航測及遙測學刊　第十九卷　第4期　第267-278頁　民國104年02月
Journal of Photogrammetry and Remote Sensing
Volume19, No4, February 2014, pp. 267-278

台灣福衛三號及七號掩星觀測大氣參數自主程式發展

黃成勇[1*]　陳坤林[2]　楊善國[3]

摘　要

從美國 1995 年美國發射第一顆掩星衛星 MicroLab-1 掩星衛星觀測地球大氣以來，已經歷經了 17 個年頭，台灣自 2006 年發射由六顆衛星組成的福爾摩沙衛星三號，至今也已經邁入第八個年頭，在電離層觀測和大氣觀測及天氣預報上，都有顯著的成果。可惜目前掩星觀測資料處理，仍仰賴美國 UCAR 的軟體，本研究在國研院國家太空中心的支持下，致力於發展台灣本土的掩星資料自主軟體，期待在福衛七號衛星發射前，可研發撰寫出符合及時及作業化的台灣掩星資料自主程式。本論文章將介紹自主軟體中大氣資料反演部分的發展現況。

大氣掩星剖面反演，包含溢相位(Excess Phase)反演，大氣乾、濕溫度剖面反演。在溢相位反演方面，利用低軌道衛星一次差分，將 GPS 衛星軌道和福衛三號軌道資訊以及三號衛星酬載 GOX(GPS Occultation Experiment)所收到的 50Hz 觀測資料，產出掩星溢相位。主要輸入資料為 POD(Precise Orbit Determination)兩個天線所收到的 50Hz 參考資料和 OCC(OCCultation)兩個天線所收到的掩星觀測資料。在乾溫度剖面上，目前使用項位匹配法(phase matching)，計算偏折角，改進傳統電離層校正方式，忽略大氣水氣的影響，反演出大氣乾溫度剖面、折射率和壓力剖面。濕氣壓剖面反演須利用地面輔助觀測資料或大氣模式進行一為變分(one-D VAR)最佳化處理。目前前兩部分已經完成符合及時及作業化的雛型軟體，第三部分完成一維變分的主要模組，正積極改寫成作業化程式。

關鍵詞：福衛三號、掩星觀測、全球定位系統

1. 背景

掩星法為五十多年前天文學家用來觀測太陽系地球以外行星大氣層結構的方法(Phinney and Anderson, 1968)，近年來則被使用來觀測地球大氣層及電離層結構。1995 年，美國發射一顆低軌道衛星(MicroLab-1)，其軌道高度為 750 公里，傾斜角為 70 度，繞行地球一週約 100 分鐘。低軌道衛星接收來自太空中29顆全球定位衛星(GPS)訊號，每天約可接收 500 筆的掩星資料，因其取樣時間頻繁，且不受陸地或海洋的限制，可對全球做廣泛的觀測，因此對全球大氣溫度的監測及變遷能夠提供相當多的資訊(Ware *et al*. 1996)。在 MicroLab-1 衛星之後，與掩星觀測相關的任務還有德國的 CHAMP (CHAllenging Minisatellite Payload) (Wickert *et al*., 2001)，2000 年發射的 SAC-C 以及 2001 年發射的 2 顆 GRACE(Gravity Recovery and Climate Experiment)衛星(Yunck *et al*, 2000)。台灣於 2006 年發射六顆低軌道衛星組成全球第一個星系，觀測大氣參數和電離層(http://www.nspo.org.tw)，計畫名稱為『福爾摩沙衛星三號計畫』。福衛三號計畫已被證實為觀測電離層和全球大氣層的觀測利器。台灣接著將在 2016 和 2018 年各發射 6 顆低軌道衛星，組成為衛

[1] 國立中央大學全球定位科學與應用研究中心 助理研究員
[2,3] 國家實驗研究院國家太空中心 助理研究員

收到日期:民國 102 年 08 月 02 日
修改日期:民國 102 年 12 月 30 日
接受日期:民國 103 年 01 月 09 日

*通訊作者, 電話: 03-4227151 ext. 25518, E-mail: yusn2845@gmail.com

星星系，以設計更優良的天線觀測大氣結構，預料將提供全球水氣分布更好更多的資訊。

目前全世界擁有自主反演軟體的單位大致由美國 UCAR(University Corporation for Atmospheric Research)，德國 EUMETSAT (European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites)和 GFZ(GFZ German Research Centre for Geosciences)等三個單位，台灣目前正積極發展自己的自主程式，期待在 2016 福七衛星發射前，擁有掩星觀測自主反演的能力。

2. 資料處理流程及方法

圖 1 為掩星大氣剖面資料處理流程，大氣部分主要分成三個部分。第一部分為圖上紅色橢圓所示，需入資料為全球定位系統和福衛三號衛星軌道資料，以及由福衛三號衛星掩星觀測天線和軌道定位收到的全球定位系統訊號，衛星時鐘誤差和衛星姿態等資訊，透過一次差分或二次差分反演溢相位(Excess Phase)。第二部分為藍色橢圓所示，溢相位經由阿貝爾轉換(Abel-inversion)反演全球定位系統訊號路徑偏折角、大氣折射率、壓力和乾溫度剖面。第三部分為綠色橢圓所示，由大氣乾溫度剖面結合地面輔助大氣觀測資料或大氣模式，經行一維變分處理反演出濕溫度剖面和濕氣壓剖面。目前所需輔助資料除全球定位航行資訊(GPSbit)資料仍需仰賴 UCAR 提供外，其他輔助資料皆可由中央大學全球定位中心產出(軌道)或由免費網頁(NCEP: National Centers for Environmental Prediction)下載。

2. 1 溢相位反演

圖 2 為大氣部分計算溢相位資料流程圖，左方方塊為需要的輸入資料，opnGps 為掩星觀測到的 GPS 訊號，igsOrb 和 leoOrb 分別為 GPS 和 FS3 的軌道資料，CLK 為時鐘誤差資訊。目前 GPS 和 FS3 的軌道和時鐘誤差可由 GPSARC 的曾子榜博士計畫產出。溢相位計算方式可以利用一次差分或二次差分方式計算求出，其原理式(1)~式(3)。

