

文章编号: 2096-1618(2024)06-0682-07

双偏振天气雷达时域和频域回波信号仿真方法对比研究

杨瑾娴, 李学华, 谭宏秀, 魏若雯, 代少君

(成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225)

摘要:相比雷达实验,通过仿真产生双偏振天气雷达回波信号,分析雷达系统性能提高、扫描策略优化、处理算法改进等对雷达观测数据的影响,是一种成本低、见效快、分析全面的有效方法。介绍时域和频域两种不同的双偏振天气雷达回波仿真方法,其中频域仿真方法是以高斯型功率谱为基础,构建天气雷达回波频谱特征,然后通过引入双通道幅度、相位差异及相关性构建水平和垂直两个通道的偏振回波信号。时域仿真方法则是以脉冲信号之间自相关函数为基础,构建回波信号自相关矩阵,然后通过 Cholesky 分解得到水平通道 I/Q 回波信号,并采用类似频域建模方法中的双通道幅度、相位差异及相关系数生成垂直通道的回波信号。仿真结果表明,两种方法都能实现双偏振天气雷达回波的仿真。

关键词:双偏振雷达;频域仿真;时域仿真

中图分类号:TN967.51

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2024.06.006

0 引言

双偏振天气雷达是气象雷达的一种,是监测和预警强对流天气的主要工具。其工作原理是通过发射一系列脉冲电磁波,利用云雾、雨、雪等降水粒子对电磁波的散射和吸收来探测降水的空间分布和垂直结构。天气雷达回波仿真是模拟天气雷达探测到的回波信号的一种方法,可以用来分析雷达系统性能提高、扫描策略优化、处理算法改进等对雷达观测数据的影响。

双偏振天气雷达主要有两种回波仿真方法,即频域仿真^[1]和时域仿真^[2]。频域仿真是通过回波信号的回波功率建模以及功率谱建模,将基本参量和偏振参量加入到频域仿真,经过离散傅里叶逆变换(IDFT)等,生成时域 I/Q 信号;而时域仿真是基于脉冲与偏振之间的统计相关性,建立自相关矩阵、经过 Cholesky 分解等,生成 I/Q 时序信号。两种仿真方法都有各自的优缺点^[3],中国目前没有直接对这两种仿真方法进行比较过。因此,本文介绍两种仿真方法的原理仿真流程,以双偏振天气雷达基数据为基础,分别进行频域仿真和时域仿真进行回波仿真,从仿真的可靠性、仿真数据的精度分析,比较两种回波仿真方法的优缺点。

1 双偏振天气雷达回波信号仿真原理

1.1 双偏振天气雷达时域回波信号仿真原理

时域回波信号仿真是基于脉冲与偏振之间的统计

相关性,建立自相关矩阵,经过 Cholesky 分解等,生成 I/Q 时序信号。时域仿真主要分为自相关矩阵构建、H/V 通道回波功率数学建模和 I/Q 信号生成等 3 大步骤。

1.1.1 自相关矩阵的构建

时域仿真是基于脉冲信号与偏振之间的统计相关性生成 I/Q 时序信号。因此,构建回波信号的自相关矩阵是关键。回波信号自相关矩阵的构建需要先对回波信号自相关函数进行计算,雷达接收信号的自相关函数表达式为

$$R(mT_s) = e^{[-8(\pi\sigma_{\theta}mT_s/\lambda^2)]} e^{-j4\pi vmT_s/\lambda} \quad (1)$$

其中, σ_{θ} 为雷达基数据的谱宽, v 为雷达径向速度,即雷达基数据的速度, λ 为波长。通过速度和谱宽,可建立回波信号自相关函数表示。

在此基础上,根据计算出的自相关函数,构建回波信号自相关矩阵。其公式表示为

$$\mathbf{R}_{x,x} = \begin{bmatrix} r_{1,1} & \cdots & r_{1,N} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{N,1} & \cdots & r_{N,N} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, $r_{i,i} = E\{R_i \cdot R_i^T\}$,对自相关矩阵 $\mathbf{R}_{x,x}$ 进行 Cholesky 分解,可以得到:

$$\mathbf{R}_{x,x} = \mathbf{P} \cdot \mathbf{P}^* \quad (3)$$

\mathbf{P} 为 $\mathbf{R}_{x,x}$ 分解得到的对角和上三角 $N \times N$ 的上三角矩阵。

1.1.2 雷达回波功率数学建模

\mathbf{P}_{rH} 和 \mathbf{P}_{rV} 是两个独立随机信号,它们遵循零均值高斯分布,其标准偏差由反射率值得出。其表达式为:

$$\mathbf{P}_{rH} = \sqrt{P_{rH}} \cdot (g_1(L, N) + i \cdot g_2(L, N)) \quad (4)$$

$$\mathbf{P}_{rV} = \sqrt{P_{rV}} \cdot (g_1(L, N) + i \cdot g_2(L, N)) \quad (5)$$

