

## 繞極衛星之軌道預報及其應用

*Orbital Prediction of Polar Orbiting Satellite  
and Its Applications*

劉 文 俊 沈 秀 蓉

Wen-Jiunn Liou

Hsiu-Jung Shen

## 摘 要

本文在衛星軌道爲一大圓及地球爲一完全球體的假設下，建立一軌道座標系統，輸入少數的軌道參數，例如昇交點的位置和時間，即可計算出通過地面接收站任一時刻衛星的方位角及仰角。亦可求得衛星輻射儀任一瞬間視場 (Instantaneous Field of View) 的位置，藉以製作每日通過地面接收站接收範圍的軌道預報。在應用上除了地面接收站的實際作業外，對於想利用衛星資料，例如 AVHRR 和 TOVS，的研究人員亦將有所助益。

## ABSTRACT

It is very important to determine the position of polar orbiting satellite data when one attempts to make those data useful. Unfortunately, it seems impossible to figure out the position of data without more detail satellite orbital information. Using limited orbital parameters to get the position information is the purpose of this paper.

A technique for the prediction of location of satellite data as a function of time after ascending node was developed from consideration of circular orbit and spherical earth.

## 一、前 言

自1960年第一顆氣象衛星發射以後，人們企圖利用衛星資料來彌補傳統觀測資料之不足尤其在廣大的洋面上更是如此。而在利用衛星資料之前，必先了解其所代表的位置才有意義。對地面接收站而言，如何預先知道衛星通過接收範圍時的方位角及仰角，以便於天線的追蹤，也是相當重要的。

由於控制衛星運行的因素相當複雜，如何利用最簡單易懂且節省電腦時間的方法，輸入衛星在昇交點的位置和時間，找出接收時間內的衛星位置和輻射儀每一觀測點的位置是本文的主題。

本文首先描述衛星位置與掃描角的關係。然後，以球面三角公式爲基礎，在假定地球爲不動之完全球體及衛星軌道爲一大圓的狀況下，建立一軌道座標系統，找出地理座標與軌道座標系統之關係。再考慮地球自轉的影響、衛星輻射儀轉速及衛星速度，再作修正。在應用上，除了繪製接收天線追

踪圖外，並可完成極高解像輻射儀 (Advanced Very High Resolution Radiometer, AVHRR) 掃描的影像定位工作。

## 二、原理與計算方法

(一)軌道氣象衛星位置與掃描線的關係

圖一爲軌道衛星位置、衛星直下點 (Sub-satellite Point, SSP) 與衛星掃描點 (View Point, VP) 的關係。由圖可知

$$\sin \epsilon = \frac{R+H}{R} \sin \eta \quad (1)$$

$$\epsilon = \eta + \psi \quad (2)$$

$$\sin \epsilon = \frac{R+H}{S} \sin \psi \quad (3)$$

$$\sin \eta = \frac{R}{S} \sin \psi \quad (4)$$

$$S^2 = R^2 + (R+H)^2 - 2R(R+H)\cos\psi \quad (5)$$

式中， $\eta$ ：衛星掃描角 (Nadir Angle)

$\epsilon$ ：天頂角 (Zenith Angle)

$\psi$ : 地心角 (Geocentric Angle)

R: 地球半徑

H: 衛星高度

S: 衛星與掃描點間的距離

因地球半徑和衛星高度為已知，所以若掃描角  $\eta$  或天頂角  $\epsilon$  已知，則由式(1)(2)可求得地心角  $\psi$ ，反之若  $\psi$  已知，則可由式(3)~(5)求得  $\eta$  與  $\epsilon$ 。

(c) 建立軌道座標系統

在討論座標系統之前，必須先對球面三角之關係有所認識。設 A、B、C 為球面上任意三點如圖二所示，a、b、c 分別為三點所夾的弧角， $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  則為各弧所夾之角度。由立體幾何之關係知：

$$\sin a \sin \beta = \sin b \sin \alpha \quad (6)$$

$$\cos a = \cos b \cos c + \sin b \sin c \cos \alpha \quad (7)$$

$$\cos b \sin c = \sin a \cos \beta + \sin b \cos c \cos \alpha \quad (8)$$

為了方便，假設地球為一不旋轉之完全球體，衛星軌道為一大圓 (Great Circle)。參照地理座標系統建立一個以衛星軌道在地球表面之軌跡 (Suborbital Track) 為赤道，以通過升交點之大圓為經度之起點，往西為正之軌道座標系統。參考圖三所示。圖中  $\tau$ 、 $\psi$  為軌道座標的經緯度。 $\lambda$ 、 $\phi$  為地理座標的經緯度。 $i$  為軌道面傾斜角。有關軌道衛星的軌道基本參數，如表一所示。

