

文章编号: 2096-1618(2018)02-0124-05

# 三亚 SC 天气雷达强度“马赛克”问题仿真溯源分析

邵楠<sup>1</sup>, 步志超<sup>1</sup>, 李柏<sup>1</sup>, 李喆<sup>1</sup>, 李昭春<sup>2</sup>

(1. 中国气象局气象探测中心, 北京 100081; 2. 海南省气象探测中心, 海南 海口 570203)

**摘要:**针对三亚 SC 天气雷达在台风“威马逊”中出现的回波强度“马赛克”现象,采用实验验证和仿真溯源的方法,对批式双重复频率技术(dual PRF)回波强度的影响进行分析。通过改变脉冲重复频率、脉冲累计个数、信号处理算法等方式,开展对比观测实验,真实复现“马赛克”现象,并追踪回波马赛克现象出现的天气和雷达参数条件。同时,基于天气雷达发射脉冲的时间自相关特性,采用大气分层模型,建立天气雷达发射端到接收端的 L/Q 信号仿真算法,通过采用端到端 L/Q 信号算法,结合实测数据和雷达参数情况,正演分析得到“马赛克”回波,证实了回波“马赛克”现象的成因。

**关键词:**L/Q 信号仿真;随机相位编码;Dual PRF 技术;强度“马赛克”

**中图分类号:**TP391.9

**文献标志码:**A

**doi:**10.16836/j.cnki.jcuit.2018.02.004

## 0 引言

对于多普勒天气雷达,不模糊速度  $v_a$  和不模糊距离  $r_a$  存在着制约关系,即  $v_a r_a = c\lambda/8$ , 其中  $c$  是光速<sup>[1-4]</sup>。为解决速度和距离模糊的多普勒两难问题,天气雷达通常采用重频技术(staggered PRF)(雷达发射重复频率按 T1、T2 交替变化的脉冲)和 DUAL PRF 技术(在一个径向内以一组短脉冲 T1 采集 M1 个脉冲样本,在下一个径向又以另一组长脉冲 T2 采集 M2 个脉冲样本)扩展速度,保证足够大的距离探测范围的同时,提高速度可测范围<sup>[5-10]</sup>。随着该技术的业务化应用,有关双重频技术在进行解算径向速度时存在速度杂散、错误等问题的文献报道屡见不鲜<sup>[11-13]</sup>;但与此同时,双重频技术对回波强度的影响往往被忽视。

2014 年第 9 号超强台风“威马逊”于 7 月 18 日 15 时 30 分在海南省文昌市翁田镇沿海登陆。期间三亚雷达站(RVP900 信号处理器,采用 DUAL PRF 技术)回波数据出现马赛克现象比较突出,雷达观测数据有条状回波出现,不同强度回波带之间边界不够清晰,如图 1 所示<sup>[14]</sup>。

## 1 对比观测实验

三亚 SC 雷达是由成都国营 784 厂生产,采用 RVP900 信号处理器。在雷达业务运行过程中,采用 9 个仰角,重复频率 PRF1/PRF2 为 500/333 Hz 的 DUAL PRF 体扫模式。通过厂家和技术人员的初步分析,认为造成三亚雷达站回波强度马赛克的原因可能为(1)在正常的业务运行中,信号处理器脉冲积累数仅为 32 次,对回波信噪比的改善有限,回波起伏较大,造成回波边界不易分辨;(2)三亚雷达周边地物较多,在 0.5° 仰角扫描时容易发生距离模糊,远处的二次回波叠加在一次回波上,易产生马赛克现象。

为进行溯源分析,于 2015 年 8-11 月,以三亚雷达台站为研究对象,在非重大天气过程中,开展针对性的观测实验。实验采用时间间隔较短 PPI 扫描模式,单次扫描的采集/存储时间共约 1 分钟;实验选取 0.5°~1.5° 低仰角进行扫描,配置不同的雷达扫描配置参数(见表 1),通过分析相似天气过程下的回波强度变化情况,对比不同参数的影响。

