双偏振天气雷达同时收发模式的一种改进方法

梁海河1 徐宝祥2 刘黎平2 葛润生2

1 中国气象局大气探测技术中心,北京 100081
 2 中国气象科学研究院,北京 100081

摘 要目前,双偏振多普勒天气雷达的同时发射方式受到了普遍关注,作者针对该方式中偏振参量差分反射率 存在较大误差的问题,研究了双发射通道相位差与差分反射率精度的关系,以及双通道发射功率差、接收机增益 等对差分反射率的影响。在此基础上,给出了双偏振同时发射方式的一种改进方案,并讨论了该方案的优势和特 点,设计了双偏振多普勒天气雷达同时发射方式下回波信号的处理框图。 关键词 偏振雷达 同时发射 改进 信号处理

文章编号 1006 - 9895(2006)04 - 0635 - 10 **中图分类号** P412 **文献标识码** A

An Improved Method on the Simultaneous Transmission Scheme of Dual Polarimetric Weather Radar

LIANG Hai-He¹, XU Bao-Xiang², LIU Li-Ping², and GE Run-Sheng²

Atmospheric Observation Technological Center of China, Beijing 100081
 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract The simultaneous transmission scheme of dual polarimetric radar (PR) is now paid more attentions, but there is a bigger error on differential reflectivity in this scheme. The paper studies the relations between the phase difference of dual transmission port and the error of differential reflectivity, and the infections of dual transmission power and receiver gain distinction to differential reflectivity. In terms of the necessary of rainfall measurements and hydrometeor discrimination, an improved method for simultaneous transmission is advanced based on the theory study, and the simultaneous signal processing scheme is provided. This new improved method can increase the ability of measurements and discrimination via reducing differential reflectivity error through changing phase between H and V channels. This scheme has many advantages including: (1) improving measurement quality by changing phase between H and V channels, (2) enhancing SNR and signal intensity of weak echo in spite of co-polar or cross-polar port, (3) obtaining elliptic depolarization ratio (EDR), (4) transmitting linear, circular or elliptic polarization at different elevations in one volume scan, and (5) eliminating ferrite switch and phase alternation for different elevations.

Polarimetric radar development is a complicated, synthetic and scientific subject, every polarimetric scheme has some advantages and disadvantages, therefore the goal of this thesis is to consider the theory and technology of PR confronted in China. This improved method should be further examined and developed in practice. **Key words** polarimetric radar, simultaneous transmission, improved scheme, signal processing

1 引言

Seliga 和 Bringi^[1]于 1978 年提出双线偏振天

气雷达,给出了交替发射和同时发射水平/垂直偏振波的两种偏振模式,并指出差分反射率 Z_{DR}的精度应为 0.1~0.2 dB。由于受当时偏振技术和设备

收稿日期 2005-01-10, 2005-12-26 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40475011

作者简介 梁海河,男,1966年出生,博士,副研究员,主要从事多普勒天气雷达探测技术和方法研究。E-mail: lhh@cams.cma.gov.cn

发展水平的限制,在以后的双线偏振天气雷达中多 采用交替发射方式^[2]。这种方式的不足在于水平脉 冲采样数是多普勒天气雷达的一半,影响了双线偏 振多普勒天气雷达的扫描速率和脉冲采样数。为 此,Sachidanda和 Zrnic^[3]从理论上研究了同时发 射方式,结果表明 Zpg 的估算精度会因粒子的倾斜 产生很大的误差,如当粒子倾斜角为5°、Z_{DR}为2~ 3 dB时, 而 ZDR的误差为 3~5 dB。为降低同时发 射方式下 ZDR的估值误差, Sachidanda 和 Zrnic^[3]对 同时发射方式提出一种改进方法,即通过移相器技 术交替发射±45°倾斜线偏振波。该方式要求在交 替脉冲之间进行水平和垂直相位调整,在实现技术 上存在很大难度。直到1997年,美国CSU-CHILL 雷达采用双发射机的方式实现了交替发射±45°线 倾斜波的偏振方式^[4]。但双发射机体制造价太高, 不适宜在业务中应用。

目前,随着偏振技术和设备的发展,偏振天气 雷达探测技术研究进入一个新阶段。美国在完成 NEXTRAD WSR-88D 雷达业务布网之后,即着手 偏振雷达的升级改造工作,并引起了人们的普遍关 注。在 NSSL KOUN 雷达的偏振升级试验中,采 用了同时发射方式下的单发射机、双发射通道、双 接收机体制^[5],并在 2002 年进行了外场对比观测 试验^[6,7]。KOUN 雷达已经剔除了大功率高隔离 度微波开关,由功分器将发射通道等分为水平和垂 直两路发射通道。该方式双发射通道间的相位差是 不确定的,其发射的偏振波状态可能是线、圆或椭 圆偏振波。理论研究认为,在同时发射方式下差分 传播相移的精度好于交替发射方式[8],但差分反射 率误差偏大的问题仍然严重^[9]。本文从理论上研究 同时发射方式下双通道间的相位差的不确定性对 Z_{DR}精度的影响,并在此基础上探讨建立一种同时 发射方式下差分反射率的误差较小、较易实现的偏 振雷达体制和适宜的降水观测模式。

