

FORMOSAT-3/COSMIC 科學研究簡介

黃清勇¹ 朱延祥²

¹ 國立中央大學大氣科學系

² 國立中央大學太空科學研究所

(中華民國九十三年六月二日收稿；中華民國九十三年十月三十日定稿)

摘 要

台灣與美郭共同合作的中華衛星三號，取名 ROCSAT-3/COSMIC 計畫，已近發射階段。最近，ROCSAT-3 已更名為 FORMOSAT-3 (即福爾摩沙衛星三號)。福爾摩沙衛星三號預計發射 6 顆低地球軌道 (low-earth-orbit) 之微衛星，接收 24 顆全球定位 GPS 發射 1.58 及 1.23 千兆赫 (GHz) 頻率訊號，此低軌道訊號接收衛星之接收網絡將形成所謂星座掩星觀測 (constellation occultation observations)，每日可提供全球觀測密度均勻分布的探空數目將多達 3000 個，此高密度之觀測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。在此衛星發射之前，我國之科學研究團隊，在國科會及太空計畫室的支助下，也針對當前掩星觀測資料反演技術及同化模擬及作業之準備，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，亦說明國內相關議題研究成果，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，如天氣預報及電離層研究，進一步說明。

關鍵詞：福爾摩沙三號/COSMIC，GPS，星座掩星觀測

一、前 言

目前在天際有 24 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，來求取與高空大氣相關之資訊，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，責由國家太空計畫室統籌規劃及執行，在擬定的十五年發展計畫，由中華衛星一號、二號及三號系列進行。其中中華衛星一號已成功發射並進行多項科學研究任務，中華二號為遙測資源衛星，目前已順利執行任務中，中華衛星三號(ROCSAT-3)則已由國科會主委代表我國與美國大學大氣研究聯盟(UCAR)與美國軌道科技公司(OSC)正式簽署合作證書，預計最遲於公元 2006 年初發射衛星 6 顆 GPS 訊號接收衛星，進行科學實驗研究。最近，ROCSAT-3 已更名為 FORMOSAT-3 (即福爾摩沙衛星三號)。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，來推動與規劃與福爾摩沙科學研究有關之任務。過去幾年曾參與福爾摩沙科學研究任務相關規劃與討論工作之學者專家甚多，兩位作者係擔任過為國科會福爾摩沙三號科研 COSMIC 推動計畫主持人及目前 NSPO 專案委託整合研究計畫主持人，對於福爾摩沙三號科學研究任務規劃及實際研發多所觸及，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。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。本文不再重覆已有之文章內容，在研究介紹上將以國內研發進展為主。

二、FORMOSAT-3/COSMIC 計畫背景與主旨

(一) 中華三號衛星 (FORMOSAT-3/COSMIC) 簡介

FORMOSAT-3 為 6 顆低軌道微衛星構成之星系，預計最遲於民國九十五年初前一次發射升空，並於半年內將 6 顆衛星分別調整至約 700~800 公里高不同的觀測作業軌道，以接收 24 顆 GPS 定位衛星發射的電訊。每顆衛星重量約為 40 公斤，將搭載三個科學酬載 (見圖 1)，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。中華三號衛星的科學研究經台灣與美國多次討論與整合規劃後，據衛星設計與觀測能力之本質，乃命名為 COSMIC (Constellation Observing System for

COSMIC Spacecraft

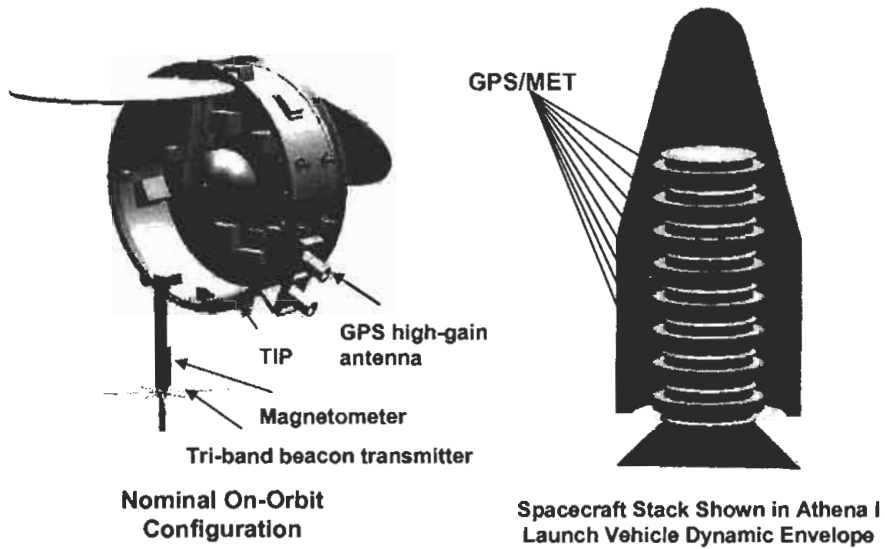


圖 1 微衛星之內部科學酬載儀器及火箭推進載具（可裝上 8 顆微衛星）。（太空計畫室提供）

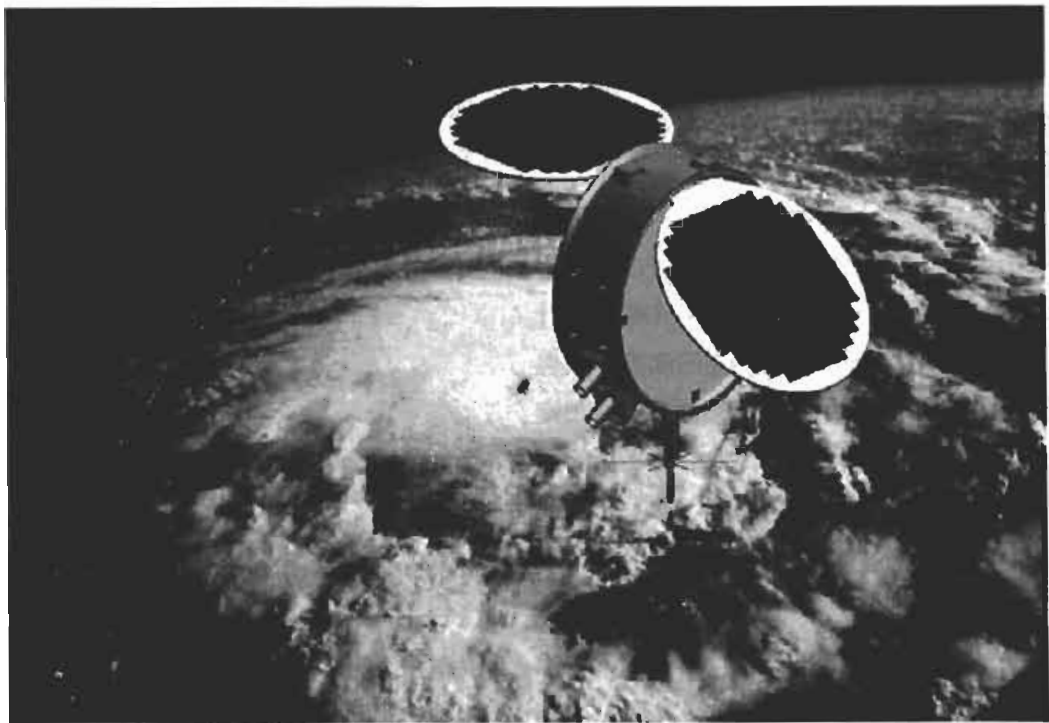


圖 2 福衛三號微衛星監測大氣情況（底下可見颱風及其眼心）。（太空計畫室提供）

Meteorology, Ionosphere and Climate) 計畫, 英文 constellation 原意為星座, 即有多衛星環繞地球守護之精神。台灣與美國共同合作的 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 2 為示意此華衛三號微衛星監測大氣情況, 例如, 由提供的水汽及溫度資訊, 對其下方颱風環流發展可更清楚的掌握, 進而改善天氣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計畫室(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 COSMIC 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(黃清勇主持)已整併於 NSPO 以專案委託計畫來推動執行(黃, 2002; 朱, 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 FORMOSAT-3/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。隨著全球掩星觀測氣象衛星的來臨, 可藉由全球掩星觀測, 提供輔助資料於氣象模式初始場, 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預報模式使用 FORMOSAT-3 資料後對於天氣預報能力

有所改善。FORMOSAT-3/COSMIC 計畫的重要任務與美國天氣研究計畫(USWRP)及台灣天氣研究計畫(TWRP) (Taiwan Weather Research Program)皆有相同的改善短期定量降水預報的積極目標, 而其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 Receiver)

FORMOSAT-3 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 24 顆 GPS 衛星 L1 (1.57542GHz) 及 L2 (1.2276GHz) 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 掩星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。

每顆 GPS 掩星衛星觀測之每日全球數目最佳時大約 600 個，估計 FORMOSAT-3 每一天至少可提供約 2500 至 3000 個，提供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，且相關資料以目前 UCAR 之處理速度，三小時內即可更新一次。這些資料對於區域性或全球性之數值天氣預報相當重要，因為傳統量測方法不易取得海面上之資料。此外由於 GPS 掩星衛星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 掩星衛星工作原理介紹

如前簡介所言，GPS 掩星衛星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 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，我們將於後面詳細介紹。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，自由電子密度或水氣含量等參數。

綜合而言，FORMOSAT-3/COSMIC 計畫所能量測之大氣、電離層以及其它參數為

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

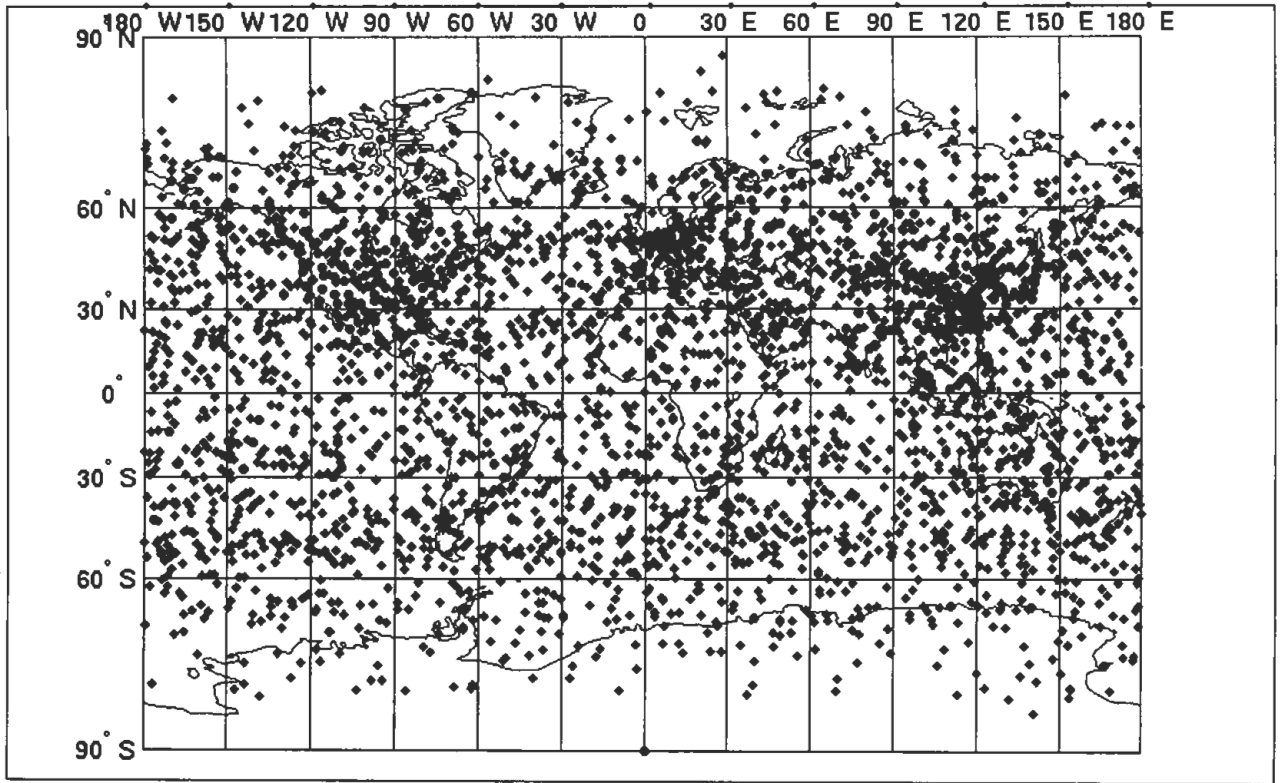


圖 3 福衛三號計 6 顆微衛星每日所提供之全球觀測 (可達 3000 個探空)。
(取自 Anthes 2000)