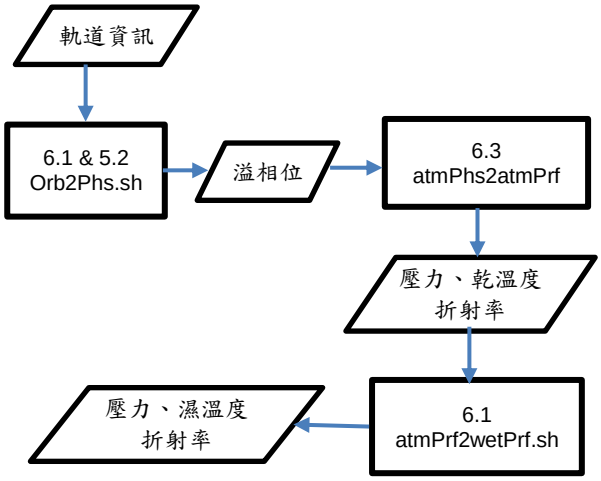

圖 1 大氣掩星資料處理流程圖

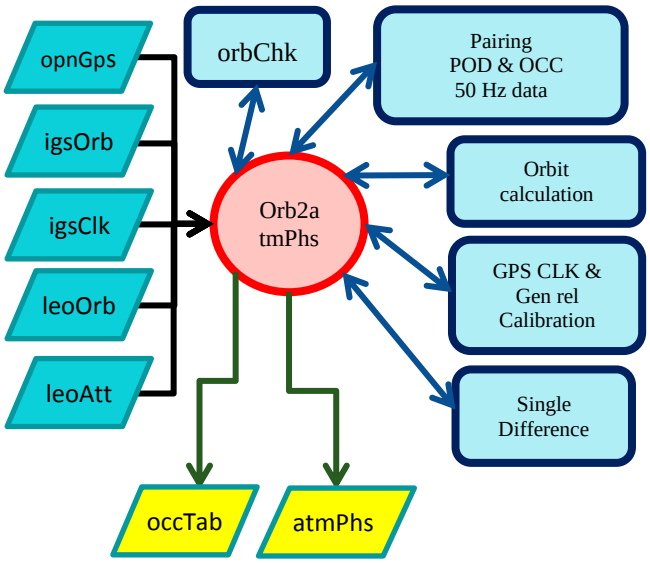

圖 2 超額相位計算處理流程圖

福衛三號四個 GPS 天線所量測到的訊號主要為 1Hz 的 CA 的虛擬距離(version 1)、50H 的雙頻 L1 和 L2 的載波相位。虛擬距離用方程式表示如下：

$$\mathrm{Pr}_{k,1}^{p}(t)=\rho_k^p(t)-cdt_k+cdt^p+I_{k,1,P}^{p}(t)+T_k^p(t)+d_{k,1,p}(t)+d_{1,p}^{p}(t)+\varepsilon_{1,p} \quad (1)$$

$$\mathrm{Pr}_{k,2}^{p}(t)=\rho_k^p(t)-cdt_k+cdt^p+\frac{f_1^2}{f_2^2}I_{k,2,P}^{p}(t)+T_k^p(t)+d_{k,2,p}(t)+d_{2,p}^{p}(t)+\varepsilon_{2,p}$$

雙頻相位為

$$\Phi_{k,1}^{p}(t)=\rho_k^p(t)-cdt_k+cdt^p+\frac{c}{f_1}N_{k,1}^{p}(1)-I_{k,1,P}^{p}(t)+T_k^p(t)+d_{k,1,\Phi}(t)+d_{1,\Phi}^{p}(t)+\varepsilon_{1,\Phi} \quad (2)$$

$$\Phi_{k,,2}^{p}(t)=\rho_{k}^{p}(t)-cdt_{k}+cdt^{p}+\frac{c}{f_{2}}N_{k,2}^{p}(1)-\frac{f_{1}^{2}}{f_{2}^{2}}I_{k,1,P}^{p}(t)+T_{k}^{p}(t)+d_{k,2,\Phi}(t)+d_{2,\Phi}^{p}(t)+\varepsilon_{2,\Phi} \quad (3)$$

上式中，c 為光速，數字 1 和 2 分別表示載波 L1 和 L2，ρ為 GPS 衛星 p 和 GPS 訊號接收器 k 的直線距離，dt^p 和 dt^q 分別代表 GPS 衛星(p)和接收器(q)的時鐘誤差，I 為電離層延遲，T 為大氣延遲，$d_{p,1}$、$d_{\Phi,1}$ 和 $d_{\Phi,2}$ 分別代表 GPS 接收器硬體電碼延遲和雙頻的相位延遲，$d^{p,1}$、$d^{\Phi,1}$ 和 $d^{\Phi,2}$ 為 GPS 衛星的電碼延遲和雙頻的相位延遲。

如圖 3 所示，掩星溢相位解算作業中主要有兩種方式，分別為一次差分和二次差分方式。一次差分為兩顆衛星和一顆低軌道衛星，如圖上黑色實線和紅色虛線進行差分，得到紅色虛線的溢相位。二次差分為利用二顆 GPS 衛星，一個低軌道衛星和一個地面 GPS 接收站訊號進行差分，即利用圖上兩條綠色虛線進行差分後在與低軌道衛星訊號一次差分後的結果進行差分，下列式(4)~式(7)分別用方程式表示一次差分。

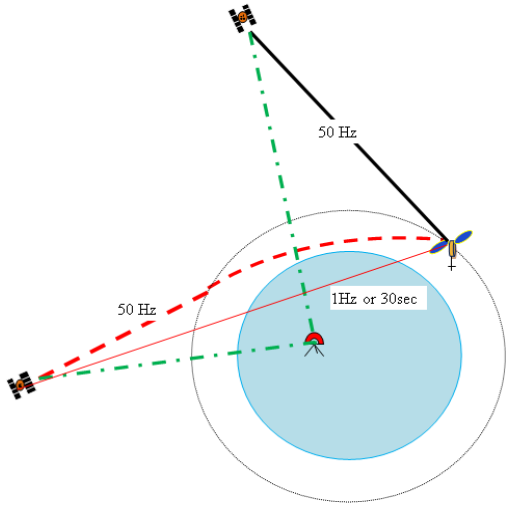

圖 3 GPS 訊號處理，一次差分和二次差分示意圖

$$\Phi_{Leo,1}^{pq}(t)=\rho_{Leo}^{pq}(t)+cdt^{pq}+\frac{c}{f_{1}}N_{Leo,1}^{pq}(1)+T_{Leo}^{pq}(t)-I_{Leo,1,P}^{pq}(t)+d_{Leo,1,\Phi}^{pq}(t)+\varepsilon_{1,\Phi} \quad (4)$$

$$\Phi_{Leo,2}^{pq}(t)=\rho_{Leo}^{pq}(t)+cdt^{pq}+\frac{c}{f_{2}}N_{Leo,2}^{pq}(1)+T_{Leo}^{pq}(t)-\frac{f_{1}^{2}}{f_{2}^{2}}I_{Leo,2,P}^{pq}(t)+d_{Leo,2,\Phi}^{pq}(t)+\varepsilon_{2,\Phi} \quad (5)$$

