

文章编号: 2096-1618(2016)01-0012-06

S波段多普勒天气雷达回波模拟

王海江^{1,2}, 刘玟宏¹, 邓洋洋¹, 宋静¹, 王雷¹

(1. 成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225; 2. 中国气象局大气探测重点开放实验室, 四川 成都 610225)

摘要: 计算机仿真技术广泛用于天气雷达信号分析, 常规的天气雷达回波模拟是采用的基于单纯的功率谱的方法, 文中主要是利用真实天气雷达基数据和功率谱相结合的方法, 利用 MATLAB 模拟天气雷达天线接收到的回波序列, 这样模拟出的天气雷达回波更接近真实天气雷达回波。首先以假设的功率谱参数拟合气象回波功率谱, 仿真生成天气雷达回波序列, 并通过 PPP 算法验证假设的功率谱参数, 然后利用真实雷达基数据作为功率谱参数, 仿真生成天气雷达回波序列, 并采用 PPP 算法得到模拟的功率谱参数并画出雷达回波图。最后, 将真实雷达回波图和模拟雷达回波图作对比, 经过误差分析表明, 该模拟方法平均误差强度比可以 0.03 以下。

关键词: 天气雷达; 回波; 信号仿真

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

0 引言

多普勒天气雷达拥有独特的能力利用电磁波去穿透云和雨, 广泛用于天气预报、中小尺度天气系统监测、人工影响天气、飞行气象保障以及大气科学研究等。在探测局部强对流灾害性、危险性天气过程和定量测量降水强度中起着重要作用。随着多普勒天气雷达的广泛使用, 在其研发和后期的维修保障过程中, 对雷达接收机性能进行测试需要用到测试信号。如果能够模拟产生真实的天气雷达回波信号, 就实现在实验室内完成外场试验, 这样就降低成本、缩短研发和维护周期^[1]。可以控制回波的参数, 做到定量测试, 并对接收机及后端的信号处理算法进行验证, 这是目前一般的天气雷达调试手段所不能够实现的。

多普勒天气雷达用过发送具有一定时间间隔的连续脉冲到大气层中, 经过散射体的散射后, 接收到返回的回波。发射信号和反射信号之间的延迟决定散射体距离雷达的距离, 并且通过测量反射信号的能量可以获取散射体的一些信息。多普勒雷达获取其波束范围内散射体的平均径向速度、速度谱宽、和反射率因子。根据 3 个基数据可以推测出雷雨、风切变、寒潮、大风等天气过程。

1 天气雷达回波信号模拟原理

气象信号由大量水凝物的反射回波组成。经过延时(电磁波在雷达与含有大量水水凝物的体积近边缘

之间来回传播的时间), 回波连续在一个时间间隔接受, 这个时间间隔等于微波脉冲在包含散射体的空间传播的时间的 2 倍, 因为不能分解单个脉冲回波, 所以在离散的时间延迟 τ_s 上对回波进行采样。 τ_s 是采样距离门时间, 同时也确定在气象信号采样中贡献最大的散射体及近似距离, $r = c\tau_s/2$ 。在 T_s 的周期间隔上, 定时脉冲触发形成发射脉冲及一连串的采样距离门^[2]。

雷达接收到的来自某一确定距离上变化的回波脉冲序列, 相当于在有效时段内载波脉冲的幅度和位相受到了调制。显然, 这一调制过程是由于目标物的位置和散射体特性变化造成^[3]。回波的采样具有很大的随机性, Doviak et al^[4]的研究理论和观测表明, 大部分的气象回波的功率谱近似高斯分布。

首先给出高斯分布的回波功率谱函数(脉冲重复频率 prf , 频率 f):

$$S_r(f) = \frac{P_r}{\sqrt{2\pi}\sigma_f} \exp\left[-\frac{(f-f_d)^2}{2\sigma_f^2}\right] \cdot \frac{1}{P_0} \quad (1)$$

$$P_0 = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_f} \exp\left[-\frac{(f-f_d)^2}{2\sigma_f^2}\right] \quad (2)$$

$$f = -\frac{prf}{2} + \frac{k \cdot prf}{N} \quad (k = 0, 1, 2, \dots, N) \quad (3)$$