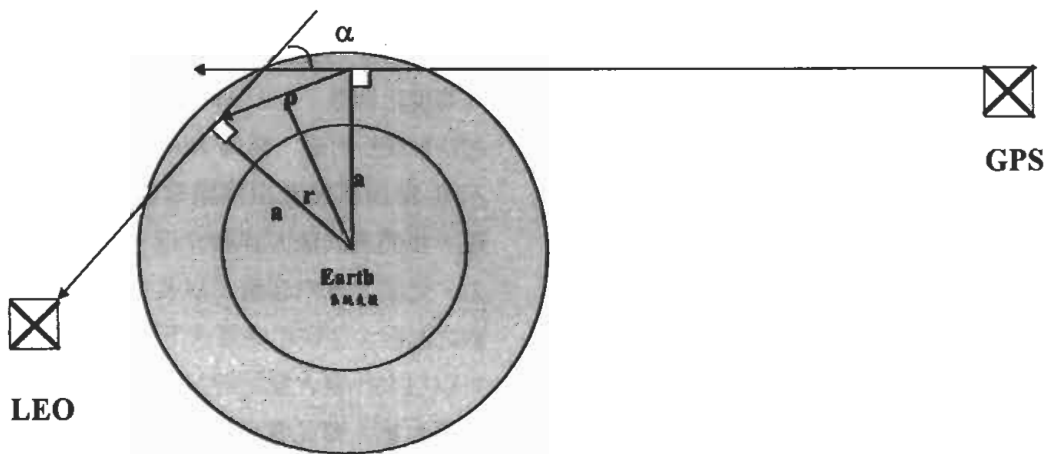


圖 4 福衛三號 GPS 掩星觀測原理。GPS 衛星發射訊號，穿越大氣產生折射，再離開大氣為 LEO 衛星接收。 p 為近日點 perigee point (射線距地最近處)， a 為碰撞參數 (impact parameter)， α 為偏折角 (bending angle) 或彎角。

- (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 掩星衛星)及地面 GPS 接受站亦可進行重力場與軌道計算，國家太空計畫室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，三個領域亦有合作及整合的必要，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 FORMOSAT-3 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。

目前此 COSMIC 整合研究計畫已由國家太空計畫室以專案委託計畫來執行研究任務。

(二) 台灣 FORMOSAT-3/COSMIC 研究目標

如前所言，台灣 FORMOSAT-3/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，值得在此簡述我方有關福衛三號科學研究導向：

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
- FORMOSAT-3 大氣層參數反演與驗證
- 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對區域氣候預報模擬之影響

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 年初發射福衛三號之前，應積極進行研究 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，目前已成功建置乾絕熱版的全球波譜伴隨 (adjoint) 模式，並進行轉移至作業模式，此同化採用美國 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，黃 (2002) 已將 GPS 掩星觀測折射率資料同化於 MM5 有限差分網格點之 3DVAR，將於稍後再進一步介紹。

電離層研究—目標旨在結合現有全球電離層地面觀測及未來福衛三號資料，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。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 (未來福衛三號資料模擬) 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
- 福衛三號衛星精密軌道計算
- 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。

首先將福衛三號衛星接收之 GPS 資料與地面 GPS 追蹤站的資料結合以進行聯合計算。在聯合解算之過程中，除可藉由觀測量的差分計算模式以消除福衛三號 GPS 觀測量所含有之不

可忽視的 GPS 軌道及時鐘誤差等系統性誤差以大幅提昇觀測量精度之外，地面監測網所提供之區域性（台灣及週邊地區）即時水汽資訊，並可用於校正 GPS 掩蔽觀測所得之氣象成果及加強其垂直分量之精度與時間解析度，且聯合解算分析所得到之精確水汽及電離層全電子含量資訊可反饋應用於台灣地區高密度氣象與地震 GPS 監測網之精密計算。

福衛三號計畫達成其科學目標的先決條件之一為必須精確求得衛星之精密軌道資訊。對於氣象天氣預報等研究項目而言，福衛三號軌道的精度要求將為 1 公尺的等級，並且將要求即時性求解。而對於重力場以及地球內部 670 公里不連續面之結構等研究項目而言，後處理之福衛三號軌道的精度將進一步被要求至數十公分之等級。因此需探討軌道科學相關之研究主題，以及建立台灣本身之精密衛星軌道計算軟體，進行福衛三號之精密軌道計算。

地球的質量因大氣流動、海洋環流、地下水水位變化及融冰等因素而產生時間及空間上的變化，進而引起地球重力場的變化。重力場變化則直接引起衛星軌道擾動，且改變地球自轉速率及全球高程基準等。反之，若以 GPS 資料計算軌道擾動或其加速度則可反求重力場變化，進而推估地球質量之時空變化。在適當資料輔助下，更可分別推估大氣結構，海洋質量或地下水水位等之變化，對瞭解全球變遷有相當之幫助。福衛三號因有 6 個衛星，其空間觀測幾何密度甚高，非常適合重力場時間序列之推求。另在 670 公里深的不連續面研究，瞭解其時空分佈將可以對地球板塊組成與地下構造的動態變化有更佳的掌握。對於地殼隱沒以每年 8-12 公分的速度向軟流圈延伸所造成的變化，將會影響地表上的重力觀測值，進而影響於地

球上空的衛星軌道。

四、目前研究現況

在太空計畫室的主導與相關研究團隊的努力下，雖然在 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。迄今為止，國內外主要研究已有相當的進展及成果。本文主旨不擬重覆介紹已有之文章內容及國外主要研究成果，而主要在介紹國內目前的研發成果。以下，將進一步介紹國內整合計畫研究成果及目前及未來準備進行之研究重點。

（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 × N),

O : 觀測誤差協方差矩陣 (M × 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_a 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：

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

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/ m^3)， 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(見圖5)。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，經嚴格測試後，即可進行作業預報。

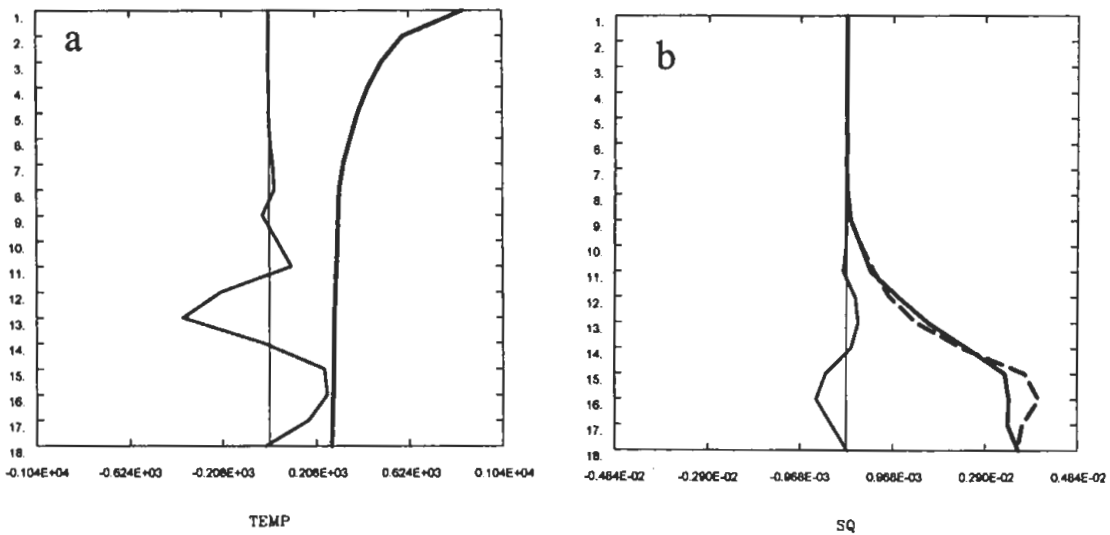


圖5 四維變分分析前後模式垂直分佈曲線，(a) 溫度，(b) 濕度。虛線為未調整前，實線為調整後。中央直黑線代表0值線。0值線附近為修正量大小曲線，(a)中的修正曲線已乘上1000倍。(取自張，2002)

(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(圖6)，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

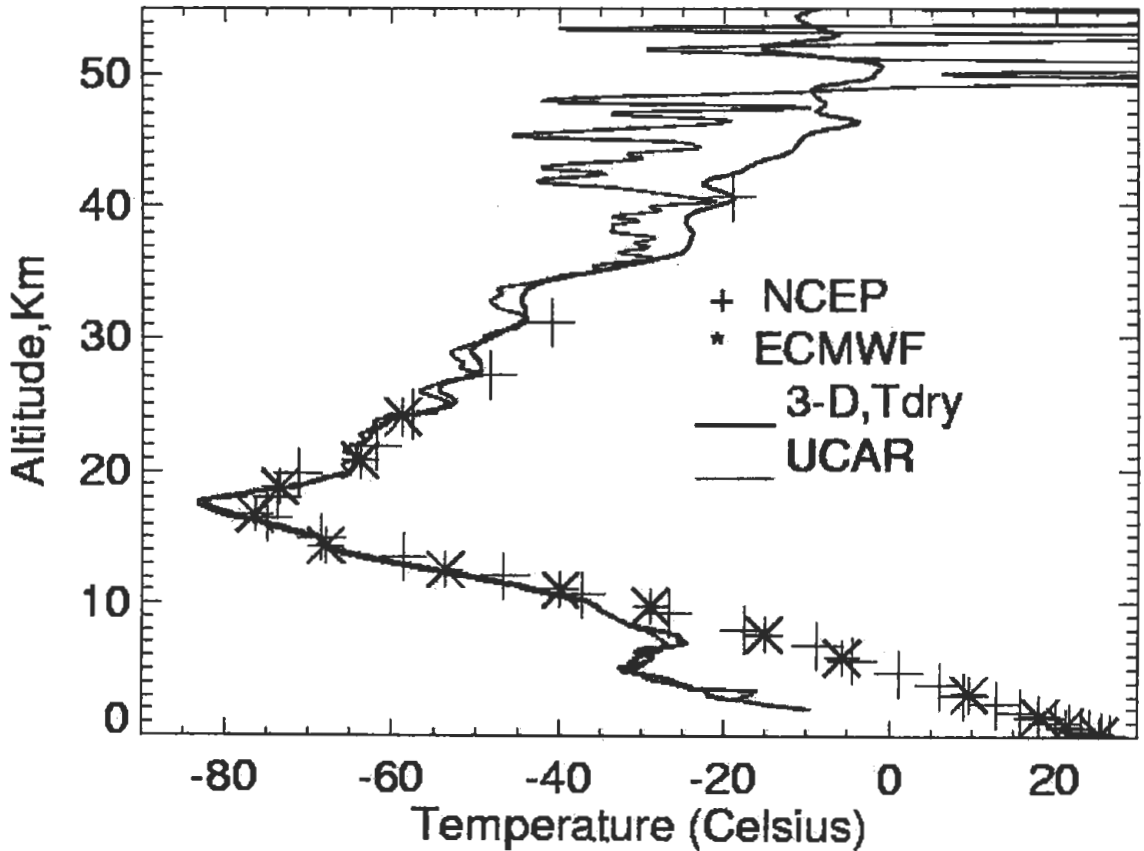


圖 6 由三維向量分析方法求得偏折角再經 Abel 反演出折射率假設乾大氣後之溫度垂直分布。
(取自 Liou and Huang 2000)

會和中性大氣層)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)。

(3) GPS 折射率資料之 3DVAR 同化模擬

目前已完成 GPS 折射率(refractivity)同化模組於 MM5 3DVAR 預報系統(如中大大氣系)及 MM5 4DVAR 預報系統(如台大大氣系)，

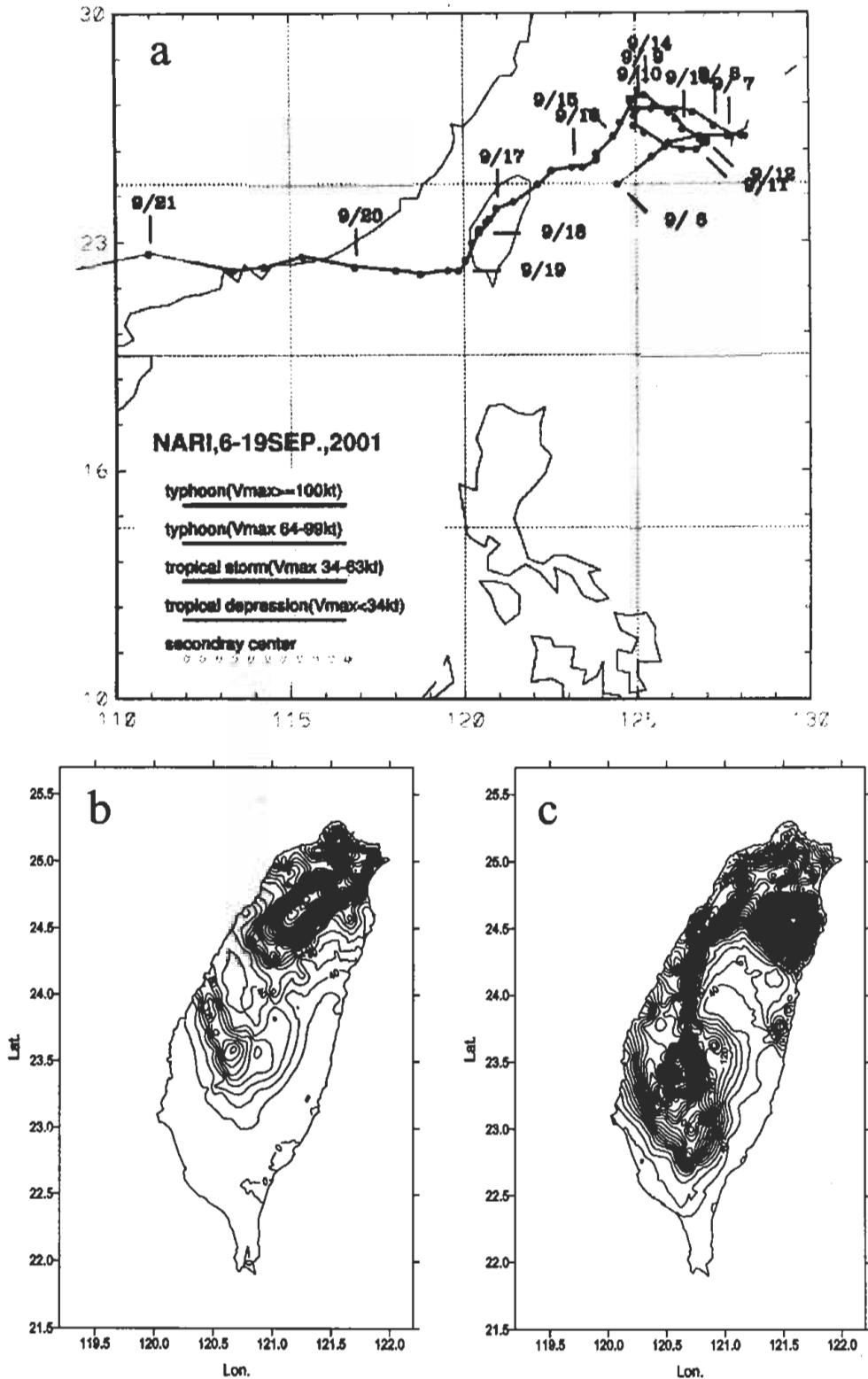


圖 7 (a) 中央氣象局之納莉颱風 Nari 最佳路徑圖，及觀測累積降雨量 (mm) 於 (b) 0000-2400 UTC 16 September 2001 (712 mm)，與 (c) 0000-2400 UTC 17 September 2001 (1144 mm)。雨量最大值示於括號內。