表一、TIROS-N 系列軌道衛星的軌道基本參數

衛星	軌道平均高度 (km)	軌道面傾斜角 (°)	昇交點週期 (min)	每次昇交點西移度數	每日的軌道數
TIROS-N 系列衛星	833	98.739	101.88	25.40	14.18
	870	98.899	106.37	25.59	14.07

考慮衛星掃描點、地理北極與軌道北極所圍成的球面三角形，由式(6)~(8)可得：

$$\cos \tau = \frac{\cos \phi \cos (\Lambda - \frac{360^\circ t}{P_E})}{\sqrt{1 - (\cos i \sin \phi - \sin i \cos \phi \sin (\Lambda - \frac{360^\circ t}{P_E}))^2}} \quad (11)$$

由  $(\psi, \tau)$  求  $(\phi, \lambda)$  時  $t$  為已知，所以很容易得到  $(\phi, \Lambda)$ 。但由  $(\phi, \Lambda)$  求  $(\psi, \tau)$  時，因  $t$  為未知數，無法直接代公式求  $(\psi, \tau)$ 。可將  $t$  值以一猜測值代入(11)式求得  $\tau$ ，再代回式(12)

$$\cos \tau = \cos \frac{360^\circ t}{P} \quad (12)$$

其中，P 為衛星軌道周期。得一新的  $t$  值，再將此值代回(11)式求  $\tau$ 。如此反覆求解，大約四次即可得到一近似解  $(\psi, \tau)$ 。

$$\begin{cases} \sin \phi = \cos i \sin \psi + \sin i \cos \psi \cos \tau' \\ \cos \lambda' = \frac{\sin i \sin \psi - \cos i \cos \psi \cos \tau'}{\cos \phi} \quad (9) \\ \sin \lambda' = \frac{\cos \psi \sin \tau'}{\cos \phi} \\ \sin \psi = \cos i \sin \phi + \sin i \cos \phi \cos \lambda' \\ \cos \tau' = \frac{\sin i \sin \phi - \cos i \cos \phi \cos \lambda'}{\cos \psi} \quad (10) \\ \sin \tau' = \frac{\cos \phi \sin \lambda'}{\cos \psi} \end{cases}$$

式中， $(\lambda, \phi)$ ：掃描點相對於升交點在地理座標的經緯度

$(\tau, \psi)$ ：掃描點相對於升交點在軌道座標的經緯度

$i$ ：軌道面傾斜角

其中  $\tau' = 90^\circ - \tau$ ， $\lambda' = \lambda + 90^\circ$ 。

若掃描點在軌道座標的經緯度  $(\tau, \psi)$  為已知，則由式(9)可求得在地理座標的經緯度  $(\lambda, \phi)$ 。反之，若  $(\lambda, \phi)$  已知，則可由式(10)得  $(\tau, \psi)$ 。

圖三為衛星北上 (Northbound) 的情形，此時  $-90^\circ \leq \tau \leq 90^\circ$ ；當衛星南下時，由圖四知  $\tau$ ， $\lambda$  與其內角  $\tau'$  和  $\lambda'$  的關係，公式(9)(10)仍可適用。(b) 考慮地球自轉的影響

