

估計 GPS 接收機 L1/L2 差分延遲之研究

林老生¹

摘要

由於 GPS 人造衛星與接收機硬體上的限制因素，產生所謂的人造衛星 L1/L2 差分延遲 (BS)，與接收機 L1/L2 差分延遲 (BR) 等系統誤差。每一顆 GPS 人造衛星的 BS，與每一部接收機的 BR 皆不同。因此，如果欲以 GPS 觀測量求得無偏差之電離層 TEC 估值，必須事先估算各 GPS 人造衛星的 BS 與接收機之 BR。

本文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)。至於人造衛星 L1/L2 差分延遲 (BS) 部份，則採用美國 JPL (Jet Propulsion Laboratory) 所估算的結果。有關接收機的 L1/L2 差分延遲 (BR) 演算法的基本原理、估計步驟，以及實驗結果將於本文加以介紹。

根據初步實驗結果顯示：(I) 利用國立政治大學兩個 GPS 測站 (CUA1、CUA2) 在不同時期所收集的資料，以試驗本文所提出的方法：(1) 以 2000 年資料估計 CUA2 的 BR 為 6.21 ns，以 2002 年資料估計 CUA1 及 CUA2 的 BR 分別為 4.73 ns 與 5.67 ns。(2) 以本文所提演算法所估計的 BR 與 JPL 估算的 BS 總和 (\overline{SPR}^K)，改正 CUA2 測站於 2002 年 3 月 3 日收集的 GPS 資料所估算的 TEC，求得當天垂直 TEC (VTEC) 的最大與最小值，分別為 60.7 ns 與 2.7 ns。(3) CUA1 與 CUA2 平距約 77 公尺，取 2002 年 3 月 3 日收集的 GPS 資料，以各站之 \overline{SPR}^K ，分別改正兩測站資料估算的 TEC，然後，針對每一顆衛星、每一曆元，分析比較此兩測站對同一顆衛星的 VTEC 較差 $\Delta VTEC_{CUA2-CUA1}^K$ ，所有 $\Delta VTEC_{CUA2-CUA1}^K$ 的平均值為 0.34 ns，中誤差為 0.10 ns。(II) 以 PGGA 的 CRFP 站資料所估計的 SPR^K 值為測試對象。首先，假設 CRFP 對各人造衛星之 SPR^K 為真值。其次，用本文所提出的演算法，估計各人造衛星之 SPR 估值 (\overrightarrow{SPR}^K)。最後，計算 SPR^K 與 \overrightarrow{SPR}^K 的較差 (Δ_{SPR}^K)。實驗結果顯示，所有 Δ_{SPR}^K 的平均值為 0.13ns，中誤差為 0.98ns。

關鍵詞：全球定位系統、電離層、全電子含量、接收機 L1/L2 差分延遲

收到日期：民國 91 年 05 月 27 日
修改日期：民國 91 年 09 月 12 日
接受日期：民國 91 年 12 月 29 日

¹ 國立政治大學地政學系助理教授

1. 前言

電磁波訊號從全球定位系統(Global Positioning System, GPS)人造衛星經過電離層到達地球上的接收機，受到電離層的影響，產生時間延遲 (time delay)，即所謂的電離層延遲。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。若有雙頻 GPS 接收機，就可藉由 L1/L2 觀測量的線性組合，而消除大部份的電離層延遲 (Hofmann-Wellenhof et al., 1994)；然而，另一方面也可以藉由 GPS L1/L2 觀測量的線性組合，估計電離層延遲或 TEC。

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 PGGGA、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 PGGGA、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，本文研究的目的，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。

利用 GPS 雙頻 L1/L2 觀測量，估計電離層 TEC 有關的方程式、方法與限制條件、GPS 人造衛



星與接收機 L1/L2 差分延遲的定義、特性與估計方法回顧等，將於第二章加以介紹。本文所提出演算法之基本原理、估計步驟，則於第三章詳加介紹。第四章，將介紹以政治大學兩個 GPS 測站 (CUA1、CUA2) 在不同時期 (分別為 2000 年 12 月 1 日至 12 月 7 日、2002 年 2 月 22 日至 3 月 12 日) 所收集的資料，以本文演算法，估計 GPS 接收機 L1/L2 差分延遲等有關的實驗結果與討論。最後，第五章將對本文所提出演算法之實驗結果作一總結。

2. 利用 GPS 觀測量估計電離層 TEC

2.1 利用 GPS 觀測量估計電離層 TEC

電離層為地球大氣層的一部份，其位於距地球表面上空 50 公里至 1000 公里(或更高)之處。GPS 的電磁波訊號穿透電離層時，會產生額外的時間延遲，稱為電離層延遲。電離層延遲的大小，與電離層的全電子含量(TEC)有密切的關係。TEC 的定義，是假設在人造衛星和接收機之間，有一個截面積為一平方公尺的圓柱體沿著電磁波訊號路徑，在此圓柱體內所含之電子總數量，其測量單位為(el/m^2)。所謂的全電子含量單位(Total Electron Content Unit, TECU)的定義如后:

$$TECU = 1 \cdot 10^{16} el/m^2 \quad (1)$$

若以公尺為單位，則電離層延遲可以下式表示 (Seeber, 1993):

$$d_{ion} = \pm \frac{C}{f^2} TEC \quad (2)$$

式中， d_{ion} 為以公尺為單位的電離層延遲，(‘+’號對應虛擬距離觀測量，‘-’號則對應相位觀測量)； f 為載波頻率，以 Hz 為單位；TEC 為全電子含量，以 TECU 為單位； C 為一常數，其等於 $40.3 m \cdot Hz^2 \cdot (el/m^2)^{-1}$ (Coco et al., 1991)。例如，若 L1 頻道的訊號受到 1 公尺的電離層延遲影響，則由方程式(2)，可以計算出當時的 TEC 大小約為 6.16 TECU (註：L1 的頻率為 1575MHz)。

若以秒為單位，則電離層延遲可以下式表示 (Seeber, 1993):

$$\delta_{ion} = \pm \frac{C}{cf^2} TEC \quad (3)$$

式中， c 為光速，以 m/s 為單位； δ_{ion} 代表以秒為單位的電離層延遲。

由方程式(2)、(3)可知，相同頻率的虛擬距離與相位觀測量，受到的電離層延遲量大小相同，符號相反；另一方面，不同頻率的電磁波，所受到的電離層延遲大小相異；因此，若有雙頻 GPS 觀測量，則可以藉由 L1/L2 觀測量的線性組合，計算每一曆元(epoch)，由接收機至每一追蹤到的 GPS 人造衛星，在視線方向之斜向 TEC (slant TEC)，STEC。



如果暫時不考慮虛擬距離的量測噪音與多路徑效應，由方程式(2)及 L1/L2 虛擬距離觀測量，可以推導出來 STEC 的估值（林老生，1998；Lin, 1998）：

$$STEC = 9.5196 \times (P_2 - P_1) \quad (4)$$

式中，STEC 為斜向 TEC 估值，以 TECU 為單位； P_1 及 P_2 分別為 L1 和 L2 頻道之虛擬距離觀測量(以公尺為單位)。請注意：L1/L2 虛擬距離觀測量中與頻率無關的系統誤差，如對流層延遲、軌道誤差等，經由方程式 (4) 計算後，已經互相抵銷掉。

如果暫時不考慮相位觀測量的量測噪音與多路徑效應，由方程式(2)及 L1/L2 相位觀測量，也可以推導出來 STEC 的估值（林老生，1998；Lin, 1998）：

$$STEC = 9.5196 \times (\Phi_1 - \Phi_2) + D \quad (5)$$

式中， Φ_1 及 Φ_2 為 L1 和 L2 頻道之相位觀測量(以公尺為單位)； $D = -9.5196 \times (\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2)$ ； λ_1 及 λ_2 為 L1 和 L2 頻道之波長(以公尺為單位)； N_1 及 N_2 為 L1 和 L2 頻道相位觀測量之整數模糊參數(Integer Ambiguity Parameters, 以 cycle 為單位)。請注意：L1/L2 相位觀測量中，與頻率無關的系統誤差，如對流層延遲、軌道誤差等，經由方程式 (5) 計算後，已經互相抵銷掉。

