

雷達數位化資料客觀分析

蘇良石

中正理工學院應用物理系

(中華民國七十七年八月二十二日收稿；十二月十四日定稿)

摘 要

利用雙線性內插法將雷達觀測資料自球座標轉換至直角座標網格上時，常導致一些異常的回波圖形產生。特別是當不連續之回波界面存在時此現象最為顯着。此乃由於雷達觀測資料的解析度並非均勻使然，尤其是方位角和仰角解析度會隨探測的距離增遠而變差，以致無法將降水分佈的實際情形完全顯示出來。

本文以模擬之雷達回波資料，分別經採用零階及一階內插方法並選取三種不同的影響半徑進行實驗，俾便探討異常圖形產生的原因及其影響，繼而尋求消除該項缺失的可行途徑。

為了便於將分析結果與回波模型比較，又將分析資料經修勻後繪成垂直剖面圖；結果顯示，欲使波長等於兩倍資料平均間距之觀測資料場，經一階內插至網格點後之最終反應函數值為 e^{-1} ，則最佳影響半徑應選取為資料平均間距的 2.4 倍。同時亦發現，資料若使用三維的內插法，要比僅在特定層中作二維內插所獲之結果為佳。

關鍵詞：雷達、客觀分析。

一、前言

從事中小尺度劇烈天氣現象研究，除了傳統的一般地面及高空觀測設備所提供的資料外，氣象雷達和衛星的觀測資料更是不可或缺。如何有效地整理和運用這些觀測資料是目前應予重視的課題。

通常雷達觀測資料均以球座標表示，當吾人將這些資料轉換至直角座標系而進行分析時，經常面臨的一些問題包括：如何有效處置這些大量的資料、靈敏度與解析度隨觀測距離所產生的變化、三度空間掃描時對時間控制的準確性、原始資料的分佈

情形與解析度的關係，以及所採內插方法是否合宜等諸項問題 (Mohr and Vaughan, 1979; Ruosteenoja and Puhakka, 1984)。本研究即針對雷達觀測時由於原始資料分佈不均勻以及經座標轉換和內插過程所造成的異常圖形予以分析，並探討其產生的原因及影響，繼而謀求消除該項缺失的可行途徑。俾便獲取誤差最小的雷達觀測資料。

二、基本理論

(一)目標物位置的決定

雷達觀測時，目標物 (target) 在直角座標中的位置，可由觀測時的斜距 (slant range) R 、水平距 (horizontal range) D 、方位角 θ 、仰角 ϕ ，以及地球有效半徑 E 換算而得。

$$Z = E \left[1 + \left(\frac{R}{E} \right)^2 + \frac{2R}{E} \sin \phi \right]^{\frac{1}{2}} - E \dots\dots(1)$$

$$D = E \sin^{-1} \left[R \cos \phi / (E + Z) \right] \dots\dots(2)$$

$$x \simeq D \sin \theta \dots\dots(3)$$

$$y \simeq D \cos \theta \dots\dots(4)$$

所謂地球有效半徑 E ，是指地球平均半徑 (含雷達所在地的高度) 的 $4 / 3$ 倍，在此曲面上所見之雷達波即以直線進行。

(二) 目標物在雷達觀測座標中的位置

爲了配合多都普勒雷達資料分析，在設計程式時即針對多都普勒雷達資料處理而設計。設作業雷達觀測之目標物其位置向量爲 \vec{r}_2 ，其與參考雷達所測之位置向量 \vec{r}_1 間的關係爲 (圖 1)

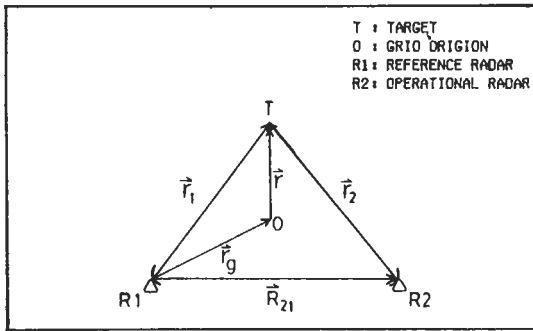


圖 1 目標物在不同座標間的位置關係

$$\vec{r}_1 = \vec{r}_2 + \vec{R}_{21} \dots\dots(5)$$

\vec{R}_{21} 爲觀測雷達相對於參考雷達之位置向量。若欲消除平流誤差 (advection error)， \vec{r}_2 應改以全體掃描 (volume scan) 之觀測中心時刻 t_0 ，所測之位置表示；今以 \vec{r}_2^* 記之。若 \vec{C} 表整個回波系統之平均移速，則

$$\vec{r}_2^* = \vec{r}_2 - \vec{C} \cdot \Delta t \dots\dots(6)$$

(6)式中 Δt 爲觀測時刻 t 落後觀測中心時刻 t_0 之時差 ($\Delta t = t - t_0$)。

經前項修正後(5)式變爲

$$\vec{r}_1 = \vec{r}_2^* + \vec{R}_{21} \dots\dots(7)$$

(三) 觀測座標與網格座標間之轉換

設 \vec{r}_g 爲網格座標原點相對於參考雷達之位置向量，則目標物在網格座標中之位置向量爲

$$\vec{r} = \vec{r}_1 - \vec{r}_g \dots\dots(8)$$

將(7)式代入(8)式後變成

$$\vec{r} = \vec{r}_2^* + \vec{R}_{21} - \vec{r}_g \dots\dots(9)$$

若網格座標之水平軸與東西向有一夾角 (tilt angle) α ，那麼 \vec{r} 在此旋轉後之座標系中之表示即爲

$$\vec{r}' = A \vec{r} \dots\dots(10)$$

(10)式中 A 爲旋轉矩陣； \vec{r} 及 \vec{r}' 均爲行向量

$$A = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}; \\
 \vec{r} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}; \vec{r}' = \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} \dots\dots(11)$$

$\vec{r}' (x', y')$ 即爲目標物在網格座標經修正後之位置向量。

(四) 客觀分析中關於影響半徑的擇取

將觀測資料換算爲網格值，必須採用客觀分析法。分析過程中對影響半徑 R 的選擇，乃取決於資料點的平均間距 d_m 的大小，同時亦受到觀測誤差和資料點分佈均勻與否的影響。Stephens and Stiff (1970) 利用 Cressman 的權重函數進行試驗；發現當觀測資料分佈均勻時， R 的最佳值爲

$$1 < \frac{R}{d_m} < 2 \dots\dots(12)$$

然而，R 值會隨資料點間距的不均勻、觀測誤差的介入以及受資料場的波長變長而增加；因此，不易求出真正的最佳影響半徑。分析雷達觀測資料時，若改用 Barnes (1973) 分析方法，可求出估計 R 的法則，其法如下所述。