其中, P_r 为雷达回波功率, g_1 和 g_2 为接收通道随机白

收稿日期:2023-07-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41575022);四川省自然科学基金资助项目(2022NSFSC0214)

噪声, L 为脉冲实现个数, N 为径向内脉冲个数。

根据雷达回波功率的数学建模^[5]可知:

$$P_{r,Hh} = Z_H - c - 20\lg R - \text{Lat} \cdot R \quad (6)$$

$$P_{r,Vv} = Z_H + Z_{dr} - c - 20\lg(R) - \text{Lat} \cdot R \quad (7)$$

$$P_{r,H} = 10^{\frac{P_{r,Hh}}{10}} \quad (8)$$

$$P_{r,V} = 10^{\frac{P_{r,Vv}}{10}} \quad (9)$$

式中, Z_H 为反射率, c 为雷达常数, R 为距离, Lat 为大气损耗。

雷达常数 c 的计算公式为:

$$c = 10\lg\left(2.69 \frac{\lambda^2}{2P_t \tau \theta \varphi}\right) - 2G + 160 + \text{Loss} \quad (10)$$

其中, P_t 为发射峰值功率, τ 为脉冲宽度, θ 为水平波束宽度, φ 为垂直波束宽度, G 为天线增益, Loss 为发射机和接收机损耗之和。

1.1.3 时域 I/Q 信号产生

时域仿真方法产生的 I/Q 时序信号的形式为:

$$x_H(n) = P_{rH} \cdot P \quad (11)$$

$$x_V(n) = [\rho_{HV}(0)P_{rH} \cdot P + \sqrt{1-\rho_{HV}(0)^2} \cdot P_{rV} \cdot P] \cdot \frac{e^{j \cdot \varphi_{dp}}}{\sqrt{Z_{dr}}} \quad (12)$$

其中, $n = 1, 2, 3, \dots, N$, N 为样本数, $\rho_{HV}(0)$ 为相关系数, φ_{dp} 为差分传播相移, Z_{dr} 为差分反射率。

将式(3)计算得出的 P 和式(4)、(5)计算得出的 P_{rH} 和 P_{rV} 代入式(11)和(12), 得到时域 I/Q 信号。

1.2 双偏振天气雷达频域回波信号仿真原理

文献[5]给出了双偏振天气雷达频域回波仿真方法及实现思路,其主要原理是通过 H/V 通道回波信号功率数学建模、H/V 通道的回波功率谱建模,然后生成时序 IQ 信号的过程。在此过程中,实现了输入 6 个雷达基本参量为参考场的双偏振天气雷达回波信号仿真($Z_H, V, W, Z_{dr}, \varphi_{dp}, \rho_{HV}$)。同时增加了发射峰值功率、雷达波长、脉冲宽度、波束宽度、天线增益、接收支路馈线损耗、发射支路馈线损耗、噪声系数、接收机增益、脉冲重复频率、脉冲积累数等重要雷达参数的定量化计算方法,使生成的回波信号受雷达系统参数影响。与时域方法不同的是,频域方法优势首先从功率谱上描述了天气回波的特征,再通过逆傅里叶变化生成 I/Q 信号,没有时域方法的矩阵运算,计算量较小;缺点是频域没有相位信息,用平均速度、速度谱宽和差分传播相移只能反映回波信号总体的平滑效果。

2 仿真实现

2.1 双偏振天气雷达时域仿真实现流程

时域仿真方法的关键在于构建随机信号 P_{rH} 和 P_{rV}

以及回波信号自相关矩阵 $R_{x,x}$ 。下面描述一个距离库的时域仿真过程:

2.1.1 计算 P_{rH} 和 P_{rV}

P_{rH} 和 P_{rV} 与雷达基数据中的反射率数据有关,通过反射率数据计算出雷达回波功率,加入接收通道随机白噪声的影响,得到 P_{rH} 和 P_{rV} 。

