

# 福爾摩沙衛星三號

台灣資料分析中心 (TACC) 系統建置與維運計畫



## TACC 科學演算說明手冊

(v 3.10)

中央氣象局

民國 102 年 12 月



## 摘要

本文說明 TACC 以 CDAAC 3.0 處理福衛三號 GPS 掩星觀測資料和小型電離層光測器 (TIP) 觀測資料的演算程序及其演算法，包括原始科學資料剖析、低軌衛星精密定軌 (POD)、超量相位演算法、掩星電離層反演法、掩星大氣反演法、大氣掩星一維變分法，以及 TIP 觀測資料處理程序等 7 個要項，外加電離層絕對 TEC 演算法等，總共 10 項。雖然 TACC 執行即時與後處理兩種不同的程序，但處理法大同小異，只有即時和後處理之 POD 有顯著的不同，因此本文以即時程序為主。當兩程序做法不同時，會個別說明。



# 目錄

1.	概論	1
1.1	處理流程概述	1
2.	福衛三號原始科學資料剖析程序	3
2.1	BJTools::parseLvl0 副常式說明	4
2.2	重要的輸出資料	5
2.3	參考文獻	6
3.	低軌衛星精密定軌程序	7
3.1	輸出入檔案類別	7
3.2	即時程序	8
3.3	後處理程序	14
3.4	LEO POD 程序的錯誤訊息與說明	15
3.5	參考文獻	16
4.	超量相位演算程序	17
4.1	超量相位演算法	17
4.2	參考文獻	20
5.	掩星電離層反演程序	21
5.1	電離層反演法	21
5.2	參考文獻	24
6.	掩星大氣反演程序	25
6.1	掩星大氣反演法	25
6.2	參考文獻	31
7.	大氣掩星一維變分程序	33
7.1	一維變分法概述	33
7.2	觀測運算子	34
7.3	實際演算流程	35
7.4	變數向量與背景誤差矩陣	36
7.5	參考文獻	36
8.	GPS 絕對 TEC 演算法	37
8.1	處理流程	37
8.2	atec.pl 程式說明	38
8.3	makeMulCal.pl 程式說明	43
8.4	makeLeoDcb.pl 程式說明	44
8.5	updateTEC.pl 程式說明	45
8.6	附錄一：多路徑校正檔說明	45
8.7	附錄二：參數檔 edit.parms#說明	46
8.8	附錄三：映射函數說明及推導	47
8.9	附錄四：參數檔 dcb.parms#說明	48
8.10	參考文獻	48

9.	小型電離層光測器觀測資料處理程序.....	51
9.1	演算方法.....	51
9.2	tipstrip 程式說明.....	54
9.3	verniermet 程式說明.....	55
9.4	metassign 程式說明.....	56
9.5	product1 程式說明.....	57
9.6	參考文獻.....	57
10.	附錄一 建立掩星事件表.....	59
10.1	計算掩星事件表.....	59
10.2	輸出大氣掩星物件.....	60
10.3	輸出電離層掩星物件.....	60
11.	附錄二 GPS 導航位元資料處理程序.....	61
11.1	rdRT17bits.pl 程式說明.....	61
11.2	cdbbs_mk_bitArc.pl 程式說明.....	62
11.3	getBits.pl 程式說明.....	62
11.4	參考文獻.....	62
12.	附錄三 中英對照.....	63

# 1. 概論

TACC 的任務主要在產製福衛三號科學資料，以提供中央氣象局及國內外相關單位進行天氣預報及學術研究發展，同時也期望建立我國自行處理福衛三號科學資料的能力。目前，TACC 所使用的科學資料處理軟體，是美國大學大氣研究聯盟的 COSMIC 資料分析與儲存中心所發展的 CDAAC 3.0 程式。

TACC 主要處理福衛三號的 GOX 觀測資料和 TIP 觀測資料兩大類。前者來自 GPS 掩星實驗酬載儀器；後者來自小型電離層光測器酬載儀器。依 TACC 資料處理程序，可分為原始科學資料剖析程序、GPS 掩星資料處理程序，以及 TIP 資料處理程序三個部分。其中，原始科學資料剖析程序主要剖析福衛三號的原始觀測量，將其中的 GPS 掩星大氣、電離層觀測量和 TIP 觀測量分門別類。GPS 掩星資料處理程序包括：低軌衛星精密定軌程序、超量相位演算程序、掩星電離層反演程序、掩星大氣反演程序、大氣掩星一維變分程序。主要反演 GPS 掩星大氣、電離層觀測量，獲得大氣溫度、壓力、水氣壓等剖線，以及電離層電子數密度（number density of electrons，以下簡稱電子密度）剖線；TIP 資料處理程序主要分析 TIP 觀測量，估算低軌衛星下方的電離層輻射量。

## 1.1 處理流程概述

圖 1.1 顯示 TACC 處理福衛三號科學資料的流程概圖，該流程由一組自動排程的程式所控制。首先，原始科學資料剖析程序將讀入的福衛三號科學觀測資料分成 GOX 觀測量和 TIP 觀測量。前者被送入低軌衛星精密定軌程序，後者被送入 TIP 資料處理程序。低軌衛星精密定軌程序先處理地面 GPS 網的觀測資料（統稱 fiducial 觀測資料），再配合 GPS 掩星觀測量估算福衛三號衛星精密軌道參數。該衛星精密軌道參數和原本的 GPS 掩星觀測量被送至超量相位處理程序，但只有福衛三號衛星精密軌道參數被送至 TIP 資料處理程序。超量相位處理程序分析 GPS 掩星大氣和電離層觀測量，得到大氣和電離層的超量相位。大氣或電離層超量相位是依觀測之衛星天線而定。大氣超量相位在經掩星大氣反演程序、大氣掩星一維變分程序後，得大氣剖線；電離層超量相位在經過掩星電離層反演程序後，得電離層電子密度剖線。其中包括超量相位轉全電子含量和剝洋蔥法等。TIP 資料處理程序則以 TIP 觀測量，配合福衛三號衛星精密軌道參數，估算電離層輻射量。

在處理時效性方面，TACC 資料處理程序又可分成即時處理程序和後處理程序兩種。即時處理程序會盡快處理收到的近即時觀測量；後處理程序會在觀測時間後約 6 週，一次處理一個月份的觀測量。不論即時或後處理程序，其處理流程和程式都大同小異。不同的部分見下列各章節說明。

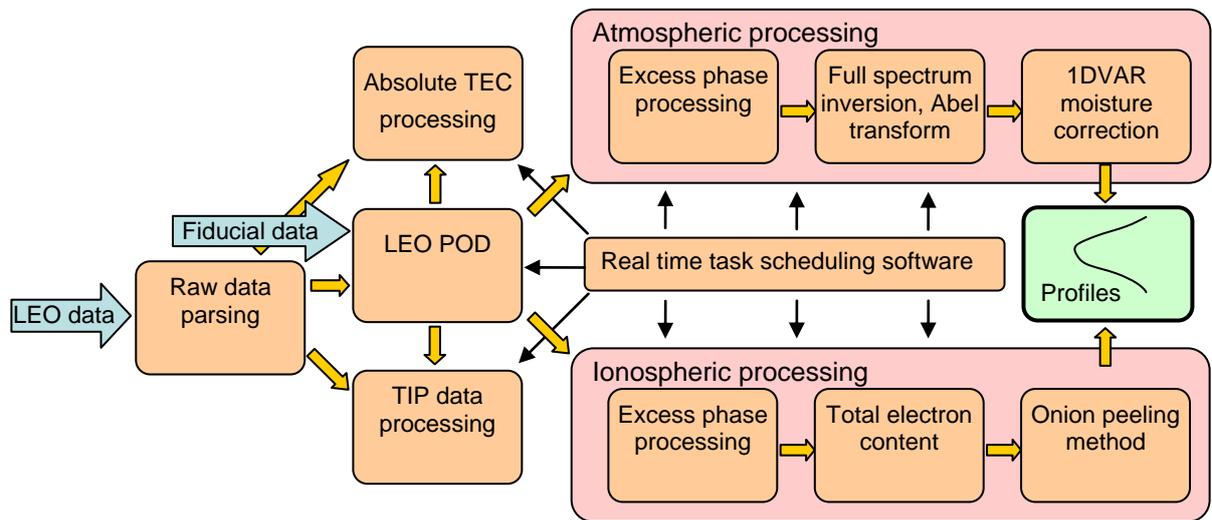


圖 1.1：福衛三號科學資料處理流程概圖。圖中橘色塊表示資料處理程序（但 Total electron content 除外。它並不是程序名，而是中間產物）；綠色塊表示最終產品；青色箭頭表示外部資料輸入；黃色箭頭表示處理流程的方向；黑色箭頭表示自動排程程式對程序的控制。

## 2. 福衛三號原始科學資料剖析程序

福衛三號原始科學資料剖析主程式 `cosmicZero2one.pl` 讀入三號衛星的原始資料，並輸出 GOX、TIP 觀測量、低軌衛星姿態、電離層閃爍、衛星導航，以及程序狀態等資訊。資料剖析程序分述如下。

- (1) 分離出 GOX、TIP 和衛星姿態檔：叫用 `BJTools::parseLv10` 副常式，輸入 `cosLv0` 檔名，得到 GOX 資料暫存檔（檔名 `GOXA.out` 或 `GOXB.out`）、TIP 資料暫存檔（檔名 `TIP.out`）和衛星姿態暫存檔（檔名 `ATT.out`）。\*該副常式先移除包含 USN 和 SSR/PC 訊息的檔頭，再將其餘的資料分類後，輸出至上述各檔。†
- (2) 取得 GOX 和衛星姿態資料的結束時間以決定正確的資料下載序號：分別叫用 `BJParser::timerange` 以及 `BJTools::readAtt` 副常式，讀取 GOX 資料暫存檔及衛星姿態暫存檔中的結束時間，再叫用 `findDumpInfo` 副常式，取得資料下載序號。該序號用來標示資料封包下載的先後順序，也成為許多資料檔名的一部分。如果結束時間不同，則以最晚的結束時間為準。
- (3) 建立 GOX 資料檔：複製 GOX 資料暫存檔至 GOX 資料檔（檔案類別為 `goxBin`）。
- (4) 剖析 GOX 資料：以 `CosmicParser.pm` 剖析 GOX 資料，從 BlackJack 格式中的 OBSDqfit 資料，得到 4 個高取樣之 GPS 觀測資料檔、1 個低取樣之 GPS 觀測資料檔和 1 個電離層閃爍資料檔；從 `CONFantc`、`OCCTopar`、`NAVgants`、`RCVMfdir`、`RCVMcmdr` 和 `RCVMlogm` 資料，得到天線設定檔 `antc.txt`、掩星資料收集參數檔 `opar.txt`、導航資訊檔 `navg.txt`、檔案目錄資訊檔 `fdir.txt`、指令檔 `cmdr.txt` 和紀錄檔 `logm.txt` 共 6 個暫存檔。其中高取樣資料檔依 GOX 天線編號分別命名為 `hirate.bin0[0123]`，取樣時間為 50 Hz。其中 00 和 01 是 2 支 POD 天線的編號；02 和 03 是 2 支 OCC 天線的編號；低取樣資料檔 `lorate.txt` 為 1 Hz 觀測資料；電離層閃爍資料檔名為 `scin.txt`。此外，自 CDAAC 2.00 起，`cosmicZero2one.pl` 新增 `--l2c` 參數，用來剖析 L2C 資料，但預設是不剖析該資料。
- (5) 建立 GOX 健康狀態檔：叫用 `BJTools::logData`，將上述 6 個暫存檔合併寫入 GOX 健康狀態檔，然後輸出至 `goxSOH` 檔。檔中含 GOX 健康狀態以及導航資訊。
- (6) 建立電離層閃爍資料檔：電離層閃爍是電波訊號受電離層影響的一種觀測現象。閃爍發生時，該訊號強度在接收儀中忽強忽弱，如閃爍狀。電離層閃爍資料即為此現象的一種指數，顯示訊號受電離層干擾的嚴重程度，可用來研究電離層。叫用 `BJTools::scinData`，從 `scin.txt` 中取出閃爍資訊，輸出至 `scnRaw` 檔。其中導航資訊包括 GPS 時間、PRN 編號、GOX 天線編號、C/A 電碼的訊噪比，以及閃爍數據等。‡
- (7) 建立低軌衛星精密定軌和電離層掩星程序所需的低取樣觀測資料檔：叫用

---

\* GOXA、GOXB 分別對應 GOX side A 與 side B。

† 自從改用 NOAA 地面接收系統接收福衛三號資料起，該資料即不帶 USN 訊息。

‡ 閃爍數據的定義見下文 PISNR 的定義。

- BJTools::splitLRdata\_merge 副常式，依天線編號把 lorate.txt 檔分成 lorate.txt0[0123] 共 4 檔，然後叫用 binex::blackJack2binex 副常式，將後者一轉成 BINEX 0x7f-00 格式，並存入 podGps 檔。
- (8) 分析低取樣觀測資料品質：執行 teqc 程式，對低取樣觀測資料做品質檢驗，並將結果附加在 goxSOH 檔中。
  - (9) 建立大氣掩星程序所需的高取樣觀測資料檔：叫用 BJTools::sortOpnGps 副常式，將 4 個高取樣觀測檔依 PRN 編號排序，再加上檔頭和檔尾，存入 opnGps 檔。檔頭資料包括取樣頻率、PRN 編號、GPS 時間、C/A 電碼虛擬距離、天線編號。檔尾資料包括檔案類別代號、資料格式代碼。<sup>\*</sup>
  - (10) 建立低軌衛星姿態檔：叫用 BJTools::navData 副常式，從 navg.txt 檔中取出導航資訊中的低軌衛星坐標和速度，再叫用 BJTools::att2gfz 副常式，配合低軌衛星坐標和速度，將 ATT.out 檔由地心地固坐標系轉至地球慣性坐標系（指定用 J2000），再存入 leoAtt 檔（該檔為 GFZ 制定的衛星姿態檔案格式）。
  - (11) 建立 TIP 觀測資料檔：直接複製 TIP 資料暫存檔至 tipBin 檔。
  - (12) 更新程序狀態檔：將目前的程序狀態存入 lev1St 檔以取代舊的狀態資訊。狀態資訊包括下載序號、低軌衛星編號、cosLv0 檔名、起訖觀測或紀錄時間等。
  - (13) 更新資料庫資訊：取 goxBin 和 goxSOH 資料來更新資料庫中 cosmicrt\_lv10 群組的相關資訊。更新的資訊包括日期、下載序號、低軌衛星編號、cosLv0 檔名、起訖觀測或紀錄時間、GOX、TIP 和 ATT 資料檔大小、GOX 天線編號等。

## 2.1 BJTools::parseLv10 副常式說明

低軌衛星將原始觀測資料下傳至地面接收站之前，SSR/PC 會先將資料丟給 MIU，MIU 將資料分包後，才丟給發射器，發送至地面接收站。地面 USN 將每份資料加檔頭和檔尾後，再串接起來傳送。典型的 level 0 資料含數萬份如此串接起來的資料。每份資料依序是 USN 檔頭、MIU 所加的傳送分包檔頭、科學資料封包（含 SSR/PC 檔頭）和 USN 檔尾。

SSR/PC 除了在科學資料前加 PP 檔頭之外，還會在 PP 檔頭前加「空位元組」。通常，SSR/PC 會先切除空位元組，才把剩下的資料發送給 MIU。然而有時 SSR/PC 會誤把實際資料的第一個位元組當成空位元組切除，再把剩下的部分發送給 MIU（參見 Hunt et al. [2006]）。結果使得每一份觀測資料都少了一個位元組。這種異常的情況稱為「資料纏繞」。程式在處理纏繞資料時，會先補上一個空位元組，使資料長度完整。詳如下述。

本模組主要目的是去除 USN、MIU 和 SSR/PC 所附加的檔頭和檔尾，並將科學封包拆解成 TIP、ATT 和 GOX 檔。主要可分成三個部分。其步驟分述如下。

### (1) MAINLOOP 部分：

- a. 檢查檔中是否有 USN 檔頭：在舊版程式中，若發現 USN 檔頭則讀出，但在目前版本中，改為若發現 USN 檔頭則直接跳過。這是因為福衛三號原始資料的接收站已由原先的 USN 改為 NOAA，故只有舊資料才有 USN 檔頭，而新資料則

---

<sup>\*</sup> 詳見 [http://tacc.cwb.gov.tw/cdaac/cgi\\_bin/fileFormats.cgi?type=opnGps](http://tacc.cwb.gov.tw/cdaac/cgi_bin/fileFormats.cgi?type=opnGps)。

無。程式假設 USN 檔頭和資料長度永遠正確，故不檢查 USN 時間是否有中斷。若檔頭不足 4 位元組，則視為無 USN 檔頭，同時跳出 MAINLOOP。

- b. 讀入傳送分包檔頭：每段傳送分包檔頭長 6 位元組。讀檔頭前，會先讀前面一小段長 4 位元組的 CCSDS 同步碼，作為定位之用。
- c. 讀科學封包：該封包分成 2 部分，前面 6 位元組是 SSR/PC 所加的 PP 檔頭，後面 1103 位元組才是來自科學儀器的科學資料。封包讀取後，暫存而不解開。
- d. 分類科學封包：根據 PP 檔頭判斷有無資料纏繞，將科學封包分成 good 和 wrapped 兩類。Good 資料表示 PP 檔頭後面接無漏失的資料；其餘則為 wrapped 資料。程式會先在 wrapped 資料前補上一個空位元組，才存入雜湊變數。<sup>\*</sup>分類完成後，讀取 USN 檔尾。重複上述步驟，直到讀完所有資料。

## (2) 處理 wrapped 資料部分：

這段冗長的程式主要是找出 wrapped 資料中，第一個 PP 檔頭的位置，然後把被切除的那一個位元組的位置找出來——依固定的間隔，可以把所有被切除的位元組的位置通通找出來。在拆解成 GOX、ATT 和 TIP 資料暫存檔後，叫用 fixWrapGOX 副常式，用 checksum 程式補回每個毀損的位元組，並刪除 ATT 資料中毀損的位元組。拆解後分別存入暫存檔，且帶 wrapped 副檔名。

## (3) 處理 good 資料部分：

主要是將 good 資料拆解成 GOX、ATT 和 TIP 資料暫存檔。在拆解之前，會偵測 SSR/PC 分包號碼的數列中，是否有資料中斷。若有則輸出警告訊息。拆解後亦分別存入暫存檔，且帶 good 副檔名，故不會和前面的暫存檔重疊。

## 2.2 重要的輸出資料

高取樣觀測資料包括：<sup>†</sup>

- (1) 觀測時間
- (2) L1、L2 相位
- (3) L1、L2 訊噪比
- (4) CA 相位模式值（僅限開迴路資料）
- (5) Delta phase（僅限開迴路資料）

低取樣觀測資料包括：<sup>‡</sup>

- (1) 觀測時間
- (2) CA、P1、P2 訊噪比（其中 CA 訊噪比是由 CA 電碼導出的 L1 訊噪比）
- (3) CA、P1、P2 電碼虛擬距離
- (4) CA、L1、L2 相位（其中 CA 相位是由 CA 電碼導出的 L1 相位）
- (5) 低軌衛星坐標和速度

---

<sup>\*</sup> 不論資料是否纏繞，每幅資料都含 PP 檔頭和科學資料，故長度為 1109 位元組，而非 1103 位元組。

<sup>†</sup> 參見 opnGps 資料格式說明，[http://tacc.cwb.gov.tw/cdaac/cgi\\_bin/fileFormats.cgi?type=opnGps](http://tacc.cwb.gov.tw/cdaac/cgi_bin/fileFormats.cgi?type=opnGps)

<sup>‡</sup> 參見 podObs 資料格式說明，[http://tacc.cwb.gov.tw/cdaac/cgi\\_bin\\_fileFormats.cgi?type=podObs](http://tacc.cwb.gov.tw/cdaac/cgi_bin_fileFormats.cgi?type=podObs)。

## 2.3 參考文獻

Hunt, D., et al., 2006: CDAAC technique difficulties, *FORMOSAT-3/COSMIC Workshop 2006 – Early results & IOP Campaigns*, Taipei.

### 3. 低軌衛星精密定軌程序

此程序主要估算低軌衛星的精密軌道和衛星時錶偏差值，同時也是即時和後處理程序中，最複雜的程序之一。主要的原因是 CDAAC 不用 Bernese 的程序控制檔來製訂流程，而是自行撰寫 Perl 程式，建構更靈活的功能，並叫用 BPE 執行處理程序。

即時程序包含 fiducial 觀測資料處理程序，以及太空 LEO POD 程序；後處理程序則只包括太空 LEO POD 程序，無 fiducial 程序。為求較高的時效性，即時 fiducial 程序必須採用速報之 GPS 衛星星曆及地球自轉軸（簡稱地軸）校正參數來分析 fiducial 觀測資料，獲得地面各 GPS 測站上空的對流層資訊，並且估算 GPS 時錶偏差值，以提供太空 LEO POD 程序估算低軌衛星之精密軌道及時錶偏差值。後處理程序則可直接取用國際 GNSS 服務網所提供的 GPS 時錶偏差值，估算低軌精密軌道，因此不需 fiducial 程序，也不必輸入 fiducial 資料。

此外，即時 fiducial 程序還包括單點精密定位子程序，用來估算 fiducial 站坐標，稱為 PPP 坐標，進而估算對流層垂直延遲量。為求較高的解算精度，PPP 子程序使用 IGS 快報資料而不用速報資料。由於快報資料較晚公布，不可能得到即時的 PPP 坐標，因此即時程序把前幾日的 PPP 坐標視為最新的測站坐標。

不論地面程序或太空程序，皆採用 Bernese 5.0 軟體進行資料分析估算。輸出入資料及處理程序說明如下。本章是以 COSMIC Project Office [2005?] 為基礎，更新至 TACC 現行版本。

#### 3.1 輸出入檔案類別

即時程序需輸入的檔案類別有：

canHrf：來自加拿大的地面 GPS 觀測量

cosHrf：來自 CDAAC 的地面 GPS 觀測量

eumHrf：來自歐洲氣象衛星開發組織的地面 GPS 觀測量

igsHrf：來自 IGS 的地面 GPS 觀測量

iguOrb 和 iguPol：IGS 速報之 GPS 衛星星曆及地軸校正參數，每 6 小時更新一次

igrOrb 和 igrPol：IGS 快報之 GPS 衛星星曆及地軸校正參數，與 iguOrb 和 iguPol 相似，但資料公布時間比速報資料晚大約 17 小時

igrClk：IGS 快報之 GPS 時錶偏差值

corDcb：歐洲 CODE 即時公布的 GPS 電碼偏差之雙頻差分值

igsSnx：IGS 組態檔，SINEX 格式，內含地面站名稱、接收器型號、天線型號，以及天線高等資訊

satCrx：GPS 衛星狀態檔，Bernese CRX 資料格式

leoAtt：低軌衛星姿態四元數

podGps：含低軌衛星收到的 GPS 雙頻電碼相位觀測量，1 秒取樣

brnFil：含接收天線的型號及天線相位中心校正值的參數檔，Bernese 格式

iraPol：美國海軍 IERS 所提供之地軸校正參數

後處理程序需輸入的檔案類別有：

igsOrb 或 codOrb：前者為 IGS 公布之最終精密星曆；後者為歐洲 CODE 公布之精密星曆

igsPol 或 codPol：前者為 IGS 公布之最終地軸校正參數；後者為 CODE 公布之地軸校正參數

igsClk 或 codClk：前者 IGS 公布之精密時錶偏差值；後者為 CODE 公布之精密時錶偏差值

leoAtt：同即時之 leoAtt

podGps：同即時之 podGps

lev1St：記錄福衛三號原始資料剖析程序的狀態檔

即時程序輸出的檔案類別有：

f30Gps：含 30 秒取樣的地面 GPS 觀測量，BINEX 0x7f-00 格式

gpsPod：GPS 衛星質心之 J2000 坐標和速度，Bernese STD 格式

gpsClk：GPS 時錶偏差值，Bernese CLK 格式，取自 igsOrb

brnPol：地軸校正參數，Bernese ERP 格式

gprPod：同 gpsPod，但取自 igrOrb

brrPol：同 brnPol，但取自 igrPol

fidPre、fidTab：兩者都是地面 GPS 站精密坐標，惟 fidTab 是 fidPre 的符號鏈結

fidTrp：地面 GPS 站上空之對流層 ZTD

comClk、comClr：30 秒取樣之 GPS 衛星時錶偏差值（前者 4 小時 1 檔；後者從前者取出最新資料，且涵蓋整個掩星觀測時間）

leoOrb：低軌衛星質心之地心地固坐標和速度，SP3 格式

leoPod：低軌衛星質心之 J2000 坐標和速度，Bernese STD 格式

leoClk：低軌衛星時錶偏差值

後處理程序輸出的檔案類別有：

gpsPod：同即時之 gpsPod，但取自 igsOrb

gpsClk：同即時之 gpsClk，但取自 igsClk

brnPol：同即時之 brnPol，但取自 igsPol

comClk：同即時之 comClr，但為後處理資料

leoOrb：同即時之 leoOrb，但為後處理資料

leoPod：同即時之 leoPod，但為後處理資料

leoClk：同即時之 leoClk，但為後處理資料

## 3.2 即時程序

在即時程序中，地面 GPS 程序主要以二次差估計所有測站的對流層 ZTD（fidTrp），以及 GPS 衛星時錶偏差值（comClk），其中包括以 igrOrb、igrPol 和

f30Gps 等資料估算地面 GPS 站坐標。太空 POD 程序主要以零次差減動力逼近法估算 LEO 精密軌道。其中包括從 comClk 中取出涵蓋整段 LEO POD 資料弧長的 GPS 衛星時錶偏差值 (comClk)，以及低軌衛星的時錶偏差值 (leoClk)。零次差方式允許地面 GPS 程序和太空 POD 處理程序可以很容易的分開進行，而不需要與 LEO 觀測時刻同步的來估算衛星時錶偏差值。說明如下。