由方程式(4)，可以推算 30 cm(相當於 1 ns)的電離層差分延遲，相當於 2.852 TECU (Klobuchar et al., 1993)；為求一致性，爾後，本文將採用 ns 作為 TEC 的單位。

因此，若有雙頻 GPS 觀測量，可用方程式(4)、(5)，分別估算 STEC。由方程式(4)所估算的 STEC，為絕對的 STEC 估值，但是受到 P_1 及 P_2 量測噪音及多路徑的影響，STEC 之噪音較大；如果方程式(5)之 D 值未定，那麼由 L1/L2 相位觀測量所估計之 STEC，含有一個未知的常數項 D，雖然其噪音較小，但是其僅能作為 STEC 的相對估值。

假設有某一顆人造衛星被持續觀測，而且沒有週波脫落(cycle slip)發生，那麼在一連續的弧段內，只有一個未知的常數項 D。求解 D 的方法有兩類：後級處理(Post Processing)方式 (Coco et al., 1991; Komjathy & Langley, 1996; Lin, 1998) 與即時處理(Real Time)方式 (Wilson & Mannucci, 1993; Yinger et al., 1999)。

相位水準技術 (phase leveling)為後級處理方式之一，今以它為例說明求解 D 值的步驟。如果，有某一顆人造衛星被持續觀測 N 曆元，並定義下面兩變數：

$$STEC_{P_2-P_1} = 9.5196 \times (P_2 - P_1) \quad (6)$$

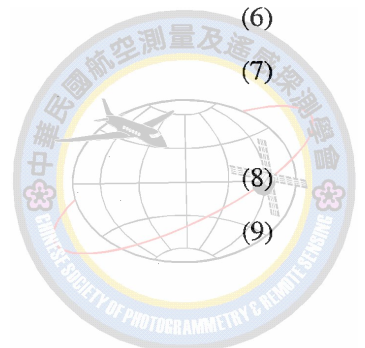
$$STEC_{\Phi_1-\Phi_2} = 9.5196 \times (\Phi_1 - \Phi_2) \quad (7)$$

將方程式(4)、(5)根據上式加以改寫如後：

$$STEC_i = (STEC_{P_2-P_1})_i \quad (8)$$

$$STEC_i = (STEC_{\Phi_1-\Phi_2})_i + D \quad (9)$$

該弧段的未知常數項 D，可由下式計算：



$$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left((STEC_{P2-P1})_i - (STEC_{\Phi1-\Phi2})_i \right) \quad (10)$$

方程式(8)、(9)及(10)中的 i 代表曆元數。因此，如果求得 D 值，再將其代回方程式(9)，就可以逐曆元計算 $(STEC_{\Phi1-\Phi2})_i + D$ ，求得噪音小的 STEC 絕對估值。

2.2 GPS 人造衛星與接收機 L1/L2 差分延遲

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)，BS (Coco, 1991)。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)，BR (Coco, 1991)。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 Wilson & Mannucci (1994) 的研究結果顯示，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 ± 3 ns 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 ± 10 ns 的誤差。

估計接收機的差分延遲，BR，的方法有三種 (Wilson & Mannucci, 1993)：(1) 使用接收機之內部檢定功能。例如由 JPL 所發展的 Rogue 接收機，就具有硬體檢定模式 (hardware calibration mode)，因此，操作者如果連上外接電線後，相同的無線電訊號會通過接收機內部的 L1/L2 頻道路徑。經觀測 20 分鐘以上，取 L1/L2 的延遲差平均值，如此，就可以直接量測該部接收機的 BR。(2) 以共用天線方式，讓一部未檢定的接收機和一部已檢定過的接收機 (如 Rogue 接收機) 共用一個天線。如此，可以求得未檢定接收機之 BR。(3) 利用單站資料或一個區域 (甚至全球) 的 GPS 測站網的資料，來建構電離層模型，同時估計每一顆 GPS 人造衛星的 BS 以及每一部 GPS 接收機差之 BR 的總和，SPR。

估計人造衛星的差分延遲，BS，之方法有二種：(1) 利用單站模型技術 (Lanyi & Roth, 1988; Coco et al., 1991; Bishop et al., 1994; Lin, 1998; Lin, 2001)，(2) 利用多站模型技術 (Wilson & Mannucci, 1993; Gao et al., 1994; Sardon et al., 1994; Wilson & Mannucci, 1994; Chao et al., 1995; Komjathy & Langley, 1996; Feltens et al., 1996; Yinger et al., 1999)。

以上兩種方法，除了要估計每一顆 GPS 人造衛星的 BS 與每一個測站接收機 BR 的總和外，還必須



選用一種數學模式來代表真實的電離層。

如果使用單站法估計 SPR，一般無法將接收機的 BR 與每一顆人造衛星的 BS 分開；除非，每一顆人造衛星的 BS 已知（或接收機的 BR 已知）。另一方面，如果使用多站法估計 SPR，如果要把 BS 與 BR 分開，那麼，至少應該有一部接收機的 BR 已知（換言之，該接收機應事先被檢定過）。

2.3 電離層穿透點 IPP 在 Solar-Magnetic 坐標系的坐標

爲了探討 GPS 估計電離層 TEC 的問題，一般假設距離地球表面約 400 公里的上空有一假想的球面薄殼，它可以近似代表垂直 TEC (Lanyi & Roth, 1988)；而且，假設訊號從 GPS 人造衛星到地面接收機所走的路徑間所遭遇的全部電子量，都被包含在這假想的薄殼裡。從接收機至 GPS 衛星之視線(Line of Sight)，與電離層薄殼之交點，稱爲“電離層穿透點”(Ionospheric Pierce Point, IPP)。

Solar Magnetic 坐標系統，爲一種三維的地心坐標系，X 軸由地球（地）指向太陽（日）的地日連線所定義，Z 軸通過地磁南北極，Y 軸垂直於包含地日連線與地磁南北極的平面 (Oma, 2002; Oulu, 2002)。一般用二維的球面薄殼代表電離層，所以，必須將電離層穿透點在 Solar Magnetic 坐標系的坐標，轉換爲球面坐標 (ϕ_m, λ_{cr}) (請參考方程式(12)至(17)的說明)。

由雙頻 GPS 觀測量，利用所謂的相位水準技術，以方程式(9)，可以計算每一層元，由接收機至每一追蹤到的人造衛星，在視線方向之斜向 TEC，STEC。這些斜向 TEC 估值，事實上包含真正的斜向 TEC、人造衛星差分延遲、以及接收機差分延遲等三個值。因此，它們的關係可由下式表示之：

$$STEC_i = S(E) \times VTEC_i + BR + BS \quad (11)$$

式中， $STEC_i$ ，爲在層元 i，由測站之接收機到某一顆衛星之 STEC 估值，以 ns 爲單位； $VTEC_i$ ，爲位於 IPP 處的垂直 TEC，以 ns 爲單位； BR ，爲某部接收機之接收機差分延遲，以 ns 爲單位； BS ，爲某顆人造衛星之人造衛星差分延遲，以 ns 爲單位； E ，爲接收機到被追蹤人造衛星的垂直角，以度爲單位； $S(E)$ ，爲電離層穿透點 (IPP) 的天頂距 z 的映射函數 (mapping function)，其爲 E 的函數，可定義如下(Mannucci et al., 1993)：

$$S(E) = \frac{1}{\cos z} = \left[1 - \left(\frac{R_e \cos E}{R_e + h} \right) \right]^{-0.5} \quad (12)$$

式中， R_e 爲地球的平均半徑，以公里爲單位； z 爲在 IPP 處的天頂距，以度爲單位； h 爲電離層薄殼距離地表的距離，本文假設此距離爲 400 公里（註：一般電離層約分爲 D、E、F1、F2 等層，F2 層距地球表面約 210 公里到 1000 公里之間，F2 對 GPS 訊號的影響最大，其中電子密度最濃的高度是在 250 公里到 400 公里之間 (Klobuchar, 1996)；此外，根據澳洲 IPS (Ionosphere Prediction