2.1.2 计算自相关函数

构建回波信号自相关矩阵,需要先计算出自相关函数,由前面可知,接收信号自相关函数与雷达基数据中的速度和谱宽数据有关,根据式(1),通过该距离库的速度(v)和谱宽(δ_v)数据可以计算出自相关函数。

2.1.3 构建自相关矩阵

已得到了接收信号的自相关函数,再根据式(2),将这些自相关函数构建成一个 $N \times N$ 的自相关矩阵。

2.1.4 Cholesky 分解

对得到的自相关矩阵进行 Cholesky 分解,得到对角线和上三角矩阵 P 及 P^* 。

2.1.5 计算 I/Q 时序信号

由式(11)和(12)可知, I/Q 时序的计算与 $\rho_{HV}(0)$ 相关系数、 φ_{dp} 差分相位、 Z_{dr} 差分反射率有关,将该距离库的相关系数、差分相位、差分反射率以及 P_{rH} 和 P_{rV} 、 P 带入式(11)和(12)中计算获得同相和正交时间序列即(I/Q)数据。

2.1.6 矩估计

通过脉冲对处理(PPP 处理)对时域仿真得到的 I/Q 信号进行谱矩估计,得到 6 个雷达基本参量:反射率、速度、谱宽、差分反射率、相关系数、差分相位。

图 1 为时域回波信号仿真的流程图。按照步骤可实现对一个距离库进行时域仿真,重复该过程,可实现时域仿真方法的整个雷达 PPI 扫描的回波信号仿真。

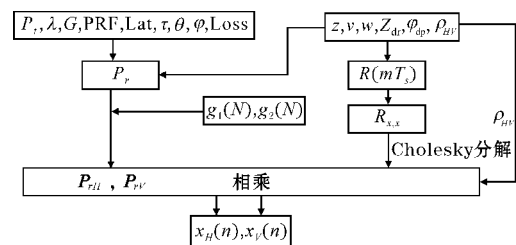


图1 时域回波信号仿真流程图

2.2 双偏振天气雷达频域仿真实现流程

根据文献[5],频域仿真的原理分为 6 个步骤:构建归一化高斯功率谱,雷达回波功率数学建模,回波信号幅频谱建模, I/Q 时序信号产生,加入系统噪声和增益影响,矩估计。通过以上步骤可以实现双偏振天气雷达回波信号的频域仿真。重复该过程将得到每一个

径向中每一个距离库的回波信号,最终可实现整个雷达 PPI 扫描过程的回波信号仿真。

3 结果

仿真实验时,以某 C 波段天气雷达实际基数据文件中的一层 PPI 扫描数据为参考场,雷达仿真参数设

置为:波长 5.3571 cm,峰值功率 250 kw,重复频率 1000 Hz,脉冲累积数 64,脉冲宽度 0.5 μs,波束宽度 1.2°,大气衰减常数 0.16 dB/km,雷达接收和发送馈线的总插损 2 dB,灵敏度 -112 dBm。表 1 给出了一个距离库点参考数据,以及经过频域和时域仿真 I/Q 数据计算得到的反射率因子、差分反射率、差分传播相移和相关系数。

表 1 仿真数据参数估计

基本参量	参考数据	频域仿真数据	时域仿真数据	参考数据与频域数据差值	参考数据与时域数据差值
Z/dBZ	46.80	46.80	46.90	0.00	0.10
v/(m/s)	7.48	7.63	7.47	0.15	0.01
w	0.56	0.48	0.58	0.08	0.02
Z _{dr} /dB	1.73	1.73	1.70	0.00	-0.03
φ _{dp} /°	186.74	186.74	186.46	0.00	0.28
ρ _{HV}	0.994	0.999	0.995	-0.005	-0.001

从表 1 的个例数据分析,频域和时域方法仿真输出反射率因子、速度、谱宽和 3 个偏振参量与参考数据相比,差值较小。图 2 为一个径向仿真数据与参考数据的对比。从径向廓线图来看,频域和时域回波仿真生成的反射率因子、速度、差分反射率、差分传播相移与参考数据的一致性比较好;频域仿真的谱宽一致性比时域仿真方法好,这是因为两种方法构建频谱宽度方法完全不一致,频域方法以高斯函数中的方差为谱宽,时域方法则以自相关函数引入谱宽参数。对于相关系数的仿真来说,时域仿真方法则展现较好的仿真