和二次差分：

$$\Phi_{Leo,Gnd,1}^{pq}(t)=\rho_{Leo,Gnd}^{pq}(t)+\frac{c}{f_{1}}N_{Leo,Gnd,1}^{pq}(1)-I_{Leo,Gnd,1,P}^{pq}(t)+T_{Leo}^{pq}(t)-T_{G}^{pq}(t)+\varepsilon_{1,\Phi} \quad (6)$$

$$\Phi_{Leo,Gnd,2}^{pq}(t)=\rho_{Leo,Gnd}^{pq}(t)+\frac{c}{f_{2}}N_{Leo,Gnd,2}^{pq}(1)-\frac{f_{1}^{2}}{f_{2}^{2}}I_{Leo,Gnd,2,P}^{pq}(t)+T_{Leo}^{pq}(t)-T_{G}^{pq}(t)+\varepsilon_{2,\Phi} \quad (7)$$

在以一次差分時，以低軌道衛星為基準，作為差分時的參考訊號衛星訊號的大氣延遲可被忽略。比較二次差分和一次差分，一次差分不受地面大氣延遲效應的影響，但是仍有 GPS 軌道誤差、GPS 時鐘誤差和GPS硬體延遲，另外還有廣義相對論影響。因此一次差分所需要的軌道經度需求比二次差分需求高。位了建立除科學核心程式能獨立發展外，台灣氣象局掩星資料處理中心也正積極建立資料源獨力取得的能力，本文直接採用 International GNSS Service 的 GPS 精密軌道和 GPS 時鐘誤差，校正 GPS 訊號一次差分的結果。

廣義相對論會影響 GPS 的時鐘誤差，其形成原因為衛星經過不同重力位能場時，重力加速度造成。由狹義相對論產生的時鐘誤差，已經經由 GPS 衛星直接校正，所以本文無須校正，另外低軌道衛星所受到的影響，也會經由一次差分消除，所以無需校正。重力對 GPS 造成的時鐘誤差為:

$$\Delta t_{R}(t)=-\frac{2}{c^{2}}\sqrt{a\mu e}\sin E=-\frac{2}{c^{2}}\mathbf{X}\cdot\dot{\mathbf{X}} \quad (8)$$

$\mathbf{X}$ 和 $\dot{\mathbf{X}}$ 分別代表衛星在 ECI 座標下的位置和速度向量，其第二階重利差修正項為

$$\delta\rho_{r,rel}^{s}=\frac{2GM_{E}}{c^{2}}\ln\left(\frac{r^{s}+r_{r}+\rho_{r}^{s}}{r^{s}+r_{r}-\rho_{r}^{s}}\right) \quad (9)$$

G 為重力場常數，M_E 為地球重量，r^s 和 r_r 分別為衛星和接收器的地心半徑長。

2. 2 乾溫度剖面反演

此部分資料處理輸入資料包含溢相位(atmPhs)，GPS navigation message (GPSBit)，大氣參考背景模式 (NCEP or CIRA(COSPAR

international reference atmosphere))，輸出資料為乾溫度剖線參數(atmPrf)，參數包含偏折角、折射係數、壓力以及溫度剖線。參考訊號的模擬(Reference_RO)，程式主要功能包含 10 公里以下開環技術(OPEN LOOP)接收訊號校正(Fix-GPSbit)，週波脫落偵測與修復(Draft_Ambiguity)，訊號溢相位和偏折角模擬，項位匹配法計算偏折角(Impact Phase matching)、電離層影響誤差校正(LC_ion_Calibration)、偏折角最佳化(Optimize Bending Angle)、大氣參數(折射率、乾溫度、壓力)計算等(Get_atmPrf)，各項模組詳細如下說明。

開環技術(OPEN LOOP)為針對 10 公里以下，掩星訊號振幅相當弱時的接收技術。主要為模擬 GPS 和低軌道衛星之間的都普勒量質模擬虛擬訊號，用已鎖定 GPS 訊號。因為開環技術未使用回饋訊號，因此訊號尚未對 GPS 訊號的航行訊號(GPSbit)做解鎖，所以需要透過後處理方式，進行航行訊號校正。

在此部分的過程中，偏折角的計算及正確度為最重要的關鍵。目前偏折角的計算大致分為幾何光學和波動光學兩大類，波動光學包含後向傳播(back-propagation)反演法(Gorbunov *et al.* 1996; Karayel and Hinson 1997; Gorbunov and Gurvich 1998b)、全像術(holographic method)(Igarashi *et al.* 2000; Pavelyev *et al.* 2002)反演法、振幅(amplitude)反演法(Sokolovskiy 2000; Liou *et al.* 2002; Pavelyev *et al.* 2003)、全波譜反演法(Full Spectrum Inversion)(Jensen *et al.*, 2003)和正則轉換法(Canonical transform)(Gorbunov, 2002) and optics phase matching (Jensen *et al.* 2004)。幾何光學和波動光學最大的差異在於幾何光學僅使用相位觀測資料，波動光學則同時使用訊號震幅和相位資料。