通过式(1)~(3)可以得到回波功率谱密度函数 $S_r(f)$, 与雷达基数据相关的量分别是回波功率 P_r , 多普勒频移 f_d , 以及频谱宽度 σ_f 。各自之间的关系分别是: $P_r = Z_e C/2$ (雷达方程中得到) 公式可以看出等效反射率因子 Z_e , 回波功率 P_r , 气象雷达参数 C 之间存在的等式关系; $f_d = 2\delta_v/\lambda$, V 和 λ 分别是平均径向速度和电池波波长; $\sigma_f = 2V/\lambda$, δ_v 是速度谱宽。

向 $S_r(f)$ 中加入噪声 $P_n(f)$, 然后再将具有噪声的

功率谱进行随机化,即可得到具有真实回波功率谱的统计谱型 $P_N(f)$:

$$P_n(f) = -\ln(1 - rand) \left\{ S_r(f) + \frac{P_N(f)}{prf} \right\} \quad (4)$$

式(4)中 $rand$ 是 $[0,1]$ 的随机数,服从均匀分布, $P_N(f)$ 是单位时间噪声功率。在实际中还要模拟回波的相位谱 $\varphi_n(f)$, $\varphi_n(f) = 2\pi \cdot rand(f)$,结合回波功率谱和相位谱可以得到复时间的 I 、 Q 序列,再将 I 、 Q 序列进行 IDFT,就可到天气雷达回波的时域时间序列 s_n :

$$s_n = I + jQ = \sum_{i=1}^{N-1} \left(\sqrt{P_n(f)} \cos \varphi_n(f) + \sqrt{P_n(f)} \sin \varphi_n(f) \right) \cdot \exp \left(j2\pi \frac{i \cdot n}{N} \right) \quad (5)$$

I 、 Q 是雷达接收机 I 通道和 Q 通道的回波时间序列^[5]。那么天气雷达回波模拟步骤总结如下:

- (1)首先假设具有真实特性的 3 个雷达基数据 V 、 Z_e 、 δ_v ,分别计算 f_d 、 P_r 、 σ_f 。
- (2)根据 f_d 、 P_r 、 σ_f 构建回波功率谱 $P_n(f)$,结合随机的相位谱 $\varphi_n(f)$,可以得到复时间频谱,再根据式(5)可以得到复时间时域序列 s_n 。
- (3)对复时间时域序列 s_n 进行提取实部和虚部,得到 I 通道和 Q 通道的序列。
- (4)采用算法处理 I 通道和 Q 通道的序列,提取出 V' 、 Z_e' 、 δ_v' 。

2 天气雷达回波信号模拟

在提出雷达目标回波模拟方法之前,需要先知道

回波功率与反射率,谱宽和速度谱宽,多普勒频移和径向速度之间的关系。各自之间的关系分别是: $P_r = Z_e C/2$ (雷达方程中得到)公式可以看出等效反射率因子 Z_e ,回波功率 P_r ,气象雷达参数 C 之间存在的等式关系; $f_d = 2V/\lambda$, V 和 λ 分别是速度谱宽和电池波波长, f_d 是多普勒频移; $\delta_f = 2\delta_v/\lambda$, δ_v 是速度谱宽, δ_f 是谱宽。

