

應用特高頻陣列雷達三維成像技術於重建大氣亂流之空間結構

陳振雄

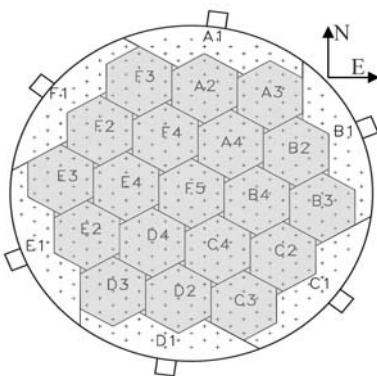
建國科技大學資訊與網路通訊系

摘要 — 本研究發展多載頻和多接收機之雷達干涉法，並應用於重建大氣亂流層狀結構之三維空間分布，分析的資料來自日本 MU 特高頻陣列雷達之觀測。觀測時發射 5 個頻率並使用 19 個接收通道之資料，再以 Capon 非線性反演方法重建雷達照射體積內之回波強度空間分布，藉此呈現主要亂流結構之小尺度變化，有助於進行大氣微觀尺度之動力分析。¹

一、簡介

結合多接收機和多載頻之雷達觀測技術可以進行目標物之空間定位，本技術已應用於脈波式的特高頻(VHF)陣列雷達，藉以執行大氣折射指數不規則體結構(通稱亂流)之小尺度三維成像和定位分析。

本文呈現實際觀測的分析結果，資料來源為日本 MU 特高頻陣列雷達(由京都大學所建立與管理)，資料時間為 2006 年 2 月 9 日 20:16-20:25UT，每一點資料取樣時間約為 0.512 秒。雷達陣列組態如圖一所示，觀測時以整個天線場送出雷達波，垂直發射 5 個頻率(46.0、46.25、46.5、46.75、47.0MHz)，並啟用 21 個接收通道，包含整個天線陣列場接收和中間部份的 20 個接收天線組(編號 A2、A3、A4、B2、B3、B4、C2、C3、C4、D2、D3、D4、E2、E3、E4、F1、F2、F3、F4、F5)，其中 F1 通道之資料未使用。脈波長 1 μ s，因此取樣資料之徑向解析度約相當於 150m，雷達波束垂直向上，波束寬約為 3.7° (-3dB 的寬度)，因此雷達脈波照射的空間尺度為數百公尺。成像分析則使用 Capon 演算法 [1]，此演算法可有效處理多維度訊號且較為省時，但是隨著訊雜比值的降低，解析效果會減弱。



圖一：日本 MU VHF 雷達組態，A1-F5 為用於接收的天線群組。

¹ 本研究由國科會贊助，計畫編號 NSC 101-2111-M-270-001 及 NSC 102-2111-M-270-001。

二、雷達三維成像技術

設定 M 個載頻 f_1, f_2, \dots, f_M ，依序隨雷達脈波輪流發射，地面上則啟用 N 個接收機，座標定為 $\mathbf{D}_1, \mathbf{D}_2, \dots, \mathbf{D}_N$ 。各個接收機所接收到的各載頻回波寫成一個欄向量(column vector)：

$$\mathbf{S}(t) = \begin{bmatrix} S_{11}(t) & S_{12}(t) & \dots & S_{1N}(t) \\ S_{21}(t) & S_{22}(t) & \dots & S_{2N}(t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{M1}(t) & S_{M2}(t) & \dots & S_{MN}(t) \end{bmatrix}^T, \quad (1)$$

其中上註標 T 為矩陣之轉置(transpose)， $S_{ij}(t)$ 為接收機 j 收到的載頻 i 之回波訊號。理想上， M 個載波須同時發射，但實際操作上只能於每個雷達脈波間切換。由於亂流之變化時間約為 1 秒鐘，而雷達脈波發射時間差僅為數百個微秒(μ s)，在此極短時間內亂流並未產生明顯變化，因此各載頻之回波可視為由相同之亂流所散射或反射回來。