Service)Wang 博士的建議，本文單站法的 h 值採用 400 公里 (Wang, 1995)。

假設 ψ_{pp} 代表通過接收機與地心的向量，與通過 IPP 與地心的向量，兩者在地心的夾角，則 ψ_{pp} 可由下式計算之：

$$\psi_{pp} = \frac{\pi}{2} - E - \sin^{-1}\left(\frac{R_e}{R_e + h} \cos E\right) \quad (13)$$

如果 GPS 接收機的地理經緯度 (geographic latitude and longitude) (ϕ_u, λ_u) 已知，則可根據對被觀測 GPS 人造衛星的方位角、垂直角以及電離層薄殼模型，計算 IPP 的地理經緯度 (Klobuchar, 1987; Lin, 1998; Lin, 2001)。IPP 的地理經緯度，(ϕ_{pp}, λ_{pp})，可由下列公式計算之：

$$\phi_{pp} = \sin^{-1}(\sin \phi_u \cdot \cos \psi_{pp} + \cos \phi_u \cdot \sin \psi_{pp} \cos A) \quad (14)$$

$$\lambda_{pp} = \lambda_u + \sin^{-1}\left(\frac{\sin \psi_{pp} \sin A}{\cos \phi_{pp}}\right) \quad (15)$$

式中， λ_{pp} 、 ϕ_{pp} 分別為 IPP 的地理經、緯度； λ_u 、 ϕ_u 分別為接收機的地理經、緯度； ψ_{pp} 為方程式(13)所定義的地心夾角； A 為被觀測的人造衛星方位角。

IPP 的地磁緯度 ϕ_m 可由下式計算之：

$$\sin \phi_m = \sin \phi_{pp} \sin \phi_p + \cos \phi_{pp} \cos \phi_p \cos(\lambda_{pp} - \lambda_p) \quad (16)$$

式中， ϕ_{pp} 為 IPP 的地理緯度； ϕ_p 、 λ_p 分別為地磁北極的地理緯度、經度，本文採用 (78.7° N, 290.1° E) (Biel, 1990)。

IPP 在共同旋轉參考框架 (the co-rotating reference frame) 的經度 λ_{cr} ，和 IPP 在地球固定框架 (earth-fixed frame) 的經度 (就是地理經度) 及地球固定框架相對於太陽的旋轉角有關 (Coco et al., 1991):

$$\lambda_{cr} = \lambda_{ef} + T_e \cdot \omega_e \quad (17)$$

式中， λ_{ef} 為 IPP 在地球固定框架的經度； T_e 為世界時 (Universal Time, UT)； ω_e 為地球的角速度 (每小時 15 度)。因此，由方程式 (17) 可以得知，在共同旋轉參考框架，面對太陽的方向，永遠固定在 180° (即 $\lambda_{cr} = 180^\circ$)；換言之，無論在何處，當太陽中天時， λ_{cr} 值等於 180° (Coco et al., 1991)。

2.4 利用 GPS 觀測量估計電離層 TEC 的潛在限制因素

基本上，如果有雙頻 GPS 觀測量，利用上述方法，即可以求得 STEC 的估值。然而，有幾個潛在限制因素，可能影響到 STEC 估值的精度：(1) 虛擬距離推導之 STEC 估值， $STEC_{P2-P1}$ ，



受到 L1/L2 虛擬距離多路徑的影響；(2) 相位推導之 STEC 估值， $STEC_{\phi_1-\phi_2}$ ，受到相位觀測量的錯誤的影響；及(3) 由於硬體上的缺陷，使得由 GPS 觀測量所估算之 STEC 值，含有人造衛星與接收機差分延遲等系統誤差。

如果採用後級處理方式估算 STEC，例如相位水準方法(Lin, 1998; 林老生, 1998)，經處理後，多路徑對虛擬距離的影響將被消除大部份，而且相位的週跳也可以用其他方法事先偵查和修復。

如果採用即時處理方式估算 STEC，例如林老生(1998)以統計方法檢驗一般的卡爾曼濾波(Conventional Kalman Filter)及穩健的卡爾曼濾波(Robust Kalman Filter) 對 STEC 之估值差，以偵查和修復相位觀測量的錯誤；同時，以所謂的多路徑模板技術產生多路徑模板，即時的消除多路徑對虛擬距離的影響。

本文將採用相位水準方法，推求 D 值，再由方程式(9)求得噪音小的 STEC 估值。至於人造衛星與接收機之 L1/L2 差分延遲等系統誤差，則必須事先加以率定，再用以改正 STEC 估值。本文將針對此一課題，加以探討。

3. 估計 GPS 接收機 L1/L2 差分延遲的演算法

3.1 演算法的基本原理

因研究需要，筆者曾經提出一種單站法，可以估計各 GPS 人造衛星與接收機之 L1/L2 差分延遲總和 (SPR) 的演算法，並以其處理美國的 PGGGA、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)。該演算法，是一種單站的後級處理技術，其主要基於以下假設：(1) 假設距離地球表面約 400 公里的上空有一假想的球面薄殼，它可以近似代表電離層 (Lanyi & Roth, 1988)。(2) 在 solar-magnetic 坐標系統下，於 3 個小時內，用 15-term 的多項式能夠有效的擬合電離層。(3) 假設人造衛星差分延遲 (BS) 和接收機差分延遲 (BR)，在所選取的觀測時段內保持常數。而且，假設斜向與垂直 TEC 間可用一個映射函數建立其關聯性。(4) 由於電離層 TEC 和觀測的當地時間有密切關係，因此，利用一種所謂的「共同旋轉參考框架」(co-rotating reference frame)來處理電離層 TEC 的觀測時間。

由於台灣地區，位於所謂的電離層赤道區。因此，若以前述單站法處理台灣區 GPS 資料，所估計的各人造衛星之 SPR 值，經標準化處理，再與其它機構估算成果比較分析後，發現有些人造衛星的 BS 估值差異值超過 1ns 以上 (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，經標準化後 (請參考 3.2 節說明)，其差異值的中誤差約在 1 ns 左右)。因此，對於這些人造衛星而言，無法直接以單站法估計的 SPR，改正 TEC 值的系統誤差。因此，必須尋找

補救的方法。

另一方面，JPL (Jet Propulsion Laboratory)利用所謂的「全球電離層製圖演算法」(Global Ionospheric Mapping, GIM, algorithm)，處理分布在全球各地的 100 個測站收集的 GPS 資料，同時估計各地的 TEC、各測站接收機之 BR 及各 GPS 人造衛星之 BS (Yinger, et al., 1999)。根據 Yinger, et al. (1999)的報導，JPL 估算的人造衛星差分延遲 (BS) 的每日變化量約在 0.2 到 0.3ns，而且此精度可維持相當長的時間 (數月到數年)，除非衛星的硬體配置有所改變 (如送波器，transmitter，的改變)。

由於，單站法能夠估計各 GPS 人造衛星之 BS 與接收機之 BR 的總和 (SPR)；而且，每一部接收機的 BR 值，與每一顆人造衛星的 BS 值都不相同。所以，如果，某一測站在一天之內追蹤到 24 顆人造衛星，則用單站法可估計出 24 個 SPR 值。但是，從 2-2 節的討論可知，這 24 個 SPR 值，有一個共同值 BR。因此，理論上，如果知道某一顆 GPS 人造衛星之差分延遲，BS (如利用 JPL 估算的 BS)，就可由該顆人造衛星的 SPR 值與其 BS 的差值，求得該測站接收機的 BR 估值。實際上，爲了提高估計接收機 BR 的精度，會使用更多合乎條件的人造衛星 BS 資料，參與 BR 的估算。然而，問題是：那些人造衛星合乎條件？

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，經標準化後，其差異值的中誤差約在 1 ns 左右。因此，本文所提出的演算法，原則上，採用 1ns，作為判斷某人造衛星的 SPR 資料，是否能參與 BR 估算的基本條件。