### (1) 地面 GPS 資料處理程序

**gpsOrb5.pl**：將 GPS 軌道資料擬合至 Bernese 軌道模式

此步驟在即時程序中，一共執行兩次。第一次將 IGS 快報的 GPS 軌道資料 igrOrb 和地軸校正參數 igrPol 擬合至 Bernese 軌道模式；第二次將 iguOrb 和 iguPol 擬合至 Bernese 軌道模式，也將 iguOrb 中的時錶偏差值進行多項式擬合。程式讀取 igrOrb 或 iguOrb 的檔名時間，作為起始時間，然後建立一暫存目錄，先設定 Bernese 環境變數，再準備好執行 Bernese 所需的資料，包括 Session 檔、satCrx、igrPol 或 iguPol，然後依序叫用下列 Bernese 程式。最後輸出 gpsPod、gpsClk、brnPol 三檔。

**POLUPD**：將 igrPol 或 iguPol 檔由地心地固坐標轉至 J2000 坐標，並存成 Bernese 格式的 ERP 檔。

**PRETAB**：將 PRE 檔由地心地固坐標轉至 J2000 坐標，並存成 TAB 檔，供 ORBGEN 程式讀取。該 PRE 檔是 igrOrb 或 iguOrb 檔在暫存目錄中的符號鏈結。<sup>\*</sup>PRETAB 同時對 PRE 檔中的時錶偏差值進行二次多項式擬合，再存成 CLK 檔。<sup>†</sup>

**CCCLOCK**：若 PRETAB 執行後產生兩個 CLK 檔的話，就把兩檔串連成一檔。

**ORBGEN**：將上述的 ERP 檔和 TAB 檔對 Bernese 軌道模式進行最小平方擬合，得 STD 檔（Bernese 標準軌道參數檔，J2000 坐標）。Bernese 軌道模式由密切軌道元素（即軌道 6 元素）以及 9 個輻射壓加速度項所組成。<sup>‡</sup>

**checkIGU.pl**：檢查 iguOrb，並排除異常檔

IGS 速報之 iguOrb 檔可能含有異常值，例如：缺 GPS 時錶偏差值，而以 999999.999999 取代，或 GPS 時錶偏差值的偏移量過大等。本程式用來排除異常的 iguOrb 檔。後續程式在讀不到最新的 iguOrb 檔時，會自動讀入舊檔。

**dofidPPP.pl**：準備 PPP 子程序排程

自 CDAAC 2.00 起，新增 PPP 子程序以估算 fidPre。本程式為 PPP 子程序準備所需的 fiducial 資訊，以利後續排程。因為 PPP 需要龐大的計算資源，因此在採用平行處理時，這些 fiducial 資訊會被分批送至不同的運算主機，並在處理後移除，再排入新的 fiducial 資訊以進行下一批處理。移除的目的即在於避免處理過的 fiducial 資訊被當成未處理的資料，再次排入處理程序中。

**fidPppRT.pl**：計算 fiducial 站之 PPP 坐標

---

<sup>\*</sup> 實際操作，是將把 igrOrb 或 iguOrb 連結至 THIS 目錄中，名為 BERNORB.PRE 的符號鏈結。該檔雖名為 PRE (precise orbit file)，但仍不是最終的精密軌道。

<sup>†</sup> 每 12 小時擬合一次時錶偏差值。

<sup>‡</sup> Bernese 以初始時間  $t_0$  的軌道 6 元素定義初始條件，再配上輻射壓對衛星所造成的 9 個加速度分量。詳見 Dach et al [2007]第 31-32 頁 Deterministic Orbit Parameterization。

本程式主要執行 PPP 子程序，由 fiducial 資料估算 PPP 坐標。首先叫用 teqc 程式，把 f30Gps 檔轉成 RINEX 格式，再叫用下列 Bernese 程式，輸出 fiducial 站最終坐標至 pppCrd 檔。

**CCRNXC**：將 igrClk 轉成 Bernese 衛星時錶檔 (CLK 檔)

**RNXSMT**：讀入 fiducial 資料，平滑 fiducial 資料中的電碼觀測量，並輸出至 Bernese 觀測檔 (SMT 檔)。Fiducial 相位資料中若有周波脫落和異常值也會被標示出來。

**RXOBV3**：將上述電碼和相位觀測資料轉至 Bernese 零次差電碼及相位觀測檔 (CZH、CZO、PZH、PZO 檔)。

**CODSPP**：計算 fiducial 站之接收器時錶偏差值，使之與 GPS 時間同步。此外，亦由平滑後的電碼觀測資料，以單點定位近似法估算 fiducial 站的粗略坐標。後者在 RINEX 觀測檔頭的近似坐標可疑時，可派上用場。觀測量中若有異常值，在這個步驟中也可被偵測出來。<sup>\*</sup>

**GPSEST**：以無電離層線性組合 (簡稱 L3) 為基礎，產生殘差檔，供後續過濾資料之用。<sup>†</sup>

**RESRMS**：過濾殘差檔。

**SATMRK**：標示觀測檔中的異常值。該異常值仍保留，只是在相應的紀錄檔中加註記。

**GPSEST**：估算 PPP 坐標。

**RESFMT**：將殘差檔轉成純文字格式輸出。

**ADDNEQ2**：計算 fiducial 站最終坐標。

**pppCrd2fidPre\_RT.pl**：建立新的 fidPre 檔

首先讀入 IGS 參考坐標檔 (IGS05\_R.CRD)，再以 pppCrd，配合前一個 fidTab 檔，共同更新 fidPre 檔。檔內含所有已知的 fiducial 站坐標。到此完成 PPP 子程序。

**champZero2one.pm**：把下載到 TACC 系統的 fiducial 資料轉成 f30Gps

下載到 TACC 系統的 fiducial 資料包括來自加拿大、IGS、EUMETSAT，以及 CDAAC 本身的地面 GPS 觀測檔 (canHrf、igsHrf、eumHrf、cosHrf)。本程式把上述資料，從原本的 1 秒取樣，平滑稀釋為 30 秒取樣，再轉成 BINEX 格式，輸出至 f30Gps 檔。平滑的方法是將該秒前後 15 秒內的資料做多項式回歸，再把結果當成該秒的資料。

**dofidT.pl**：處理難以排程的工作項目

因下一支程式並不是以資料檔到達的時間來排程，而是以 fiducial 站數是否大於或等於 37 站來決定排程的，所以本程式在於解決這種困難的排程，其中並無科學內涵。輸出檔含 GPS 地面站名以及取自 iguOrb 的 GPS 衛星坐標，僅供下一支程式之用。

**fidTrop5.pl**：計算對流層法方程

本程式以 Bernese 建構每小時一個法方程檔 (fidNeq)，供後續程式堆疊本程式所產生的二次差法方程，以估算對流層 ZTD。程式在設定資料的起訖時間後，才開始建構法方程。處理流程見圖 3.1。叫用 Bernese 程式如下列。最後輸出 fidNeq。注意以下 Bernese 程式名稱後面若接一個底線和字串，則表示該程式讀入的 INP 檔位於該字串所

---

<sup>\*</sup> 參見 Dach et al. [2007]第 431 頁。

<sup>†</sup> 殘差定義為估算值減觀測值。反之，觀測值加殘差即為估算值。見 Dach et al. [2007]第 140、144 頁。

代表的 Bernese OPT 目錄下。例如：GPSEST\_C1 代表 GPSEST 程式將讀入位於 C1 OPT 目錄下的 GPSEST.INP 檔。若無，則在預設的 THIS OPT 目錄下。

**BXOBV3**：將 f30Gps 轉成 Bernese 零次差電碼及相位觀測檔。不論訊噪比如何或者有無周波脫落，所有資料都會被轉檔。此為 CDAAC 自行撰寫之類 Bernese 程式。

**CODSPP**：由 Bernese 零次差電碼觀測檔計算所有 fiducial 站的時錶偏差值（誤差小於 1  $\mu$ s），使地面 GPS 接收器時間觀測量與 GPS 時間同步。衛星截止仰角設為 10 度。

**SNGDIF**：由 Bernese 零次差相位觀測檔建立基線以及一次差相位觀測量，供後續使用。

**MAUPRP**：偵測與修正一次差相位觀測量中的周波脫落。其中採用 L1、L2 線性組合觀測量以決定每一段無周波脫落的資料。<sup>\*</sup>若無法清楚判定，則把它當成有周波脫落來解決。若仍無法解決，才把它視為是一個新的 L1、L2 周波未定值的開始。

**MPRXTR**：取出 MAUPRP 執行後輸出的摘要資訊。

**BASLST**：找出長度在 2000 公里以下的基線，供後續進行無電離層周波未定值估算。無電離層周波未定值又稱為 L3 周波未定值。

**GPSEST\_C1**：以二次差估算 L3 周波未定值，並以 Saastamoinen 對流層模式為先驗對流層模式估算對流層 ZTD。GPSEST 可以做資料的預處理，也可以估算某些初始解、周波未定值，以及建立法方程。在此為 GPSEST 的初始化，其主要目的是檢查資料的品質，並儲存 L3 殘差檔，供後續程式檢查和標示。該殘差的加權均方根應近 1.0 公釐級。

**GPSXTR\_C1**：從 GPSEST 產出的紀錄檔中，取出求解摘要。該摘要檔包括待求解的周波未定值的個數、已解出的周波未定值的百分比等。

**RESRMS**：檢查殘差，並標示異常值。該異常值定義為殘差大於 5 公釐。

**SATMRK**：根據上一步的結果，在觀測檔中標出異常的觀測量。

**GPSEST\_C2**：以二次差 QIF 方式，逐一基線的求解 L1 和 L2 周波未定值，並將結果存入觀測檔。逐一基線的目的是節省 CPU 和記憶體用量。先前估出的 L3 對流層 ZTD 也會當成已知數一併讀入。

**GPSXTR**：檢查周波未定值的殘差。

**GPSEST\_THAT**：最後一次執行 GPSEST，以二次差估算 L3 法方程，再存入 NQ0 檔。所有 fiducial 坐標及對流層延遲量也會被估算。先前已解出的周波未定值在此當成已知數，而先前未解出的周波未定值則當成未知數處理。先驗對流層模式仍採用 Saastamoinen，但映射函數設為 WET\_NIELL。資料將稀釋成 120 秒取樣，同時考慮衛星仰角對觀測量的加權。內含站坐標和對流層 ZTD 值的法方程矩陣都會被存入 NQ0 檔，供後續堆疊之用。

**rtclock.pl**：估算 GPS 衛星時錶偏差值。

自 CDAAC 3.0 起，估算 GPS 時錶偏差值的工作從其他程式中取出，獨立運作。根據 Van Hove [2011] 的說法，其目的是為將來較大衛星星系（如福衛七號）預做準備。因本程式相當耗時，按原本的設計，福衛三號的下載序號每出現一次便估算一次計，會有 5 次重複。對福衛七號而言，將有更多次重複。改以每 15 分鐘估算前 4 小時的 GPS 衛星時錶偏差值，並輸出至 comClk，不再以下載序號計，可大量提升資料處理的即時性。叫用的 Bernese 程式如下。Bernese 程式後的底線和字串的定義同上述。

---

<sup>\*</sup> 參見 Dach et al. [2007] 第 116 頁。

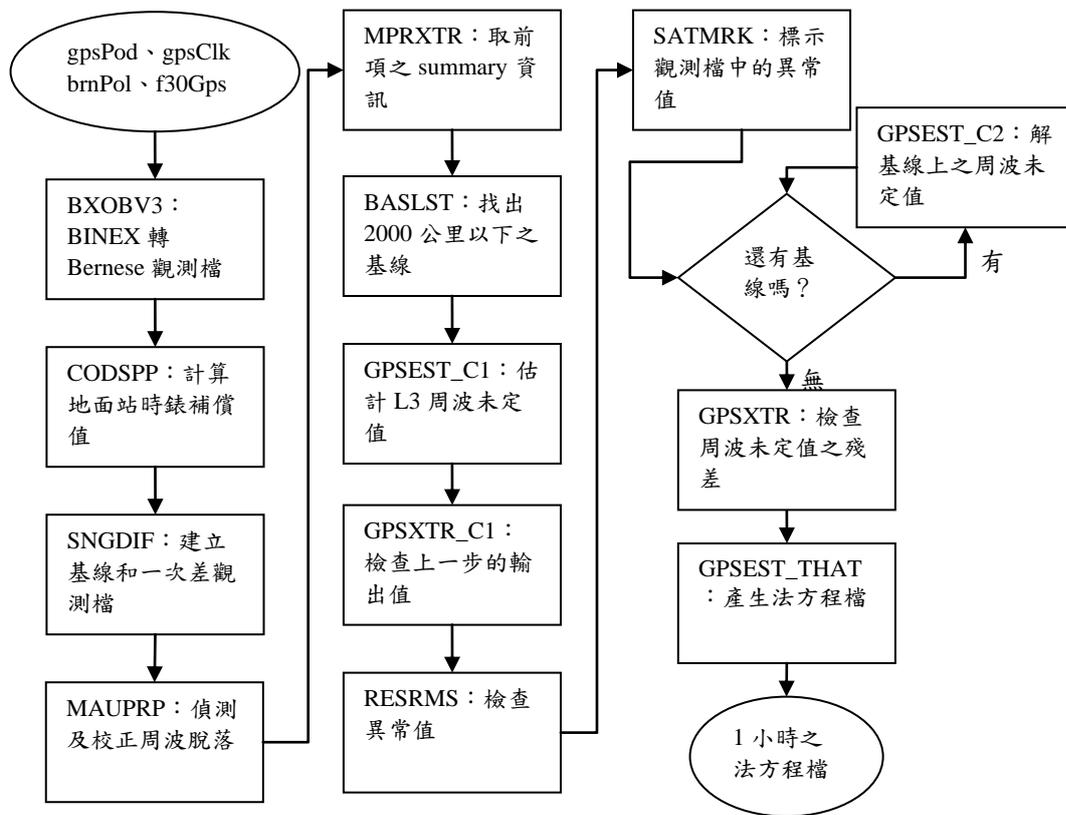


圖 3.1：fidTrop5.pl 之法方程演算流程圖。

**BXOBV3\_CLK**：將 f30Gps 轉成 Bernese 零次差電碼及相位觀測檔。

**CLKEST\_CLK**：估計每顆 GPS 衛星 30 秒取樣之時錶偏差值。

**estTropRT.pl**：估計對流層 ZTD。

本程式用來估計前 12 小時內所有測站的每小時 ZTD 參數。執行中會將 fiducial 站坐標暫時去除，再堆疊前 12 小時內的法方程，才反演出對流層 ZTD。首先讀入 fidNeq 檔名，再由檔名取得資料起訖時間，以取得前 12 小時內所有的 fidNeq 檔，再叫用下列 Bernese 程式。最後輸出 fidTrp。

**ADDNEQ2\_TROP**：堆疊前 12 小時的 fidNeq，估計每小時所有站之 ZTD 值。程式會暫時去除站坐標，才堆疊法方程。最後反演法方程組，提供一小時一個 ZTD 估計值。

## (2) 太空 LEO POD 處理程序

**leoOrb5\_rtclock.pl**：執行 LEO POD。

本程式以 L3 零次差減動力逼近法處理 LEO POD。它會依不同任務讀入參數檔中不同的參數。對即時程序而言，LEO POD 程序至少要有 6 至 12 小時的軌道弧長才會執行。同樣根據 Bernese 程式的要求，只取 9 分鐘的倍數弧長。自 CDAAC 3.00 起，程式叫用 BernTools::getClkDmpC，依掩星觀測的起訖時間，從 comClk 中取出最新且涵蓋整段弧長的 GPS 時錶偏差估計值，輸出至 comClr，供後續 Bernese 程式使用。處理流程見圖 3.2。叫用的 Bernese 程式有：

**BXOBV3**：把 f30Gps 轉成 Bernese 電碼和相位觀測檔。

**CODCHK\_THIS**：檢查電碼觀測量有無異常值。

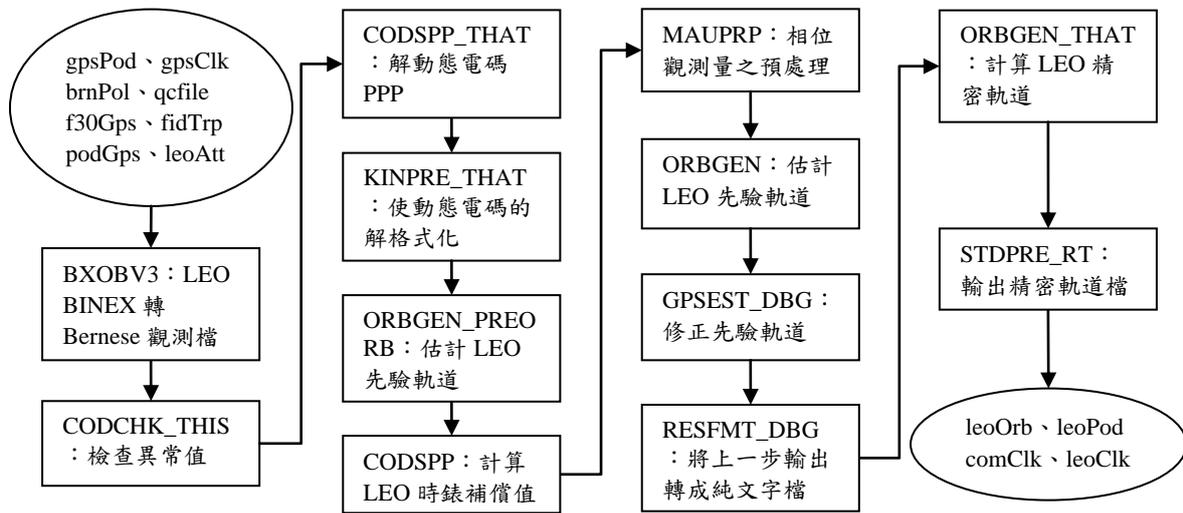


圖 3.2: leoOrb5\_rtclock.pl 之處理流程圖。

**CODSPP\_THAT**: 取 L3 電碼觀測量，計算動態精密點位置（即低軌衛星坐標）和低軌衛星的時間，並分別輸出至 KIN 和 CLK 檔。

**KINPRE\_THAT**: 將 KIN 檔轉成 SP3 格式，輸出至 PRE 檔。

**ORBGEN\_PREORB**: 對 PRE 檔之軌道資料進行最小平方擬合，得到 Bernese 標準軌道檔，用來偵測 LEO 時錶偏差值和周波脫落，並修正之。同時輸出 LEO STD 和 RPR 檔。

RPR 檔含輻射壓資訊。

**CODSPP**: 計算低軌衛星時錶偏差值。輸入檔包括：GPS 時錶偏差值（comClk）、GPS 軌道資訊檔（gpsPod）、前一個下載序號之 LEO 軌道資訊檔（leoPod）、低軌衛星姿態檔，以及地軸校正參數（brnPol）。算得的 LEO 時錶偏差值是以無電離層之電碼觀測量估計的。

**MAUPRP**: 偵測及估計無電離層之 LEO 零次差觀測量的周波脫落。輸入的資料有：低軌衛星收到的相位觀測量、GPS 時錶偏差值、GPS 軌道資訊檔（gpsPod）、前一個下載序號之 LEO 軌道資訊檔（leoPod）、低軌衛星姿態檔，以及地軸校正參數（brnPol）。

**ORBGEN**: 對低軌衛星動態點位置做最小平方擬合。

**GPSEST\_DBG**: 修正 LEO 先驗軌道。輸入值包括已修正周波脫落之 LEO L3 載波相位觀測量、30 秒取樣的 GPS 時錶偏差值、GPS STD 軌道資料檔、先驗的 LEO STD 和 RPR 檔、低軌衛星姿態檔，以及地軸校正參數。L3 周波未定值是在反演前由 NEQ 系統預估出來的，而 LEO 時錶偏差值則是由觀測時刻一筆接一筆的預估出來的。輸出的 ELE 檔含校正後的 6 個密切軌道元素、9 個輻射壓加速度項，以及每 12 分鐘一筆的虛擬速度猜值。此猜值在徑向、橫向和法線方向先驗標準差分別為  $2 \cdot 10^{-5}$ 、 $1 \cdot 10^{-5}$ 、 $1 \cdot 10^{-5}$  m/s。另輸出含 LEO 時錶偏差值的 CLK 檔，以及殘差檔。\*

**RESFMT\_DBG**: 將殘差檔轉成純文字檔輸出。

**ORBGEN\_THAT**: 以 ELE 檔中的初始條件和推估的速度資訊，更新 leoPod。

**STDPRE\_RT**: 由 leoPod 建立 LEO 精密軌道檔（leoOrb）。

\* 詳見 Dach et al. [2007]第 507-508 頁。

最後叫用 `BernTools::readStddifPlt`，比較軌道重疊的部分，以其三維均方根差判斷 LEO POD 程序是否成功。若差值小於 5 公尺，則輸出 `leoPod` 和 `leoOrb`；若大於 5 公尺，則表示此次解算失敗，不會輸出產品。

### 3.3 後處理程序

如前所言，後處理程序只含太空 POD 程序。該程序是以一個月份的低軌衛星任務資料為單位，取零次差無電離層的相位觀測量，以減動力逼近法進行 LEO POD 運算。詳述如下。

#### (1) 太空 LEO POD 資料處理程序

`gpsOrb5PP.pl`：將 IGS 最終軌道擬合至 Bernese 軌道模式

其做法類似即時程序中的 `gpsOrb5.pl`，惟輸入資料改用 `igsOrb` 和 `igsPol`。<sup>\*</sup>同時將時錶偏差值 (`igsClk` 或 `codClk`) 轉成 Bernese CLK 格式輸出 `comClk` 檔。

`leoOrb5.pl`：執行 LEO POD

本程式類似即時之 `leoOrb5_rtclock.pl`，但依不同任務讀入不同參數，並以無電離層零次差減動力逼近法處理 LEO POD。對後處理程序而言，LEO POD 是以一天 24 小時的軌道弧角來處理的。如果資料長度小於 24 小時，則軌道弧角就用 9 分鐘的弧角的倍數來算。這都是 Bernese 程式的要求。主要的資料處理流程可分成三個步驟：

- a. 計算先驗的 LEO 軌道
- b. 資料預處理以及清除
- c. LEO 軌道估算精度的提升

一個先驗軌道是來自一個觀測值與模式擬合的結果。程式以 GPS 電碼觀測量，配合一動力模式，擬合出動態精密點位置。得到的先驗軌道用在改進 24 小時弧角的軌道運算上。該動力模式是由軌道 6 元素、9 個輻射壓加速度項，以及每 12 分鐘一筆的虛擬速度猜值所組成。不過，就資料清除的步驟而言，這個先驗軌道可能會被切成四等分（視任務而定），來改善軌道的準度。其餘的計算部分叫用 Bernese 程式如下。