效果,仿真输出的廓线基本与参考数据一致,而频域方法的仿真结构基本偏大,则相关系数变小时,误差更大。这是因为频域方法中的 H/V 通道信号相关性模型建立在随机序列相关性为 0 的基础上,而有限数量(如 32/64 个)随机序列的相关性不为 0,而且在不同距离库仿真时随机序列相关性不同,这样引起每个距离库的误差不一样;此外这个相关性是在频域建立的,算法后续的计算过程也会影响到 H/V 通道的相关性。此外,频域仿真的差分传播相移出现部分跳变。

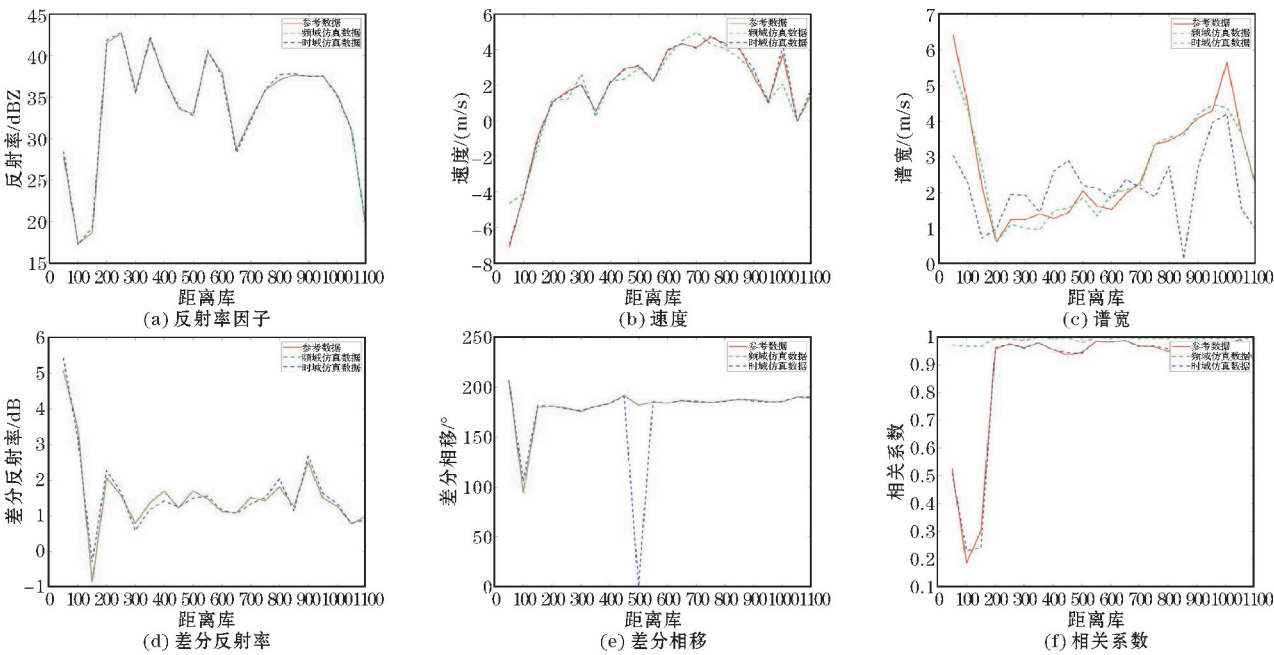


图 2 参考数据、频域仿真数据、时域仿真数据的反射率、速度、谱宽、差分反射率、差分传播相移、相关系数径向廓线图

图 3 为频域和时域仿真数据与参考回波数据的 PPI 图对比,从回波结构和数值分布定性的角度分析,频域和时域两种回波仿真中得到的反射率、速度、差分反射率、差分传播相移,与参考数据同样具有较好的一

