

# GPS/MET 掩星觀測大氣剖面之研究

劉說安 黃成勇

中央大學太空科學所暨太空遙測中心

中壢市五權里 38 號 32054

Tel: 03-4227151 轉 7631 Fax: 03-4254908 Email: yueian@csrsr.ncu.edu.tw

## 摘 要

掩星法最初被天文學家所使用，來觀測太陽系地球以外行星之大氣組成分子，其原理乃植基於 Snell's law，即電磁波穿過有折射率梯度的介質時會產生偏折。近年來同樣的原理被應用來觀測地球大氣壓力和溫度的剖面，即利用 GPS(Global Positioning System)衛星發出的訊號，在穿過大氣層到達低軌道衛星的過程中，訊號被偏折的角度，來反演出大氣的折射率。

本文將要應用我們開發的掩星求解模式，來處理 GPS/MET 資料、估計大氣溫度和壓力剖面。首先，由經過偏折的 GPS/MET 訊號來計算都卜勒平移量，再利用低頻濾波器來降低雜訊的影響，緊接著估算出訊號的偏折角度，再由偏折角反演出大氣的折射率，最後經由積分估得大氣的溫度和壓力剖面。

## 一、緒論

掩星法原為天文學家用來觀測太陽系地球以外行星大氣層結構的方法(Phinney and Anderson, 1967)，近年來則被使用來觀測地球大氣層及電離層結構。在1995年美國發射一顆低軌道衛星(Microlab 1)，其軌道高度為750公里，傾斜角為70度，繞行地球一週約100分鐘。低軌道衛星接收來自太空中24顆GPS衛星訊號，每天約可接收500筆的演星資料，因其取樣時間頻繁，在一百四十公里以下其解析度距離小於一公里，且不受陸地或海洋的限制，更不受各種天候的限制(Feng and Herman, 1999)，可對全球做觀測，因此對全球大氣溫度的監測及變化能夠提供相當多的資訊(Ware et al. 1996)。

在國外，目前有一些關於掩星法的研究，但目前觀測較精確的仍侷限於地表七公里至四十公里之處。如Feng and Herman(1999)的文章，利用掩星法求得該區域內的溫度其誤差在2度以內。反演出的溫度誤差在二度以內。Ware et al.(1996)也證明利用演星法反掩得到大氣層頂的高度相當正確，且大氣層頂的溫度誤差僅為0.5度，隨高度加高溫度誤差會變大，但到40公里處溫度誤差則增加到兩度左右。

## 二、掩星法反演大氣參數原理

訊號在穿過電離層和大氣層時，傳播介質會造成訊號傳播速度的遲延，此外，介質本身不同的折射梯度也會造成訊號在傳播路徑上的偏折。GPS/MET即利用這個原理，以低軌道衛星接收GPS衛星所發射的訊號，量測GPS訊號的Doppler平移量與低軌道衛星與GPS衛星徑向的Doppler平移量差值，計算訊號在介質傳播時被偏折的角度。圖一，為GPS/MET原理的簡單示意圖。向量 $\vec{e}$ 為GPS衛星到低軌道衛星的單位方向向量， $\vec{e}_g$ 為訊號自GPS衛星傳播的方向， $\vec{e}_i$ 為GPS訊號被接收到的方向， $\vec{e}_g$ 和 $\vec{e}_i$ 兩個向量的夾角即為訊號的偏折角。圖上的a稱為切點半徑(impact distance)，其大小為GPS訊號自GPS衛星發送時的方向延長線與地心的垂直距離，或是低軌道衛星接收到訊號方向延長線與地心的距離。通常我們在反演大氣層折射係數時，假設大氣層的折射係數呈球狀分布，且GPS衛星與低軌道衛星所處位置得折射係數為1，所以此處我們假設GPS衛星和低軌道衛星的衛星和低軌道衛星的切點半徑相同(Feng and Herman, 1999)。都卜勒效應可用下式表示(Fjeldbo, 1971)：

$$\Delta f = \frac{f}{c} [(\vec{v}_g \cdot \vec{e}_g - \vec{v}_i \cdot \vec{e}_i) - (\vec{v}_g \cdot \vec{e} - \vec{v}_i \cdot \vec{e})] \quad (1)$$