綜上所述，本文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爲：(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。詳細的 BR 估計步驟，將於下一節說明。

3.2 估計 GPS 接收機差分延遲的步驟

根據上述基本原理，說明估計各 GPS 接收機差分延遲的步驟如後：

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，計算每一層元 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。根據方程式(11)，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：

$$STEC_i^K = S(E) \times VTEC_i^K + BR + BS^K \quad (18)$$

以下列 15-term 的多項式，代表位於 IPP 處的垂直 TEC， $VTEC_i^K$ ：

$$\begin{aligned} VTEC_i^K(\phi_m, \lambda_{cr}) = & a_0 + a_1 \cdot \phi_m + a_2 \cdot \lambda_{cr} + a_3 \cdot \phi_m^2 + a_4 \cdot \lambda_{cr}^2 + a_5 \cdot \phi_m \cdot \lambda_{cr} \\ & + a_6 \cdot \phi_m^3 + a_7 \cdot \lambda_{cr}^3 + a_8 \cdot \phi_m^2 \cdot \lambda_{cr} + a_9 \cdot \phi_m \cdot \lambda_{cr}^2 + a_{10} \cdot \phi_m^4 \\ & + a_{11} \cdot \lambda_{cr}^4 + a_{12} \cdot \phi_m^3 \cdot \lambda_{cr} + a_{13} \cdot \phi_m^2 \cdot \lambda_{cr}^2 + a_{14} \cdot \phi_m \cdot \lambda_{cr}^3 \end{aligned} \quad (19)$$

式中， ϕ_m 為 IPP 的地磁緯度 (geomagnetic latitude)； λ_{cr} 為 IPP 在共同旋轉參考框架的經度，而 a_0, \dots, a_{14} 等為電離層模型的係數。

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，由觀測資料及方程式 (18) 至 (19) 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)，和方程式 (19) 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)：

$$SPR^K = BR + I_c + BS^K + M^K + I^K \quad (20)$$

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(20)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 $\overline{SPR^K}$ 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(20)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 Δ^K

由 2.2 節的討論與方程式(20)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{t}_{gd}^K 。然後，計算每一顆衛星之 \hat{T}_{gd}^K 與 \hat{t}_{gd}^K 的差值 Δ^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{t}_{gd}^K 差值 Δ^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。



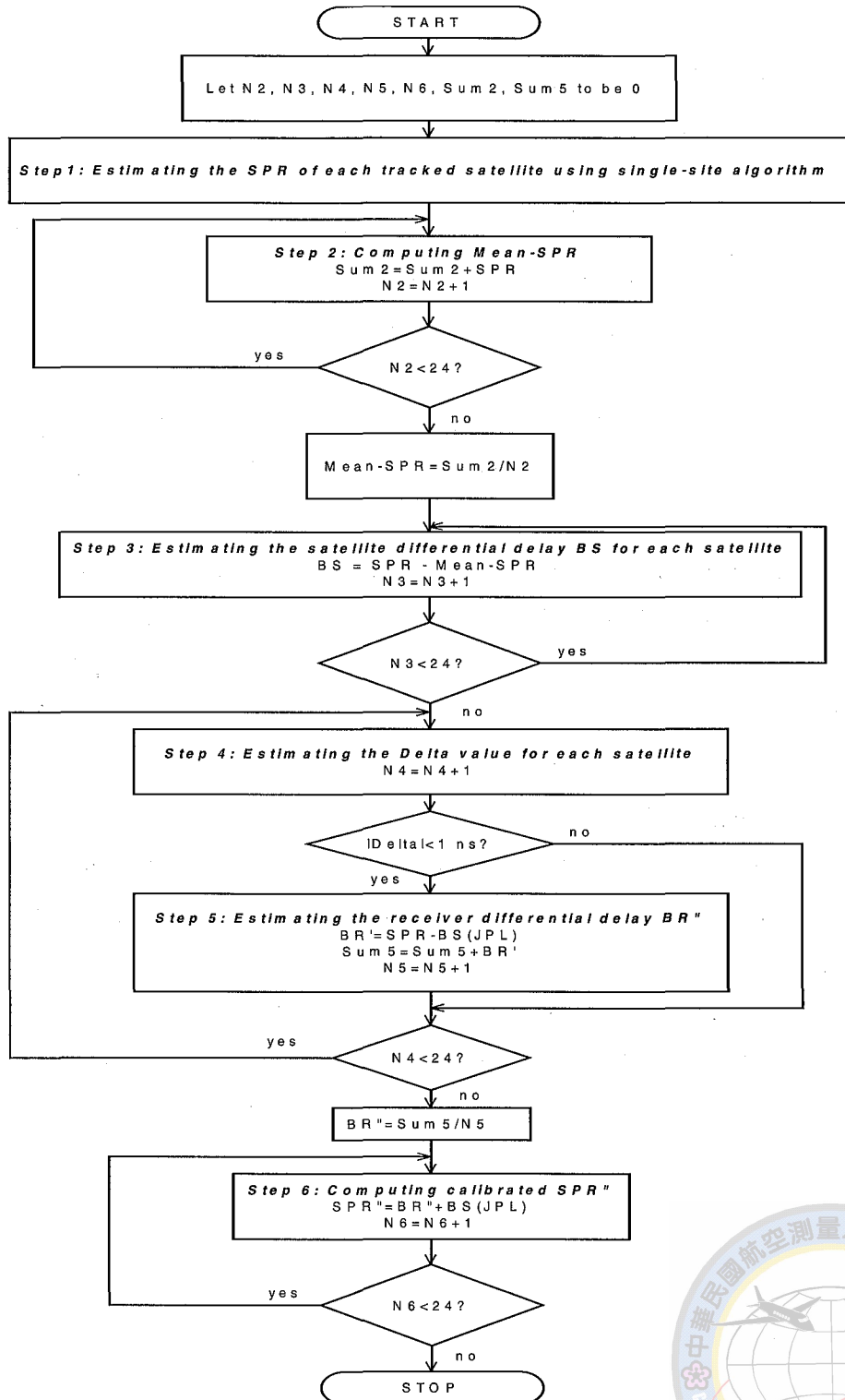


圖 1 估計 GPS 接收機 L1/L2 差分延遲的概要流程圖



圖 1 所示者，為上述估計 GPS 接收機 L1/L2 差分延遲（含 $\overline{\overline{SPR}}^K$ ）的概要流程圖。由於流程圖繪製軟體的限制因素，所以上述某些參數（如 $\overline{\overline{SPR}}^K$ ）必須稍作修改，除此之外，各步驟的處理內容與考量因素，與上列文字說明相同。

圖 1 與上列文字說明相異之處，綜整如后：(1) 為方便說明，假設有 24 顆 GPS 人造衛星資料待處理。(2) N2、N3 等為整數，Sum2、Sum5 等為實數。(3) 圖中步驟 1 的 SPR 代替 SPR^K 。(4) 圖中步驟 2 的 Mean-SPR 代替 \overline{SPR} 。(5) 圖中步驟 3 的 BS 代替 \overline{BS}^K 。(6) 圖中步驟 4 的 Delta 代替 Δ^K 。(4) 圖中步驟 5 的 BR' 代替 BR^K ，BS(JPL) 代替 T_{gd}^K ，BR'' 代替 \overline{BR} 。(4) 圖中步驟 6 的 SPR'' 代替 $\overline{\overline{SPR}}^K$ 。

4. 實驗結果與討論

4.1 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）。

4.2 實驗結果與討論

4.2.1 實驗區 GPS 測站估計電離層 TEC 概況

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（註：由方程式(9)知，每一個弧段，有一個未知數 D 待求定）。

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

雖然在資料收集階段，垂直角截止角為 10 度；但在資料處理階段，為了減低多路徑對 L1/L2 虛擬距離的影響，將捨棄垂直角低於 15 度的資料。因此，由實驗區資料分析，由測站 CUA1 或 CUA2 能觀測到電離層範圍（指所觀測的 GPS 人造衛星對應之 IPP 在電離層薄殼的活動範圍）為：