双发射通道相位差对偏振参量 Z_{DR} 的影响

假定天线馈源为双接口 (H'、V') 式, H'口发 射和接收水平偏振波, V'口发射和接收垂直偏振 波,且天线安装指向误差可以不计 ($\leq 0.1^{\circ}$)。设 H'和 V'偏振波为: (1) 同时发射, (2) 相互正交, (3) 双发射通道相位差为 β。当雷达分辨体积内的 散射雨滴的倾斜角为零,散射矩阵S可以表示为

$$\boldsymbol{S} = \begin{bmatrix} s_{\rm hh} & 0\\ 0 & s_{\rm vv} \end{bmatrix}.$$
 (1)

则固有的差分反射率 Zdr 可以写为[9]

$$Z_{\rm dr} = \frac{\langle \mid s_{\rm hh} \mid {}^2 \rangle}{\langle \mid s_{\rm vv} \mid {}^2 \rangle},\tag{2}$$

式中, *s*_{hh}和 *s*_w为水平和垂直偏振波的后向散射系数, "||"表示取模。这里以下标"dr"表示电压比,下文采用同样的表示方法,并以下标"DR"表示 dB 值。括号表示数学期望。假定所有的粒子的大小和形状相同(即忽略了信号涨落)。

当电磁波穿过云雨区,且水成物粒子倾斜角 α 不为零时,电磁波则会受到传播效应的影响。以V'和E'列矢量分别代表接收机电压信号($V_{h'}, V_{v'}$)和 天线发射电压($E_{h'}, E_{v'}$)。电磁波从发射机馈源口 到散射目标物,并返回到接收机的传播过程可写 为:

$$\mathbf{V}' = \mathbf{A}\mathbf{T}^{\mathrm{T}} \, \mathbf{S}\mathbf{T}\mathbf{E}',\tag{3}$$

其中, A 为接收机转换矩阵, T 为传播转换矩阵(上标 T 表示转置矩阵), E'为天线发射电压矩阵, S 为散射矩阵。

天线发射电压矩阵经归一化处理后写为

$$\boldsymbol{E}' = \begin{bmatrix} E_{\mathbf{h}'} \\ E_{\mathbf{v}'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ W_1 e^{\mathbf{j}\beta} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中, W₁ 是双发射通道的电压比, j 是复数符号。 接收机转换矩阵可写为

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{W}_2 \mathrm{e}^{\mathrm{j}\gamma} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{1} \end{bmatrix}, \tag{5}$$

其中, W₂ 是双接收通道的增益比, γ 是双通接收道 相位差。

传播转换矩阵 T 可以用差分传播相移 \$ DP 表示为^[10]

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} e^{-i\phi_{DP}/2} + \tan^2 \alpha & (e^{-i\phi_{DP}/2} - 1)\tan\alpha \\ (e^{-i\phi_{DP}/2} - 1)\tan\alpha & e^{-i\phi_{DP}/2}\tan^2\alpha + 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$
其中, α 为水成物粒子倾斜角。

引入误差后,差分反射率式(2)可以表示为

$$Z_{\rm drw} = \frac{\langle \mid V_{\rm h'} \mid {}^2 \rangle}{\langle \mid V_{\rm v'} \mid {}^2 \rangle},\tag{7}$$

式中,下标"w"表示引入了误差。

为讨论双发射通道相位差的影响,不妨假设 W_1 、 W_2 均为1,则由式(3)~(7)得差分反射率为

4 期 No. 4 梁海河等:双偏振天气雷达同时收发模式的一种改进方法

LIANG Hai-He et al. An Improved Method on the Simultaneous Transmission Scheme of ...

$$Z_{\rm drw} = \frac{|s_{\rm hh}e^{-j\phi_{\rm DP}}\cos^2\alpha + s_{\rm vv}\sin^2\alpha - (s_{\rm hh}e^{-j\phi_{\rm DP}} - s_{\rm vv})e^{j\beta}\sin\alpha\cos\alpha |^2}{|s_{\rm hh}e^{j(\beta-\phi_{\rm DP})}\sin^2\alpha + s_{\rm vv}e^{j\beta}\cos^2\alpha - (s_{\rm hh}e^{-j\phi_{\rm DP}} - s_{\rm vv})\sin\alpha\cos\alpha |^2},\tag{8}$$