$\Delta f$  為都卜勒效應訊號頻率的改變量，上式中括號內的第一個小括號為訊號傳播路徑的都卜勒效應，第二個小括號為GPS衛星與低軌道衛星徑向距離的都卜勒效應。從以上量測到的都卜勒效應與切點半徑的幾何相關我們可求出訊號傳播的偏折角。

對於球形對稱的大氣層而言，大氣的折射參數  $n(a_0)$  可經由Abel方程式(Phinney and Anderson, 1968) 求得：

$$n(a_0) = \exp\left\{\frac{1}{\pi} \int_{a_0}^{\infty} \frac{\alpha(a) da}{\sqrt{a^2 - a_0^2}}\right\} \quad (2)$$

式中  $a_0 = n(a_0) \times r_0 = n(r_0) \times r_0$ ，此處  $r_0$  為訊號傳播路徑距離地心最近點的距離， $\alpha(a)$  為在不同切點半徑的偏折角度。經由上式我們即可求出距離地心  $r_0$  位置的折射率。

折射率的大小與介質的特性息息相關，當波的頻率小於20GHz(Feng and Benjamin, 1999)的時候，大氣層的折射率可用氣體溫度  $T$ (degrees Kelvin)，乾空氣壓力  $P_d$ (Kpa)，以及濕氣壓  $e$ (Kpa)表示如下(Liebe, 1989)：

$$(n-1) \times 10^6 = 2.558 P_d \times (300/T) + [41.63 \times (300/T) + 2.39] \times e \times (300/T) \quad (3)$$

此外，我們定義大氣折射參數為

$$N = (n-1) \times 10^6 \quad (4)$$

此大氣折射參數亦可寫成(Smith and Weintraub, 1953)：

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

此式中， $P$ (mb)為大氣總壓， $e$ (mb)為水氣壓力。在反演大氣參數時，我們通常忽略濕氣壓的影響，另外依理想大氣條件  $P = \rho RT/M$ ，我們可將式(5)改寫成下式：

$$N = 77.6 \frac{P}{T} = 77.6 \frac{\rho R}{M} \quad (6)$$

其中， $\rho$  為氣體的密度， $M$  為氣體莫爾分子重， $R$  為氣體常數。由式(6)再結合靜力方程  $dP = -g\rho dz$ ，可得到壓力剖面為

$$P(z) = \int g(z') \rho(z') dz' \quad (7)$$

$$= \frac{1}{R \times 77.6} \int g(z') N(z') dz'$$

而乾溫度剖面為

$$T(z) = 77.6 \times \frac{P(z)}{N(z)} \quad (8)$$

$$= \frac{1}{R} \times \frac{\int g(z') N(z') dz'}{N(z)}$$

上式中所求出的溫度之所以被稱為乾溫度乃是因為在我們反演壓力和溫度剖面時，忽略了濕氣壓，所以在靠近地表水氣含量較大的區域，溫度會有較大的誤差。

### 三、資料處理步驟與成果

這個部分我們將介紹由低軌道衛星所接收到GPS衛星訊號(L1=1575.42MHz, L2=1227.6MHz)，反演成大氣折射係數，壓力和乾溫度的過程。其反演主要的步驟如下：

1. 由低軌道衛星所收到的訊號計算都卜勒效應
2. 訊號平滑
3. 由都卜勒效應計算訊號切點半徑和偏折角
4. 電離層效應校正

5. 反演大氣折射係數剖面
  6. 反演大氣壓力及乾溫度剖面
- 茲將上述各步驟詳述如下：

#### 1. 由低軌道衛星所收到的訊號計算都卜勒效應

GPS/MET實驗中所收到的資料為兩個載波L1(1575.42MHz)及L2(1227.60MHz)的載波相位 $\phi(t)$ ，其資料取樣時間為每秒50筆。訊號在GPS和低軌道衛星傳播實際路徑的都卜勒效應為  $f_d = (\Delta\phi)/(\Delta t)$ ，經由兩載波L1和L2的觀測，我們可得到兩個隨時間變化的都卜勒效應。在我們處理的過程中，發現L1和L2載波觀測到的結果會受到雜訊的影響，圖二，為低軌道衛星觀測資料所轉換的都卜勒平移量隨時間的變化圖，在圖上60秒之後其所受到的雜訊比之前觀測到的結果大很多，經我們驗證的結果，從60秒到76秒之間為距地表十公里到地表四十公里的區域。尤其在L2載波，其所受到的雜訊比L1大很多，一般認為，此現象能為在此區域，大氣折射係數的水平梯度及垂直折射梯度的不規則變化所造成。因此在反演大氣參數之前，我們需先將都卜勒的訊號做平滑的處理。

