

福爾摩沙衛星三號氣象研究簡介

黃清勇

國立中央大學大氣科學系

December 2006

摘要

台灣與美國共同合作的福爾摩沙衛星三號，取名 FORMOSAT-3/COSMIC，已於 2006 年 4 月 15 日於美國加州成功發射。福衛三號發射 6 顆低地球軌道 (low-earth-orbit) 之微衛星，接收 28 顆全球定位 GPS 發射 1.58 及 1.23 千兆赫 (GHz) 頻率訊號，形成所謂星座掩星觀測 (constellation occultation observations) 網絡，每日提供全球均勻分布的探空數目理想上可達 2500 個。發射後截至目前為止，六顆衛星製造設計良好，衛星姿態已漸取得熟稔控制，衛星狀態也十分健康，每日原始資料已超過 2000 筆，反演出良好的大氣資料更不少於 1500 筆。此高密度之觀測，已為目前全世界氣球探空數目的兩倍，對世界各國氣象作業預報帶來可觀的效益，對一般大氣科學研究更是提供絕佳的機會。此科學實驗除將開創世界之首例，計畫本身對我國衛星工業生根、技術發展與衛星元件製造能力之提昇亦有重大之助益，所附帶的各種觀測資訊，亦大大提昇吾人對大氣狀況之了解，對學術研究及國計民生之應用有極高的價值。依此多衛星及酬載儀器所具功能特性，其主要目標著重在建立全球大氣重要參數之衛星即時觀測作業網，可以：(1) 增進全球及地區性天氣預報作業之精確度；(2) 增進太空天氣之監控與預報能力及電離層動態監控等相關用途；(3) 提供氣候研究及全球變遷研究資料；(4) 提供地球重力及衛星軌道研究資料等。我國之大氣科學研究團隊，在國科會及太空中心的支助下，已進行當前掩星觀測資料反演技術及同化模擬及作業預報，有持續深入之研發。本文除簡單介紹 FORMOSAT-3/COSMIC 計畫背景，整體研發目標及資料應用之重點，對國內大氣學門氣象領域較具密切相關之項目亦進一步說明。

一、前言

目前在天際有 28 顆全球定位 GPS (Global Positioning System) 衛星，在距地約兩萬公里高運行，固定發射 1.58 及 1.23 千兆赫 (GHz) 頻率訊號，如果能於低地球軌道 (low-earth-orbit) 提供若干訊號接收衛星，則所提供之訊號接收網絡將形成所謂星座掩星觀測 (constellation occultation observations)。美國大氣研究大學聯盟 (UCAR) 於 1995 發射第一顆此種訊號接收衛星，來求取與大氣相關之資訊，並命名為 GPS/MET 實驗。GPS/MET 之工作原理就是利用裝載於繞地球低軌道衛星上之 GPS 接收器，觀測 GPS 無線電波訊號傳播在穿過地球大氣層氣所產生的折射現象，即接收 GPS 訊號的時間延遲現象，並利用反演技術推算出無線電波訊號所經過路徑上之電子密度和溫度、壓力、及水汽含量等資料，是一種不受天候影響之主動性的大氣無線電波折射探測技術。為了推算大氣層對無線電波傳播所造成的影響，必需精確的知道信號來源和接收器的位置，才可能推算大氣層對電波所造成之折射影響。由 GPS/MET 接收器的位置和 GPS 定位信號的正確位置，可以量出定位信號在穿透大氣時的折射角度，再利用模式和一些假設就可以由反演技術直接推算大氣折射率。大氣折射率為壓力、溫度、水汽含量等參數之函數，故可藉此協助估計大氣之壓力、溫度或水汽含量。除了主要的 GPS 訊號接收器酬載，在訊號接收衛星上亦可加掛各種其它儀器酬載觀測電離層各種物理參數，將於後續介紹。

衛星工業與技術研發為政府推動的重要國家級計畫，責由國家太空中心統籌規劃及執行，在擬定的十五年發展計畫，由福爾摩沙衛星 (原中華衛星) 一號、二號及三號系列進行。其中福爾摩沙衛星一號已完成任務並進行多項科學研究，福爾摩沙衛星二號為遙測資源衛星，目前已順利執行任務中，福爾摩沙衛星三號 (FORMOSAT-3) 則已由我國與美國大學大氣研究聯盟 (UCAR) 及美國軌道科技公司 (OSC) 合作，公元 2006 年 4 月 15 日於美國加州成功發射 6 顆 GPS 訊號接收衛星，進行科學實驗研究。有鑑於此計畫的成功與否，不僅取決於衛星本體元件製造技術之建立及衛星軌道之操控技術能力，亦相當依賴衛星觀測資料於科學研究與實際應用層面之發展情況，因此國科會曾於自然處海科中心成立「推動中華衛星三號科學

研究」計畫，來推動與規劃與福衛三號科學研究有關之任務。過去幾年曾參與福衛三號科學研究任務相關規劃與討論工作之學者專家甚多，作者係擔任過為國科會福衛三號科研 COSMIC 推動計畫主持人及目前 NSPO 專案委託氣象整合研究計畫主持人，今年協助 NSPO 舉辦國際科學研討會『FORMOSAT-3/COSMIC Workshop 2006 - Early Results and IOP Campaigns』(詳見 <http://formosat3.ncu.edu.tw>)，會中已針對於福衛三號衛星狀態、未來運轉、資料狀況、科學研究、任務規劃及研發合作等議題多所觸及，乃於此做個簡介說明計畫背景與國內外目前主要研究成果。NSPO 預計於 2007 年 TAO 出版 FORMOSAT-3/COSMIC 科學研究專刊。TAO 曾於 2000 年出版 COSMIC 專刊，但主要針對國外 GPS Radio Occultation 技術及當時 COSMIC 現況，甚少涉及國內過去推動歷史及主要研究成果。本文另一主旨在對我國福衛三號簡介，不擬觸及較專業的衛星軟硬體設計與製造，在科學研究介紹上則以國內氣象研發進展為主。

二、FORMOSAT-3/COSMIC 計畫背景與主旨

(一) 福爾摩沙衛星三號 (FORMOSAT-3/COSMIC) 簡介

台灣與美國共同合作的福爾摩沙衛星三號，取名 FORMOSAT-3/COSMIC 計畫。福爾摩沙衛星三號經台灣與美國整合科學研究規劃後，依據衛星設計與觀測能力之本質，美國為 COSMIC (Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate) 研究計畫，英文 constellation 原意為星座，即有多衛星環繞地球守護之精神。在衛星軟硬體的設計及組裝上，福衛三號並非完全自製，而是由美國 OSC 提供第一顆衛星，我國依原始設計圖 (如圖 1)，在太空中心組裝其餘五顆衛星及進行各種模擬測試。福爾摩沙衛星三號 (FORMOSAT-3) 已順利於 2006 年 4 月 15 日於美國加州成功發射。每顆衛星重量約為 40 公斤，搭載三個科學酬載，六顆衛星安置於一個裝載器，由美國空軍推進火箭發射至初始高度約 400 公里高，六顆衛星再一一依序彈射出去。預計距發射日期一半年內逐步將六顆衛星分別調整至約 800 公里高，以分開 30 度形成軌道均勻分布的觀測作業，以接收 28 顆 GPS

定位衛星發射的電訊（如圖 2）。在無地形阻擋射線及特殊天氣情況（如產生反射及折射），理想上六顆衛星每日約可提供全球近 2500 個的探空資料，目前約可提供每日近 2000 個的原始資料，而由原始資料可反演出的相當正確的大氣探空資料筆數已達 1500 以上（Lin et al. 2006），可以說福衛三號已得到幾近百分之百的成功。

福衛三號的三個科學酬載分別為(1)氣象用全球定位系統接收器(GPS/MET Receiver)，(2) 小型電離層光測器(TIP)，(3) 三頻指標信號儀(Tri-Band Beacon)，用來建立全球大氣重要參數之即時觀測作業網。台美共同合作的 FORMOSAT-3/COSMIC 計畫，因多衛星及酬載儀器所具功能特性，其主要目標著重在建立全球大氣重要參數之衛星即時觀測作業網，得以：(1) 增進全球及地區性天氣預報作業之精確度；(2) 增進太空天氣之監控與預報能力及電離層動態監控等相關用途；(3) 提供氣候研究及全球變遷研究資料；(4) 提供地球重力及衛星軌道研究資料等。圖 3 為福衛三號與 GPS 衛星的聯網示意圖，顯示微衛星監測大氣情況，由提供的水汽及溫度資訊，對其下方大氣電離層及對流層環流發展可更清楚的掌握，進而改善太空天氣及逐日氣象作業預報與科學研究。