地球自轉對地理座標系統位置之影響只是經度的增減而已。所以實際上相對於升交點的經度  $\Lambda$  為

$$\Lambda = \lambda + \frac{360^\circ t}{P_E}$$

式中， $\lambda$ ：相對於升交點所在的地理經度

$t$ ：衛星通過升交點到達衛星直下點的時間

$P_E$ ：地球自轉週期

反之，若已知  $(\Lambda, \phi)$  求  $(\tau, \psi)$  時， $\lambda$  應改為

$$\lambda = \Lambda - \frac{360^\circ t}{P_E}$$

代入公式(11)，得

四、測站追蹤天線方位角與仰角的求取

設測站為A，衛星直下點為B，北極為C，圍成一球面三角形，AB弧所夾之地心角為 $\psi$ ，測站的地理經緯度分別為 $\lambda_s$ 和 $\phi_s$ ，而衛星直下點的地理經緯度分別為 $\lambda$ 和 $\phi$ ，則 $\alpha$ 即為方位角， $\gamma = \lambda - \lambda_s = \lambda'$ ， $a = 90^\circ - \phi$ ， $b = 90^\circ - \phi_s$ ， $c = \psi$ ，代入(7)式得

$$\sin \phi = \sin \phi_s \cos \psi + \cos \phi_s \sin \psi \cos \alpha \quad (13)$$

其中， $-90^\circ < \phi < 90^\circ$ 。設仰角為 $\theta$ ，圖一中衛星掃描點視為測站，由式(1)(2)知

$$\psi = \epsilon - \eta$$

$$= 90^\circ - \theta - \sin^{-1}(R \cos \theta / (R + H)) \quad (14)$$

由式(8)可以推知  $\sin a \sin \gamma = \sin c \sin \alpha$  亦可成立。故

$$\sin \lambda' = \frac{\sin \psi \sin \alpha}{\cos \phi} \quad (15)$$

由式(8)知

$$\sin c \cos \alpha = \cos a \sin b - \sin a \cos b \cos \lambda$$

故

$$\cos \lambda' = \frac{\sin \phi \cos \phi_s - \sin \psi \cos \alpha}{\cos \phi \sin \phi_s} \quad (16)$$

若已知衛星直下點在軌道座標的經緯度，由式(9)可求得在地理座標的經緯度 $(\lambda, \phi)$ 代入式(13)~(16)可求出測站天線接收時的方位角 $\alpha$ 及仰角 $\theta$ 。

三、結果與應用

(一)衛星的軌道預報

以測站天線對衛星的仰角 $\theta \geq 0^\circ$ 為可接收範圍，由美國國家氣象通信中心(KWBC)廣播的TBUS軌道參數，推算出每次衛星通過赤道的昇交點及時間，利用上述的方法，計算出每次衛星通

過測站接收範圍內，衛星直下點的經緯位置及方位角、仰角。圖五為1983年12月26日NOAA-7軌道衛星，通過臺北衛星資料接收站的軌道預報圖。圖中，粗實線箭頭為衛星直下點軌跡；×為自接收開始每隔二分鐘的位置；以臺北為中心的同心圓為接收天線仰角；以臺北為中心的細實線為接收天線的方位角。由圖可知12月26日NOAA-7衛星可接收到兩次訊號，軌道號碼為12931及12932，兩次軌跡皆為北上訊號。昇交點時間分別為06:02:56.072 Z及07:44:54.477 Z，昇交點東經分別為140.059°及114.566°。訊號接收開始時間分別為06:03:43.108 Z及07:44:11.697 Z，接收終了時間分別為06:18:16.019 Z及07:58:45.574 Z。

(二)衛星影像的定位

TIROS-N系列軌道衛星的極高解像輻射儀(AVHRR)掃描特性如表二。從太空掃向太陽，每一掃描線有2048個瞬間視場(IFOV)，由每一瞬間視場的位置；可算出輻射儀的掃描角 $\eta$ 及地心角 $\psi$ ，再由衛星上送出之實際掃描線時間與昇交點的時間差為 $\tau$ 。將此 $(\psi, \tau)$ 代入(9)式，加上地球自轉的影響，即可求得每一瞬間視場的地理經緯度，配合實際雲圖大小，即可由電腦繪圖繪出影像中的經緯線及海岸線。圖六即是一例，該圖為NOAA-7軌道衛星所攝，掃描時間由1983年12月26日07:47:15 Z至07:54:57.664 Z，昇交點為東經114.566度。圖六(a)為未經定位未作曲率校正第一頻道之雲圖；圖六(b)為與(a)相同之雲圖，加入影像定位；圖六(c)為經曲率校正第一頻道之定位雲圖。圖七為1983年12月26日06 Z同步氣象衛星GMS拍攝之可見光雲圖。