致性;但是频域仿真的相关系数,与参考数据相比,明显偏强;时域仿真的谱宽在雷达近距离范围,与参考谱宽数据存在较大差异。

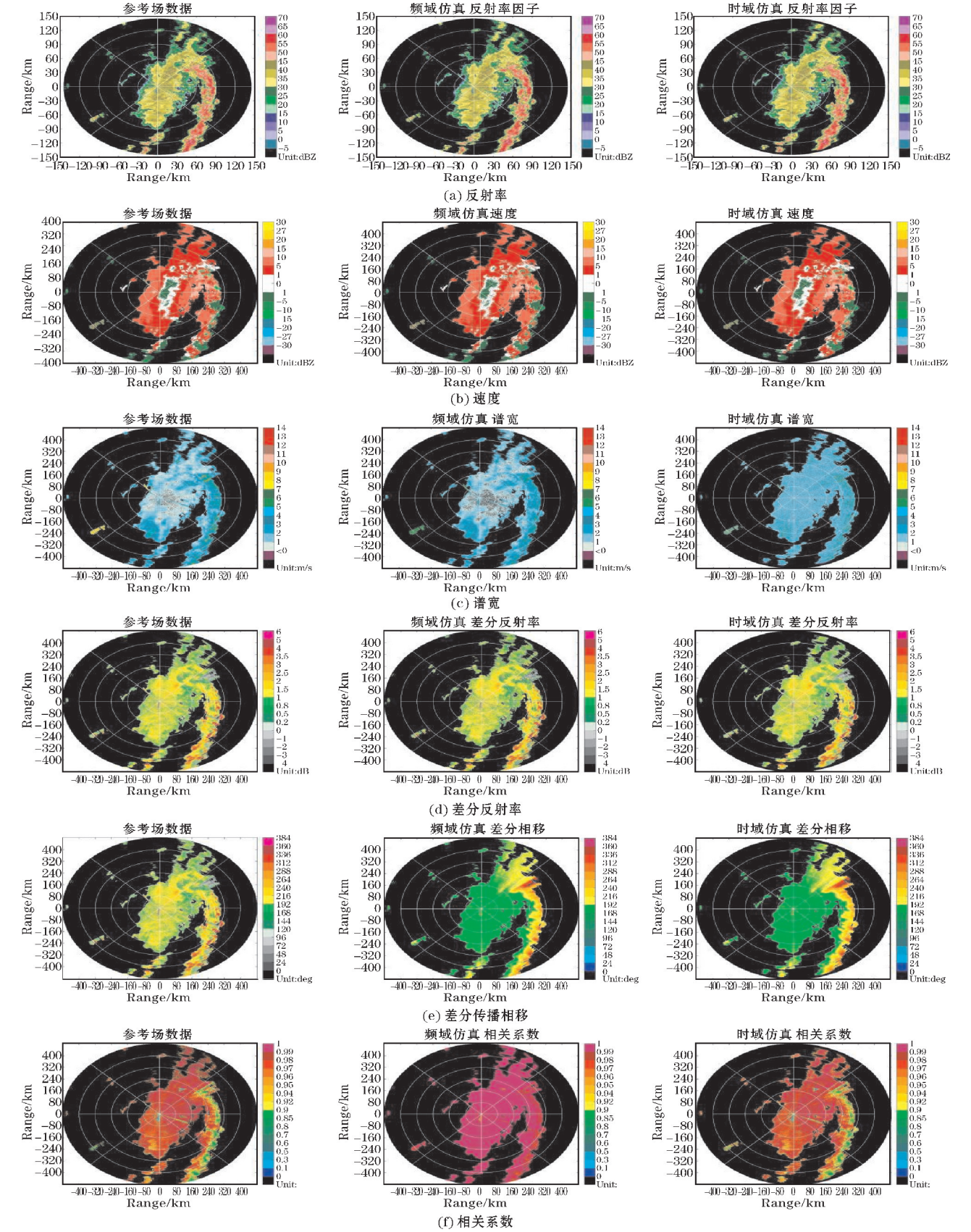


图 3 参考数据、频域仿真数据、时域仿真数据的反射率、速度、谱宽、差分反射率、差分传播相移、相关系数 PPI 图

图 4 为两种仿真方法仿真结果与参考数据的散点图比较。散点图能够直观展示仿真数据与参考场数据之间的差异。图中红色散点代表频域仿真数据,蓝色散点代表时域仿真数据。从图 4 可知,频域方法的反射率因子和差分反射率、差分相位相比时域方法,散点图更集中在直线上,说明频域方法与参考数据一致性更好。两种方法的谱宽离散度皆大,但时域方法明显离散性更差;相关系数与前面分析一致,相关系数小时,频域方法明显仿真效果较差。