將觀測資料場 $f(x, y)$ 內插至網格點後所得分析值場設為 $g_0(i, j)$ ，其間之反應函數 (response function) 記作 $D_0(\lambda)$ ，其關係為

$$g_0(i, j) = f(x, y) D_0(\lambda) \dots\dots\dots(13)$$

其中

$$D_0(\lambda) = e^{-\kappa_0 \left(\frac{\pi}{\lambda}\right)^2} \dots\dots\dots(14)$$

(14) 式中 λ 為波長， κ_0 為決定權重函數的參數。網格分析值 $g_0(i, j)$ 需經下式再作一次修正。

$$g_1(i, j) = g_0(i, j) + [f(x, y) - g_0(x, y)] D_1 \dots\dots\dots(15)$$

式中 $D_1 = e^{-\gamma \kappa_0 \left(\frac{\pi}{\lambda}\right)^2} = D_0^{\gamma}$ ； γ 為加速收斂的參數； $g_0(x, y)$ 則為將網格分析值 $g_0(i, j)$ 利用雙線性內插法，內插至原觀測位置的值。

(15) 式經整理後可改寫作

$$D_1^* = \frac{g_1(i, j)}{f(x, y)} = D_0 + (1 - D_0) D_1 = D_0 (1 + D_0^{\gamma-1} - D_0^{\gamma}) \dots\dots\dots(16)$$

D_1^* 為最終反應函數，它代表網格分析值經再次修正後尚保有原資料特性之比例。

若將(14)式改寫成

$$\kappa_0 = \left(\frac{\lambda}{\pi}\right)^2 [-\ln D_0(\lambda)] \dots\dots\dots(17)$$

(16) 式中若取 $\gamma = 0.3$ ； $\lambda = 2\Delta n$ ， Δn 為觀測資料之間距。

當 $D_1^*(2\Delta n) = e^{-1} = 0.368$ 時， $D_0(2\Delta n)$ 的值即為 0.0301。將之代入(17)式，可得

$$\kappa_0 = 3.503 \left(\frac{2\Delta n}{\pi}\right)^2 \dots\dots\dots(18)$$

因 κ_0 與影響半徑的關係為 $R = (\kappa_0 \epsilon)^{\frac{1}{2}}$ ；將 κ_0 值代入後可得

$$R = (3.503 \epsilon)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{2\Delta n}{\pi}\right) \dots\dots\dots(19)$$

(19) 式中 $\epsilon = \ln\left(\frac{1}{\epsilon}\right)$ ， ϵ 表示在影響半徑之外，

諸觀測資料對網格分析值的影響情形。

若取 $\epsilon = 4$ ，則 $\epsilon = 0.0183$ ，此相當於約有 1.83% 的觀測資料未用來修正網格點的初始值。將 ϵ 值代入(19)式中，最後得到影響半徑與資料平均間距之關係為

$$R \approx 2.4 \Delta n \dots\dots\dots(20)$$

(五) 網格大小的選擇

由於可解析波長的下限等於資料點間距的兩倍。而欲將一波形完整地示出 (包括斜率的變化)，至少須 5 個網格點數，故知網格間距 d 不得大於 $\Delta n / 2$ 。Koch et al (1983) 爲了避免過度場和輻散場產生不穩定現象，曾建議 d 與 Δn 間須滿足下列關係式：

$$\frac{1}{3} < \frac{d}{\Delta n} < \frac{1}{2} \dots\dots\dots(21)$$

(六) CAPPI 上產生異常圖形之原因

受到計算機容量的限制，吾人無法將全體掃描中全部觀測資料，同時地作一次三度空間的客觀分析；而是先將大氣切割成一定厚度之許多薄層，再將每條掃描線上的資料分配至各個薄層中 (圖 2)

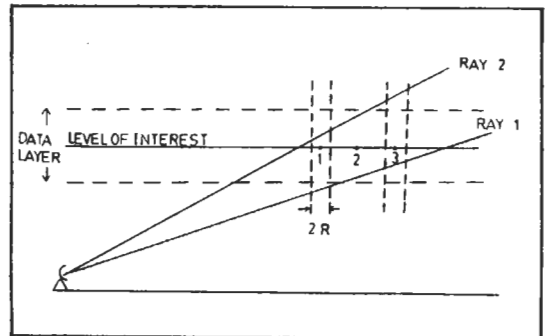
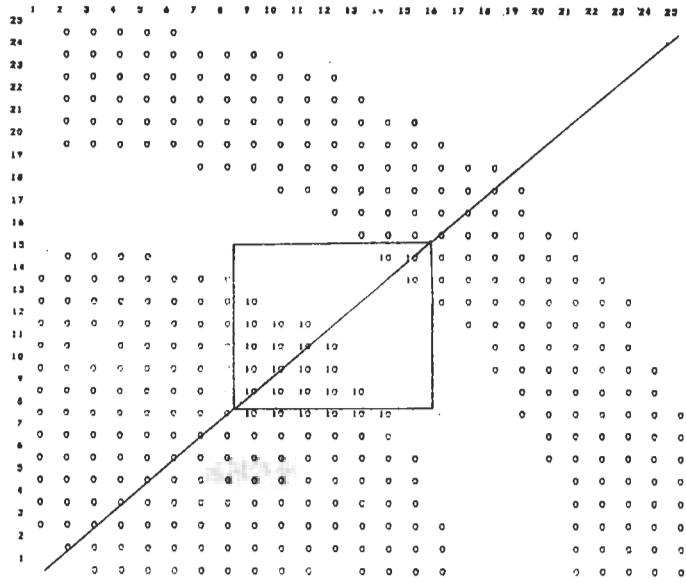


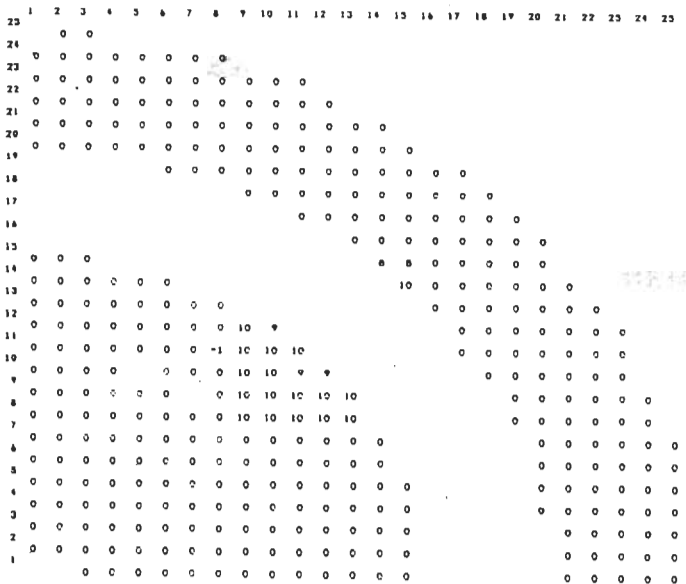
圖 2 雷達掃描資料經內插至定高層中之網格點時，產生異常圖形之示意圖。

•圖 2 中網格點 1 處之分析值是由上層中 ray 2 上的觀測值內插而得；網格點 2 處則得不到分析值；網格點 3 處之分析值卻是取自下層中 ray 1 上的觀測值。由於雷達觀測資料解析度的不均勻，它會隨距離、高度的增遠而變差，致使各定高層 (level