表二、極高解像輻射儀(AVHRR)的掃描特性

掃描 儀器名稱	頻道 數目	掃描 角度	掃描時間	掃描點	掃描角	掃描時間	視角
			掃描線	掃描線	掃描點間	掃描點	掃描點
AVHRR	可見光1 近紅外線1 紅外線3	±55.4°	1/4秒	2048	0.054°	0.0000819 秒	1.9 × 10 <sup>-3</sup> π

(三)衛星掃描範圍與接收天線方位角和仰角追蹤圖的繪製

由接收開始至終了時間與昇交點時間的差為 $\tau$ ，代入(9)式，可繪出掃描範圍。再利用(13)(14)得 $\phi$ 值，代入(15)(16)得 $\lambda$ 值，若將 $\alpha$ 值固定，而 $\theta$ 由5°開始增加；或將 $\theta$ 值固定，而只變動 $\alpha$ 值均可得多組的

$(\lambda, \phi)$ 值。將其投影在地圖上即如圖八所示。圖中所示粗黑線即為圖六所在的位置。由圖可容易的看出掃描範圍的位置及相對於測站的方位，在衛星訊號未到達之前，就可參考此圖，知道其掃描範圍，參照早先同步衛星所拍攝的雲圖，判斷是否有必要把此訊號儲存起來，以備其他處理研究之用。

#### 四、結 語

本文假設衛星軌道爲一大圓，實際上衛星軌道的偏心率，不論是 NOAA-7或 NOAA-8均小於 0.01，也極爲接近。故利用本文所提出之方法做出之衛星軌道預報，應用於影像資料的定位，將有助於衛星資料的利用。本文僅對 AVHRR 資料作定位，若以同樣的原理方法，將也可對軌道衛星另一掃描系統 TOVS (TIROS Operational Vertical Sounder) 中的 HIRS/2、SSU 及 MSU 每一掃描點作定位工作，爲以後海面溫度及垂直溫濕度剖面的求取鋪路。

