic, A. (2001), Ionospheric correction improvements for single frequency GPS receivers. ION 57<sup>th</sup> Annual Meeting, pp. 379-381.
14. Coco D. (1991), GPS - Satellites of opportunity for ionospheric monitoring. GPS World, October, pp.47-50.
15. Ephishov, I.I., Baran, L.W., Shagimuratov, I.I. & Yakimova, G.A. (2000), Comparison of total electron content obtained from GPS with IRI. Phys. Chem. Earth ©, Vol. 25, No. 4, pp. 339-342.

16. Feltens J., Dow J.M., Martin-Mur T.J., Martinez C.G. & Bayoona-P'erez M.A. (1996), Verification of ESOC ionosphere modeling and status of IGS intercomparison activity. Presented at the IGS Analysis Center Workshop, Silver Springs, MD, USA, March 19-21, pp.205-219.
17. Gao, Y., Heroux, P., Liao, X., Lahaye, F, Beck, N. & Olynik., M. (1999), GPS instrumental bias between receivers, ION 55<sup>th</sup> Annual Meeting, pp. 209-216.
18. Goodwin, G.L. & Breed, A.M. (2001), Total electron content in Australia corrected for receiver/satellite offset bias and compared with IRI and PIM predictions. Adv. Space Res. Vol. 27, No. 1, pp. 49-60.
19. Klobuchar J.A., Basu S. & Doherty P. (1993), Potential limitations in making absolute ionospheric measurements using dual frequency radio waves from GPS satellites, Proceedings of Ionospheric Effects Symposium, IES-93, May, pp.187-194.
20. Kunches, J. (2000), In the teeth of Cycle 23. ION GPS-2000, pp. 626-633.
21. Lin L.S. (1998), Real-time estimation of ionospheric delays using GPS measurements, UNISURV S-51, Reports from School of Geomatic Engineering, The University of New South Wales, Sydney, Australia, 218pp.
22. Rizos, C. (1997), Principles and Practice of GPS Surveying. Monograph 17, School of Geomatic Engineering, The University of New South Wales, Sydney, Australia, 560pp.
23. Seeber, G. (1993), Satellite Geodesy. Walter de Gruyter, Berlin, 531pp.
24. Skone, S. (2000), Wide area ionosphere modeling at low latitude – specifications and limitations. ION GPS-2000, pp. 643-652.
25. Walter, T. Hansen, A., Blanch, J., Enge, P., Mannucci, T., Pi, X., Sparks, L., Iijima, B., El-Arini, B., Lejeune, R. & Chu, A. (2000), Robust detection of ionospheric irregularities. ION GPS-2000, pp. 209-218.
26. Wanninger, L. (1994), Der Einfluss der Ionosphäre auf die Positionierung mit GPS, PhD thesis of University of Hannover, Germany, Nr. 201, 137pp.
27. Yinger, C., Feess, W., Esposti, R, Chasko, A., Wilson, B. & Wheaton, B. (1999), GPS satellite interfrequency biases, ION 55<sup>th</sup> Annual Meeting, pp. 347-354.
28. Yuan, Y. & Qu, J. (2001), An improvement to ionospheric delay correction for single-frequency GPS users – the APR-I scheme, Journal of Geodesy, 75: 331-336

#### 四、計畫成果自評

基本上，本研究內容與原計畫大致相符，研究結果也符合預期目標。上述實驗結果，是以政治大學的兩個 GPS 接收站的資料為主；此外，承蒙內政部地政司衛星測量中心提供 7 個衛星追蹤站的 GPS 資料（觀測期間為 2001 年 10 月至 2002 年 9 月），本案將陸續以所提出的演算法算各衛星追蹤站 GPS 接收機的

L1/L2 差分延遲。本案部分的研究結果預定於下列研討會發表：第 22 屆測量學術及應用研討會（2003 年 9 月）。

表 1、CUA2 測站於 2002 年 3 月 3 日觀測到的 GPS 衛星編號與弧段數

PRN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	13	14	15
弧段	3	2	2	1	2	2	1	2	1	1	1	3	1	3
PRN	17	18	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
弧段	1	1	2	2	2	1	1	2	1	2	1	1	1	2

表 2、CUA2 測站至人造衛星 4、7、14、24 對應之 IPP 的地理經緯度、地方時、  
STEC 與垂直角等統計資料

PRN	$W_{\max}$	$W_{\min}$	$\lambda_{\max}$	$\lambda_{\min}$	$\lambda_{cr_{\max}}$	$\lambda_{cr_{\min}}$	$STEC_{\max}$	$STEC_{\min}$	$E_{\max}$
4	27.72	18.49	130.01	113.94	315.00	188.94	105.12	55.02	51.29
7	24.28	16.25	125.76	110.98	286.65	173.7	99.80	57.85	73.15
14	28.53	16.11	125.57	111.08	359.85	108.15	28.69	6.87	72.10
24	27.97	17.03	127.35	111.56	337.20	213.90	137.62	51.48	59.08