差分反射率 Z_{DR}的误差 ΔZ_{DR}(以 dB 表示)为

$$\Delta Z_{\rm DR} = Z_{\rm DRw} - Z_{\rm DR}, \qquad (9)$$

式中 ZDRw表示以"dB"表示的引入误差后的差分反射率因子。

根据式(8)、(9),得差分反射率误差为

$$\Delta Z_{\rm DR} = 10 \, \lg \frac{\mid e^{-j\phi_{\rm DP}} \left(\cos^2 \alpha - e^{j\beta} \sin \alpha \, \cos \alpha\right) + \left(\sin^2 \alpha + e^{j\beta} \sin \alpha \, \cos \alpha\right) Z_{\rm dr}^{-1/2} \mid^2}{\mid e^{-j\phi_{\rm DP}} \left(e^{j\beta} \sin^2 \alpha - \sin \alpha \, \cos \alpha\right) Z_{\rm dr}^{-1/2} + e^{j\beta} \cos^2 \alpha + \sin \alpha \, \cos \alpha \mid^2}.$$
(10)

对上式进一步化解,得

$$\Delta Z_{\rm DR} = 10 \, \log \frac{Z_{\rm A}^2 + Z_{\rm B}^2}{Z_{\rm C}^2 + Z_{\rm D}^2},\tag{11}$$

其中,

$$Z_{\rm A} = \cos\phi_{\rm DP}(\cos^2\alpha - \sin\alpha\cos\alpha\cos\beta) + \sin\alpha\cos\alpha \cdot (Z_{\rm dr}^{-1/2}\cos\beta - \sin\beta\sin\phi_{\rm DP}) + Z_{\rm dr}^{-1/2}\sin^2\alpha, \quad (11a)$$

 $Z_{\rm B} = \sin\alpha \cos\alpha (Z_{\rm dr}^{-1/2} \sin\beta - \sin\beta \cos\phi_{\rm DP} +$

 $\cos\beta\sin\phi_{\rm DP}) - \cos^2\alpha\sin\phi_{\rm DP}, \qquad (11b)$

 $Z_{\rm C} = \left[\cos\phi_{\rm DP}(\sin^2\alpha\cos\beta - \sin\alpha\cos\alpha) + \sin^2\alpha\sin\beta \cdot \sin\phi_{\rm DP}\right] Z_{\rm dr}^{1/2} + \cos^2\alpha\cos\beta + \sin\alpha\cos\alpha, \qquad (11c)$

$$Z_{\rm D} = \left[\sin^2 \alpha \sin\beta \cos\phi_{\rm DP} - \sin\phi_{\rm DP} (\cos\beta \sin^2 \alpha - \right]$$

 $\sin\alpha\cos\alpha]Z_{\rm dr}^{1/2} + \cos^2\alpha\sin\beta. \qquad (11d)$

由式(11)可知,差分反射率误差不仅与水成物 的倾斜角有关,还与差分传播相移有关。在强风切 变区,雨滴可在较长距离上出现平均倾斜角,这种 情况常发生在近地面层。有的观测^[11]认为,在高 度 10 m 处,倾斜角可以达到 10°,但随高度增加倾 斜角减小很快,当在 80 m 处时,倾斜角已减小为 2°。在线性水平风中,由计算倾斜角的模式^[11]模拟 的垂直风切变(水平风随高度的变化,取极大值 0.01 m/s)在近地面上(垂直速度取为 0 m/s)所 产生的倾斜角为 0.6°(假定雨滴下落末速度为上限 值 9 m/s)^[5]。这种强风切变可以出现在强风暴湍 流区中,但是不能在传播距离上维持,而且风切变 方向不是同向的。

在空间均匀区域,当水平风加速时,在加速方 向上会产生相对气流运动,则雨滴会出现倾斜且对 称轴平行于相对气流方向。气流加速通常与湍流相 关,气流加速在时空上是随机的,因而雨滴的平均 倾斜角应近于零。所以,雨滴即时的倾斜角可呈现 各种方式,但就平均而言,由湍流引起的平均倾斜 角近于零。

对于固态水成物,风切变和湍流引起的倾斜可 能大于雨滴,这是由于固态水成物(如冰雹、冰晶、 雪等)的形状并不像雨滴那样具有比较规则的形状 (如椭球、锥体,空柱状、子弹体形、针状等)。虽 然固态水成物的形状和取向还没有完全理解,但冰 雹在下落过程中存在着翻滚现象^[12],冰晶、雪的倾 斜角方差最大可达到 3°~15°^[13],因此,发射波的 偏振状态选择应考虑对水成物倾斜角的不敏感性。

电磁波的偏振状态会受到传播效果的影响,通 常这种影响与降雨强度和水成物类型相关。理论计 算表明,在雨滴指数分布假定下,在 90 km 的双程 传播路径(区域)上,存满了 25 mm/h 的强降水时, 差分相移 ϕ_{DP} 为 180°(差分相移因子 $K_{DP}=2°/km$); 存满 8 mm/h 降水时, ϕ_{DP} 为 45°($K_{DP}=0.5°/km$) (参见文献[3]中的图 14、15)。在实际中,当一个 飑线的走向与雷达径向波束一致时, ϕ_{DP} 可以达到 180°($K_{DP}=1\sim2°/km$)。对于固态水成物, ϕ_{DP} 是一 个不敏感的偏振参量,它的取值通常较小^[12]。因 此,一般地说(非严格意义),当 ϕ_{DP} 较大(如 $\phi_{DP}=$ 90°~180°)时意味着在较大区间存在着较强的降 雨;当 ϕ_{DP} 较小时(如 $\phi_{DP}<$ 90°)则可能意味着较小 的降雨或固态降水。所以,对传播效果(ϕ_{DP})的考 虑,有利于选择适宜的发射波的偏振状态。