`BXOBV3`：把 `f30Gps` 轉成 Bernese 電碼和相位觀測檔。

`CODSPP_THAT`：取 L3 虛擬距離觀測量，計算動態精密點位置和低軌衛星的時間，並分別輸出至 `KIN` 和 `CLK` 檔。

`KINPRE_THAT`：將 `KIN` 檔轉成 `SP3` 格式，輸出至 `PRE` 檔。

`ORBGEN_PREORB`：對 `PRE` 檔之軌道資料進行最小平方擬合，得到 Bernese 標準軌道檔，用來偵測 LEO 時錶偏差值和周波脫落，並修正之。同時輸出 `LEO STD` 和 `RPR` 檔。

`CODSPP`：計算 LEO 時錶偏差值。輸入檔包括：GPS 時錶偏差值、GPS 軌道資訊檔 (`gpsPod`)、LEO STD 軌道資訊檔 (`leoPod`)、低軌衛星姿態檔，以及地軸校正參數 (`igsPol` 或 `codPol`)。算得的 LEO 時錶偏差值是以無電離層之電碼觀測量估計的。

`MAUPRP`：偵測及估計無電離層之 LEO 零次差觀測量的周波脫落。輸入的資料有：低軌衛星收到的 L1、L2 相位觀測量、GPS 時錶偏差值、GPS 軌道資訊檔 (`gpdPod`)、LEO 軌道資訊檔 (`leoPod`)、低軌衛星姿態檔，以及地軸校正參數 (`igsPol` 或

---

<sup>\*</sup> 若觀測日期早於 2006.309 的資料，則以 `codOrb` 和 `codPol` 檔取代 `igsOrb` 和 `igsPol`。

codPol)。

**ORBGEN**：對 LEO 動態點位置做最小平方擬合。

**GPSEST**：對先驗的 LEO 軌道進行軌道改進。輸入值包括已修正周波脫落之 LEO L3 載波相位觀測量、低軌衛星姿態檔，以及地軸校正參數。L3 周波未定值是在反演前由 NEQ 系統預估出來的，而 LEO 時錶偏差值則是由觀測時刻一筆接一筆的預估出來的。輸出的 ELE 檔含校正後的 6 個密切軌道元素、9 個輻射壓加速度項，以及每 12 分鐘一筆的虛擬速度猜值。該速度猜值的先驗值仍是  $2 \cdot 10^{-5}$ 、 $1 \cdot 10^{-5}$ 、 $1 \cdot 10^{-5}$  m/s。另輸出含 LEO 時錶偏差值的 CLK 檔，以及殘差檔。

**ORBGEN\_THAT**：以 ELE 檔中的初始條件和推估的速度資訊，更新 leoPod。

**STDPRE**：由 leoPod 建立 LEO 精密軌道檔 (leoOrb)。

**STDDIF**：比較正在處理的軌道以及前一個的軌道檔 (leoPod)，兩軌道重疊的部分，以判斷 LEO POD 程序是否成功。

在 leoOrb5.pl 的最後，GPSEST 會檢查處理成功的觀測量數目。如果數目小於 1000，則程式會輸出錯誤訊息並結束；反之，則將統計結果寫入資料庫的 mission\_leoOrb5 項，再輸出 leoPod 和 leoOrb 檔。

### 3.4 LEO POD 程序的錯誤訊息與說明

(1) 來自太空程序的錯誤訊息

#### Chi-square of Solution Too Large

執行 GPSEST 後會輸出卡方值。若該值大於 100，leoOrb5\_rtclock.pl 即判定結果之統計誤差過大而宣告失敗。統計上，卡方值越大表示理論模式與實際資料的湊配越差。

#### Number of Observations of Solution Too Small

執行 GPSEST 後會輸出 LEO 軌道觀測量 (含 LEO 軌道 6 元素和 9 個輻射壓加速度項等)。若觀測量小於 100 個，leoOrb5\_rtclock.pl 即判定能解出的觀測量太少而宣告失敗。CDAAC 表示：這種問題通常發生於低軌衛星姿態不良的時候，故無法由 CDAAC 程式解決 [Schreiner, 2006]。

#### Orbit Overlap Too Large

執行 STDDIF 後會輸出正在處理的 LEO 軌道。leoOrb5\_rtclock.pl 和 leoOrb5.pl 比較前後軌道重疊部分的兩個均方根。若其差值大於 5 公尺，即判定軌道誤差過大而宣告失敗。

#### TOO Large of Data Gap in Tracking Data

前後下載序號的資料之間，若中斷的時間太長，則無法完成 LEO POD。Bernese 在程序中算出中斷的時間長度，經 leoOrb5\_rtclock.pl 判斷後，捨棄中斷超過 12 小時的後段資料。

#### TOO Few Data Epochs in Tracking Data Arc

若一份下載資料中的 LEO 軌道弧長中的觀測量太少，則無法完成 LEO POD。例如本次下載的資料有 572 分鐘長，則觀測量必須多於 572 個。若否，則捨棄。

#### Weighted RMS of Solution Too Large

POD 解算誤差太大 (加權均方根大於 0.01 公尺) 而宣告失敗。這個問題來自於 iguOrb

資料品質不良[Schreiner, 2007]。CDAAC 已於 2007.079 更新 `leoOrb5_rt.pl`，加入 `BernTools::getBadprns`，來排除品質不良的 `iguOrb` 資料，減少這種訊息出現的機率。CDAAC 3.0 起，改以 `checkIGU.pl` 來查驗。

#### Weighted RMS of Solution = 0.001 m

同上，若加權均方根剛好等於 0.001 公尺，仍宣告失敗[TBR]。

#### No fidTrp files found

在無法產出或來不及產出 `fidTrp` 檔時，`leoOrb5_rtclock.pl` 會因讀不到 `fidTrp` 檔而中斷執行。無法產出 `fidTrp` 的原因通常是 `fiducial` 資料不足 37 站；來不及產出 `fidTrp` 的原因通常是 `fiducial` 資料遲到。基線全部解算失敗也會造成無 `fidTrp` 檔，但這種情形只發生在所有基線都是短基線。目前 TACC 都使用長基線，所以未曾發生過。

CDAAC 3.00 起，改以 `rtclock.pl` 來查驗。

(2) 來自 Bernese 的錯誤訊息

#### Problem with script: CODSP

這是 Bernese 的一個 bug [Hunt, 2007]。原本 Bernese 只允許檔中最多存 30 顆 GPS 衛星的資料。更新 Bernese 後已解決這個問題，最多可存 32 顆 GPS 衛星的資料。

#### Problem with script: ORBGEN

發生在估算 LEO 精密軌道失敗。在一份下載資料中，若有一次以上的 GOX on/off 切換，使 GOX 資料不連續，同時在 TACC Ops Interface 中，其衛星姿態不良（標示為紅色）時，常出現這種錯誤訊息。因此推測該錯誤來自於 GOX 開關機和衛星姿態不良。

#### Problem with CLKEST

發生在無衛星時錶資訊（no satellite clocks）[TBR]。

#### SR XYZELE: ORBIT NO ELLIPSE, PROC STOPPED

表示測定之衛星軌道非橢圓。通常發生在 LEO 衛星連續觀測的資料長度不足的時候，例如：一份下載資料的長度不足 9 分鐘。

### 3.5 參考文獻

COSMIC Project Office, 2005?: *Algorithm description for LEO precision orbit determination with Bernese v5.0 at CDAAC*, <http://tacc.cwb.gov.tw/cdaac/doc/documents/pod.pdf>.

Dach, R. et al. (Ed.), 2007: *User Manual of the Bernese GPS Software Version 5.0*, Stämpfli Publications AG, Bern, Austria.

Hunt, D., 2007: (私人聯絡).

Schreiner, W., 2006: (私人聯絡).

Schreiner, W., 2007: (私人聯絡).

Van Hove, T., 2011: (私人聯絡).

## 4. 超量相位演算程序

本程序主要估算大氣和電離層之超量相位。它同樣和 Bernese 程式緊密結合，其中叫用多支 Bernese 程式及類 Bernese 程式進行演算。類 Bernese 程式源自標準 Bernese 程式，但經過 CDAAC 人員增修而來。不論即時處理程序或後處理程序，皆採一次差演算程序估算大氣超量相位；以零次差估算電離層超量相位。

在大氣方面，本程式根據 50 Hz 取樣的 GPS 大氣觀測資料 (opnGps)、低軌衛星姿態檔 (leoAtt)，配合 POD 程序所得之 GPS 和 LEO 軌道 (gpsPod 和 leoPod)、GPS 時錶偏差值 (即時 comClr；後處理 comClk) 及 LEO 時錶偏差值 (leoClk)，估算大氣超量相位 (atmPhs)。在電離層方面，則以 1 秒取樣的 podGps 取代 opnGps，配合上述資料估算電離層超量相位 (ionPhs)。

得以進行一次差的條件是，單一低軌衛星同時接收來自一顆掩蔽中的 GPS 衛星的訊號和另一顆非掩蔽中的參考 GPS 衛星的訊號，如圖 4.1。取掩星連線之相位觀測量與參考連線之無電離層相位觀測量做一次差，可消除 LEO 時錶偏差項。其優點是可使 GPS 觀測量中的誤差，例如多路徑效應、大氣殘差、熱雜訊（一種隨溫度與系統頻寬而變的內部雜訊）等，減至最小 [Schreiner et al., 2005]。

### 4.1 超量相位演算法

圖 4.1 中，掩星連線上的相位觀測量稱為 AB 相徑（以長度單位表示的相位）；參考連線上的相位觀測量稱為 AC 相徑。在接收時刻  $t_r$ ，頻率  $f_1$ （即 1575.42 MHz）的 AB 相徑

$$L_{a,1}^b(t_r) = \rho_a^b(t_r) + c(\delta t_a(t_r) - \delta t_{a,rel}(t_r)) - c(\delta t^b(t_r - \tau_a^b) - \delta t_{rel}^b(t_r - \tau_a^b)) + \delta \rho_{a,ion,1}^b(t_r) + \delta \rho_{a,trop}^b(t_r) + \delta \rho_{a,rel}^b(t_r) \quad (4.1)$$

其中  $\rho_a^b$  是 A 與 B 之間的幾何距離； $\delta t_a$ 、 $\delta t^b$  分別為 A、B 衛星時錶偏差值； $\delta t_{a,rel}$ 、 $\delta t_{rel}^b$  分別為 A、B 衛星時錶偏差之相對論效應項； $\tau_a^b$  為電波傳播時間； $c$  為光速； $\delta \rho_{a,ion,1}^b$  為頻率  $f_1$  上的電離層影響量； $\delta \rho_{a,trop}^b$  為對流層影響量， $\delta \rho_{a,rel}^b$  為除了上述以外的相對論效應項。注意(4.1)式省略周波未定值、多路徑效應以及熱雜訊項不列出。同理，對同一接收時刻、同一探測頻率的 AC 相徑也可以(4.1)式表示，惟上標 b 須改以 c 取代。因此，AC 相徑之無電離層線性組合即下式：[Schreiner et al., 2005]

$$L_{a,3}^c(t_r) = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} L_{a,1}^c(t_r) - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} L_{a,2}^c(t_r) = \rho_a^c(t_r) + c(\delta t_a(t_r) - \delta t_{a,rel}(t_r)) - c(\delta t^c(t_r - \tau_a^c) - \delta t_{rel}^c(t_r - \tau_a^c)) + \delta \rho_{a,trop}^c(t_r) + \delta \rho_{a,rel}^c(t_r) \quad (4.2)$$

其中  $f_2=1227.60$  MHz。

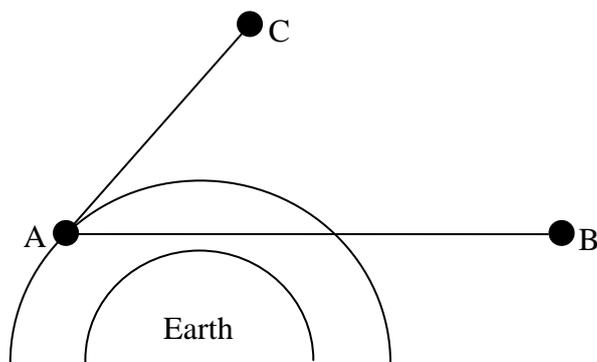


圖 4.1：一次差演算程序示意圖。其中 A 為低軌衛星；B 和 C 分別為掩蔽中以及非掩蔽中的 GPS 衛星。AB 連線為掩星連線；AC 連線為參考連線。

兩相徑的一次差可消除 LEO 時錶偏差項  $\delta t_a - \delta t_{a,rel}$ ，如下式：

$$L_{a,1}^b(t_r) - L_{a,3}^c(t_r) = (\rho_a^b(t_r) - \rho_a^c(t_r)) - c(\delta t^b(t_r - \tau_a^b) - \delta t^c(t_r - \tau_a^c)) + c(\delta t_{rel}^b(t_r - \tau_a^b) - \delta t_{rel}^c(t_r - \tau_a^c)) + \delta \rho_{a,ion,1}^b + (\delta \rho_{a,trop}^b - \delta \rho_{a,trop}^c) + (\delta \rho_{a,rel}^b(t_r) - \delta \rho_{a,rel}^c(t_r)) \quad (4.3)$$

其中  $\delta \rho_{a,trop}^c \approx 0$  且  $\delta t_{rel}^b - \delta t_{rel}^c \approx 0$ ，故可忽略不計。式中， $\rho_a^b - \rho_a^c$ 、 $\delta t^b - \delta t^c$ 、 $\delta \rho_{a,rel}^b - \delta \rho_{a,rel}^c$ ，以及  $\tau_a^b$  和  $\tau_a^c$  可由 gpsPod、leoPod、leoAtt、comClr（或 comClk）、opnGps、leoClk 資料取得，故可估算  $\delta \rho_{a,ion,1}^b + \delta \rho_{a,trop}^b$ ，即電離層和大氣超量相徑之和，簡稱為超量相徑和（正比於超量相位和）。惟應注意：

- (1) 超量相位是相對值：由於周波未定值從一開始就被忽略不計且不解出，因此該超量相位為一帶有未知常數的相對物理量。對後續的掩星大氣程序而言，該超量相位會對時間微分，得到都卜勒頻移量，而常數的微分為零。
- (2) GPS 時間同步：實務上，GPS 接收器時間與 GPS 時間不一定同步，因此解算中仍需要輸入 LEO 時錶偏差值，調整接收器時間標籤為 GPS 時間，使之同步。

雖然超量相位和是大氣超量相位以及電離層超量相位之和，但對大氣掩星而言，削減電離層貢獻量的步驟要到大氣反演程序才會進行；反之，電離層超量相位卻是以零次差估算的，因此直接將已知的 AB 相徑、GPS 和低軌衛星坐標、GPS 和 LEO 時錶偏差等觀測量，代入(4.1)式，得頻率  $f_1$  上的電離層超量相位。同理亦可估算頻率  $f_2$  上的電離層超量相位。由於後續的電離層反演法也只需相對的超量相位，因此周波未定值也忽略不計。

雖然雙頻差分可以大大簡化電離層超量相位演算法，但考慮雙頻訊號所走的路徑不一致，因此 CDAAC 決定不採用 [Schreiner, 2010]。

相關的程式及其說明如下。

[processOcc50PN.pl](#)：建立電離層和大氣之超量相位檔。

本程式主要估算大氣和電離層之超量相位和。開迴路資料亦適用。這支程式可由二次差、一次差和零次差的計算方式處理資料，但目前指定以一次差的方式處理大氣資料；以零次差處理電離層資料，故只需叫用 GENPHS50PN 程式。該程式雖為 CDAAC 所撰寫，但叫用多支 Bernese 或類 Bernese 程式以估算超量相位。類 Bernese 程式的命名規則很像 Bernese 程式，但實際上是 CDAAC 自行撰寫或修改自 Bernese 的程式。分

述如下。

**GENPHS50PN**：產生大氣及電離層掩星之 LEO 超量相位。叫用程式說明如下。

**OPNSYS**：開啟通用程式輸入檔 SYSINP、程式輸出檔 SYSOUT，以及錯誤訊息檔 SYSERR。

**DEFCON**：定義常數。

**GTSATA**：取得 GPS 衛星（天線）名稱、衛星 Block 代號供仰角相關校正。

**GTFLNA**：讀取 leoPod 檔名。

**GETDAT**：取得區域性的大地測量資料參數。

**RDGENI**：讀取 GENPHS50PN.INP 檔中的 Bernese 環境變數。此為 CDAAC 自行撰寫的類 Bernese 程式。

**MYDEFREQ**：定義頻率。此為簡化自 Bernese 程式 DEFREQ.f 的類 Bernese 程式。

**GETSTANM**：讀取天線相位中心檔 (brnFil) 中，低軌衛星之掩星天線和參考天線名稱（長 16 個位元組）。其中，掩星天線即為掩星連線上的 OCC 天線；參考天線即為參考連線上的 POD 天線。此由 CDAAC 自行撰寫。

**RDOCC**：讀取 podGps 掩星資料。此由 CDAAC 自行撰寫，位於 bxobv5 模組中。

**READ\_OPNGPS**：讀取 opnGps 高取樣之 GPS 觀測資料。限用於大氣掩星。由 CDAAC 自行撰寫。本程式共執行兩次，第一次讀掩星連線之 GPS 觀測資料，第二次讀參考連線之 GPS 觀測資料。

**FIXREFGAP**：以多項式內插補點方式，修補參考連線資料中的中斷處。由 CDAAC 自行撰寫。

**CHECKL2**：檢查參考連線上的 L2 相位資料的品質。

**INTREF**：對參考連線上之 L2 相位資料做內插補點，使之成為 50 Hz 的資料。由 CDAAC 自行撰寫，且只用於早期的 SAC-C 資料，不用於福衛三號資料。

**SMTHREF**：平滑參考連線上的 L4 資料。L4 稱為無幾何距離之線性組合[曾清涼、儲慶美, 1999]。由 CDAAC 自行撰寫。

**SPLINE**：以曲線內插的方式，將參考連線上的資料，由原來的觀測時間格點，轉成掩星連線的時間格點。由 CDAAC 自行撰寫。

**GTLCML**：讀取 leoClk 檔。本程式修改自 Bernese 程式 GTSCLM.f。

**XYZTIM**：校正受時變因素（例如地球潮汐）影響的地心坐標。

**GETORB**：計算此刻 B 站的坐標（B 站定義見圖 4.1）。

**COOTRA**：將 B 站坐標，由 J2000 坐標系轉至 TOD（True of Date）坐標系，輸出恆星時和極坐標值。

**GTLEOCO**：旋轉 A 站坐標至 TOD 坐標。

**GPHECC**：讀取天線相位中心校正值。

**LEOANTE**：計算 TOD 坐標中，A 站的 sensor 偏差值。對低軌衛星而言，sensor 偏差值即天線校正值。<sup>\*</sup>

**GETRADOFF**：[TBD]

**TRUEARTH**：將 A 站由 TOD 坐標轉至地心地固坐標。

---

<sup>\*</sup> 參見 Dach et al. [2007]第 16.2.4 節。

PRANGE：計算掩星連線（或參考連線）間的虛擬距離。

POLARI：對零次差觀測量計算天線軸方向的極化效應 [TBR]。

## 4.2 參考文獻

Dach, R., et al. (Ed.), 2007: *User Manual of the Bernese GPS Software Version 5.0*, Stämpfli Publications AG, Bern, Austria.

Schreiner, W. S., C. Rocken and D. Hunt, 2005: Approach and quality assessment of single difference processing of GPS radio occultation data at the UCAR CDAAC, *AGU Fall Meeting*.

Schreiner, W. S., 2010: (私人聯絡).

## 5. 掩星電離層反演程序

本程序以 `gmriion` 模組為主。演算法由電離層掩星資料之雙頻超量相位、GPS 和低軌衛星的坐標等資訊，計算校正之掩星全電子含量（簡稱校正 TEC）和電子密度剖線。主要的假設為電子密度之局部球對稱，即假設在電波射線的切點附近的範圍內（可達數千公里半徑），電子密度為地球中心對稱的分布。這個假設有時並不成立，因為電離層電子密度的水平分布不一定是均勻的，尤其是在赤道異常區。當這種不均勻大到某一個程度的時候，有時會出現特別大的正或負電子密度值。在一個掩星事件中，最高和最低的射線切點在地面上的投影也可能相距數百公里——CDAAC 稱之為 `horizontal smear`。因此，反演之電子密度剖線並不太能反應出真實的垂直分布，而比較像是以一維的空間來表示垂直與水平的電離層結構。本文以 COSMIC Project Office [2005?] 為基礎，更新至 TACC 現行版本。詳細說明如下。

輸入的資料有：

`ionPhs`：包含 L1、L2 超量相位、GPS、低軌衛星坐標和速度等

輸出的資料有：

`ionPrf`：包含電離層電子密度、掩星 TEC、掩星平面方位角、掩星點經緯度等

### 5.1 電離層反演法

在讀入雙頻超量相位、衛星坐標等資料之後，`gmriion` 模組即可估算掩星電離層電子密度剖線。主要的步驟如下：

(1) 讀取 `ionPhs` 檔：讀入 `ionPhs` 檔中所有資訊。叫用的副程式有：

`readlevel1b.f`：讀取 `ionPhs` 檔中的掩星 ID、掩星事件開始與結束時間、掩蔽中以及非掩蔽中的 GPS 衛星 PRN 編號\*、C/A、P1、P2 電碼的訊噪比、GPS 和低軌衛星的坐標和速度、L1 和 L2 大氣超量相位等。†

(2) 以直線計算射距離、高度和經緯度：因 GPS 電波路徑在電離層的偏折角很小，所故可假設 GPS 電波射線沿直線傳播至低軌衛星。該射線至地心的距離即為射距離。根據 GPS 和低軌衛星的坐標，可以幾何法計算該射線與地球同心球殼的切點之坐標。考慮地球扁率，可再轉至高度、經度和緯度坐標。叫用的副程式如下：

`impact.f`：計算射距離、高度和經緯度。

`xyz2g.f`：將地心直角坐標轉換至高度、經度和緯度坐標。

(3) 轉至地心地固坐標：考慮地球旋轉因素以及掩星事件所發生的時間，必須將 GPS、低軌衛星坐標由地球慣性坐標系轉至地心地固坐標系，才能得到正確的經度。叫用的副程式如下：

`gast.f`：根據輸入的日期和時間，計算地球慣性坐標系和地心地固坐標系之間的旋轉角。

---

\* 掩蔽中以及非掩蔽中衛星的定義見圖 4.1。

† 指廣義的大氣，包含電離層。

- (4) 重整射距離與相位陣列：重整的目的在於將射距離的極小值排在射距離陣列的第一個元素，且將超量相位等資料依與射距離的對應關係重排。在一個射距離陣列中一定有其極大值。對 GPS/MET 而言，射線的仰角有正有負，因此最大射距離應該會出現在陣列中間某處（因射距離會先增後減）；但對 CHAMP 而言，CHAMP 通常設定為只收負仰角的資料，而且絕大多數是下降掩星的資料（因 CHAMP 衛星的 GPS limb sounding 天線是架在衛星的後面），因此最大射距離通常出現於陣列的開頭。這個步驟把這兩種情形所得到的資料重整成單一排列。它以最大射距離為界，將資料分成兩段。仰角為負的那一段為主要的部分，稱為掩星側；仰角為正的那一段稱為輔助側。同樣將 GPS 和低軌衛星的坐標以及切點坐標，由該點分開，但只存掩星側的資料。所有的資料都依最小射距離放在陣列開頭的方式重排。叫用的副程式如下：

`revers.f`：逆排一維陣列。

- (5) 檢查高度範圍是否足夠：本程式只處理切點的高度範圍涵蓋地表 150 公里高至低軌衛星軌道高度下 1 公里的掩星資料（若資料涵蓋這個範圍，則界外的資料也會被處理；反之，若高於下界或低於上界，則整筆資料都會被捨棄）。叫用的副程式有：

`xyz2g.f`：說明同上。

- (6) 檢查觀測時間是否有中斷：觀測時間可能因為周波脫落等因素而中斷。這個步驟以指定的最大容許時間間隔值來判斷掩星側和輔助側是否有超過最大容許的中斷時間。若超過，則結束程式執行。