如表 1 所示,三亚 SC 雷达对比实验主要设置不同脉冲累计个数、不同的重复频率大小、不同的信号处理方式对获得回波情况进行对比,结果见图 2~5。

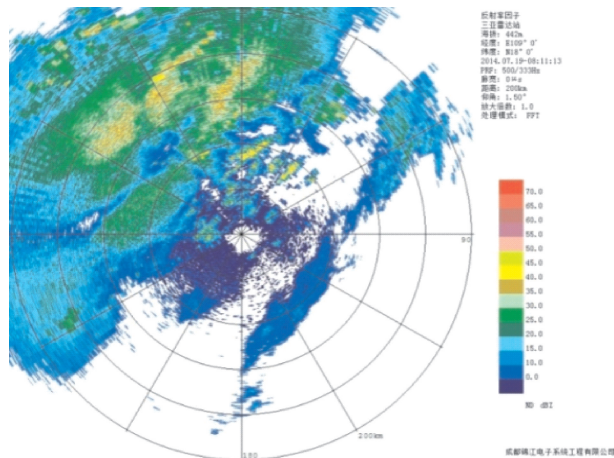


图1 2014年7月19日8点11分三亚雷达反射率数据

表 1 三亚 SC 雷达比对实验配置参数

序号	仰角/°	重频/Hz	处理方法	脉冲累计个数	库长
1	1.5	500/333	FFT	32	300
2	1.5	500/333	FFT	64	300
3	1.5	300	FFT	32	450
4	1.5	300	FFT	64	450
5	0.5	300	FFT	32	450
6	0.5	900	FFT	32	150
7	0.5	900	PHASE *	32	150
8	0.5	900/600	FFT	32	150
9	0.5	900/600	PHASE *	32	150