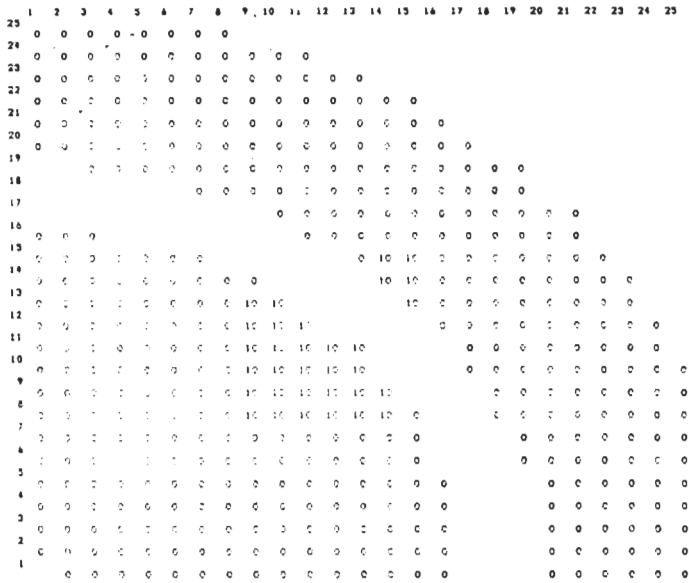
of interest) 上資料點的分佈並非均勻。在某些缺少資料的地區，甚至呈連續的帶狀分佈 (圖 3) 。再者，在低層處，因受地球表面曲度影響，致使雷達無法偵測至最大距離，因而在低定高層上的資料亦顯示其未能涵蓋至最大偵測距離。



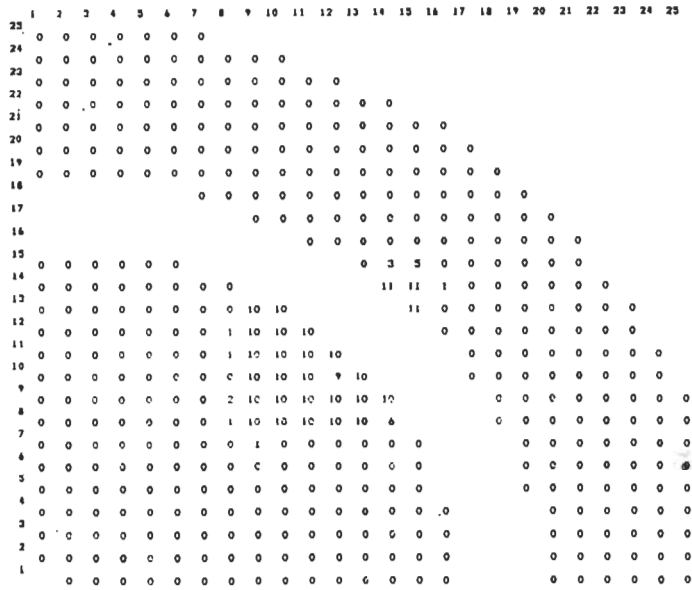
(a)



(b)



(c)



(d)

圖 3 回波強度 (dBz) 在定高層 (3 km) 上之分析結果

(a) 採零階內插; $R=2.5$ km (圖中方塊為回波模型之邊界; 對角線為垂直剖面圖中所選之水平軸)

(b) 採一階內插; $R=2.5$ km

(c) 採零階內插; $R=5$ km

(d) 採一階內插; $R=5$ km

三、實驗設計

(一)回波模型設計

爲了比較水平及垂直向具不連續降水分佈時，CAPPI上所形成之回波圖形，今以兩種不同之回波模型進行模擬實驗(圖4)。圖4 a所示爲X-Z平面上之回波模型剖面圖；在X軸上30 km—60 km處有一垂直向上發展之回波區，高度由距地0.8 km起至4.5 km止，回波強度均勻地皆爲10 dBz。在此範圍外之回波強度均設爲0 dBz。圖4 b所示爲位於回波模型上界處之回波強度呈線性遞減的情形；自距地4 km起至6 km間，回波強度由10 dBz漸降至0 dBz。以上兩類回波模型其在Y-Z平面上之回波分佈與X-Z平面上所顯示者完全相同。

(二)模擬資料來源及整理

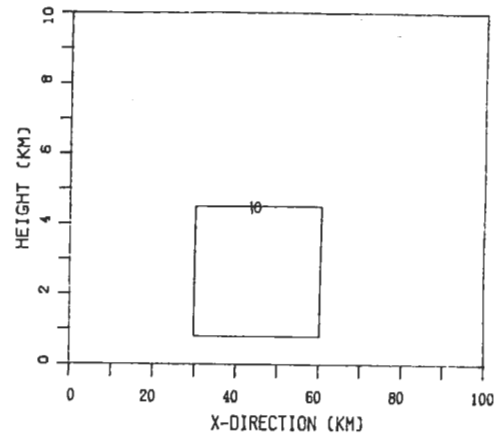
1 模擬雷達實際操作的情況，掃描時方位角的變化範圍爲 $0^\circ \sim 90^\circ$ ，增量爲 2° ；仰角變化範圍爲 $0^\circ \sim 15^\circ$ ，增量爲 1.5° ；在此範圍內共計有506條掃描線，沿每條掃描線上自距雷達0.5 km起至100 km處止，每間隔0.5 km預設一個回波強度值；此值乃依據回波模型中所設之值而定。

2 實驗中考慮整個回波系統處於準靜狀態(guasi steady state)，無移動速度。將參考雷達視爲作業雷達，並將網格原點定在參考雷達所在之位置。同時令網格座標軸分別指向東和北。即在(5)~(11)式中令 $R_{z1} = 0$ ； $C = 0$ ； $r_z = 0$ 以及 $\alpha = 0$ 。

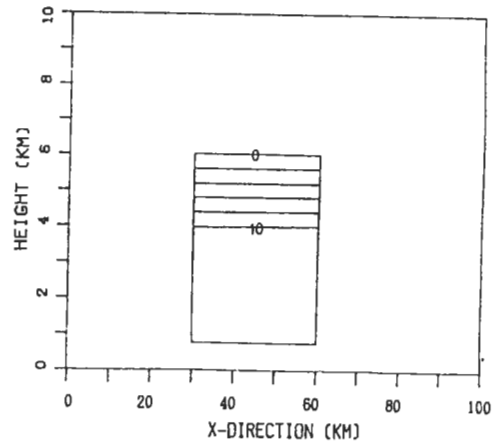
3 將大氣自離地1 km起至9 km處止，共分爲九個定高層。各層中的資料取自離層面上下各0.4 km範圍內諸掃描線上所測得之資料。此定高層厚度的選擇將決定各層中的資料點數。爲避免垂直方向資料點的重覆計算，各層間不予重疊。