将目标回波的模拟方法用简单的流程图表示如图 1 所示。

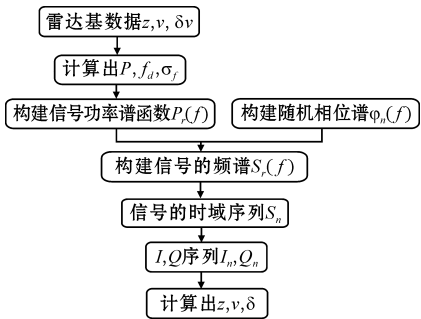


图 1 目标回波模拟方法流程图

首先假设反射率30 dBz,在雷达实际应用中,一般测量的是雷达回波强度 dbz ,它与等效反射率之间的关系为 $dbz = 10 \log Ze$,然后再根据等效反射率与回波功率之间的关系计算出回波功率 P_r ;然后假设平均径向速度 $V = 10 \text{ m/s}$,计算多普勒频移 f_d ;最后是假设速度谱宽 $\delta_v = 3 \text{ m/s}$,计算频谱宽度 σ_f 。雷达参数的取值如表 1 所示。

表 1 雷达参数取值

发射功率	天线增益	波束宽度	脉冲宽度	电池波波长	雷达径向距离	脉冲重复频率
750000	45	1	1	0.03	60	1000

将 f_d 、 P_r 、 σ_f 的值带入式(1),并结合式(2)、(3)模拟出不包含噪声的功率谱,由表 1 可以计算出雷达常数, N 取 1024,如图 2 所示。

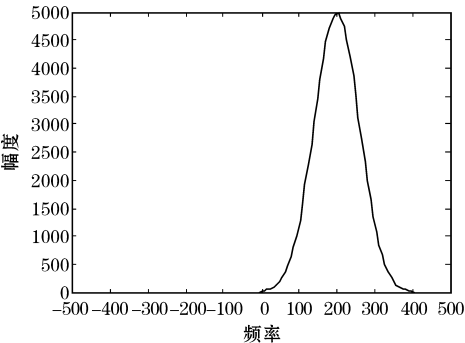


图 2 未含噪声的功率谱

等。研究表明,所有这些噪声都可以看作是 高 斯 白 噪 声^[6],将图 2 所示的功率谱加入信噪比为-20 dB的高斯白噪声,得到具有真实回波特性的功率谱,如图 3 所示。

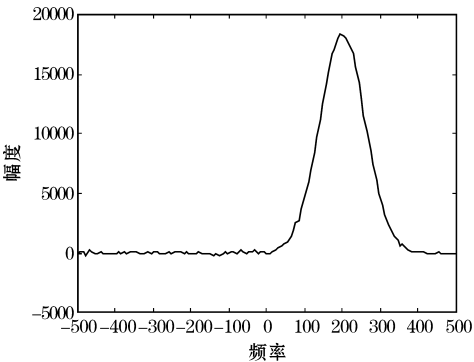
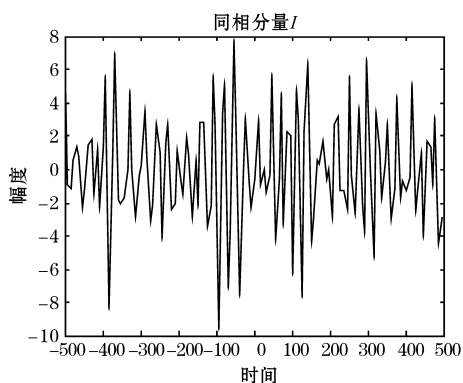
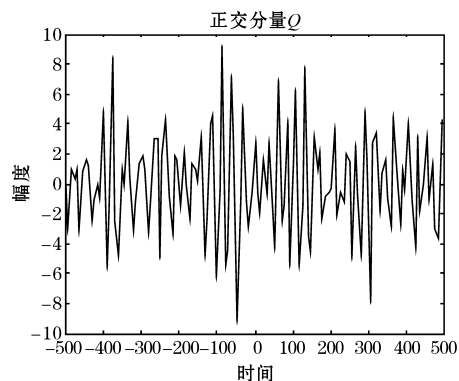


图 3 加噪声的功率谱

雷达接收机的噪声包括接收机热噪声和外部噪声

结合式(4)、(5),将功率谱进行随机化,然后将相位谱随机化,即可得到复时间的频谱,再进行傅里叶反变换,就可以产生 I 、 Q 对应的时域序列。 I 通道和 Q 通道对应的时序序列分别如图4和图5所示。