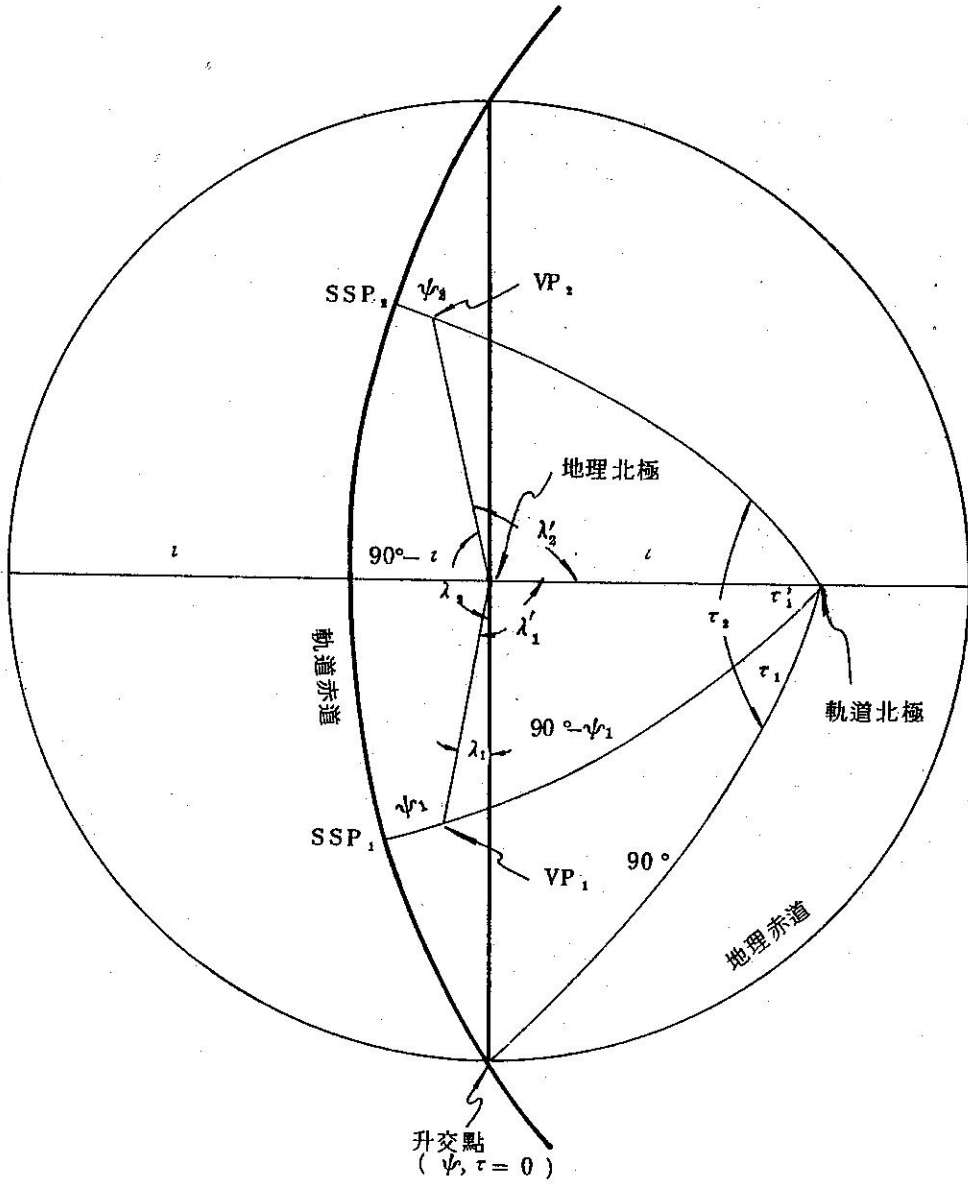
#### 誌 謝

感謝中央氣象局衛星站顏課長泰崇的支持，林章台和唐維新同仁的製作圖表，僅此致由衷謝忱。

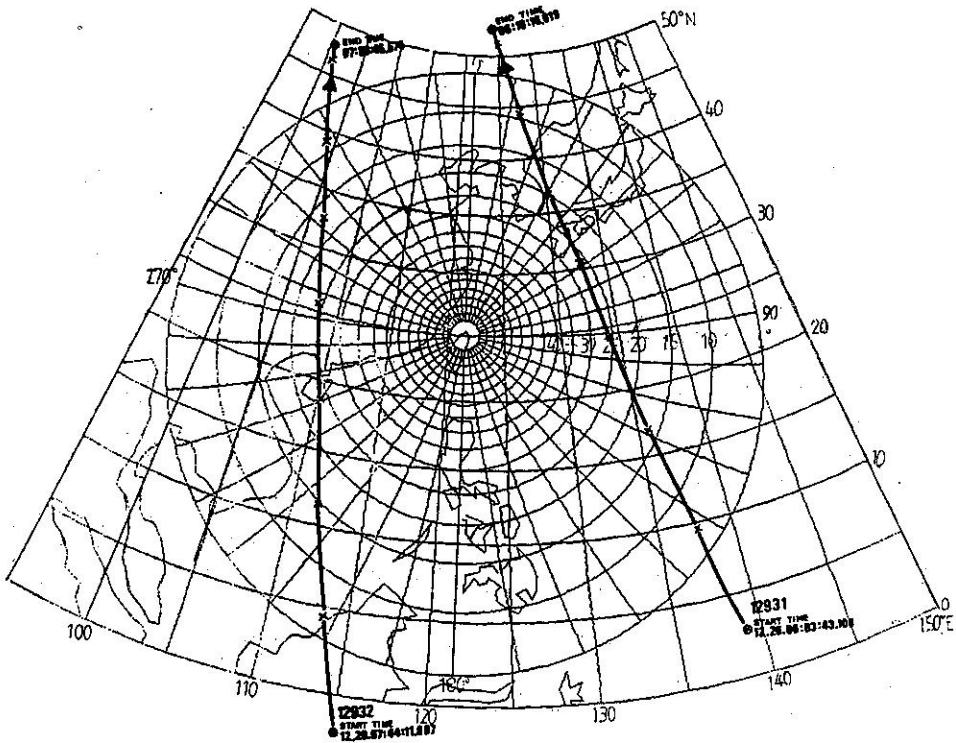
#### 參 考 文 獻

- 曾忠一：大氣輻射（文化大學講義，未發表）
- Barnes, J. C., & M. D. Smallwood, 1982: TIROS-N series direct readout services users guide, Washington, D. C.
- Lauritson Levin, G. J. Nelson & F. W. Porto, 1979: Data extraction and calibration of TIROS-N/NOAA radiometers, NOAA Tech. Men. NESS 107pp, Washington, D. C.
- Ruff, I. S., & Arnold Gruher, 1975: Graphical relations between a satellite and a point viewed perpendicular to the satellite velocity vector (side scan), NOAA Tech. Men. NESS 65pp, Washington, D. C.





圖四 軌道座標之經緯度與其內角之關係



圖五 1983年12月26日NOAA-7軌道衛星通過地面接收站的軌道預報圖



圖六 (a)