定義 $\mathbf{S}(t)$ 之互相關函數矩陣如下：

$$\mathbf{V} = \mathbf{S}(t) \mathbf{S}^H(t) = \begin{bmatrix} V_{11} & V_{12} & \dots & V_{1M} \\ V_{21} & V_{22} & \dots & V_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ V_{M1} & V_{M2} & \dots & V_{MM} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中上註標 H 為 Hermitian 運算子， \mathbf{V} 是 $MN \times MN$ 之矩陣(又稱為 visibility matrix)， V_{pq} 為 $N \times N$ 矩陣，為各接收機訊號之互相關函數矩陣， p 和 q 代表載頻編號，例如第 1 個和第 2 個載頻之互相關函數矩陣為

$$V_{12} = \begin{bmatrix} S_{11}S_{21}^* & S_{11}S_{22}^* & \dots & S_{11}S_{2N}^* \\ S_{12}S_{21}^* & S_{12}S_{22}^* & \dots & S_{12}S_{2N}^* \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{1N}S_{21}^* & S_{1N}S_{22}^* & \dots & S_{1N}S_{2N}^* \end{bmatrix}, \quad (3)$$

符號* 為複數之共軛運算(conjugate)。使用 Capon 演算法之三維成像運算式為

$$B(\mathbf{a}, R) = \frac{1}{W^2(\mathbf{a}, R)} \frac{1}{\mathbf{e}^H \mathbf{V}^{-1} \mathbf{e}}, \quad (4)$$

其中

$B(\mathbf{a}, R)$: 亮度分布(brightness distribution)

$$\mathbf{a} = [\sin\theta\sin\varphi, \sin\theta\cos\varphi, \cos\theta]$$

θ 和 φ : 偵測方向之天頂角和方位角

R : 相對於雷達體積中心點之距離變數

$W(\mathbf{a}, R)$: 三維之權重函數(weighting function), 由雷達波束和距離權重函數所形成。

變數 \mathbf{e} 為一個權重向量(weighting vector), 用以反演亮度分布值, 其形式為

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} e^{-j(2k_1R-k_1\mathbf{a}\cdot\mathbf{D}_1)} & e^{-j(2k_1R-k_1\mathbf{a}\cdot\mathbf{D}_2)} & \dots & e^{-j(2k_1R-k_1\mathbf{a}\cdot\mathbf{D}_N)} \\ e^{-j(2k_2R-k_2\mathbf{a}\cdot\mathbf{D}_1)} & e^{-j(2k_2R-k_2\mathbf{a}\cdot\mathbf{D}_2)} & \dots & e^{-j(2k_2R-k_2\mathbf{a}\cdot\mathbf{D}_N)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{-j(2k_MR-k_M\mathbf{a}\cdot\mathbf{D}_1)} & e^{-j(2k_MR-k_M\mathbf{a}\cdot\mathbf{D}_2)} & \dots & e^{-j(2k_MR-k_M\mathbf{a}\cdot\mathbf{D}_N)} \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

其中 k_i 是載波 i 之波數(wavenumber)。

方程式(4)顯示反演之亮度分布是受到權重函數 $W(\mathbf{a}, R)$ 影響後之結果, 因此 $W(\mathbf{a}, R)$ 之效應需適當移除, 才能取得較為合理之亮度分布, 用以呈現亂流之三維結構和位置[2]。本研究參考[3]針對日本 MU 雷達所提方法與方程式, 進行 $W(\mathbf{a}, R)$ 效應之移除, 其詳細過程不再贅述, 本文僅呈現修正後之成像結果。

三、觀測分析結果

3.1 多載率觀測分析之大氣亂流層狀結構

在三維成像技術中, 若只利用一個接收機的多載頻資料進行分析, 則只可得到徑向距離的亂流結構隨時間之分布和變化, 稱為距離成像法(range imaging/RIM) [4], 其簡介與方程式參考附錄。本研究中 RIM 之資料來自於以整個天線陣列場為接收通道所接收之回波訊號, 此時雷達的波束最窄, 可獲得較佳的徑向結構。