为定量对比分析频域和时域两种方法的仿真性能,以平均偏差、标准偏差两个统计量来分析,其中平

均偏差和标准偏差定义分别定义如下:

$$\text{平均偏差: } D = \frac{\sum_{i=1}^n (|X_i - Y_i|)}{n}$$

(13)

$$\text{标准偏差: } \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2 - n \cdot D^2}{n-1}}$$

(14)

式中, X_i, Y_i 分别是不同数据对的反射率因子、速度、谱宽、差分反射率等数据, n 为有效数据。平均偏差越小,说明两个数据的一致性越好,标准偏差表明数据一致性的离散程度,标准偏差越大说明数据一致性分布不集中。

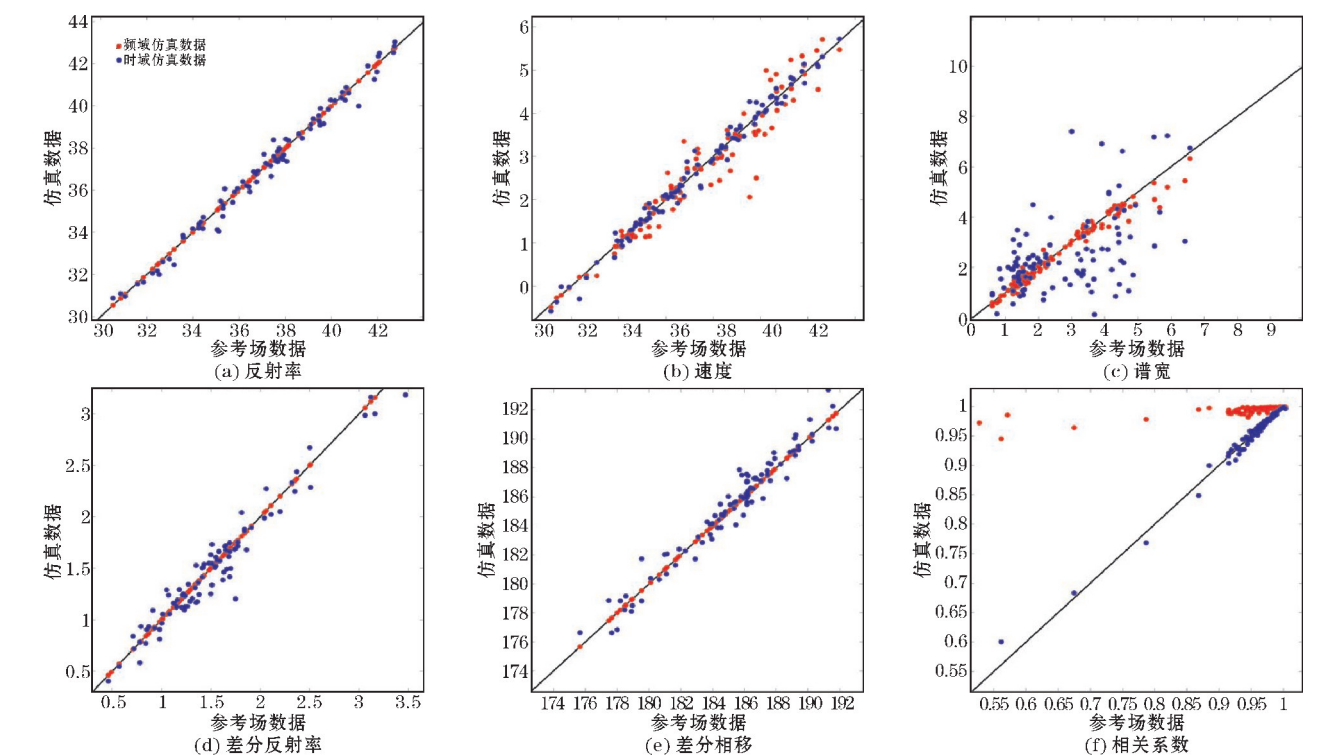


图 4 参考数据、频域仿真数据、时域仿真数据的反射率、速度、谱宽、差分反射率、差分传播相移、相关系数散点图

表 2 为本次分析的平均偏差和标准偏差定量分析结果。从表 2 可知,两种仿真方法的反射率因子平均偏差和标准偏差都小于 0.5 dBZ,速度平均偏差和标准偏差皆小于 1 m/s,差分传播相移平均偏差和标准偏差皆小于 2.5°;对于差分反射率来说,仿真的平均偏差和标准偏差都小于时域仿真方法,这在散点图分布是一