四、分析方法

(一)由於模擬資料之徑向解析度(range resolution)爲0.5 km，而每次掃描扇面的間隔



(a)



(b)

圖4 回波模型之垂直剖面圖(回波強度單位: dBz)(a)第一類回波模型 (b)第二類回波模型。

，在距雷達遠處可達2~3 km，故平均資料間距 Δn 約爲2 km。依(8)式計算知影響半徑應取爲5 km較適當。本實驗中選取三種不同的R值，分別爲：2.5 km、5 km和7.5 km，以便比較何者爲最佳之影響半徑。

(二)分別採用零階及一階內插法(Barnes, 1973)將每一定高層中一定厚度內之資料內插至網格上。二維內插時將資料點的高度值亦一併作內插，如此可得到網格資料的高度值，繼而再沿垂直向作線性內插以求取各定高層之真正網格值。平

面網格覆蓋範圍是 100 km × 100 km 網格間距依
式知不得大於 1 km，故取為 1 km 之等間距。
但在資料印出或繪圖時，則將網格間距放大 4 倍後
為之。在作一階內插時取 $r=0.3$ 以及 $\epsilon=4$ 。

(三)為了便於將分析結果與原回波模型比較，另
將各定高層上沿東北方向(如圖 3 a 中所示之對角
線)之資料繪成垂直剖面圖。繪圖時資料需先予以
修勻(採 Shuman 九點平滑法)；否則，在一些欠
缺資料的區域將無法繪出等值線。

五、結果與討論

(一)定高層上回波強度之比較(僅作二維內涵)

1 以第一類回波模型進行實驗之結果：

僅將定高層為 3 km 之實驗結果示於圖 3 a —
3 d。印表時之網格大小已放大為 4 km 之等間距
。

(1)影響半徑取作 2.5 km，採零階及一階內插
方法之分析結果分別示於圖 3 a 及圖 3 b。

(2)影響半徑取作 5 km，亦分別採零階及一階

內插方法所得結果示於圖 3 c 及圖 3 d。

圖 3 之結果顯示，採零階內插所得結果，其回
波強度在模型邊界處會發生突降。相反的，採一階
內插時，回波強度在模型邊界處之變化較為緩和。
再者，增大影響半徑能使資料欠缺帶的寬度變窄，
並能提昇網格分析值的準確度。

2 以第二類回波模型進行實驗之結果

僅選取影響半徑為 5 km 之實驗結果示於圖 5
及圖 6。

(1)圖 5 a — 5 c 所示為採零階內插而高度分別
為 4 km、5 km 及 6 km 之網格分析值。

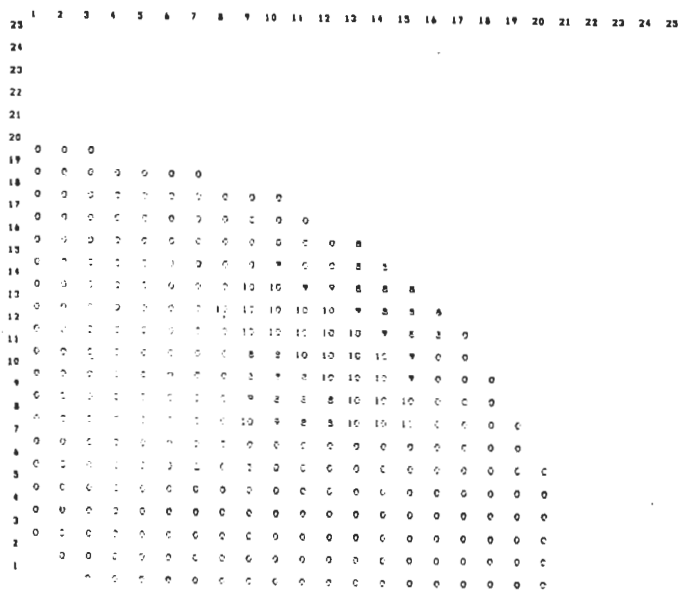
(2)圖 6 a — 6 c 所示則為採一階內插而高度分
別取作 4 km、5 km 及 6 km 時之網格分析值。

綜觀圖 5 和圖 6 得知，當高度由 4 km 增至
6 km 時，其回波強度會隨著呈線性遞減。同樣地
，圖中仍顯示出欠缺資料的帶狀區。

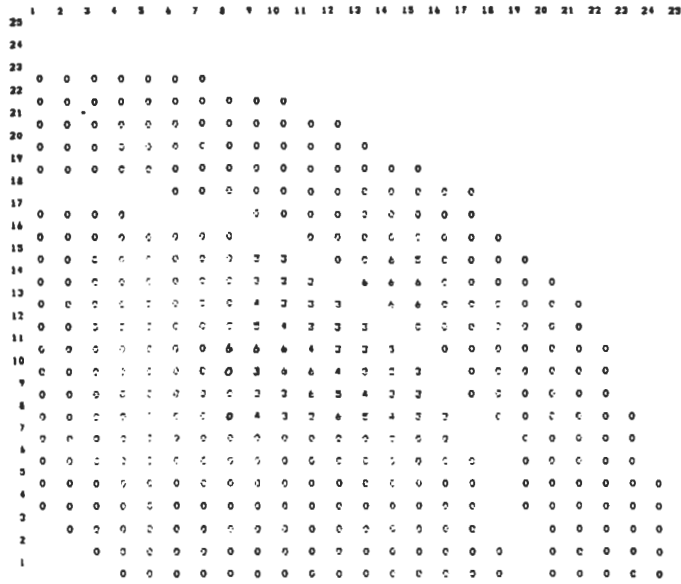
(二)垂直剖面圖中回波強度之比較(僅作二維內涵)

1 第一組實驗 (R = 2.5 km)

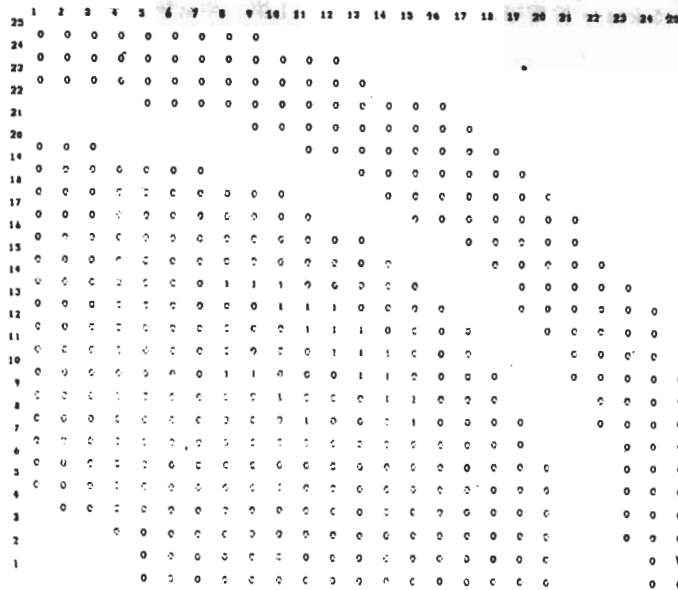
此組結果顯示由於影響半徑選取過小，使得垂
直剖面圖中的回波強度雖經修勻後仍與原模型不符