台灣方面 FORMOSAT-3/COSMIC 計畫目前主要架構包含國家太空中心(NSPO)以衛星本體發展的軟硬體計畫(與美國大學大氣研究中心合作)及任務導向的科學計畫。過去國科會自然處科學研究導向的 COSMIC 整合研究計畫整併於 NSPO 以專案委託計畫來推動執行（黃，2002）。研究計畫分成氣象、電離層及大地測量三個領域群組，互相支援以達成改善台灣天氣預報之共同目的，此亦是 COSMIC 計畫的一項重要的任務。台灣典型的劇烈天氣包含移動的梅雨鋒面，局部對流的海島雷暴和密集的侵入颱風，時常與引發洪水和土石流的強烈降水有關。為減少巨大的經濟財產及生命的損失，亟須要提高天氣預報的精確度。隨著全球氣象衛星 GPS/MET 的來臨，可藉由全球衛星觀測，提供輔助資料來改善氣象模式的初始場，進而改善天氣預報。因此，FORMOSAT-3/COSMIC 計畫的一大挑戰性的任務應在顯示數值天氣預報模式在使用 FORMOSAT-3/COSMIC 資料後對於天氣預報能力有所改善，目前以改善短期定量降水預報為積極目標，而其於長期的全球觀測對短期

氣候監測與模擬亦應有明顯的效益。

(二) 酬載儀器簡介

(1) 氣象用全球定位系統接收器(GPS/MET Receiver)

福衛三號為由 6 顆低軌道微衛星組成之星系衛星，主要酬載是在每顆衛星上安裝的四個 GPS 天線，以接收現有之 28 顆 GPS 衛星 L1(1.57542 GHz)及 L2(1.2276 GHz) 頻段訊號。由於 GPS 訊號傳播在穿過地球大氣電離層及對流層時，會因大氣所產生的折射現象造成接收信號的時間延遲；由所實際量到的訊號之時間延遲量或傳播路徑之折射角度，可以利用模式推算出訊號所穿過之電離層及大氣層之電子密度、溫度、壓力、及水汽含量等資料，配合天氣預報作業，每 3 小時提供更新資料，供數值天氣預報模式使用。

(2) 小型電離層光測器(Tiny Ionosphere Photometer, TIP)

將於每顆衛星上安裝一個小型電離層光測器，其光譜頻段為 135.6nm。經由此儀器測量所得數據，可推算出衛星對地垂直向下方向之電子密度總量，以增加電離層全電子含量的訊息，做為利用電離層斷層掃描(Ionospheric Tomography)技術反演電離層三維結構的重要初始數據(Initial Data)。

(3) 三頻指標信號儀(Tri-Band Beacon)

將於每顆衛星上安裝一個三頻指標信號儀，儀器使用 150、400、1067MHz 三個頻段之同相電波發射機(Coherent Radio Transmitter)，在地面利用特別的信標接收器測量信號之相位差，以推算電離層總電子含量 (Total Electron Content, TEC)，進而推導在電離層高度(90-700 公里)高解析度四維 (三維空間及一維時間) 電子密度的分布。

以上三個酬載相互配合，相輔相成。當觀測大氣電離層之電子密度等參數時，可結合 GPS 地面站所接收之資料與由 GPS/MET 衛星上所接收之資料，求得全球電子剖面密度，但因其水平方向空間解析度仍不夠，可藉由三頻指標信號儀以及 TIP 測量所獲得之數據，來大幅提高電子密度之橫面解析度。

估計福衛三號每天可提供全球約 2500 個穿透大氣層之折射事件資料(圖 3)，這些折射事件相當均勻地分佈於全球，且反演資料以目前 UCAR 的處理速度，三小時內即可更新一次。因為傳統量測方法不易取得海面上之資料，這些資料對於區域性或全球性之數值天氣預報相當重要。此外，由於 FORMOSAT-3/COSMIC 所量得數據之精度相較於現有其他傳統觀測法（如探空氣球）不遑多讓（如 Ware et al. 1996 之分析報告），但卻較不易受儀器性能老化、設計改變等因素之影響，將有助於研究細微和長時間之氣候變遷現象，亦可對電離層進行觀測，並且有助於地球重力場研究。

(三) GPS/MET 工作原理介紹

如前簡介所言，GPS/MET 之工作原理簡單的說，就是利用裝載於繞地球低軌道衛星上之 GPS 接收器，觀測 GPS 無線電波訊號傳播在穿過地球大氣層氣所產生的折射現象，如圖 4 所示。由於電波能量在大氣介質中之傳播速度會減慢，因此造成所接收 GPS 訊號的時間產生延遲現象。另外由於大氣折射指數的作用，導致 GPS 電波在大氣中傳播的路徑有偏折的現象。電波射線偏折角的定義為原入射大氣前射線與離開大氣後射線之夾角，因此若無折射發生，此二射線應同向，即無偏折現象。每一個射線之偏折量與其入射點離地高度有直接關係，通常定義為切入參數或譯為撞擊參數 a (impact parameter)，其值為入射射線至地心之最短距離。為了推算大氣層對無線電波傳播所造成的影響，必需精確地知道信號來源和接收器的位置，才可能推算大氣層對電波所造成之折射影響。由 GPS/MET 接收器的位置和 GPS 定位信號的正確位置，可以量出定位信號在穿透大氣時的折射角度，再利用模式和一些假設就可以由反演技術直接推算大氣折射率(atmospheric refractivity)。目前在反演時假設離開射線與入射射線至地心之最短距離相等 (local spherical symmetry) 以求得偏折角。有關掩星反演技術研究背景與討論可見 Kursinski et al. (2000)。求得每一碰撞參數（即高度）之偏折角後，依 Snell 折射定律，再假設大氣折射率為球對稱（即僅為高度之函數），由 Abel 轉換即可求得大氣折射指數或折射率，稱為

Abel 反演折射率。有關 Abel 轉換原理及由無線電波求得偏折角的過程，有另文詳細介紹（黃與朱，2004）。大氣折射率為壓力、溫度、水汽含量、以及自由電子密度等參數之函數，在較粗略要求下，Abel 反演折射率可以用來代表大氣局部折射率，由此通往模式分析大氣，藉此資訊修正大氣之壓力、溫度，自由電子密度或水汽含量等參數。

綜合而言，COSMIC 計畫所能量測之大氣、電離層以及其它參數為

- (a) GPS 訊號穿過大氣之偏折角
- (b) 大氣折射指數隨高度之分布
- (c) 大氣溫度以及溼度隨高度之分布
- (d) 電離層電子密度隨高度之分布
- (e) 電離層全電子含量
- (f) 電離層閃爍現象
- (g) GPS 定位訊號(可推求地球重力場變化)

三、福爾摩沙衛星三號科學研究

(一) 推動 FORMOSAT-3/COSMIC 科學研究

由上述 FORMOSAT-3/COSMIC 簡介，衛星酬載儀器觀測主要為大氣特性(電離層及氣象資訊)，另外由 GPS 衛星、LEO 衛星(GPS/MET)及地面 GPS 接受站亦可進行重力場與軌道計算，NSPO 擬定三個任務導向研究主題：天氣及氣候(Weather and Climate)、電離層 (Ionosphere) 與測地 (Geodesy)，已於 2002 年正式展開計畫研究。在科學研究上，三個領域已各自整合且可相互合作，如電離層團隊可以為氣象團隊提供上游資訊，而測地團隊可以提供精確軌道計算、重力場研究及水汽量反演，提供觀測定位點的最基本資料，對於處理 COSMIC 原始資料(如折射角)提供上游基礎工作。

過去幾年來，國科會大力支持 COSMIC 任務規劃工作，經由 COSMIC 推動計畫來進行推派有關 COSMIC 研究的短期出國人員及舉辦多次國際及國內 COSMIC

學術研討會事宜。在成立 COSMIC 整合研究計畫後，此 COSMIC 推動計畫(原設立於國科會海科中心)的任務需求部份併入整合計畫總計畫辦公室及相關子計畫中。過去台灣 COSMIC 整合研究計畫已由 NSPO 以 FORMOSAT-3/COSMIC 專案委託計畫來執行研究任務。在 2006 年底，更委由國立中央大學成立 GPS Scientific Application and Research Center (GPS-SARC)，來推動、整合與進行國內與 GPS 相關之科學研究。