根据式(11),图 1、2 分别给出了差分反射率 误差 Δ*Z*_{DR}随双发射通道(H、V)相位差 β、以及差 分相移 ϕ_{DP} 的变化情况(倾斜角取为 α =0.5°)。由 图 1 可知,当 ϕ_{DP} 的取值在 30°到 180°范围时,在 β = 90°处,Δ*Z*_{DR}取最大值为 0.16 dB(当 α =1°时,相应 Δ*Z*_{DR}=0.32 dB)。图 2 表明,当 β =90°时,Δ*Z*_{DR}随 ϕ_{DP} (0~360°)变化的误差为最小,它的最大值出现 在 ϕ_{DP} =90°时,max(ΔZ_{DR})₉₀=0.16 dB(Max 表示 最大值,下同);当 β =0°和 180°时, ΔZ_{DR} 随 ϕ_{DP} (0~ 360°)变化的误差为最大,它的最大值出现在 ϕ_{DP} = 180°时,max(ΔZ_{DR})₀=0.32 dB。对比在 β =90°和 β =0°时的变化曲线可知,当 ϕ_{DP} <90°时,(ΔZ_{DR})₉₀ 与(ΔZ_{DR})₀的差异比较小,在 0.1 dB 左右;当 ϕ_{DP}



图 1 差分反射率误差 ΔZ_{DR} 与双通道相位差 β 的关系 (ϕ_{DP} 间隔为 30°, 倾斜角取为 $\alpha=0.5^{\circ}$)

Fig. 1 The relations between error of differential reflectivity ΔZ_{DR} and phase difference β for dual transmission ports (ϕ_{DP} interval is 30°, tilt angle $\alpha = 0.5^{\circ}$)



图 2 差分反射率误差 ΔZ_{DR} 与差分相移 ϕ_{DP} 的关系 (β 间隔为 22.5°, 倾斜角取为 α =0.5°) Fig. 2 The relations between error of differential reflectivity ΔZ_{DR} and differential phase shift ϕ_{DP} (dual transmission ports phase difference β interval is 30°, tilt angle α =0.5°)

>90°时, $(\Delta Z_{DR})_{90}$ 随 ϕ_{DP} 减小, 而 $(\Delta Z_{DR})_{0}$ 随 ϕ_{DR} 增加。所以, 当 β = 90°时, ΔZ_{DR} 的误差总体上为最小, 对测量"中等"或"强"降水时这种优势更为明显。

图 3、4、5 分别给出了在 $\beta = 0^{\circ}$ 、 $\beta = 90^{\circ}$ 、 $\beta = -45^{\circ}$ 时, ΔZ_{DR} 随倾斜角 α 的变化情况。(1) 当 $\beta = 0^{\circ}$ 时(图 3), $(\Delta Z_{DR})_{0}$ 有两个极小值(当 $\phi_{DP} \approx 0^{\circ}$ 和 360°时)、一个极大值(当 $\phi_{DP} \approx 180^{\circ}$ 时); (2) 当 $\beta =$

90°时(图 4), $(\Delta Z_{DR})_{90}$ 有三个极小值(当 $\phi_{DP} \approx 0^{\circ}$, 180°和 360°时)、两个极大值(当 $\phi_{DP} \approx 90^{\circ}$ 和 270° 时); (3)当 β =-45°时(图 5), $(\Delta Z_{DR})_{-45}$ 有三个 极小值(当 $\phi_{DP} \approx 0^{\circ}$, 90°和 360°时)、两个极大值 (当 $\phi_{DP} \approx 45^{\circ}$ 和 225°时)。通过图 3、4 和 5 的对比分 析表明, ΔZ_{DR} 受倾斜角 α 的影响是依次减弱的;特 别当 $\phi_{DP} < 90^{\circ}$ 时,在 β =-45°时, ΔZ_{DR} 的误差为最 小, 且受 α 的影响最不敏感(当 α =3°时, ΔZ_{DR} 的最



图 3 差分反射率误差 ΔZ_{DR} 随倾斜角 α 的变化 ($\beta=0^{\circ}$)

Fig. 3 The relations between error of differential reflectivity ΔZ_{DR} and tilt angle α ($\beta=0^{\circ}$)