#### 2. 訊號平滑

我們所使用的資料平滑方法為矩陣濾波法(matrix method), (Feng and Herman, 1999)。其數學式如下：

$$\bar{f}_s(t_1, t_2, \dots, t_n) = [\bar{I} + \bar{S}^{-1} \bar{T} \bar{S}]^{-1} \times \bar{f}_a(t_1, t_2, \dots, t_n) \quad (9)$$

其中  $\bar{f}_s$  為濾波後的都卜勒效應， $\bar{f}_a$  為原始的都卜勒效應， $\bar{f}_a$ ， $\bar{f}_s$  皆為隨時間改變的向量序列，其取樣的時間可取全部的觀測資料或取一段間隔時間做處理， $\bar{I}$  為單位矩陣， $\bar{S}$  的形式如下(matrix method), (Feng and Herman, 1999)：

$$\bar{S} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -3 & 3 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -3 & 3 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -3 & 3 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -3 & 3 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & -1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$\Gamma$  為加權矩陣，當雜訊比越大時我們所給予的加權就越大，如圖2，在60秒以後顯然有較大的雜訊比，因此我們在此時間內給予較大的權重比。圖3為都卜勒訊號經過濾波之後的結果，從圖中可看出在60秒之後，訊號已明顯平滑許多。

#### 3. 由都卜勒效應計算訊號切點半徑偏折角

圖一可解釋都卜勒訊號如何反演偏折角的幾何關係， $\alpha_1 + \beta_1$  為訊號傳播的偏折角，式(1)的都卜勒效應可表示成下式：

$$\Delta f + \frac{f}{c}(\bar{v}_s \cdot \bar{e} - \bar{v}_i \cdot \bar{e}) = \frac{f}{c} [v_s' \cos(\alpha_0 + \alpha_1) + v_s' \sin(\alpha_0 + \alpha_1) - v_i' \cos(\beta_0 + \beta_1) + v_i' \sin(\beta_0 + \beta_1)] \quad (11)$$

此外，從圖四可看出切點半徑(a)有以下的幾何關係：

$$r_s \sin(\alpha_0 + \alpha_1) = r_i \sin(\beta_0 + \beta_1) \quad (12)$$

由量測得到的都卜勒平移量，和以知的衛星位置和衛星速度，經由式(11)和式(12)我們即可求出訊號的偏折角。圖五為由都卜勒平移量反算訊號偏移角結果，

#### 4. 電離層效應校正

訊號傳播路徑上的介質，大致可分成電離層及大氣層部分，因我們的工作主要在反演大氣參數，因此必須對電離層對訊號造成的偏折角加以校正。在電離層中，訊號的折射係數(n)為路徑上的電子濃度與訊號頻率相關，其關係式如下：

$$n = (1 - \frac{40.3 \times n_e}{f^2}) \quad (13)$$

式(13)中， $n_e$ 為電子濃度， $f$ 為訊號的頻率。依Vorob'es and Krasil'nikova(1993)所提出的方法，電離層所造成的偏折角可經由下式消除大部分的電離層所造成的偏折角：

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

式中 $\alpha(a)$ 為經過電離層校正後，在切點半徑為 $a$ 時的偏折角， $f_1, f_2$ 為GPS訊號L1和L2的載波頻率， $\alpha_1(a), \alpha_2(a)$ 為L1和L2在切點半徑為相同值時的偏折角。在圖六中，我們比較了由相同時間對電離層做校正和相同的切點半徑對電離層效應做校正對訊號偏折角的影響，從圖上我們可看出在50公里之上，以相同切點半徑所做的電離層效應，有較好的結果，而在50公里以下，兩個方法則無明顯的差別。