(1) 地理緯度：南北方向從北緯 15.39 度到北緯 32.38 度（空間距離約 1,890 公里），東西方向從東經 110.98 度到東經 132.20 度（空間距離約 2,356 公里）；(2) 地磁緯度：從地磁北緯 4.31 度到北緯 21.49 度；(3) 共同旋轉參考框架經度（約相當於地方時，以後文中將以地方時代表之）：0 度到 360 度（因為使用 24 小時的資料）。

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， ϕ_{\max} 與 ϕ_{\min} 分別代表地理緯度的極大與極小值， λ_{\max} 與 λ_{\min} 分別代表地理經度的極大與極小值， $\lambda_{cr_{\max}}$ 與 $\lambda_{cr_{\min}}$ 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。

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	ϕ_{\max}	ϕ_{\min}	λ_{\max}	λ_{\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

圖 2 所示者為 CUA2 測站，於 2002 年 3 月 3 日觀測 PRN 24 之 STEC 與 VTEC 對地方時的時間系列；其中，X 軸為地方時，以小時為單位；Y 軸為 TEC，以 ns 為單位。而圖 3 則為相同時間、測站，觀測 PRN 24 之 STEC 與 VTEC 對地理緯度的時間系列；其中，X 軸為地理緯度，以度為單位；Y 軸為 TEC，以 ns 為單位。

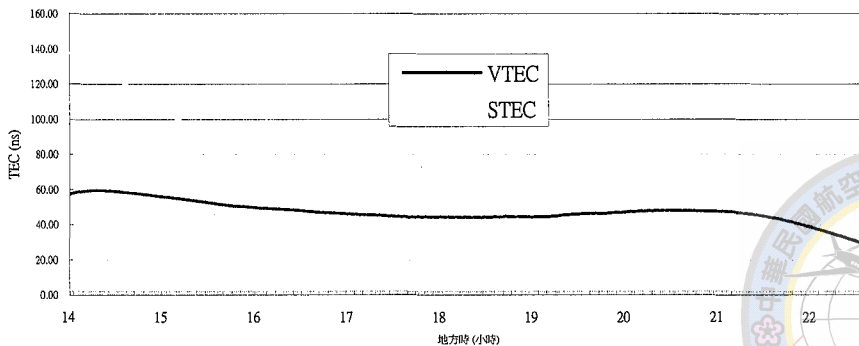


圖 2 CUA2 測站，於 2002 年 3 月 3 日觀測 PRN 24 之 STEC 與 VTEC 對地方時的時間系列

圖 2 及 3 中, STEC 及 VTEC 分別代表在 IPP 處之斜向和垂直 TEC, 兩者之關係如方程式(11)、(12)所示, 由映射函數 $S(E)$ 建立 (請注意: 此時 STEC 及 VTEC 仍含有人造衛星差分延遲(BS)與接收機差分延遲(BR)等系統誤差)。PRN 24 的垂直角最大為 59.08 度, 對應的 $S(E)$ 為 1.14; 最小為 15 度, 對應的 $S(E)$ 為 2.40。而且, PRN 24 持續被觀測約 7.18 小時 (一個弧段), 其從左邊弧段起開始上升, 垂直角升到 59.08 度後, 再往右下降至 15 度達右邊弧端。所以, STEC 與 VTEC 在弧段的兩端相差最大。

由以上二圖亦可發現, VTEC 的大小與地方時與緯度有高度的相關性。通常, 某地的地方時在 14 時左右, 其對應的 VTEC 最大。另外, PRN24 的運動方向是先從北緯 22.1 度起往北達 27.97 度後, 再往南運動至北緯 17.03 度, 因此, 造成在弧段的右半部對應的 TEC 不降反而上升之故。

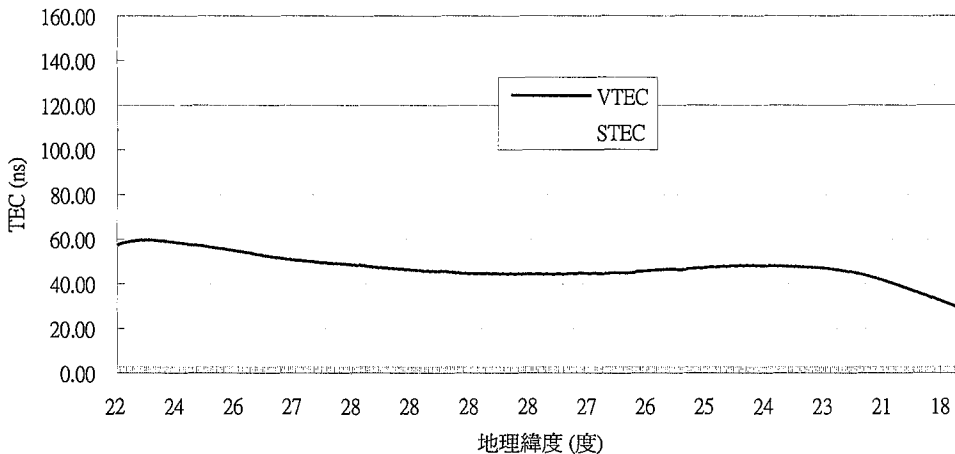


圖 3 CUA2 測站, 於 2002 年 3 月 3 日觀測 PRN 24 之 STEC 與 VTEC 對地理緯度的時間系列

4.2.2 估計人造衛星與接收機差分延遲總和 SPR^K 與人造衛星差分延遲值 \overline{BS}^K

利用本文提出的演算法估計步驟一, 可以估計每一測站對各類 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。

4.2.3 估計接收機差分延遲 BR

根據第三章介紹的估計步驟，爲了估計接收機差分延遲 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{t}_{gd}^K ，的差異 Δ^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 爲 -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 BS_K ，經處理後也可得到標準化人造衛星差分延遲 \hat{t}_{gd}^K 。然後，計算每一顆衛星之 \hat{T}_{gd}^K 與 \hat{t}_{gd}^K 差值 Δ^K 。最後，按估計步驟五，估計測站之 GPS 接收機差分延遲 BR 。

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 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
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
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 所示者，爲 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{t}_{gd}^K 之比較表， Δ^K 爲 \hat{T}_{gd}^K 與 \hat{t}_{gd}^K 的差

值, Δ^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{t}_{gd}^K 之比較表, Δ^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{t}_{gd}^K 之比較表, Δ^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 BR 。

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 之比較表 (以 ns 為單位)

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
Δ^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 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 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 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。

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
Δ^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
Δ^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

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

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{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{SPR}^K 為 2.46 ns。表 9 所示者，為 CUA1 與 CUA2 對各 GPS 人造衛星的 \overline{SPR}^K 比較表。表 9 中， $\overline{SPR}^K_{Cua1-2002}$ 代表測站 CUA1，用 2002 年 GPS 資料估算的結果； $\overline{SPR}^K_{Cua2-2000}$ ， $\overline{SPR}^K_{Cua2-2002}$ 則分別代表測站 CUA2 用 2000 年及 2002 年資料所估算的結果：

4.2.5 以人造衛星與接收機差分延遲總和 \overline{SPR}^K 改正 GPS 推導之 TEC 觀測量

如果人造衛星與接收機差分延遲皆已知，則可由方程式(11)或(18)，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(21)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。

$$VTEC_j^K = \frac{\left(STEC_j^K - \overline{SPR}_j^K \right)}{S_j^K(E)} \quad (21)$$

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(21)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。

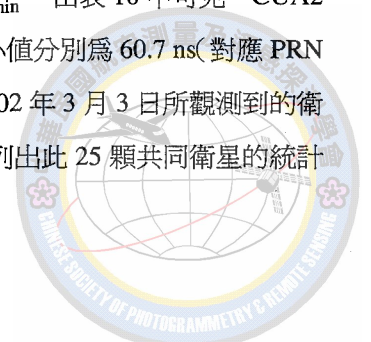


表 9 CUA1 與 CUA2 對各 GPS 人造衛星 \overline{SPR}^K 的比較表 (以 ns 為單位)

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 \overline{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	

