

魏鸣,张思进,刘佳,等. 2011. 机载气象雷达扫描的理想模型仿真算法[J]. 大气科学学报,34(1):28-35.

Wei Ming, Zhang Si-jin, Liu Jia, et al. 2011. Simulation algorithm research of an airborne Doppler weather with radar scanning ideal model[J]. Trans Atmos Sci, 34(1):28-35.

机载气象雷达扫描的理想模型仿真算法

魏鸣¹, 张思进^{1,2}, 刘佳³, 邵程远², 刘晓东²

(南京信息工程大学 1. 气象灾害省部共建教育部重点实验室; 2. 大气物理学院; 3. 大气科学学院, 江苏 南京 210044)

摘要:利用地基多普勒天气雷达数据, 提出机载雷达扫描的模拟仿真算法, 并建立了仿真扫描的理论模型。该模型利用数据分层几何投影, 处理速度较快、精度较高, 可应用于扇形扫描和圆锥扫描。在理想情况下, 设计了消除地物回波的算法及多普勒速度退模糊的算法。试验表明, 仿真回波可应用于机载气象雷达实际观测前的扫描方式可行性研究, 有助于分析机载雷达探测的云雨回波特性。

关键词:机载雷达; 理论模型; 分层投影; 数据仿真; 算法设计

中图分类号: P412. 25 文献标识码: A 文章编号: 1674-7097(2011)01-0028-08

Simulation algorithm research of an airborne Doppler weather radar with scanning ideal model

WEI Ming¹, ZHANG Si-jin^{1,2}, LIU Jia³, SHAO Chen-yuan², LIU Xiao-dong²

(1. Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education; 2. School of Atmospheric Physics; 3. School of Atmospheric Sciences, NUIST, Nanjing 210044, China)

Abstract: Based on ground base radar data, the simulation algorithm of airborne radar is proposed and an ideal model of simulation scanning patterns is also established. The algorithm is quicker and precise with the geometrical projection of divided data levels. The algorithm can be used in both sector scanning and taper scanning. At ideal conditions, this paper also discusses the algorithm of the ground echo eliminating as well as the Doppler velocity dealiasing. The results show that simulated echo could be applied to the feasibility study of scanning types before the real flight observation of airborne Doppler weather radar, and helps analysis its cloud and rain echo characteristics.

Key words: airborne radar; ideal model; geometrical projection; data simulation; algorithm design

0 引言

多普勒天气雷达以其高时空分辨率成为中小尺度灾害性天气监测预报中独特而有效的探测手段(张培昌等, 2005), 目前已被广泛应用于探测降水、低空急流以及阵风锋等方面的研究(Merritt, 1969; Hildebrand et al., 1981; 裴宇杰等, 2005)。与地基雷达相比, 机载雷达在飞行中观测具有更多的灵活性,

能够从新的视角揭示天气信息。部分发达国家机载多普勒气象雷达已有多年的研究和应用基础, 对龙卷和台风等天气的观测试验取得了有效的成果(贲德等, 2006)。为了模拟机载多普勒气象雷达的扫描方式与观测结果, 本文用地基多普勒气象雷达数据, 进行空间插值处理, 设计仿真算法, 通过在机载雷达扫描方向进行空间分层投影, 在不考虑旁瓣回波和载机实际飞行状态等因素的影响时, 得到理想

收稿日期: 2010-06-02; 改回日期: 2010-09-01

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2007AA061901); 江苏省自然科学基金资助项目(BK2009415); 高校博士点专项科研基金联合资助课题(20093228110002); 江苏省高校自然科学研究重大基础研究项目(10KJA170030); 灾害天气国家重点实验室开放课题(2010LASW-A01); 北极阁基金(BJG201001)

作者简介: 魏鸣(1957—), 女, 天津人, 博士, 教授, 研究方向为大气探测与遥感; 张思进(通信作者), 男, 硕士生, 研究方向为大气探测与遥感, zsj19851115@126.com.