- (7) 相位校正：把輔助側的超量相位的平方視為射距離的函數（因兩者都是時間的函數，故亦互為對方的函數），再以曲線內插的方式，依掩星側的射距離的格點進行內插。校正的方式有兩種，由輸入的校正參數定義，如下：

a. 若校正參數為 1，則將掩星側的超量相位減去輔助側的超量相位，所得到的超量相位即已排除了 GPS 衛星高度到低軌衛星高度之間的超量相位，只留下掩星側到輔助側，兩低軌衛星高度之間的超量相位，稱為校正後的超量相位。在此假設掩星平面和 LEO 軌道面幾乎共面，而且在該掩星事件中，電離層並無明顯改變。參見 Schreiner et al. [1999]。

b. 校正參數為 0 適用於沒有輔助側資料的情況下，例如 CHAMP。這種近似的校正法會變得稍微複雜。其初步是將所有掩星側的超量相位減去最大射距離處之超量相位。這種近似的校正法又稱為準校正法。

目前處理福衛三號資料時，皆指定校正參數為 1。叫用的副程式有：

`splinx.f`：以曲線內插法處理輸入的矩陣。

- (8) 計算校正 TEC：由校正過的超量相位所算出來的 TEC 稱為校正之掩星 TEC。計算公式如下，參見 Schreiner et al. [1999]：

$$TEC = \frac{\Delta L}{40.3 \cdot 10^{16}} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (5.1)$$

其中 TEC 為 TECU 單位（等於  $10^{16}$  electrons/m<sup>2</sup>）； $\Delta L$  為雙頻差分之超量相位； $f_1$  和  $f_2$  分別為載波 L1 和 L2 的頻率。經準校正法得到的 TEC（以下簡稱為 TEC<sub>0</sub>）到

最後會再從重建電子密度剖線之中校正回來。

(9) 由已校正之掩星 TEC 反演電子密度剖線：根據 Schreiner et al. [1999] 第 13 式

$$\tilde{T}(r_0) = 2 \int_{r_0}^{r_{LEO}} \frac{rN(r)}{\sqrt{r^2 - r_0^2}} dr \quad (5.2)$$

對校正參數為 1 而言，射距離在低軌衛星軌道高度附近的 TEC 可近似為：

$$TEC(p) \approx 2N_e(p_{max})\sqrt{2p_{max}(p_{max} - p)} \quad (5.3)$$

其中  $p$  為射距離； $N_e$  為電子密度； $p_{max}$  為最大射距離（假設為低軌衛星軌道高度）。這個近似公式說明：在切點高度接近最大射距離以下數公里的範圍，電子密度值可由已校正 TEC 的平方與射距離的線性回歸求得。對於準校正法而言（校正參數為 0；假設電子密度為球對稱分布）， $TEC_0$  大約是上述 TEC 值的一半，因此還要做第二次校正，即在各射距離上之  $TEC_0$  加上一解析估計項。校正後的 TEC 可表示為：

$$TEC(p) = TEC_0(p) + N_e(p_{max})\sqrt{\frac{\pi}{2}Hp_{max}} \left[ 1 - \exp\left(\frac{p_{max} - p}{H}\right) \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{p_{max} - p}{H}}\right) \right] \quad (5.4)$$

右側第二項即為解析估計項（其靈感得自 Healy [2004]）。其中  $H$  為低軌衛星軌道高度上的尺標高（CDAAC 視之為常數）； $\operatorname{erfc}$  代表互補誤差函數。 $H$  可暫設為 1000 公里高，在重建電子密度剖線的時候，再以  $N_e(p_{max})$  疊代調整之。

在給定低軌衛星軌道高度  $p_n$ （等於最大射距離  $p_{max}$ ）上的電子密度  $N_e(p_n)$  後（由回歸線斜率算得），根據 Lei et al. [2007] 第 5 式，已校正 TEC 可反演得電子密度剖線。該式即為所謂的剝洋蔥法。以副程式 `invtec.f` 計算。相關文獻見 Syndergaard et al. [2005]。

對校正參數為 0 的情形，上面這個步驟放在迴圈內執行 10 次，以疊代的方式估算低軌衛星軌道高度上的  $H$  和  $N_e$  收斂值，接著修正校正 TEC，並求電子密度剖線。在每一次的疊代中， $H$  都從射距離以及部分已求得的電子密度剖線的對數值，兩者的線性回歸中估算出來。叫用的副程式如下：

`lreg.f`：計算線性回歸。

`splinx.f`：說明同上。

`invtec.f`：由已校正 TEC 反演電子密度剖線。

(10) 計算剖線最高點和最低點的距離：由剖線最高點和最低點的高度和經緯度計算 horizontal smear 距離。叫用的副程式為：

`dist.f`：計算 horizontal smear 的距離。

(11) 計算電離層峰的電子密度、高度、經緯度和臨界電漿頻率：搜尋 150 公里高的最大電子密度。在取得其高度和經緯度後，計算其臨界頻率。

- (12) 計算 80 公里至剖線最高點的垂直 TEC：積分 80 公里至剖線最高點的垂直 TEC，但負值除外。
- (13) 估計剖線最高點以上的垂直 TEC：用電子密度的對數值與高度所做的線性回歸來外插最高點以上的垂直 TEC。叫用 `lreg.f` 副程式。
- (14) 計算掩星平面的方位角：計算剖線最高點、最低點，以及最大電子密度的高度的掩星平面方位角。該方位角定義正北為 0，朝東為正，朝西為負。叫用的副程式如下：
- `azimuth.f`：由 GPS 和低軌衛星坐標，以及切點經緯度計算掩星平面方位角。
  - `vprod.f`：計算兩向量的外積。
  - `sprod.f`：計算兩向量的內積。
  - `norm.f`：計算向量的範數（絕對值）。

## 5.2 參考文獻

- COSMIC Project Office, 2005?: *Algorithms for inverting radio occultation signals in the ionosphere*, <http://tacc.cwb.gov.tw/cdaac/doc/documents/gmrion.pdf>.
- Healy, S., 2004: Forecast impact experiments with CHAMP RO measurements: First results at ECMWF, in *Colloq. Atm. Remote Sens. Using GPS*, Boulder, CO.
- Lei, J., et al. 2007: Comparison of COSMIC ionospheric measurements with ground-based observations and model predictions: Preliminary results, *J. Geophys. Res.*, 112, A07308, doi:10.1029/2006JA012240.
- Schreiner, W. S., S. V. Sokolovskiy, C. Rocken, and D. C. Hunt, 1999: Analysis and validation of GPS/MET radio occultation data in the ionosphere, *Radio Sci.*, 34, 949-966.
- Syndergaard, S., E. R. Kursinski, B. M. Herman, E. M. Lane, and D. E. Flittner, 2005: A refractive index mapping operator for assimilation of occultation data, *Mon. Wea. Rev.*, 133, 2650-2668.

## 6. 掩星大氣反演程序

大氣反演程式以 roam 模組為主，由雙頻超量相位計算偏折角和射距離，再反演得到大氣剖線。所有反演過程都以局部球對稱假設為前提。演算程式可以處理開迴路和鎖相迴路觀測資料。Kuo et al. [2004]已闡述此反演法的主要流程。其後 CDAAC 加以調整、增修，以應用於福衛三號大氣資料反演。本文以 COSMIC Project Office [2005?]為基礎，更新至現行版本。

輸入的檔案類別有：

atmPhs：內含大氣超量相位（長度單位）、GPS 和低軌衛星的坐標和速度，以及雙頻電碼訊噪比等。

gpsBit：內含 GPS 衛星導航位元，用於處理開迴路資料。

輸出的檔案類別有：

atmPrf：內含偏折角、射距離、大氣折射率、大氣壓及溫度剖線，但不含水氣資訊。

### 6.1 掩星大氣反演法

在讀入掩星觀測時間、GPS 和低軌衛星的坐標和速度、雙頻超量相位和電碼的訊噪比之後，roam 模組即可估算偏折角、射距離，以及大氣折射率、壓力、溫度等剖線資料。包括下列 11 個步驟：

- (1) 計算都卜勒頻移模式值：在處理開迴路觀測資料時，需要相應的都卜勒模式值，以利衛星訊號的降頻轉換（為降低輸入頻率為輸出頻率的一種轉換）。因此，程式以 CIRA+Q 氣候模式為基礎，建構大氣環境中的折射指數，再由 Abel 轉換式算得 GPS 和低軌衛星之間的電波射線偏折角，進而模擬掩星訊號之都卜勒頻移。這種方法稱為折射氣候學，詳見 Kirchengast et al. [1999]、Sokolovskiy [2001]。其都卜勒頻移量等於超量都卜勒頻移與真空都卜勒頻移量（指真空中，純粹因相對運動所造成的頻移）之和。叫用的副程式有：

`rayl.f`：計算 GPS 到低軌衛星之電波射線天頂角。

`dop.f`：根據 GPS、低軌衛星坐標和速度以及電波射線天頂角，計算超量都卜勒頻移。

- (2) 處理開迴路資料：首先定義開迴路觀測資料。在開迴路模式中，低軌衛星可能會記錄到某個射線切點高度以下的 L1 掩星訊號（L2C 開迴路模式可記錄 L2 訊號）。因此在該高度以下的部分，L1 和 L2 的訊號均屬於開迴路資料；在其高度以上的部分，則屬鎖相迴路資料（鎖相迴路模式）。開迴路資料的起點和終點是由接收器都卜勒模式參數（在 atmPhs 中的項目名稱是 xmdl）來定義的。在鎖相迴路模式中的 xmdl 被設為-999。因此，只要不是-999，就表示 L1 訊號是以開迴路訊號來處理的。其次是切除資料中受接收器追蹤誤差污染的部分。掩星事件發生時，若地球的臨邊到接收器的距離夠長（例如福衛三號可達 3300 公里左右）的話，則掩星訊號的超量都卜勒頻率的小數變化會遠小於偏折角的小數變化。對福衛三號而言，L1

的超量都卜勒頻率的變化量必定在 $\sim\pm 10$  Hz 之間。當都卜勒觀測值和模式值相差較大的時候，顯然觀測之 RO 訊號多了接收器追蹤誤差。當此差異超過 5 Hz 時，訊號會在稍早的時間被截斷（5 Hz 的臨界值會隨低軌衛星高度而變）。接著以「開迴路追蹤法」對訊號做降頻轉換。開迴路追蹤法是以接收器內的頻率模式，對已收到的訊號做降頻轉換，但不對該訊號做反饋，再以原探測頻率對複數訊號（即 I（in-phase）和 Q（quadrature）相位）重新取樣的一種技術。在開迴路模式中，上升和下降掩星訊號都有可能被記錄。每個開迴路訊號都被視為一個不相連的複數樣本，但在後處理的樣本中，解出的相位和周波未定值又必須讓相鄰的開迴路訊號互相連接在一起，因此還必須經過移除導航資料調制的手續。所謂導航資料調制（NDM），即是將 GPS 衛星導航資訊加載在載波的過程（參見曾清涼、儲慶美 [1999]）。移除的方法是根據 50 bps 的 GPS 衛星導航位元資料（gpsBit），同步移除開迴路訊號中的 NDM。若有 gpsBit 參數，則按 gpsBit 檔中的資料位元序列，同步刪除相應的 NDM 部分；若不帶 gpsBit 參數，則當相鄰的相量的夾角大於 90 度時，將該相量反轉 180 度，當成同步刪除 NDM 的結果。去除 NDM 之後，即對該相位加減 180 度或不予加減，使其與前一相位相差最小而得到連續的相位。相位連續後，開迴路訊號就被當成鎖相迴路訊號一般處理。

- (3) 平滑 L1、L2 超量相位並計算超量都卜勒頻移：處理後的 L1、L2 掩星訊號仍帶有一些雜訊，可能導致其超量相位不在反演之球對稱假設的範圍之中。換言之，這些雜訊會使得超量相位，在經過後續的幾何光學近似法所得到的偏折角，變成射距離的多值函數。這多值函數並不能經由 Abel 反演法來反演，因此在以幾何光學法計算偏折角和射距離之前，必須將此誤差從超量相位中濾掉。這個步驟在 CDAAC 2.0 使用兩種濾波器（如下述 a 和 b）；在 CDAAC 3.0 則改用多重移動之多項式回歸法，又稱為 Savitzky-Golay 濾波器。更換濾波器的原因是：EUMETSAT 的 Christian Marquardt 在 2009 年發現本程序有一個瑕疵，即原來的濾波器會在 10-20 公里高度以上，產生 0.1-0.2% 數量級的偏折角偏差，從而增加後續折射率及其他剖線的反演誤差。CDAAC 和 TACC 於更換濾波器後，即獲得改善（參見 CDAAC 和 TACC 網站 COSMIC Status Update 說明）。下述 a、b 兩種濾波器都允許超量相位對時間的導數（即超量都卜勒頻移量）有解析解。而輸入的參數可決定使用哪一種濾波器。
- 傅利葉濾波器：將相位觀測資料提供給傅利葉轉換。首先，將頻譜乘上高斯曲線的窗區函數。由輸入的參數決定窗區的寬度。反演轉換的頻譜就變成平滑的相位。此平滑窗區跟頻譜窗區的寬度呈負相關。其二，頻譜乘上窗區函數以及頻率的虛數部分。然後反演轉換的頻譜就變成平滑的相位導數（即都卜勒頻移量）。原始相位資料末端的不連續會因頻譜的失真，而使平滑函數在接近末端的地方惡化。為減少這種效應，在傅利葉轉換前，原始相位的末端會先被平滑地外插至常數 0。
  - 曲線回歸+傅利葉濾波器：這個方法不需要外插。相位主要的走勢用三次曲線回歸去除。然後將殘存的相位（在零附近，而且末端也沒有很大的不連續）放入傅利葉濾波器計算殘存的都卜勒量。曲線回歸的導數是以三次多項式的微分進行解析計算的。於是都卜勒量等於都卜勒量經曲線回歸和濾波後的殘量所得

到的都卜勒量之總和。

叫用的副程式有：

`filter1.f`：計算一函數導數的傅利葉濾波。

`filter.f`：計算一函數的曲線回歸+傅利葉濾波，以及該函數之導數的曲線回歸+傅利葉濾波。

`fsprm.f`：計算多重移動多項式回歸。

(4) 計算掩星點的經緯度、掩星平面方位角和橢球曲率中心（幾何光學法）：其演算步驟可細分成下列 5 項：

a. 由都卜勒頻移量計算 L1 的偏折角和射距離。初步估計地球慣性坐標系內的偏折角和射距離，以便後續估計掩星點。叫用下列副程式：

`correct.f`：多值函數近似法，用來校正周波未定值。

`eps.f`：給定 GPS 和低軌衛星坐標、速度，以及超量都卜勒頻移量，以計算偏折角和射距離。

b. 估計掩星點坐標和掩星平面方位角。掩星平面定義為參考坐標原點到 GPS 和低軌衛星的向量 ( $\vec{r}_1$  和  $\vec{r}_2$ ) 所構成的平面。掩星點為一掩星剖線的代表點，為 L1 超量相位接近 500 公尺的 GPS-LEO 連心線上之切點。該點平均高度為 3-4 公

里。因此從坐標原點到掩星點的向量  $\vec{r}_p$  是以  $\vec{r}_2$  朝向  $\vec{r}_1$  旋轉  $\frac{\pi}{2} + \frac{\alpha}{2} - \phi_2$  來計算的

（在此已假設局部球對稱）。其中  $\phi_2$  即是該連心線在  $\vec{r}_2$  的天頂角。掩星點在此以地球慣性坐標系之大地（geodetic）經緯度來表示（到 d.才轉至地心地固坐標）。掩星點上的掩星平面方位角定義為：北方和 GPS 衛星方向的夾角（由北朝東為正）。叫用下列副程式：

`azimuth.f`：計算掩星平面方位角。

`perigee.f`：假設局部球對稱，計算射線近地點之大地經緯度。

c. 計算橢球曲率中心。在球對稱假設之下，地球扁率可能引入相當的反演誤差 [Syndergaard, 1998]。為了減小這種誤差，將參考坐標原點由地心移至橢球曲率中心。因曲率中心在經度和緯度方向不同，故將局部球中心定義為掩星平面方向上的掩星點之曲率中心，而將 GPS 和低軌衛星的坐標原點移至曲率中心。叫用下列副程式：

`curvcent.f`：在給定經緯度和方位角後，計算地球參考橢球之局部曲率中心及曲率半徑。

d. 轉換至地心地固坐標。將掩星射線切點由地球慣性坐標轉至地心地固坐標。叫用下列副程式：

`gast.f`：在給定日期和時間後，計算地球慣性坐標系和地心地固坐標系之間的旋轉角  $\Delta\theta$ 。

e. 計算掩星平面法向量。取 GPS 衛星向量與低軌衛星向量之外積，得掩星平面之法向量。再依 z 軸旋轉  $\Delta\theta$ ，至地心地固坐標系。再取單位向量，得到掩星平面單位法向量（簡稱 uvnop）。叫用下列副程式：

`rnorm.f`：取單位向量。

`spin.f`：計算第一向量沿著第二向量旋轉某角度後所得到的向量。

`vprod.f`：計算兩向量之外積。

- (5) 以幾何光學法計算偏折角：由都卜勒頻移量計算偏折角和射距離之幾何光學法是假設電波只以單一射線由發射端（GPS）傳送至接收端（LEO）。在多溼的對流層以上，因為多路徑效應不大，所以這個假設是合理的。在發射端和接收端，都卜勒頻移量和射線天頂角之間的關係，可表示為：

$$\frac{f + f_{dop}}{f} = \frac{1 - \bar{n}_2 \cdot \bar{v}_2 / c}{1 - \bar{n}_1 \cdot \bar{v}_1 / c} = \frac{c - v_2 \cos(\gamma_2 - \phi_2)}{c - v_1 \cos(\gamma_1 - \phi_1)} \quad (6.1)$$

其中  $\bar{n}_{1,2}$  為發射端和接收端的射線方向向量（已乘上折射指數 1）， $\bar{v}_{1,2}$  為掩星平面上的速度分量， $\gamma$  為速度分量的天頂角， $\phi$  為射線天頂角。另由司乃耳公式可得：

$$r_1 n_1 \sin \phi_1 = r_2 n_2 \sin \phi_2 = a \quad (6.2)$$

由幾何得知偏折角  $\alpha = \phi_1 + \phi_2 + \theta - \pi$ （ $\theta$  為 GPS 和低軌衛星對地心的圓心角），故解上述方程組，即可求得射距離  $a$  和偏折角  $\alpha$ 。此步驟叫用下列副程式：

`correct.f`：說明同上。

`eps.f`：說明同上。

`lintp.f`：在給定射距離格點之後，以線性內插計算偏折角。

- (6) 以電波全像術計算偏折角：在多路徑效應的情況下（例如在多溼的對流層中），因為偏折角是射距離的多值函數，因此由都卜勒計算偏折角和射距離並不可行。在程式中，包含四種電波全像術，由原始複數之掩星訊號（相位和振幅）導出偏折角為射距離的函數。四種電波全像術如下，但目前僅選定第四種方法計算。

- a. 倒遞法（BP）
- b. 滑動頻譜法（SS）
- c. 正則變換法（CT）
- d. 全波段頻譜反演法（FSI）

所有的電波全像術都是二維的，換言之，皆適用於掩星平面上的電磁場。但有兩個條件：

- a. 發射端必須不動，即接收端接收到的是不動的電磁場
- b. 軌跡為已知量

在球對稱假設之下，發射端的軌道半徑即相當於常數。採用 CT 法需先知道接收到的電磁場在直線軌跡中的規格資訊。採用 FSI 法則需知道接收之電磁場在圓形軌跡中的規格資訊。採用全像術之前，應以司乃耳定律計算發射端和接收端的虛擬位置，以及兩者間的總相徑。此法相當於處理幾何光學中的連續直線射線，因此發射端的虛擬位置即有固定的軌道半徑。對 FSI 法而言，接收端的虛擬位置也必須為固定的軌道半徑。對 CT 法而言，電磁場即可從該虛擬位置倒回成直線傳播。而 FSI 法為 CT 法之一。若發射端和接收端有正圓的軌道，則 FSI 就是 CT 簡化後的傅利葉轉換。頻率直接與射距離相關，而由傅利葉頻譜中的相位的導數可得偏折角（參見 Jensen et al. [2003]）。叫用下列副程式：

gpsleofix1.f：修正 GPS 和 LEO 軌道半徑為常數。  
 fsil.f：以 Jensen et al. [2003]的 FSI 法計算偏折角、射距離及偏折角誤差等。  
 FSI\_SNR.f：以 FSI 法計算 SNR。  
 Merge\_err.f：合併 FSI 法所得之誤差。  
 medav.f：計算一矩陣的移動中位數平均。  
 runav.f：計算一矩陣的移動平均。  
 ErrTrunc.f：刪除偏折角誤差較大的資料。  
 append.f：將一矩陣併入另一矩陣中。  
 FSIvar.f：計算偏折角的變異量。  
 FSIrefErr.f：計算折射率的變異量。  
 lintp.f：說明同上。

根據定義，SS、CT 和 FSI 法所提供的偏折角是射距離的單值函數（即有一對一的對應關係），但 BP 法可能得到多值函數，尤其是對超折射而言。對 GPS 和近似圓形的 LEO 軌道來說，FSI 法是處理多溼對流層中，多路徑傳播之偏折角和射距離最佳的方式，因為它最精確也最快速。另需注意，CDAAC 2.0 原本在 FSI 將超量相位轉至射距離的過程中，使用滑動中位數濾波，但 CDAAC 在 2009 年 5 月發現此舉產生 6-8 公里高度以下的偏折角誤差，故已於 CDAAC 3.0 中移除上濾波器。

- (7) 整併（縫合）上述(5)、(6)點所估算之 L1 偏折角：在多溼的對流層中，多路徑效應會導致 L2 掩星訊號的大擾動，使得訊號無法使用。在高度較高的地方，L2 都卜勒頻移量可能帶有瞬間的雜訊，或是在 L1 和 L2 都卜勒頻移之間有很大的平均偏量。因此上述二者可作為多路徑效應的一個指標。只要其中之一超過臨界值（以變數 crt12 和 crt112 定義），就會把該高度以下，由 GO 計算都卜勒頻移量所得到的偏折角取代為由 FSI 所得到偏折角。此外，該高度以下的 L2 都卜勒頻移量也不會被(9)使用。叫用下列副程式：

append.f：說明同上。

- (8) 電離層校正：以偏折角的線性組合對掩星觀測量做電離層校正[Vorob'ev and Krasil'nikova, 1994]。為了減輕反愚所導致的 L2 雜訊，程式採用 Rocken et al. [1997]的線性組合如下：

$$\alpha(a) = \alpha_1(a) + \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [\tilde{\alpha}_1(a) - \tilde{\alpha}_2(a)] \quad (6.3)$$

其中  $\tilde{\alpha}_1(a)$  和  $\tilde{\alpha}_2(a)$  取自 L1 和 L2 的超量相位，經過大幅低通濾波的平滑處理（比  $\alpha_1(a)$  的平滑窗區還大）。如此可降低 L2 雜訊所帶來的誤差。

- (9) 偏折角最佳化：當中性大氣偏折角的幅度和與天氣相關的訊號強度隨高度呈現指數遞減時，經過濾波和電離層校正之後，仍殘存的誤差大小近似於常數，而使得在某個高度以上，原有的掩星訊號被沒入殘存的雜訊之中。為了減輕 Abel 轉換將此雜訊由高處傳到低處（即誤差傳遞），觀測之偏折角需要再經過最佳化的估計。這個最佳化在某些假設之下，將氣候模式所模擬出來的偏折角當成猜測的初始值，而最

佳化之偏折角即為觀測和模式偏折角的線性組合。其權重關係如下：

$$\alpha_{opt}(a) = w_{obs}(a)\alpha_{obs}(a) + w_{guess}(a)\alpha_{guess}(a) \quad (6.4)$$

式中權重函數  $w(a)$  的估計方式是由觀測誤差和初始猜測值誤差決定的。初始猜測值又是根據折射氣候學算出來的。而最佳的權重是由 60-80 公里高的觀測偏折角的均方根偏差以及初始猜測值的均方根偏差估計出來的。在此假設初始猜測值的標準偏差的一部分是常數[Kuo et al., 2004]。此外，另一初始猜測值的標準偏差也由 20-60 公里高的初始猜測值計算偏折角的均方根偏差而得[Lohmann, 2004]。最後計算觀測和猜測兩者之誤差相關性，以估計最佳化偏折角之權重係數。叫用的副程式如下：

`NoiseErr.f`：計算 60-80 公里之偏折角平均值及標準偏差。

`correl.f`：計算相關係數。

`correllengths.f`：計算相關長度範圍。

`direct.f`：以 Abel 反演法，由折射率計算偏折角（射距離的函數）。

`estimK.f`：計算 20-60 公里之間，偏折角的平均值及其標準偏差。

`obsvarprof.f`：計算誤差變異量剖線。

`linfit.f`：按比例調整氣候模式之偏折角剖線。

`standref.f`、`standref1.f`、`standref2.f`、`standref3.f`：對不同的氣候模式（包括 CIRA、CIRA+Q 和 NCAR）給定日數和緯度，計算標準折射率剖線。

- (10) 反演折射率（Abel 反演法）：由掩星觀測量得到最佳化的偏折角以後，若掩星起始高度不到 150 公里，則由初始猜測值補齊至 150 公里（即令起始高度至 150 公里之  $\alpha_{opt}(a) = \alpha_{guess}(a)$ ），才由 Abel 反演式（如下式）計算出折射指數：

$$n(x) = \frac{1}{\pi} \int_x^{x_{np}} \frac{\alpha_{opt}(a)}{\sqrt{a^2 - x^2}} da \quad (6.5)$$

其中允許積分後，上限代入的結果為零。式中  $x = rn(r)$ ， $N = 10^6(n-1)$ ，而  $z = r - r_{curv} + \Delta z_{geoid}$ 。其中  $r_{curv}$  為位於掩星點之局部曲率半徑（由第 4 點算出）， $\Delta z_{geoid}$  是大地水準面的高度校正參數。叫用的副程式如下：

`correct.f`：說明同上。

`invert.f`：計算折射率。

`zoversea.f`：大地水準面之高度校正。

- (11) 計算乾氣壓和溫度（由靜力方程式積分而得）：假設大氣僅為乾空氣（忽略水氣），則大氣壓力正比於大氣密度： $N = c\rho$ 。其中  $c$  為常數。由靜力方程之積分式：

$$p(z) = c^{-1} \int_z^{z_{np}} g(z') \rho(z') dz' \quad (6.6)$$

可得壓力剖線，再由  $N = 77.6P/T$  計算溫度剖線。叫用下列副程式：

`tempres.f`、`tempres1.f`：計算乾氣壓和溫度剖線。

## 6.2 參考文獻

COSMIC Project Office, 2005?: *Algorithms for inverting radio occultation signals in the neutral atmosphere*, <http://tacc.cwb.gov.tw/cdaac/doc/documents/roam05.doc>.