致的。谱宽的标准偏差都大于 1 m/s,其中时域方法效果更差,达 2.24 m/s。

此外,实验中对仿真 I/Q 数据进行幅度分布统计,并通过统计直方图进行分析,结果如图 5 所示。从图 5 可知,H/V 通道的 I 和 Q 信号的都近似零均值高斯分布。

表 2 两种方法的定量统计结果分析

基本参量	频域和参考场平均偏差	时域和参考场平均偏差	频域和参考场标准偏差	时域和参考场标准偏差
Z/dBZ	0.157	0.259	0.231	0.365
v/(m/s)	0.471	0.113	0.892	0.184
w	0.259	1.155	0.531	2.236
Z _{dr} /dB	0.283	0.163	0.819	0.248
φ _{dp} /°	1.218	0.934	2.235	0.875
ρ _{HV}	0.114	0.008	0.212	0.018

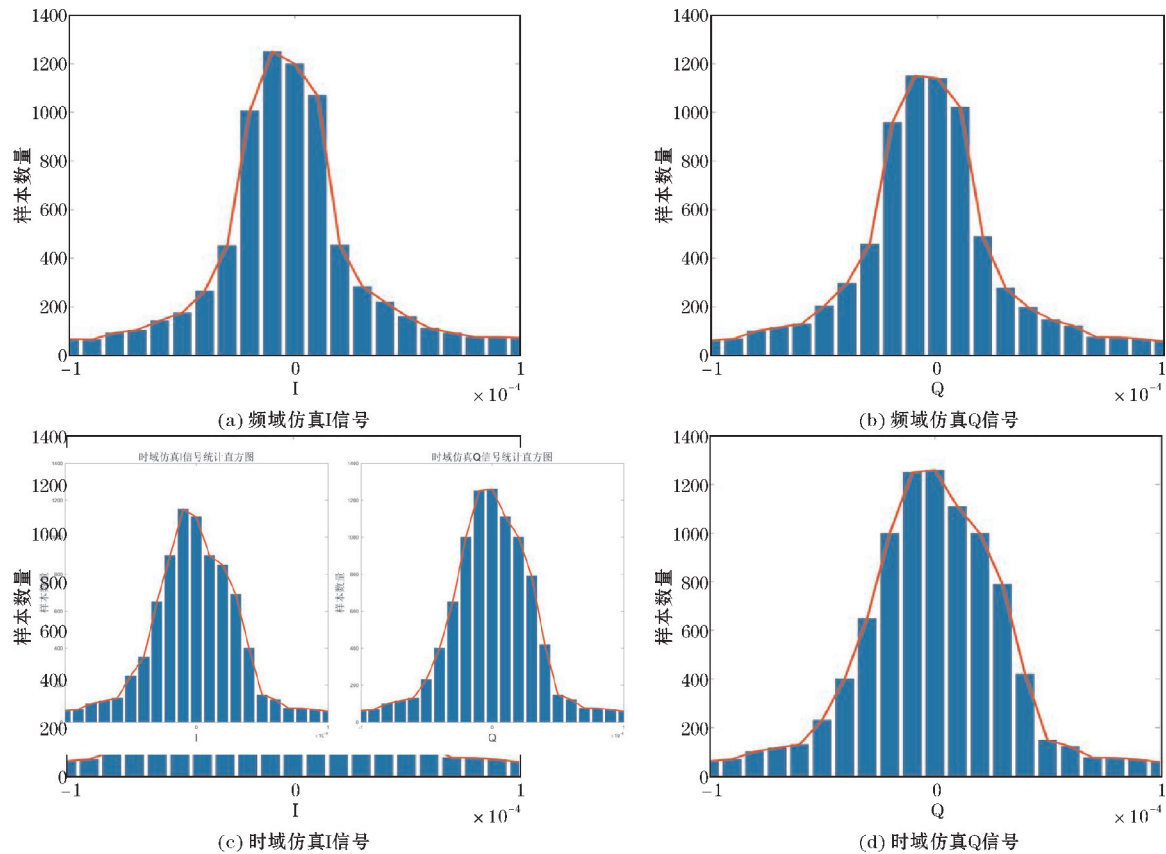


图 5 时域仿真 H/V 通道 I/Q 信号统计直方图

4 结束语

针对目前存在的时域和频域天气雷达仿真方法问题,本文介绍了双偏振天气雷达的时域和频域回波仿真方法及原理,并叙述了两种回波仿真流程。通过对时域和频域两种方法的仿真实验,从径向廓线、回波结构、散点图、统计结果等不同角度,对两种方法的仿真结果进行对比分析。结果表明:时域和频域方法都可实现双偏振天气雷达回波仿真,其中两种方法仿真的反射率因子、速度、差分反射率、差分传播相移与参考数据一致性较好;在谱宽仿真方面频域仿真优于时域仿真,而相关系数的仿真,时域仿真优于频域仿真。综合而言,时域仿真和频域仿真方法各自存在优缺点。在选择使用时域回波仿真方法或频域回波仿真方法时,需要充分考虑具体的应用场景和需求。值得一提的是,本文工作目前主要为高仰角天气雷达回波仿真,在后续研究中,将继续开展有地物污染和同频干扰等方面的工作。

参考文献:

[1] Schwartzman D, Curtis C D. Signal Processing and

Radar Characteristics (SPARC) Simulator: A Flexible Dual-Polarization Weather-Radar Signal Simulation Framework Based on Preexisting Radar-Variable Data[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2019, 12 (1): 135–150.

[2] Chen H, Gentile R. Phased array system simulation [C]. 2016 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology (PAST), Waltham, MA, USA, 2016.

[3] 孙佳敏. SAR 回波仿真技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.

[4] 唐顺仙, 李睿, 史朝, 等. 天气雷达回波模拟系统的设计与实现[J]. 电子技术应用, 2014, 40 (11): 136–142.

[5] Dai S, Li X, Bu Z, et al. Signal Simulation of Dual-Polarization Weather Radar and Its Application in Range Ambiguity Mitigation [J]. Atmosphere, 2022, 13(3): 432–449.

[6] 王海江, 刘玟宏, 邓洋洋, 等. S 波段多普勒天气雷达回波模拟[J]. 成都信息工程大学学报, 2016, 31(1): 12–17.

[7] Zrni' c D S. Simulation of weatherlike Doppler

- spectra and signals [J]. J. Appl. Meteorol, 1975, 14:619–620.
- [8] Torres S M. Estimation of Doppler and Polarimetric Variables for Weather Radars. Ph. D. Thesis [D]. University of Oklahoma, Norman, OK, USA, 2001.