(二) 台灣 FORMOSAT-3 研究目標

如前所言，台灣 COSMIC 整合研究計畫規劃的三個研究團隊：氣象團隊(Meteorology)、電離層團隊(Ionosphere)及測地團隊(Geodesy)，具體反映我國目前可用人力及各單位有興趣從事之研發課題，由於與上述 FORMOSAT-3/COSMIC 整體計畫的科學研究任務密切相關，且更為落實我國研究發展之需求，值得在此簡述我國有關福衛三號的科學研究導向：

氣象研究—主要目標為透過資料同化之基礎研究及應用研究，提昇國內有關資料同化之技術，另外亦瞭解 GPS 掩星觀測資料對於天氣與氣候研究之影響。同時透過不同資料之同化及反演演算技術之建立與改善，增進數值天氣模擬及預報能力。其主要分項目標：

- GPS 折射資料同化研究與應用
- 福衛三號大氣層參數反演技術與驗證
- 三維及四維變分技術運用於衛星資料同化理論與模式發展
- GPS 掩星觀測資料對梅雨、颱風及其它災害天氣數值預報之影響
- GPS 掩星觀測資料應用於短期氣候監測與區域氣候及環境預報模擬之影響

GPS 掩星觀測資料的精確程度，已有許多研究加以證實，如使用 1995 年發射之 UCAR Micro Lab 1 之 GPS/MET 觀測實驗資料，顯示可以在高度 6 公里以下反演出誤差在 10~20%之間的水汽剖線，在邊界層中更可達 5%。由 GPS/MET 反演技術，無線電探空儀 (radiosonde) 觀測，以及作業單位的全球分析所得出的溫度

剖線，發現其誤差在 1°C 之內 (Ware et al. 1996)。Kuo et al. (1998) 研究顯示 GPS/MET 資料在垂直方向的高密度分布可以完整地解析出由天氣預報中心 (如美國環境預報中心) 的全球分析模式所無法看到的中尺度現象。綜合所言，GPS/MET 資料具有品質精確、高垂直解析度 ($\leq 1\text{km}$)，與不受洋面限制的優點。而隨著 LEO 衛星數目的增加，可以大量提高對同一地區觀測的頻率。因此，這種非傳統的觀測資料，在彌補觀測資料不足之區域特別有效益，因此在改善台灣地區天氣預報的重要性是相當明顯的。而這也是我國福衛三號計畫中的重要科學目標之一。

對於國內的氣象界而言，在 2006 年初發射華衛三號之前，已積極進行研究 GPS 掩星觀測資料導入於數值模式的方法，以改進天氣預報的準確度，而目前導入方法可採用三維及四維資料同化 (3DVAR 與 4DVAR)。所謂三維資料同化是將欲引進之資料與模式初始預報時間之分析場調整至最小的誤差，而四維資料同化則須進一步考慮在不同時間的二者之累積誤差。Zou et al. (1995) 和 Kuo et al. (1997) 發現：將大氣的折射率同化至模式中有助於模式對溫、溼度的掌握，因此對預報的結果有相當正面的影響。Kuo et al. (2000) 進一步推論：使用更上游觀測的偏折角來同化，應會較 GPS 折射率同化會有更好的模擬結果。Zou et al. (1999) 直接同化 GPS 偏折角進行全球三維變分分析，結果顯示資料效益集中於觀測點 600 公里方圓內，分析結果顯示較一般觀測反演的折射率有更好的準確度。Liu and Zou (2003) 進一步於全球模式進行 GPS 偏折角四維資料同化及模擬，模擬結果顯示對全球預報之改善有正面的效益，特別是於傳統觀測較為缺乏之南半球。以上的例子都顯示出 GPS 掩星觀測資料未來應用在改善氣象預報上的潛力。我國中央氣象局在幾年前便認知到這個世界潮流，因此已開始採用 3DVAR 及 4DVAR 方法來導入 GPS 掩星觀測偏折角，目前已成功建置於全球波譜伴隨(adjoint)模式，並進行轉移至作業模式，此同化方法採用美國 NCEP 使用的所謂波譜統計插分 SSI (Spectral Statistical Interpolation) 之 3DVAR (Parish and Derber 1992)。在區域模式方面，Huang et al. (2005, 2006) 使用 3DVAR 將 GPS 折射率同化於區域模式 WRR 及 MM5，探討對侵台颱風預報之影響。

電離層研究—目標旨在結合現有全球電離層地面觀測及 FORMOSAT-3/COSMIC 資料，建構全球電離層電漿三維結構，並將此三維資料輸入建構之電離層模式以研究及預報電離層太空天氣變化 (Liou 2006)。其主要分項目標：

- 配合福衛三號觀測建立全球電離層電漿四維結構以研究及預報太空天氣之電離層天氣變化
- 電離層模式三維網格建立及既有全球地面觀測資料收集
- 既有 GPS/MET(福衛三號資料模擬)及全球地面觀測資料同化電離層四維模式建構
- 電離層電子密度不規則體以及衛星訊號電離層閃爍(Scintillation)現象之觀測與研究
- 電離層天氣模式預報計算及其與全球觀測之比較與驗證

首先利用福衛三號觀測電離層電漿垂直分布，分析計算福衛三號記錄觀測以求得衛星遮掩地點電離層電漿垂直分布。同時，蒐集及同化全球地面電離層 GPS 及雷達網觀測資料，以建構全球電離層電漿三維網格，提供初始場給電離層模式 TIEGCM 進行太空天氣的預報與研究。另外，建立福衛三號電離層四維斷層掃描技術，利用福衛三號 TIP 以及 TBB 酬載之觀測資料，反演電離層電漿四維分佈。同時利用三頻指標訊號，配合地面雷達，進行電離層電子密度之觀測與研究，以驗證福衛三號所蒐集的數據。

測地研究—目標為藉由分析福衛三號所接收之精密 GPS 觀測資料，可進行有關測地與地球物理方面之科學研究，其主要分項目標：

- 福衛三號與地面 GPS 監測網資料之聯合解算
- 福衛三號精密軌道計算
- 福衛三號資料推求地球重力場
- 福衛三號資料探討地球內部 670 公里不連續面之研究

相較於氣象氣候及電離層團隊，測地研究團隊特別著重於精密 GPS 資料之分

析處理，以及台灣本土化之科學先進方法與計算軟體的發展。由於強調自我發展科學方法與計算程式之開發，因此對於各項影響福衛三號 GPS 觀測量之誤差均必須慎重分析及處理，GPS 資料處理誤差分析以及福衛三號精密軌道計算也因此成為測地研究主題之一重要核心。目前所計算之後處理福衛三號軌道之精確度與美國 UCAR 比較已相當接近 (Lin et al. 2006)。

四、目前我國大氣科學研究現況

在 NSPO 的主導與相關研究團隊的努力下，在 2000 年曾於 TAO 出版 COSMIC 專刊，在 2000 年出版於台北舉辦 COSMIC International Workshop 之論文彙編 (見參考文獻)，以及 2002 年出版於 NCAR 舉辦 Radio Occultation Science Workshop 之論文彙編，但這些所發表的論文主要皆針對國外 GPS Radio Occultation 技術及當時 COSMIC 研究成果進行報告與討論。2006 年 11 月底，NSPO 於台北舉辦國際科學研討會『FORMOSAT-3/COSMIC Workshop 2006 - Early Results and IOP Campaigns』，國內外使用福衛三號觀測資料之研究已有相當的進展及成果，2007 年計畫於 TAO 出版 FORMOSAT-3/COSMIC 專刊。本文不擬介紹研討會論文內容，而主要在介紹國內目前的氣象研究方法及成果。

(一) 掩星資料同化與模擬

資料同化係由定義之分析函數之最小誤差來取最佳分析場 (optimal analysis)。此法首先須定義一客觀函數(objective function)(或價值函數 cost function)如下

$$J = \frac{1}{2} \{ (x_0 - x_b)^T B^{-1} (x_0 - x_b) + \sum_{i=0}^n [y_{obs} - R(x_i)]^T O^{-1} [y_{obs} - R(x_i)] \} \quad (1)$$