圖二是本研究所分析的一個案例, 縱軸為取樣層高度, 橫軸為時間軸, 時間由右邊開始。圖中有四個取樣層, 每一計算值之時間解析約為 16 秒。上圖為原始的回波功率圖, 距離解析度為 150 m, 所以無法呈現各層內部的亂流或層狀結構。下圖是距離成像分析後的結果, 每 2 m 距離即計算一個回波強度值(亮度), 大大提升了距離解析度。其中, 在 5.25-5.40km 之取樣層中可以看到一個受到大氣波動所調制的亂流層狀結構, 波峰並略微向右傾斜, 此傾斜現象是由於水平風速在垂直方向上的逐漸增大所致, 即風切效應, 可參考圖四之水平風場示意圖。實際分析之水平風場即類似於此(未呈現於本文中)。

3.2 大氣亂流層之三維結構

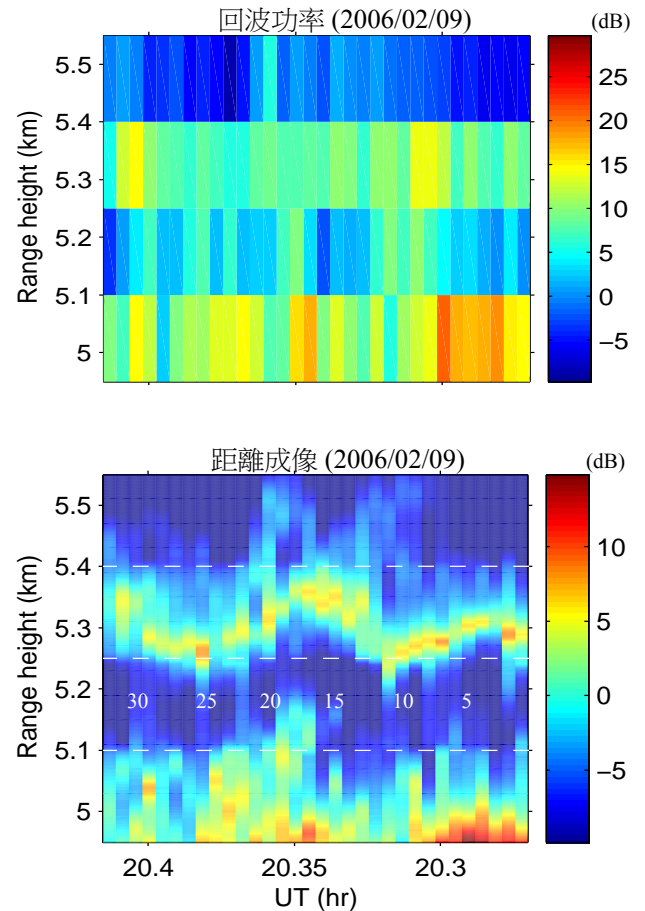
分析圖二中受到大氣波動所調制的亂流層狀結構, 圖三是三個連續時刻 T_4 、 T_3 、 T_2 之三維結構解析圖, 即圖二中編號第 4、3、2 的位置點。觀察圖二之波動性層狀結構, 可判斷第 3 位置點剛好是波峰通過雷達上空之時間。