的扫描模型,仿真了机载多普勒气象雷达对相应区域的扫描产品。

1 利用地基雷达资料生成三维降水云回波数据

鉴于地基多普勒天气雷达的圆锥扫描数据不能反映相同高度的气象信息,为获取各等高面的回波功率(dBZ)及多普勒径向速度,需要将整个体积扫描数据插值到各等高面(即获取 CAPPI)。本研究中采用权重插值法(彭霞云等,2007),对雷达体扫描范围内的数据进行插值。

$$D(\theta, r) = \frac{D(\varphi_1, \theta, t_1) + \left(\frac{t_1 - r}{r - t_2}\right) \times D(\varphi_2, \theta, t_2)}{\left(1 + \frac{t_1 - r}{r - t_2}\right)} \quad (1)$$

其中: φ_1 和 φ_2 分别为上一层径向和下一层径向的仰角; t_1 和 t_2 分别为上一层径向和下一层径向的库数,且 t_1 和 t_2 所在距离库是等高度的; θ 为两层径向共有的方位角; $D(\theta, r)$ 表示在方位角为 θ , 径向库为 r 处, 高度为 t_1 和 t_2 距离库所在高度的回波大小。则(1)式表示利用上一层径向和下一层径向对 $D(\theta, r)$ 所在位置的插值方法。需要将按极坐标存储的 CAPPI 数据储存在直角坐标系中,即进行极坐标一直角坐标转换: $D(\theta, r) \rightarrow D(x, y)$, 公式如下

$$\begin{cases} x = r \cos(\theta); \\ y = r \sin(\theta). \end{cases} \quad (2)$$

在获取各个等高层上的雷达数据后,需要对数据进行质量控制,剔除跳跃回波点和孤立回波点。剔除跳跃回波采用的标准为:与平均值的偏差大于

3 倍的标准差。剔除孤立回波点的标准为:数据点周围取 16 个点均无有效回波数据(崔丹等,2009)。

2 理想仿真模型建立

2.1 载机模拟飞行参数设计

设研究模型中雷达载机飞行高度为 5 000 m, 飞行速度设为 300 ~ 350 km/h。机载雷达最大探测距离在 100 km(测反射率因子)和 50 km(测径向速度)以上,地表平均海拔为 0 m。

2.2 载机模拟扫描方式设计

设计两种机载雷达的模型:1)在载机机头安置无源相控阵雷达,采用快速立体扇形扫描(Smith and Hung, 1975; Jorgensen et al., 2000; Yu and Smull, 2000)对气象目标物进行一定范围的水平方位角和俯角的探测(图 1a);2)在机腹安置小功率脉冲多普勒气象雷达,采用圆锥扫描(刘黎平等, 2003; 蔡亲波和颜琼丹, 2009)的方式对飞机机腹以下气象目标物进行观测(图 1b)。

3 仿真算法设计

3.1 仿真算法设计思路

利用地基雷达基数据插值到 30 ~ 50 个等高面(CAPPI),数据经过质量控制后,根据模拟雷达载机的飞行高度、扫描的俯角/方位角、波束宽度等信息,计算在各个不同 CAPPI 层中所需的数据点,从而获得机载多普勒天气雷达探测云雨的仿真结果(图 2)。