Jensen et al., Full spectrum inversion of radio occultation signals, *Radio Sci.*, 38, 1040, doi:10.1029/2002RS002763, 2003.

Kirchengast et al., The CIRA-86&Q\_UoG model: An extension of the CIRA-86 monthly tables including humidity tables and a Fortran 95 global moist air climatology model, *Eur. Space Agency, IMG/UoG Techn. Rep.*, 8, 1999.

Kuo, Y.-H., T.-K. Wee, S. Sokolovskiy, C. Rocken, W. Schreiner, D. Hunt and R. A. Anthes, Inversion and error estimation of GPS radio occultation data, *J. Meteorol. Soc. Japan*, 82(1B), 507-531, 2004.

Rocken et al., Analysis and validation of GPS/MET data in the neutral atmosphere, *J. Geophys. Res.*, 102(D25), 29,849-29,866, 1997.

Sokolovskiy, S.V., Tracking tropospheric radio occultation signals from low Earth orbit, *Radio Sci.*, 36(3), 483-498, 2001b.

Syndergaard, S., Modeling of the effect of the Earth's oblateness on the retrieval of temperature and pressure profiles from limb sounding, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 60, 171-180, 1998.

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

曾清涼、儲慶美：GPS 衛星測量原理與應用，第二版，國立成功大學衛星資訊研究中心，臺南，1999。



## 7. 大氣掩星一維變分程序

大氣掩星一維變分法用於整合大氣掩星剖線資料（檔案類別為 atmPrf）與大氣模式資料，以得到高垂直解析度之水氣資料（wetPrf）。其中大氣模式資料在 CDAAC 2.0 即時程序為低解析之 AVN/GFS 大氣預報資料（avnPrf）；在 CDAAC 2.0 後處理程序為 ECMWF 大氣分析資料（ecmPrf）；在 CDAAC 3.0 即時程序為高解析之 NCEP/GFS 大氣預報資料（仍是 avnPrf）；在 CDAAC 3.0 後處理程序為高解析之 ECMWF ERA-40 分析資料（eraPrf）。所有模式資料都是追蹤過 atmPrf 資料的近地點軌跡，再經由內插補點的方式所取出的大氣剖線資料，故皆有和觀測剖線一樣的軌跡。以下說明以 COSMIC Project Office [2005] 為基礎，並增修至 TACC 現行作業版本。

### 7.1 一維變分法概述

在即時程序與後處理程序所使用的一維變分演算法皆相同。其價值函數  $J$  表示為

$$J(\mathbf{x}) = \frac{1}{2}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_b)^T \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_b) + \frac{1}{2}(\mathbf{H}(\mathbf{x}) - \mathbf{y}_o)^T \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{H}(\mathbf{x}) - \mathbf{y}_o) \quad (7.1)$$

其中：

$\mathbf{x}$  是一維的分析變數向量\*

$\mathbf{x}_b$  是一維的背景變數向量（猜值，包括 first guess，例如 ecmPrf 或 avnPrf）

$\mathbf{y}_o$  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）<sup>†</sup>

$\mathbf{R}$  是觀測誤差矩陣（對角矩陣）<sup>‡</sup>

$\mathbf{H}$  是非線性的正演觀測運算子，可表示為：

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}(\mathbf{x}) \quad (7.2)$$

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

價值函數  $J$  對  $\mathbf{x}$  的偏微分表示為：

$$\nabla_{\mathbf{x}} J = \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_b) + \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{H}(\mathbf{x}) - \mathbf{y}_o) \quad (7.3)$$

\*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。

<sup>†</sup> 背景誤差矩陣在 CDAAC 程式中的檔名是 sample.be，內含大氣溫度、大氣壓力、水氣偏壓的偏差矩陣。高度範圍在 0-40 公里之間。

<sup>‡</sup> 觀測誤差矩陣在 CDAAC 程式中的檔名是 mgoe.MM，內含折射率平均偏差矩陣及折射率標準偏差矩陣。其中 MM 是月份。另有一觀測誤差矩陣，檔名為 gps.oe，但僅用於處理偏折角資料。

其中  $\mathbf{H} = \frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}}$ ，即非線性運算子  $H$  對  $\mathbf{x}$  的偏導數； $\mathbf{H}^T$  是  $\mathbf{H}$  的伴隨運算子。根據  $J$  在  $\mathbf{x}$

方向的梯度，我們可以求得  $J$  的極小值，即在觀測和模式之間求得最佳化的結果。在實際操作上，則採用疊代法，從梯度遞減的演算中求得，稱為增量法。為了加速運算，名為 L-BFGS-B 的最佳化方法也被引用。

改成增量法後的價值函數定義為：

$$J(\delta \mathbf{x}) = \frac{1}{2} \delta \mathbf{x}^T \mathbf{B}^{-1} \delta \mathbf{x} + \frac{1}{2} (\mathbf{H} \delta \mathbf{x} - \mathbf{d})^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{H} \delta \mathbf{x} - \mathbf{d}) \quad (7.4)$$

其中  $\delta \mathbf{x}$  為增量。在最佳化的情況下，最佳增量  $\delta \mathbf{x}_a$  與背景變數  $\mathbf{x}_b$  之和，即為最佳分析變數  $\mathbf{x}_a$ 。表示為

$$\mathbf{x}_a = \mathbf{x}_b + \delta \mathbf{x}_a \quad (7.5)$$

而  $\mathbf{d}$  為測量值誤差向量，定義為

$$\mathbf{d} = \mathbf{y}_0 - \mathbf{H} \mathbf{x}_b \quad (7.6)$$

若令  $\mathbf{v} = \sqrt{\mathbf{B}^{-1}} \delta \mathbf{x}$ ，則可使最小化達到快速收斂，而(7.4)式可改寫為

$$J(\mathbf{v}) = \frac{1}{2} \mathbf{v}^T \mathbf{v} + \frac{1}{2} (\mathbf{H} \delta \mathbf{x} - \mathbf{d})^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{H} \delta \mathbf{x} - \mathbf{d}) \quad (7.7)$$

而其在向量  $\mathbf{v}$  的方向梯度則為

$$\nabla_{\mathbf{v}} J = \mathbf{v} + \sqrt{\mathbf{B} \mathbf{H}^T} \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{H} \delta \mathbf{x} - \mathbf{d}) \quad (7.8)$$

## 7.2 觀測運算子

在無電離層的中性大氣中，大氣折射率可表示為

$$N = 10^6 (n - 1) = 77.6 \frac{P}{T} + 3.73 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (7.9)$$

其中  $n$  是大氣折射指數， $P$  是大氣壓力（單位 hPa）， $T$  是大氣溫度（單位 K）， $e$  是水氣偏壓（單位 hPa）。在一維變分中，大氣溫度、壓力和水氣偏壓這三種物理量透過觀測運算子，轉成大氣折射率，以便經過分析，建構出最佳的折射率，同時獲得最佳的大氣溫度、壓力和水氣偏壓。對應至前述(7.2)式，式中的  $\mathbf{y}$  即  $N$ ， $\mathbf{x}$  是由  $P$ 、 $e$ 、 $T$  串接而成的一維向量，而  $H$  運算子即(7.9)式等號右側。

### 7.3 實際演算流程

- (1) 讀取輸入資料：輸入資料包括一參數清單、福衛三號觀測資料（即 atmPrf）、背景剖線資料（即模式剖線）、觀測誤差矩陣，以及背景誤差矩陣。參數清單中，列出一維變分程序中所使用的參數名稱及參數值，例如增量法、觀測檔案類別、輸出格點的解析度及運算模式等。福衛三號觀測資料包括 atmPrf 資料中的偏折角剖線資料和折射率剖線資料。在參數清單中，可將前者（即偏折角）或後者（折射率）指定為觀測資料。目前是將折射率指定為觀測資料。背景資料包括模式剖線資料中的大氣溫度、水氣數據、大氣壓力和高度。觀測誤差矩陣包括折射率平均偏差矩陣以及折射率標準偏差矩陣。這兩矩陣都是緯度、高度和月份相關的。其估算法見 Kuo et al. [2004]。背景誤差矩陣的內容與觀測誤差矩陣相似，但變數類別改用大氣溫度、大氣壓力，以及水氣偏壓。該矩陣也是緯度、高度相關的，惟與月份無關。對於背景誤差估計，CDAAC 採用了 NMC 方法，取 48 小時預報減去 24 小時預報之差異統計而得。<sup>\*</sup>
- (2) 設定運算格點：GPS 掩星實驗提供高度方向的折射率，因此若指定折射率為一維變分的觀測資料，則高度即為其縱坐標。處理一維變分並不需要很高的運算能力，所以可以設定較密集的運算格點，如 100-200 公尺。在此設定為等間距 100 公尺。
- (3) 計算測量值誤差向量
- (4) 資料品質檢驗
- (5) 價值函數最小化
- (6) 輸出最佳化之大氣剖線資料

程式名稱：var1d.F

叫用的副程式有：

get\_filenames：取得模式剖線資料檔名

read\_atmprf：讀 atmPrf 檔

read\_fgspfrf：讀取模式剖線資料

scale\_height\_of\_ref：[TBD]（僅用於處理偏折角資料）

check\_SS\_moisture：[TBD]

perturb\_background：[TBD]（僅用於 mode\_run 不是 1）

interp\_fgsg2grd：內插背景資料（模式值）至觀測空間格點上

read\_moe：讀入 gmoe.MM 檔中的觀測誤差矩陣，但僅用於處理折射率資料。其中 MM 是 2 位數的月份

read\_oe：讀入 gps.oe 檔中的觀測誤差矩陣，但僅用於處理偏折角資料

read\_be：讀入 sample.be 檔中的背景誤差矩陣

cutoff\_ob\_outside：移除超出計算域的觀測點

gen\_synthetic\_ob：[TBD]（僅用於 mod\_run 不是 1）

add\_ref\_error：內插觀測誤差矩陣至觀測空間格點上[TBD]，僅用於處理折射率資料

add\_obs\_error：同上，但僅用於處理偏折角資料

add\_fixed\_obs\_error：[TBD]

calculate\_rf\_innov：計算測量值誤差向量，但僅用於處理折射率資料

---

<sup>\*</sup> NMC 已改名為 NCEP。

`calculate_ba_innov`: 同上，但僅用於處理偏折角資料  
`qc_check`: 資料品質檢驗  
`remove_bad_ob`: 移除標記為不良的觀測資料  
`compute_ba_coef`: 重新計算偏折角的係數[TBD]  
`add_bkg_error`: [TBD]  
`alloc_cv_variables`: 分配運算空間給向量等變數  
`pack_state_var`: [TBD]  
`alloc_betype`: [TBD] (僅用於 `kind_be` 等於 2)  
`prepare_U_transf`: [TBD] (僅用於 `kind_be` 等於 2)  
`copy_xtype`: copy information from `z_xb` to `z_dx`  
`check_gradient`: [TBD] (僅用於 `mode_run` 等於 -1)  
`update_background`: 更新背景變數向量[TBD]  
`cuteoff_ob_outside`: [TBD]  
`solver`: [TBD]  
`alloc_atype`: Allocate space for data type of analysis [TBR]  
`trans_output`: [TBD]  
`write_output`: [TBD]  
`trans_ref_state`: [TBD]  
`stat_on_outgrid`: [TBD]  
`trans_output_verify`: [TBD]  
`check_verify`: [TBD]

## 7.4 變數向量與背景誤差矩陣

由於 CDAAC 指定價值函數中的觀測變數向量為掩星觀測之大氣折射率，而觀測運算子是將大氣壓、水氣偏壓及大氣溫度轉換至觀測空間之大氣折射率的正演函數，因此分析變數向量（要探求的量）及背景變數向量（大氣模式值）均是由大氣壓、水氣參數及大氣溫度變數串接而成的一維變數向量。當價值函數值極小時，可同時得到最佳化之大氣溫度、壓力和水氣偏壓剖線。值得注意的是，CDAAC 程式在後處理程序中，亦使用 `avnPrf` 所算得的背景誤差矩陣，而不是 ECMWF 的背景誤差矩陣。

CDAAC 表示：背景誤差矩陣在演算中的權重很小，因此後處理程序不論用哪一種背景誤差矩陣，對結果的影響十分有限。而背景誤差矩陣本身難以估算，因此統一使用得自 `avnPrf` 之背景誤差矩陣[Wee, 2007]。

## 7.5 參考文獻

COSMIC Project Office, 2005: *Variational atmospheric retrieval scheme (VARs) for GPS radio occultation data*, <http://tacc.cwb.gov.tw/cdaac/documents/1dvar.pdf>.

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. Meteorol. Soc. Japan*, 82(1B), 507-531.

Wee, T.-K., 2007: (私人聯絡).

## 8. GPS 絕對 TEC 演算法

本文說明以 atec 模組處理福衛三號低軌衛星收到的 GPS 衛星觀測資料，估算 LEO-GPS 連線之間的絕對全電子含量 (aTEC) 的方法。由於每筆 aTEC 都是時間序列的觀測資料，而 LEO-GPS 連線在這段時間內掃過一類似扇形的區域，因此該 aTEC 數列特稱為「TEC 弧」。

TACC 即時和後處理程序所使用的絕對 TEC 演算流程大同小異。差異的部分會在文中特別指出。本文以 COSMIC Program Office [2006a?] 為基礎，更新至 TACC 現行版本。詳細說明如下。

輸入的檔案類別有：

podObs：低軌衛星上收到的 GPS 觀測量，RINEX 2.20 格式。

iguOrb：IGS 公布之速報衛星星曆，每 6 小時更新一次，僅用於即時處理程序。

igsOrb：IGS 公布之最終精密星曆，僅用於後處理程序。

corDcb：歐洲 CODE 即時公布之 GPS 端電碼偏差之差分值。僅用於即時處理程序。

codDcb：同 corDcb，但為後處理資料。僅用於後處理程序。

leoOrb：LEO POD 資料，含衛星質心之地心地固坐標和速度，SP3 格式。

leoAtt：低軌衛星姿態四元數。

brnPol：地軸校正參數，Bernese ERP 格式。

brnFil：含低軌衛星及天線名稱的參數檔，Bernese STA 格式。

mulCal：含 GOX 天線之虛擬距離多路徑場型資訊。

輸出的檔案類別有：

podTec：內含 GPS 和低軌衛星之間的絕對 TEC 值，netCDF 格式。

leoDcb：LEO 端 GPS 電碼偏差之差分值的每日平均值。僅限 P2-P1 電碼，不含 C1-P1 電碼。

mulCal：更新之多路徑校正檔（使用同一檔案類別）。

### 8.1 處理流程

絕對 TEC 資料處理流程如圖 8.1。Perl 程式 atec.pl 可視為 atec 模組的核心程式，主要的任務是將 podObs 檔轉成 podTec 檔。makeMulCal.pl 程式不在即時程序也不在後處理程序之中。它只用來產生及更新 mulCal 檔，以提供即時和後處理程序之必要參數。makeLeoDcb.pl 用來估算每日平均的 LEO DCB 值。在即時程序中，該程式每天執行一次；在後處理程序中，則在 atec.pl 後才執行。updateTEC.pl 僅用於後處理程序，在產生一段時間區間（通常是一個月份）之 leoDcb 檔後，更新 podTEC 檔。另兩支程式 mulCal2ascii.pl 和 catDCBs.pl 為非必要程式，也不用於即時、後處理程序。它們只是用來將 mulCal 和 leoDcb 檔轉成行列式的純文字檔，方便 gnuplot 軟體繪圖。

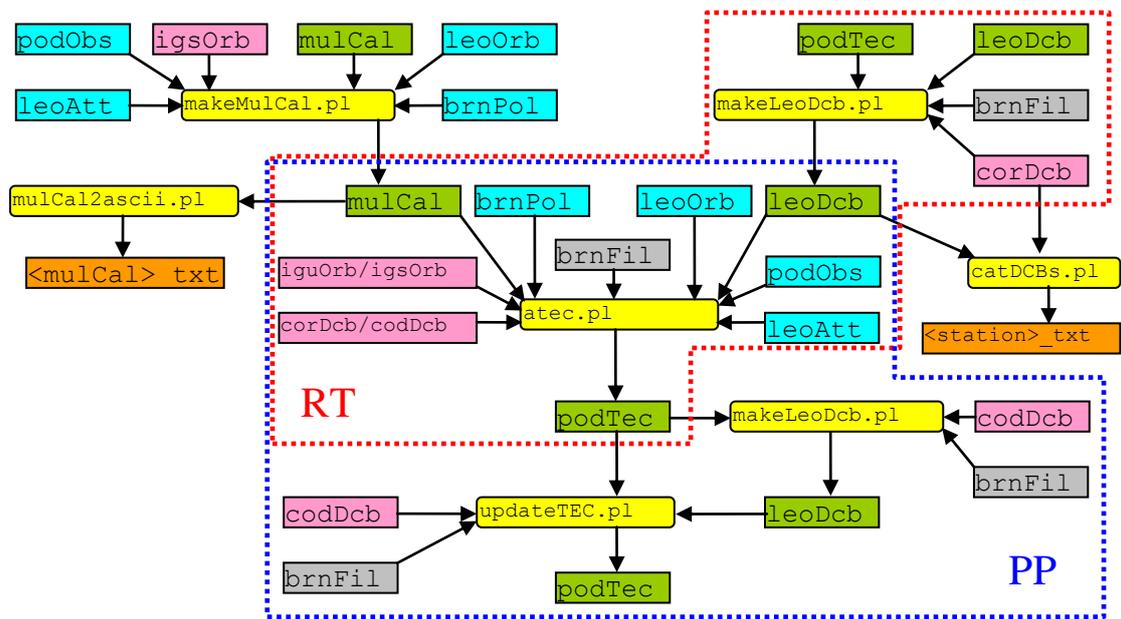


圖 8.1：絕對 TEC 處理流程概圖，源自 COSMIC Program Office [2006a?]。黃色塊表示 atec 模組中的 Perl 程式；橄欖色塊和橘色塊表示由 atec 模組產生的資料，但後者並不列入 TACC 資料產品；粉紅色塊表示外來資料；淺藍色塊表示由 TACC 產生，且用於 atec 模組的資料；淺灰色塊表示 Bernese 設定檔；紅、藍虛線區塊分別表示即時和後處理程序。

## 8.2 atec.pl 程式說明

在即時程序中，本程式將每份下載之 GPS 觀測量 (podObs) 轉換成絕對 TEC 值 (podTec)；在後處理程序中，則將每日的 podObs 檔轉換成 podTec 檔。程式會自動讀入前一次下傳或前一天的 podObs 檔，確保觀測資料在前後兩檔或兩天的交界處，仍然保持連續。詳細步驟說明如下。語法：

```
atec.pl podObs_YYYY.DDD.LLL.NN.TT_rnx [--(no)att] [--(no)pod] [--(no)flip]
      [--(no)db] [--tmpdir=dirpath] [--parmsfile=filename] [--calfile=filename]
```

其中 YYYY、DDD、LLL、NN、TT 分別是年、日 (day-of-year)、低軌衛星編號、下載序號，以及 GOX 天線編號。其他引數說明如表 8.1。

表 8.1：atec.pl 程式引數說明。

引數	說明
--att 或 --noatt	指定要使用或不使用衛星姿態資料 (預設為 --att)
--pod 或 --nopod	前者指定使用 LEO POD 軌道資料；後者指定使用 LEO 預報軌道資料 (即時預設為 --nopod；後處理預設為 --pod)
--flip 或 --noflip	與 --noatt 併用，指定翻轉航天器框架 180 度 (預設為 --noflip)
--db	指定使用資料庫儲存資料

---

--tmpdir=dirpath	指定暫存目錄 (路徑)
--parmsfile=filename	指定參數檔名
--calfile=filename	指定多路徑校正檔名

---

### (1) 準備工作

atec.pl 程式首先由系統環境變數取得任務代碼 (例如 cosmicrt) 並決定採用即時或後處理程序。此外,也根據執行時所帶的參數值,取得 mulCal 檔和參數檔

edit.parms#兩檔的完整路徑。然後建立一暫存目錄供 atec.pl 和 atec\_edit.pl 之間之檔案交換,並從 podObs 檔頭取得資料起啟時間、結束時間,以及天線軸向量。\*若該向量長度為零或找不到時,則停止執行本程式。叫用的副常式有:

**Dplib::protoMission**: 由任務名稱取出原任務名稱,例如從任務 cosmicrt 中取出原任務名稱 cosmic。

**GetOptions**: 讀取命令列的選項。

**PubFile->new**: 建立新的 PubFile 物件,用於處理資料檔名。

**PubFile->parse**: 剖析資料檔名,並傳回 PubFile 物件。

**Dplib::simplefn**: 由資料檔名全路徑中,取出資料檔名。

**GetVersion::GetVersion**: 定義輸出檔名中的子類別與版本號碼。

**Tempdir->new**: 建立暫存檔,並傳回該目錄名稱。

### (2) 計算航天器至天線軸的四元數

航天器至天線軸之四元數可由航天器框架中的天線軸向量計算出來。經由這個四元數,可將所有在航天器框架中的向量,轉成天線軸框架中的向量。因此為了後續計算上的方便,在此先計算該四元數,以便把航天器框架中的 LEO-GPS 連線向量,轉成天線軸框架中的 LEO-GPS 連線向量,計算該向量偏離天線軸的角度。

以數學來描述,航天器坐標系 (相對於測量學所稱的框架) 包含一組以天線軸向量為依據的三維正交基底。在航天器坐標系中,該基底 ( $\mathbf{x}_{bs}$ ,  $\mathbf{y}_{bs}$ ,  $\mathbf{z}_{bs}$ ) 定義如下 (參見圖 8.2):<sup>†</sup>

**$\mathbf{x}_{bs}$** : 天線軸向量方向的單位向量

**$\mathbf{y}_{bs}$** : S/C 天底 (即 +  $\mathbf{z}_{sc}$ ) 與  $\mathbf{x}_{bs}$  外積方向的單位向量,如果  $\mathbf{x}_{bs}$  與  $\mathbf{z}_{sc}$  平行或反向時,則定義  $\mathbf{y}_{bs}$  為  $-\mathbf{y}_{sc}$

**$\mathbf{z}_{bs}$** :  $\mathbf{x}_{bs}$  和  $\mathbf{y}_{bs}$  外積方向的單位向量

S/C-B/S 四元數 ( $q_{sc2bs}$ ) 代表一個航天器框架到天線軸框架的轉置矩陣,即航天器框架中的向量  $\mathbf{v}$  與天線軸框架中的向量  $\mathbf{v}'$  之間的關係可表示為  $\mathbf{v}' = q_{sc2bs}^* \mathbf{v} q_{sc2bs}$ 。其中星

---

\* 天線軸即天線波束中心軸。對福衛三號而言,2支 POD 天線在航天器框架的 XZ 平面上,仰角約 15 度;2支 OCC 天線也在同一平面上,仰角約-27.3 度。詳細數據見 COSMIC Program Office [2006b?]