在此

x_0 ：初始分析變數 (N 維向量)，

x_i ：時間 t_i 分析變數 (N 維向量)，

x_b ：背景變數（ N 維向量），

y_{obs} ：同化時窗（ t_0 至 t_n ）觀測變數（ M 維向量），

B ：預報誤差協方差矩陣(covariance matrix)（ $N \times N$ ），

O ：觀測誤差協方差矩陣（ $M \times M$ ），

R ：transformation 運算子，將分析的變數計算成觀測位置上的變數，

N ：分析變數的維度，

M ：觀測的個數維度。

上述函數 J 極小值可以使分析變數 x_0 與背景變數 x_b 及觀測資訊的誤差有最佳的調整。當同化時窗僅為初始分析時間，即為3DVAR，若同化為一時窗（ t_0 至 t_n ），則須積分數值模式以求得 x_i ，因此為4DVAR。在極小化 J 值是透過矩陣線性運算，過程須對 R 轉置，因模式 R 為非線性，需要線性化，才能取其轉置。雖然吾人無從直接表示出來這些龐大矩陣的運算式及過程，在數學上其運算結果等同於對 R 線性化之正切線性模式（tangent linear model）（TLM）後取其轉置（即伴隨模式，adjoint model）之向後積分。在極小化 J 時，需來回疊代以求取最佳分析解，對大量維度之分析變數而言，數學上必須有特殊方法。另外，使用4DVAR時，由於需同時完成預報模式及其伴隨模式之數值積分，在計算時間的花費上至少是3DVAR的兩個級數以上。

基於資料處理程度的深淺，GPS掩星觀測資料至少可分為（1）相位延遲、（2）偏折角、（3）大氣折射率、（4）溫度及濕度剖線。對於數值模式而言，溫度與濕度是可被直接預報的變數，但偏折角與大氣折射率則否。一般而言，在不失準確性下，可以選擇在短時間內同化GPS掩星觀測資料的方法，以符合預報作業單位對時效性的要求。由前言，3DVAR的優點在於除了可以同化溫度、溼度、風場外，還可以同化模式沒有直接計算的變數，因此GPS掩星觀測的上游原始資料，即衛星訊號偏折角，或是大氣折射率，皆可直接同化於模式。這一部分的困難度在於必須推導出連接非傳統觀測場與分析場變數（如偏折角）之間關係的運算子，以及它的伴隨運算子。針對GPS掩星觀測資料的性質，我們必須

處理下列問題：

- (1) 對溫度、水汽而言，只需空間內插程式及其伴隨運算子。
- (2) 對折射率而言，則需將溫度 (T)、濕度 (q)、壓力 (p) 利用前進模式轉成大氣折射率 (N) 及其伴隨運算子。
- (3) 對偏折角而言，則除了溫度 (T)、濕度 (q)、壓力 (p) 計算出的大氣折射率 (N) 之外還需模擬電磁波經過大氣之路徑 (ray-tracing) 來求得偏折角，及其伴隨運算子。

由於模式並不直接預報折射率 N ，因此運算子 L 的作用是把模式預報的氣象參數和折射率連結起來 (Thayer, 1974)。折射率定義為：

$N = (n-1) \times 10^6$ ， n 為折射指數 (為光在真空中的速度與在介質中的速度之比值)，可由觀測偏折角之 Abel 轉換導出 (須假設折射指數為球對稱分布)。基本上，大氣折射指數除了與中性大氣 (neutral atmosphere) 的大氣溫度、壓力、水汽壓、以及離化大氣 (ionized atmosphere) 中的自由電子密度、地球磁場強度、和電子與中性大氣粒子的碰撞頻率有關外，也是電波頻率的函數。但對 GPS 訊號而言，由於其頻率遠高於地球電離層的最大臨界頻率 (critical frequency) (約 20MHz)，自由電子的旋繞頻率 (Gyro-frequency) (約 1MHz)，以及電子的最大碰撞頻率 (約 0.1MHz)，因此其所對應的大氣折射指數的數學式可表示如下：

$$n = (77.6 \frac{P}{T} - 5.6 \frac{P_w}{T} + 3.73 \times 10^5 \frac{P_w}{T^2}) \times 10^{-6} - 4.03 \frac{n_e}{f^2} \quad (2)$$

其中 P 是大氣壓力 (hPa)， T 是大氣溫度 (K)， P_w 是水氣分壓 (hPa)， n_e 是電子密度含量 (個/m³)， f 是發射電波頻率 (Hz)。從公式中可知折射率可分為三部分，分別是乾性空氣、溼性空氣、電離層自由電子密度。因此若將某地點上空的大氣參數代入式(2)中，便可得此地點的大氣折射指數剖面，故由式(2)所算出之大氣折射率特稱為大氣局地折射率 (local refractivity)。而由 GPS 電波穿越大氣抵 LEO 衛星之射線偏折角，根據 Abel 轉換反演方法 (在球對稱假設下) 所

導出之大氣折射率，則為積分路徑折射率 (path refractivity)，代表切過近地點之射線路徑總折射效應。在穿越低層大氣時，由於空氣密度較高、水平梯度亦較大，此由LEO衛星觀測導出之折射率與局部折射率會有較大之誤差。

使用偏折角來同化，則不須再使用Abel 轉換，即不必再假設穿越路徑之折射須嚴格對稱（相對於該近地點），因此理論上其誤差較小。然而，目前所能得到較準確之偏折角鮮少低於離地1公里（詳見Kuo et al. 2004），因此使用觀測折射率同化之誤差來源較多是採用局地單點之模式大氣折射率，而此項主要誤差可透過由穿越大氣之積分路徑折射指數來有效控制。不管 R (forward operator) 與 L (adjoint operator)，二者因須與同化模式結合，皆是繁複的工作。折射率 N 與模式預報的氣象參數 (P、T) 關係相當簡單，運算子容易完成。更上游偏折角則為更原始的觀測資料，但與大氣結構關係複雜許多。若GPS掩星觀測的上游偏折角及折射率資訊已反演為傳統的溫濕度變數，則三維變分的同化過程非常為簡單， R 與 L 運算子目前可直接用探空運算子，但根據過去研究利用觀測系統模擬實驗 (Observing System Simulation Experiments, OSSE)，即同化時窗區所有觀測皆為模式預報所產生，發現其資料同化正面影響的效益會降低。反之，觀測變數若是必須求解微分方程(如射線路徑方程式或平衡方程式)，則 R 與 L 運算子完成的困難度更高。

(1) GPS 偏折角之全球模式 4DVAR 反演分析

國內中央氣象局在幾年前即已引進美國全球模式三維資料變分。張 (2002) 首先引進 Zou 發展的 GPS 偏折角 4DVAR (Liu and Zou 2003) 於氣象局之全球乾模式。同化實驗結果顯示，在植入單點 GPS/MET 折射角探空觀測資料 (位於北美區) 後，模式分析的主要修正反應在水汽場，尤其位於低層者。中對流層做偏濕修正，而下層則為偏乾修正，此與模式相對於 GPS/MET 觀測間的系統性差異一致。相對於水汽而言，模式溫度幾無修正。由於同化模式與作業模式有相同結構與設計，目前除完成研究版之 4DVAR 全球模式同化模組，主要工作已完成 3DVAR 偏折角同

化模組，掛上於全球模式之 SSI 3DVAR，目前可以進行福衛三號偏折角同化平行作業 (Chang et al. 2006)。

(2) GPS 掩星觀測反演技術研發

國內 Liou and Huang (2000) 使用 GPS/MET MicroLab 1 的觀測，利用幾何光學反演法(radio-optics)，由 GPS 及 LEO 衛星相對位置及移動三維向量分析，求出 GPS 偏折角後，再經 Abel 反演出折射率計算乾大氣之溫度垂直分布，並與 UCAR 及 ECMWF 等觀測值比較，反演結果顯示，除於較高層外，有相當良好的一致性。劉 (2002) 亦探討其它不同反演技術，如振幅反演法，並與幾何光學反演法比較，亦討論全像術(holography)、正則轉換反演(Canonical transform)等方法之特性。如前所述，幾何光學反演法為根據較簡單的幾何光學如施乃爾定律 (Snell's law)，假設地球大氣(包括電離層和中性大氣層)折射率為圓形對稱，利用 Abel-equation 反演出折射率隨高度的變化。振幅反演法為根據訊號能量守衡的原理，依訊號的衰減率換算訊號傳播的撞擊參數(impact parameter)和偏折角。全像術反演法，考慮到光學的干涉與繞射的現象，根據 Helmholtz 方程式的邊界問題，利用複利葉分析等工具，求出偏折角等參數，此方法可以分析訊號至接收器的主波束和旁波束，可分析訊號的多路徑效應和來自海面反射的訊號。正則轉換反演法主要利用傅利葉積分轉換子將觀測使用切入參數和偏折角兩個變數表示，正則變換的優點為將求出的偏折角相對映到一個切入參數，所以在數學處理上，不會有奇異點出現。振幅反演法，僅利用低軌道衛星接受到的訊號衰減率來反演大氣參數。上述方法中，全像術和正則轉換為目前認為求出結果精度較好的方法，此兩種方法，可以分析低空如對流層多路徑的效應，且在反演折射率時，較不會有奇異點的發生。關於反演技術的詳細說明參見劉 (2002) 及 Yeh et al. (2006)。