注：\* PHASE 采用随机相位编码技术处理

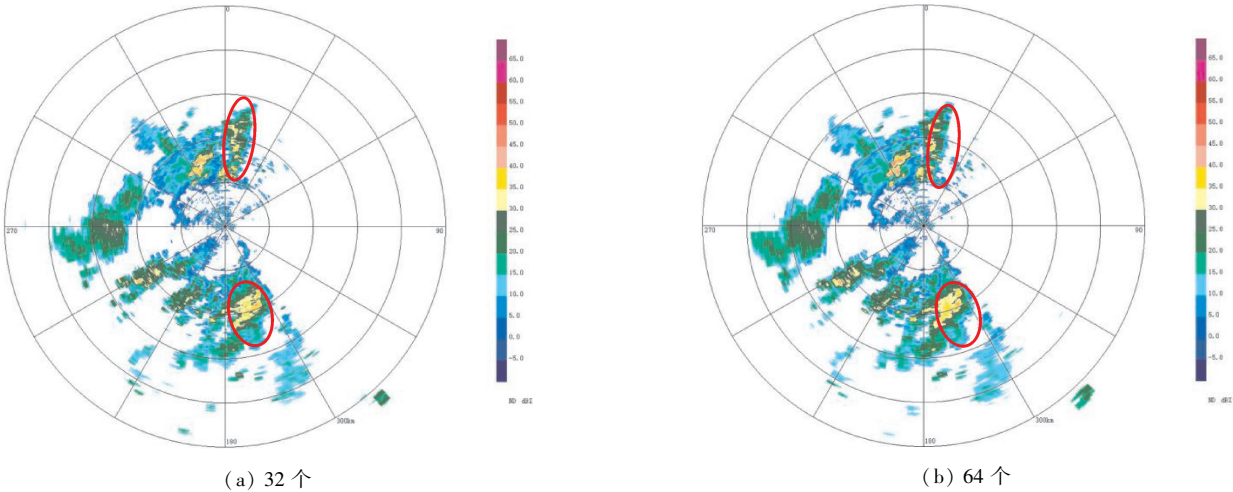


图 2 300 Hz 单重频下选取不同脉冲累计个数对比图

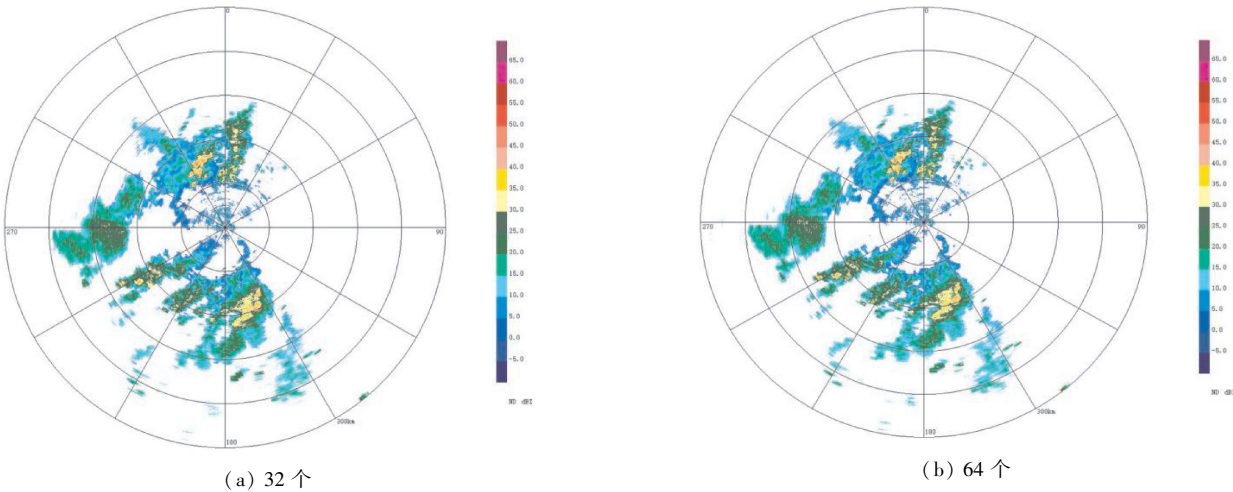


图 3 500/333 Hz 双重频下选取不同脉冲累计个数对比图

图 2 对比不同脉冲累计个数对单重复频率下回波强度影响,从红圈标识区域可以看出,64 次脉冲累计会比 32 次累计后更加清晰,通过累计增加了信噪比,降低了功率的统计方差。图 3 对比双重频下脉冲累计个数对回波强度的影响图,两图的差异不能清晰辨别,这可

能与 RVP900 处理器的设置有关,在一定转速下,虽然累积次数可以选择,选取的次数可能并不代表真实的累积次数,也有可能双重复频率对累计个数的影响不敏感。但还是可以通过对比图看出,脉冲累计个数提高了信噪比,但不会产生强度发生条纹状有规律的波动。