大峰值为 0.3 dB)。因此,当 φ_{DP}较小时,选择 β= -45°的椭圆偏振波对粒子的倾斜角不敏感,较适 宜测量固态水成物或"弱"降水。

上述分析表明, 对较强降水和混合型降水的测量和识别, 发射圆偏振波 (β = 90°)时, 偏振参量 ΔZ_{DR} 的误差是最小的, 有利于提高定量测量降水精 度和不同类型降水识别准确度; 发射椭圆偏振波 (当 β =-45°)时, 偏振参量 ΔZ_{DR} 的误差对水成物 的倾斜程度的敏感性明显减弱, 有利于水成物类型 识别和必要时进行倾斜角估算。当 β 处在-45°和 90°附近时所具有的不同特性, 可为实际观测提供 灵活的观测模式, 如对强风暴的体积扫描观测中, 在低仰角可采用发射圆偏振波的观测方式, 在高仰 角可采用发射椭圆偏振波的观测方式。

3 双通道功率差对偏振参量 Z_{DR} 的影响

设由 H 和 V 合成后的椭圆偏振波因 $W_1 \neq 1$ 而 产生的主对称轴倾角偏差为 τ' ,则^[14]

$$\tau' = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2W_1 \cos\beta}{1 - W_1^2} \right) - \frac{\pi}{4}.$$
 (12)

由式(12),图 6 给出了由发射通道功率差 W_1 引起的倾斜角偏差 τ' 随双发射通道相位差 β 的变化情况。当 $W_1=0.1$ dB时,造成椭圆偏振波主轴倾斜角误差 τ' 约为 0.35°。

虽然, $\tau' \neq 0$ 属系统误差,但会使电磁波在传播过程中产生耦合,引起偏振参量测量误差。由 τ'



图 6 双发射通道功率不匹配引起的椭圆偏振波主对称轴的偏差 Fig. 6 The angle error of symmetry axis of ellipse polarization resulting from dual transmission powers mismatching

产生的旋转矩阵R为

$$\boldsymbol{R} = \begin{bmatrix} \cos \boldsymbol{\tau}' & -\sin \boldsymbol{\tau}' \\ \sin \boldsymbol{\tau}' & \cos \boldsymbol{\tau}' \end{bmatrix}, \quad (13)$$

则电磁波的发射、散射和接收过程可以表示为

$$\mathbf{V}' = \mathbf{A}\mathbf{T} \ ^{\mathrm{T}}\mathbf{S}\mathbf{T}\mathbf{R}\mathbf{E}'. \tag{14}$$

这里, 假定 H 和 V 之间的电场耦合仅由于电场倾 斜产生, 接收机转换矩阵在双通道之间没有耦合产 生。上标"T"表示矩阵转置。将式(4)、(5)、(6) 和(13), 代入式(14), 并假定粒子倾斜角为零, 则

$$\begin{bmatrix} V_{\mathbf{h}'} \\ V_{\mathbf{v}'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{\mathbf{h}\mathbf{h}} W_2 e^{\mathbf{j}(\boldsymbol{\gamma} - \boldsymbol{\beta}_{\mathrm{DP}})} (\cos \boldsymbol{\tau}' - \sin \boldsymbol{\tau}' W_1 e^{\mathbf{j}\boldsymbol{\beta}}) \\ s_{\mathbf{v}\mathbf{v}} (\sin \boldsymbol{\tau}' + \cos \boldsymbol{\tau}' W_1 e^{\mathbf{j}\boldsymbol{\beta}}) \end{bmatrix}.$$
(15)

将式(15)代入式(7),得
$$Z_{\rm drw} = \frac{|s_{\rm hh}W_2 e^{j(\gamma - \phi_{\rm DP})} (\cos \tau' - \sin \tau' W_1 e^{j\beta})|^2}{|s_{\rm vv} (\sin \tau' + \cos \tau' W_1 e^{j\beta})|^2}.$$
(16)

由于假定取样体积内粒子大小与形状相同,公 式(16)中的数学期望被消除。由式(16)可知,垂直 发射电场项 $\sin \tau' E_v$ 被引入到了水平发射电场中, 因此,水平和垂直通道的相位差和能量差并不是被 简单地增到了差分传播中。由式(9)和(16),并经 化简得:

$$\Delta Z_{\rm DR} = 10 \, \lg \mid W_2 \mid^2 + 10 \, \lg \mid e^{i(\tau - \phi_{\rm DP})} \mid^2 + 10 \, \lg \frac{\mid (\cos \tau' - \sin \tau' W_1 e^{j\beta}) \mid^2}{\mid (\sin \tau' + \cos \tau' W_1 e^{j\beta}) \mid^2}.$$
(17)