3.2 立体扇形扫描下的仿真算法

在仿真机载雷达天线进行立体扇形扫描时,雷达可以获得不同距离库上气象目标物的剖面信息。

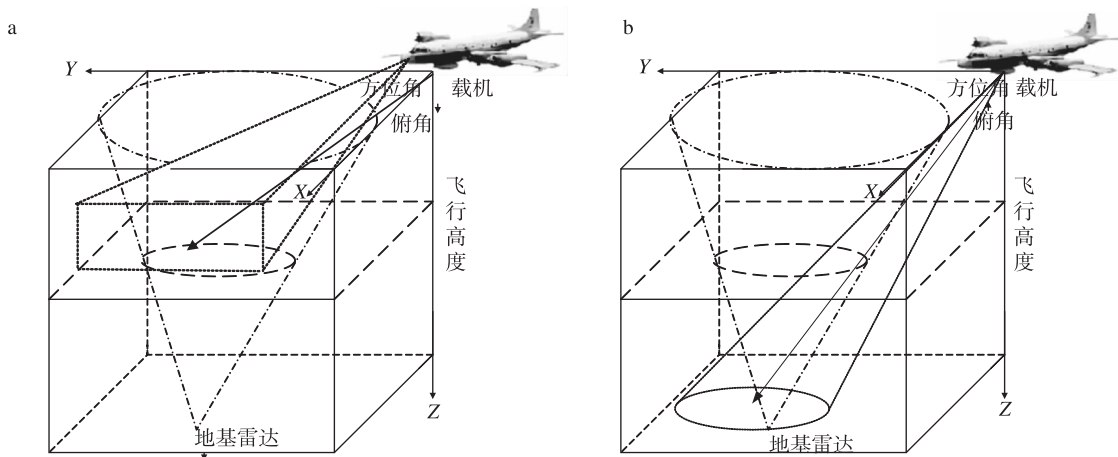


图 1 模拟载机扫描方式示意图 a. 扇形扫描;b. 圆锥扫描

Fig. 1 Sketch map of simulating plane scanning a. the sector scan;b. the taper scan

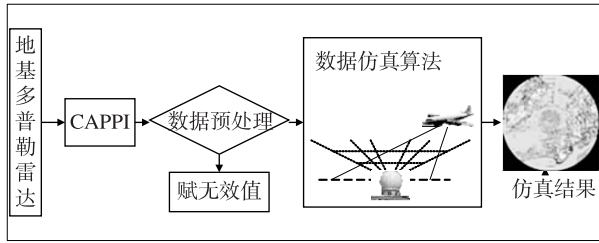


图 2 机载多普勒气象雷达的仿真流程

Fig. 2 Flow chart of airborne Doppler weather radar simulation

如图 1a 所示,飞机飞行高度为 H (图 3), 设扫描线中任意一点距离库为 P , 则在飞机航线平面上的投影为

$$L = P \cos(\varphi) \quad (3)$$

其中 φ 为扫描俯角。将 L 在 x, y, z 方向进行二次投影, 令 θ 为方位角, 得

$$\begin{cases} x = P \cos(\varphi) \cos(\theta); \\ y = P \cos(\varphi) \sin(\theta); \\ z = P \sin(\varphi). \end{cases} \quad (4)$$

考虑飞机扇形扫描特性, 得到在距离库 p_1 到 p_2 之间, 扫描俯角 φ_1 到 φ_2 之间, 扫描方位角在 θ_1 到 θ_2 之间 (图 3) 的机载雷达仿真数据点坐标为

$$\begin{cases} x = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_{p_1}^{p_2} P \cos(\varphi) \cos(\theta) d\varphi d\theta dp; \\ y = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_{p_1}^{p_2} P \cos(\varphi) \sin(\theta) d\varphi d\theta dp; \\ z = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_{p_1}^{p_2} P \sin(\varphi) d\varphi dp; \end{cases} \quad (5)$$

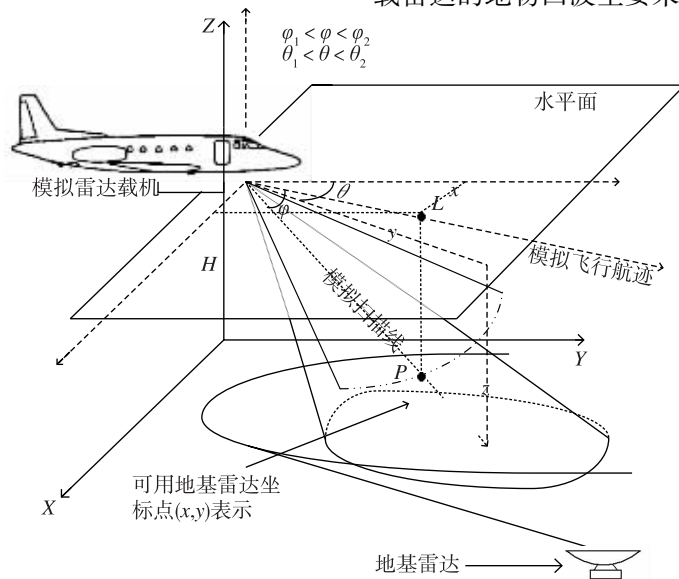


图 3 扫描仿真算法示意图

Fig. 3 Schematic diagram of scanning simulation algorithm

根据(5)式, 当 $d\varphi = 0$ 时, 模拟扫描方式为水平扇扫, 当 $d\theta = 0$ 时, 模拟扫描方式为垂直扇扫。

3.3 圆锥扫描的仿真算法

圆锥扫描天线置于载机机腹, 用于对地面到载机飞行高度范围内的气象目标进行观测, 如图 1b 所示。若已知载机飞行高度为 H , 载机对应的地形海拔高度为 h , 设相对高度为 ΔH , 则 $\Delta H = H - h$ 。令 φ 为扫描俯角, θ 为方位角, 则雷达扫描中心的地面投影点坐标为

$$\begin{cases} x_0 = z_0 \tan(\varphi) \cos(\theta); \\ y_0 = z_0 \tan(\varphi) \sin(\theta); \\ z_0 = \Delta H. \end{cases} \quad (6)$$