(a)



(b)



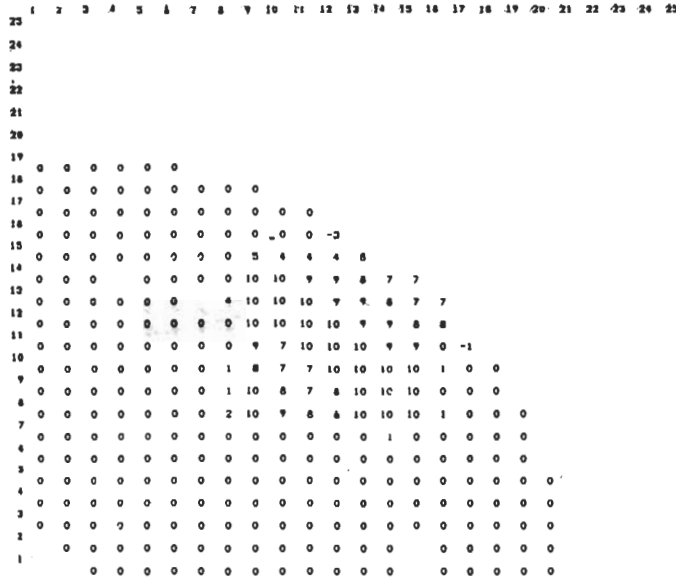
(c)

圖 5 回波強度 (dBz) 在各個定高層上之分析結果 (採零階內插;
 $R = 5 \text{ km}$)
 (a) $H = 4 \text{ km}$
 (b) $H = 5 \text{ km}$
 (c) $H = 6 \text{ km}$

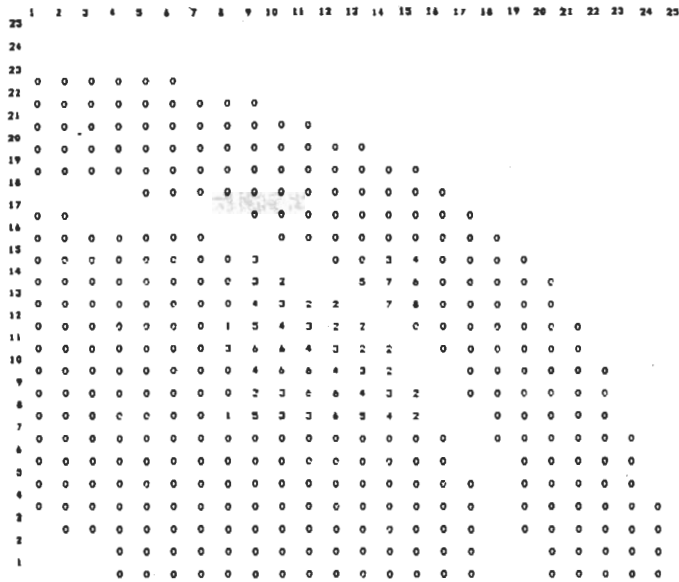
。圖 7 所示為回波強度等值線，圖中曲線間隔為 2 dBz。

(1)圖 7 a、7 b 分別為以第一類回波模型(具明顯的不連續界面)並配合零階及一階內插，資料

經修勻後之結果。回波强度高於 0 dBz 之分佈範圍可達 5 km 之高度。圖 7 a 所示，乃由零階內插所得之結果。在垂直交界面附近(高度約為 4.5 km)之等值線起伏頗大。反觀圖 7 b，採一階內插能



(a)



(b)

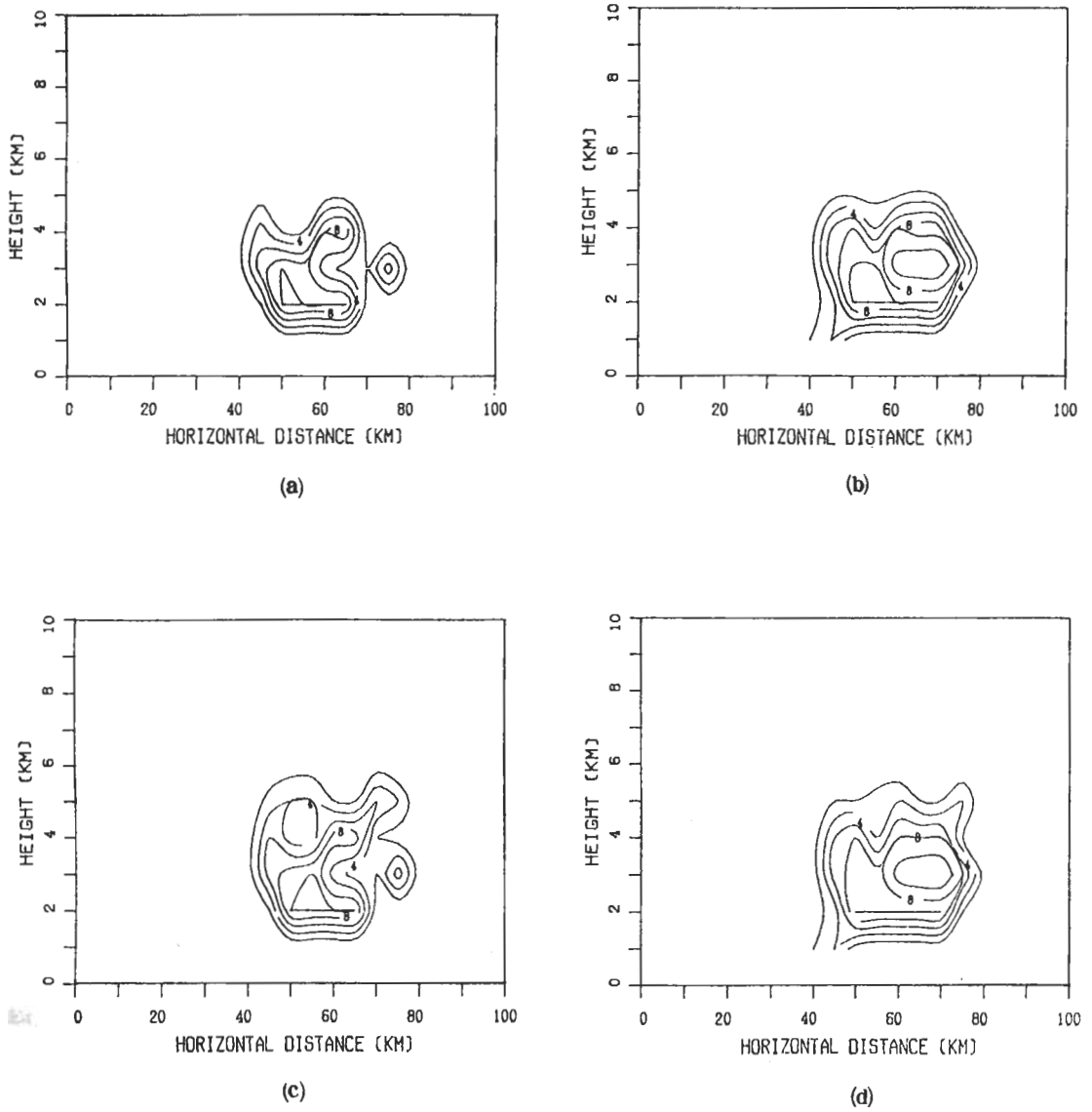


圖 7 回波強度之垂直剖面圖 (曲線間隔為 2dBz ; R = 2.5 km)