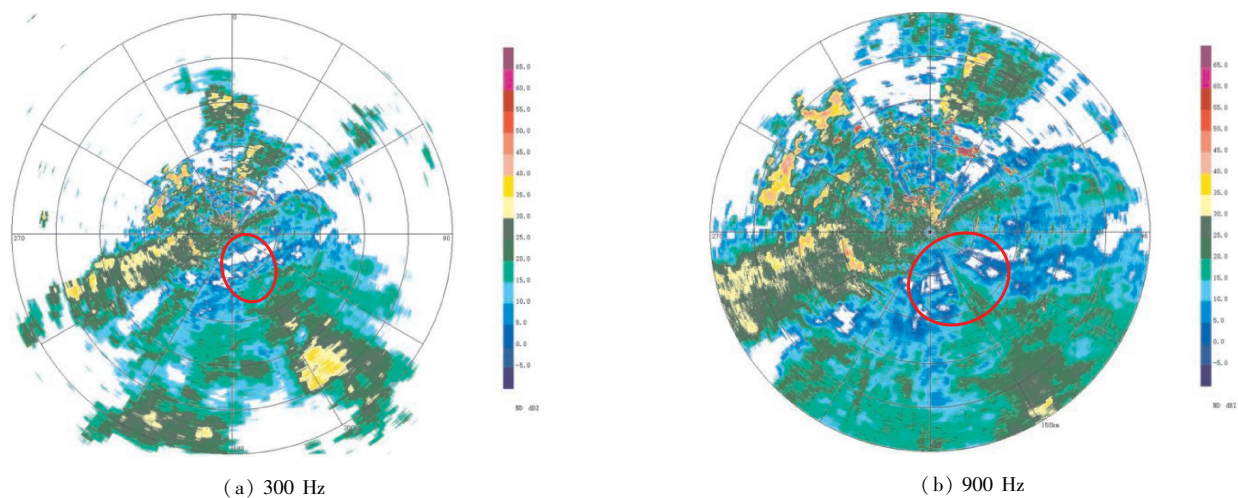


图 4 单重频回波强度图

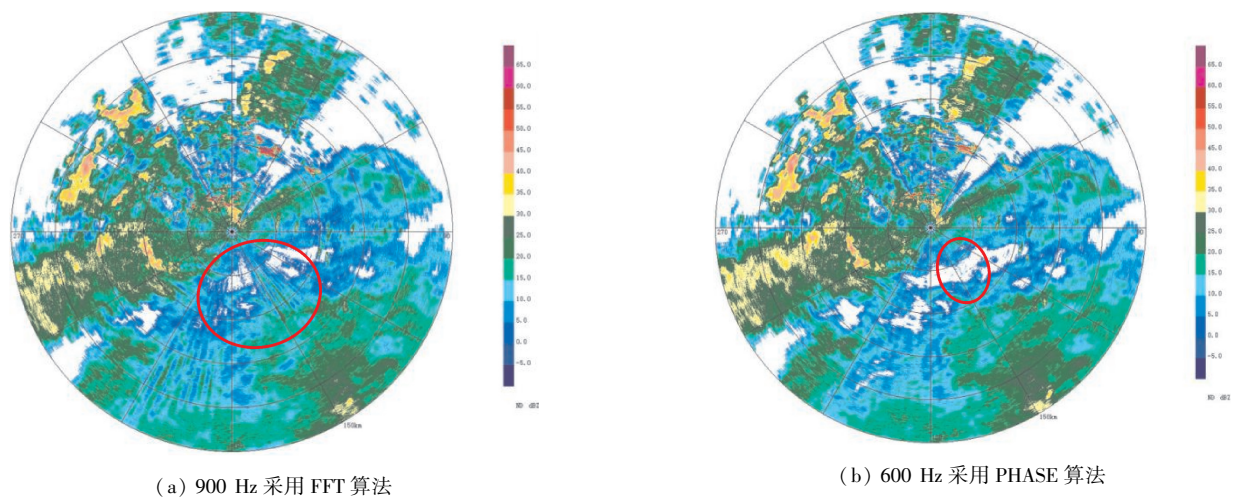


图 5 900 Hz/600 Hz 回波强度图

为更容易产生二次回波,选取 900/600 Hz 的双重频与300 Hz的单重频进行连续观测对比分析。通过理论计算,300 Hz对应的最远可探测数据为500 km,900 Hz对应的最远可测数据为167 km,600 Hz对应的为250 km。从图 4(a)可以看出,300 Hz在处红色标记处不存在回波,但其对应的远端回波能达到300 km以外,图 4(b)可以看出,相似天气过程下,900 Hz在该红色标记处出现了带状的条状二次回波。同时对比图 5 的 900/600 Hz的图可以看出,图 5(a)侧在相同红色标记处,出现了图 1 中的回波强度马赛克现象,位置与900 Hz单重频下出现二次回波的位置基本对应。并且通过加相位编码 PHASE 功能,图 5(b)中的回波马赛克现象消失。

通过这组对比观测实验,对回波马赛克现象进行了复现,可以得到:回波马赛克现象出现的条件是雷达采用 DUAL PRF 技术,回波出现距离折叠;通过相位编码技术,可以消除该现象。接下来,进一步用信号仿真方法进行分析 and 验证为什么出现这种回波特征。