為清楚顯示亂流結構在雷達波束照射體積內之變化, 圖三只顯示九層橫切面之輪廓線圖, 呈現各高度層回波

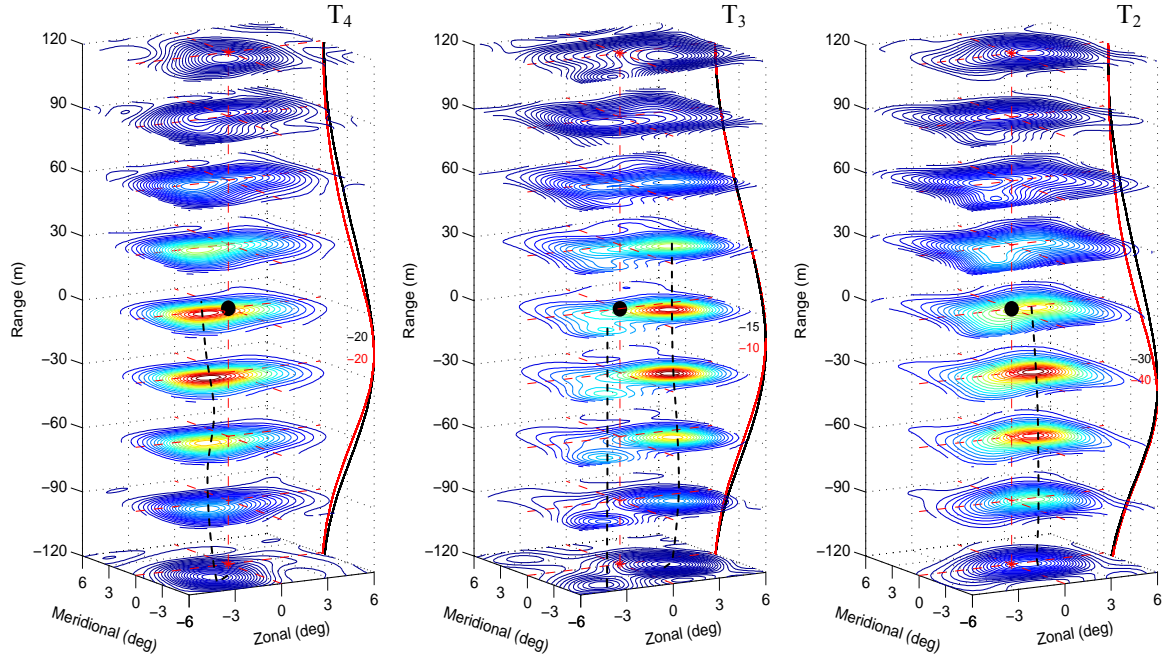
功率之二維水平角分布。輪廓線之中心代表較強的回波, 有時可見二個回波中心, 例如中間 T_3 的時刻。參照圖二, 此時刻之亂流層在 5.325 km 下方, 即位於取樣層之中心高度下方。第 3 位置點是波峰處, 在其中心高度下方之橫切面輪廓線可看到有二個明顯的回波中心。本現象可由圖四之波動層狀結構模式說明之。在第 T_3 時刻, 雷達波束照射到波峰處, 但由於層狀結構在波峰二邊反方向傾斜, 雷達接收到的訊號主要來自波峰二邊的散射或反射回波。

相較於 T_3 時刻, T_4 時刻的傾斜層狀結構使得雷達回波主要來自雷達正上方之左邊, T_2 時刻的傾斜層狀結構則使得雷達回波主要來自雷達正上方之右邊。圖三的橫切面輪廓線圖清楚顯示這兩種回波位置的特性。各個時刻的分析結果說明多載頻和多接收機三維成像之可行性。

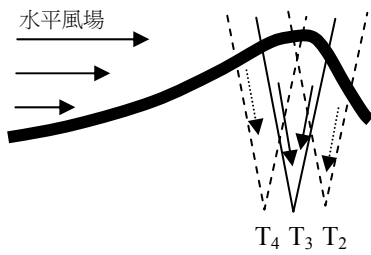
另外, 圖三中的 range-meridional 平面上顯示二條剖面線, 黑色線是橫切面成像回波各自加起來後的高度剖面線, 紅色線則是只取天頂方向的成像回波之高度變化, 皆可顯示層狀結構在徑向上的分布。但前者包含偏離天頂角的回波, 所以若偏離天頂角較遠的地方有強回波, 通常會加大層狀結構在徑向上的厚度。不過, 在本案例中二者差異不大。但若只取天頂方向的成像回波, 可以有效降低非亂流回波之污染, 例如飛機反射波或其他訊號源干擾, 這些非亂流回波通常來自較大的天頂角方向 [5][6]。



圖二：多載頻技術反演之層狀結構, 圖中 30、25 等數字表示不同時刻之編號, 時間從右邊開始。



圖三：三維成像之結果，呈現九個橫切面之輪廓線，由左至右為圖二中第 4、3、2 時刻。粗虛線顯示各橫切面回波中心的連接。在 Range-meridional 平面上的兩條剖面線是亮度垂直分布，紅色線為天頂角方向的亮度垂直分布，黑色線是橫切面各自加總後的亮度垂直分布。