以了解 GPS 上游資料同化技術及其對颱風模擬效果。黃 (2004) 使用 MM5 3DVAR 同化目前兩顆 GPS 掩星衛星 (CHAMP 及 SAC-C) 觀測折射率, 模擬重要侵台颱風 (納莉 2001, 利奇馬 2001, 納克莉 2002, 辛樂克 2002, 杜鵑 2003 等)。

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 24 小時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 Nari 個案。本個案該日全球有 158 點 GPS 觀測, 所幸仍有 4 點 CHAMP 及 SAC-C GPS 觀測點落於

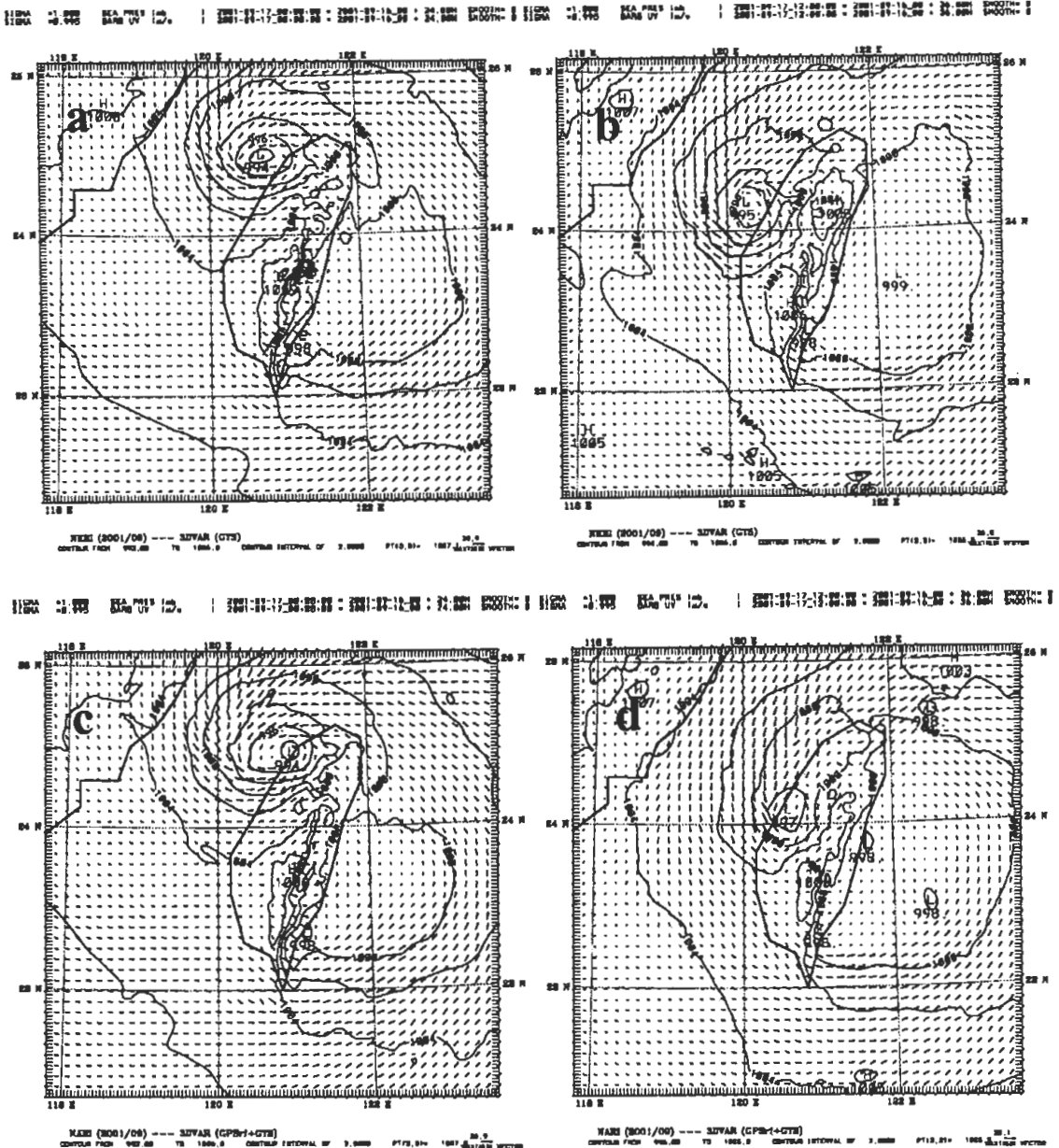


圖 8 納莉颱風 5 公里解析度之 MM5 模擬。未含 GPS 折射率同化於模擬時間(a) 24 h 與 (b) 36 h 之海平面氣壓 (hPa) 及近地面水平風場 (m s⁻¹)，(c)及(d)同(a)及(b) 但為含 GPS 折射率同化。

初始同化時窗 (0000UTC 16 September 2001 加減 3 小時) 的最外層模擬分析場。圖 7 為 Nari 颱風之最佳路徑圖及於台灣地區之累積雨量圖 (0-24 h 及 24-48 h)，圖 8 為其 MM5 模擬 5 公

里解析度之地面氣壓場與近地風場 (無 GPS 與有 GPS 資料同化)，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。圖 9 為其 MM5 模擬之 24 小時累積雨量圖 (無 GPS 與

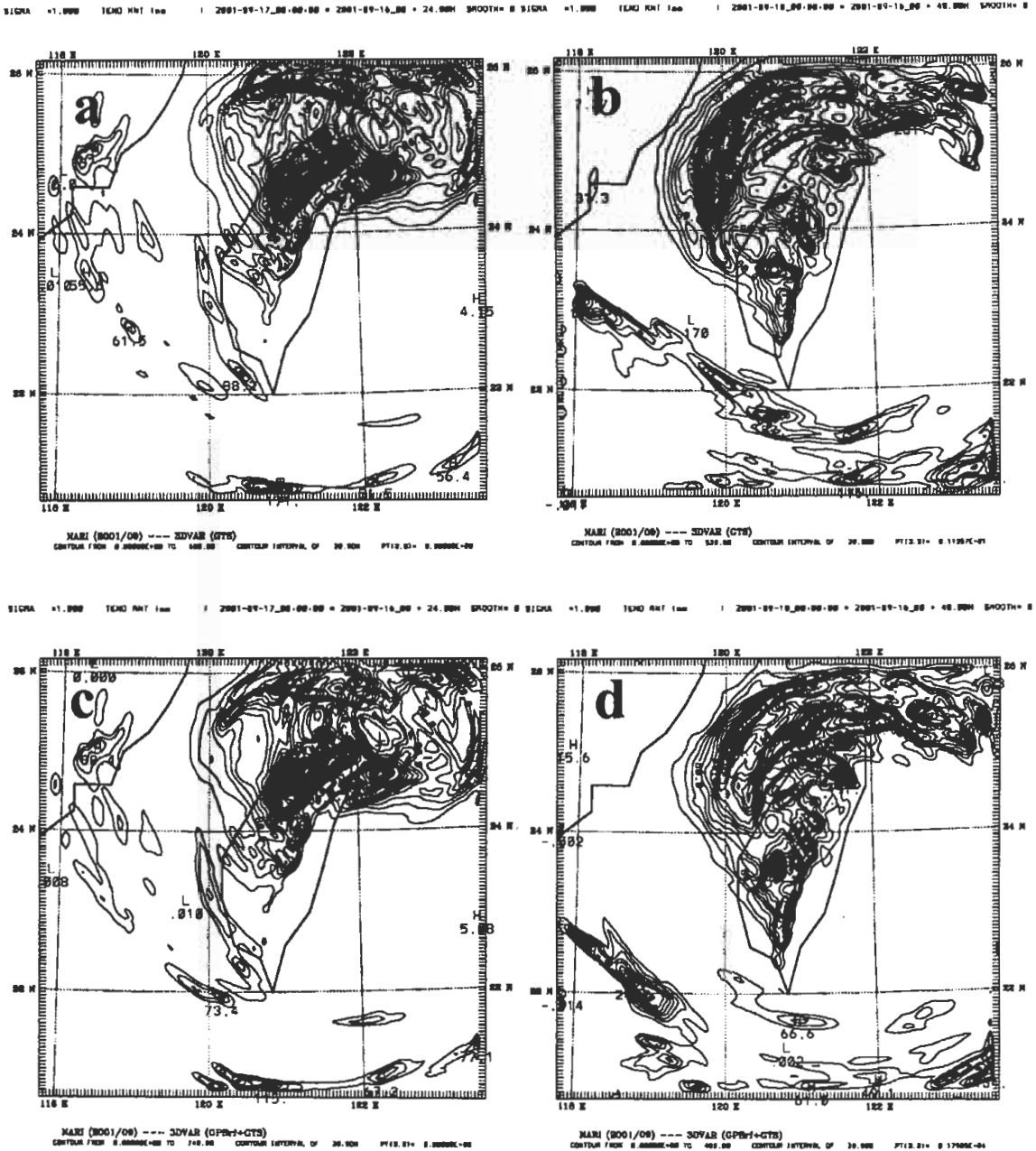


圖 9 納莉颱風 5 公里解析度之 MM5 模擬 24 小時累積雨量。未含 GPS 折射率同化於模擬時間(a) 0000-2400 UTC 16 September 2001 與 (b) 0000-2400 UTC 17 September 2001，(c)及(d)同(a)及(b)但為含 GPS 折射率同化。等值線間距為 20 mm。

有 GPS 資料同化)，主要降雨區集中於北半部、宜蘭及嘉南一帶。MM5 模式有相當不錯的模擬結果，但進一步比較，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 threat score 得分較高，rms 誤差亦較小，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。上述研究成果將刊登於國外期刊（見 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 的 OSSE 研究。在此 OSSE 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。圖 10 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

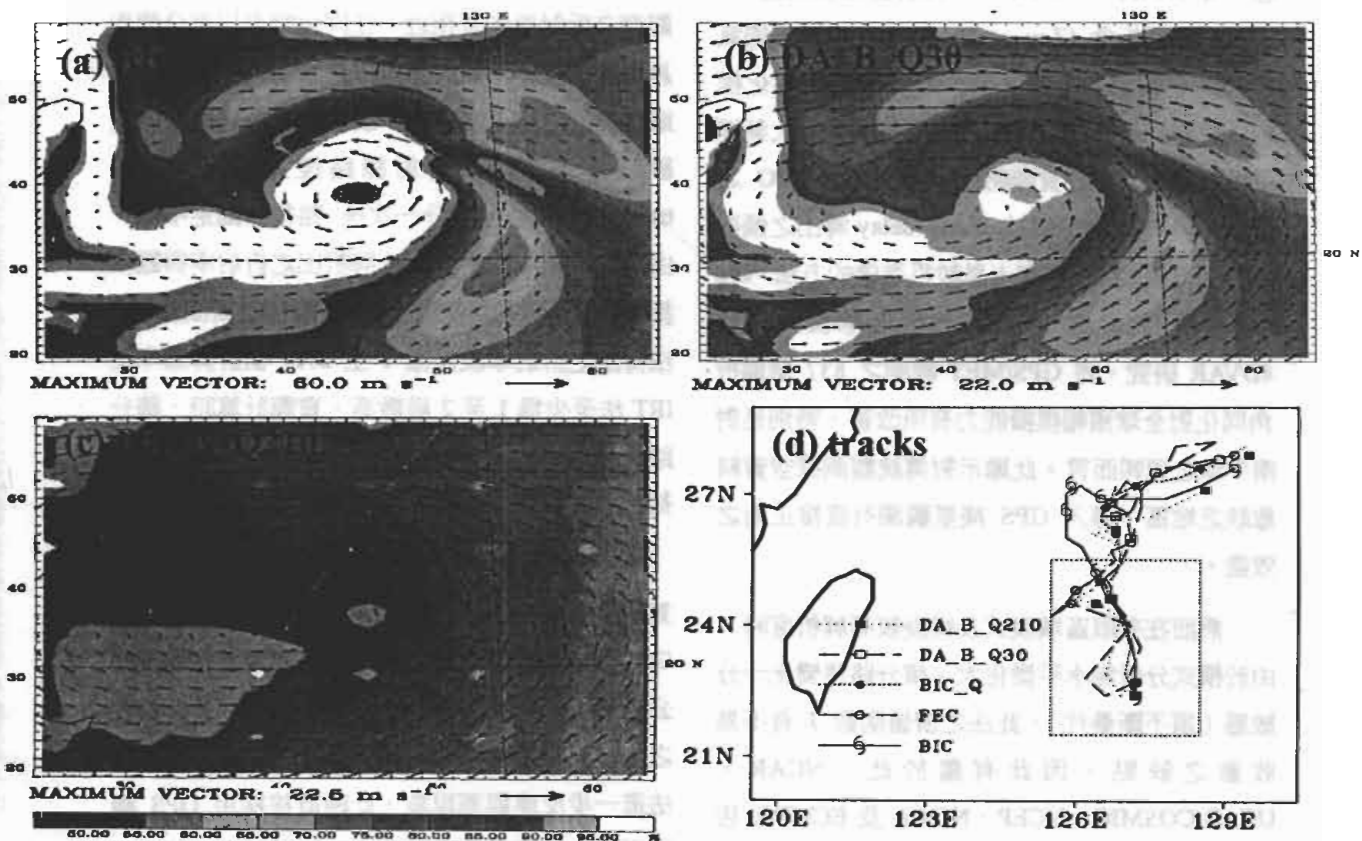


圖 10 MM5-adjoint 4DVAR 同化模擬結果 (a) 30 公里解析度之最佳初始場 (BIC)，(b) 同化 30 公里解析度之水汽場之模擬結果 DA_B_Q30，(c) 同(b)但同化 210 公里解析度之水汽場 DA_B_Q210，(d) 模擬路徑，FEC 表示假 EC210 公里解析度 (低標) 及 BIC (高標)。(取自吳，2002)