2 端到端 I/Q 仿真方法验证

2.1 强度马赛克现象分析

通过对比观测实验,追踪回波马赛克现象出现的天气和雷达参数条件,下面进一步探究出现条纹状马赛克的原因,拟通过图 6 解析出现马赛克现象出现的过程。

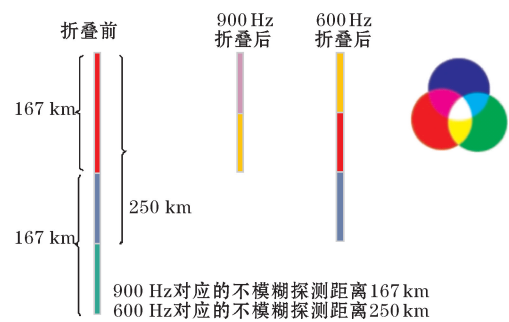


图 6 回波强度马赛克现象解释示意图

为方便分析,图6中假设未发生折叠的回波(最左侧)随着距离有3种回波强度(颜色)的变化,分别是0~167 km的红色,167~250 km的蓝色和250~334 km的绿色,对照三基色图标,假设强度折叠具有颜色相加的特性,那么对应900 Hz只能有效探测167 km,二次回波折叠到0~167 km的一次回波上,600 Hz能探测到0~250 km的距离,二次回波叠加在一次回波中,可以看出不同重复频率对应的不同折叠距离和强度导致了回波强度出现条纹状变化。为进一步验证,首次使用作者在文献[15]中提出的端到端 I/Q 信号仿真算法对回波马赛克现象进行验证。首先先介绍下端到端 I/Q 信号仿真的原理。

## 2.2 端到端 I/Q 信号仿真原理

天气雷达回波信号是由大量水凝物的反射回波非相干叠加组成,由于散射体的大小及位置的随机性,回波信号的幅度和相位也是随机的。忽略发射脉冲相位变化和散射时相位变化,考虑一个周期性的脉冲序列,那么对于任意时刻  $mT_s$  ( $m=0,1,2,\dots,m$ ,  $T_s$  为重复周期),忽略发射脉冲相位变化和散射时相位变化,可以将回波接收电压表示为<sup>[7]</sup>

$$V(mT_s) = \sum_k A_k(\tau_k, mT_s) U(mT_s - \tau_k) e^{-j\gamma_k} \quad (1)$$

$$\gamma_k = 4\pi r_k / \lambda + 4\pi v_k T_s / \lambda \quad (2)$$

式中:  $U$  代表发射脉冲波形,  $A_k$ 、 $r_k$ 、 $\gamma_k$  分别代表第  $k$  个散射体的回波幅度、位置和总的相位,  $v_k$  代表第  $k$  个散射体移动的速度,且满足:

$$\tau_k = 2r_k / c$$

$$A_k = \frac{\lambda G_0 f(\theta, \varphi) \sqrt{P_t} S_k}{4\pi r^2}$$

其中  $\lambda$  为雷达发射波长,  $G_0$  为天线增益,  $f(\theta, \varphi)$  为天线方向函数,  $P_t$  为雷达发射功率,  $S_k$  第  $k$  个粒子的散射矩阵。

波束作用体积内的水凝物粒子的数目非常巨大,且位置分布不均匀,由式(1)可知,如果考虑所有粒子的散射特性计算回波电压强度是不现实的。基于激光雷达时域仿真算法,首次将大气分层模型引入到天气雷达时域信号仿真中,这种算法是指沿着天气雷达扫描的方向,将散射体内的单个水凝物或散射目标分成角度为  $\Delta\theta$ 、中心位于  $\theta_m$  的很多层,并且认为每一个分层内具有一个相同的速度大小和方向,最终散射体内的回波信号可以看作所有分层信号的累加,分层的个数可以表示为  $n_L = \frac{\theta_{3dB}}{\Delta\theta}$ 。角度为  $\Delta\theta$  可选为天线在每个重复周期内的扫描角度,并认为在此角度内的散射目标可以认为是各向同性。

基于大气分层模型,根据不同分层间速度的统计特性和中心极限定理,可将式(1)中任意时刻回波信号可以写为

$$V(mT_s) = \sum_{k=0}^{n_L} \frac{\lambda G_0 f_k(\theta, \varphi) \sqrt{P_t} S_k}{4\pi r^2} a(k+m) \times$$

$$\exp\left\{-j\frac{4\pi}{\lambda}mT_s[b(k+m)-v(k+m)]\right\} \quad (3)$$

式中  $a(k)$  是复高斯随机分布,根据周期时间自相关性可知,  $v(k)$  表示每个分层的风速均值,而  $b(k)$  是零均值,  $\sigma v$  方差的高斯随机分布。

## 2.3 仿真方法溯源分析

利用端到端 I/Q 信号仿真模型,结合实测数据,根据2.1节给出的分析,给出仿真方法进行溯源分析的具体验证步骤:

