

文章编号: 2096-1618(2020)02-0129-05

基于物理模型的双极化多普勒天气雷达回波模拟

高梦青¹, 王海江¹, 李 静², 王国强², 徐自励²

(1. 成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225; 2. 中国民航局第二研究所, 四川 成都 610041)

摘要:利用降水回波的物理特性模拟回波, 可以为天气雷达提供接近真实的测试信号, 节省了天气雷达研发、维护的时间和成本。双极化天气雷达测量降雨的理论依据于水滴是扁椭球形。雨滴大小采用指定的 Marshall-Palmer 分布描述, 并且其均匀分布于由雷达参数所决定的雷达分辨率体积内, 回波信号就是所有雷达分辨率体积内散射电场的叠加。通过分析双极化天气雷达回波特性, 建立回波的数学模型。该模拟方法的输入是雨滴参数、标准天气雷达参数、风速和角度值。输出参数是 I、Q 回波的电压形式, 该模型有效地模拟了降水散射体的回波, 也表明基于空间物理特性的双极化天气雷达模拟是能够实现的。

关键词:双极化多普勒天气雷达; 最小二乘拟合; 轴比; 水平反射率; 垂直反射率; 径向速度

中图分类号: TN958.2

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2020.02.001

0 引言

天气雷达系统的核心是接收机信号处理部分, 在天气雷达的生产、研发中, 对雷达接收机的信号处理质量的评估是必不可少的一个环节, 在这个过程中需要为天气雷达提供一个有效的信号源。如果能够模拟逼近真实天气雷达接收的回波序列, 这不仅仅能优化雷达系统设计参数, 还能够有助于改进天气雷达的性能, 提高天气雷达的研发效率。Carlo Capsoni 等^[1]在之前的研究基础上, 对多参数的极化雷达进行模拟, 比之前的模拟器更加完善, 考虑了水滴具有不同形状和大小, 对湍流等进行模拟, 对每个离子的贡献进行估计, 也对差分发射率的估计进行了调查。对 S 波段的气象雷达的仿真结果和测试结果进行了比较, 发现在绝大多数情况下, 都具有 consistency, 但是没有生成时间序列。文献[2]开发了一种雷达信号模拟器, 该模拟器使用气象场景的三维物理模型。模拟的气象场分辨率体积由一种先进的区域预报系统(the advanced regional prediction system, ARPS)提供, 在大气场中的雷达分辨率体积内看成有成千上万的散射小球, 每个小球的幅度和相位决定该小球的回波, 每个散射小球回波的相干叠加形成雷达回波, 然而该模拟方法只提供谱矩。文献[3]采用 APRS 得到气象目标的微物理特性, 利用 T 矩阵方法模拟了超级单体风暴。同年, 文献[4]使用天气预报模式(weather research forecast, WRF)对一次冬季风暴进行仿真。文献[5]设计了一个基于微物理模

型的航空电子天气雷达观测器的模拟器。文献[6]采用天气预报模式和转移矩阵(T-Matrix)编码结合的方法, 根据协方差矩阵来产生雷达信号, 将霰、冰雹等考虑到模拟器中, 模拟了 3D 的场景和天线扫描, 并进行了真实场地建设, 将该模拟算法应用到真实天气雷达上测试数据来确认之前的成果, 并得到了较好的效果。文献[7]基于微物理特性的风场对机载雷达回波进行仿真。

综上, 提供带有极化信息的气象回波信号对于双极化多普勒天气雷达的研发和测试尤为重要。但提及的模拟方法需要真实的天气数据作为支撑, 模拟系统的运算量大。文中在已有的方法上, 利用降水回波的物理特性模拟双极化多普勒雷达回波。该方法基于理论依据提供降雨目标的气象参数, 从而实现气象场景的建模, 并使用 T 矩阵法计算降雨粒子的电磁散射矩阵, 从而实现不同极化波的雷达回波模拟。通过对比分析水平极化波和垂直极化波的模拟结果, 表明该方法的双极化仿真的有效性和可靠性。

1 双极化天气雷达回波信号模拟原理

双极化天气雷达的降雨测量基于水滴是扁椭球形。在静止的空气中, 水滴以短轴垂直于地的方式降落。虽然雨滴在下落过程中会产生多种外形, 但此次模拟实验中只假设水滴形状满足扁椭球形, 并以短轴垂直于地的方式降落。 b 为主轴长度, a 为短轴长度, 其中轴比 b/a 与等效体积球形雨滴直径 D_e 关系式为^[7]