- (a) 第一類回波模型 ; 零階內插
- (b) 第一類回波模型 ; 一階內插
- (c) 第二類回波模型 ; 零階內插
- (d) 第二類回波模型 ; 一階內插

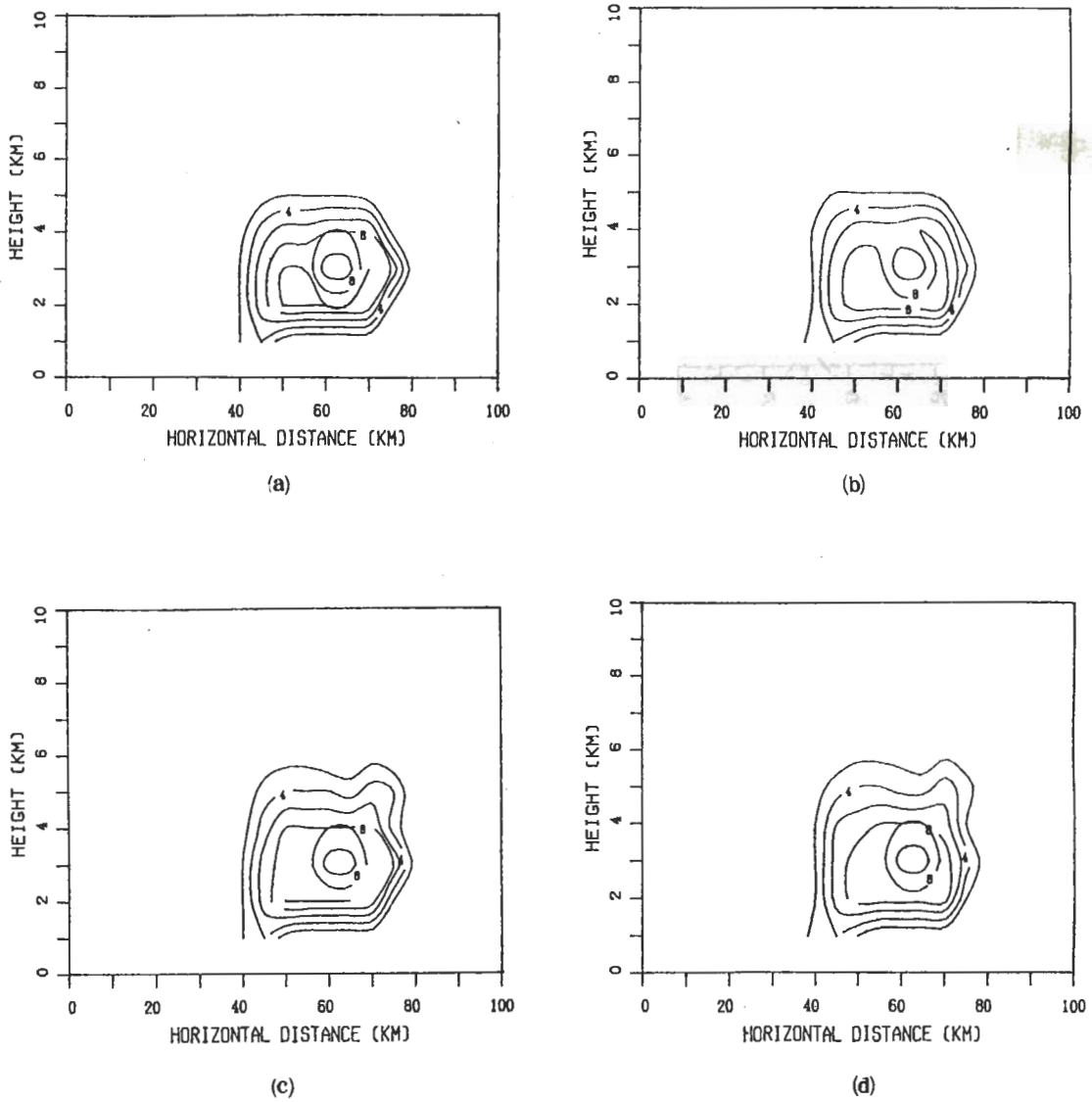


圖 8 回波強度之垂直剖面圖 (曲線間隔為 2 dBz ; $R = 5$ km)