圖四：層狀結構模式與雷達回波示意圖，雷達波束垂直向上。T₂、T₃、T₄ 表示雷達波束照射的時間點。雷達波束內向下箭號表示回波來向。

結論

多載頻和多接收機技術已使用於特高頻陣列雷達，可以重建大氣亂流層狀結構之三維空間分布。本研究取用日本 MU 特高頻陣列雷達的觀測資料，針對一個波動性的亂流層狀結構，不僅利用多載頻成像法呈現出層狀結構在雷達體積內的高度和時間變化，也解析出層狀結構在雷達體積內的回波來向角變化，說明三維成像技術的適用性。由於應用於大氣研究的特高頻陣列雷達建構經費較高，所以無法像傳統的氣象雷達一樣普遍設立。不過，隨著陣列雷達觀測技術不斷更新和精進，例如脈波相位加碼、相控快速切換雷達波束方向、取樣和訊號處理速度的提升等，使得特高頻陣列雷達探測大氣的能力不斷提升，資料分析之解析度也不斷提高，這對大氣微觀物理現象的觀測和研究會有很大的助益。

附錄

多載頻之距離成像法須設定 M 個載頻 f_1, f_2, \dots, f_M ，依序隨雷達脈波輪流發射與接收。利用一些非線性的反演方法，可由這些載頻回波訊號來重建亂流之徑向結構。適用於目前雷達和觀測資料的非線性訊號反演方法為 Capon 分析法，並以在時間域之計算較為方便，定義 $B(r)$ 為反演後在距離 r 的亮度分布，其值代表 r 處的回波強度。Capon 分析法如下：

$$B(r) = \frac{1}{e^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{e}} \quad (6)$$

其中 $\mathbf{e} = [e^{j2k_1 r} \ e^{j2k_2 r} \ \dots \ e^{j2k_n r}]^T$ ，為為一個權重向量 (weighting vector)，用以反演亮度分布值， k_i 是載率 i 之波數， T 表示矩陣轉置動作。(6) 式中的註標 H 和 -1 分別代表 Hermitian 運算子 (conjugate 加 transpose) 和反矩陣運算。 \mathbf{R} 是二載頻回波訊號間沒有時間延遲的互相關函數之矩陣，形式為

$$\mathbf{R}(\tau = 0) = \begin{bmatrix} V_{11} & V_{12} & \dots & V_{1n} \\ V_{21} & V_{22} & \dots & V_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ V_{n1} & V_{n2} & \dots & V_{nn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$V_{ij}(\tau = 0, \Delta k) = \langle V_i V_j^* \rangle \quad (8)$$

V_{ij} 為互相關分析(cross-correlation analysis)，並為一對載頻波數差 Δk 之函數， V_i 和 V_j 是第 i 個和第 j 個載率所收之時間序列訊號。