图4 I 通道序列图5 Q 通道序列

3 回波信号中基数据的提取

天气信号处理提供3种最重要的谱矩估计:

(1)天气信号功率或多普勒频谱的零阶矩。这与分辨体积内液态水含量或降水率有关。

(2)平均多普勒速度或归一化功率谱的一阶矩。这是针对天线指向接近水平时,在本质上表示大气接近或远离雷达的活动。

(3)速度谱宽,是关于归一化频谱一阶矩的二阶矩平方根^[7]。这是对速度弥散度的测量,即在分辨率体积内,对风切变和湍流的检测。

为检验模拟的回波的正确性,还需要通过算法去验证,提取出3个雷达基数据与假设的值进行比较。平均径向速度和谱宽的估计采用脉冲对处理方法,又称为双脉冲处理法,最初是由 Rummler 提出,后面经过 Zrinc 等的改进,使性能更优,这种方法所需要的设备相对比较简单,能进行实时分析又能达到实时的精

度,是目前较好的一种处理方法^[8]。

脉冲对方法相对于 FFT 的优点是能从低信噪比中提取出谱宽和平均径向速度^[9-12]。脉冲对估计法利用延后 T_s 后的自协方差函数估计计算2个多普勒谱矩,用功率加权平均多普勒频移表示 $R(T_s)$ 。

$$R(T_s) = e^{j2\pi f_d T_s} \int_{-1/2T_s}^{1/2T_s} S(f) e^{j2\pi T_s (f-f_d)} df \quad (6)$$

考虑常用的功率加权平均多普勒平移估计

$$f'_d = \int_{-1/2T_s}^{1/2T_s} f S'_n(f) df \quad (7)$$

这里的 $S'_n(f)$ 是功率谱的归一化估计^[13]。若有 $M+1$ 个有相同间隔的脉冲序列被发射,那么自相关在采样时间后延 T_s 后,可从和式得到估计

$$R(T_s) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} V^*(m) V(m+1) \quad (8)$$

从而平均速度估计为

$$V' = \frac{\lambda}{4\pi T_s} \arg R(T_s) \quad (9)$$

归一化二阶中心矩为

$$\sigma_f^2 = m_2 - m_1^2 = \frac{1}{2\pi^2 T_s^2} \ln \frac{A(0)}{A(T_s)} \quad (10)$$

那么根据式(10)可以得速度谱宽的估计式为

$$\delta_v = \frac{\lambda}{2\sqrt{2}\pi T_s} \sqrt{\ln \frac{R(0)}{R(T_s)}} \quad (11)$$

在实际情况下,假设有 $M+1$ 个采样点,需要计算相邻2个采样点 Z 之间的互相关函数以及自相关函数,也就是如式(12)和(13)

$$R(T_s) = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M Z_{n+1} Z_n^* \quad (12)$$

$$R(0) = \frac{1}{M+1} \sum_{n=1}^{M+1} Z_n Z_n^* \quad (13)$$

将式(12)和(13)带入式(9)和(11)即可估计出平均径向速度和速度谱宽。应该强调的是,即使在大信噪比情况下,若谱宽与无模糊间隔相当,则估计的谱宽是有偏的,所以在这方面自协方差法比傅里叶变换处理好^[14-15]。但为保持精度,雷达系统必须设计为最大期望的谱宽,那么应小于 $1/T_s$ 。对于窄频谱,自协方差和频谱估计方法都会产生一定估计值部分的偏差^[16]。