(3) GPS 折射率資料之 3DVAR 同化模擬

目前已完成 GPS 折射率 (refractivity) 同化模組 (local operator 及 nonlocal operator) 於區域模式 WRF/MM5 其 3DVAR 系統及 GPS 折射率 (refractivity) 同化模組於 MM5 4DVAR 預報系統，探討 GPS 資料同化技術及其對天氣預報的影響。在 GPS-SARC 的團隊，研究計畫有氣象局的非靜力區域模式 (NFS) 之同化預報作業 (Terng et al. 2006)，WRF 及 WRF 3DVAR 折射率同化之即時預報 (Lin et al. 2006)，黃 (2004) 使用 MM5 3DVAR 同化兩顆 GPS/MET 衛星 (CHAMP 及 SAC-C) 觀測折射率，模擬重要侵台颱風。由模擬發現，對登陸之颱風而言，折射率同化對於後期颱風的累積降水預報有明顯的改善當定量降雨客觀評估。本文僅介紹 2001 年納莉 Nari 個案。本個案該日全球有 158 點 GPS 觀測，有 4 點 CHAMP 及 SAC-C GPS 觀測點落於初始同化時窗的最外層模擬分析場。MM5 模擬顯示於初始時間加入 GPS 折射率同化，改善了登陸後的中心路徑。在降雨預報，顯示使用 GPS 折射率同化比僅無使用時之降雨模擬，在大雨分布上較接近實際觀測，24-48 h 小時之累積雨量模擬上預報技術得分較高，顯示 GPS 折射率資料之同化對颱風較大定量降雨模擬及預報具有正面效益。上述研究成果已刊登於國外期刊 (Huang et al. 2005)。

(4) GPS 折射率資料之 4DVAR 同化模擬

如前所言，4DVAR 由於須對數值模式及其伴隨模式來回積分，目前僅為學術研究 (微少個案) 上，離實際預報作業仍非常遙遠。使用 4DVAR 可以將實際模式預報與同化時窗區之所有觀測納入，因此對導正模式行為有直接之效果，但 4DVAR 非常耗時，需要充分的電腦資源。吳(2002)及 Wu et al. (2003) 使用 MM5-adjoint 對颱風結構發展及路徑進行 4DVAR 研究。在此研究，因其同化時窗區所有觀測皆為模式預報所產生，理論上若將此同解析度之所有模式變數資訊同化，則可以回復原最佳初始場。研究顯示當 30 公里解析度最佳

初始場(BIC)僅提供 210 公里之水氣觀測值，則無法回復至近似情況。若提供 30 公里之水氣觀測值，則雖然風場仍為 210 公里解析度，且缺乏強烈內核渦旋結構，但透過 4DVAR 及初始存在的較弱渦旋環流（如同綜觀分析場之特性），水氣仍能回復至近似 BIC 情況，此時所改善之近似 BIC 情況之初始水氣，對路徑預報也有進一步之改善（相對於無資料同化或 210 公里解析度之水氣觀測資料同化）。Huang et al. (2006)亦使用 MM5 4DVAR，同化福衛三號觀測資料，發現其修正之初始水氣與溫度分析，對 2006 年 9 月之珊珊（Shanshan）颱風之路徑及降雨預報均有正面影響，但由於虛擬渦旋之同化主宰主要影響，單純之 GPS 資料同化對一般天氣模擬預報之影響仍須在大量個案探討後方有較清晰之結論。

(5) 區域模式之 GPS 觀測同化—偏折角與溢相位

較高難度的運算子，如模擬 ray-tracing 方程， $d^2\bar{x}/d\tau^2 = n\bar{\nabla}n$ （ \bar{x} 為射線位置向量， τ 為射線長度距離參數），可以導出偏折角（Zou et al. 1999）。目前我國氣象局的全球模式已導入偏折角 3DVAR 同化模組，並作為平行作業使用。由於此法須由模式大氣提供折射指數以積分實際路徑，得出抵達 LEO 之偏折角，與實際 LEO 由 phase delay 導出之偏折角性質比較類似，事實上是較為準確的方法。Liu and Zou (2003)使用 NCEP 之全球模式進行 4DVAR 研究，將 GPS/MET 觀測之 837 個偏折角同化對全球預報模擬能力有所改善，特別是對南半球之預報而言。此顯示對傳統觀測探空資料愈缺乏地區，導入 GPS 掩星觀測有直接正面之效益。

然而在有限區域模式及模擬較高解析度時，由於模式分析場水平變化大，積分路徑變化十分敏感（須不斷疊代），此法之價值函數 J 有不易收斂之缺點。因此有鑑於此，美國及歐州預報中心皆不主張使用前述方法，目前已研發出簡化方法（Sokolovskiy et al. 2005），但係針對所謂溢相位（excess phase）， $S = \int v dl$ （ $v = n - 1$ ），沿特定射線路徑積分，但只積分一次，因此無需疊代、

亦無收斂之問題。目前可假設射線路徑為直線或為某一曲線，再由此溢相位值之 Abel 反演導出折射率。由於實際觀測之偏折角最大僅約 2 至 3 度，直接積分射線路徑方程所模擬 ray-tracing 亦指出實際影響偏折角僅於近地點附近之 600 公里半徑內之大氣。因此在相當好的近似下，可以假設射線為直線，此時十分容易由模式大氣直接解析出積分之總相位變化及其折射指數，由於所計算出之折射率已非局地折射率，因此與觀測之折射率本質相近，在同化時可以充分使用真正觀測資訊。

目前國內區域模式研究團隊已完成溢相位同化算子，並將之導入於 WRF 3DVAR。圖 5 為使用 WRF 模式對 Shanshan 颱風之 72 小時路徑預報，在初始場分析，使用 WRF 3DVAR 同化了 32 點的折射率資料。同化方法為 nonlocal operator 及 localized nonlocal operator（後者限制前者射線僅於掩星觀測點附近）。模擬結果顯示對本個案，GPS 資料的同化對颱風的路徑預報僅有些微影響。在雨量預報，有無同化時結果差異甚小，顯示對此颱風預報而言，其它資料的同化（如衛星反演風場）應同時考慮，以改善初始渦旋的強度之不足。

五、結語

台灣與美國共同合作的福爾摩沙衛星三號，命名 FORMOSAT-3/COSMIC，經多年不斷折衝努力，已順利於 2006 年 4 月 15 日於美國加州成功發射。福衛三號 6 顆低地球軌道（low-earth-orbit）之微衛星可以接收 28 顆全球定位 GPS 發射 1.58 及 1.23 千兆赫（GHz）頻率訊號，形成所謂星座掩星觀測（constellation occultation observations），每日可提供全球均勻分布的探空數目理想上可達 2500 個，目前實際反演出之高精確之大氣資料已超過 1500 個，透過衛星狀態調整及反演技術之最佳化，此數目正朝理想之上限邁進。此高密度之觀測實驗除將開創世界之首例，對我國衛星工業生根、技術發展與衛星元件製造能力之自我提昇亦有重大之助益。依此多衛星及酬載儀器（觀測電離層參數）所具功能特性，其主要目標著重在建立全球大氣重要參數之衛星即時觀測作業網，可以：(1) 增進全球及地區性天氣預報作

業之精確度；(2) 增進太空天氣之監控與預報能力及電離層動態監控等相關用途；(3) 提供氣候研究及全球變遷研究資料；(4) 提供地球重力及衛星軌道研究資料等。在此衛星發射之前，我國之科學研究團隊，已在國科會及太空中心的督導與支持之下，針對當前掩星觀測資料反演技術及同化模擬已完成必須之準備。本文除簡單介紹 FORMOSAT-3/COSMIC 計畫背景，整體研發目標及資料應用之重點，亦說明國內相關議題研究方法與重要成果，對國際此方面之研究發展，侷於專業領域，只選擇與我國大氣學門較具密切相關之項目，如反演技術、氣象預報之同化模擬研究進一步說明。