對應於(6)式，另有 Fourier 分析法，其亮度計算為

$$B(r) = \mathbf{e}^{\dagger} \mathbf{R} \mathbf{e} \quad (9)$$

相較於 Capon 分析法，Fourier 法的解析效果較差。

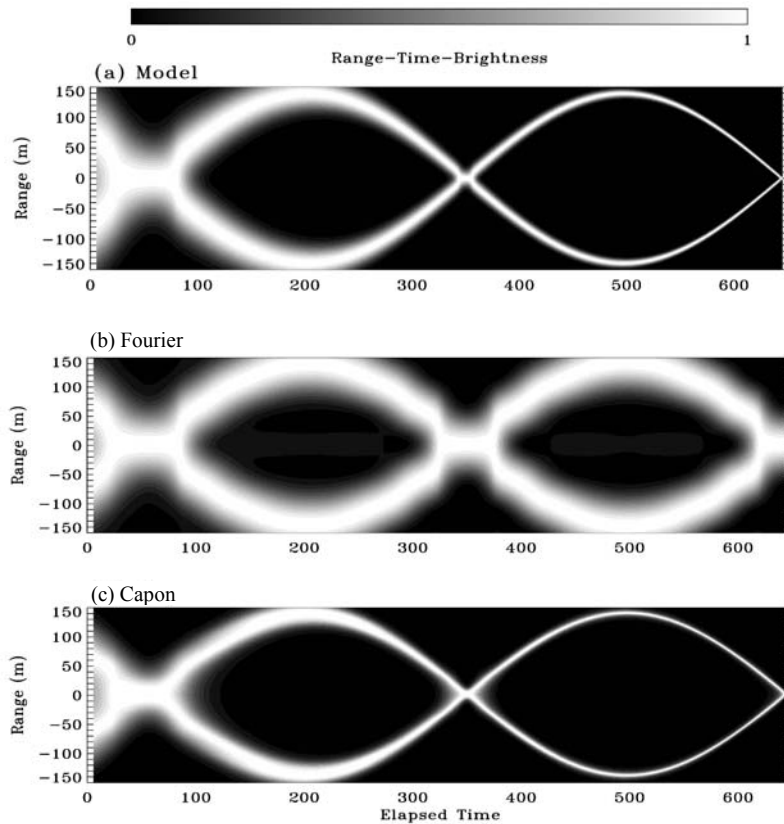
圖五是模擬的案例，呈現 Fourier 和 Capon 分析法的解析度差異。模擬中所使用之雷達回波方程式和相關運算式可參考[7]之附錄，本文略過其詳細描述。在本次模擬案例中設定雷達脈波寬為 $2\mu\text{s}$ ，即取樣資料之徑向解析度約相當於 300m，並使用六個載率 52.75, 53.05, 53.35, 53.65, 53.95, 54.25 MHz。圖五(a)之模型中設定二個層狀結構，在 300 m 的取樣層中厚度和位置都有變化，圖五(b)和(c)分別是 Fourier 和 Capon 分析法的結果，相較之下，Capon 分析法確實有較佳的效果。Fourier 分析法雖然可以分辨出這二層結構，但無法解析厚度之變化。更多模擬案例顯示，當層狀結構更靠近時，Fourier 分析法無法分離這二層結構。

誌謝

本研究之雷達資料由日本 MU 雷達站所提供，該雷達站由日本京都大學生存圈研究所(RISH)所經營與管理。感謝 RISH 之 G. Hassenpflug 博士、T. Tsuda 和 M. Yamamoto 教授之協助觀測。

參考文獻

- [1] Palmer, R. D., S. Gopalam, T.-Y. Yu, and S. Fukao, "Coherent radar imaging using Capon's method," *Radio Sci.*, vol. 33, 1585-1598, doi:10.1029/98RS02200, 1998.
- [2] Yu, T.-Y. and R. D. Palmer, "Atmospheric radar imaging using multiple-receiver and multiple-frequency techniques," *Radio Sci.*, vol. 36, 1493-1503, doi:10.1029/2000RS002622, 2001
- [3] Chen, J.-S. and J. Furumoto, "A novel approach to mitigation of radar beam weighting effect on coherent radar imaging using VHF atmospheric radar," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, to be published, 2011.
- [4] Palmer, R. D., T.-Y. Yu, and P. B. Chilson, "Range imaging using frequency diversity," *Radio Sci.*, vol. 34, 1485-1496, 1999.
- [5] Hassenpflug, G., M. Yamamoto, H. Luce, and S. Fukao, "Description and demonstration of the new Middle and Upper atmosphere Radar imaging system: 1-D, 2-D and 3-D imaging of troposphere and stratosphere," *Radio Sci.*, vol. 43, RS2013, doi:10.1029/2006RS003603, 2008.
- [6] Yu, T.-Y., J. Furumoto, and M. Yamamoto, "Clutter suppression for high-resolution atmospheric observations using multiple receivers and multiple frequencies," *Radio Sci.*, 45, RS4011, doi:10.1029/2009RS004330, 2010.
- [7] Chen, J.-S., J. Furumoto, and T. Nakamura, "Effects of radar beam width and scatterer anisotropy on multiple-frequency range imaging using VHF atmospheric radar," *Radio Sci.*, 45, RS5001, doi:10.1029/2009RS004267, 2010.



圖五：多載頻距離成像法模擬分析，脈波寬 $2\mu\text{s}$ ，六個載率 52.75、53.05、53.35、53.65、53.95、54.25 MHz。(a) 二層狀模型，(b) Fourier 分析法，(c) Capon 分析法。