关于基本发射率数据的估计,由于回波功率可以从回波信号的 I 、 Q 序列中得到,即: $A = (I^2 + Q^2)^{\frac{1}{2}} = P^{\frac{1}{2}}$ 和 P 分别为振幅和回波功率^[17-18]。假设雷达扫描的分辨率是1 km,在1 km中分成4个距离库,每个距离库为250 m。分别计算4个距离库上回波功率,然后计算出回波功率:

$$P_{ave} = \frac{P1 + P2 + P3 + P4}{4} \tag{14}$$

计算平均回波功率后,根据 $P_r = Z_e C/2$ 和 $dbz = 10\log Ze$,算出反射率 dbz 。

首先提取出模拟回波中提取的反射率因子,在固定的信噪比为15 dB下进行测试,按照不同的距离取不同的反射率因子^[19],首先假设不同距离的反射率,根据实际生成的回波提取估计的反射率的值,理论值与真实值的结果,图中理论反射率和估计的反射率之间的误差接近1 dBz,如图 6 所示。

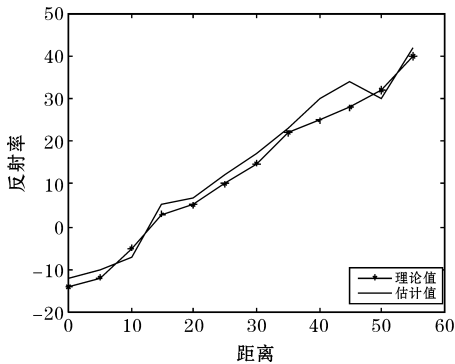


图 6 反射率理论值与估计值之间的比较

然后是平均径向速度的估计,信噪比也固定为 15 dB,取样点数为 128 点,假设平均径向速度在-12 ~ 10 m/s之间取值,利用模拟的回波估计平均径向速度,如图 7 所示。

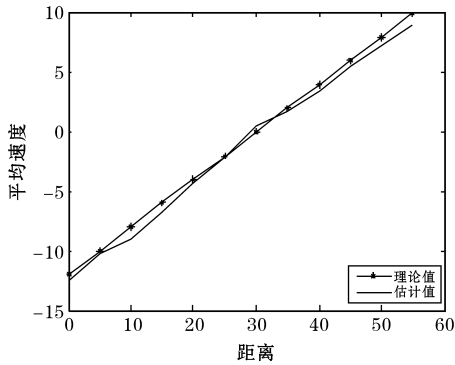


图 7 平均径向速度理论值与估计值之间的比较

从图 6 可以看出平均径向速度的估计值与理论值之间的平均误差小于1 m/s。所以平均径向速度的估计值是可靠的。

最后估计回波中的速度谱宽,谱宽估计误差如图 8 所示。由于速度谱宽的值反映的是速度变化情况,所以速度的假设值也应该随着变化,为在图中体现速度谱宽的估计值,在图 8 中并未给出速度变化值。

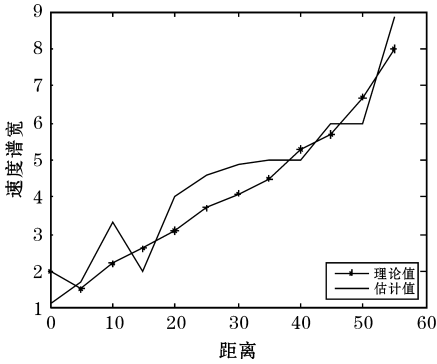


图 8 速度谱宽估计值和理论值比较

5 生成雷达回波图

采用真实天气雷达基数据,用 Matlab 读取真实天气雷达的基数据,根据读取的不同参数通过基数据逆向生成 I, Q 数据,再根据天气雷达基数据生成原理画出回波图,也就是将读出的真实天气雷达基数据作为图 1 模拟流程图的输入,得到模拟的天气雷达回波图。