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。圖 10 顯示此時所改善之近似 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）。因此 4DVAR 雖為學術研究上之主要議題，在模擬能力之改進空間與方向上可以提供參考比較。

(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），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，NCAR、UCAR/COSMIC、NCEP、NOAA 及 ECMWF 皆不主張使用前述 iterative ray-tracing (IRT)，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，但積分一次，因此無需疊代、亦無收斂之問題。目前有所謂 straightline ray-tracing (SRT) 假設射線路徑為直線，或 curved-line ray-tracing (CRT) 方法假設射線路徑為某一曲線，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 (SRT)，如圖 11 所示，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。但實際射線是彎曲的，當射線沿途有較大之水平變化時，就必須採用近似實際射線路徑，直接積分射線路徑方程模擬 ray-tracing，但此法僅積分一次後，路徑即固定不變。由圖 11 顯示此由 SRT 法解析出之折射率與觀測折射率十分接近，在近地面時，與實際觀測及 IRT 法得出之折射率誤差僅 1 至 2%，但計算效率比 IRT 法至少為 1 至 2 級數高。實際計算時，積分路徑並不須抵達 GPS 或 LEO 衛星兩方，只要涵括實質影響之大氣部分即可。

Sokolovskiy et al. (2005) 使用 WRF 模式計算局地折射率、SRT 折射率及 CRT 折射率並與 GPS 觀測折射率比較，發現在模式解析度約 300 公里以上時，三者 (SRT、CRT 及 IRT) 與觀測之誤差非常接近，表示使用任何 ray-tracing 已無法進一步反應觀測現象，此時直接採用 GPS 觀測反演的折射率來同化模式大氣折射率，基本上有相同的效果。但當模式解析度在 5 公里以下時，CRT 折射率可以減少 SRT 折射率與 GPS 觀

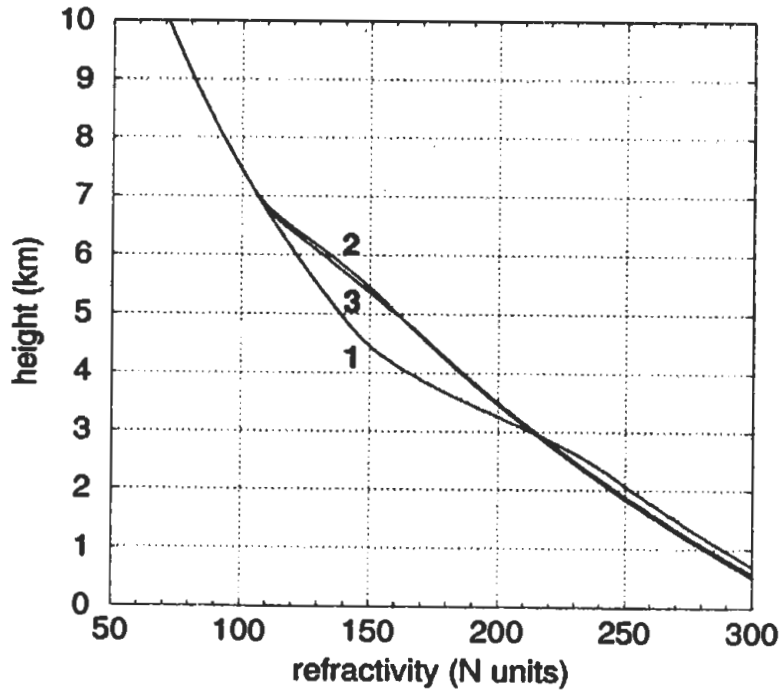


圖 11 局地折射率(line 1), Abel 反演之折射率(line 2), 及與使用直現射線路徑反演之折射率 (line 3)。
(取自 Sokolovskiy et al. 2005)

測折射率之誤差為十分之一。因此，SRT 折射率法仍不十分適合於非常高解析度的模式模擬。然而，上述僅為 forward operator 的比較，當真正同化時，tangent linear operator 及 adjoint operator 之效果評估（表現、效率、精確度），須要同化模組完成後進行細部實驗比較才能得知。

由以上之說明，發展 3DVAR SRT 溢相位同化所需之 forward model 及其 adjoint model 為目前 NCAR 及我國研發之重點，預計可於衛星發射前完成。目前已完成射線路徑積分方程 IRT 偏折角的 forward model，如圖 12 所示，為使用 Nari 個案模式積分 12 小時結果（1200 UTC 16 September 2001）為分析大氣，計算於板橋上空由射線路徑積分方程 IRT 求得偏折角再經 Abel 反演所得之折射率與模式局地折射率之比較，顯示此 Abel 折射率，無論使用模擬網域 domain 1

（45 公里解析度）或 domain 2（15 公里解析度），在較近地面所代表之平均折射率已無法充分反應水平梯度之影響，其最大相對誤差約 10%，在某些地點可達 15%。此時直接採用偏折角同化在效益上有其意義，然而此法在 domain 3（5 公里解析度），受侷於網域過小，並無法積分求出最後的偏折角。因此對區域模式而言，採用何種簡化模組，如 CRT 或 IRT 偏折角同化或 SRT 溢相位同化，在作業上需要進一步評估，但上述模組除具有高度之準確度外，同時皆可配合即時同化作業預報之要求，為目前積極研發完成之任務。

（二）掩星資料反演與電離層研究

如前所述，GPS 掩星衛星系統是利用低軌衛星接收 GPS 衛星的雙頻載波相位訊號，經由遮蔽現象來觀測地球大氣層與電離層的各项參數。目前 UCAR 用以反演電離層電子密度的方

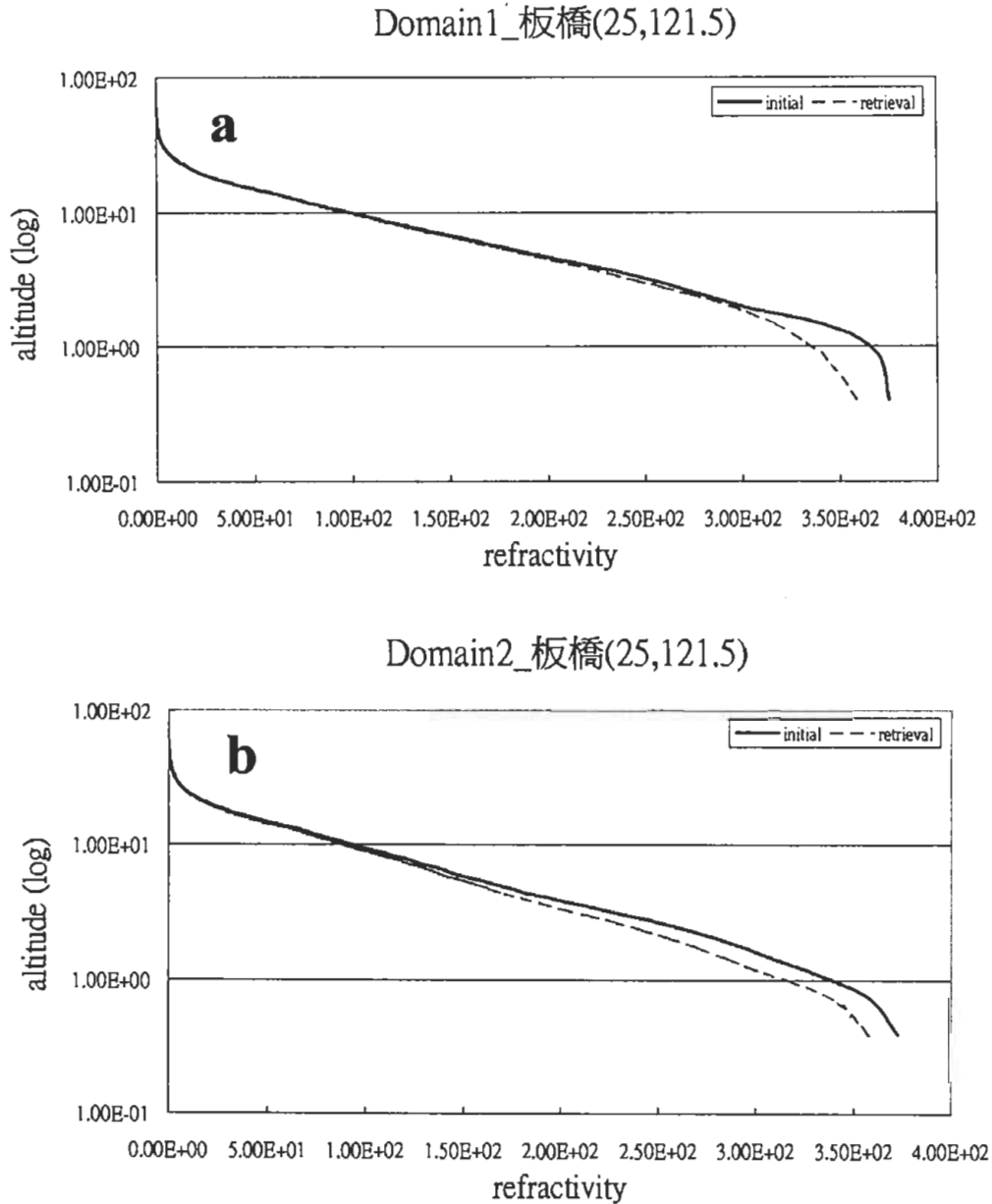


圖 12 納莉颱風個案於模擬時間 1200 UTC 16 September 2001 於板橋之模式局地折射率(實線)，與使用射線路徑積分方程求取偏折角再由 Abel 反演之折射率(虛線) (a) domain 1 (45-km 解析度)，(b) domain 2 (15-km 解析度)。

法，最主要利用觀測得到的 GPS 電波相位或虛擬距離(Pseudo range)資料，透過偏折角度或全電子含量的計算，藉由 Abel 積分轉換，反演成電子密度隨高度的分佈 (Hajj and Romans 1998;

Hajj et al. 2000; Kursinski et al. 1997; Schreiner et al. 1999; Ware et al. 1996; Zou et al. 1995)。然而，當 GPS 掩星遮蔽觀測在經過電離層不規則或是當低空遮蔽觀測時(高度約小於 5 公里)，由於

多路徑電波傳播(multi-path propagation)效應產生電波干涉現象，造成低軌衛星所接收的相位值不準確，進而影響反演的電離層電子密度或大氣層參數準確性。為解決此問題，最近日本及俄國科學家(Igarashi et al. 2000)發展出無線電波主波分析法(Radio Holography Method)，利用 GPS 信號相位與信號強度資訊，以避開多重路徑傳播效應的影響。除此之外，相屏法(Phase Screen Method) (Sokolovskiy 2000)與向後傳播法(Back-Propagation Method) (Mortensen et al. 1999)亦用來進行 GPS/掩星衛星遮蔽觀測的反演。以下介紹如何根據 GPS 衛星以及低軌道衛星的軌道參數與移動速度，利用 Abel 積分轉換法進行遮蔽觀測的反演理論。

(1) 由衛星軌道資料估算電波射線偏折角

由圖 4 可清楚知道，由於 GPS 衛星和 LEO 衛星在軌道高度上的差異，使得當 GPS 衛星發射 GPS 信號到 LEO 衛星時，因電離層和低層大氣層的折射指數的作用，使得 GPS 電波在傳播路徑上發生折射，最後造成到達低軌道衛星的 GPS 電波路徑與原入射路徑產生一偏折角度。值得注意的是，在 100 公里上空至低軌衛星高度（約 800 公里）處，電波傳播的偏折最主要受到電離層影響。由於受到電離層電子密度隨高度分布的作用，導致 GPS 電波路徑在電離層 F 層最高電子密度以上是向上偏折，而在電離層 F 層最高電子密度以下則轉成向下的偏折。有鑑於此，在精密計算 GPS 電波受大氣折射指數作用所產生的總折角時，電離層的向上偏折效應必須考慮。