綜括來說，在天氣預報上，中央氣象局已成立 COSMIC 資料處理中心 (TACC) 來即時處理分發福衛三號 GPS 掩星觀測資料，並正積極進行其全球模式之三維變分 (3DVAR) 同化平行作業，導入偏折角或折射率進行預報。學術界業已完成區域模式 MM5 3DVAR 折射率同化技術，同時亦完成區域模式 WRF 3DVAR 溢相位同化，也利用 MM5 4DVAR 探討折射率同化對颱風預報的影響，相關研究工作也正由 GPS-SARC 中心負責整合持續推動進行。本文簡略介紹國內 FORMOSAT-3/COSMIC 計畫之主要氣象研究，顯示我國目前對大氣反演技術能力、全球及區域模式之掩星觀測同化與模擬皆已建立良好的基礎，科學研究成果可望逐步展現，同時顯示對即時天氣預報的積極效益。

誌謝

感謝國家實驗研究院前院長李羅權教授 (現任國立中央大學校長) 長期之支持及美國大學大氣研究聯盟主席 (UCAR) Dr. R. Anthes 提供圖文資料。美國 UCAR 的 COSMIC 中心主任郭英華博士提供我國氣象研究上之協助，亦在此致謝。本文報告多所依據過去 FORMOSAT-3/COSMIC 整合研究計畫、推動計畫以及 IOP 整合計畫，特別感謝 NSPO 的長期支持使相關研究工作得以順利推動，同時感謝參與 NSC 及 NSPO 專案委託計畫主持人吳俊傑教授、林博雄教授、劉說安教授、丘增杰教授、張忍成教授、滕春慈博士、林沛練教授、林松錦教授及嚴明鈺教授。最後，

感謝中央氣象局及所有參與研究單位之協助與合作。

參考文獻

- 黃清勇與朱延祥，2004：FORMOSAT-3&COSMIC科學研究發展簡介。「大氣科學」，**32**, 293-328。
- 黃清勇，2002：COSMIC資料驗證與短期天氣及氣候預報應用研究－總計畫暨子計畫。國科會太空計畫室專案委託計畫期末報告，17頁。
- 黃清勇，2004：COSMIC資料驗證與短期天氣及氣候預報應用研究－總計畫暨子計畫。國科會太空計畫室專案委託計畫期末報告，200頁。
- 劉說安，2002：COSMIC資料驗證與短期天氣及氣候預報應用研究－子計畫一：整合掩星觀測法與地表GPS觀測網-增進反演大氣參數精度。國科會太空計畫室專案委託計畫期末報告，26頁。
- 吳俊傑，2002：COSMIC資料驗證與短期天氣及氣候預報應用研究－子計畫二：GPS/MET資料同化及對天氣影響研究。國科會太空計畫室專案委託計畫期末報告，52頁。
- 張忍成，2002：COSMIC資料驗證與短期天氣及氣候預報應用研究－子計畫三：華衛三號GPS導出大氣折射資料的驗證與同化研究。國科會太空計畫室專案委託計畫期末報告，44頁。
- Anthes, R. A., 2000: An update on COSMIC and advances over GPS/MET. *Proceeding of COSMIC International Workshop*, Taipei, September 27-29, 2000, 1-17.
- Chang, J.-C., L.-B. Chu, C.-H. Lu, Y.-C. Chen, X. Zou, C.-H. Tseng, C.-T. Fong, W.-M. Chen, and M.-D. Cheng, 2006: Early results from assimilating FS-3 GPS RO data with CWB/GFS-3DVAR. FORMOSAT-3/COSMIC Workshop 2006 – Early Results and IOP Campaigns, Taipei, 28 Nov.~1. Dec., 2006.
- Huang, C.-Y., Y.-H. Kuo, S.-H. Chen and F. Vandenberghe, 2005: Improvements on typhoon forecast with assimilated GPS occultation refractivity. *Weather and Forecasting*, **20**, 931–953.

- Huang, C.-Y. , S.-Y. Chen, Y.-H. Kuo, Y.-R. Guo S., Sokolovskiy and S.-H. Chen, 2006:
 A 3DVAR and 4DVAR impact study for FORMOSAT-3 data on prediction of typhoons impinging Taiwan. FORMOSAT-3/COSMIC Workshop 2006 – Early Results and IOP Campaigns, Taipei, 28 Nov.~1. Dec., 2006.
- Kuo, Y.-H.,T.-K. Wee, S. Sokolovskiy, C. Rocken, W. Schreiner, D. Hunt, and R. A. Anthes, 2004: Inversion and error estimation of GPS radio occultation data. *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 507-531.
- , S. V. Sokolovskiy, R. A. Anthes and F.Vandenberghe, 2000: Assimilation of GPS radio occultation data for numerical weather prediction. *TAO*, **11**, 157-186.
- , X. Zou, and W. Huang, 1997: The impact of GPS data on the prediction of an extratropical cyclone: An observing system simulation experiment. *J. Dyn. Atmos. Ocean*, **27**, 413-439.
- , X. Zou, S.-J. Chen, Y.-R. Guo, W. Huang, R. Anthes, D. Hunt, M. Exner, C. Rocken, S. Sokolovskiy, 1998: A GPS/MET sounding through an intense upper-level front, *Bull. Amer. Met. Soc.*, **79**, 617-626.
- Kursinski, E. R., G. A. Hajj, S. S. Leroy, and B. Herman, 2000: The GPS radio occultation technique. *TAO*, **11**, 53-114.
- Lin, P.-L., J.-S. Hong, Y.-P. Chou , S.-T. Miou, 2006: Impact of FORMOSAT-3 GPS data assimilation on WRF real time regional weather prediction. FORMOSAT-3/COSMIC Workshop 2006 – Early Results and IOP Campaigns, Taipei, 28 Nov.~1. Dec., 2006.
- Lin, S.-C., Y.-T. Yen, C.-L. Wu, and Y.-J. Chou, 2006: A preliminary comparison of FORMOSAT-3 GPS radio occultation soundings with radiosondes. FORMOSAT-3/COSMIC Workshop 2006 – Early Results and IOP Campaigns, Taipei, 28 Nov.~1. Dec., 2006.
- Lin, T.-J., C. Hwang, and T.-P. Tseng, 2006: Temporal gravity field recovery using

- FORMOSAT-3/COSMIC kinematic orbit data. FORMOSAT-3/COSMIC Workshop 2006 – Early Results and IOP Campaigns, Taipei, 28 Nov.~1. Dec., 2006.
- Liou, Y.-A. and C.-Y. Huang, 2000: Active limb sounding of atmospheric refractivity, pressure, and temperature profiles from GPS occultation by a 3D vector analysis. *Proceeding of COSMIC International Workshop*, Taipei, September 27-29, 2000, 60-69.
- Liu, C.-H., 2006: The early results of FORMOSAT-3/COSMIC mission - The ionosphere. FORMOSAT-3/COSMIC Workshop 2006 – Early Results and IOP Campaigns, Taipei, 28 Nov.~1. Dec., 2006.
- Liu, H. and X. Zou, 2003: Improvements to GPS radio occultation ray-tracing model and their impacts on assimilation of bending angle. *J. Geophys. Res.*, **108 (D17)**, 4548, doi: 10.1029/2002JD003160.
- Parish, D. and J. Derber, 1992: The National Meteorological Center Spectral Statistical Interpolation analysis. *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 1747-1763.
- Schreiner, W. S., et al., Analysis and validation of GPS/MET radio occultation data in the ionosphere, *Radio Sci.*, 34, 949-966, 1999.
- Sokolovskiy, S., 2001: Modeling and inverting radio occultation signals in the moist troposphere. *Radio Sci.*, **36**, Number 3, 441-458.
- , C. Rocken, and A. Lowry, 2001: Use of GPS for estimation of bending angles of radio waves at low elevations. *Radio Science*, **36**, Number 3, 473-482.
- , Y.-H. Kuo, and W. Wang, 2005: Assessing the accuracy of linearized observation operator for assimilation of the Abel-retrieved refractivity: case simulation with high-resolution weather model. *Mon. Wea. Rev.*, in press.
- Terng, C.-T., T.-M. Leou, and C. Pan, 2006: The impact study of CWB non-hydrostatic limited area model (NFS) prediction with assimilation