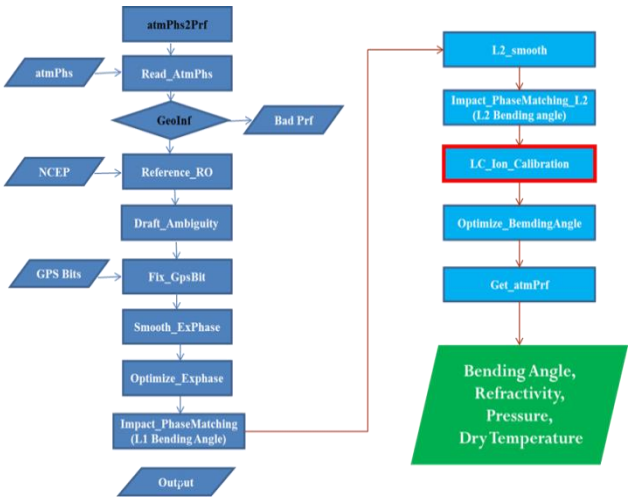

圖 4 乾溫度剖面反演資料處理流程圖

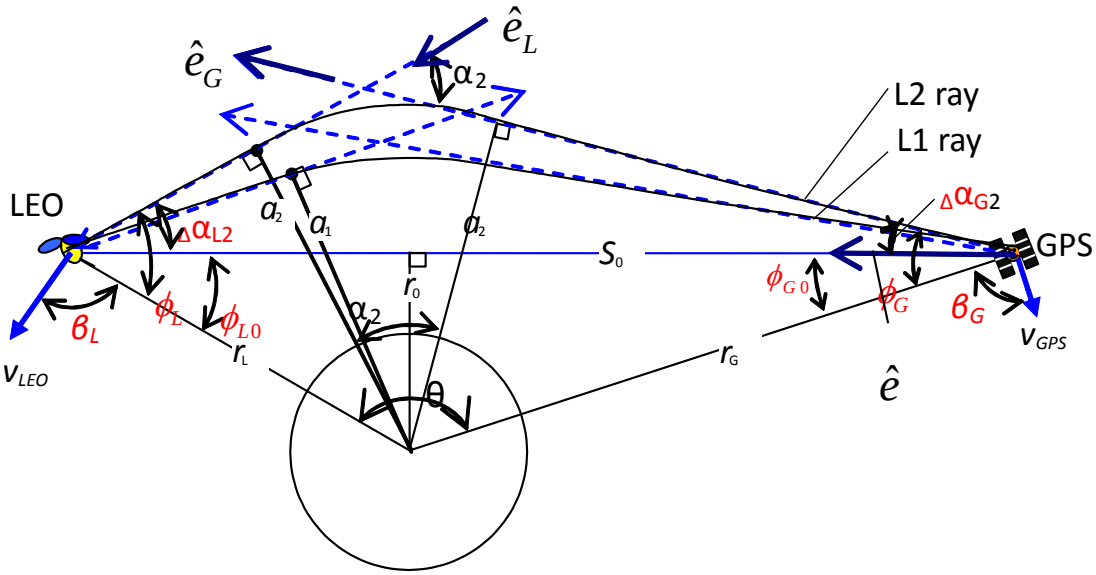

圖 5 掩星反演幾何示意。L1 和 L2 為訊號真實路徑，當訊號穿過大氣層因介質折射率梯度而產生訊號路徑偏折，產生都卜勒平移量變化

幾何光學如圖五所示，α_2 為訊號 L2 的偏折角，為 GPS 訊號發射的單位向量 $\hat{e}_G$ 和 LEO 接收訊號的單位向量 $\hat{e}_L$ 的夾角，也就是訊號傳送出去後方向的角度改變量。以方程式的形式可寫成

$$\alpha(a) = \cos^{-1}(\hat{e}\cdot\hat{e}_G) + \cos^{-1}(\hat{e}\cdot\hat{e}_L) = (\phi_G, \phi_{G0}) + (\phi_L, \phi_{L0}) \quad (10)$$

式中ϕ_G為 GPS 衛星半徑和訊號傳送出去方向之間的夾角$\cos^{-1}(-\hat{r}_G\cdot\hat{e}_G)$，$\phi_L$為 LEO 衛星半徑和訊號接收方向之間的夾角$\cos^{-1}(\hat{r}_G\cdot\hat{e}_L)$，$\phi_{G0}$為 GPS 半徑和向量$\hat{e}$的夾角$\cos^{-1}(-\hat{r}_G\cdot\hat{e})$，$\phi_{L0}$為 GPS 半徑和向量$\hat{e}$的夾角$\cos^{-1}(\hat{r}_L\cdot\hat{e})$，若將偏折角以切入參數的形式表示，由式(10)可得

$$\alpha_{i=1,2}(a) = \sin^{-1}\left(\frac{a_i}{r_G}\right) - \sin^{-1}\left(\frac{r_0}{r_G}\right) + \sin^{-1}\left(\frac{a_i}{r_L}\right) - \sin^{-1}\left(\frac{r_0}{r_L}\right) \quad (11)$$

式中 r_0 為地心到 S_0 線最近距離，i=1,2 代表 GPS 的 L1 和 L2 訊號。

都卜勒平移量式若以圖五上各向量交角形式表示可改寫成

$$\frac{d\phi_{i=1,2}}{dt} = \left[v_G\cos(\beta_G+\phi_G) + v_L\cos(\beta_L+\phi_L)\right] - \left[v_{G0}\cos(\beta_G+\phi_{G0}) + v_L\cos(\beta_L+\phi_{L0})\right] \quad (12)$$

若假設折射率僅有徑向梯度變化，切入參數在同一條訊號路徑上為定值，因此

$$n_{G(i=1,2)} r_G \sin i_{G(i=1,2)} = n_{L(i=1,2)} r_L \sin i_{L(i=1,2)} = a_{i=1,2} \quad (13)$$

在一般情況下 GPS 和低軌道衛星的折射率(n_G, n_L)非常接近於 1，可被忽略。結合方程式(12)和(13)，都卜勒平移量可由觀測資料求出，(ϕ_G, ϕ_L)和切入參數為未知數，其他參數皆可經由 GPS 和 LEO 的位置和速度求得，將此二式做線性疊代即可求出二角(ϕ_G, ϕ_L)，再由式(13)算出切入參數和由式(11)求出偏折角。

此時算出來的偏折角還包含著電離層的影響，必須先經由 Vorob'es and Krasil'nikova (1994)提出的偏折角修正方程式消除大部分的電離層所造成的偏折角

$$\alpha(a) = \frac{f_1^2\alpha_1(a) - f_2^2\alpha_2(a)}{f_1^2 - f_2^2} \quad (14)$$

校正後的偏折角，再經由 Abel Transform 計算大氣折射率 n。

$$n(r_p) = exp\left[\frac{1}{\pi}\int_{r_p}^{\infty}\frac{\alpha(a)}{\sqrt{a^2-a_p^2}}da\right] \quad (15)$$

字母 p 代表訊號路徑與地表最近的點。折射率的大小與介質的特性息息相關，當波的頻率小於 20GHz (Feng and Benjamin, 1999)的時候，大氣層的折射度可用氣體溫度 T(degrees Kelvin)，乾空氣壓力 P_d (mb)，以及濕氣壓 e(mb)表示如下(Thayer 1974)：

$$N = k_1\frac{P_d}{T} + k_2\frac{e}{T} + k_3\frac{e}{T^2} \quad (16)$$

k_1=77.604 K/mb、k_2=64.79 K/mb、k_3=3.776×10^5 K^2/mb，大氣折射度與折射率有下列的關係

$$N = (n-1)\times 10^6 \quad (17)$$

式(16)中有三個項次，對掩星反演大氣參數將變的過於複雜，因此掩星反演所使用的大氣折射度為 (Smith and Weintraub, 1953)

$$N = 77.6\frac{P}{T} + 3.73\times 10^5\frac{e}{T^2} \quad (18)$$

式中，P(mb)為大氣總壓，e(mb)為濕氣壓。在反演大氣參數時，我們通常忽略濕氣壓的影響，另外依理想大氣條件 $P=\rho RT/M$，我們可將式(18)改寫成下式