假設 n_R 和 n_T 分別表示接收衛星及發射衛星處折射係數，依據電波傳播原理，接收信號的卜勒頻移量(Doppler shift)， Δf_i ，為

$$\frac{\Delta f_i}{f_i} = \frac{\left(\frac{v_R^i}{n_R} + \frac{v_T^i}{n_T} \right)}{C} \quad (3)$$

其中 v_R^i 和 v_T^i 分別表示接收衛星及發射衛星速度在電波傳播方向的分量， C 代表光速，而 i 可是 1 或 2 分別表示 GPS 訊號中頻率為 L1 與 L2 的電波。若 ψ_i^R 表示接收電波相位（單位為波長），則電波傳播總相位長則為 $L_i = \lambda_i (f_i t - \psi_i^R)$ ，使得

$$\frac{f_i}{C} \frac{dL_i}{dt} = -\Delta f_i = f_i - f_R \quad (4)$$

以公式(3) 代入公式 (4)，我們可得

$$\frac{dL_i}{dt} = -\left(\frac{v_R}{n_R} + \frac{v_T}{n_T} \right) \quad (5)$$

在球形對稱的假設下，我們可得

$$\begin{aligned} \frac{dL_i}{dt} = & v_T^r \cos \phi_T^i + v_T^\theta \sin \phi_T^i + v_R^r \cos \phi_R^i \\ & - v_R^\theta \sin \phi_R^i \end{aligned} \quad (6)$$

及

$$r_T \sin \phi_T^i = r_R \sin \phi_R^i = a \quad (7)$$

由(6)與(7)式，可解出兩未知值 ψ_R^i 和 ψ_T^i ，而傳播折角 α^i 則為

$$\alpha^i = \phi_T^i + \phi_R^i + \psi - \pi \quad (8)$$

其中 ψ 是發射及接收衛星與地心之間夾角，可由衛星軌道參數中精確求出。

GPS 電波的偏折角得到後，可以利用 Abel 轉換計算出大氣折射率 N 。令發射及接收衛星電波傳播途徑及衛星與地球地心連線所形成的夾角為 ψ_T^i 和 ψ_R^i ，可分別表示為

$$\begin{aligned} \phi_T^i &= \phi_T^0 + \delta_T^i \\ \phi_R^i &= \phi_R^0 + \delta_R^i \end{aligned} \quad (9)$$

其中 ψ_T^0 和 ψ_R^0 為電離層和大氣層均不存在（亦即在真空狀態，電波傳播路徑為直線情況下）時，電波傳播路徑及衛星與地球地心連線所形成的夾角，而 δ_T^i 和 δ_R^i ，分別代表兩差量。在真空狀態下，由式(6)，(7)及(8)，我們可以得到

$$\frac{d\Delta L_i}{dt} = v_T^r [\cos(\phi_T^0 + \delta_T^i) - \cos\phi_T^0] + v_T^\theta [\sin(\phi_T^0 + \delta_T^i) - \sin\phi_T^0] + \quad (11a)$$

$$\text{及} \quad v_R^r [\cos(\phi_R^0 + \delta_R^i) - \cos\phi_R^0] + v_R^\theta [\sin(\phi_R^0 + \delta_R^i) - \sin\phi_R^0]$$

$$\begin{aligned} r_T [\sin(\phi_T^0 + \delta_T^i) - \sin\phi_T^0] - r_R [\sin(\phi_R^0 + \delta_R^i) - \sin\phi_R^0] = 0 \\ -\alpha^i + \delta_T^i + \delta_R^i = 0 \end{aligned} \quad (11b)$$

因為 δ_T^i 和 δ_R^i 遠小於 ψ_T^0 和 ψ_R^0 ，經公式展開我們可得

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta L_i}{dt} &= A\delta_T^i + B\delta_R^i \\ 0 &= C\delta_T^i - D\delta_R^i \\ \alpha^i &= \delta_T^i + \delta_R^i \end{aligned} \quad (12)$$

其中

$$\begin{aligned} A &= -v_T^r \sin\phi_T^0 + v_T^\theta \cos\phi_T^0 \\ B &= -v_R^r \sin\phi_R^0 - v_R^\theta \cos\phi_R^0 \\ C &= r_T \cos\phi_T^0 \\ D &= r_R \cos\phi_R^0 \end{aligned} \quad (13)$$

以上方程式組中的 $d\Delta L_i/dt$ ， A 、 B 、 C 和 D 值是可由 GPS/MET 衛星軌道資料與 GPS 訊號資訊中求出。由式(12)與(13)可解出 δ_T^i 、 δ_R^i 和 α^i ，但實際上 α^i 和 $d\Delta L_i/dt$ 係成線性關係如下

$$\begin{aligned} \frac{dL_0}{dt} &= v_T^r \cos\phi_T^0 + v_T^\theta \sin\phi_T^0 + v_R^r \cos\phi_R^0 - v_R^\theta \sin\phi_R^0 \\ r_T \sin\phi_T^0 - r_R \sin\phi_R^0 &= 0 \\ \alpha^0 &= \phi_T^0 + \phi_R^0 + \psi - \pi = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

其中 dL_0/dt 就是真空狀態中兩衛星電波傳播的都卜勒頻移值（ L_0 表示兩衛星之間距離）。由 $\Delta L_i = L_i - L_0$ ，我們可得

$$\alpha^i = \frac{C + D}{AD + BC} \frac{d\Delta L_i}{dt} \quad (14)$$

同時 $d\Delta L_i \propto 1/(f_i^2)$ ，使得

$$\log_{10} \alpha_1 - \log_{10} \alpha_2 = \log_{10} \left(\frac{f_2^2}{f_1^2} \right) = -0.22 \quad (15)$$

其中 $f_1=1575.42\text{MHz}$ 而 $f_2=1227.6\text{MHz}$ 。利用式(15)可以檢驗計算所得 GPS 電波傳播折角是否正確。

(2) 大氣折射指數之反演—Abel 轉換的應用

當 GPS 衛星訊號穿過電離層時，電波射線路徑(ray path)將會受到電離層自由電子密度的影響而發生偏折現象，如圖 13 所示。在球對稱的前提下，亦即大氣折射指數僅為距離 r 的函數，電波射線路徑將受到 Bouguer's 定律的支配。換言之，位於電波射線路徑上任何一點的位置向量

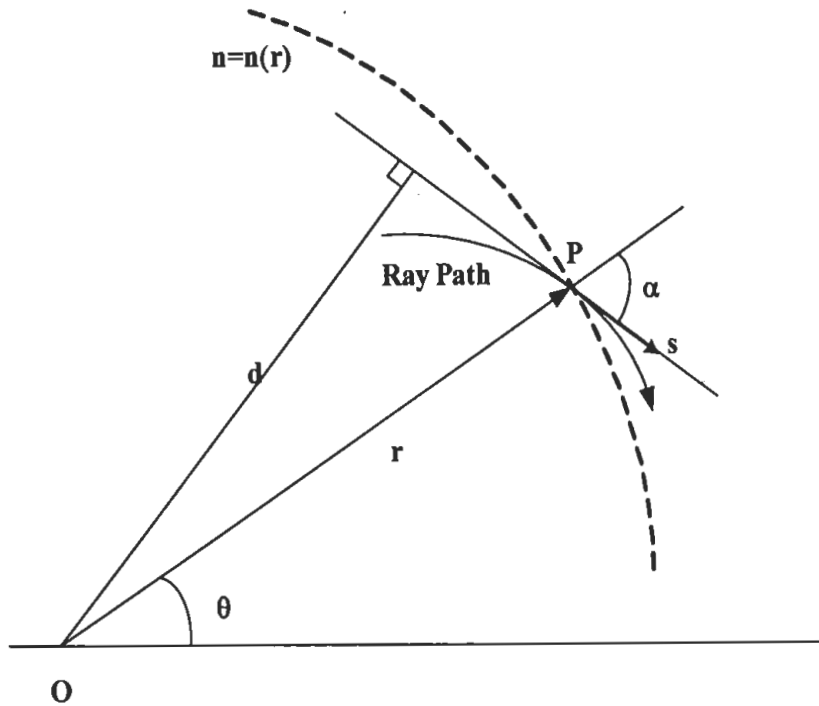


圖 13 在球對稱的條件下，電波射線路徑受大氣折射指數作用而彎折的示意圖，其中 O 為參考原點(可定為地球中心)，向量 S 為位於射線路徑上 P 點的切線單位向量，r 代表 P 點的位置向量，虛線代表大氣折射指數等值線，而 $d = r \sin \phi$ 。根據 Bouguer's 定律，可得 $nr \sin \alpha = nd = c$, c 為一常數。

r，將滿足下式：

$$n(r)r \sin \phi = a \tag{16}$$

其中 a 為碰撞參數(impact parameter)。根據圖 13，在 P 點附近在射線路徑上的任一極微小的弧長可以表示如下：

$$ds = \sqrt{r^2 (d\theta)^2 + (dr)^2} \tag{17}$$

利用式(16)，(17)，以及 $ds = rd\theta/\sin\phi$ 的關係，可得

$$d\theta = \frac{a}{r\sqrt{n(r)^2 r^2 - a^2}} dr \tag{18}$$

電波經過弧長 ds 後所具有的偏折角 $d\alpha$ 與弧長所對應的曲率半徑 ρ 之間關係，可描述如下式

$$ds = d\alpha \times \rho \tag{19}$$

在幾何光學(geometry optics)的假設下，考慮球對稱的條件， ρ 與大氣折射指數 $n(r)$ 的關係如下 (Born and Wolf 1980)

$$\rho = n(r) / \nabla_{\perp} n \tag{20}$$

其中 $\nabla_{\perp} n(r)$ 代表在 P 點垂直沿電波射線路徑切線方向的大氣折射指數梯度分量。由於 $ds = rd\theta/\sin\phi$ ，同時 $\nabla_{\perp} n(r) = \nabla n(r) \sin\phi$ ，並考慮圖 4 的電波射線全程路徑所產生的總偏折角，則由式 (18)，(19)與(20)可得

$$\alpha(a) = \int_{r_i}^{r_{out}} \frac{2a}{\sqrt{a'^2 - a^2}} \frac{d \ln n}{d a'} da' \tag{21}$$

其中 $a' = nr$ ，同時已假設在 dr 的微小距離內，大氣折射指數的變化量可忽略不計。根據 Abel 積分轉換，由式(21)可得大氣折射指數 n 與電波偏折角的關係為

$$n_r(a) = n_0 \exp \left[\frac{1}{\pi} \int_a^\infty \frac{\alpha(a')}{\sqrt{a'^2 - a^2}} da' \right] \quad (22)$$

其中 $n_r(a)$ 代表在某一個碰撞參數 a 之條件下，低軌道衛星所接收到 GPS 衛星訊號在電波路徑距地最近處(即圖 4 中 P 點位置)的總偏折角， n_0 為電波入射地球大氣處的大氣折射指數(可視為真空，亦即 $n_0=1$)。

一旦大氣折射率由 GPS 衛星訊號的偏折角利用式(22)計算出後，便可以利用式(2)，在適當的條件下，推算出所對應的各項大氣參數。在電離層中，因為大氣壓力十分微弱，同時水汽可以忽略不計，在此情況下，電離層自由電子密度與大氣折射指數的關係如下：

$$n = 1 - \frac{40.3 n_e}{f^2} \quad (23)$$

其中 n_e 是電子密度含量(電子數/ m^3)， f 是電波頻率(Hz)，如此即可得電子密度隨高度的分佈。

(3) 全球電離層動態之模擬與研究

為了利用 FORMOSAT-3/COSMIC 計畫所反演的電離層電子密度進行全球電離層動態的研究，我們引入由美國 NCAR/HAO 所開發出的“熱氣層-電離層-電動力學一般性環流模型”(Thermosphere - Ionosphere - Electrodynamics General Circulation Model，簡稱 TIE-GCM 模型)，用來模擬並研究熱氣層(thermosphere)與電離層(ionosphere)的電動偶合作用，同時以此模型為基礎，藉適當的電離層資料同化過程，利

用 FORMOSAT-3/COSMIC 計畫的反演資料，進行太空天氣(space weather)以及電離層全球動態的預報與研究。TIEGCM 模式所模擬的範圍是從九十七公里以上的全球熱氣層與電離層的三維空間，模擬參數包括熱氣層的溫度與各種成份的密度，和電離層的電子密度、溫度與各種離子的密度、溫度。此外它也可以模擬中性風、電漿飄移速度(plasma drift velocity)與電場分佈。隨著太陽活動性(solar activity)的差異，此模式最高的模擬高度，在低太陽輻射強度時為 500 公里左右，而在高太陽輻射強度時可達 700 公里左右。此數值模型的水平解析度為經度 5 度、緯度 5 度，而垂直方向的解析度則隨大氣壓力面的情況而定，約為 10 到 50 公里不等。