1983年12月26日7時Z NOAA-7 AVHRR  
第一頻道未經定位未作曲率校正之雲圖

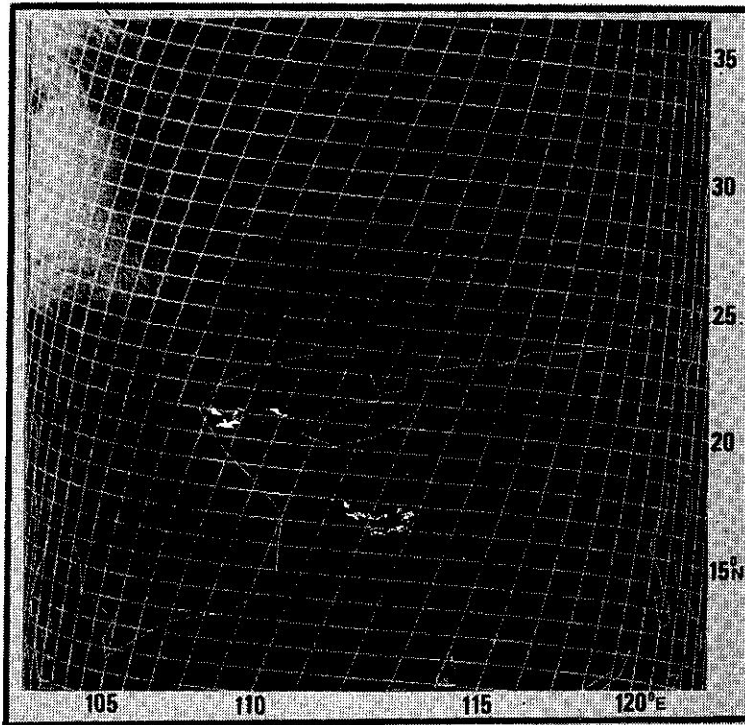


圖 六 (b) 1983年12月26日 7時Z NOAA-7 AVHRR  
第一頻道 未作曲率校正之定位雲圖

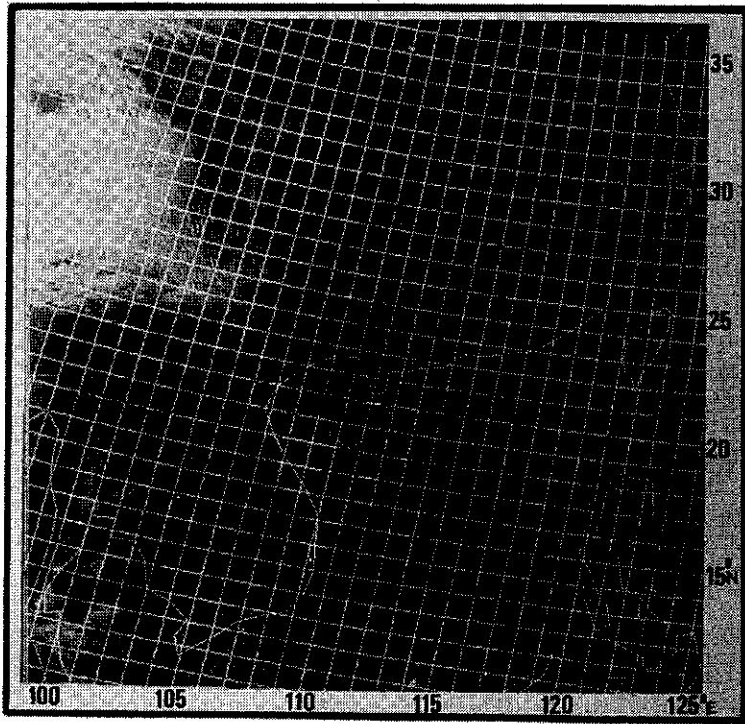