(1) 将表3中仰角为  $0.5^\circ$ 、累计个数为32个,重复频率300 Hz的基数据,作为端到端 I/Q 仿真程序的输入端。matlab 绘图见图7,显示方位与图2~5有所不同,从图中可以看出,在左方有大面积较远回波。

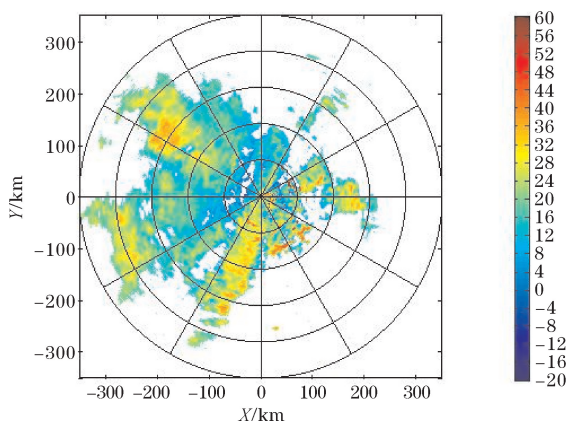


图7 300 Hz 回波强度分布图

(2) 利用端到端 I/Q 仿真算法,以图7的基数据为天气背景参数,生成900/600 Hz双重复频率的 I/Q 数据,此处不考虑二次折叠, I/Q 数据的最远探测距离于基数据一一对应。

(3) 根据不同重复频率对应的最大探测距离,判断每个重复频率对应的 I/Q 信号回波是否出现距离折叠。若出现,则将二次回波的信号叠加到一次回波位置处,进行非相干叠加。

(4) 采用快速傅里叶变换 FFT 算法,将仿真算法生成的 I/Q 数据计算得到基数据信息,如图8所示。

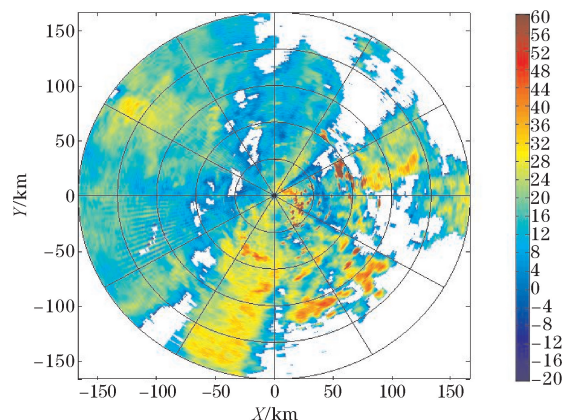


图8 I/Q 端到端仿真得到的900/600 Hz 回波强度分布图



将从 300 Hz 基数据仿真得到随机 I/Q 数据,再得到的 900/600 Hz 的基数据与实验得到的数据进行对比(图 9)。可以看出两者具有非常好的相似性,同时也证实了回波“马赛克”现象的成因。

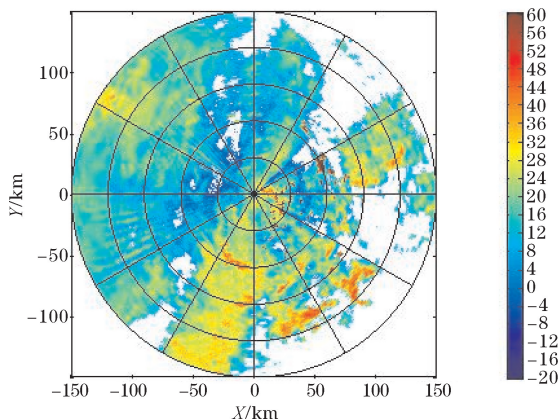


图 9 900/600 Hz 的真实回波强度分布图

### 3 结论

以三亚 SC 天气雷达在台风“威马逊”中出现的回波强度马赛克现象为研究对象,分析了 DUAL PRF 技术对回波强度的影响,并采用实验验证和端到端 I/Q 仿真的方法,对问题进行了溯源分析。通过开展对比观测实验,真实复现马赛克现象,初步得到结论:回波马赛克现象出现的条件是雷达采用 DUAL PRF 技术,回波出现距离折叠;通过相位编码技术,可以消除该现象。然后通过采用端到端 I/Q 信号仿真的方法,将具有大面积回波的 300 Hz 的信号作为仿真基数据输入端,生成具有 900/600 Hz 双重频的 I/Q 随机回波信号,考虑距离折叠的信号非相干叠加计算,通过正演分析得到了马赛克回波,进一步验证了“马赛克现象”的成因。