收稿日期: 2019-11-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1733103); 四川省科技厅资助项目(2018JZ0030)

$$D_e = 2 \left\{ (T_s / g \rho_w) \left[(b/a)^2 - 2(b/a)^{1/3} + 1 \right] (b/a)^{1/3} \right\}^{1/2} \quad (1)$$

其中, $T_s = 72.75 \times 10^{-3} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ 是水的表面张力, g 是重力加速度, ρ_w 为水密度。仿真设定最大等效直径(直径皆代表等效直径 D_e) 为 15 mm。根据式(1), 确定轴比 b/a 与等效直径 D_e 的关系, 假设轴比的范围从 1 ~ 2.2, 可求出对于区间内的等效直径 D_e 的分布, 实验中需要先确定等效直径大小, 然后通过等效直径大小反求出轴比 b/a , 但是直接对式(1)进行求解是困难的, 此时选择用最小二乘算法对轴比和等效直径的分布曲线进行拟合, 通过设定不同的等效直径精度和范围, 可得出对应的轴比大小。拟合效果图如图 1 所示。

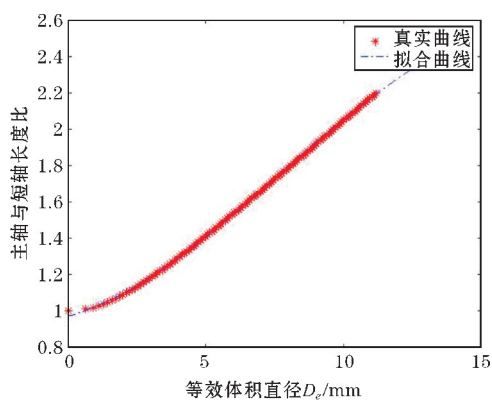


图1 最小二乘法拟合效果图

为了减少计算量, 假设照射到所有粒子的电磁波沿水平传播且视在倾角等于零时, 因此水平 h 和垂直 v 极化的后向散射截面为^[9]

$$\sigma_{h,v} = \frac{\pi^5 D_e^6}{9\lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{1 + (m^2 - 1)A_{h,v}} \right|^2 \quad (2)$$

其中 λ 为雷达发射电磁波波长, m 为水的折射指数,

$$A_v = 1/e^2 (1 - ((1 - e^2)/e^2)^{1/2} \text{asin}(e)) = 1 - 2A_h \quad (3)$$

e 为离心率,

$$e = \{1 - (a/b)^2\}^{1/2} \quad (4)$$

直径向量应用在创建后向散射面积的矢量, 雨滴大小分布则采用 Marshall-Palmer 雨滴尺寸分布模型

$$\begin{aligned} N(D) &= N_0 \exp(-\Lambda D) \\ \Lambda &= 4.1 R^{-0.21} \text{ mm}^{-1} \\ N_0 &= 8 \times 10^3 \text{ m}^{-3} \text{ mm}^{-1} \end{aligned} \quad (5)$$

其中 R 为降雨强度, 表示每小时降水的毫米数。 D 代表不同水滴的直径大小, 水滴大小分布函数的反射率可用 D_e 表示为

$$\eta_{h,v} = \int \sigma_{h,v}(D_e) N(D_e) dD_e \quad (6)$$

用 $\eta_{h,v}$ 表示的反射率因子值为

$$Z_{h,v} = \frac{\eta_{h,v} \lambda^4 |K_w|^2}{\pi^5} \quad (7)$$

其中 $K_w = (\epsilon_r - 1)/(\epsilon_r + 2)$, ϵ_r 是相对介电常数。差分反射率定义为

$$Z_{DR} = 10 \lg \left(\frac{Z_h}{Z_v} \right) \quad (8)$$

使用气象方程估计的反射率公式为

$$\hat{Z}_{h,v} = \hat{P}_{\text{rec}(h,v)} \cdot \frac{1024 R_{\text{range}}^2 \ln 2 \lambda^2}{P_t G_t G_r c \tau \theta_1^2 \pi^3 |K_w|^2} \quad (9)$$

\hat{P}_{rec} 为天线处的气象信号的平均功率, 与电场的加权回波有关, 电场的加权回波通过式(10)对所有的直径尺寸粒子求和

$$\sum E_{\text{weight}} \cdot \vec{a} = \sqrt{\frac{P_t}{(4\pi)^3}} \cdot G \lambda \sum_{n=1}^N \left(\frac{2\sqrt{\pi} \sigma_n e^{j\psi_n} \cdot e\left(\frac{\theta_n^2 \varphi_n^2}{\gamma^2 \delta^2}\right)}{r_n^2} \right) \cdot \vec{a} \quad (10)$$