该基数据是采用的 SA 波段的雷达数据,扫描方式是 PPI,基本产品是 PPI 显示,分别选取了冰雹天气过程、飑线过程和降水的天气过程。

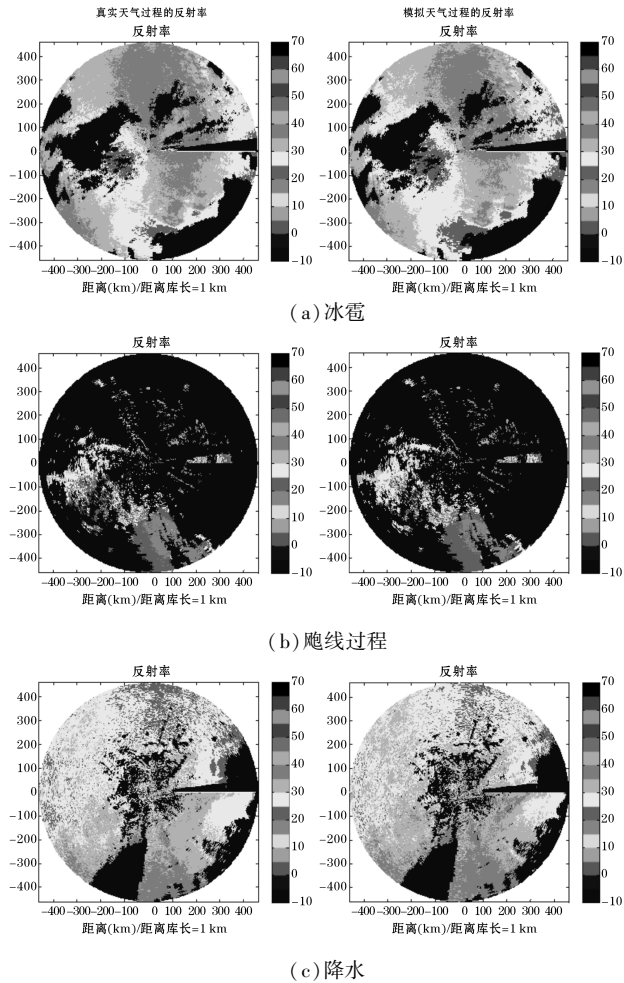


图 9 3 种天气过程雷达回波图(真实雷达回波图与模拟雷达回波图)

在图9 (a)、(b)、(c)分别是冰雹、飏线、降水3种不同的天气过程的真实雷达回波图与模拟的雷达回波图,左边是真实的天气雷达回波图,右边是对应的模拟的天气雷达回波图。分析这3幅图容易看出,左边和右边的图具有几乎一致的回波结构分布和强度值。通过对雷达回波图的对比分析可以看出该模拟方法具有一定的参考价值,能够模拟出目标信号的强度特性。

下面进行误差分析,首先定义一个误差强度比 ρ , 具体公式解析式为

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (|A_{ij} - B_{ij}|)}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (|A_{ij}|)}$$

(15)

式子中 N 代表雷达回波图中的像素点个数, A 代表真实天气雷达回波中的每个像素点的值, B 代表模拟天气雷达回波中的每个像素点的值。将公式应用在真实和模拟的雷达回波图中,计算结果如表2所示。

表2 几种天气过程天气雷达回波模拟的误差强度比

天气过程	冰雹天气	飏线过程	降水
误差强度比	0.030	0.028	0.025

6 结束语

通过将雷达基数据和基于谱的方法相结合,实现预期的雷达回波序列的仿真,并将模拟的回波经过算法验证证明其正确性。首先提出天气雷达回波的等效公式,从公式中分析得出天气雷达回波分为目标回波和杂波回波。然后根据公式分别提出模拟目标回波和模拟杂波及去除杂波的方法。其中对目标回波的模拟后,分别模拟出了 I 通道序列和 Q 通道序列,并通过 PPP 算法对模拟的回波进行验证,计算出3个基数据,并与之前假设的3个基数据做误差分析,验证该模拟方法是有效的。之后是杂波的模拟,在天气目标信号的功率谱上叠加地物杂波,构成气象回波,最后为了进一步显示模拟效果的直观性,将天气雷达真实基数据读出生成天气雷达回波图后,再利用该模拟方法生成模拟的天气雷达回波图。仿真结果表明,该模拟方法能够模拟出具有真实天气目标信号的雷达回波。

参考文献:

[1] 李曦,潘志明. 机载雷达杂波环境模拟器实现方法研究[J]. 现代雷达, 2009,(12):5-9.