#### 5. 反演大氣折射係數剖面

計算大氣折射係數，我們可由步驟4求出隨切點半徑而改變的偏折角度經式(2)Abel equation積分求出大氣折射係數。因為積分高度的限制我們可將式(2)，改寫如下(Feng and Herman, 1999)：

$$n(a_0) = \exp\left\{\frac{1}{\pi} \int_{a_0}^{a_{\max}} \frac{\alpha(a) da}{\sqrt{a^2 - a_0^2}}\right\} \times \exp\left\{\frac{1}{\pi} \int_{a_0}^{\infty} \frac{\alpha(a) da}{\sqrt{a^2 - a_0^2}}\right\} \quad (15)$$

參考文獻：

1. Feng, Derek D. and Herman, M., 1999: Remote Sensing the Earth's Atmosphere Using the Global positioning System(GPS)— The GPS/MET Data Analysis, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. V.16 n.8 pt.0 pp.989-1002.
2. Fjeldbo, G., and A.J. Kliore, and V. R. Eshleman, 1971: The neutral Atmosphere of Venus as studied with the

式(15)中，我們選擇 $a_{\max}=90$ 公里為積分的最高點，而在90公里以上，因偏折角趨近於零，且90公里以上，大氣非常稀薄，大氣折射係數可當成1，因此式(15)式中，乘號右側的自然指數可當成1。另外，在圖七中，短折線可以看出在低於10公里的高度，偏折角與切點半徑並不是平滑的變動，因此在處理10公里以下的高度，我們先將隨時間變化的切點半徑做平滑的處理，在反演大氣折射係數。圖八，為我們反演出的大氣折射係數，在圖上可看出大約在17公里處，曲線有一些(不平滑)，此處為大氣層對流層頂。

#### 6. 反演大氣壓力和溫度剖面

在經過上述步驟，求出大氣折射參數之後，我們即可利用式(7)和式(8)反演大氣壓力剖面和乾溫度剖面，圖九圖十分別為反演出的壓力和溫度剖面圖，從圖上可看出在壓力方面，所反演出結果與ECMWF和NMC所觀測的結果相當吻合，而在溫度方面，高度10公里到40公里之間，反演的結果和ECMWF和NCEP所觀測結果亦相當吻合，但是在40公里以上則有相當大的震盪，而在10公里以下的區域，因為忽略了水氣壓的影響，因此所反演的溫度會低於測量的結果。

#### 四、結論

據我們反演的結果，掩星法在觀測大氣層高度四十公里以下，十公里以上的高度，其壓力和溫度都相當準確，對對流層頂的高度觀測也相當正確。在四十公里以上的高空，則溫度會有相當大的抖動現象，而在十公里以下，因為忽略了大氣層水氣壓的影響，所以所反演出來的溫度會低於ECMWF和NCEP的結果。另外，在40公里以下，我們總共約有2000筆的掩星觀測資料，顯然比其他方法更能掌握大氣垂直溫度變化情形。