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{SPR}^K 前的 $VTEC$ 時間系列比較圖，分別繪出如圖 4 與圖 5，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 4、5，可得到以下結論：(1) 以 \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。

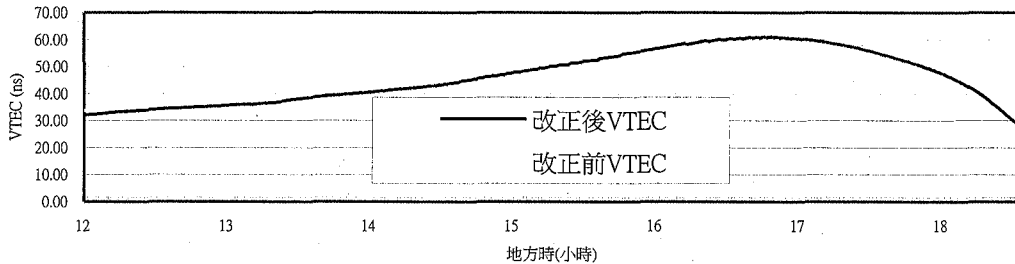


圖 4 CUA2 於 2002 年 3 月 3 日對 PRN 7 GPS 人造衛星實施 \overline{SPR}^K 改正前後之 VTEC 時間系列比較圖

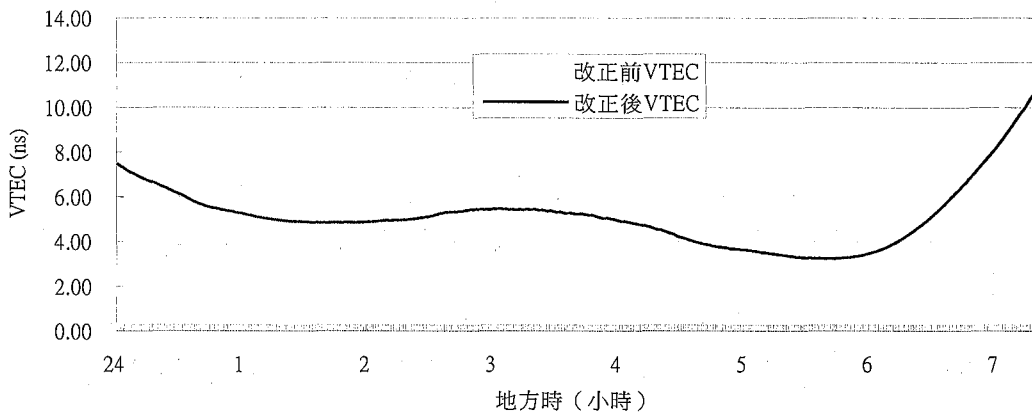


圖 5 CUA2 於 2002 年 3 月 3 日對 PRN 14 GPS 人造衛星施 \overline{SPR}^K 改正前後之 VTEC 時間系列比較圖

4.2.6 CUA1 與 CUA2 觀測相同 GPS 人造衛星的 VTEC 比較

如 4.1 節所述，CUA1 與 CUA2 兩觀測站間，相距約 77 公尺；而且，兩站在 2002 年的 GPS 資料涵蓋時間約相同。因此，如果用以改正各 TEC 觀測量系統誤差的改正值 \overline{SPR}^K 是正確的話，那麼每一曆元，CUA1 對某一顆 GPS 人造衛星（如 PRN 1）的 $VTEC_{CUA1}^1$ ，與 CUA2 對此共同人造衛星（如 PRN1）的 $VTEC_{CUA2}^1$ ，理論上應幾乎相等。

因此，爲了進一步驗證本文所提演算法的正確性，以 2002 年 3 月 3 日於 CUA1 與 CUA2 站所收集的 GPS 資料，分別計算 CUA1、CUA2 對各 GPS 人造衛星的斜向 TEC，並用表 9 的 $\overrightarrow{SPR}^K_{Cua1-2002}$ 與 $\overrightarrow{SPR}^K_{Cua2-2002}$ 改正其系統誤差，計算改正後的 $VTEC^K_{CUA1}$ 與 $VTEC^K_{CUA2}$ 。然後，對每一顆人造衛星，逐曆元的計算 $VTEC^K_{CUA1}$ 與 $VTEC^K_{CUA2}$ 的差值 $\Delta VTEC^K_{CUA2-CUA1}$ ；進而求 $\Delta VTEC^K_{CUA2-CUA1}$ 的平均值 (Mean)、中誤差 (σ)、最大值 (Max.)、與最小值 (Min.)，以上各值均以 ns 爲單位。表 11 所示者，爲經由上述程序處理後，有關的統計成果。

由表 11 可得到以下結論：(1) 各 GPS 人造衛星之 $\Delta VTEC^K_{CUA2-CUA1}$ 值的 Mean 約介於 0.12ns 到 0.50ns 之間 (平均值爲 0.34ns，中誤差爲 0.10ns)； σ 則約介於 0.03ns 到 0.22ns 之間 (平均值爲 0.09ns，中誤差爲 0.04ns)；Max. 則約介於 0.16ns 到 0.68ns 之間 (平均值爲 0.46ns，中誤差爲 0.13ns)；Min. 則約介於 -0.05ns 到 0.31ns 之間 (平均值爲 0.10ns，中誤差爲 0.08ns)。(2) 從以上實驗結果，顯示以本文所提演算法所估計的 GPS 接收機差分延遲改正 TEC 觀測量，平均約有 0.34ns 的誤差量。

表 11 2002 年 3 月 3 日， $VTEC^K_{CUA2}$ 減去 $VTEC^K_{CUA1}$ 的統計資料

PRN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	13	14	15
Mean	0.37	0.30	0.32	0.42	0.45	0.21	0.42	0.44	0.12	0.42	0.29	0.24	0.33
σ	0.06	0.07	0.08	0.07	0.11	0.16	0.10	0.07	0.03	0.08	0.07	0.06	0.08
Max.	0.49	0.40	0.43	0.50	0.62	0.45	0.57	0.54	0.16	0.53	0.41	0.32	0.49
Min.	0.21	0.16	0.16	0.07	0.31	0.03	0.24	0.07	0.03	0.08	0.07	0.12	0.08
PRN	17	18	21	22	23	24	25	26	27	29	30	31	
Mean	0.16	0.50	0.38	0.47	0.33	0.35	0.23	0.34	0.21	0.30	0.41	0.41	
σ	0.04	0.12	0.09	0.16	0.07	0.07	0.11	0.08	0.05	0.06	0.09	0.22	
Max.	0.21	0.67	0.51	0.68	0.43	0.45	0.33	0.47	0.29	0.38	0.54	0.64	
Min.	0.04	0.12	0.09	0.16	0.07	0.07	-0.05	0.08	0.05	0.06	0.09	0.00	

4.2.7 CRFP 測站對各人造衛星原始 SPR^K 與 \overrightarrow{SPR}^K 估值的比較

根據 Lin(1998)與林老生(2001)研究結果顯示，用單站法處理美國南加州 Permanent GPS Geodetic Array (PGGA)，CRFP 等 5 個測站，12 天的 GPS 資料，估計人造衛星與接收機差分延遲總和 (SPR) 的精度爲 0.43ns；PGGA 資料估計的標準化人造衛星差分延遲，與德國的 DLR 機構所估計之標準化人造衛星差分延遲相比較，其較差的中誤差爲 0.33ns。

爲了進一步了解本文所提演算法的精度，就以 PGGA 的 CRFP 站資料所估計的 SPR^K 值爲測



試對象。首先，假設 CRFP 對各人造衛星之 SPR^K 為真值。其次，用本文所提出的演算法，重新估計 CRFP 對各人造衛星之 SPR 估值 (\overrightarrow{SPR}^K)。最後，計算 SPR^K 與 \overrightarrow{SPR}^K 的較差 (Δ_{SPR}^K)。