- (a) 第一類回波模型；零階內插
 (b) 第一類回波模型；一階內插
 (c) 第二類回波模型；零階內插
 (d) 第二類回波模型；一階內插

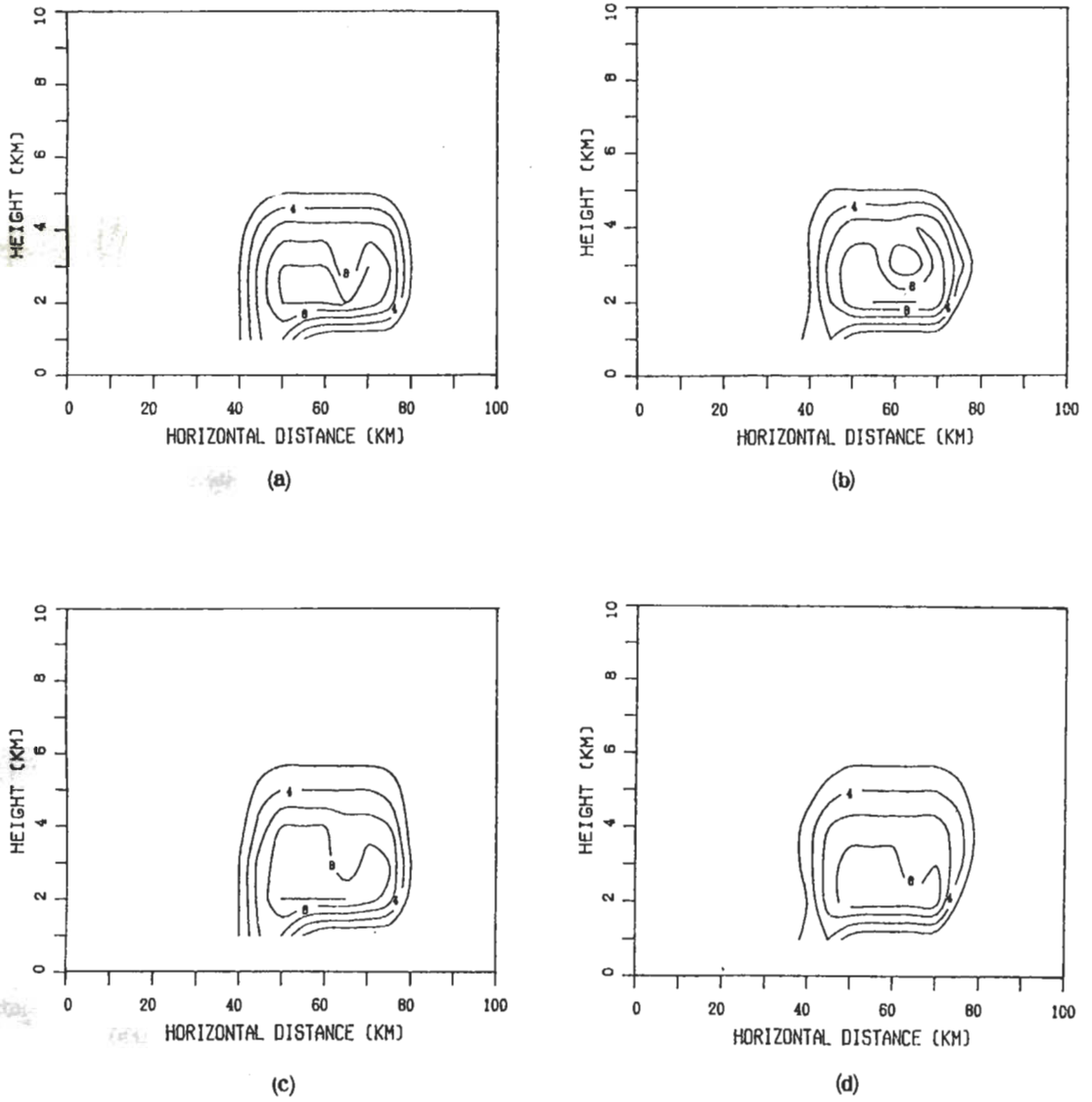


圖 9 回波強度之垂直剖面圖 (曲線間隔為 2 dBz; $R = 7$ km)

- (a) 第一類回波模型; 零階內插
- (b) 第一類回波模型; 一階內插
- (c) 第二類回波模型; 零階內插
- (d) 第二類回波模型; 一階內插

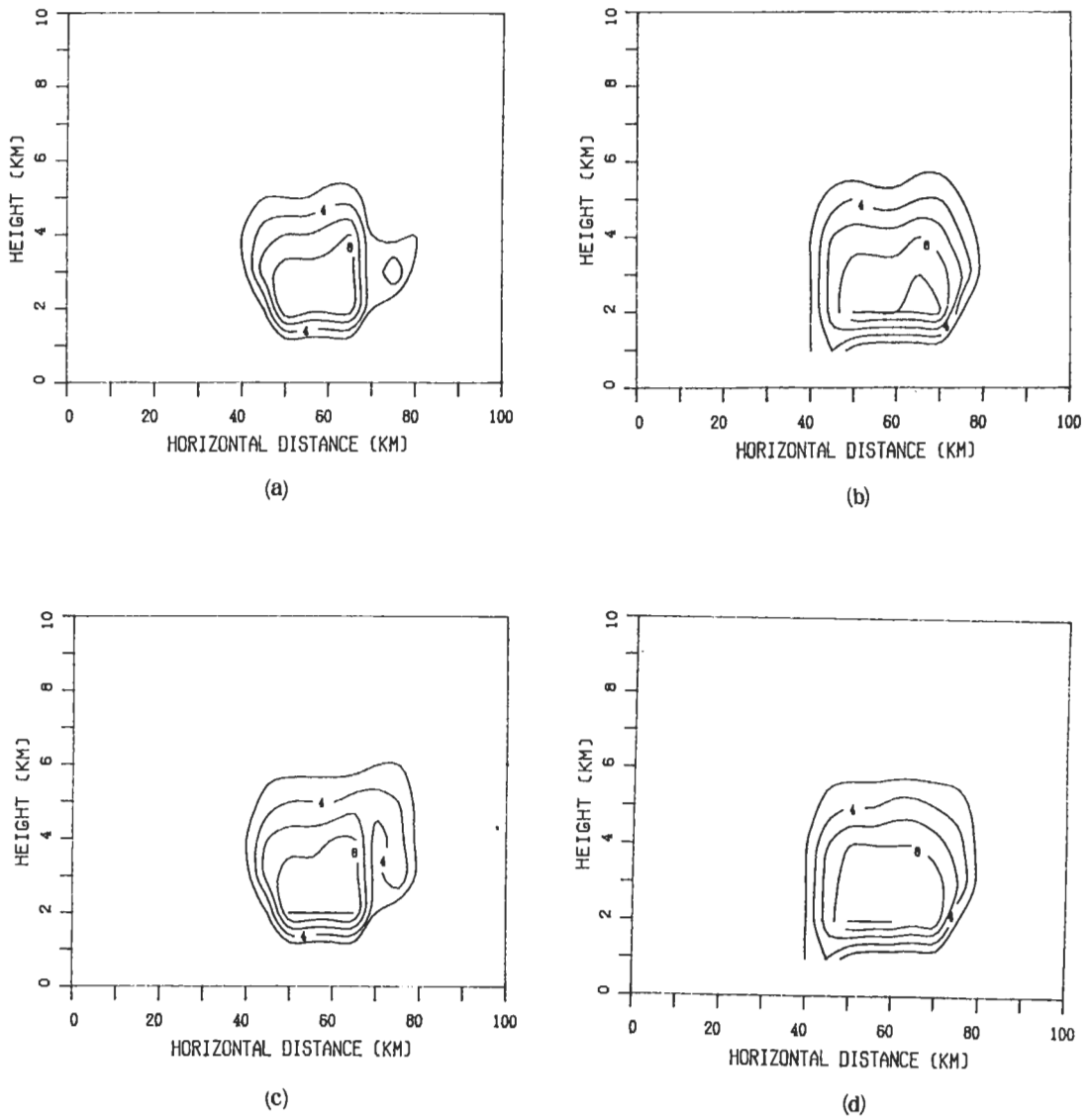
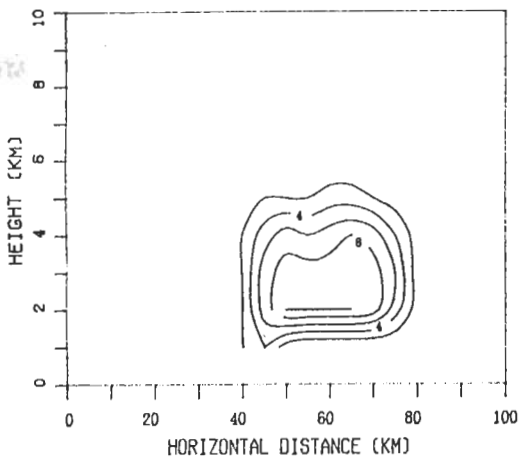
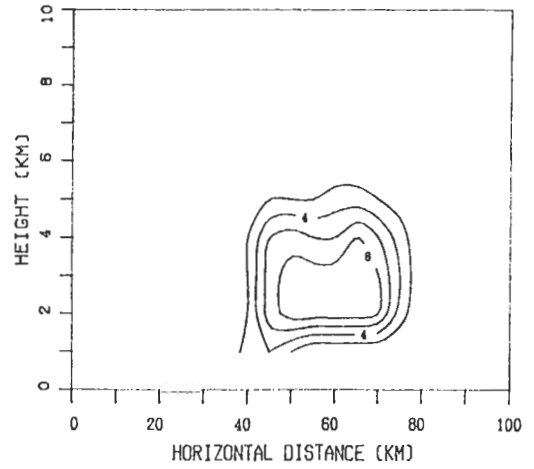