### 参考文献:

- [1] 李枕,高玉春.多普勒雷达与气象观测[M].北京:气象出版社(第二版),2013.
- [2] 李枕,张越.偏振多普勒天气雷达原理和应用[M].北京:气象出版社,2010.
- [3] 张培昌,杜秉玉,戴铁丕.雷达气象学[M].北京:气象出版社,2005:499.
- [4] 李柏.多普勒天气雷达原理与业务应用[M].北京:气象出版社,2011.
- [5] Sirmans D, D Zrníc, B Bumgarner. Extension of maximum unambiguous Doppler velocity by use of two sampling rates[C]. Preprints, 17th Conf. on Radar Meteorology, Seattle, WA, Amer. Meteor. Soc., 1976: 23-28.
- [6] P JOEP, T MAY. Correction of Dual PRF Velocity Errors for Operational Doppler Weather Radars[J]. J. Atmos. Oceanic Technol. 2003, 4(20): 429-442.
- [7] Zrníc D, P Mahapatra. Two methods of ambiguity resolution in pulsed Doppler weather radars[J]. IEEE Trans. Aerosp. Electr. Syst., 1985: 21, 470.
- [8] 唐瑾.脉冲多普勒天气雷达解模糊算法研究[D].合肥:安徽大学,2006.
- [9] 唐瑾,吴小培.多普勒天气雷达的交替 PRT 地物滤波算法[J].雷达科学与技术,2006,3(4): 177-180.
- [10] 柏晓锁,朱文剑.一种改进的双重频退速度模糊方法[J].航空精密制造技术.2009,45(6): 27-44.
- [11] 杨川,刘黎平,胡志群,等.C波段多普勒雷达双 PRF 模式速度混淆区识别和处理方法研究[J].气象学报,2012,(4).
- [12] 楚志刚,银燕,顾松山.一种抗噪声的天气雷达速度退模糊新算法[J].气象学报,2013,(4).
- [13] 楚志刚. CINRAD-SA 多普勒天气雷达速度模糊特征及退模糊方法研究[D].南京:南京信息工程大学,2014.
- [14] RVP900™ Digital Receiver and Signal Processor [M]. Vaisala Oyj, 2013.
- [15] CINRAD/SA 天气雷达双 PRF 技术 I/Q 信号仿真及算法对比验证[J].北京理工大学学报,2016.

## The Reflectivity Factor Mosaic Phenomenon Simulation Traceability Analysis for Sanya SC Weather Radar

SHAO Nan<sup>1</sup>, BU Zhi-chao<sup>1</sup>, LI Bai<sup>1</sup>, LI Zhe<sup>1</sup>, LI Zhao-chun<sup>2</sup>

(1. Meteorological Observation Centre of China Meteorological Administration, Beijing 100081, China; 2. Meteorological Observation Centre of Hainan Province, Haikou 570203, China)

**Abstract:** Aiming at the mosaic phenomenon of reflectivity factor in typhoon "Johnson Weimar" of Sanya, based on the experimental validation and simulation method, the influence of the Dual PRF to the reflectivity factor is first analyzed. By changing the different PRT, accumulate number and signal processing algorithm, the mosaic phenomenon is recurrence during the experiment and the weather conditions and radar parameters are traced. At the same time, based on weather radar transmitted pulse time autocorrelation properties, using the atmospheric stratification model, the end to end weather radar I/Q signal simulation algorithm is established. By using the end to end I/Q simulation methods, the mosaic phenomenon of reflectivity factor is obtained, the causes of echo "mosaic" phenomena is confirmed.

**Keywords:** I/Q signal simulation; random phase encoding; dual PRF; mosaic phenomenon of reflectivity factor