<sup>†</sup> 這個地方像是繞口令,但卻是嚴謹的定義。首先,天線軸坐標系包含一組三維正交基底的意思是,該基底是構成天線軸坐標系的一部分,並非全部,因時間也是該坐標系的一部分。在航天器坐標系中定義該基底的意思是,以航天器坐標系為參考坐標系來描述天線軸基底。如同以慣性坐標系描述 (定義) 地球旋轉坐標一樣,前者是參考坐標系,後者才是標的。嚴格來說,被定義的東西並不是天線軸坐標系,而是它的基底,因此我們避免寫出像「在 A 坐標系中定義 B 坐標系」這樣的句子。

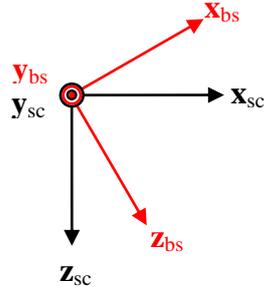


圖 8.2：航天器坐標系與天線軸坐標系的關係示意圖。黑色代表航天器坐標系之三維正交基底。x 軸名義上是航天器前進的方向，z 軸指向航天器的天底方向，y 軸在 z 與 x 外積方向，射出紙面或螢幕。詳見 COSMIC Program Office [2006c?]。紅色代表天線軸坐標系的三維正交基底，x 軸沿天線軸向量，y 軸同樣射出紙面或螢幕，z 軸在 x 與 y 外積方向。對福衛三號而言，POD 天線的  $\mathbf{x}_{bs}$  仰角約 15 度；OCC 天線的  $\mathbf{x}_{bs}$  仰角約 -27.3 度。對 CHAMP 指向天頂的天線而言， $\mathbf{x}_{bs} = -\mathbf{z}_{sc}$ ； $\mathbf{y}_{bs} = -\mathbf{y}_{sc}$ ； $\mathbf{z}_{bs} = -\mathbf{x}_{sc}$ 。

號代表共軛矩陣。此一框架轉置的定義與 Kuipers [2002] 的定義一致。

另一三維轉置矩陣  $\mathbf{R}_{sc2bs}$  也可用來描述  $\mathbf{v}' = \mathbf{R}_{sc2bs} \mathbf{v}$ ，表示為：

$$\mathbf{R}_{sc2bs} = (\mathbf{x}_{bs} \quad \mathbf{y}_{bs} \quad \mathbf{z}_{bs})^T = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \\ z_1 & z_2 & z_3 \end{pmatrix} \quad (8.1)$$

因此，四元數  $q_{sc2bs} = q_w + \mathbf{i}q_x + \mathbf{j}q_y + \mathbf{k}q_z$  中各分量可表示為：

$$q_w = \frac{1}{2} \sqrt{1 + x_1 + y_2 + z_3} \quad (8.2)$$

$$q_x = \frac{1}{2} \text{sign}(y_3 - z_2) \sqrt{1 + x_1 - y_2 - z_3} \quad (8.3)$$

$$q_y = \frac{1}{2} \text{sign}(z_1 - x_3) \sqrt{1 - x_1 + y_2 - z_3} \quad (8.4)$$

$$q_z = \frac{1}{2} \text{sign}(x_2 - y_1) \sqrt{1 - x_1 - y_2 + z_3} \quad (8.5)$$

叫用的副常式有：

`Dutil::mat2quat`：把一個轉置矩陣轉換成一個四元數。

`Dutil::quatinv`：取一矩陣之共軛。

(3) 取用前一份下載資料中的 RINEX 資料

程式讀取前一份下載資料中的 podObs 檔後 90 分鐘資料，檢查其中是否含與本 podObs 檔相接連的觀測資料。若有，則取之相連，以確保資料連續。若前一個 podObs 檔的資料長度不足 90 分鐘，則再取前 2 檔。最多往前取 4 檔。但如果有任何 podObs 檔的資料長度超過 24 小時，則停止執行本程式。叫用的副常式有：

`TimeClass->new`：建立一個 TimeClass 物件，用於 GPS 時間轉換。

`Tools::findPrevDump`：根據本次下載資訊，尋找前一次的下載序號。

`PubFile->new`：同前。

#### (4) 讀取相應之衛星軌道檔和姿態檔

讀取與 `podObs` 檔時間範圍相應的 GPS 衛星軌道檔 (`iguOrb` 或 `igsOrb`)、低軌衛星軌道檔 (`leoOrb`)，以及低軌衛星姿態檔 (`leoAtt`)，以決定 GPS 和低軌衛星坐標以及航天器框架。<sup>\*</sup>GPS 軌道檔在即時程序為 `iguOrb`，後處理程序為 `igsOrb`；低軌衛星軌道檔和姿態檔則分別是 `leoOrb` 和 `leoAtt`。其中，若前後 `leoOrb` 檔之間有長達 1 分鐘以上的間隔，則表示軌道不連續，並停止執行本程式。叫用的副常式有：

`PubFile->new`：同前。

`PubFile->parse`：同前。

`TimeClass->new`：同前。

`OccTable::findGpsFiles`：根據下傳資訊中的起訖時間，尋找相應的 `iguOrb` 或 `igsOrb` 檔。

#### (5) 比對預報軌道與導航資訊

這個步驟只用於低軌預報軌道，檢查低軌預報軌道是否符合 `leoAtt` 中的導航資訊，以免誤用了預報錯誤的軌道資料。但目前 TACC 只用低軌衛星的精密軌道 (`leoOrb`)，故程式會跳過這個步驟，不進行比對。叫用的副常式暫略。

#### (6) 計算地心地固坐標系轉至天線軸坐標系的四元數

由於 `iguOrb`、`igsOrb` 和 `leoOrb` 是以地心地固坐標系描述 GPS 和低軌衛星軌道，而我們希望得到的是天線軸框架中的 GPS-LEO 連線向量，因此還需要計算地心地固至天線軸框架的四元數  $q_{ecf2bs}$ 。

由於 `leoAtt` 檔已提供了 ITOE (Inertial True of Epoch) 框架轉至航天器框架的四元數  $q_{itoe2sc}$ ，因此我們只需要計算地心地固至 ITOE 的四元數  $q_{ecf2itoe}$ ，即可以下列公式得到  $q_{ecf2bs}$ ：

$$q_{ecf2bs} = q_{ecf2itoe} q_{itoe2sc} q_{sc2bs} \quad (8.6)$$

下面要計算的  $q_{ecf2itoe}$  並不只是一個慣性坐標系和旋轉坐標系之間的轉置矩陣而已。我們還須考慮地軸之校正。從 `brnPol` 檔可得到地軸校正參數，因此我們再比照前面的做法，由地心地固坐標系，定義 ITOE 坐標系所包含的一組三維的正交基底 ( $\mathbf{x}_{itoe}$ ,  $\mathbf{y}_{itoe}$ ,  $\mathbf{z}_{itoe}$ )。已知用來描述地心地固坐標系轉換至 ITOE 坐標系的三維轉置矩陣  $\mathbf{R}_{ecf2itoe}$  可寫成：<sup>†</sup>

$$\mathbf{R}_{ecf2itoe} = (\mathbf{x}_{itoe} \quad \mathbf{y}_{itoe} \quad \mathbf{z}_{itoe})^T = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \\ z_1 & z_2 & z_3 \end{pmatrix} \quad (7)$$

<sup>\*</sup> 除了特別說明之外，本文所謂的坐標值，都是指空間坐標中的位置。與速度坐標值等無涉。

<sup>†</sup> 原文為「ITOE 坐標至 ITOE 坐標」，實為誤植。

因此，四元數  $q_{\text{ecf2itoe}} = q_w + \mathbf{i}q_x + \mathbf{j}q_y + \mathbf{k}q_z$  中各分量仍可以(8.2)至(8.5)式表示之。叫用的副常式有：

`SP3::read_SP3`：讀取 SP3 檔，並傳回時間、衛星坐標和速度。

`Dutil::mat2quat`：將轉置矩陣轉換為四元數。

`Dutil::quatinv`：取一矩陣之共軛。

`Dutil::quatmult`：計算四元數乘積。

`Tools::readAtt`：讀 leoAtt 檔並傳回檔中資料。

`Tools::cachefid`：依指定的起訖時間尋找 brnPol 檔，並傳回一資料結構。

`Dutil::ITOE2ECF`：建立 ITOE 至地心地固坐標系的轉置矩陣，並傳回一個從 ITOE 框架轉到 ECEF 框架的坐標向量（也可再搭配速度向量）。

#### (7) 準備 atec\_edit.f 的輸入資訊

首先將 ECEF 至 B/S 的四元數以及太陽能板傳動角寫入一暫存檔，檔名 leoAtt\_quat。atec\_edit.f 所需的起訖時間（單位 GPS seconds）以及相應的輸入檔名全路徑，則被寫入另一暫存檔 infile\_list 如下：

```
869788800.000 869875199.000 /pub/cosmic/levella/podObs/2007.211/podObs_2007.211.004.01.01_rnx
869875200.000 869961599.000 /pub/cosmic/levella/podObs/2007.212/podObs_2007.212.004.01.01_rnx
869788800.000 869886000.000 /pub/cosmic/levellb/leoOrb/leoOrb_2007.211.004.01_2007.3200_sp3
869875200.000 869961060.000 /pub/cosmic/levellb/leoOrb/leoOrb_2007.212.004.01_2007.3200_sp3
869788800.000 869874300.000 /pub/cosmic/levella/igsOrb/igsOrb_2007.211.00.00.1440_sp3
869875200.000 869960700.000 /pub/cosmic/levella/igsOrb/igsOrb_2007.212.00.00.1440_sp3
869961600.000 870047100.000 /pub/cosmic/levella/igsOrb/igsOrb_2007.213.00.00.1440_sp3
869788804.004 869961585.004 /tmp/atec.pl12873/leoAtt_quat
```

#### (8) 執行 atec\_edit

副常式 atec\_edit.f 以 Blewitt [1990] 為基礎，用來偵測及移除 podObs 檔中的周波脫落和異常值，並估算 TEC 值。其算法是將相位觀測之 TEC 值調整 (leveling) 到電碼觀測量，如 Syndergaard et al. [2006] 所示。它也可讀入 mulCal 檔，以減輕電碼虛擬距離中的多路徑效應。它另一個主要功能是估算 GOX 天線附近的平均多路徑值，以更新 mulCal 檔，但這部分的計算主要用於 makeMulCal.pl，而且更新 mulCal 檔也是在 makeMulCal.pl 中完成的，因此詳細留到後面該程式章節裡再說明。

#### (9) 校正低軌衛星和 GPS 之 DCB 值

分別取低軌衛星及 GPS 的 DCB 校正檔，校正上一步驟所估算出的 TEC 值。在 leoDcb 和 corDcb (或 codDcb) 檔中，DCB 校正值的單位是奈秒，與 TEC 的轉換係數是  $\frac{cf_1^2 f_2^2}{C_0(f_1^2 - f_2^2)}$ 。其中， $c$  為光速； $f_1$ 、 $f_2$  是 GPS 雙頻載波頻率； $C_0 = \frac{e^2}{8\pi^2 m \epsilon_0} \approx 40.3082 \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$ ，因此  $1 \text{ ns} = 2.853336681 \text{ TECU}$ 。叫用的副常式如下：

`AtecTools::readStation`：讀取低軌衛星及天線名稱 (brnFil)。

`AtecTools::findDcbFiles`：取得 corDcb 或 leoDcb 檔名。

`AtecTools::readDcb`：讀取 corDcb 檔中的 DCB 值及其均方根，或 leoDcb 檔中與 brnFil 相應的 DCB 值及其均方根。

`PubFile->parse`：同前。

`TimeClass->new`：同前。

#### (10) 檢查重疊的 TEC 弧

比較本段 TEC 弧與前一段 TEC 弧重疊的部分。若同一段 TEC 弧因不同的下載序號或不同天而被分割成 2 段時，則取前一段 TEC 弧來補，以獲得連續的資料。若被分割成 2 段以上，則最多往前取 3 段（加本段共 4 段），連接在一起。叫用的副常式有：

TimeClass->new：同前。

PubFile->new：同前。

Dplib::simplefn：同前。

PubFile->parse：同前。

PDL::NetCDF->new：開啟 netCDF 檔，並回傳一 NetCDF 物件供讀寫。

### 8.3 makeMulCal.pl 程式說明

本程式由 RINEX 觀測檔 (podObs)、SP3 軌道檔 (leoOrb 和 igsOrb)，以及衛星姿態檔 (leoAtt)，產製多路徑校正檔。輸出檔 (netCDF 格式) 包含指定低軌衛星編號及天線編號的 C1、P1、P2 平均多路徑值供校正。程式叫用 atec\_edit.f 根據 Blewitt [1990]，偵測 RINEX 檔中的異常值、修正周波脫落，並估算平均多路徑值。其語法為：

```
makeMulCal.pl YYYY.DDD[-[YYYY.]DDD] MISSION [--prefix=filetype] [--leo=#]
  [--ant=#] [--(post|real)] [--(no)att] [--(no)pod] [--(no)flip] [--
  tmpdir=dirpath] [--parmsfile=filename] [--calfile=filename] [--
  datesfile=filename]
```

其中 YYYY、DDD、MISSION 分別是年、日 (day-of-year) 和任務代碼 (例如 cosmicrt)。其他引數說明如表 8.2。

表 8.2：makeMulCal.pl 程式引數說明。

引 數	說 明
--prefix=filetype	指定輸入檔案類別，但只限於 podObs 或 ionObs (預設值為 podObs)
--leo=#	指定低軌衛星編號 (預設為 1)
--ant=#	指定衛星天線編號 (預設為 0)
--post 或 --real	指定輸入即時或後處理之檔案類別 (例如即時取 leoPor；後處理取 leoOrb，預設值是 --post)
--att 或 --noatt	指定要使用或不使用衛星姿態資料 (預設值為 --att)
--pod 或 --nopod	前者指定使用 LEO POD 軌道資料；後者指定使用低軌預報軌道資料 (即時預設為 --nopod；後處理預設為 --pod)
--flip 或 --noflip	與 --noatt 併用，指定翻轉航天器框架 180 度 (預設值為 --noflip)
--tmpdir=dirpath	指定暫存目錄 (路徑)
--parmsfile=filename	指定參數檔名
--calfile=filename	指定多路徑校正檔名
--datesfile=filename	指定一內含日期資訊的檔名，以避免讀入該日期的資料

## 8.4 makeLeoDcb.pl 程式說明

在即時程序中，本程式根據 podTec 資料估算一天份（例如 doy 100）的 LEO DCB 值，並存入 leoDcb 檔，但程式是由 corDcb 檔帶動執行的。每天的 corDcb 檔通常於隔日（例如 doy 101）的 09:00 UTC 進入系統，並帶起該程式（主程式又叫用 atec\_dcb1.f 和 atec\_dcb2.f 兩支副常式），才產製 leoDcb 檔。估算 LEO DCB 的方法是取兩個 GPS-LEO 連線路徑上的 TEC 值，如圖 8.3 的 A、B 線段。假設

$$TEC_A \cdot M(\theta_A) = TEC_B \cdot M(\theta_B) \quad (8.8)$$

其中  $M$  為斜向 TEC 轉換至垂直 TEC 的映射函數， $\theta$  是 GPS-TEC 連線的仰角，表示為：

$$M(\theta) = \frac{\sin \theta + \sqrt{\tilde{r}^{-2} - \cos^2 \theta}}{1 + \tilde{r}^{-1}} \quad (8.9)$$

其中  $\tilde{r} \equiv \frac{R_{orb}}{R_{orb} + H_{ion}}$ ， $R_{orb}$  是低軌衛星之軌道半徑， $H_{ion}$  是電離層有效高度（自  $R_{orb}$  起算，參見附錄三）。目前 TACC 定義  $R_{orb}$  為 7000 公里； $H_{ion}$  為 4000 公里。令真實 TEC 值等於觀測值（ $TEC'$ ）與 LEO DCB 值之和，即得

$$(TEC'_A + DCB)M(\theta_A) = (TEC'_B + DCB)M(\theta_B)，故$$

$$DCB = \frac{TEC'_A M(\theta_A) - TEC'_B M(\theta_B)}{M(\theta_B) - M(\theta_A)}。其加權平均值為（見 Syndergaard [2006]）：$$

$$DCB_{LEO} = \frac{\sum (M(\theta_B) - M(\theta_A))(TEC'_A M(\theta_A) - TEC'_B M(\theta_B))}{\sum (M(\theta_B) - M(\theta_A))^2} \quad (8.10)$$

其中的疊加是對同一時間同一顆低軌衛星，所有 GPS-LEO 觀測量逐一配對之組合的疊加。例如：某顆低軌衛星同時觀測到來自 A、B、C 三顆 GPS 衛星的 TEC 值（即  $TEC'_A$ 、 $TEC'_B$ 、 $TEC'_C$ ），則可得 AB、AC、BC 三種配對組合，因此(8.10)式中的疊加，即為這三種組合之疊加。在實際運算上，程式會先篩選所有可能的配對組合再疊加。目前採用的篩選標準是  $\theta_A$  和  $\theta_B$  均須大於 5 度（排除低仰角）、A、B 線段夾角不得大於 180 度，而且  $0 \leq TEC \cdot M(\theta) < 20$ ，單位 TECU。注意：最後這項標準應隨太陽活動性的增強而調整。

此外，(8.10)式所使用的加權值是  $(M(\theta_B) - M(\theta_A))^2$ ，而非  $(M(\theta_B) - M(\theta_A))$ ，避免負的加權值。程式中說明該式得自最小平方法，應是誤植。因為理論上，同一時間的 DCB 值為常數，與配對組合無關。然回歸分析中的最小平方法卻是用來分析應變數（即 DCB 值）與自變數（即配對組合）的關係，故不適用。因兩者無相關性，故求得

的回歸係數（即回歸線之斜率）必為 0，而截距就是 DCB 平均值。

該映射函數  $M$  源自 Foelsche and Kirchengast [2002]，但加以變形。其推導過程見附錄三。數學上，雖可證明變形後的映射函數等於原函數，但原映射函數是為中性大氣，尤其是對流層而設計的，而前者卻是用於電離層上層 TEC 之校正。原因是該函數假設大氣和電離層為層狀結構（即局部球對稱），而中性大氣與電離層上層有某些物理量，具有類似的高度分布。例如：中性大氣之天頂靜水延遲量隨高度遞減，電離層上層的 TEC 亦同。Foelsche and Kirchengast [2002] 亦說明仰角大於 6 度的氣象資料適用此映射函數。

後處理程序以 `codDcb` 檔取代即時之 `corDcb` 進行每日估算。

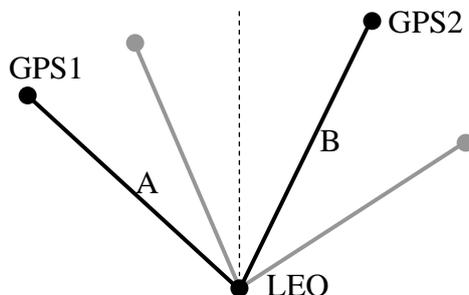


圖 8.3：估算 LEO DCB 之映射示意圖。A 線段為 GPS1-LEO 連線；B 線段為 GPS2-LEO 連線；虛線為映射用垂線。灰線表示其他候選的 GPS-LEO 連線。

## 8.5 updateTEC.pl 程式說明

本程式僅用於後處理程序，更新指定時間區間內之 `podTec` 檔。因為在後處理中，LEO DCB 值是在一指定時間區間（目前設定為 1 個月）內，所有 `podTec` 檔均產出後才估算出來的，因此程式以新估出的 LEO DCB 值取代原值，得到更新後的 `podTec` 檔。被更新的項目除了該值之外，也會修正斜向（電波路徑上的）TEC 值。修正的方法很簡單，就是把該 TEC 值減去原 DCB 值，再加上新 DCB 值。其結果仍存回原檔。

## 8.6 附錄一：多路徑校正檔說明

多路徑校正檔 (`mulCal`) 包括用來校正虛擬距離多路徑的三維參數，`netCDF` 格式，可以 `readcal.f` 程式讀取。檔名格式及資料項目說明如下。

檔名格式：`mulCal_YYYY.DDD.LLL.TT_nc`

其中 YYYY、DDD、LLL 和 TT 分別是年、日（day-of-year）、低軌衛星編號，以及低軌衛星天線編號。

- `X_grid`：偏離天線軸角的水平分量（單位度）
- `Y_grid`：偏離天線軸角的垂直分量（單位度）
- `Z_grid`：太陽能板傳動角（單位度）
- `MC1`：在 C/A 電碼虛擬距離上的平均多路徑值（單位公尺）
- `MP1`：在 P1 電碼虛擬距離上的平均多路徑值（單位公尺）
- `MP2`：在 P2 電碼虛擬距離上的平均多路徑值（單位公尺）

## 8.7 附錄二：參數檔 edit.parms#說明

Fortran namelist 檔，包括處理絕對 TEC 資料所需的可調參數如下。

- &edit
  - \* dtleo：指定 LEO 軌道資料的取樣時間（目前設定為 60 秒）
  - \* dtgps：指定 GPS 軌道資料的取樣時間（目前設定為 900 秒）
  - \* dtatt：指定衛星姿態檔之最大取樣時間（目前設定為 300 秒）
  - \* snrmin：指定 SNR 值的下限（目前設定為 5 volts/volt）
  - \* snrmax：指定 SNR 的上限（目前設定為 1200 volts/volt）
  - \* altmin：指定高度的下限（目前設定為 0 公里）
  - \* gapmax：指定 TEC 弧中，最大可接受的中斷時間（目前設定為 10 秒）
  - \* minarclen：指定最小可接受的 TEC 弧長（目前設定為 480 個觀測數）
  - \* minsublen：指定最小可接受的 TEC 次弧長（目前設定為 30 個觀測數）
  - \* rms0：指定寬巷雜訊的 RMS 初始值（目前設定為 0.05 周波）
  - \* rmsfac：指定寬巷雜訊的標準偏差上限（目前設定為 4，無單位）
  - \* rmsmax：指定寬巷 RMS 值的上限（目前設定為 0.3 周波）
  - \* errmax：指定 TEC 次弧的寬巷 RMS 值上限（目前設定為 0.5 周波）
  - \* slipmax：指定在 Q 巷（Q-lane）處理中，最大容許的周波脫落（目前設定為 1.5 周波）
  - \* slipmin：指定以 Q 巷計算在一 TEC 弧開頭，兩個連續資料點的周波差值的下限（目前設定為 0.1 周波）
  - \* intslip：決定是否以最近整數修正周波脫落的判斷值（目前設定為 .false.，無單位）
  - \* wreg0：修正周波脫落時，用來平滑 TEC 弧的參數（目前設定為  $10^{12}$ ，無單位）
  - \* sigma0：指定 L1-L2 熱雜訊之標準偏差上限（目前設定為 0.02 周波）
  - \* mfit：修正周波脫落時，須一併納入處理的資料點數（目前設定為 12 個觀測點）
  - \* jderiv：正規化微分的次方數（目前設定為 3 次方）
  - \* postfac：修正周波脫落時，P2-P1 後擬合殘差之標準偏差的最大容許值（目前設定為 15）
  - \* sigmax：後擬合之均方根偏差的最大容許值（目前設定為 15）
  - \* calphase：指定 L1 相位觀測量類別（目前設定為 LA）
  - \* calcode：指定寬巷中，P1 虛擬距離觀測量類別（目前設定為 C1）
- &output
  - \* mulcal：指定是否輸出多路徑校正檔（目前設定為 .false.）
  - \* abstec：指定是否輸出 TEC 弧資料檔（目前設定為 .true.）
  - \* rawobs：指定是否在標準輸出介面顯示原始 RINEX 資料（目前設定為 .false.）
  - \* orbits：指定是否在標準輸出介面顯示輸入及內插過的軌道資料（目前設定