其中 $\psi_n = 2kg_{0n}$, 且 $g_{0n} = x_{0n} \sin\theta \cos\varphi + y_{0n} \sin\theta \sin\varphi + z_{0n} \cos\theta$, x_{0n}, y_{0n}, z_{0n} 分别是散射体对应在 x, y, z 构成的直角坐标系上的坐标。 G 表示雷达在发射和接收时的增益, 即假设 $G_t = G_r = G$, \vec{a} 表示电磁散射场的方向。 θ_1 为单程功率方向图上 3 dB 波束宽度, R_{range} 为径向距离, P_t 为发射功率, G_t, G_r 分别表示雷达发射和接收增益。平均径向速度

$$\hat{v} = \frac{1}{N-1} \frac{\lambda f_p}{4\pi} \sum_{n=1}^{N-1} \arg\{V_{n+1} V_n^*\} \quad (11)$$

其中 V_n 是径向速度, f_p 是多普勒频率, N 为脉冲个数。

2 天气雷达回波信号模拟模型

模型主要模块为利用雷达数据输入产生近似的雷达分辨率体积单元和在分辨率单元上分布有雨滴; 利用雨滴参数构建一个 T 矩阵, 这个 T 矩阵中包括雨滴的等效直径尺寸, 每个直径尺寸大小的后向散射面积和采用 Marshall-Palmer 分布的每个直径对应的雨滴数目。

创建雷达分辨率体积单元, 可根据计算圆锥体积中的一段求得分辨率体积单元。如图 2 所示。

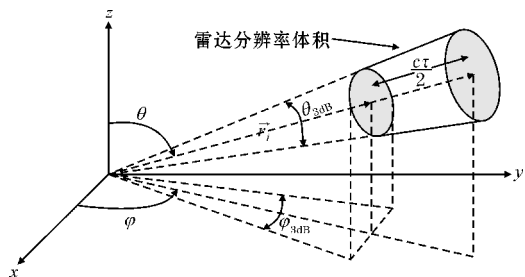


图2 天气雷达分辨率体积单元

假设一个椭圆的波束, 分辨率体积可以近似为

$$V_{\text{res}} = \frac{\pi}{4} \cdot (r_i \theta_{3\text{dB}}) (r_i \varphi_{3\text{dB}}) \left(\frac{cT}{2} \right) \quad (12)$$

为了使所有的脉冲期间让雨滴经过分辨率单元,在分辨率单元中添加边界范围,在该范围中有初始化的雨滴,在该体积中的雨滴都定义在极坐标下。

通过雨滴参数构建一个 T 矩阵,表 1 为雨滴参数列表。

表 1 雨滴参数列表

参数名称	参数值
最小降水物直径/mm	0.05
小和中等雨滴的分界点/mm	1
大和中等雨滴的分界点/mm	5
最大降水物直径/mm	15
低尺寸分辨率/mm	0.08
高尺寸分辨率/mm	0.3
最高尺寸分辨率/mm	0.8
后向散射模型	瑞利分布
瑞利散射参数/mm	0.93
降水速度/(mm · h ⁻¹)	50
降水角度 φ/(°)	0
降水角度 θ/(°)	0
风速向量/(m · s ⁻¹)	[-5,0,0]

计算出所需要的数据,并且最后将这些数据写入 T 矩阵,

$$T = \begin{bmatrix} D_{e1} & \cdots & D_{eN} \\ \sigma_{1v} & \cdots & \sigma_{Nv} \\ \sigma_{1h} & \cdots & \sigma_{Nh} \\ N_{D_1} & \cdots & N(D_N) \end{bmatrix} \tag{13}$$

再根据雨滴参数创建矩阵放在雷达分辨率单元内。对于每种直径每一个雨滴采用均匀分布函数使其随机分布在该体积内,雨滴的位置采用球面坐标的方式放在一个雨滴位置矩阵

$$matrixpos = \begin{bmatrix} r_1 & \cdots & r_N \\ \varphi_1 & \cdots & \varphi_N \\ \theta_1 & \cdots & \theta_N \\ angle_1 & \cdots & angle_N \end{bmatrix} \tag{14}$$