$$N = 77.6\frac{P}{T} = 77.6\frac{\rho R}{M} \quad (19)$$

其中，ρ為氣體的密度，M 為莫耳分子重， R 為氣體常數。由式(19)再結合靜流力方程 $dP=-g\rho dz$，可得到氣壓剖面為

$$P(z_i) = \frac{M}{77.6R}\int_{z_i}^{Top} -g(z')N(z')dz' + P(Top) \quad (20)$$

而乾溫度剖面為

$$T(z_i) = 77.6\frac{P(z_i)}{N(z_i)} \tag{21}$$

上式中，求出的溫度之所以被稱為乾溫度是因為在反演大氣壓力和溫度剖面時，忽略了濕氣壓，所以在靠近地表水氣含量較大的區域，反演的大氣參數將會有較大的誤差。在一般乾空氣狀態下，式(20)的莫耳分子重為 28.8 克，水氣莫耳分子重為 18.0 克，因此在有水氣存在時，因為忽略了水氣存在，所以反演後的氣壓剖面會有高估的情形。方程式(20)中的大氣折射度，因為忽略水氣影響，等於將乾大氣折射度和濕大氣都當成了乾大氣折射度折射度(虛擬乾大氣折射度)。比較方程式(16)的濕折射度係數與乾折射度的比為 $3.73\times10^5/77.6$，式(20)的莫耳分子重，在水氣達到飽和時，變化量也不至於超過 5%的情形下，虛擬大氣折射度將比溫度高估的情形還嚴重，所以經由此方程式反演的溫度將低於真正的溫度剖面。

2.3 計算濕溫度參數(濕溫度，濕氣壓)：

圖 6 為溼氣壓氣溫參數剖面反演流程，需入資料為乾溫度剖面和大氣背景場。在掩星觀測反演大氣參數時，由訊號偏折角可反演出大氣折射率(N)，折射率與大氣參數壓力(P)、溫度(T)及濕度(e)的關係如式(22)。

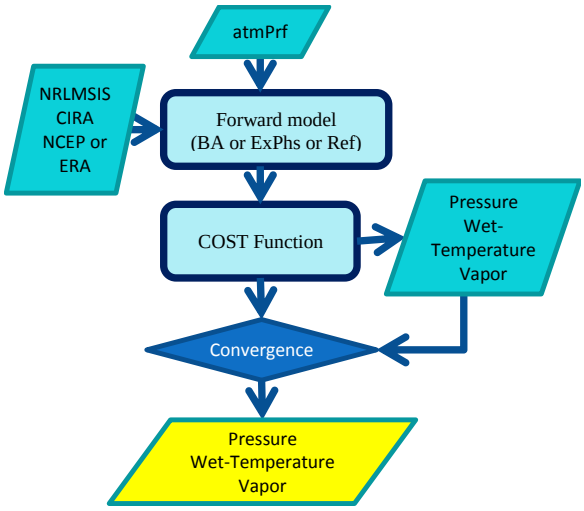

圖 6 濕溫度參數剖線反演資料處理流程

$$N = 77.6\frac{P}{T} + 3.73\times10^5\frac{e}{T^2} \tag{22}$$

再加上大氣靜流力方程式 $dP=-\rho g dz$，共兩個條件式，仍不足以求出方程式的三個未知變數。掩星反演求解乾溫度度參數時，為忽略溼氣壓的影響。價值函數（cost function）J 表示為

$$J(\mathbf{x}) = \frac{1}{2}(\mathbf{x}-\mathbf{x}_b)^{\mathrm{T}}\mathbf{B}^{-1}(\mathbf{x}-\mathbf{x}_b) + \frac{1}{2}(H(\mathbf{x})-\mathbf{y}_o)^{\mathrm{T}}\mathbf{R}^{-1}(H(\mathbf{x})-\mathbf{y}_o) \tag{23}$$

其中 $\mathbf{x}$ 是一維的分析變數向量(被探求的量，例如由大氣壓、水氣偏壓及大氣溫度變數串接成一維的變數向量）$\mathbf{x}_b$ 是一維的背景變數向（猜值，例如 first guess，本計畫預計採用 avnPrf，若能獲得 ECMWF 則使用 ECMWF），$\mathbf{y}_o$ 是一維的觀測變數向量（實際觀測量，例如折射率）$\mathbf{B}$ 是背景誤差矩陣（對角矩陣）$\mathbf{R}$ 是觀測誤差矩陣（對角矩陣）H 是非線性的正演（forward）觀測運算子，可表示為：

$$\mathbf{y}=H(\mathbf{x}) \tag{24}$$

其中 $\mathbf{y}$ 稱為模式化的觀測量(modeled observation)，H 運算子即是將變數 $\mathbf{x}$ 由模式態（model state）對應到觀測空間的 $\mathbf{y}$。B 和 R 均假設為高斯分布，且互相獨立。

3. 成果介紹

3.1 溢相位成果

在進行溢相位計算時，OCC 天線所收到的訊號，為穿過低層大氣的掩星訊號，POD 天線所收到的訊號除了用在福衛三號軌道定位之外，50Hz 的訊號則用來作為一次差分計算溢相位，消除低軌道衛星時鐘誤差的影響。首先要進行低軌道衛星確認，確定獲得低軌道衛星軌道的窗區，並進行衛星品質確認，如進行一般 GPS 訊號周波脫落偵測等步驟。之後，將 POD 和 OCC 所量測的 50Hz 資料進行配對，並確認可獲得低軌道軌道，可以進行一次差分的掩星事件，輸出掩星觀測事件表。圖 6 和圖 7 示 POD(黑色藍色線)天線和 OCC(紅色和綠

色)天線觀測到的 GPS 訊號時間表。將 OCC 天線的時間軸與 POD 天線同一間做匹配，即得掩星觀測一次差分表。讀取 GPS 衛星時鐘誤差，進行衛星時鐘誤差校正。計算衛星速度，衛星軌道半徑，廣義相對論影響校正。一次差分，獲得溢相位，訊號周波脫落偵測修復。

圖 8 為中心目前發展的軟體所反演出來的溢相位(上兩圖)和都普勒平移量(下兩圖)，與 UCAR(黑色實線)的成果相當一致。藍線和紅線分別為利用前後兩顆 POD 天線所收到的參考訊號做 GPS 一次差分後的溢相位。在都普勒平移量，約 45 秒之後，可以看見約有三到四條平行的曲線分布的情形，此乃因為在 GPS 訊號的正切點低於 20 公里時，福衛三號衛星會改用 OPEN LOOP 技術接收 GPS 訊號，造成連續取樣時間有時會有半波長跳動的情形，因此形成如圖的分布情形。此跳動的情形，實際上為 GPS 的航行資料(navigation message)資料，此部分訊號會在反演乾溫度剖面的過程中時被校正。目前自主程式大部分已經完成，以具有即時處理觀測資料的能力。