- 為.false.)
- \* wqlane：指定是否在標準輸出介面顯示寬巷和 Q 巷（目前設定為.false.）
  - \* crvfit：指定是否在標準輸出介面顯示周波脫落事件中的電離層線性組合和擬合曲線（目前設定為.false.）
  - \* cslips：指定是否在標準輸出介面顯示周波脫落事件中的周波位置和數量（目前設定為.false.）
  - \* tecsmpl：指定是否在標準輸出介面顯示所有 TEC 弧、虛擬距離多路徑值，以及偏離軸角的角度（目前設定為.false.）

## 8.8 附錄三：映射函數說明及推導

原 Foelsche and Kirchengast [2002]之幾何映射函數表示如下：

$$m(\varepsilon) = \left( \frac{R_e}{H_{atm}} + 1 \right) \left[ \cos(\sin^{-1}(\tilde{r} \cos \varepsilon)) - \tilde{r} \sin \varepsilon \right]$$

其中  $R_e$  是地球半徑； $H_{atm}$  是大氣有效高度； $\varepsilon$  是電波源之仰角； $\tilde{r} \equiv \frac{R_e}{R_e + H_{atm}}$ 。

Syndergaard [2006]加以整理後，用於電離層上層的形式如下：

$$M(\theta) = \frac{\sin \theta + \sqrt{\tilde{r}^{-2} - \cos^2 \theta}}{1 + \tilde{r}^{-1}}$$

其中  $M(\theta) = \frac{1}{m(\varepsilon)}$ ， $\theta = \varepsilon$ ， $\tilde{r} \equiv \frac{R_{orb}}{R_{orb} + H_{ion}}$ （注意和上述的定義不同）， $R_{orb}$  是低軌衛星軌道半徑， $H_{ion}$  是電離層有效高度（自  $R_{orb}$  起算，見圖 8.A）。其推導過程如下：

$$\begin{aligned} M(\theta) &= m^{-1}(\theta) = \left( \frac{R}{H} + 1 \right)^{-1} \left[ \cos(\sin^{-1}(\tilde{r} \cos \theta)) - \tilde{r} \sin \theta \right]^{-1} \\ &= (1 - \tilde{r}) \left[ \sqrt{1 - \tilde{r}^2 \cos^2 \theta} - \tilde{r} \sin \theta \right]^{-1} \\ &= (1 - \tilde{r}) \frac{\sqrt{1 - \tilde{r}^2 \cos^2 \theta} + \tilde{r} \sin \theta}{\left( \sqrt{1 - \tilde{r}^2 \cos^2 \theta} - \tilde{r} \sin \theta \right) \left( \sqrt{1 - \tilde{r}^2 \cos^2 \theta} + \tilde{r} \sin \theta \right)} \\ &= \frac{\sin \theta + \sqrt{\tilde{r}^{-2} - \cos^2 \theta}}{1 + \tilde{r}^{-1}} \end{aligned}$$

其中  $\cos(\sin^{-1}(\tilde{r} \cos \theta)) = \sqrt{1 - \tilde{r}^2 \cos^2 \theta}$ ，證明如下。

根據正弦定理， $\beta = \sin^{-1}(\tilde{r} \cos \theta)$ ，且 CB 線段長  $\overline{CB} = (R + H) \cos \beta$ 。又根據畢氏定理， $\overline{CB} = \sqrt{(R + H)^2 - R^2 \cos^2 \theta} = (R + H) \sqrt{1 - \tilde{r}^2 \cos^2 \theta}$ ，故得證。

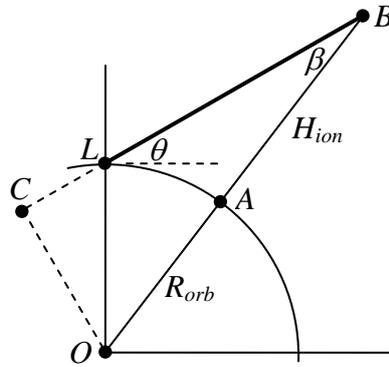


圖 8.A：映射之幾何關係圖。假設 GPS 訊號沿直線傳播，並通過 B 點，到達 L 點，則 LB 線段可被映射至 AB 線段。其中  $R_{orb}$ （即 OA 線段）是低軌衛星的軌道半徑； $H_{ion}$ （即 AB 線段）是電離層有效高度； $\theta$  是 GPS 衛星仰角； $\beta$  是 B 點的頂角；O 是地心；L 表示低軌衛星；B 是 GPS-LEO 衛星連線與半徑為  $R_{orb} + H_{ion}$  的圓的一個割點；A 是 OB 線段在 LEO 軌道的割點；C 是 LB 線段之延伸線與地球同心圓的切點。

## 8.9 附錄四：參數檔 dcb.parms#說明

- &dcb1
  - \* elevlim：GPS 衛星的最低容許仰角，以低軌衛星為參考點（目前設定為 5 度）
  - \* seplim：兩 GPS-LEO 連線的夾角，用於判斷該夾角是否過大（目前設定值是 180 度）
  - \* teclow：垂直 TEC 的最小容許值，用於判斷觀測值是否太小（目前設定值是 0 TECU）
  - \* techig：垂直 TEC 的最大容許值，用於判斷觀測值是否太大（目前設定值是 20 TECU）
  - \* hiono：電離層有效高度（目前設定值是 4000 公里）
  - \* minpairs：最少配對組數（目前設定值是 50 對）
  - \* errlim：[TBD]（目前設定值是 100）
  - \* weight：[TBD]（目前設定值是 1）
- &output
  - \* dcbirms：[TBD]（目前設定值是 .true.）
  - \* arctec：[TBD]（目前設定值是 .false.）
  - \* dcbprs：[TBD]（目前設定值是 .false.）
  - \* pntprs：[TBD]（目前設定值是 .false.）

## 8.10 參考文獻

- Blewitt, G., 1990: An automatic editing algorithm for GPS data, Geophys. Res. Lett., 17, 199-202.
- COSMIC Program Office, 2006a?: Algorithms for processing GPS data into absolute Total

- Electron Content (aTEC) along LEO-GPS links,  
<http://tacc.cwb.gov.tw/cdaac/doc/documents/atec.pdf>.
- COSMIC Program Office, 2006b?: COSMIC GPS antenna (sensor) offsets wrt spacecraft center of mass, sensor boresight vectors, sensor azimuth vectors,  
<http://tacc.cwb.gov.tw/cdaac/doc/documents/COSMIC-Ant-Offsets.pdf>.
- COSMIC Program Office, 2006c?: COSMIC spacecraft geometry in body-fixed coordinate system with GPS antenna identification,  
[http://tacc.cwb.gov.tw/cdaac/doc/documents/COSMIC\\_GEOM.pdf](http://tacc.cwb.gov.tw/cdaac/doc/documents/COSMIC_GEOM.pdf).
- Foelsche, U. and G. Kirchengast, 2002: A simple “geometric” mapping function for the hydrostatic delay at radio frequencies and assessment of its performance, *Geophys. Res. Lett.*, 29(10), doi:10.1029/2001GL013744.
- Kuipers, J. B., 2002: *Quaternions and Rotation Sequences*, Princeton University Press, Princeton.
- Syndergaard, S., 2006: Ionospheric data processing and retrieval, FORMOSAT-3/COSMIC Workshop 2006 - Early Results and IOP Campaigns, Taipei.



## 9. 小型電離層光測器觀測資料處理程序

小型電離層光測器之資料演算法包括 CDAAC 所寫的 Perl 主程式 `tipRadiance.pl` 及美國海軍研究實驗室所發展的 TIP 核心程式 (`tipstrip.c`、`verniermet.c`、`product1.c` 等)，將 level 1a 的 TIP 原始觀測量轉換成 level 1b 的 TIP 產品。TIP 輻射觀測量並不是高品質的產品，而比較像是快視產品。以下說明是根據 COSMIC Project Office [2005?]更新至 TACC 現行版本。

輸入的資料有：

- (1) TIP 原始觀測檔 (`tipBin`)：時間、光子數和儀器設定值
- (2) 低軌衛星姿態檔 (`leoAtt`)：含姿態四元數和低軌衛星坐標、速度
- (3) TIP 校正檔 (`tipCal`)：目前的校正檔名為 `tipCal_2007.243_nml`
- (4) 量測資訊檔 (`tipmeasures.csv`)：用於 TIP 資料串流中的遙測變數 (代碼) 表及其說明
- (5) 摘錄檔 (`extract.txt`)：需要用的 TIP 代碼表
- (6) 時間資料檔 (`timedata.nml`)：閏秒資訊、發射時日和時間格式
- (7) 參數檔 (`parms#`)：發射前測試用的設定參數

輸出的資料即 TIP 產品 (`tipLv1`)，內含：

- (1) TIP 觀測時間 (GPS 時間)
- (2) TIP 原始光子數
- (3) TIP 輻射觀測量
- (4) TIP 步進馬達的位置
- (5) TIP 觀測量品質指標
- (6) TIP 指向方向偏離天底的角度
- (7) TIP 指向地表的經緯度
- (8) 低軌衛星的橢球高
- (9) 低軌衛星的經緯度
- (10) 觀測起訖時間 (GPS 時間) 和使用的校正檔名

### 9.1 演算方法

- (1) 將 TIP 原始資料 (光子數) 轉換為時變輻射量：首先以外部命令執行 `tipstrip` 程式將每一個 `tipBin` 檔分解成 6 個純文字資料檔 (`.data`、`.echo`、`.head`、`.info`、`.tail`、`.wrn`，皆為 CSV 格式)，且放入暫存目錄中，準備在需要時被讀入記憶體中。然後執行 `verniermet` 程式，計算衛星航行時間。其中，觀測時刻的估計值是以科學資料檔 (`.data`) 中的日期標籤為依據的。接下來，執行 `product1` 程式，計算時變輻射資料，並輸出至輻射檔 (`.rad1`)。其  $1356\text{\AA}$  輻射量

$$I = \frac{N}{S \cdot \Delta t} \quad (9.1)$$

其中， $N$  為原始光子數（有別於後來的 photon count）， $\Delta t$  為累積時間（取自標頭檔 .head）， $S$  為敏感度（由儀器設定值、濾鏡溫度以及 TIP 校正參數決定）。值得注意的是，NRL 自 TIP 1.71 版以後，將  $S$  定義為原來  $S$  的倒數，故修正後的(9.1)式與 COSMIC Project Office [2005?] 中的式子不同。

輸出的資料品質等級是根據科學資料檔中的科學樣本是否完整而決定的。可能的數字及其意義如下：

- 0：觀測量良好
- 1：由於高伏特數的擾動所造成的科學樣本不完整
- 3：由於馬達未到位所造成的科學樣本不完整
- 4：敏感度不清楚，但樣本良好
- 5：敏感度不清楚，再加上 1 的狀況
- 7：敏感度不清楚，再加上 3 的狀況

相關的程式和模組有：

`tipstrip.c`：讀取 TIP 原始觀測檔、摘錄檔和量測資訊檔，存入 6 個 CSV 檔。

`verniermet.c`：讀取標頭檔中的 TIP 時間和 GPS 時間，使之同步以計算衛星航行時間，並輸出至一時間檔 (.time)。

`product1.c`：讀取科學資料檔、標頭檔和時間檔，以及校正參數檔 (tipCal) 以計算並輸出輻射檔。

`Tools::readCsv`：讀取 CSV 格式資料，在這裡是讀取科學資料檔和輻射檔。

- (2) 計算 TIP 所指的方向偏離天底的角度：讀入 `leoAtt` 檔中的低軌衛星姿態四元數、低軌衛星的地心地固坐標和速度，然後以 `sca` 四元數將 LL 框架的+z 軸旋轉至航天器框架的+z 軸，以計算旋轉角。<sup>\*</sup>此旋轉角即為 TIP 偏離天底的角度。此外亦建立了地軸修正量 (`brnPol`) 物件，再將 `brnPol` 檔連結到暫存目錄，以便後續 ITOE 坐標系與地心地固坐標系之間的轉換。<sup>†</sup>使用模組：

`Tools::readAtt`：讀取航天器的四元數及其地心地固坐標和速度。

`Tools::cachefid`：建立 `brnPol` 物件。

- (3) 將 TIP 指向的單位向量轉至地心地固坐標：取 `att` 四元數的共軛，將先前的航天器

---

<sup>\*</sup> `leoAtt` 檔中與低軌衛星相關的四元數有兩種，代碼分別為 `att` 和 `sca`。`att` 為慣性姿態，用來將 ITOD 框架轉換至航天器框架；`sca` 則將航天器框架轉換至 LL 框架。航天器框架定義為 Z：TIP 所指的方向；X：朝 ANT01 與 ANT02 之間的方向，與 Z 垂直；Y：垂直於衛星圓盤面（吾人站在衛星頂上，面朝 -X 方向時，Y 軸在左側）。詳見 [http://tacc.cwb.gov.tw/cdaac/doc/documents/COSMIC\\_GEOM.pdf](http://tacc.cwb.gov.tw/cdaac/doc/documents/COSMIC_GEOM.pdf)。LL 框架定義為：Z：天底方向，即航天器位置向量  $\vec{r}$  的反方向（單位向量，且於 ITOD 框架）； $Y = (\vec{r} \times \vec{v}) / |\vec{r} \times \vec{v}|$ ， $\vec{v}$  為航天器速度向量（於 ITOD 框架）； $X = Y \times Z$ 。注意 `att` 和 `sca` 四元數的排列順序皆為 `qx`、`qy`、`qz`、`qw`。

<sup>†</sup> ITOD 坐標系的定義見 [http://csds.uah.edu/iso/tech/gloss\\_los.html](http://csds.uah.edu/iso/tech/gloss_los.html)，原文是 ITOD coordinate system is a “snapshot” of a non-rotating True of Date coordinate system taken at some particular time of interest。而 True of Date coordinate system is any geocentric coordinate system with its z-axis parallel to Earth’s polar axis。ITOE 框架的定義待查。

參考框架旋轉至 ITOE 框架，再轉換至地心地固坐標，計算該坐標中的 TIP 指向單位向量。使用模組有：

`Dutil::ITOEtoECF`：讀取（共軌）四元數和地軸修正量，做 ITOE 框架至地心地固坐標的轉換。

- (4) 將 TIP 指向偏度和低軌衛星坐標以 TIP 量測的取樣時間進行內插：以分段式立方貝索函數之內插補點法，將
- TIP 偏離天底的角度
  - 航天器+z 單位向量的分量（地心地固坐標）
  - 低軌衛星位置向量的分量

轉換為 TIP 輻射量的取樣時間。使用模組有：

`Interp::cubicBessel`：對一維函數提供分段式立方貝索函數內插補點法。

- (5) 計算 TIP 指到地表位置的經緯度：TIP 指到地表的位置定義為地球之橢球與航天器+z 向量的交點，表示為

$$\vec{r}_{\text{targ}} = \vec{r}_{\text{leo}} + \gamma \hat{z}_{sc} \quad (9.2)$$

其中  $\gamma$  為橢球方程和直線方程聯立解的兩根中，較小的那個根（因為另一根指的是穿過橢球內部，到橢球另一端（遠端）的交點）； $\hat{z}_{sc}$  為航天器+z 方向的單位向量。因為  $\vec{r}_{\text{targ}}$  必定滿足橢球方程式：

$$\frac{x_{\text{targ}}^2}{a^2} + \frac{y_{\text{targ}}^2}{a^2} + \frac{z_{\text{targ}}^2}{b^2} = 1 \quad (9.3)$$

其中  $a$  和  $b$  為橢球長短軸的半徑，因此  $\gamma$  也必滿足

$$\frac{(x_{\text{leo}} + \gamma z_1)^2}{a^2} + \frac{(y_{\text{leo}} + \gamma z_2)^2}{a^2} + \frac{(z_{\text{leo}} + \gamma z_3)^2}{b^2} = 1 \quad (9.4)$$

其中  $z_1$ 、 $z_2$ 、 $z_3$  為航天器+z 向量在地心地固坐標中的三維分量。最後再將該坐標轉換為橢球上的地理經緯度。

- (6) 計算低軌衛星在橢球上的高度和經緯度：首先定義亞衛星點  $\vec{r}_s = (x_s, y_s, z_s)$ ，滿足下式：

$$\vec{r}_{\text{leo}} = \vec{r}_s + \eta \vec{n}_s \quad (9.5)$$

其中  $\vec{n}_s$  為位於亞衛星點上，垂直於橢球面上的向量（不必是單位向量），定義如下，另見圖 9.1。

$$\vec{n}_s = \begin{pmatrix} x_s a^{-2} \\ y_s a^{-2} \\ z_s b^{-2} \end{pmatrix} \quad (9.6)$$

因  $\vec{r}_s$  指向橢球上某一點，故係數  $\eta$  必滿足下式：

$$\frac{x_{leo}^2}{a^2} \left(1 + \frac{\eta}{a}\right)^{-2} + \frac{y_{leo}^2}{a^2} \left(1 + \frac{\eta}{a}\right)^{-2} + \frac{z_{leo}^2}{b^2} \left(1 + \frac{\eta}{b}\right)^{-2} = 1 \quad (9.7)$$

由牛頓法疊代求解  $\eta$ ，再代回(9.5)式得  $\vec{r}_s$ ，並以  $h = \eta |\vec{n}_s|$  計算低軌衛星的橢球高。最後將地心地固坐標之亞衛星點轉成地理經緯度。

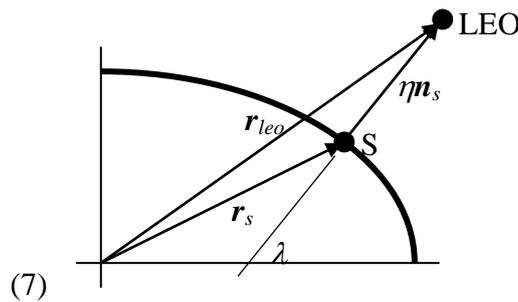


圖 9.1：低軌衛星和亞衛星點及相關向量示意圖。亞衛星點 S 位於地球球殼上， $r_s$  為其向量。 $r_{leo}$  為低軌衛星向量； $\eta m_s$  為 S 到 LEO 的向量，垂直於地球球殼； $\lambda$  表示緯度。

## 9.2 tipstrip 程式說明

本程式讀取 TIP 原始資料 (tipBin)、摘錄檔 (extract.txt) 和量測資訊檔 (tipmeasures.csv)，並輸出 .data、.echo、.head、.info、.tail、.wrn 共 6 個資料檔。其中摘錄檔含 tipstrip 程式要剖析的 TIP 觀測量的助記符號，共 76 個；量測資訊檔除了 76 個助記符號之外，也包含相應的說明、次系統名稱、檔案類別等資訊。<sup>\*</sup> 叫用的函式說明如下：

`parse_command_line`：剖析執行時所輸入的參數，TIP 原始資料即在此輸入。

`get_extracted_mnemonics`：讀入摘錄檔，取出檔中所有的助記符號。

`get_measures`：讀入量測資訊檔，取出檔中所有資訊。

`match_measures_mnemonics`：比對摘錄檔和量測資訊檔，確定前者完全包含於後者。

`get_extracted_format`：根據量測資訊檔中所記載的檔案類別及其資料格式，決定輸出的純文字資料串的格式。

`make_indices_array`：建立 1 個索引陣列，記錄 8 個子幅的索引值。TIP 原始資料通常由數萬幅資料所組成。每一幅可分為 8 個子幅，代碼分別是 TI、FC、FD、F1、F5、F6、F7、PS。<sup>†</sup> 其中 TI、FC、FD、F1 和 PS 分別代表 header、command echo、science data、informational SOH 和 trailer，即 .head、.echo、.data、.info 和 .tail。F5、

<sup>\*</sup> 參見 Budzien et al. [2006]第 31 頁。

<sup>†</sup> 參見 Budzien et al. [2006]第 29 頁。

F6、F7 分別代表 external memory dump、internal memory dump 和 code dump，而且每幅之中只會出現一種。有時資料中斷，會造成子幅不連續。因此這個索引陣列即記錄每個子幅在原始資料中的位置，便於索引。

`stripper`：實際取出 TIP 原始資料中的所有資料，並依上述資訊，分別存入 `.head`、`.echo`、`.data`、`.info` 和 `.tail`。

### 9.3 verniermet 程式說明

本程式讀取時間資料檔 (`timedata.nml`) 以及標頭檔中的 TIP 時間和 GPS 時間，使之同步計算衛星航行時間，並輸出至時間資訊檔 (`.time`) 和 `segments` 檔。根據 NRL 的說法，TIP 儀器內部有一個 24-bit 的計數器，自 TIP 儀器開機的瞬間歸零，然後開始以每 0.2844xxx 秒的時間，累加 1 個 tick (換言之，每秒會累進 3 至 4 個 tick) [Budzien, 2007]。因為它和時間成近似正比的關係，所以這個計數器也可視為一個碼錶。因為碼錶是以石英鐘計時，所以可能會受溫度影響，而產生時間誤差。xxx 即表示其時間誤差。其比值的平均值在本程式中稱為 mean slope，用來換算近似的時間值。

Budzien et al. [2006] 第 30 頁說明：每一幅 TIP 原始資料最後會被 SSR/PC 自動蓋上一個 24-bit 的時間戳記 (但有時會漏蓋時戳或蓋錯時戳，原因不明)。NRL 表示：該時間戳記只能以整數形式記錄，因此小數的部分不是捨去，就是進位。換言之，時間戳記在此時已失去了原本的精度。因為碼錶每 0.2844 秒左右才進 1，而 TIP 又以每 5.67 秒的間隔時間，把每一幅資料送給 SSR/PC 蓋時戳，因此在折衝換算之下，SSR/PC 真正蓋上的，是一個最近的整數 GPS 時間。兩相鄰時戳的差值，有時是 5，有時是 6。本程式的目的就將一組連續的時間數據，以平均和內插的方式，找回較精準的衛星航行時間。叫用的函式說明如下。

注意本程式只針對合理的時間做修正，至於 SSR/PC 未蓋或蓋錯時戳，則需留到下一程式才補正。

`parse_command_line`：剖析執行時所輸入的參數，時間資料檔即在此輸入。

`load_csv_file`：讀入 CSV 格式資料。在本程式中，用來讀入 `.head` 檔。

`linecount`：計算 CSV 資料的行數。在本程式中，用來計算 `.head` 檔的行數。

`get_column_names`：讀取 CSV 資料中，每一行的名稱。在本程式中，用來讀取 `.head` 檔中每一行的名稱 (所有名稱均寫在第一列，因此就是讀取第一列的意思)。

`read_csv_column`：讀取 CSV 資料，指定行的資料。在本程式中，用來讀取 `.head` 檔中，助記代碼為 TICKS、TIMESTAMP 以及 UNITNUM 的資料，再放入時間陣列。<sup>\*</sup>其中 UNITNUM 為 TIP 控制電子元件的序號。

`initialize_time_info`：讀入時間資料檔，並將 GPS 起始時間 (即 1980 年 1 月 6 日)、福衛三號發射時間 (即 2006 年 4 月 15 日 01:40:00) 轉成儒略時間，將發射時間轉成 GPS 時間

`estimate_gps_epoch`：取 `tipBin` 檔名時間，估計其 GPS 時間值。因 `tipBin` 檔名只含日期資訊，因此這個 GPS 時間值只是粗估值。

`improve_timestamps_exec`：以此 GPS 時間為參數，修正時間陣列，並輸出一個比較

---

<sup>\*</sup> 助記符號說明見參見 Budzien et al. [2006] 第 31 頁。

準的時間標籤陣列。這是本程式的核心函式，其中採用複雜的修正方式，包括一個 mean slope 的計算，以及經過平均和內插的方式，找回時間的小數部分，並將 mean slope 值輸出至 .segments 檔。注意這個時間標籤並不是 SSR/PC 所蓋的時間戳記，而是經上述處理過的時間。