式(17)表明,在假定雷达分辨体积内水成物的倾斜 角为零的情况下,(1)双通道接收机之间的相位差 不影响 Z_{DR} 的测量精度;(2)双通道接收机的功率增 益误差与 Z_{DR} 误差呈线性关系,因此该误差应小于 0.1 dB;(3)发射机双通道之间的功率差异与 Z_{DR} 误 差不是线性的,它将椭圆偏振倾斜的偏差影响也引 入了 Z_{DR} 误差。公式(17)给出了 ΔZ_{DR} 随着双发射 通道功率差 W_1 的变化情况(图略):(1)要保证 $|\Delta Z_{DR}|$ 小于 0.1 dB,则 $|W_1|$ 应小于 0.05 dB;(2) 当 $\beta=90^{\circ}$ 或 $\beta=270^{\circ}$ 时,不论 W_1 取任意值, ΔZ_{DR} 均 等于零。即发射偏振波的偏振状态为圆偏振时, ΔZ_{DR} 不受 W_1 的影响。

4 双偏振多普勒天气雷达同时发射方 式下的改进方案

4.1 方案的总体结构

为降低偏振参量的测量误差,改善观测能力,

并从实现技术的可行性和与多普勒体制的兼容性考 虑,图7给出了双线偏振多普勒方案同时发射方式 的一种改进方案原理图。功分器将发射能量同时送 入垂直和水平偏振两路波导,经由天馈子系统中的 正交模式耦合器将两路偏振波再次合成后发射,合 成后偏振波的偏振状态由两路发射通道的位相差确 定。在接收状态时,正交模式耦合器将返回信号分 解为水平线偏振波和垂直线偏振波两路通道,在接 收子系统中分别经放大、混频、A/D 等预处理后, 在信号和数据处理子系统信号经进一步处理,提取 出信号的偏振参数。该方案的特点是,在垂直通道 增加了移相器、在馈源处增加了偏振状态监视器, 以及水平和垂直通道功率监视器(或定向耦合器用 于功率标定)。功率监视器(或定向耦合器)的作 用是监测(标定)水平和垂直两路通道发射功率的 大小。移相器用于调整双发射通道的相位差,由标 定程序控制,依据偏振状态监视器返回信号,根据 测量需要用来调节 V 通道与 H 通道的位相差。

4 期

No. 4

为了保持与多普勒的水平单偏振模式兼容,在 双偏振多普勒雷达中提供两种工作模式是必要的。 一种是双偏振模式,发射机与功分器/开关相联, 能量经过功分器被等分为 H 和 V 两路,由两路波 导送入天线正交模式耦合器经馈源辐射。接收机分 为 H 和 V 两路通道,分别接收 H 和 V 返回信号。 另一种是水平单偏振模式,在功分器之前的开关将 H 通道接通,而使 V 通道断开,使系统只发射水平 偏振波。

在该总体方案中,主计算机管理和执行任务初 始化、处理调度、资源管理、状态监控、数据转化, 并通过标准的异步串行口实现对天线控制和数据获 取单元(DAU)的连接。实时主处理器控制各种功 能单元,这些功能单元包括数字信号处理器、同步 和主机。同步器按照精确的时间间隔,依据脉冲发 射、信号接收、信号处理的请求发出数字指令,并 按照设备测试和定标的要求产生相应的指令。

接收机系统采用双通道数字中频接收机,来自 双(或单)接收机的数据信号直接进入信号处理器 (DSP)子系统,可编程 DSP子系统完成数据预处 理标度、地物滤波、各阶谱估计,可获取的偏振变 量为差分相位、差分反射率、相关系数等。新的信 号处理器必须考虑到它的可升级性,留有足够的内 存空间以备一些新算法的使用,如速度退模糊算 法、相位编码以及再新增偏振参量算法等。

该方案通过调整 H、V 发射通道间的相位差, 接收 H、V 返回信号的偏振天气雷达方式的优点可 以表述为:



20: 发射机 Transmitter; 13: 水平单偏振和双偏振开关 Single H and dual polarimetric switch;
 15: 单偏振多普勒信号通道 Single polarimetric Doppler signal channel; 16: 功分器 Power splitter;
 20: 移相器 Phase shifter; 22、23、24: 开关 Switch; 30: 正交模式耦合器 Orthomode coupler;
 30H: 水平通道 H port; 30V: 垂直通道 V port; 31: 偏振状态监视器 Polarization status monitor;
 32: 馈源 Feed; 34: 偏振状态监视信号 Polarization status monitor signal; 36: 反射体 Reflector;
 35: 相位驱动信号 Phase driver signal; 41、42: 接受机 Receivers; 50: 数字信号处理器 Digital signal processor

图 7 双偏振多普勒雷达系统在同时发射方式下的一种改进方案框图

Fig. 7 An improved scheme of simultaneous transmission on dual polarimetric Doppler weather radar

(1)改善偏振参量测量精度。双发射通道相位 差在 90°附近时,偏振参量 ΔZ_{DR}的总体误差为最 小,有利于提高定量测量降水精度和不同类型降水 识别准确度;双发射通道相位差约在-45°附近时, 偏振参量 ΔZ_{DR}的误差对水成物的倾斜程度的敏感 性明显减弱,有利于水成物类型的识别。