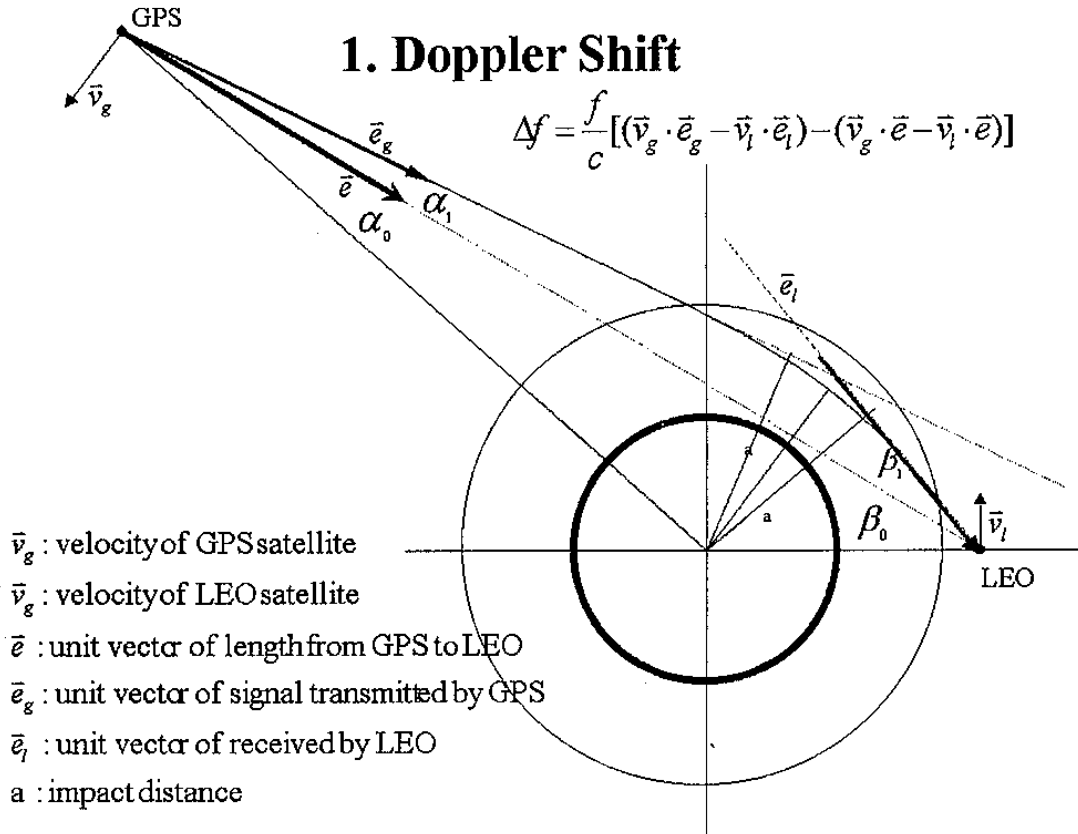
掩星法目前已能充分掌握大氣10公里到40公里的垂直溫度和壓力變化，未來加入適當的大氣模式，及加入地表的GPS觀測，即可做大氣層三維的觀測和分析。因GPS接收器價格不貴且裝設方便，且可做高解析的觀測，相信可以提供更多的水氣資訊，來改進數值氣象預報模式。

mariner V radio occultation experiments.

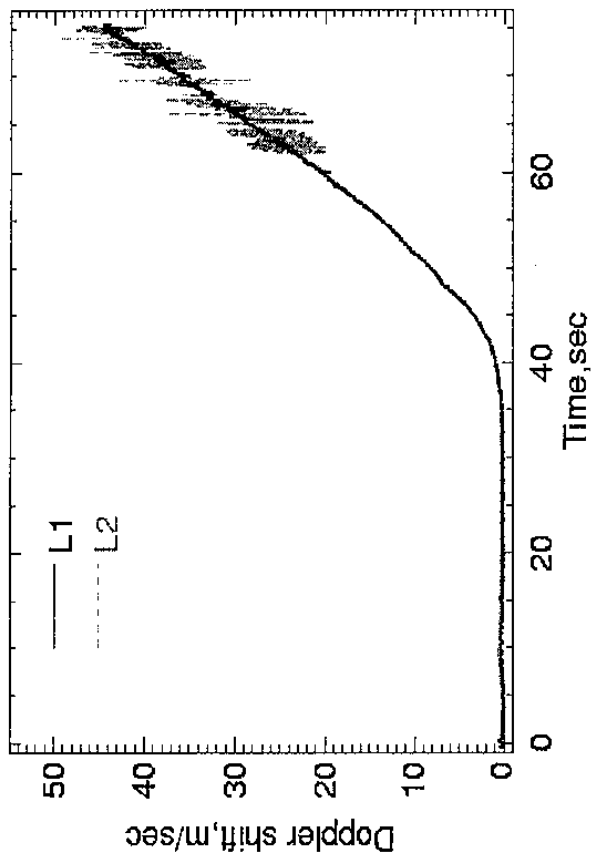
Astronomical. Journal, 76, 123-140

3. Liebe, H. J., 1989: MPM-An atmospheric millimeter-wave propagation model. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 10, 631-650.