[2] Lischi S, Lupidi A, Berizzi F, et al. X-band full

polarized Doppler weather radar return simulation by using propagation-modified ensemble-averaged covariance matrix[C]. Radar Symposium (IRS), 2013 14th International. IEEE, 2013,(2): 799-804.

[3] 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.

[4] Doviak, Richard J, Dusan S. Zrníc. Doppler Radar & Weather Observations[M]. Academic press, 2014.

[5] 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]. Radar Conference (RADAR), IEEE, 2011: 734-739.

[6] 高志球,肖艳姣. 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, 13(4): 43-49.

[7] 张华. 脉冲多普勒气象雷达信号处理系统研究[D]. 南京:南京理工大学, 2003.

[8] 郭在华. 基于多普勒双极化天气雷达信号处理研究[D]. 成都:电子科技大学, 2005.

[9] 刘劲,戴奉周,刘宏伟. 宽带雷达探测性能分析[J]. 雷达科学与技术, 2008,6(2):92-95.

[10] 徐晓枫. 相控阵天气雷达信号处理若干问题研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2013.

[11] Capsoni C, D'Amico M, Nebuloni R. A multiparameter polarimetric radar simulator[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2001, 18(11): 1799-1809.

[12] Hubbert, J C. Weather radar ground clutter. Part I: Identification, modeling and simulation[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2009,26(7):1165-1180.

[13] Bringi V N, V Chandrasekar. Polarimetric Doppler weather radar: principles and applications[J]. Cambridge University Press, 2001.

[14] Hondl, Kurt D, Michael D. Eilts. Doppler radar signatures of developing thunderstorms and their potential to indicate the onset of cloud-to-ground lightning[J]. Monthly weather review, 1994, (2218): 1818-1836.

- [15] Warde, David A, Sebastián M. Torres. The auto-correlation spectral density for Doppler-weather-radar signal analysis. *Geoscience and Remote Sensing*[J]. *IEEE Transactions on* 2014, 52(1): 508–518.
- [16] Doviak R J, R D Palmer. Polarimetric doppler weather radar [J]. *Encyclopedia of atmospheric science*, 2014.
- [17] 王福侠, 俞小鼎, 王宗敏, 等. 河北暴雨的多普勒天气雷达径向速度特征[J]. *气象* 2014, 40(2): 206–215.
- [18] 周生辉, 魏鸣, 张培昌, 等. 单多普勒天气雷达反演降水粒子垂直速度 I: 算法分析[J]. *气象学报*, 2014, 72(4): 760–771.
- [19] 吴翀, 刘黎平, 张志强. S波段相控阵天气雷达与新一代多普勒天气雷达定量对比方法及其初步应用[J]. *气象学报*, 2014, 72(2): 390–4.

S Band Doppler Weather Radar Echo Simulation

WANG Hai-jiang^{1,2}, LIU Wen-hong¹, DENG Yang-yang¹, SONG Jing¹, WANG lei¹

(1. College of electronic engineering, Chengdu University of information technology, Chengdu 610225, China; 2. Key Lab of Atmospheric Sounding, China Meteorological Administration, Chengdu 610225, China)

Abstract: Computer simulation is extensively used in radar signal analysis, the conventional weather radar echo simulation is based on the simple method of power spectrum. The main method of this paper is to combine the usage of the weather radar base data and the power spectrum method to simulate the echo signal received from the antenna with MATLAB, so that the echoes are closer to the real weather radar return. Firstly, using assumptive parameters to fit the meteorological echo power spectrum, and simulating the weather radar echoes, and through PPP algorithm verifies the power spectrum parameters. Then utilizing the real radar base data as power spectrum parameters, and using simulated parameters calculated through PPP to plot the radar echoes. At last, simulated radar echoes are compared with real radar echoes, and through error analysis, it shows that the average error intensity ratio can be less than 0.03.

Key words: weather radar; echo; signal simulation