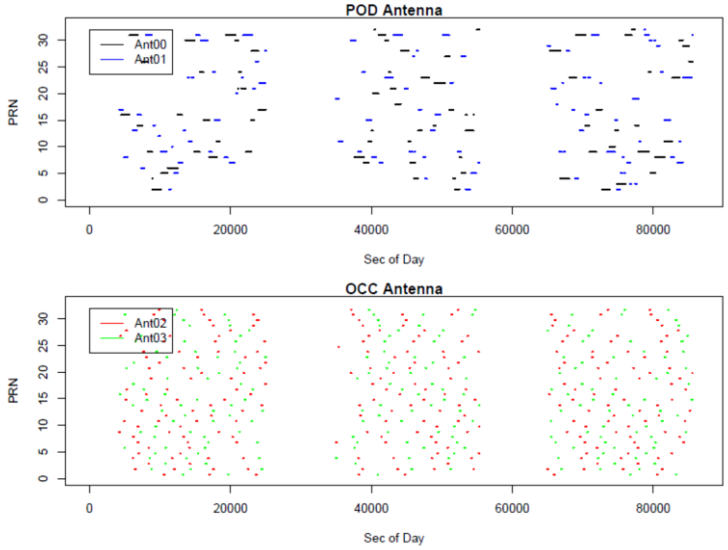

圖 7 POD 和 OCC 天線觀測時間表

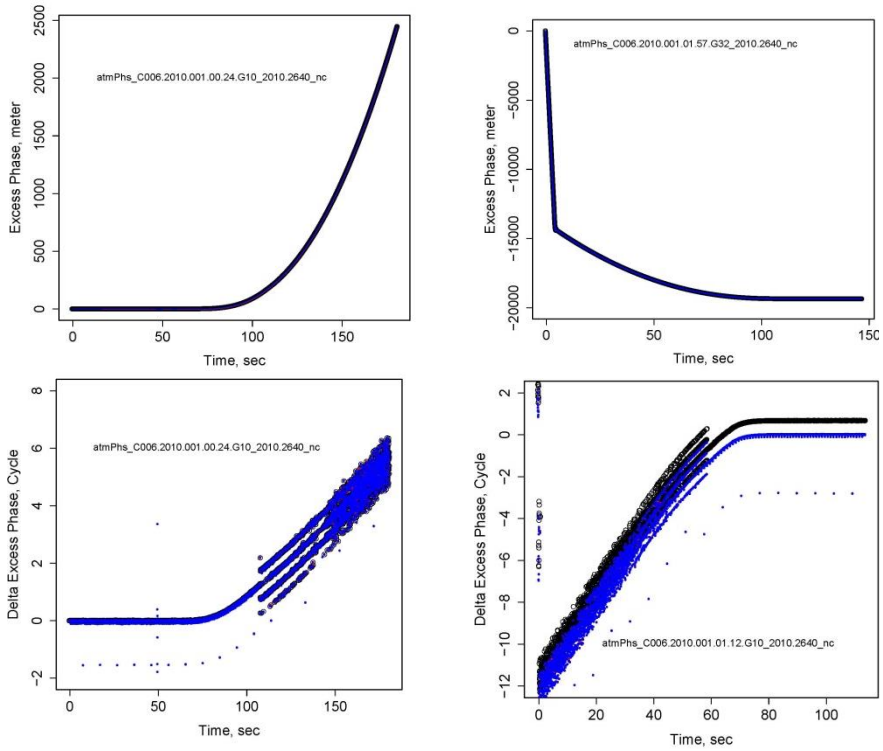

圖 8 溢相位(上兩圖)和都普勒平移量(下兩圖)成果比較圖

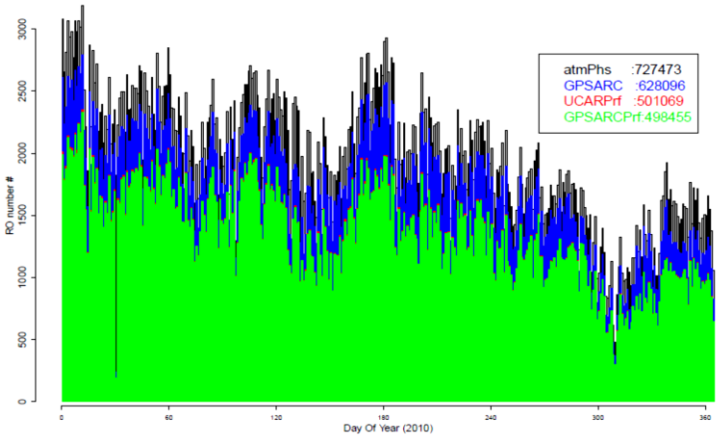

圖 9 乾溫度剖面反演驗證成果統計

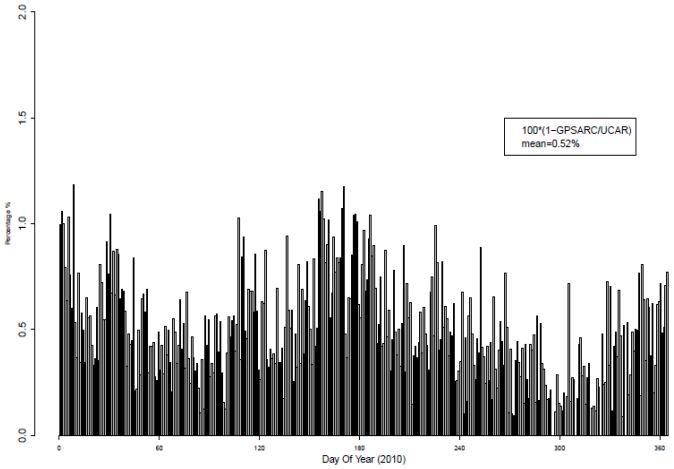

圖 10 乾溫度剖面反演驗證成果統計，未反演比率圖

圖 11 顯示四個掩星事件的乾溫度剖線，在 8 公里到 35 公里之間的溫度剖線，GPSARC 和 CDAAC(COSMIC CDAAC Data Analysis and Archival Center)的成果大致相符合，在 35 公里以上，所有的剖線在 35 公里以上幾乎都呈現偏低的現象，此原因為不同單位使用的背景大氣模式不相同，目前自主軟體所使用的背景場為 NCEP 模式，CDAAC 所使用的為 ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)大氣模式，因為在 35 公里以上，背景場的加權較大，因此剖線會偏向背景場。

3.2 濕溫度剖面反演

在濕溫度剖面反演上，已經完成固定模式溫度剖面方法反演大氣濕溫度剖面。下圖舉出兩個反演的例子。圖上、黑色線為自主軟體反演出來的成果，藍色十字符號為 UCAR 目前在網上公布的結果，紅色為 ERA40(ECMWF 40 Year Re-analysis)模式的成果。反演方式為利用下列方程式(25)。

$$N = c_1 \frac{P}{T} + c_2 \frac{e}{T^2} \tag{25}$$

方程式中折射率 N 來自於乾溫度剖面，溫度剖面由模式提供，即可反演出大氣濕溫度剖面，溫度剖面可由乾溫度剖面的溫度折返點，加上地面溫度或由雲高溫度加以限制而得，取代模式溫度剖面。目前自主程式部分已經完成主要功能的撰寫，目前正積極進行符合即時作業的軟體改寫。