(2)改善信噪比 (SNR),提高偏振参量测量能力。由于线或圆偏振的交叉极化接收信号是"弱"信号,在弱回波测量时,交叉极化信号会被"淹没"在接收机噪声中^[5]。采用接收 H、V 信号方式,改变了传统圆/线偏振雷达接收正交和交叉极化信号的接收方式,双接收通道中均为"强"信号。

(3) 直接测量圆(椭圆)退偏振比(EDR)。测量 EDR 的好处在于可获得比线退偏振比LDR 更好的 SNR 和动态范围,且 EDR 对粒子倾斜角的敏感性弱于线退偏振比(LDR)。CSU-CHILL 雷达曾作过一次试验观测^[15],其中对比了椭圆退偏振比EDR(利用 H、V通道返回信号和它们的相关系数获得)与线退偏振比LDR,结果表明EDR 与 LDR 沿距离的变化趋势基本一致,但 EDR 高于 LDR 约10 dB。这个差值接近于此前的理论预测值(约15 dB)^[16]。

(4)利用线、圆或椭圆偏振波的不同特性,可 在实际的体积扫描观测中的不同仰角间提供灵活的 观测模式,改善降水测量和强对流云体上部的水成 物识别能力。利用发射不同偏振状态偏振波的退偏 振比 EDR 对冰晶等识别的模拟和观测试验^[13,17,18], 表明椭圆退偏振比是一个优于线退偏振比的参量, 其动态范围和相对于倾斜角的不敏感性好于线退偏 振比。

(5)在实现技术上相对简单,既避免了大功率 高隔离度微波旋转开关,又不必在脉冲间控制双通 道相位差。采用单发射机在交替脉冲间控制发射 +45°/-45°线倾斜偏振波的方式^[3],在实现技术上 难度很大,而非脉间转换控制移相器和偏振状态监 视技术在国外气象偏振雷达中已经使用。移相器的 本质是通过改变电磁波相对传输长度而达到改变相 位的目的(一个波长对应 360°),机械式移相器(相 位延迟片,PRP)适合于大功率的气象偏振雷达使 用,且具有技术简单、精度高的优点。PRP 分为几 个工作档,最大误差为 2.6°/180°(K 波段 8 mm 波 长时)^[17,18]。对于 S (100 mm)和 C (50 mm) 波段 雷达,这一机械加工的精度还将提高。另一方面, 移相器误差是系统误差,可通过标定技术进行参量 计算补偿,因此该方案在当前技术条件下完全可 行。为检验该探测理论和技术方案的有效性,在技 术实现中可以采用更为灵活的试验方案。依据理 论计算结果,将 PRP 的双发射通道相位差确定为 一45°和 90°两个机械档,在略去偏振状态监视器 和功率监视器之后,通过标定技术测量后把偏振 状态和相位误差、功率误差引入到偏振参量中进 行计算补偿。这种简化方案将更经济且可操作易 实现。

4.2 双线偏振多普勒天气雷达的天馈和信号处理 系统

天馈系统的设计和改造是双线偏振升级的关键 之一。由于改造后的天线辐射性能会降低,必须采 取相应的措施以降低旁瓣以及水平垂直辐射不匹配 等问题的影响^[19]。馈源喇叭、偏振状态监测器和 正交模式耦合器在物理结构上应纵向相衔接,馈源 支撑杆可用波导代替,以尽可能减小遮挡物。正交 模式耦合器的 H 和 V 接入口以前后交错分布为 宜,与支撑杆间的固定螺口母片也应取为纵向,以 降低阻挡面积。

偏振多普勒天气雷达信号处理算法是基于对一 系列发射脉冲的返回信号离散取样后,要求同时进 行谱估计和偏振参量的估算。由于采用了先进的数 字中频技术,回波强度值直接由"I"、"Q"信号估 算。在水平单偏振模式下,除可获得水平反射率、 径向速度和速度谱宽外,还可以获得线性退偏振 比 LDR。在双线偏振模式下,可获取差分反射 率、差分相移和相关系数。图 8、9 分别给出了双 线偏振多普勒系统在水平单偏振模式和双线偏振 模式下的信号处理框图。信号提取算法可参考文 献[14]。

双线偏振多普勒天气雷达对天线、微波电路 (如极化器或正交模式耦合器),甚至于发射和接收 通道中的各种部件都有相当严格的要求。这是由于 降水介质中的偏振效应相对较小,决定了偏振雷达 系统中必须使用精确的仪器设备。文献[14]对正 交模式耦合器的隔离度、双通道接收机的匹配状 况、相位控制精度、双通道馈源指向误差等均给 出了技术指标或标定要求。限于篇幅,这里不再 叙述。



图 8 双线偏振多普勒系统同时发射方式下改进方案的水平单偏振模式信号处理框图

Fig. 8 Digital signal process diagram of single H polarization mode for dual polarimetric Doppler weather radar system with simultaneous transmission