基本上，TIEGCM 數值模型係根據數個具物理理論的方程所組成，包括(1)熱氣層的熱力學方程式(thermodynamic equation)：此模型所模擬的中性大氣溫度，係基於此方程而得。它能描述大氣的溫度隨時間的變化，並且考慮大氣受太陽輻射的加熱作用、焦耳加熱、碰撞加熱作用與各種結合熱作用。當然它也包括熱輻射冷卻作用。(2)熱氣層的動量方程式(momentum equation)：熱氣層裡的水平風場隨時間的變化，是根據熱氣層的中性大氣在水平面上的動量守恆方程而得，其所考慮的作用力的來源包括：科氏力，離子拖曳(ion drag)，壓力梯度，動量對流(momentum convection)，垂直方向的阻泥。至於垂直風場的計算，是由假設中性大氣具線性與不可壓縮性，由中性大氣的連續方程求得。(3)熱氣層各種大氣成分連續方程(continuity equation)：基於質量守恆定律，熱氣層的主要成分氧分子、氧原子的密度分佈，可由氧分子、氧原子連續方程求得。再根據假定氮分子、氧

分子、氧原子三者的質量混和比為一，可得到氮分子的密度分佈。在氧分子、氧原子連續方程組裡，其質量混和比隨時間的變化，可由化學作用（製造與損失）、垂直擴散作用（分子與渦流擴散）和對流作用等造成。此外 TIEGCM 模式也包含熱氣層裡佔較少比例成分的氧化氮與氮原子（分成低能量氮與高能量氮）的密度分佈。氧化氮與低能量氮的連續方程與氧類似，但高能量氮的密度是由假定其處於光化學平衡下求得。(4)電離層的電子、離子溫度方程式(temperature equation)：從電子能量守恆方程式(energy conservation equation)加以簡化，並假定電子溫度變化只在垂直等壓面方向，而電子的熱流量與局部的加熱、冷卻作用，形成熱的準穩定狀態(thermal quasi-steady state)。其加熱的來源主要是由於電子從電離層外沉降與太陽的輻射(EUV)產生的電子，而冷卻作用是因電子與離子、大氣碰撞損失能量造成。離子溫度的計算是假定離子也是處在熱的準穩定狀態，是由於離子與電子的靜電作用、焦耳加熱和離子與大氣的碰撞作用三者互相平衡形成。(5)帶電粒子的連續方程式(continuity equation)：從粒子數守恆律，氧離子密度隨時間的變化率，除由其產生、損失率造成外，氧離子的傳輸作用如離子飄移($E \times B$)作用與沿地磁的擴散作用亦是造成氧離子變化的主因。氧離子的產生率來源是太陽輻射的電離化作用、高緯度區的粒子沉降機制和化學作用，損失率來源主要是將電荷移轉給氧分子、氮分子、氮原子。其它離子密度如氧分子離子、氮分子離子、氧化氮離子、氮原子離子等都假定處於光化平衡而求得；至於電子密度則由假定局部電中性而得。(6)電場方程式(electric field equation)：由於假定沿地磁線是等電位，TIEGCM 僅適用於時間尺度大於一分

鐘的現象。在假定以地球為參考坐標的電場是靜電場和電流的連續性，配合中性風場造成的電動機效應，可求得電位場、電場。在極區的電場為考慮與磁層、行星際磁場有關，因此以經驗式的電位場(Heelis model)外加於此區。

為了驗證 TIEGCM 模式可以用來研究 FORMOSAT-3/COSMIC 計畫所反演出的全球電離層資料，我們比較由 TIEGCM 模式所模擬出的 GPS 電波射線路徑的全電子含量(點線)與由 GPS/MET 實驗所觀測得的全電子含量(實線)隨電波射線切點高度的變化情形，如圖 14 所示。在進行 TIEGCM 模式的模擬時，我們選用 GPS/MET 掩星實驗發生時(1997 年 2 月 23 日 18:40:39UT)的物理參數，如太陽輻射強度、極區的粒子沉降能量率(particle precipitation energy flux)、磁尾(magnetotail)投射之最大電位降(potential drop)與大氣潮汐在下層邊界的大氣潮汐參數。除此之外，我們也調整氧離子在上層邊界的流量與熱氣層裡的焦耳加熱(Joule heating)作用強度。

由圖中可以明顯看出，模擬與觀測的電離層全電子含量十分吻合，顯示 TIEGCM 模式可以用來研究 FORMOSAT-3/COSMIC 計畫所反演得的電離層資料。除了全電子含量之外，我們亦利用 TIEGCM 模式模擬磁暴(geomagnetic storm)發生時期電離層 F 域層高度以及最大電子密度隨時間的變化與擾動。圖 14 顯示模擬與觀測結果的比較圖，其中磁暴發生的時間為 2000 年 4 月 6-7 日，分圖 a 與 b 為中壢數位電離層觀測儀(Digisonde)所量測的電離層最大電子密度與 F 域層虛高(virtual height)隨時間變化的情形，而分圖 c 與 d 則為 TIEGCM 模式所模擬的結果，其中粗黑線為磁暴當天電離層參數每小

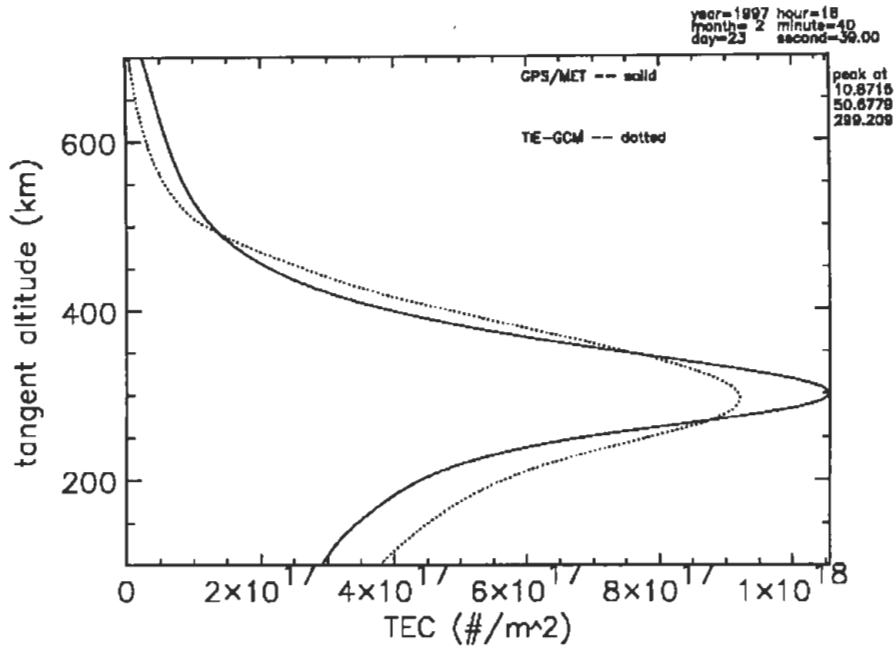


圖 14 TIEGCM 模式計算 GPS 電波路徑中的全電子含量與 GPS/MST 的觀測結果的比較。(陳明桂教授提供)

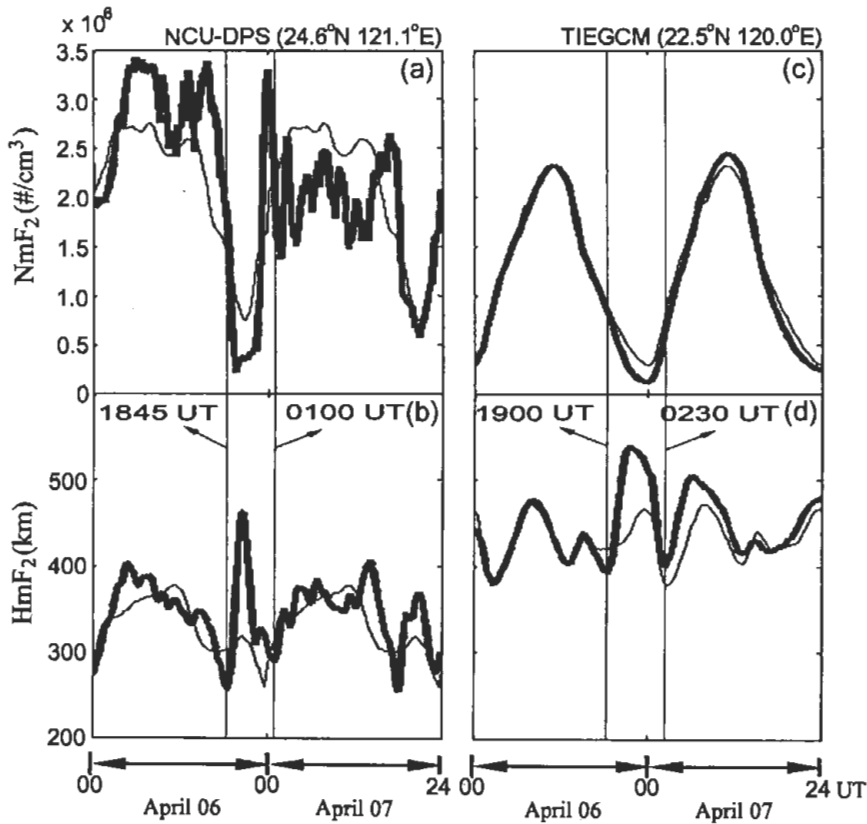


圖 15 利用 TIEGCM 模式針對磁暴時期之電離層擾動的模擬結果。(陳明桂教授提供)

時變化的實測與模擬結果，而細實線為電離層參數的月中間值(monthly median value)。由圖 15 所示，TIEGCM 模式的模擬結果與電離層雷達的實測結果十分吻合，暗示利用 TIEGCM 模式將可以進行太空天氣所引起的電離層暴(ionospheric storm)的模擬研究。

(4) 電離層斷層掃描技術應用

利用沿著固定經度線所設置的低軌道衛星標識訊號接收網所觀測的電離層全電子含量(Total Electron Content, TEC)，根據適當的數學反演方法，可以反求出電離層電子密度垂直剖面。TEC 的定義如下

$$TEC = \int_s n_e ds \quad (24)$$

其中 ds 代表電離層積分路徑的微小長度。利用低軌道衛星的標識訊號(beacon signal)通過電離層後所具有的相位偏移，可以進行 TEC 的量測。例如由 NNSS 衛星的 JMR-1 接收機，我們可以算出衛星標識訊號分別為 $f_1 = 150MHz = f_r, m_1$ 以及 $400MHz = f_r, m_2$ 的微分都卜勒相位移(differential Doppler phase shift) $\phi(t)$ ，而其與 TEC 的關係如下：

$$TEC = (\phi(t) + \phi_0) / \left[\frac{80.6\pi}{f_r c} \left(\frac{1}{m_2^2} - \frac{1}{m_1^2} \right) \right] \quad (25)$$

在此 $m_1 = 3$ ， $m_2 = 8$ 、 $f_r = 50MHz$ ，而積分常數 ϕ_0 可用 Leitinger 的兩站法求得 (Leitinger et al. 1975)，如此一來即可求得近垂直各射線的 TEC。若將式(24)離散化，即得一組近垂直射線的線性方程式

$$\sum_j a_{ij} X_j = C_i \quad (26)$$

在此 a_{ij} 表第 i 條近垂直射線在第 j 個網格的

徑長 X_j 代表第 j 個網格的電子密度， C_i 表近垂直射線 i 的 TEC。除了由 NNSS 衛星標識訊號求得 TEC 之外，利用 FORMOSAT-3/COSMIC 衛星，亦可以得到電波射線路徑的 TEC。其法如下：由衛星所接收到的 GPS 訊號中 L1 及 L2 頻率的相位資料，由下式可算出 TEC

$$TEC = \frac{(S_1 - S_2)}{40.3} \frac{f_1^2 f_2^2}{(f_1^2 - f_2^2)} \quad (27)$$

上式中的 S_1 及 S_2 分別為頻率 L1 與 L2 的相位。TEC 得到後，可以利用電離層經驗模式 IRI-2000 及其他參考資料，例如查普曼層(Chapman layer)等數學模型，設定適當的電離層電子密度剖面的初始值，再應用 MART 演算法(如下式)，利用電腦經過連續的迭代過程，便可以反求出電離層電子密度剖面。此種方法特稱為電腦電離層斷層掃描法 (Computerized Ionospheric Tomography Method, 簡稱 CIT 法)。

$$X_j^{K+1} = X_j^K \left[\frac{C_i}{\sum_{i=1}^m a_{ij} X_j^K} \right]^{\lambda_K \cdot a_{ij} / |a_i|} \quad (28)$$

其中 X_j^K 為迭代 K 次的第 j 網格的電子密度， C_i 為第 i 條路徑的 TEC， λ_K 為鬆弛常數(relaxation constant)，其值選定為 0.5， a_i 為第 i 條路徑長。如此即所求得沿著地面觀測網上空的兩維電子密度的分佈。

我們用 GPS/MET 掩星事件中的 GPS 電波射線的 TEC 資料，根據 CIT 方法中的 MART 演算法，對 Micro lab-1 衛星連續三個時段(分別為 1977/02/23 的 00:29 至 02:04 UT, 0210 至 03:42 UT 及 03:40 至 05:21 UT)的 TEC 資料進行電子密度分佈的反演，結果如圖 16 所示，其中