表 12 所示者，為 CRFP 測站之人造衛星差分延遲估值 \overline{BS}^K 與標準化人造衛星差分延遲 \hat{t}_{gd}^K ， \overline{BS}^K 與 \hat{t}_{gd}^K 皆以 ns 為單位 (Lin, 1998)。JPL 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 ，則列於表 13。根據第 3.2 節所介紹方法，總共有 22 顆人造衛星，同時出現在 JPL 與 CRFP 資料中，因此，CRFP 與 JPL 的 Sat-Mean 分別為 -0.18ns 與 -3.88ns。比較表 12 的 \hat{t}_{gd}^K 與表 13 的 \hat{T}_{gd}^K 結果，其差值 Δ^K 的絕對值小於 1ns 的人造衛星共有 12 顆，如表 14 所示； Δ^K 的平均值與中誤差分別為 0.14ns、0.42ns。由此，估算 CRFP 測站的 GPS 接收機延遲的估值 \overline{BR} 為 11.86ns。

由 \overline{BR} 與 JPL 估算的人造衛星差分延遲 T_{gd}^K ，可估算 CRFP 站測各人造衛星之 SPR 估值 (\overrightarrow{SPR}^K)。表 15 所示者，為 CRFP 的各人造衛星之 SPR^K (Lin, 1998) 與 \overrightarrow{SPR}^K 值的較差 Δ_{SPR}^K 。所有 Δ_{SPR}^K 的平均值為 0.13ns，中誤差為 0.98ns，極大值為 1.56ns，極小值為 -1.55ns。

表 12 CRFP 測站之人造衛星差分延遲估值 \overline{BS}^K 與標準化人造衛星差分延遲 \hat{t}_{gd}^K

PRN	1	2	4	5	6	7	9	14	15	16	17
\overline{BS}^K	0.28	1.67	-1.19	-0.16	-1.43	1.71	-0.71	0.38	0.93	1.33	0.74
\hat{t}_{gd}^K	0.46	1.85	-1.01	0.02	-1.25	1.89	-0.53	0.56	1.11	1.51	0.92
PRN	18	19	21	22	23	24	25	26	27	29	31
\overline{BS}^K	-1.05	0.52	0.83	-1.57	0.61	1.68	-2.59	-2.09	-0.06	-2.81	-1.03
\hat{t}_{gd}^K	-0.87	0.70	1.01	-1.39	0.79	1.86	-2.41	-1.91	0.12	-2.63	-0.85

表 13 JPL 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

PRN	1	2	4	5	6	7	9	14	15	16	17
T_{gd}^K	-3.21	-1.60	-6.22	-4.17	-4.96	-1.71	-5.54	-2.61	-2.21	-0.61	-1.51
\hat{T}_{gd}^K	0.67	2.28	-2.34	-0.29	-1.08	2.17	-1.66	1.27	1.67	3.27	2.37
PRN	18	19	21	22	23	24	25	26	27	29	31
T_{gd}^K	-5.24	-3.21	-2.47	-3.85	-2.79	-0.73	-7.60	-6.83	-4.37	-7.71	-6.14
\hat{T}_{gd}^K	-1.36	0.67	1.41	0.03	1.09	3.15	-3.72	-2.95	-0.49	-3.83	-2.26

表 14 JPL 估算之 \hat{T}_{gd}^K 與 CRFP 測站資料估算之 \hat{t}_{gd}^K 之比較表

PRN	1	2	5	6	7	14	15	18	19	21	23	27
\hat{T}_{gd}^K	0.67	2.28	-0.29	-1.08	2.17	1.27	1.67	-1.36	0.67	1.41	1.09	-0.49
\hat{t}_{gd}^K	0.46	1.85	0.02	-1.25	1.89	0.56	1.11	-0.87	0.70	1.01	0.79	0.12
Δ^K	0.21	0.43	-0.31	0.17	0.28	0.71	0.56	-0.49	-0.03	0.40	0.30	-0.61

表 15 CRFP 測站觀測各人造衛星原始 SPR^K 與 \overleftarrow{SPR}^K 差異值之統計資料

PRN	1	2	4	5	6	7	9	14	15	16	17
SPR^K	8.59	9.97	7.12	8.04	6.87	10.01	7.60	8.69	9.24	9.70	9.04
\overleftarrow{SPR}^K	8.65	10.26	5.64	7.69	6.90	10.15	6.32	9.25	9.65	11.25	10.35
Δ_{SPR}^K	-0.06	-0.29	1.48	0.35	-0.03	-0.14	1.28	-0.56	-0.41	-1.55	-1.31
PRN	18	19	21	22	23	24	25	26	27	29	31
SPR^K	7.29	8.82	9.14	6.74	8.82	9.89	5.72	6.22	8.24	5.49	7.28
\overleftarrow{SPR}^K	6.62	8.65	9.39	8.01	9.07	11.13	4.26	5.03	7.49	4.15	5.72
Δ_{SPR}^K	0.67	0.17	-0.25	-1.27	-0.25	-1.24	1.46	1.19	0.75	1.34	1.56

5. 結論與建議

GPS 觀測量除了可以供測量定位之用，同時也可供遙測電離層 TEC，提供單頻 GPS 接收機消除電離層 TEC，或是供其它科學研究。然而，爲了求得無偏差之 TEC 估值，必須事先估算 GPS 接收機與人造衛星差分延遲，並加以改正之。針對台灣地區的 GPS 測站，本文提出一種演算法，可以估算各 GPS 接收機差分延遲，然後加上 JPL 估算的人造衛星差分延遲，用以之改正 GPS 推導之 TEC 估值。

本文所提出的演算法，概要的處理程序爲：(1) 用單站演算法，估計每一顆 GPS 人造衛星與接收機之差分延遲總和， SPR^K 。(2) 計算所有 SPR^K 的平均值 \overline{SPR} 。(3) 估計每一顆 GPS 人造衛星之差分延遲， \overline{BS}^K 。(4) 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 Δ^K 。(5) 估計接收機差分延遲 BR 。(6) 計算 BR 與 JPL 的人造衛星差分延遲 T_{gd}^K 的總和 SPR^K 。

根據初步實驗結果顯示：(I) 利用國立政治大學兩個 GPS 測站 (CUA1、CUA2) 在不同時期所收集的資料，以試驗本文所提出的方法：(1) 以 2000 年資料估計 CUA2 的 BR 為 6.21 ns，以 2002 年資料估計 CUA1 及 CUA2 的 BR 分別為 4.73 ns 與 5.67 ns。(2) 以本文所提演算法所估計的 BR 與 JPL 估算的 BS 之總和 (SPR^K)，改正 CUA2 測站於 2002 年 3 月 3 日收集的 GPS 資料所估算的 TEC，發現當天垂直 TEC(VTEC) 的最大與最小值，分別為 60.7 ns 與 2.7 ns。(3) CUA1 與 CUA2 平距約 77 公尺，取 2002 年 3 月 3 日收集的 GPS 資料，以各測站資料估計之 SPR^K ，分別改正兩測站資料估算的 TEC，然後，針對每一顆衛星、每一曆元，分析比較此兩測站對同一顆衛星的 VTEC 較差 $\Delta VTEC_{CUA2-CUA1}^K$ ，發現所有 $\Delta VTEC_{CUA2-CUA1}^K$ 的平均值為 0.34 ns，中誤差為 0.10 ns。(II) 以 PGGA 的 CRFP 站資料所估計的 SPR^K 值為測試對象。首先，假設 CRFP 的各人造衛星之 SPR^K 為真值。其次，用本文所提出的演算法，估計各人造衛星之 SPR 估值 (\overrightarrow{SPR}^K)。最後，計算 SPR^K 與 \overrightarrow{SPR}^K 的較差 (Δ_{SPR}^K)。實驗結果顯示，所有 Δ_{SPR}^K 的平均值為 0.13ns，中誤差為 0.98ns。

以上為利用本文所提之演算法，處理台灣地區測站的初步實驗結果，未來展望與建議：(1) 持續處理台灣地區的 GPS 資料，驗證本演算法的效能並改良之。(2) 將改正後的 GPS 推導的 TEC 估值，與其它 TEC 觀測值 (如由 Ionosonde 觀測值) 或估值 (如由國際參考電離層模型，IRI，估計 TEC) 比較，驗證本演算法的效能並改良之。(3) 利用區域 GPS 網站資料，建構即時的區域電離層模型，提供單頻 GPS 接收機使用，以消除電離層延遲。