圖10 回波強度經三維內插之垂直剖面圖(曲線間隔為2 dBz ; $R = 2.5$ km)

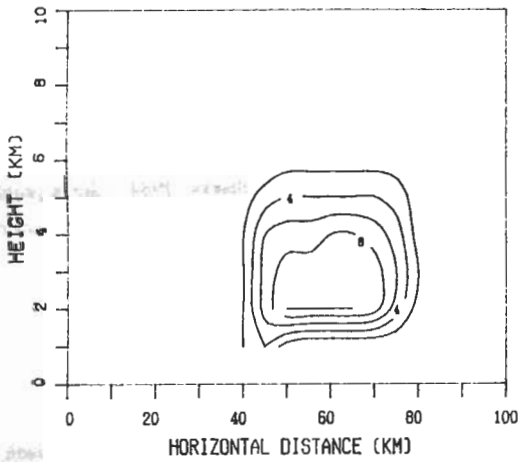
- (a) 第一類回波模型；零階內插(定高層中)
- (b) 第一類回波模型；一階內插(定高層中)
- (c) 第二類回波模型；零階內插(定高層中)
- (d) 第二類回波模型；一階內插(定高層中)



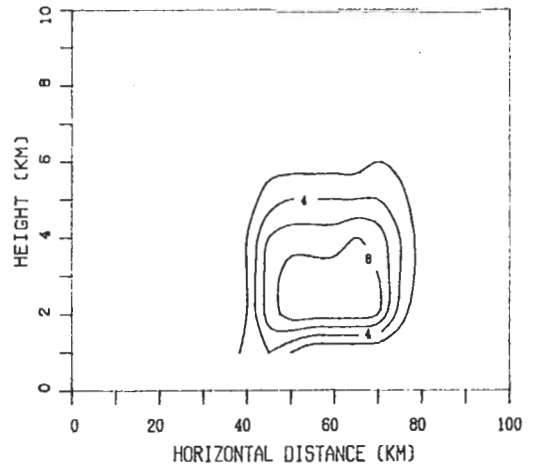
(a)



(b)



(c)



(d)

圖11 回波強度經三維內插之垂直剖面圖(曲線間隔為 2 dBz ; R = 5 km)

(a)第一類回波模型;零階內插(定高層中)

(b)第一類回波模型;一階內插(定高層中)

(c)第二類回波模型;零階內插(定高層中)

(d)第二類回波模型;一階內插(定高層中)

上之真正網格值。

1 第四組實驗 (R = 2.5 km)

圖10 a—圖10 d所示分別為圖7 a—圖7 d中之資料經作三維內插後之結果。經比較後知圖形已有大幅的改進，然採一階內插所獲之結果仍優於零階內插之分析結果。

2 第五組實驗 (R = 5 km)

圖11 a—圖11 d所示分別為圖8 a—圖8 d中之資料經作三維內插後之結果。經比較得知二者之外形輪廓雖無甚大差異，但在靠中心附近之部份異常圖形業已消除。值得一提的是，由於影響半徑已增大，此時採一階內插或採零階內插所得之分析結果已相當接近。

六、結論

經比較五組實驗結果知悉：

- (一)採用一階內插法所獲分析結果優於零階內插所得之結果。
- (二)不論採何種分析法在低層或近雷達處，可獲致較佳的分析結果。
- (三)當平均資料與間距為2 km時，網格間距可取作1 km，此時最佳影響半徑應為5 km。
- (四)增大影響半徑確可消除部份呈波狀的資料欠缺區，但卻增加了甚多的計算時間，實際作業時應考慮經濟效益。
- (五)資料經考慮三維的內插過程，所得分析結果遠比僅作二維之內插過程為佳。

誌謝

本研究承國科會支持 (NSC-76-0202-M014-02) 及國立中央大學大氣物理系提供繪圖及相關程式，謹致謝忱。

參考文獻

- Barnes, S., 1973: Mesoscale objective map analysis using weighted time series observations. *NOAA Tech. Memo. ERL NSSL-62, Norman, Okla.*, 60pp.
- Koch et al., 1983: An interactive Barnes objective map analysis scheme for use with satellite and conventional data. *J. Climate and Appl. Meteor.* 22, 1487-1503.
- Mohr, G. and R. Vaughan, 1979: An economical procedure for Cartesian interpolation and display of reflectivity factor data in three dimensional space. *J. Appl. Meteor.*, 18, 661-670.
- Rousteenoja, K., and T. Puhakka, 1984: Some problems related to Cartesian space analysis of digital rada data. 22nd conference on rada meteor. *Amer. Meteor. Society, Boston, Mass.*, 166-171.
- Shuman, F.G., 1957: Numerical methods in weather prediction II, smoothing and filtering. *Mon. Wea. Rev.*, 85, 357-361.
- Stephens and Stiff, 1970: Optimum influence radii for interpolation with the method of successive corrections. *Mon. Wea. Rev.*, 98, 680-687.

OBJECTIVE ANALYSIS OF DIGITAL RADAR DATA

*Liang-Shur Su*Department of Applied Physics
Chung-Cheng Institute of Technology

(manuscript received August 22, 1988; in final form December 14, 1988)

ABSTRACT

Using typical bilinear interpolation methods in deriving Cartesian grid values from spherical radar data, artifacts are easily produced. These artefacts arise from an angular resolution in the radar measurement grid which is too low compared to the typical spatial variabilities of echoes especially in the vertical near discontinuities at horizontal echo boundaries.

In order to illustrate those undesired artifacts produced by interpolation from coarse data, two types of simulated echo patterns and two basic interpolation schemes: zero order and first order interpolation have been studied.

In this study, we select three values of scan radii to perform experiments. In order to make a comparison between analytic results and the model echo patterns, various vertical cross sections through the same model echo fields obtained by both interpolation methods have been plotted.

It is evident that the optimum radius of influence which gives maximum response of no more than 0.369 at the minimum resolvable wavelength is derived and proved to be 2.4 times of the mean data spacing.

In the meanwhile, it is also found that the extension of the two dimensional interpolation scheme to three dimensions will improve the final-results.

Key words: Radar, Objective analysis