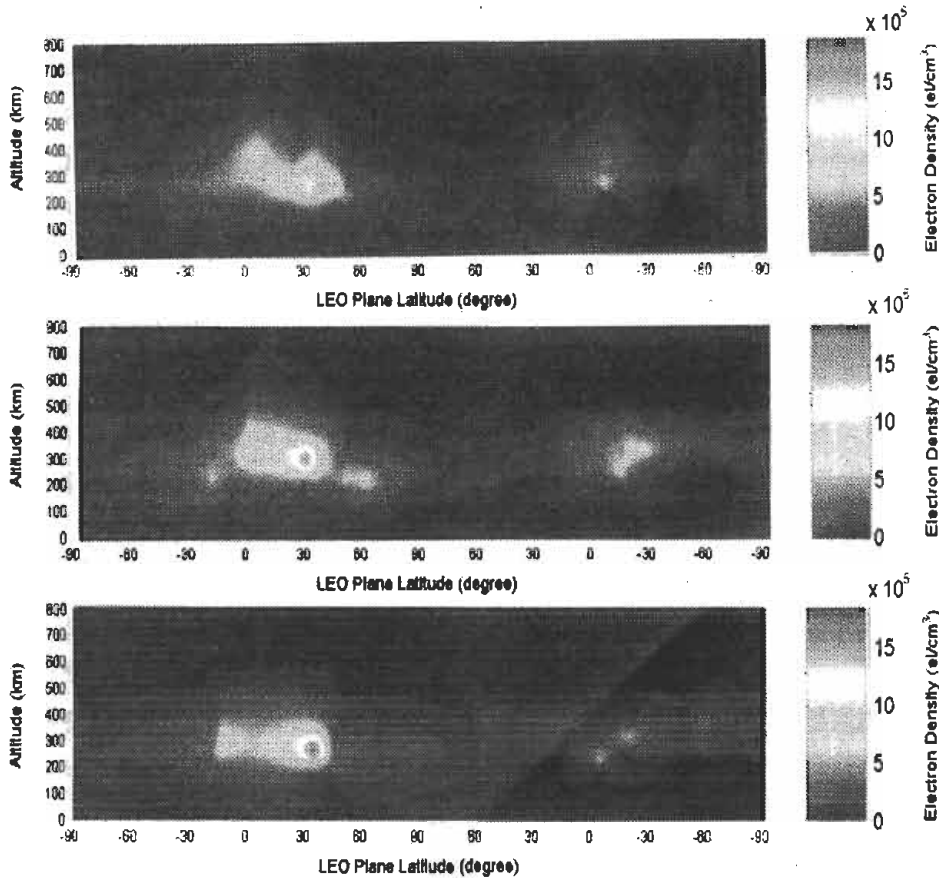


圖 16 利用 GPS/MET 資料以電離層斷層掃描技術反演電離層結構。(蔡偉雄教授提供)

縱座標為高度由地面至 800 km，橫座標為平面緯度， 0° 表赤道，左半圈 -90° 至 90° 代表白天電子密度，右半圈 90° 至 -90° 代表夜晚電子密度，上小圖為第一圈(即 00:29~02:04UT)，中小圖為第二圈(即 02:10~03:42 UT)，下小圖為第三圈(即 03:43~05:21 UT)。由圖可知在白天赤道異常(Equatorial Anomaly)現象非常明顯，而在夜晚則赤道異常消失不見，此處的模擬結果與理論吻合。

(5) 電離層觀測比較

為了評量 GPS/MET 實驗中，由 Abel 積分轉換所反演出的電離層電子密度的資料，我們將 GPS/MET 實驗結果與中壢數位電離層觀測儀

(Digisonde)所觀測得的電子密度剖面以及 $foF2$ 等資料，進行比較。我們使用的資料時間，為西元 1995 至 1997 年的 GPS/MET 實驗反演資料和中壢電離層觀測儀的觀測資料。由於 GPS/MET 實驗資料的位置與中壢電離層儀所在的位置，極少有重疊的情形發生，為了進行比較，我們選用的 GPS/MET 實驗資料，其所對應的地理位置和中壢電離層觀測儀的位置相差在 12 度之內。根據此定義，在 3 年內共 217 有效的觀測天中，總共有 403 筆 GPS/MET 實驗的資料是滿足前述的要求，再由此 403 筆資料和中壢 DPS 資料進行比對，挑出在同一時間上兩系統皆有資料，共有 232 筆。其中造成資料無法

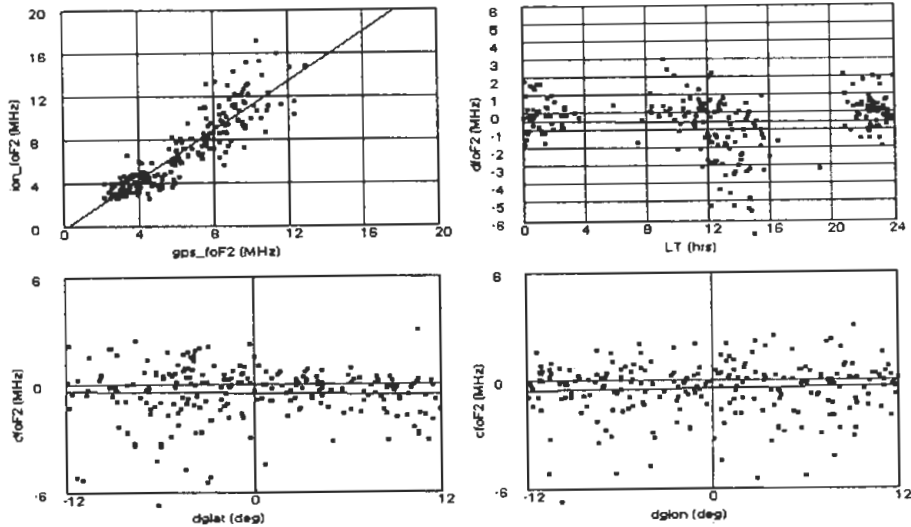


圖 17 左上方的方格為 GPS/MET 實驗所得到的 $foF2$ 和中壠電離層觀測儀得到的 $foF2$ 的散佈圖，而右上方、左下方及右下方的方格，分別為 $foF2$ 的差值對當地時間、緯度差異及經度差異的散佈圖，其中亦包含各趨勢線。(蔡龍治教授提供)

比對的原因，大多數都是因為 GPS/MET 實驗遮蔽觀測的時刻，中壠電離層觀測儀系統無法操作（如機器維修等因素），或者是有很強的電離層散塊 E 層 (sporadic E layer, 簡稱 Es) 回波，造成無法判讀到電離層 F 域參數等因素所致。

圖 17 是由 232 筆匹配的資料中，以更多統計上的方式進行比較。左上方的方格中，是 GPS/MET 實驗得到的電離層最大臨界頻率 (亦即所謂的 $foF2$) 對電離層觀測儀所得的電離層圖 (Ionogram) 上的 $foF2$ 的散佈圖 (scatter plot)，其中電離層圖的 $foF2$ 是指在遮蔽觀測之 $foF2$ 發生時間的前後一小時的 DPS 資料取其平均值。圖中還有以最小平方方法 (Least Squares Method) 得到的趨勢線 (fitting line)，計算得知資料點所具有的線性相關係數 (linear correlation coefficient) 高達 0.90，而其斜率為 1.14，位準點 (Bias) 為 -0.35 MHz。另外，計算得知資料點的均方根差值 (root

mean square) 為 1.58 MHz。造成此量測值之間差異的可能原因甚多，包括：(1) GPS/MET 資料在反演的過程中，以球對稱假設為前提造成的誤差；(2) 電離層觀測儀系統觀測的誤差以及自動判讀系統在判讀電離圖過程中的誤差；(3) GPS/MET 實驗和電離層觀測儀在觀測時間和空間上的不匹配 (mismatch)。

在圖 17 的右上方、左下方及右下方的方格中，分別為 $foF2$ 的差值 (由 GPS/MET 資料減去電離層觀測儀的資料) 對當地時間 (local time)、緯度差異及經度差異的散佈圖，圖中尚以最小平方方法得到的趨勢線。由右上方的方格中得知，於當地時間中午 12:00 至晚上 8:00 之間，GPS/MET 資料所顯示較低的 $foF2$ 值所佔的比例超過 83%，其主要的原由相信是赤道異常效應 (equatorial anomaly region) 的噴泉效應 (Fountain

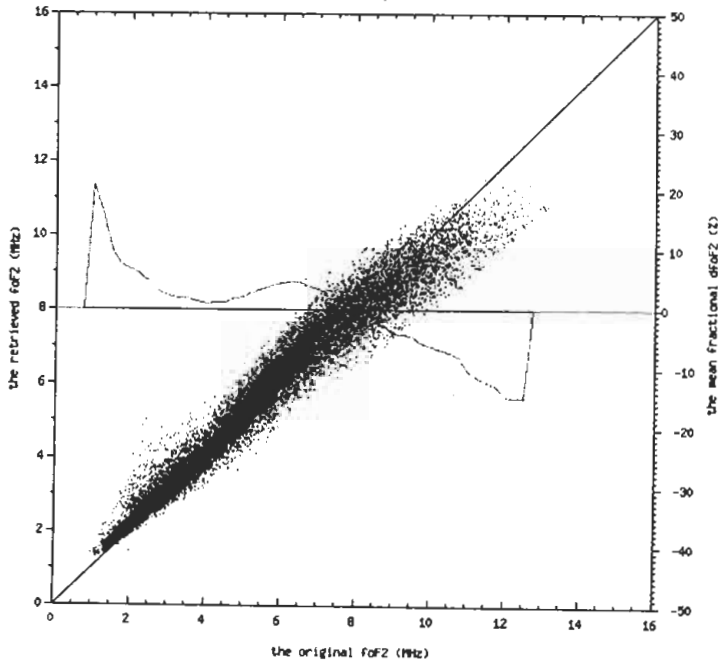


圖 18 GPS/MET 模擬實驗中利用 Abel 轉換反演結果與 IRI 模式的 F 層臨界頻率的比較。(蔡龍治教授提供)

Effect), 使得在緯度 $20 \pm 25^\circ$ 的範圍內, 於緯度 20° 處 (相當接近中壢 24°N) 有相對極大的電子密度。在使用 Abel 積分轉換進行電子密度的反演時, 在球對稱的假設下, 因為赤道異常效應所造成的不對稱效應, 使得 GPS/MET 實驗結果將量測到較低的 $foF2$ 及電子密度。而在左下方及右下方的方格中, 計算得知其相關係數分別為 -0.1 和 0, 故得知位置差異對其 $foF2$ 差值幾乎沒有影響。

圖 18 為應用電離層 IRI 模式模擬 GPS/MET 實驗所得電離層 F 層臨界頻率 (橫軸 $foF2$) 與 IRI 模式實際 F 層臨界頻率 (縱軸 $foF2$) 的比較圖, 以及其平均百分差值 ($\Delta foF2/foF2$) 對應實驗 IRI 模式 $foF2$ 的結果曲線。如圖所示, 由 Abel 積分轉換所得的 $foF2$ 值, 在小於 8 MHz 時有高估現象, 而在大於 8 MHz 時則有低估現象, 尤其在 $foF2$ 值小於 2 MHz 時, 由 Abel 積

分轉換結果所得的 $foF2$, 更高估達 20%。欲解決此問題, 在進行電離層電子密度的反演時, 必須考慮電離層電子密度的水平變化問題。初步結果顯示, 當使用考路非球對稱假設的改良式 Abel 轉換進行電離層電子密度的反演時, 前述的高估現象將可以大大地降低至 10% 以下, 而 $foF2$ 值大於 8 兆赫時的低估現象雖也有改進, 但效果較不明顯。

(6) 電離層電子密度不規則體的定位

在 FORMOSAT-3/COSMIC 計畫的電離層整合研究計畫中, 關於電離層電子密度不規則體對 FORMOSAT-3 三頻標識訊號 (150、400、以及 1066.7 MHz) 以及 GPS 衛星訊號的影響的研究, 包括閃爍 (scintillation) 現象與衰落 (fading) 現象等, 是一個十分重要的課題。為了滿足此研究的需要, 必須利用地面雷達對電離層電子密度不規則體的各種特性, 包括不規則體的發生

高度，厚度，水平延伸使度，形狀與幾何結構，漂移速度，電漿擾動程度等，進行觀測，以確定閃爍現象與電子密度不規則體各種特性與行為的關聯，進而探究閃爍現象的發生機制與對衛星通信的影響。

爲了此目的，我們發展了一套利用中壢特高頻陣列雷達(Chung-Li VHF Array Radar)，能夠精確定位發生於電離層 Es 層中的電子密度不規則體位置與建構其三維空間結構的方法。根據中壢雷達三組獨立接收機所接收到回波訊號的相位差(phase difference)，考慮雷達天線陣列幾何結構與回波相位模稜(phase ambiguity)因素，電子密度不規則體在回波區(echoing region)中的方位角 ϕ ，與仰角 θ ，可以由下式算出

$$\phi = \cot^{-1} \left[\tan \beta + \frac{d_{32}}{d_{12} \cos \beta} \frac{(\Delta\phi_{21} + 2\pi l)}{(\Delta\phi_{32} + 2\pi m)} \right] \quad (28)$$

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{\Delta\phi_{32} + 2\pi m}{\kappa d_{32} \sin \phi} \right) \quad (29)$$