表 3、CUA2 測站，於 2002 年 3 月 3 日估計對每一顆人造衛星之  $SPR^K$  與  $\overline{BS}^K$

PRN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	13	14	15
$SPR^K$	2.32	5.54	3.35	4.70	2.86	2.76	10.27	5.18	4.61	9.17	1.29	0.83	0.12	4.80
$\overline{BS}^K$	-1.67	1.55	-0.64	0.71	-1.13	-1.23	6.28	1.19	0.62	5.18	-2.70	-3.16	-3.87	0.81
PRN	17	18	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
$SPR^K$	5.10	0.72	4.31	5.68	2.86	3.85	9.30	1.46	4.37	4.34	3.93	3.32	1.79	2.81
$\overline{BS}^K$	1.11	-3.27	0.32	1.69	-1.13	-0.14	5.31	-2.53	0.38	0.35	-0.06	-0.67	-2.20	-1.18

表 4、JPL 人造衛星差分延遲  $T_{gd}^K$  與標準化人造衛星差分延遲  $\hat{T}_{gd}^K$

PRN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	13	14	15	16
$T_{gd}^K$	-3.21	-1.60	-4.41	-6.22	-4.17	-4.96	-1.71	-4.64	-5.54	-1.73	-12.51	-2.61	-2.21	-0.61
$\hat{T}_{gd}^K$	1.1	2.71	-0.10	-1.91	0.14	-0.65	2.60	-0.33	-1.23	2.58	-8.20	1.70	2.10	3.70
PRN	17	18	19	21	22	23	24	25	26	27	29	30	31	
$T_{gd}^K$	-1.51	-5.24	-3.12	-2.47	-3.85	-2.79	-0.73	-7.60	-6.83	-4.37	-7.71	-7.76	-6.14	
$\hat{T}_{gd}^K$	2.80	-0.93	1.19	1.84	0.46	1.52	3.58	-3.29	-2.52	-0.06	-3.40	-3.45	-1.83	

表 5、JPL 估算之  $\hat{T}_{gd}^K$  與用 CUA2 測站 2000 年資料估算之  $\hat{t}_{gd}^K$  比較表

PRN	1	2	5	6	7	10	17	21	23	24	29	30
$\hat{T}_{gd}^K$	1.37	2.98	0.41	-0.38	2.87	2.85	3.07	2.11	1.79	3.85	-3.13	-3.18
$\hat{t}_{gd}^K$	0.43	2.72	1.39	-0.20	3.04	3.22	2.53	1.49	1.92	4.93	-1.95	-2.67
$\Delta^K$	0.94	0.26	-0.98	-0.18	-0.17	-0.37	0.54	0.62	-0.13	-1.08	-1.18	-0.51

表 6、JPL 估算之  $\hat{T}_{gd}^K$  與用 CUA1 測站 2002 年資料估算之  $\hat{t}_{gd}^K$  之比較表 (以 ns 為單位)

PRN	2	3	7	13	15	17	20	22	23	27
$\hat{T}_{gd}^K$	2.80	-0.01	2.69	-8.11	2.19	3.79	-0.84	1.93	0.55	-2.43
$\hat{t}_{gd}^K$	3.08	1.71	2.02	-7.87	3.97	3.60	0.30	1.70	-0.36	-2.57
$\Delta^K$	-0.28	-1.72	0.67	-0.24	-1.78	0.19	-1.14	0.23	0.91	0.14

表 7、JPL 估算之  $\hat{T}_{gd}^K$  與用 CUA2 測站 2002 年資料估算之  $\hat{t}_{gd}^K$  之比較表 (以 ns 為單位)

PRN	2	3	7	13	21	22	23	27	31
$\hat{T}_{gd}^K$	3.09	0.28	2.98	-7.82	2.22	0.84	1.90	0.32	-1.45
$\hat{t}_{gd}^K$	2.34	0.90	2.01	-7.55	3.63	1.05	0.28	0.20	0.12
$\Delta^K$	0.75	-0.62	0.97	-0.27	-1.41	-0.21	1.62	0.12	-1.57

表 8、CUA1 與 CUA2 測站之接收機差分延遲估值  $\overline{BR}$

測站	$\overline{BR}$ (ns)	備註
CUA1	4.73	用 2002 年資料估算
CUA2	5.67	用 2002 年資料估算
CUA2	6.46	用 2000 年資料估算

表 9、CUA1 與 CUA2 對各 GPS 人造衛星  $\overline{SPR}^K$  的比較表 (以 ns 為單位)