- FORMOSAT-3 GPS/RO data. FORMOSAT-3/COSMIC Workshop 2006 – Early Results and IOP Campaigns, Taipei, 28 Nov.~1. Dec., 2006.
- Wang, C. Y., and Y. H. Chu, 2001: Interferometry investigations of blob-like sporadic E plasma irregularity using the Chung-Li VHF radar, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, **63**, 123-133
- Ware, R., M. Exner, D. Feng, M. Gorbunov, K. Hardy, B. Herman, Y. Kuo, T. Meehan, W. Melbourne, C. Rocken, W. Schreiner, S. Sokolovskiy, F. Solheim, X. Zou, R. Anthes, S. Businger, and K. Trenberth, 1996: GPS soundings of the atmosphere from low earth orbit: Preliminary results. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 19-40.
- Wu, C.-C., K.-H. Chou, Y.-H. Kuo, and W.-P. Huang, 2003: Observing-systems simulation experiments for tropical cyclone initialization and prediction based on four-Dimensional variational data assimilation. *Proceedings of 2003 ROCSAT-3/COSMIC Science Workshop*, Central Weather Bureau, Taipei, 9 pages.
- Yeh, W.-H., T.-C. Chiu, Y.-A. Liou, C.-Y. Huang, 2006: The influence of open loop on radio occultation data. FORMOSAT-3/COSMIC Workshop 2006 – Early Results and IOP Campaigns, Taipei, 28 Nov.~1. Dec., 2006.
- Zou, X. and X. Qingnong, 2000: Studies on the initialization and simulation of a mature hurricane using a variational bogus data assimilation scheme. *J. Atmos. Sci.*, **57**, 836-860.
- , X., B. Wang, H. Liu, R. A. Anthes, T. Matsumura, and Y.-J. Zhu, 2000: Use of GPS/MET refraction angles in 3D variational analysis. *Quarterly Journal Royal Meteorological Society*, **126**, 3013-3040.
- , X., F. Vandenberghe, B. Wang, M. E. Gorbunov, Y.-H. Kuo, S. Sokolovskiy, J. C. Chang, J. G. Sela, and R. Anthes, 1999: A raytracing operator and its adjoint for the use of GPS/MET refraction angle measurements. *Journal Geophysical Research*,

Atmospheres, **104**, 22,301-22,318.

——, Y.-H. Kuo, and Y.-R. Guo, 1995: Assimilation of atmospheric radio refractivity using a nonhydrostatic adjoint model. *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 2229-2249.

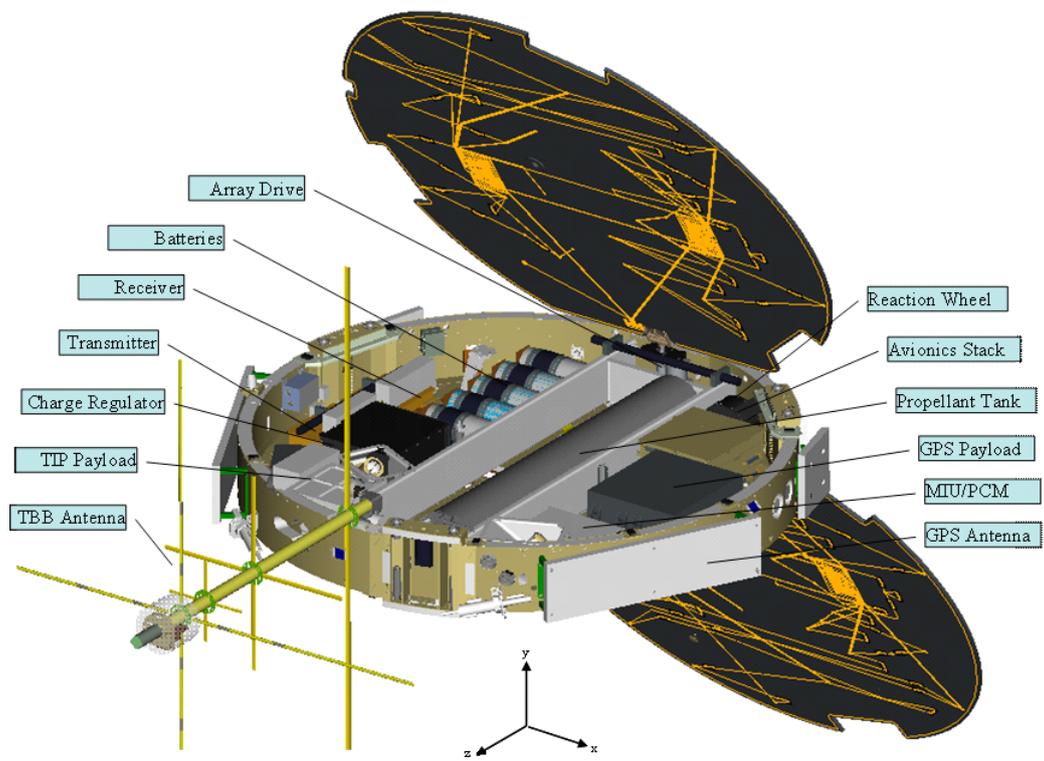


圖 1. 福衛三號微衛星之內部科學酬載。(國家太空中心提供)

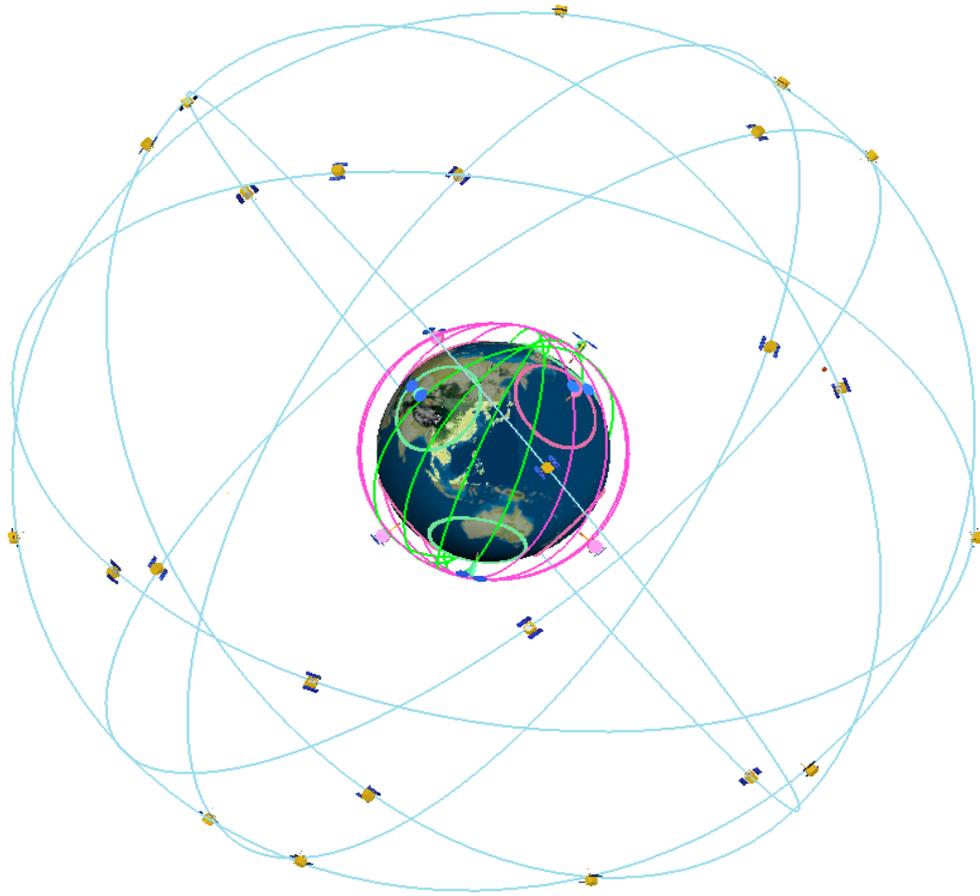


圖 2. 福衛三號 6 顆微衛星與 24 顆 GPS 的大地空間關係。(國家太空中心提供)