其中 $\Delta\phi_{21}$ 與 d_{12} 分別爲中壢雷達天線陣列 1 與 2

的回波相位差與中心距離(等於 41.22 公尺)， $\Delta\phi_{31}$ 與 d_{31} 分別爲天線陣列 2 與 3 的回波相位差與中心間隔(等於 44.34 公尺)， $\Delta\phi_{32}$ 與 d_{32} 分別爲天線陣列 1 與 3 的回波相位差與中心間隔(等於 19.6 公尺)， $\beta = 4.3^\circ$ ， l 、 m 是兩個整數常數稱爲干涉波瓣數(Interferometer Lobe Number)。至於不規則體的高度可計算如下式

$$h = (r^2 + Re^2 + 2r Re \sin \theta)^{1/2} - Re \quad (30)$$

其中 Re 爲地球曲率半徑， r 爲目標物的距離， θ 爲天頂角。有關中壢特高頻雷達的特性以及進行電離層電子密度不規則體觀測實驗的細節，可以參考 Wang and Chu (2001)。

圖 19 爲中壢特高頻雷達觀測發生在電離層 Es 層中電子密度不規則體回波強度隨時間與距離的分布圖。所使用的雷達參數爲：脈波寬 28 μ s，使用 7 個比次(Bits)的巴可碼(Barker Code)，脈波間隔時間(Inter Pulse Period) 2ms，同相積分時間(coherent integration time)爲 4ms，觀測範圍 123.6 到 159 公里。由圖中顯示，回波發生的距離，隨時間不斷提升。由此種距離-時間-強度圖(range-time-intensity plot)重，無法判

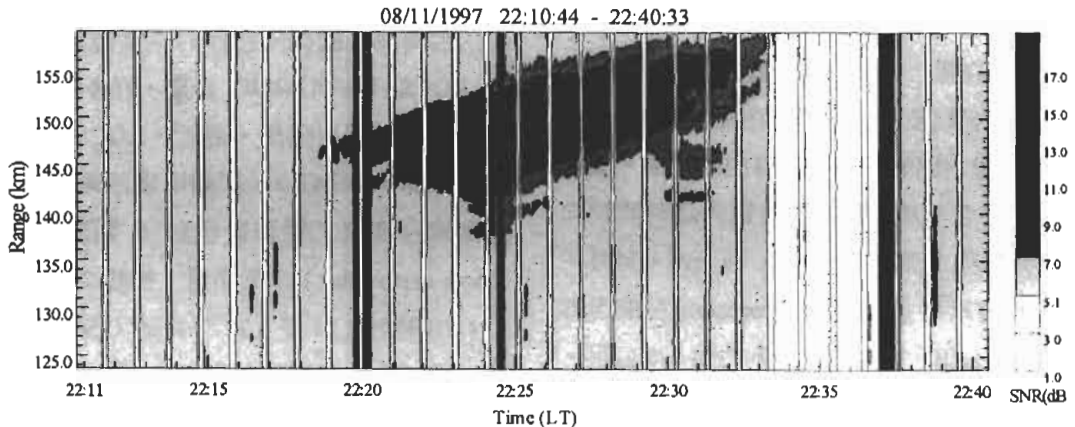


圖 19 中壢特高頻雷達電離層 E 域電子密度不規則體回波強度隨時間與距離的分布圖(取自 Wang and Chu, 2001)

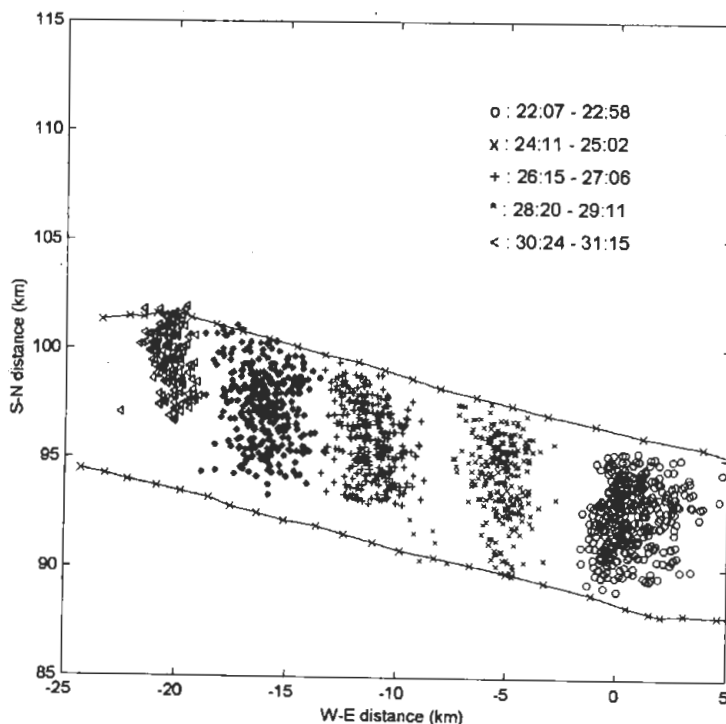


圖 20 利用雷達干涉法解析出電子密度不規則體在回波區內隨時間的漂移(取自 Chu and Wang, 2003)

定產生回波的電子密度不規則體的空間結構，以及飄移方向與速度。為了進一步了解不規則體的特性，利用前述的雷達干涉法(Radar Interferometry Method)，可以對目標物進行定位，結果如圖 20 所示，圖中兩條近似平行的曲線代表回撥的預期回波區域(expected echoing region)，係由 IGRF1997 模型，考慮中壢雷達站的經緯度，在電子密度不規則體的方向角(aspect angle)為 0.25° 以及不規則體所在高度範圍為 110 到 120 公里之間的假設下所算出的結果。圖中顯示電子密度不規則體在回波區內隨時間朝西北西方飄移，漂移速度約為 45 m/s。另外，不規則體的水平空間尺度(dimension)在東西方向約為 3-5 公里，而在南北方向約為 5-8 公里。因此若能事先利用地面雷達解析出電子密度不規則體的移行速度與方向，並獲得不規則體的

空間結構訊息，則可以事先預知衛星訊號將在何時與何地通過電離層電子密度不規則體，並引發閃爍現象。同時不同的電子密度不規則體所產生衛星訊號的閃爍現象的差異，將亦因此而可以得知。

五、結 語

台灣與美國共同合作的中華衛星三號，命名 ROCSAT-3/COSMIC 計畫，經多年不斷折衝努力，已近發射階段。最近，ROCSAT-3 已更名爲 FORMOSAT-3 (即福爾摩沙衛星三號)。福爾摩沙衛星三號預計發射 6 顆低地球軌道 (low-earth-orbit) 之微衛星，接收 24 顆全球定位 GPS 發射 1.58 及 1.23 千兆赫 (GHz) 頻率訊號，此低軌道訊號接收衛星之接收網絡將形成所謂星座掩星觀測 (constellation occultation observations)，每日可提供全球觀測密度均勻分

布的探空數目將多達 3000 個，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，在國科會及太空計畫室的督導與支持之下，也針對當前掩星觀測資料反演技術及同化模擬及即時作業之準備，有持續深入之推展與研發。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，亦說明國內相關議題研究成果，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及電離層研究，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) 同化作業，準備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 折射率同化作業，亦可進行預報。同時亦與 NCAR 合作，準備發展區域模式 3DVAR 偏折角或溢相位同化，以厚植我國於掩星觀測同化技術生根為使命。本文亦簡略介紹國內同仁參與 FORMOSAT-3/COSMIC 計畫研究之主要研究成果，初步來看，對大氣反演技術能力及掩星觀測同化模擬皆有一定之成績。

在電離層研究及預報上，將可以進行太空天氣的預報研究，電離層斷層掃描技術的開發與建立，電離層電子密度對於衛星訊號所產生的閃爍現象的觀測與研究，以及電離層反演技術的開發與 FORMOSAT-3 資料的驗證等。相信 FORMOSAT-3/COSMIC 計畫的執行，將可以大幅度的提升我國太空科學相關領域的學術水準，並在國際上佔有一席之地。

福衛三號(FORMOSAT-3/COSMIC)計畫，係政府全力支持進行的一項國家級衛星技術研發的重要計畫，衛星主體本身之軟硬體由國家太空計畫室統籌規劃及執行完成，而有關推動 FORMOSAT-3/COSMIC 計畫科學任務工作，任務導向計畫由太空計畫室主導，學術處則可支援自由參與的一般研究計畫（如過去 COSMIC 整合研究計畫及子計畫）。以目前運作及過去推動 COSMIC 計畫的角度來看，個人淺見以為未來 FORMOSAT-3/COSMIC 研究應：

- 舉辦國內研討會及廣收各單位研究人員及技術人員之經驗技術交流，對於國內新知識及新技術（相關於 FORMOSAT-3/COSMIC 任務）之促進可產生積極的引導作用。
- 舉辦大型國際學術研討會邀請美方及國際與我國 FORMOSAT-3/COSMIC 任務相關之專家學者參加，促進我方新知識及新技術之了解，對未來任務規劃與改進方向有一致的效益。
- 積極進行我方 FORMOSAT-3/COSMIC 相關的研究及技術人員至美國與其他國家進行短期訪問，透過雙邊合作關係，可以彌補或加強乃至引進我方計畫任務所需之相關資訊及技術。

目前擬透過美國國家科學基金會 (NSF) 與台

灣國科會國際合作處進行雙邊合作計畫，由美國 NCAR 及 UCAR/COSMIC 協助，來促進共識性的任務之完成。在衛星成功運轉後，必須由整合性的資料中心，如中央氣象局的 TACC 來快速有效傳遞 FORMOSAT-3 觀測資訊，學界則應建置與 FORMOSAT-3/COSMIC 任務相關的模式研究及資料網站中心，俾以達資訊無國界，以我國衛星立足國際舞台，藉以提昇國內相關研究水準及強化衛星產品的應用價值。

誌 謝

感謝國家實驗研究院李羅權院長及國家太空計畫室吳作樂主任之支持，與美國大學大氣研究聯盟主席 (UCAR) Dr. R. Anthes 之提供圖文資料。美國 UCAR 的 COSMIC 中心主任郭英華博士提供寶貴意見及研究上之協助，亦在此致謝。本文報告部分內容多所依據過去 COSMIC 整合研究計畫及推動計畫，感謝參與太空計畫室專案委託計畫主持人吳俊傑教授、劉說安教授、張忍成教授、蔡偉雄教授、陳明桂教授，王建亞教授，劉正彥教授及蔡龍治教授提供研究成果。最後，感謝中央氣象局及所有參與研究單位之協助。

參考文獻

- 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.
- Born, M, and E.Wolf, 1980: *Principles of Optics*, Pergamon Press, New York, 808pp.
- Chu, Y. H., and C.Y. Wang, 2003: Radial Velocity and Doppler Spectral Width of Echoes from Field-Aligned Irregularities Localized in the Sporadic E Region, *J. Geophys. Res.*, 108(A7), doi:10.1029/2002JA009661.
- Hajj, G. A., and L. J. Romans, Ionosphere electron density profiles obtained with the Global Positioning System: Results from the GPS/MET experiment, *Radio Sci.*, 33, 175-190, 1998.
- Hajj, G.A., L.C.Lee, X.Pi, L.C.Romans, W.S.Schreiner, P.R.Straus, and C.Wang: COSMIC GPS ionospheric sensing and spqce weather, *TAO*, 11, 235-272, 2000
- 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*, in press.
- Igarashi, K., A. Pavelyev, K. Hocke, D. Pavelyev, I. A. Kucherjavenkov, S. Matyugov, A. Zakharov, and O. Yakovlev, Radio holographic principle for observing natural processes in the atmosphere and retrieving meteorological parameters from radio occultation data, *Earth Planets Space*, 52, 893-899, 2000.

- 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.
- 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, 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.
- Mortensen, M. D., R. P. Linfield, and E. R. Kursinski, Vertical resolution approaching 100m for GPS occultations of the Earth's atmosphere, *Radio Science*, **34**, 1475-1484, 1999.
- 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.
- 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.
- 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.

Introduction to FORMOSAT-3/COSMIC Science Research

Ching-Yuang Huang¹ Yen-Hsyang Chu²

¹Department of Atmospheric Sciences, National Central University

²Institute of Space Science, National Central University

(Manuscript received 02 June 2004 ; in final form 30 October 2004)

ABSTRACT

The bilateral project between Taiwan and U.S.A., originally named ROCSAT-3/COSMIC, has recently been renamed as FORMOSAT-3/COSMIC and is nearing the launch stage. FORMOSAT-3 consists of six low-earth-orbit micro-satellites which will receive both 1.58 GHz and 1.23 GHz signals emitted by 24 GPS satellites, thus forming a network of constellation occultation observations with a daily up to 3000 sounding collections globally evenly distributed. Such a high-density observation experiment will be the first pioneer experiment in the world, which will greatly help Taiwan on the promotion of satellite industry, technology development and manufacturing capacity of related devices, and will also enhance our understanding of the atmosphere, highly valuable for academic research and general applications to civil problems. Based on the characteristics of the payloads in the satellite with the ability to construct global important parameters of the atmosphere through the real-time measurement network, there are main goals: (1) to improve the accuracy of global and regional weather predictions; (2) to improve the ability of space weather monitoring and prediction as well as monitoring of ionospheric evolution; (3) to provide data for study for climate and global environmental changes; (4) to provide data for study for earth gravity and precise orbital determination of the LEO satellite. Prior to launch, several local science teams, under supports of NSC and NSPO, have persistently aimed to investigate related occultation data retrieval algorithms, assimilation/simulation techniques and operational weather forecasting. This paper gives a brief introduction to FORMOSAT-3/COSMIC project background, the goals of our research mission in Taiwan, and focal points of GPS occultation data applications, and also presents some recent research achievements relevant to this project.

Keywords: FORMOSAT-3/COSMIC, GPS, Constellation occultation observations