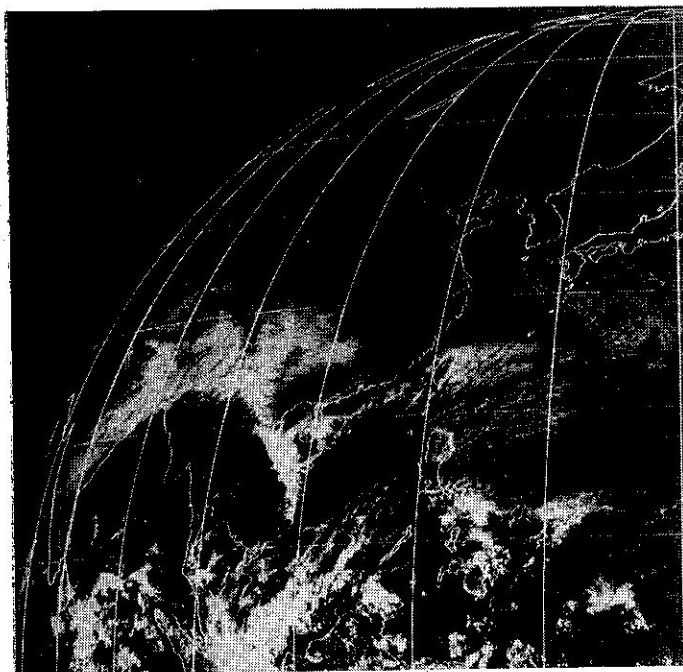
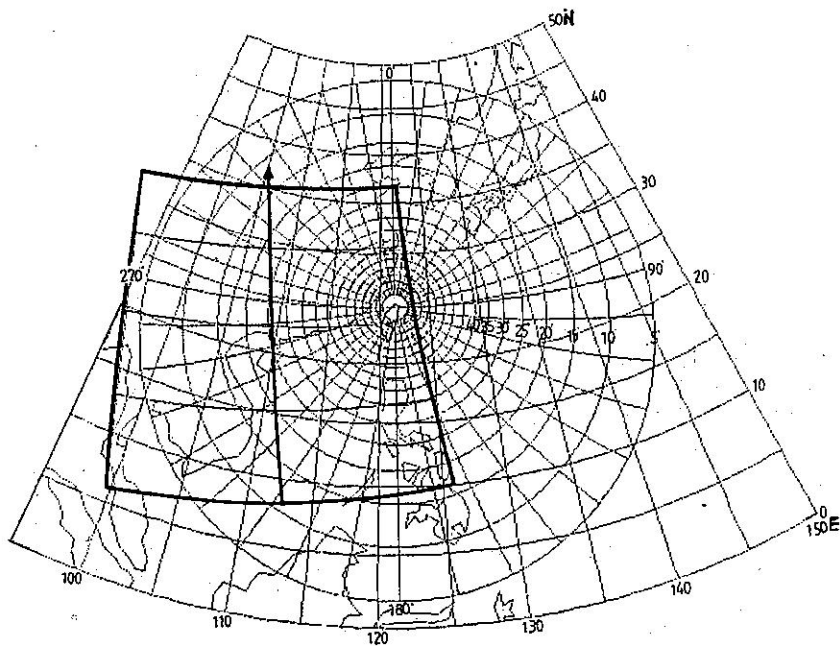


圖 六 (c) 1983年12月26日 7時Z NOAA-7 AVHRR  
第一頻道 已作曲率校正之定位雲圖





圖七 1983年12月26日 GMS 可見光雲圖



圖八 掃描範圍天線追蹤圖，其中黑實線所圍成的區域即為圖六之雲圖範圍