PRN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	13	14	15	16
$\overline{SPR}^K_{Cua1-2002}$	1.52	3.13	0.32	-1.49	0.56	-0.23	3.02	0.09	-0.81	3.00	-7.78	2.12	2.52	4.12
$\overline{SPR}^K_{Cua2-2002}$	2.46	4.07	1.26	-0.55	1.5	0.71	3.96	1.03	0.13	3.94	-6.84	3.06	3.46	5.06
$\overline{SPR}^K_{Cua2-2000}$	3.25	4.86	2.05	0.24	2.29	1.5	4.75	1.82	0.92	4.73	-6.05	3.85	4.25	5.85
PRN	17	18	19	21	22	23	24	25	26	27	29	30	31	
$\overline{SPR}^K_{Cua1-2002}$	3.22	-0.51	1.61	2.26	0.88	1.94	4.00	-2.87	-2.10	0.36	-2.98	-3.03	-1.41	
$\overline{SPR}^K_{Cua2-2002}$	4.16	0.43	2.55	3.20	1.82	2.88	4.94	-1.93	-1.16	1.30	-2.04	-2.09	-0.47	
$\overline{SPR}^K_{Cua2-2000}$	4.95	1.22	3.34	3.99	2.61	3.67	5.73	-1.14	-0.37	2.09	-1.25	-1.3	0.32	

表 10、以 CUA2 測站於 2002 年 3 月 3 日的 GPS 衛星資料計算之  $STEC_j^k$ ，

經  $SPR^k$  改正後之  $VTEC_j^k$  統計資料 (以 ns 為單位)

PRN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	13	14	15
$VTEC_{max}$	55.2	52.0	26.5	57.6	47.9	40.3	60.7	53.8	36.3	55.9	65.0	8.9	18.9
$VTEC_{min}$	4.2	3.4	5.3	33.2	6.8	6.7	26.1	15.5	7.3	18.0	16.1	2.7	8.6
PRN	17	18	21	22	23	24	25	26	27	29	30	31	
$VTEC_{max}$	18.4	14.9	12.5	31.4	43.4	54.8	26.7	49.3	50.3	37.	25.2	40.6	
$VTEC_{min}$	11.5	8.0	5.0	7.0	12.7	23.9	8.5	10.0	13.7	9.0	8.5	9.1	

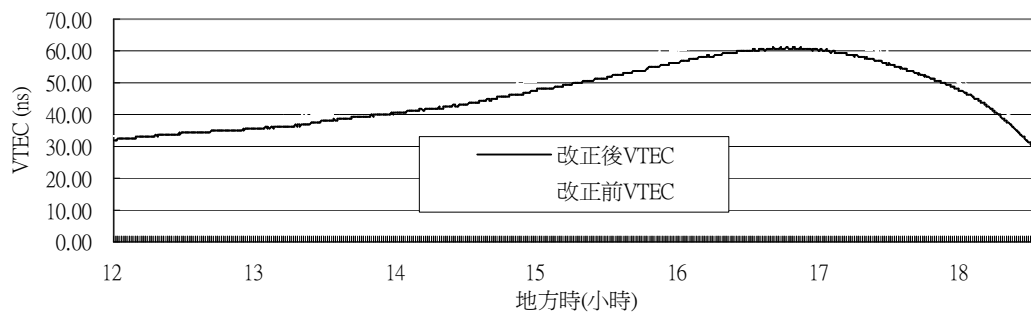


圖 1、CUA2 於 2002 年 3 月 3 日對 PRN 7 GPS 人造衛星實施  $SPR^k$  改正前後之



### VTEC 時間系列比較圖

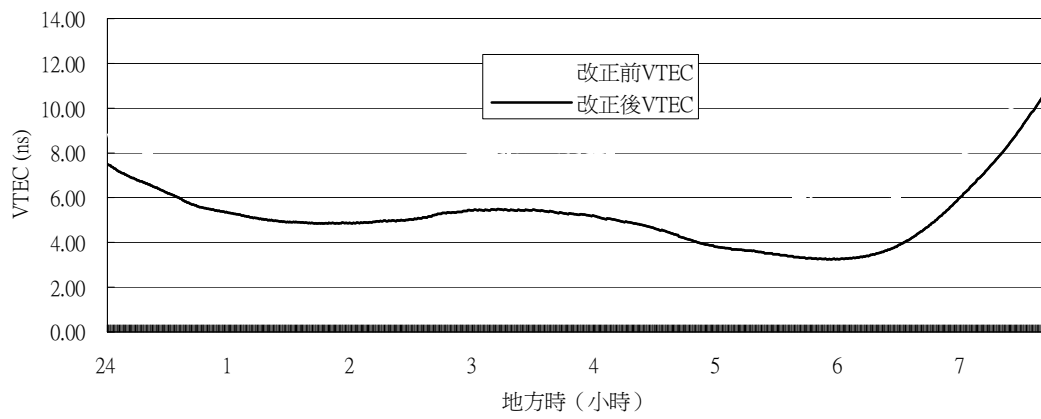


圖 2、CUA2 於 2002 年 3 月 3 日對 PRN 14 GPS 人造衛星施  $\overline{SPR}^K$  改正前後之 VTEC 時間系列比較圖