`write_qualityflags_file`：可另外輸出該時間標籤陣列至 .timeflags 檔（目前並未輸出）。

`array_subarray`：從一陣列中取出部分陣列，再寫入新的陣列。

`arrayminmax`：輸出陣列中的極大值和極小值，及其索引值。因為 24-bit 的碼錶能記錄的時間戳記最大值是  $2^{24}$ ，即 16777216，當此值滿溢時，也會歸零而換算出錯誤的 GPS 時間值。因此找出時間陣列中的極大值，可以用來判斷 GPS 時間值到底有沒有因溢位而被錯記。假如後一筆時間的極大值小於前一筆，就知道 GPS 時間值需要累積，才能找回正確的時間。

`gpscumulative2met`：將累積後的 GPS 時間轉成衛星航行時間

`write_results_file`：將 GPS 時間標籤和衛星航行時間輸出至 .time 檔。

## 9.4 metassign 程式說明

本程式依序讀取先前產生的 .segments 檔以及 .head、.echo、.data、.info、tail 檔。依 .segments 檔內的时间資訊（即助記符號為 SLOPE、TICKOFFSET、TIMEOFFSET 的資料），內插後 5 個檔內的时间戳記為 GPS 時間標籤，再將結果輸出至新的標頭檔 (.head2)、科學資料檔 (.data2)、SOH 資訊檔 (.info2)、尾檔 (.tail2) 和 .echo2 檔。新檔中包含舊檔所有資訊（MET 資料除外），以及內插而得的时间標籤。叫用的函式如下：

`parse_command_line`：剖析執行時所輸入的參數，.head 檔和时间資訊檔 (timedata.nml) 即在此輸入。

`colcount`：計算檔案中，指定列的行數。

`get_column_names`：讀取 CSV 資料中，每一行的名稱。在本程式中，用來讀取 .segments 檔中每一行的名稱。

`read_csv_column`：讀取 CSV 資料，指定行的資料。在本程式中，用來讀取 .segments 檔中，助記符號為 SEGMENT、IMIN、IMAX、TICKSMIN、TICKSMAX、TIMESTMPMIN、TIMESTMPMAX、SLOPE、TICKOFFSET，以及 TIMEOFFSET 的資料，再放入各別的陣列中。

`initialize_time_info`：同前。

`estimate_gps_epoch`：同前。

`erase_csv_column`：移除陣列中，指定的一行資料，以避免輸出至檔案。在本程式中，要移除的是讀取自 .head 檔的陣列中的 MET 資料。因為內插後的时间標籤會被寫入 .head2 檔中，因此 .head2 檔不再需要 MET 資料。故叫用本函式，移除 MET 資料，以避免輸出至 .head2 檔中。

`correct_rollovers`：[TBD]

## 9.5 product1 程式說明

本程式讀取科學資料檔 (.data2)、標頭檔 (.head2)、尾檔 (.tail2)、時間檔 (.time)，以及校正參數檔 (tipCal) 以計算並輸出輻射資料檔 (.rad1)。輻射資料 (助記符號是 RADIANCE) 是依上述(9.1)式計算而得的。檔中亦包含資料品質指數 (助記符號是 QUALFLAG)。其定義見上述。叫用的函式如下：

`parse_command_line`：剖析執行時所輸入的參數。 .head 檔名和 tipCal 檔名即在此輸入。注意 product1 程式只讀 .head 檔名，並不讀其內容。因為一個 tipBin 檔所衍生的資料檔的主檔名皆相同，所以藉由一個 .head 檔的主檔名就可找到相應的其他檔案，例如 .data2、.head2、.tail2 等。

`read_tail_arrays`：讀 .tail2 檔，並輸出助記符號為 UNITNUM 和 TICKS 的資料。

`load_calibration_info`：開啟並讀取 tipCal 檔。

`read_data_arrays`：讀 .data2 檔，並輸出助記符號為 TICKS、COUNTS、MOTPOS、MOTATPOS、SCICMPLT 的資料。

`read_head_arrays`：讀 .head2 檔，並輸出助記符號為 TICKS、TFILTH、SCIPER 的資料。

`read_time_arrays`：讀 .time 檔，並輸出助記符號為 TICKS 和 MET 的資料。

`write_results_file`：輸出 .rad1 檔，內含先前讀入的 UNITNUM、TICKS、MOTPOS 資料，再計算並輸出 MET、RADIANCE 和 QUALFLAG 資料。其中 RADIANCE 來自上述的(9.1)式，但若無法成功計算敏感度，則令敏感度為 1。

## 9.6 參考文獻

Budzien, S., et al., 2006: TIP Command and Telemetry Manual, April 12, 2006.

Budzien, S., 2007: (私人聯絡).

COSMIC Project Office, 2005?: Algorithms for processing level1a Tiny Ionospheric Photometer data into level1b radiances, <http://tacc.cwb.gov.tw/cdaac/doc/documents/tip.pdf>.



## 10. 附錄一 建立掩星事件表

掩星事件表是一種清單，記錄掩星事件發生的後設資料，以提供大氣、電離層反演程序之必要資訊。CDAAC 程式在 LEO POD 程序之後，大氣和電離層反演程序之前，建立掩星事件表（檔案類別為 occTab），進而產生大氣掩星物件 atmObj，以及電離層掩星物件 ionObj，分別供大氣、電離層反演程序使用。

TACC 即時和後處理程序建立掩星事件表的流程大同小異。差異的部分會在文中特別指出。本程序輸入和輸出的檔案類別如表 10.A。詳細說明如下。

表 10.A：掩星表處理程序的輸出入檔案類別。

主程式名	輸入檔案類別	輸出檔案類別	說明
createOccTableGaps.pl	opnGps、leoOrb、iguOrb（即時）、igsOrb 或 codOrb（後處理）	occTab	建立掩星事件表
createAtmOccObjs.pl	doleo0、occTab	atmObj	輸出大氣掩星物件
createIonOccObjs.pl	doleo0、occTab、leoAtt	ionObj	輸出電離層掩星物件

### 10.1 計算掩星事件表

首先建立通用的掩星事件表（簡稱通用掩星表）。通用掩星表是根據 GPS 和低軌衛星與地球的幾何關係所建立起來的。表中記錄該時間區間，所有可能發生的掩星事件。假設 GPS 電波訊號沿直線傳播，且定義大氣掩星切點離地球參考橢球面的距離，最高為 150 公里；最低-150 公里。電離層掩星切點的距離，定義最低為 150 公里，最高為低軌衛星的高度。依此假設，將可能發生的掩星事件分成大氣掩星和電離層掩星。因為不考慮衛星天線的視野，所以除了視野內會發生的掩星事件之外，通用掩星表也包括了視野外，會發生但看不到的掩星事件。因此必須配合實際觀測資料（opnGps），才能從表中篩選出實際發生的掩星事件。

不直接以 opnGps 建立掩星事件的原因是，上述的方法能把資料中斷視為同一個掩星事件，而不會變成 2 個或多個不相關連的事件。

在讀入 opnGps 資料後，createOccTableGaps.pl 分析高取樣的大氣掩星觀測資料，以判斷檔中的掩星資料是由哪些被追蹤的 GPS 衛星產生的，並記錄每個掩星事件的起訖時間。由於一個掩星事件可能被分割成兩段，放在前後兩份下載資料中，因此程式也讀入前一筆 opnGps 資料，檢查檔中是否有連續追蹤的前段資料。若有，則記錄為 early occ。接著，找出每個掩星事件中最佳的參考 GPS 衛星，供一次差程序用。最佳的參考衛星依下列 5 個準則來挑選：

- (1) 在掩星期間之中，若只有一顆參考衛星，則選之
- (2) 若有多於一顆參考衛星，則選擇掩星期間中，追蹤時間最長者

- (3) 捨棄沒有該衛星軌道資訊的 PRN 編號
- (4) 捨棄以 OCC 天線追蹤的參考衛星
- (5) 優先考慮掩星同側之參考衛星，例如：天線編號 02 的掩星對應天線編號 01 的參考衛星；03 對應 00

此外，還要比對大氣掩星觀測時間與參考觀測觀測時間，取其交集，以篩選出兩者同時觀測的高取樣資料。最後將篩選結果輸出至 `occTab`，即可得到所有適用於一次差超量相位程序的大氣掩星表。

程式也會比較最高點和最低點的掩星觀測時間來區分上升和下降掩星事件。假如最低點的時間早於最高點的時間，則判斷為上升掩星；反之亦然。

注意本節只取用 `opnGps`，但不用 `podGps`，因此在電離層部分，只能輸出其通用掩星表。電離層的篩選工作將等到 10.3 節才進行。

## 10.2 輸出大氣掩星物件

在上一節中，所有適用於一次差超量相位程序的大氣掩星資訊已大致齊備了，因此本節的工作主要是從 `occTab` 逐一取出每個大氣掩星事件的資訊，把它轉成大氣掩星物件。每一個大氣掩星物件其實只是一個小小的「perl 片段」，其中包含大氣反演所需的輸入檔路徑，方便大氣反演程序處理。其中會比較掩星起訖時間，篩選掩星時間長度至少大於 30 秒的物件；小於 30 秒的物件會被捨棄。此外，`early occ` 的紀錄也會從 `occTab` 取得，並繼承下來，而在本節中，將代表同一掩星事件的前後兩半資料檔名並列於同一 perl 片段中。最後將每一個 perl 片段存成每個小檔案，即得 `atmObj`。

## 10.3 輸出電離層掩星物件

本節主要從 `occTab` 中，篩選出實際發生的電離層掩星事件。其篩選原則和大氣掩星類似。`Early occ` 的紀錄也會繼承下來，在本節中，將代表同一掩星事件的前後兩半資料檔名並列於同一 perl 片段中（但直到一次差超量相位程序才處理銜接的問題）。不同的是，篩選電離層掩星事件的工作是根據 `podGps` 而不是 `opnGps`。此外，它並不以最高點和最低點的掩星觀測時間來判斷上升和下降掩星，而是以 `GOX` 天線和姿態（`leoAtt`）來決定。同樣到最後，程式將每一個 perl 片段存成每個小檔案，即得 `ionObj`。

## 11. 附錄二 GPS 導航位元資料處理程序

在大氣反演程序中，有一種重要的工作是藉由 GPS 導航位元資料，移除開迴路資料中的 NDM，以獲得連續的相位。本章即說明如何獲取 GPS 導航位元資料，並產生該程序所需的 gpsBit 資料。

GPS 導航位元資料就是二進制的 GPS 導航訊息（參見曾清涼、儲慶美[1999]）。CDAAC 在全球挑選數個 GPS 地面追蹤站，並搭配特殊的 CDBS 電腦來剖析 GPS 衛星資料流，捕獲 GPS 導航位元資料。後來，CDAAC 發展了一組可模擬 CDBS 電腦部分功能的程式，得以在無 CDBS 電腦的情況下，直接接收並剖析來自 Trimble® NetRS GPS 接收機的資料流，得到同樣的 GPS 導航位元資料。後者雖然不是從 CDBS 電腦取得的，但其結果和前者並沒有差別，因此不管它的來源為何，我們都把這些導航位元資料稱為 CDBS 資料或是 CDBS 檔。而那些提供資料流的 GPS 地面追蹤站，則稱為 Bit Grabber 系統或 Bit Grabber 站。由這些站所構成的網絡稱為 Bit Grabber 網。

一個理想的 Bit Grabber 網必須涵蓋全球，以網羅所有的 GPS 導航訊息，進而解決所有的開迴路資料。TACC/CDAAC 有效的 Bit Grabber 站在 2010 年 11 月有 6 個，已足夠涵蓋全球。<sup>\*</sup>CDAAC 將 Bit Grabber 網收到的 CDBS 檔放在一起，每小時打包並壓縮前一小時的所有 CDBS 檔成為一個 tar 原始檔案集，然後把它的檔案類別指定為 bitArc。因此每一個 bitArc 檔就是一小時份的 CDBS 檔的壓縮檔。經過 getBits.pl 程式的處理，可篩選出與大氣掩星相關的 CDBS 資料，並以資料位元序列的形式存入 gpsBit 檔，供大氣反演程序使用。相關的處理流程見圖 11.A，並分述如下。

### 11.1 rdRT17bits.pl 程式說明

作為一個 internet-domain socket，rdRT17bits.pl 程式透過 TCP/IP，取得遠端 Trimble NetRS GPS 接收機的 RT17 資料流，每當資料量累積到 4096 位元（等於 512 位元組）時，就以 BitsTools 模組篩選出其中的導航位元，存成 CDBS 檔。叫用的模組說明如下：

`BitsTools::new`：建立一個可處理 GPS 導航位元的物件。

`BitsTools::process_bits_buffer`：處理每份 4096 位元大小的暫存資料。根據 RT17 格式，從中篩選出導航位元區塊，再依 GPS 導航訊息格式，將每幅數據拆解成 5 個子幅，每個子幅拆 10 個「字」，每個字長 30 位元。然後叫用 `BitsTools::parity_chk` 函式，對每個字進行同位核對，檢查是否有位元錯誤或遺失。接著計算出第 1 子幅的時間，並叫用 `BitsTools::writeFrame` 函式，按不同的 PRN 編號，將結果輸出至相應的 CDBS 檔。由於 GPS 制定每個字的傳遞時間為 0.02 秒，因此每幅數據需耗時 30 秒才能傳完。換言之，每個 CDBS 檔記錄 30 秒的導航位元資訊。同一個 PRN，每 30 秒產出一個 CDBS 檔。有關 RT17 格式，參見 MS Series Operation Manual [2000]。有關 GPS 導航訊息格式及同位核對，參見 Spilker [1995] 以及 Navstar Global Positioning

---

<sup>\*</sup> 實際上有 7 站，但新竹站較不穩定，且其涵蓋範圍和新增的五分山站重疊，因此有效站有 6 個。

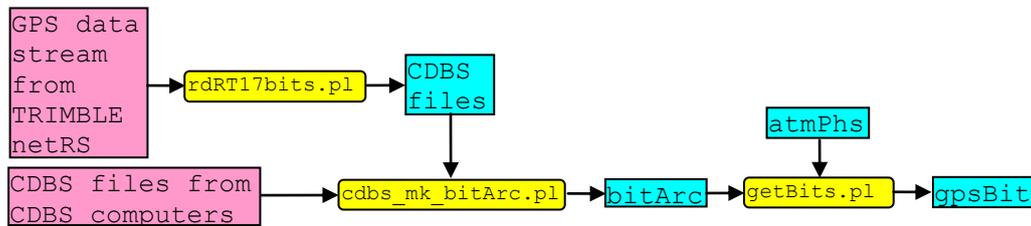


圖 11.A：GPS 導航位元資料處理流程概圖。黃色塊表示 Perl 程式；粉紅色塊表示來自 TACC 以外的資料；淺藍色塊表示由 TACC 產生的資料。

System Interface Specification [2004]。

`BitsTools::parity_chk`：對每字進行同位核對。核對通過後輸出 1；否則為 0。

`BitsTools::writeFrame`：將每幅數據、同位核對結果及其第 1 子幅的時間等資料，寫入一個 CDBS 檔。

## 11.2 `cdbs_mk_bitArc.pl` 程式說明

本程式將每一小時份的 CDBS 檔打包並壓縮成一個 `bitArc` 檔。

## 11.3 `getBits.pl` 程式說明

本程式從 `atmPhs` 檔取出大氣掩星事件的起訖時間，搜尋這個時間區間中所有的 `bitArc` 檔，將其解壓縮，放入暫存目錄，再叫用 `cdbs_dump.pl` 程式，從中篩選出相關的資料位元序列及同位核對值，存入 `gpsBit` 檔。叫用的程式說明如下：

`cdbs_dump.pl`：根據 PRN 編號、大氣掩星事件的起訖時間等資訊，在暫存目錄中找到起訖時間之間的所有 CDBS 檔，讀取每個子幅中的每個位元，逐一輸出，同時輸出相應子幅的同位核對值。\*

## 11.4 參考文獻

MS Series Operation Manual, 2000: Trimble Navigation Ltd., Part Number 40868-00, Rev. A., USA.

Navstar Global Positioning System Interface Specification, 2004: IS-GPS-200D, *Navstar GPS Space Segment/Navigation User Interfaces*, ARINC Engineering Services, LLC., USA.

Spilker, J. J., 1995: GPS navigation data, in *Global Positioning System: Theory and Applications*, v. 1, edited by B. W. Parkinson and J. J. Spilker, ISBN 156347106-X.

曾清涼、儲慶美, 1999：GPS 衛星測量原理與應用，第二版，國立成功大學衛星資訊研究中心，臺南

\* 與前面不同的是，雖然每個字都有相對應的同位核對值，但在此輸出的數值卻是相應「子幅」的同位核對值，而不是相應「字」的同位核對值。只有當子幅中的 10 個字皆通過同位核對，該子幅的同位核對值才是 1；反之，10 字中有任一字無法通過同位核對，該子幅的同位核對值即為 0。

## 12. 附錄三 中英對照

---

(IGS) 快報資料	(IGS) Rapid data
(IGS) 速報資料	(IGS) Ultra-rapid data
(IGS) 最終資料、最終坐標、最終精密星曆	(IGS) Final data, final coordinate, final ephemeris
CCSDS 同步碼	CCSDS sync bytes
COSMIC 資料分析與儲存中心	COSMIC Data Analysis and Archive Center; CDAAC
COSMIC 資料位元串流器	COSMIC data bit streamer; CDBS
GPS 掩星實驗	GPS Occultation Experiment; GOX
ITOD 框架	Inertial true-of-date frame; ITOD frame
ITOE 坐標系	Inertial true-of-epoch coordinate system; ITOE coordinate system
LL 框架	Local level frame; LL frame
Perl 片段	Perl snippet
PP 檔頭	Packet primary header
SSR/PC 分包號碼	SSR/PC frame counter
tar 原始檔案集；tar 檔	Tarball
TEC 弧	TEC arc
TIP 控制電子元件	TIP Control Electronics; TICE
一次差	Single difference
一維變分	One-dimensional variational; 1D-VAR
二次差	Double difference
三次曲線回歸	cubic spline regression
上升／下降（掩星）	Rising/setting (occultation)
下載序號	Dump ID
大地水準面	Geoid
子幅	Subrame
子類別	Subtype
小型電離層光測器	Tiny Ionosphere Photometer; TIP

---

---

互補誤差函數	Complementary error function
內插補點	Interpolation
分包 (用於資料剖析法)	Frame
分段式立方貝索函數	Piecewise cubic Bessel function
反愚	Anti-spoofing; AS
反演	Inversion
天底	Nadir
天頂	Zenith
天頂靜水延遲量	Zenith hydrostatic delay
天線軸	Boresight; B/S
太陽能板傳動角	Solar array drive angle
尺標高	Scale height
加權均方根	Weighted root-mean-square; weighted RMS
卡方值	Chi-square
司乃耳	Snell
四元數	Quaternion
正則變換法	Canonical transform method; CT
正演	Forward
任務介面單元	Mission Interface Unit; MIU
任務代碼	Mission ID
先驗標準差	A priori sigmas
全波段頻譜反演法	Full spectrum inversion; FSI
全電子含量	Total electron content; TEC
同位核對	Parity check
地心地固坐標系	Earth Centered Earth Fixed coordinate system; ECEF
地球慣性坐標系	Earth Centered Inertial coordinate system; ECI
多重移動之多項式回歸法	multiple sliding polynomial regression
多值函數	Multi-valued function
多路徑	Multipath
字 (GPS 導航相關)	Word

---

---

曲線	Spline
伴隨運算子	Adjoint operator
低軌	Low Earth orbit; LEO
助記符號	Mnemonics
均方根差	Root-mean-square difference; RMS difference
局部球中心	local center of sphericity
局部球對稱	Local spherical symmetry
快視	Quick look
折射氣候學	Refractivity climatology
亞衛星點	Sub-satellite point
周波未定值	(Phase) ambiguity
周波脫落	Cycle slip
固態硬碟／酬載電腦	Solid state recorder/Payload computer; SSR/PC
法方程	Normal equation; NEQ
物件	Object
空位元組	Null byte
近即時	Near real time
垂直延遲量	Zenith total delay; ZTD
後設資料	Metadata
後擬合	Post-fit
恆星時	Sidereal time
扁率	Oblateness
星曆	Ephemeris
映射函數	Mapping function
相位中心校正	Phase center offset
相徑	Phase path
相量	Phasor
美國大學大氣研究聯盟	University Corporation for Atmospheric Research; UCAR
美國海洋大氣總署	National Oceanic and Atmospheric Administration; NOAA

---

---

美國海軍研究實驗室	Navy Research Laboratory; NRL
美國國家氣象中心	National Meteorological Center; NMC
美國國家環境預報中心	National Centers for Environmental Prediction; NCEP
計算域	Computational domain
降頻轉換	Downconversion
倒遞法	Back propagation method; BP
剖線	Profile
剝洋蔥法	Onion peeling method
射距離	Impact parameter
時間標籤	Time tag
時間戳記；時戳	Timestamp
時錶偏差值	Clock bias
校正之掩星全電子含量；校正 TEC	Calibrated occultation total electron content; calibrated TEC
格點	Grid
框架（用於測量學）	Frame
航天器	Spacecraft; S/C
訊噪比	Signal-to-noise ratio; SNR
追蹤誤差	Tracking error
閃爍（現象）	Scintillation
偏折角	Bending angle
健康狀態	State of health; SOH
動態精密點位置	Kinematic precise point position
參考連線	Reference link
國際 GNSS 服務網	International GNSS Service; IGS
堆疊	Stack
密切軌道元素	Osculating elements
掩星	Radio occultation; RO
掩星側	Occultation side
掩星連線	Occultation link

---

---

敏感度	Sensitivity factor
異常值	Outlier
移動中位數平均	running median average
移動平均	running average
符號鏈結	Symbolic link
累積時間（用於 TIP 觀測）	Science integration period
都卜勒頻移	Doppler frequency shift
單點定位近似法	Point positioning approach
單點精密定位	Precise point positioning; PPP
場型	(Field) pattern
幅（用於 TIP 觀測）	Frame
幾何光學法	Geometric optics; GO
最小平方	Least square
殘差	Residual
減動力逼近法	Reduced-dynamic approach
測量值誤差向量	Innovation vector
無幾何距離之線性組合	Geometry-free linear combination
無電離層	Quasi Ionosphere-Free; QIF
程序控制檔	Process Control File; PCF
絕對全電子含量	Absolute total electron content; aTEC
虛擬速度猜值	Pseudo-stochastic velocity pulses
虛擬距離	Pseudorange
虛擬隨機雜訊碼	Pseudorandom noise; PRN
視野	Field of view; FOV
超折射	Super refraction
超量相位	Excess phase
超量都卜勒頻移	Excess Doppler frequency shift
開迴路	Open loop; OL
傳送分包	Xfer-frame
極化效應	Polarization effect

---

---

準度	Accuracy
準校正法	Quasi-calibration
溢位	Overflow
滑動中位數濾波	sliding median filtering
滑動頻譜法	Sliding spectral method; SS
資料流	Data stream
資料纏繞	Data wrapping
零次差	Zero difference
電子密度	Electron density
電波全像術	Radio holography; RH
電碼偏差之雙頻差分值	Differential code bias; DCB
電離層峰	Ionospheric peak
截止仰角	cutoff elevation angle
精度	Precision
精密定軌	Precise orbit determination; POD
臺灣資料分析中心	Taiwan Analysis Center for COSMIC; TACC
輔助側	Auxiliary side
價值函數	Cost function
增量	Increment
增量法	Incremental formulation
寬巷雜訊	Wide-lane noise
模式化的觀測量	Modeled observation
模式態	Model state
歐洲中範圍氣象預報中心	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts; ECMWF
歐洲氣象衛星開發組織	European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites; EUMETSAT
熱雜訊	Thermal noise
衛星航行時間	Mission elapsed time; MET
儒略時間	Julian time

---

---

導航位元	Navigation bit
導航資料調制	Navigation data modulation; NDM
擬合	Fitting
檔尾	Trailer
檔頭	Header
環球太空網路公司	Universal Space Network, Inc.; USN
臨界（電漿）頻率	Critical frequency
臨邊	Limb
鎖相迴路	Phase locked loop
觀測時刻	Epoch

---