图 9 双线偏振多普勒系统同时发射方式下改进方案的双线偏振模式信号处理框图

Fig. 9 Digital signal process diagram of double H-V polarization mode for dual polarimetric Doppler weather radar system with simultaneous transmission

5 总结

本文从偏振参量估算精度、技术实现可行性和 应用目的考虑,对同时发射方式下的偏振多普勒方 案提出了一种改进方法。该方法采用移相器技术, 可调节垂直通道与水平通道的相位差,合成所需要 的任意偏振波(如倾斜 45°线偏振、圆、椭圆偏振 波),可提高偏振天气雷达对降水观测和水成物识 别能力,以适用于常规业务观测、科学试验研究、 人工影响天气和航空气象保障等领域的应用需求。

偏振多普勒天气雷达的体制是一个复杂的、综 合的科学问题,任一种偏振模式都有其优势和不 足。本文仅从理论上探讨了同时发射方式的一种改 进方法,这种方法的有效性还应在实际工作中进行 对比试验。

参考文献 (References)

- Seliga T A, Bringi V N. Differential reflectivity and differential phase shift Applications in radar meteorology. *Radio Science*, 1978, 13: 271~275
- [2] Bringi V N, Hendry A. Technology of polarization diversity radars for meteorology. *Radar in Meteorology*. D. Atlas, Ed. Boston: American Meteorological Society, 1990. 153~190
- [3] Sachidananda M, Zrnic D S. ZDR measurement considerations for a fast scan capability radar. *Radio Science*, 1985, 20 (4): 907~922
- [4] Brunk D, Bringi V N. A description of CSU-CHILL national radar facility. J. Atmos. Oceanic Technol., 2000, 17: 1596~ 1608
- [5] Doviak R J, Bringi V, Ryzhkov A, et al. Considerations for polarimetric upgrades to WSR - 88D radars. J. Atmos. Oceanic Technol., 2000, 17: 257~278
- [6] Schuur T J. The joint polarization experiment An operational test of weather radar polarimetry. 2002, http://www. nssl. noaa.gov
- [7] Schuur T J, Elvander R C, Simensky J G, et al. Joint polarization experiment (JPOLE) for the WSR-88D radar: plans and progress. Preprints, 18th International Conference on Interactive Information and Processing Systems (IIPS), Orlando, Florida, Boston: American Meteorological Society, 2002
- $\left[\ 8 \ \right]$ Ryzhkov A V, Zrnic D S. Polarimetric rainfall estimation in

the presence of anomalous propagation. J. Atmos. Oceanic Technol., 2000, **15**: 1320~1330

- [9] Ryzhkov A V. Interpretation of polarimetric radar covariance matrix for meteorological scatterers: Theoretical analysis. J. Atmos. Oceanic Technol., 2001, 18: 315~328.
- [10] Doviak R J, Zrnic D S. Doppler radar and weather observations. San Diego: Academic Press, 1993. 562 pp
- [11] Brussard G. A meteorological model for rain-induced cross polarization. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 1978, AP – 24: $5\sim11$
- [12] Straka J M, Zrnic D S, Ryzhkov A V. Bulk hydrometeor classification and quantification using polarimetric radar data: Synthesis of relations. J. Appl. Meteor., 2000, **39**: 1341~1372
- [13] Reinking R F, Matrosov S Y. Evaluation of 45° slant quasilinear radar polarization state for distinguishing drizzle droplets, pristine ice crystal, and less regular ice particles. J. Atmos. Oceanic Technol., 2002, 19: 296~321
- [14] 梁海河. 基于 WSR-98D 双线偏振多普勒天气雷达技术方案的研究.中国气象科学研究院博士学位论文. 2003 Liang Haihe. A study on dual polarimetric upgrades for WSR-98D in China. Ph. D. dissertation (in Chinese), Chinese Academy of Meteorological Sciences. 2003
- [15] Holt A R, Bringi V N, Brunkow D. A comparison between parameters obtained with the CSU-CHILL radar from simultaneous and switched transmission of vertical and horizontal. 29th Conference on Radar Meteorology. 1999
- [16] Torlaschi E, Holt A R. A comparison of different polarization schemes for the radar sensing precipitation. *Radio Science*, 1998, 3: 1335~1352
- [17] Reinking R F, Matrosov S Y, Bruintjes R T, et al. Identification of hydrometeor with elliptical and linear polarization Ka-band radar. J. Appl. Meteor., 1997, 36: 322~339
- [18] Matrosov S Y, Reinking P R, Kroprli R A. On the use of radar depolarization ratios for estimating shapes of ice hydrometeors in winter clouds. J. Appl. Meteor., 2001, 40: 479~ 490
- [19] 梁海河,刘黎平,徐宝祥. CINRAD/SA 雷达天线的辐射特性 分析及其支持双线偏振升级的可行性研究. 气象学报(接受 待发表)

Liang Haihe, Liu Liping, Xu Baoxiang. CINRAD/SA antenna radiation characters analysis and its feasibility for dual polarimetric upgrades. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), in Press