其中, r 代表径向距离, φ 代表天线仰角, θ 代表天线方位角, $angle$ 是雨滴与波束中心线的夹角,该参数用来判断哪些雨滴在波束内部。

对于每种尺寸大小的雨滴,放置在分辨率体积内的雨滴被选中是根据矩阵(13)和(14),之后通过应用风速矢量和终端速度使雨滴移动到新位置,终端速度计算为^[10]

$$v(D) \approx 386.6 D^{0.67}$$

假定所有的雨滴都通过高斯扩散以风速移动,该传播方式可以应用到所有的雨滴,每次移动后新的位置都

保存在式(14)中。模拟器的输入函数主要是尺寸函数、近似函数、Marshall-Palmer 分布函数、分辨率体积、雨滴数量、初始位置、加权、移动函数,Atlas and Ulbrich 终端速度计算公式。模型参数列表如表 2 所示。

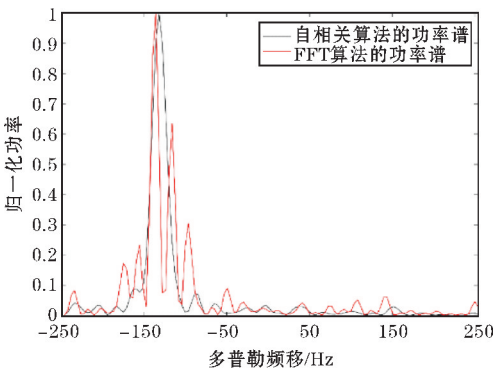
表 2 模型参数列表

参数	内容
雷达参数	发射机功率,最大天线增益,距离分辨率体积的距离,单向 3 dB 波束,脉冲宽度,频率,脉冲重复频率,仰角和方位角
天气参数	雨滴尺寸范围,雨滴直径分辨率,雨滴速率,雨滴角度,风速和风向

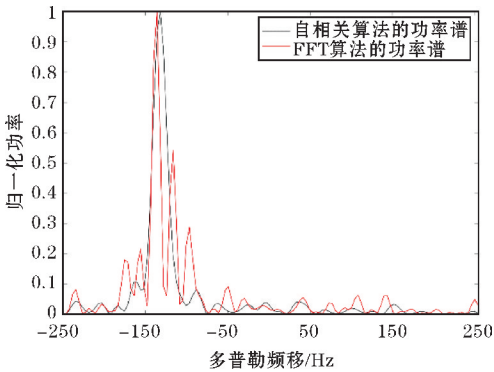
该回波模拟器输出加权电场回波,通过加权电场回波可以计算回波功率、反射率、差分反射率、速度等降水参数。

3 实验结果分析

图 3(a)为归一化的水平极化波的回波功率谱,分别采用 FFT 算法和自相关算法的傅立叶变换对功率谱^[11]进行计算,图 3(b)是对应的垂直极化波的功率谱。从图中可以看出,无论是对于垂直极化或者是水平极化,分别通过这两种方法计算的功率谱的分布规律基本一致。且分布规律可以近似为高斯分布,与文献^[12]一致。



(a) 水平极化功率谱估计



(b) 垂直极化功率谱估计

图 3 功率谱估计图

图4为根据每个脉冲计算的径向速度分布直方图,纵坐标表示该速度区间出现的频率,并使用高斯拟合函数对该直方图进行高斯拟合,可以看出高斯函数的峰值所对应的横坐标值与功率谱峰值对应的多普勒频移基本一致,且与初始设置的速度值基本一致。

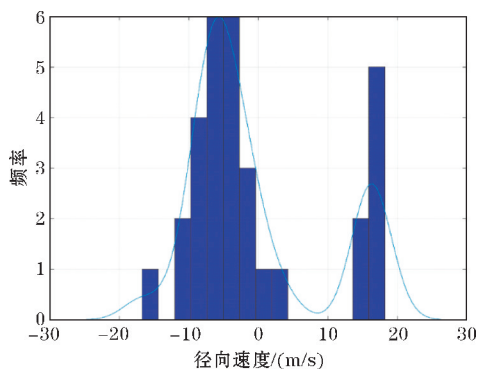


图4 径向速度分布直方图

图5是每个脉冲返回时的反射率的计算,图中每个脉冲的反射率通过接收电压进行估计计算,并且对每个脉冲求取平均值,如图中平均反射率曲线所示。图中实际的反射率是根据水滴大小的分布函数计算所得。可以看出两个极化方向值的变化趋势基本一致,且水平极化的反射率值比垂直方向的约大2 dBz,这个特征与文献[13]一致。并且可以看出使用水滴大小分布函数计算的反射率比估计反射率略大,这个仿真结果与理论值一致。综上所述,从运行该程序的结果可以看出文中基于物理模型产生极化多普勒雷达回波的方法可行。