- [9] Cheong, L B, Palmer, et al. A Time Series Weather Radar Simulator Based on High-Resolution Atmospheric Models [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2008, 25(2):230–243.
- [10] Galati G, Pavan G. Computer simulation of weather radar signals. Simul. Pract. Theory 1995, 3:17–44.
- [11] 高志球, 肖艳姣, 袁立功, 等. 天气多普勒雷达回波信号处理的模拟试验 [J]. 遥感技术与应用, 1998(4):43–49.
- [12] 高梦青, 王海江, 李静, 等. 基于物理模型的双极化多普勒天气雷达回波模拟 [J]. 成都信息工程大学学报, 2020, 35(2):129–133.

Comparison between Frequency Domain Echo Simulation Method and Time Domain Echo Simulation Method of Dual Polarization Weather Radar

YANG Jinxian, LI Xuehua, TAN Hongxiu, WEI Ruowen, DAI Shaojun

(College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: Compared with radar test, it is an effective method with low cost, quick effect, and comprehensive analysis to generate dual-polarization weather radar echo signal through simulation and analyze the influence of radar system performance improvement, scanning strategy optimization, and processing algorithm improvement on radar observation data. In this paper, two different simulation methods of dual-polarization weather radar echo in the time domain and frequency domain are introduced. The frequency domain simulation method is based on the Gaussian power spectrum to construct the spectrum characteristics of weather radar echoes, and then the horizontal and vertical polarization echo signals are constructed by introducing dual channel amplitude, phase difference, and correlation. The time domain simulation method is based on the autocorrelation function between pulse signals and builds the echo signal autocorrelation matrix. Then, the horizontal channel I/Q echo signal is obtained by Cholesky decomposition, and the vertical channel echo signal is generated by using the double-channel amplitude, phase difference and correlation coefficient similar to the frequency domain modeling method. The simulation results show that both methods can realize the simulation of dual-polarization weather radar echoes.

Keywords: dual polarization radar; frequency domain simulation; time domain simulation