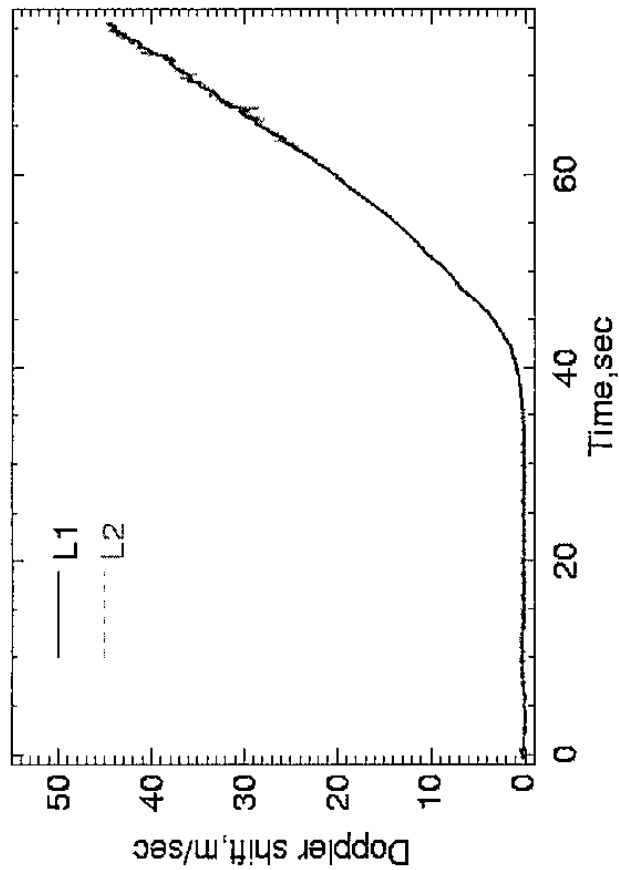
4. Smith, E. K., and S. Weintraub, 1953: The constants in the equation for atmospheric refractive index at radio frequencies. Proc. IRE, 41, 1035-1037.
5. Ware R., M. Exner, D. Feng, M. Gorbunov, K. Hardy, B. Herman, Y. Kuo, T. Meehan, W. Melbourne, C. Rocken, W. Schreiner, S. Sokolovskiy, F. Solheim, X. Zou, R. Anthes, S. Businger, and K. Trenberth, 1996: GPS Sounding of the Atmosphere from Low Earth Orbit: Preliminary Results. Bulletin of the American Meteorological Society. 77,19-40.
6. Vorob'ev, V.V., and T.G. Krasil'nikova, 1993: Estimation of the accuracy of the atmospheric refractive index recovery from Doppler shift measurements at frequencies used in the NAVSTAR system. Phys. Atmos. Ocean, 29,602-609.