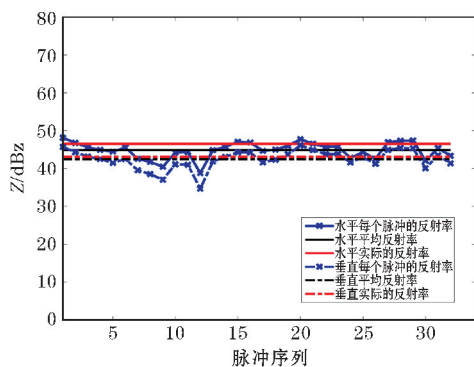


图5 雷达反射率估计

4 结束语

通过对雷达分辨率体积内降水粒子分布建模,并根据设定的粒子传播速度更新粒子位置。假设粒子是椭圆形,设定粒子的等效直径尺寸,通过最小二乘算法求粒子的轴比,然后计算不同极化波对应的后向散射截面,并加入随机相位,根据脉冲时间更新雨滴位置,

然后计算每个脉冲所对应的回波功率和相位。并对实验得到的回波序列进行验证分析,结果表明文中使用的回波模拟方法可行。但是本文仅仅对降雨回波进行了分析,下一步可以对不同降水现象进行模拟。

参考文献:

- [1] Capsoni C, D'Amico M, Nebuloni R. A Multiparameter Polarimetric Radar Simulator [J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2001, 18 (11): 1799–1809.
- [2] Cheong B L, Palmer R D, Xue M. A time series weather radar simulator based on high-resolution atmospheric models [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2008, 25(2): 230–243.
- [3] Li Z Z, Zhang Y, Zhang G, et al. A microphysics-based simulator for advanced airborne weather radar development [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(4): 1356–1373.
- [4] Lupidi A, Moscardini C, Berizzi F, et al. Simulation of X-band polarimetric weather radar returns based on the Weather Research and Forecast Model [C]. 2011 IEEE Radar Conference (RADAR), Kansas, 2011: 734–739.
- [5] Lupidi A, Lischi S, Cuccoli F, et al. Capabilities and potential of an avionic polarimetric weather radar simulator [C]. Signal Processing Symposium. IEEE, 2015.
- [6] Lischi S, Lupidi A, Martorella M, et al. Advanced Polarimetric Doppler Weather Radar Simulator [C]. Radar Symposium (IRS), 15th International. IEEE, 2014: 1–6.
- [7] 韩雁飞, 刘夏, 李海, 等. 基于微物理特性的三维低空风切变雷达回波仿真[J]. 系统工程与电子技术. 2016(2): 298–304.
- [8] Green A W. An Approximation for the Shapes of Large Raindrops [J]. Journal of Applied Meteorology, 1975, 14(8): 1578–1583.
- [9] Stapor D P, Pratt T. A generalized analysis of dual-polarization radar measurements of rain [J]. Radio Science, 2016, 19(1): 90–98.
- [10] Atlas, D., Ulbrich, C. W. Path-and area-integrated rainfall measurement by microwave attenuation in the 1–3 cm band. J. Appl. Meteorol.. 1977, 16: 1322–1331.

- [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] Pinsky M, Jordi F I V, Otto T, et al. Application of a Simple Adaptive Estimator for an Atmospheric Doppler Radar[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(1):115-127.
- [13] Crozier C L, Joe P I, Scott J W. et al. First experiment with an operational Doppler radar[C]. Prepr., Radar Meteorol. Conf., 24th, 1989:179-185.

Dual Polarization Dopplerweather Radar Echo Simulation based on a Physical Model

GAO Mengqing¹, WANG Haijiang¹, LI Jing², WANG Guoqiang², XU Zili²

(1. College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. The Second Research Institute of CAAC, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: Weather radar echo signal can be simulated by using the physical characteristics of rainfall. The simulation signal used as test signal in radar research and development can save time and money. The theoretical basis of dual polarization Doppler weather radar is that the raindrops are oblate spheroid. The raindrops size distribution fits the Marshall-Palmer raindrop spectra. The raindrops are uniformly distributed throughout the radar resolution volume determined by radar parameters. The echo signal can be explained as a superposition of the scattered electric fields in the volume. A mathematical model of echo signal is established by analyzing the echo characteristics of dual polarization Doppler weather radar. The inputs of this model are raindrop parameters, radar parameters, wind speed and azimuth of the volume. The output is I, Q electric voltage sequences. This model simulates the rainfall radar echo signal efficiently, meanwhile, it shows that the simulation of dual polarization Doppler weather radar echo signal based on physical characteristics can be realized.

Keywords: dual polarization doppler weather radar; least square fitting; axial ratio; reflectivity factor at horizontal polarization; reflectivity factor at vertical polarization; radial velocity