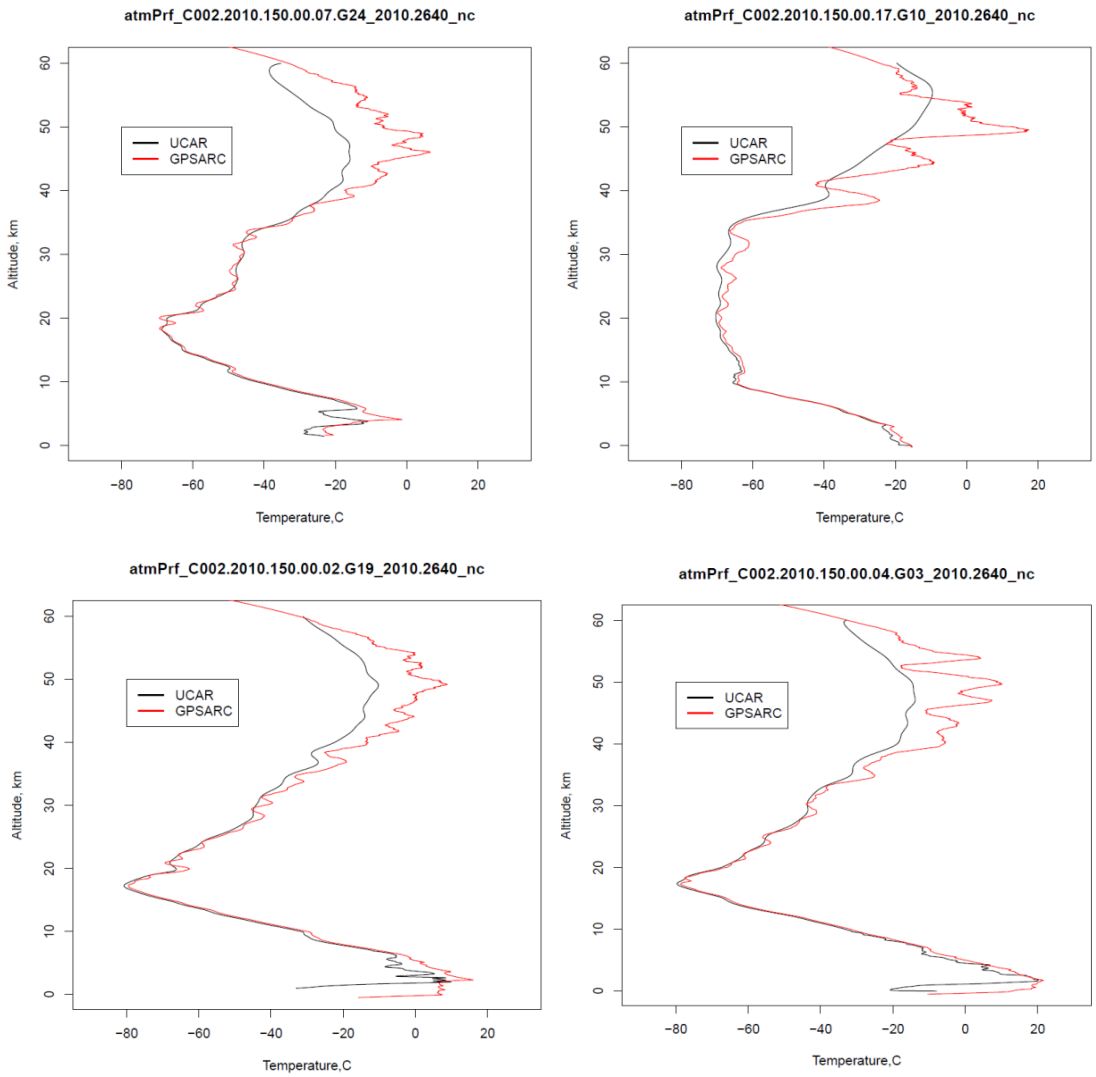

圖 11 掩星大氣乾溫度剖線比較圖

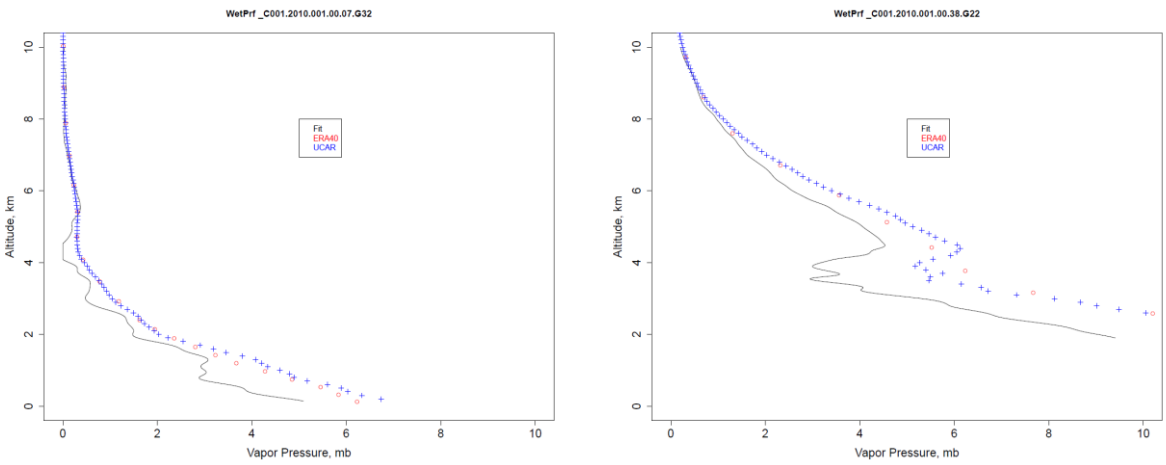

圖 12 濕氣壓剖面圖: 黑色線為自主軟體反演出來的成果，藍色十字符號為 UCAR 目前在網上公布的結果，紅色為 ERA40 模式的成果

4. 結論

目前在三個模組反演出來的剖線與 UCAR 的相比，剖線曲線大致上是一致的。前兩個模組經測試驗證，目前都已經接近作業化的雛型階段，只要再稍加改進，預計在今年底可達到作業化模式處理福衛三號的掩星資料，明年經修改後即可處理福衛七號衛星。第三個模組目前也已經反演出合理的濕溫度和濕氣壓剖面，目前正積極改寫，以符合作業化階段。

發展台灣掩星自主軟體，除了希望能做到科技紮根，我們自己能掌握到關鍵技術之外，亦可節省資料處理所需要的經費。更希望有一天能做出新的或更好的反演軟體，達到超歐趕美的目標。

參考文獻

Feng D. D. and M. Herman, Remote Sensing the Earth's Atmosphere Using the Global positioning System (GPS) — The GPS/MET Data Analysis, J. Atmos. Oceanic Technol., 16, 989, 1999

Gorbunov, M. E., S. V. Sokolovskiy, and L. Bengtsson, Space refractive tomography of the atmosphere: Modeling of direct and inverse problems. Max-Planck-Institut für Meteorologie Report No. 210, Hamberg, Germany. 1996.