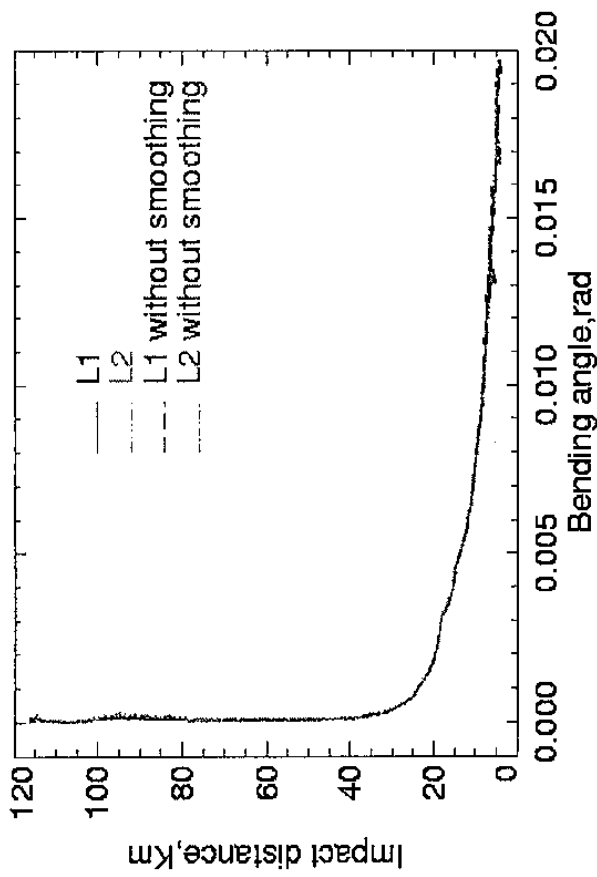
圖一、GPS/MET 原理示意圖



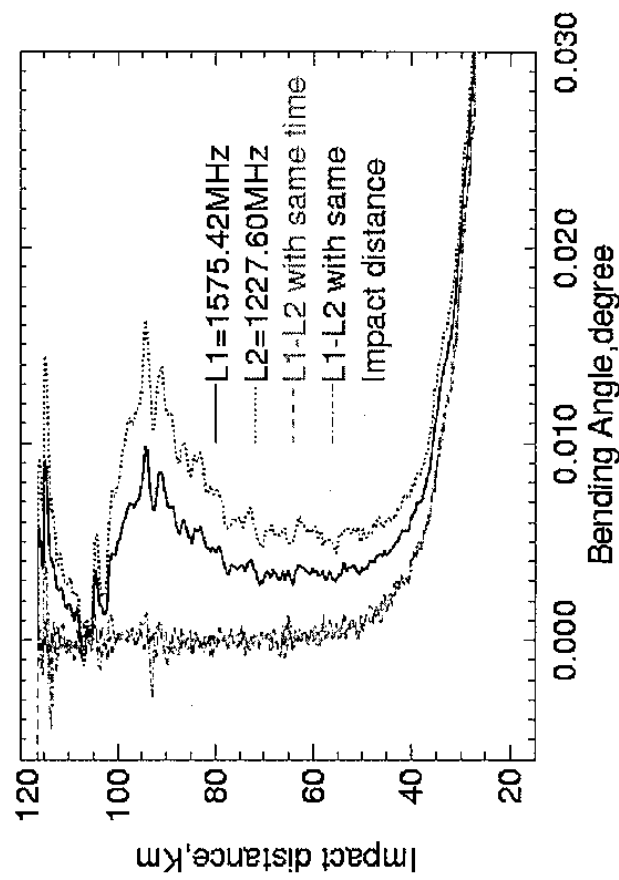
圖二、原始觀測之都普勒訊號



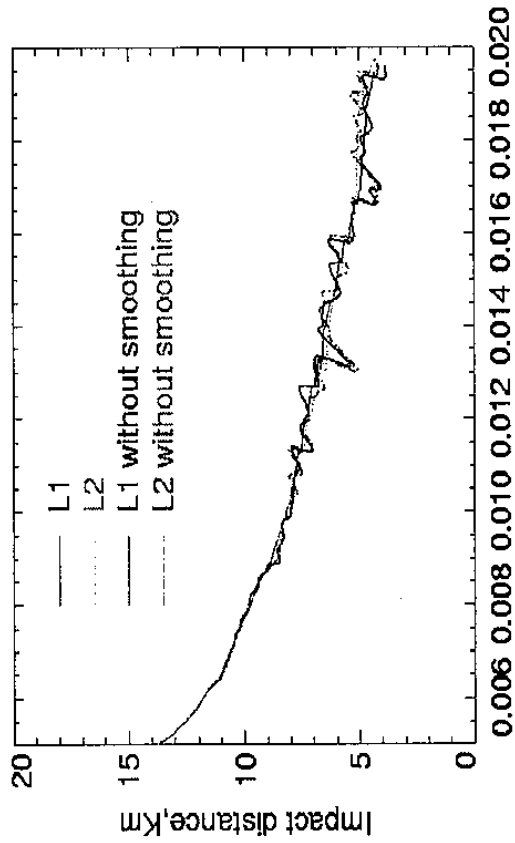
圖三、經矩陣濾波後之都卜勒訊號



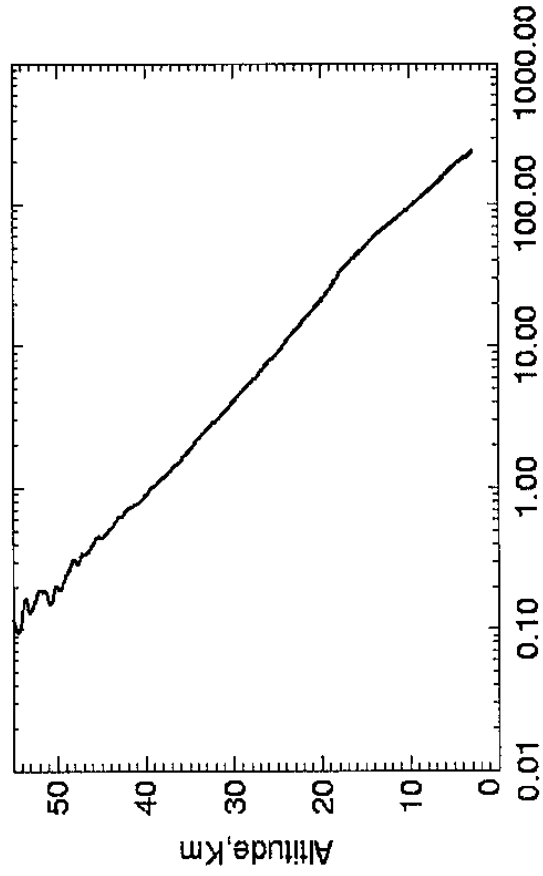