誌謝

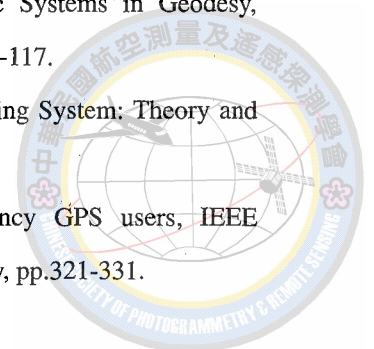
本研究由國科會專題計畫 NSC 90-2211-E-004-001 支持完成。並特別感謝兩位匿名委員的寶貴審查意見，使得本文得以改進。

參考文獻

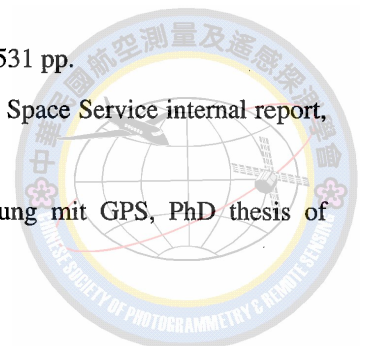
- 林老生(1998)，提高 GPS 即時估計電離層延遲精度之研究，測量工程，第四十卷，第一期，中國測量工程學會，第 25-46 頁。
- 林老生(2001)，以 GPS 觀測量估計 GPS 人造衛星與接收機 L1/L2 差分延遲之研究，測量工程，第四十三卷，第四期，中國測量工程學會，第 5-28 頁。



- Biel H.A. (1990), The geomagnetic time and position of a terrestrial station, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, Vol. 52, No. 9, pp.687-694.
- 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.
- 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.
- Bishop G., Walsh D., Daly P., Mazzella A. & Holland E. (1994), Analysis of the temporal stability of GPS and GLONASS delay correction terms seen in various sets ionospheric delay data, *Proceedings of ION GPS-94, Seventh International Technical Meeting of The Satellite Division of The Institute of Navigation*, September 20-23, Salt Lake City, Utah, pp.1653-1661.
- Chao Y., Tsai Y., Walter T., Kee C., Enge P. & Parkinson B. (1995), An algorithm for inter-frequency bias calibration and application to WAAS ionosphere modeling, *Proceedings of ION GPS-95, Eighth International Technical Meeting of The Satellite Division of The Institute of Navigation*, September 12 - 15, Palm Springs, California, pp.639-646.
- Coco D. (1991), GPS - Satellites of opportunity for ionospheric monitoring. *GPS World*, October, pp.47-50.
- Coco D.S., Coker C., Dahlke S.R. & Clynch J.R. (1991), Variability of GPS satellite differential group delay biases, *IEEE Transaction on Aerospace and Electrical Systems*, Vol. 27, No. 6, pp.931-938.
- 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.
- Gáo Y., Heroux P. & Kouba J. (1994), Estimation of GPS receiver and satellite L1/L2 signal delay biases using data from CACS. *Proceedings of the Int. Symp. on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation*, Banff, Canada, August 30- September 2, pp.109-117.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. & Collins, J. (1994), *Global Positioning System: Theory and Practice*, Third Edition, Springer-Verlag Wien, New York, 355pp.
- Klobuchar J.A. (1987), Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users, *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. AES-23, No.3, May, pp.321-331.



- Klobuchar J.A. (1996), Ionospheric effects on GPS. In *Global Positioning System: Theory and Applications* (Edited by Parkinson & Spilker), Vol. 1, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., pp.485-515.
- 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.
- Komjathy A. & Langley R.B. (1996), The effect of shell height on high precision ionospheric modeling using GPS, Presented at the IGS Analysis Center Workshop, Silver Springs, MD, March 19-21, pp.193-203
- Lanyi G.E. & Roth T. (1988), A comparison of mapped and measured total ionospheric electron content using Global Positioning System and beacon satellite observations, *Radio Science*, Vol. 23, No. 4, pp.483-492.
- 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.
- Lin L.S. (2001), Remote sensing of ionosphere using GPS measurements, *Proceedings of ACRS 2001, Volume 1, November 5-9, Singapore*, pp. 69-74.
- Mannucci A.J., Wilson B.D. & Edwards C.D. (1993), A new method for monitoring the earth ionospheric total electron content using the GPS global network, *Proceedings of ION GPS-93, Sixth International Technical Meeting of The Satellite Division of The Institute of Navigation, September 22-24, Salt Lake City, Utah*, pp.1323-1332.
- Oma (2002), <http://www.spnvis.oma.be/help/background/coortran/coordtran.html>, accessed in 2002.
- Oulu (2002), <http://www oulu.fi/~spaceweb/textbook/coordsys.html>, accessed in 2002.
- Sardon E., Rius A. & Zarraoa N. (1994), Estimation of the transmitter and receiver differential biases and the ionospheric total electron current from Global Positioning System observations, *Radio Science*, Vol. 29, No. 3, pp.577-586.
- Seeber, G. (1993), *Satellite Geodesy*, Walter de Gruyter, Berlin, New York, 531 pp.
- Wang Y.J. (1995), Monitoring ionospheric TEC using GPS, IPS Radio and Space Service internal report, Department of Administrative Services, Sydney, Australia, 33pp.
- Wanninger, L. (1994), Der Einfluss der Ionosphäre auf die Positionierung mit GPS, PhD thesis of University of Hannover, Germany, Nr. 201, 137pp.



Wilson B.D. & Mannucci A.J. (1993), Instrumental biases in ionospheric measurements derived from GPS data, Proceedings of ION GPS-93, Sixth International Technical Meeting of The Satellite Division of The Institute of Navigation, September 22-24, Salt Lake City, Utah, pp.1343-1351.

Wilson B. & Mannucci A. (1994), Extracting ionospheric measurements from GPS in the presence of Anti-Spoofing, Proceedings of ION GPS-94, Seventh International Technical Meeting of The Satellite Division of The Institute of Navigation, September 20-23, Salt Lake City, Utah, pp.1599-1608.

Yinger C., Fees W., Esposti R., Chasko A., Cosentino B., Syse D., Wilson B. & Wheaton B. (1999), GPS satellite interfrequency biases, Proceedings of ION 55th Annual Meeting, June 28-30, Cambridge, MA, pp. 347-354.



Study on GPS Receiver L1/L2 Differential Delay Estimation

Lao-Sheng Lin¹

ABSTRACT

One of the challenging problems in making absolute ionospheric delay measurements using the dual-frequency observations to the GPS satellites is to estimate satellite L1/L2 differential delay (BS) and receiver L1/L2 differential delay (BR). In this paper an algorithm is proposed which can estimate the receiver L1/L2 differential delay (BR) of any static GPS site. Then, the accumulated values of the estimated BR and the satellite L1/L2 differential delays (BSs) estimated by JPL, SPRs, are used to correct those GPS derived TEC estimates. The estimation method and preliminary test results are described here.

GPS Data from sites CUA1 and CUA2, National Chengchi University, Taipei, Taiwan were used to test the proposed algorithm. The test results indicate that: (1) The estimated receiver L1/L2 differential delays of CUA1 and CUA2 are 4.73 ns and 5.67 ns respectively using year 2002 data. (2) The maximum and minimum VTEC values observed at site CUA2 on 2002/03/03 are 60.7 ns and 2.7 ns respectively, after applying estimated SPR corrections. (3) The mean value and standard deviation of the VTEC differences to those common GPS satellites from sites CUA1 and CUA2, on 2002/03/03, are 0.34 ns and 0.10 ns respectively. (4) The mean value and standard deviation of the differences between the observed SPR and the estimated SPR using the proposed algorithm of site CRFP, PGGA, are 0.13 ns and 0.98 ns respectively.

Key Words: Global Positioning System (GPS), Ionosphere, Total Electron Content (TEC), Receiver L1/L2 Differential Delay

¹Assistant Professor, Department of Land Economics
National Chengchi University