Occultation Locations for COSMIC, 6 S/C, 3 Planes, 24 Hrs

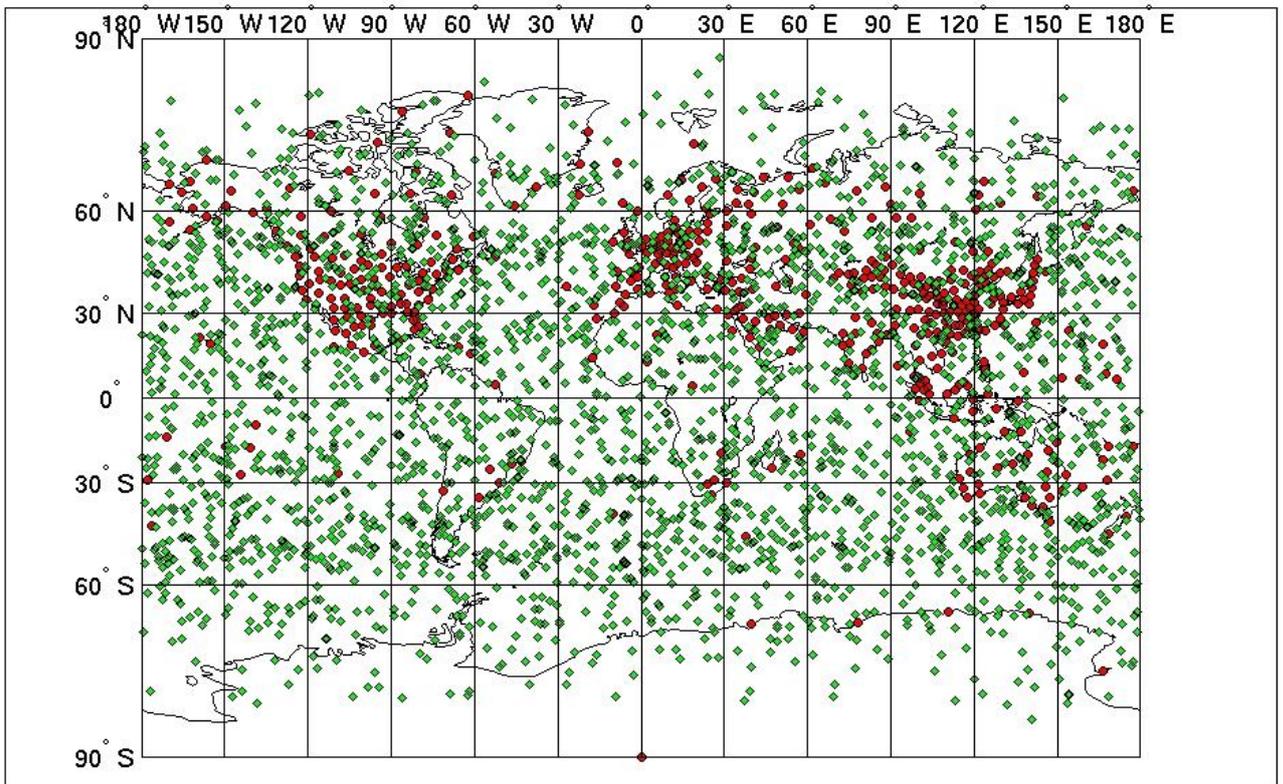


圖 3. 福衛三號計 6 顆微衛星每日所提供之全球觀測 (可達 2500 個探空)。
(取自 Anthes 2000)

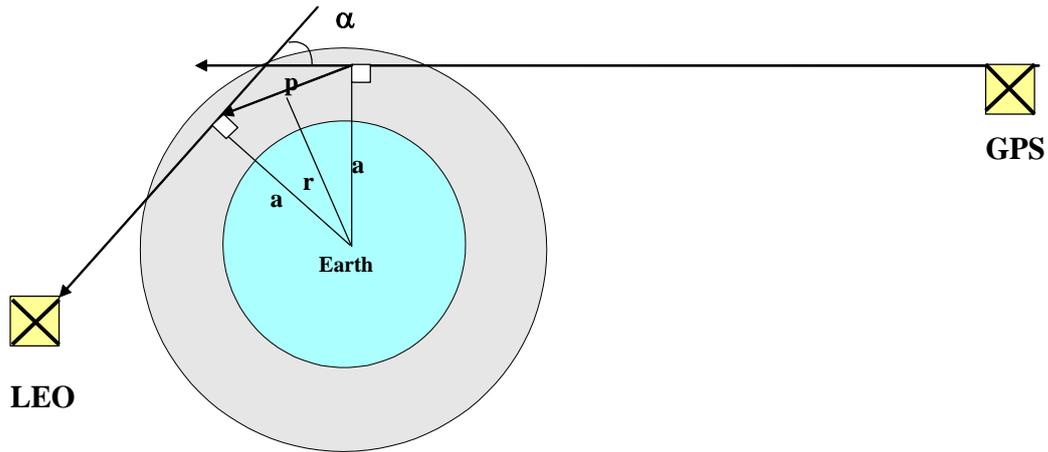


圖 4. 福衛三號 GPS 掩星觀測原理。GPS 衛星發射訊號，穿越大氣產生折射，再離開大氣為 LEO 衛星接收。 p 為近日點 perigee point (射線距地最近處)， a 為撞擊參數 (impact parameter)， α 為偏折角 (bending angle) 或彎角。

Typhoon ShanShan
Fest: 0.00 h
Terrain height AMSL

Init: 0000 UTC Thu 14 Sep 06
Valid: 0000 UTC Thu 14 Sep 06 (0800 LST Thu 14 Sep 06)

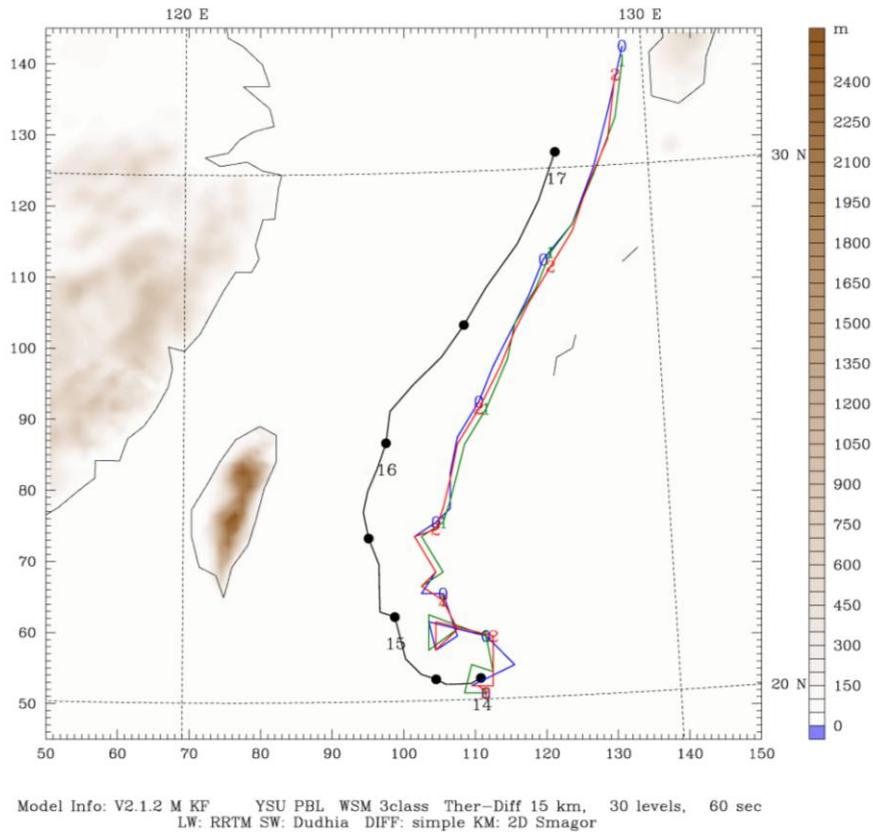


圖5. 最佳路徑（黑線夾點），使用WRF三層巢狀網域（最高5公里解析度）所模擬路徑，分別為個案實驗無GPS資料同化（藍色夾“0”），使用 localized nonlocal operator（綠色夾“1”）及 nonlocal operator（紅色夾“2”）同化溢相值。颱風中心位置為取自第二個網域（15公里解析度）模擬結果（每12小時一筆）。共有32個GPS掩星觀測點落於第一個網域（45公里解析度）可用於同化。