Gorbunov, M., and A. S. Gurvich, Algorithms of inversion of Microlab-1 satellite data including effects of multipath propagation, Int. J. Remote Sensing, 19 , 2283-2300, 1998.

Gorbunov, M. E., Ionospheric correct and statistical optimization of radio occultation data, Radio Science, Vol. 37, No. 5, 1084, 2002.

Igarashi A. Pavelyev, K. Hocke, D. Pavelyev, I. A. Kucherjavenkov, S. Matyugov, A. Zakharov, O. Yakovlev, Radio holographic principle for observing natural processes in the atmosphere and retrieving meteorological parameters from radio occultation data. Earth Planets Space, No. 52, 893-899, 2000.

Karayel, E. T., and D. P. Hinson, Sub-Fresnel-scale vertical resolution in atmospheric profiles from radio occultation. Radio Sci., 32(2), 411-423, doi:10.1029/96RS03212. 1997.

Liou, Y.-A., and C.-Y. Huang, Active limb sounding of atmospheric refractivity and dry temperature profiles by GPS/Met occultation, Space Weather Study Using Multipoint Techniques, Ling-Hsiao Lyu (ed). COSPAR Colloquia Series Vol. 12 , 2002. (NSC 89-2111-M-008-025-AP3).

Jensen A. S., M. S. Lohmann, H.-H. Benzon, and A. S. Nielsen, Full Spectrum Inversion of radio occultation signals, RADIO SCIENCE, VOL. 38, NO. 3, 1040, doi:10.1029/2002RS002763, 2003

Jensen A. S., M. S. Lohmann, A. S. Nielsen, H.-H. Benzon, Geometrical optics phase matching of radio occultation signals, RADIO SCIENCE, VOL. 39, NO. 3, 3009, doi:10.1029/2003RS002899, 2004

Pavelyev A.G., Y.-A. Liou, C. Reigber, J. Wickert, K. Igarashi, K. Hocke, C.Y. Huang, 2002: GPS radio holography as a tool for remote sensing of the atmosphere and mesosphere from space. GPS Solutions, 100-108, Vol. 6, No. 1-2, 2002.

Pavelyev A.G., J. Wickert, Y.A. Liou, K. Igarashi, K. Hocke, and C.Y. Huang, High-precision observation of the mesosphere and atmosphere using radioholographic analysis of GPS/MET and CHAMP radio occultation database. In: First CHAMP Mission Results for Gravity, Magnetic and Atmospheric Studies, Ch. Reigber, and H. Luhr (ed). Pub. Springer, Berlin, pp. 500-507., 2003.

Phinney, R. A. and D. L. Anderson, On the radio occultation method for studying planetary atmospheres. J. Geophys. Res., 73, 1819-1827, 1968.

Smith, E.K., and S. Weintraub, The Constants in the Equation for Atmospheric Refractive Index at Radio Frequencies. Proceedings of the IRE, 41(8),1035-1037,doi:10.1109/JRPROC.1953.274297. 1953.

Sokolovskiy, S. V., Inversions of radio occultation amplitude data. Radio Sci., 35(1), 97-105, doi:10.1029/1999RS002203. 2000.

Vorob'ev, V. V., and T. G. Krasil'nikova, Estimation of the accuracy of the atmospheric refractive index recovery from Doppler shift measurements at frequencies used in the NAVSTAR system, Phys. Atmos. Ocean, 29, 602-609, 1994.

Ware, R., M. Exner, D. Feng, M. Gobunov, K. Hardy, B. Herman, Y. Kuo, T. Meehan, W. Melbourne, C. Rocken, W. Schreiner, S. Sokolovskiy, F. Soltheim, X. Zou, R. Anthes, S. Businger, and K. Trenberth, GPS Sounding of the Atmosphere for Low Earth Orbit: Preliminary Results Bull. Amer. Meteor. Soc., 77, 19-40, 1996.

Wickert, J., Reigber, C., Beyerle, G., Konig, R., Marquardt, C., Schmidt, T., Grunwaldt, L., Galas, R., Meehan, T.K., Melbourne, W.G., Hocke, K., Atmosphere sounding by GPS radio occultation: 7rst results from CHAMP,

Geophysical Research Letters, 28 (17), 3263–3266, 2001.

Yunck, T. P., C.-H. Liu, and R. Ware, A History of GPS Sounding. Terr. Atmos. Oceanic Sci., 11(1), 1-20. 2000.

Taiwan self-developed software Development for FORMOSAT-3 and FORMOSAT-7

Cheng-Yung Huang [1] Kun-Lin Chen [2] Eddy Yang [3]

ABSTRACT

The radio occultation technique for observing atmosphere and ionosphere has been developing for seventeen years, since the launch of the first radio occultation satellite MicroLab-1. The six micro-satellites FORMOSAT-3, the first constellation to observe atmosphere, can provide the global coverage limb measurements above earth surface in all time. It had been proven to be a powerful tool to observe parameters of ionosphere and atmosphere. The radio occultation data is processed by CDAAC software developed by UCAR. Currently, the GPSARC are working hard to develop the Taiwan self-developed scientific software to process the radio occultation data for both missions, FORMOSAT-3 and FORMOSAT-7, NSPO and TACC are developing the automatic and independent system to process the RO data. In this study, we introduce the status of self-developed software about the atmospheric RO data process.

The atmospheric radio Occultation data process include three main procedures, excess phase retrieval, dry parameter profiles retrieval and wet parameter profiles retrieval. The main function of excess phase retrieval is retrieve the OCC observation to excess phase with orbit information of GPS and FS3. The Dry parameter profiles retrieval will produce bending angle, refraction index, pressure and dry temperature without considering the water vapor. The wet parameter retrieval will produce the same atmospheric profiles, except the dry temperature is replaced by wet temperature, and produce the extra water vapor pressure.

Keywords: FORMOSAT-3, GPS, Occultation, FORMOSAT-7

[1] Research fellow, GPS Science and Application Research Center of National Central University
[2,3] Research fellow, National Space Organization, National Applied Research Laboratories
[*] Corresponding Author, Phone: 886-3-4227151 ext.25518, E-mail: yusn2845@gmail.com

Received Date: Aug. 02, 2013
Revised Date: Dec. 30, 2013
Accepted Date: Jan. 09, 2014