圖四、切點半徑與偏折角估關係圖



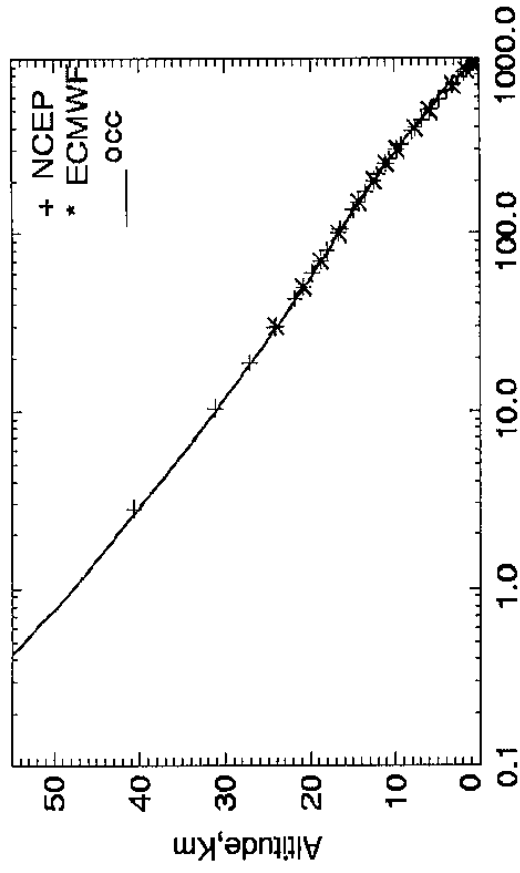
圖五、校正電離層效應後切點半徑與偏折角估關係圖



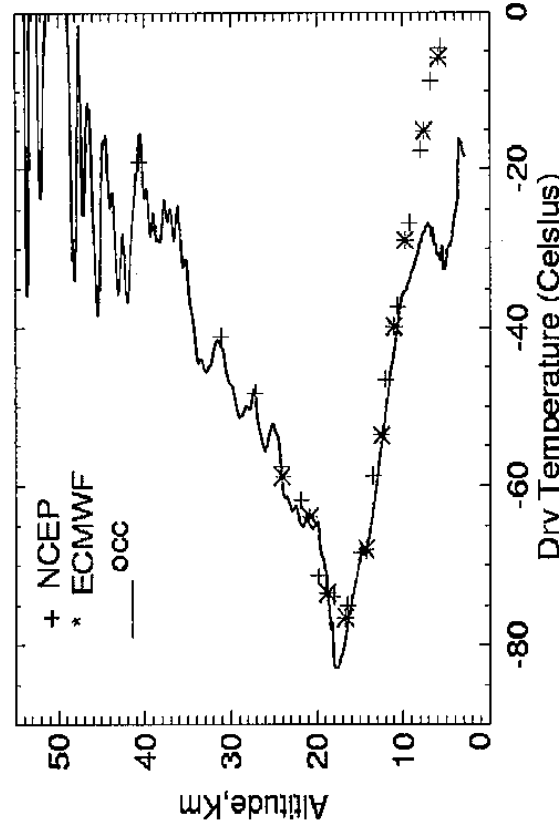
圖六、對流層偏折角與平滑後偏折角比較圖



圖七、演星法反演之大氣折射率剖面圖



圖八、演星反演與 NCEP, ECMWF 之壓力比較圖



圖九、演星反演與 NCEP, ECMWF 之乾溫度比較圖