以 $D(L)$ 表示第 L 个等高面上的扫描半径缩减距离, K 表示距离高度系数, 则

$$D(L) = (L - 1)K \quad (7)$$

其中:

$$K = \frac{L - (L - L') \sin\varphi}{L - 1} \quad (8)$$

L' 表示 CAPPI 等高面的最高海拔, 则圆锥扫描投影在平面上的数据点坐标 x, y 即可表示为:

$$\begin{cases} x = \int_0^{360} (x_0 + (R - D(L)) \cos(\theta)) d\theta; \\ y = \int_0^{360} (y_0 + (R - D(L)) \sin(\theta)) d\theta. \end{cases} \quad (9)$$

3.4 数据误差分析及处理

3.4.1 理想情况下去除地物回波

当不考虑地面起伏, 旁瓣回波等因素影响时, 机载雷达的地物回波主要来自于波束到达地面时散射

的回波。即:若 CAPPI 最低一层由 r 表示,则当等
高面 $L = r$ 时,获得反射率因子为地物杂波,可提取
并去除。地物杂波可表示为

$$\begin{cases} x = \int_0^{360} (x_0 + (R - D(r)) \cos(\theta)) d\theta; \\ y = \int_0^{360} (y_0 + (R - D(r)) \sin(\theta)) d\theta. \end{cases} \quad (10)$$

由式(6)可知扫描中心地面投影点在平面上的
坐标,并令 $(R - D(L))$ 为 M ,则上式为:

$$\begin{cases} x = \Delta H \int_0^{360} (\tan(\varphi) \cos(\theta) + M \cos(\theta)) d\theta; \\ y = \Delta H \int_0^{360} (\tan(\varphi) \sin(\theta) + M \sin(\theta)) d\theta. \end{cases} \quad (11)$$

3.4.2 理想情况下退径向速度模糊

假设飞机速度可精确测量,则机载雷达的径向
速度模糊主要由两部分引起,其中主要原因是飞机
飞行速度造成,其次当多普勒频移大于脉冲重复频
率 P_{RF} 一半的时候,即 $f_d > \frac{P_{RF}}{2}$ 时,也会产生径向速度
模糊(郎需兴等,2001;刘淑媛等,2004;陈楠等,
2009;)。一般来说,由最大不模糊多普勒频率可计
算出最大相对不模糊速度;当目标物与雷达天线相
向运动,并考虑飞机的理论飞行速度为确定且可测
量,假设载机速度为 V_1 ,目标物速度为 V_2 ,有

$$f_d = -\frac{2}{\lambda}(V_1 + V_2). \quad (12)$$

当目标物与天线相背运动时,有

$$f_d = \frac{2}{\lambda}(V_1 + V_2). \quad (13)$$

当目标物与天线同向运动时,有

$$f_d = \frac{2}{\lambda}(V_1 - V_2). \quad (14)$$

由于最大不模糊多普勒频率 $f_{dmax} = \pm \frac{1}{2}P_{RF} =$
 $\frac{2V_r}{\lambda}$,当雷达天线与目标物相向运动时 $V_r = -V_1 - V_2$;
当雷达天线与目标物相背运动时 $V_r = V_1 + V_2$;当雷
达天线与目标物同向运动时 $V_r = V_1 - V_2$;所以目标
物的实际速度为

$$V_{tme} = V_{rad} \pm 2n \times V_{max} \pm V_a. \quad (15)$$

其中: V_{tme} 表示目标物实际速度; V_{rad} 表示雷达观测
径向速度; V_{max} 表示最大不模糊径向速度; n 表示模
糊次数; V_a 为雷达天线移动速度(即载机速度)。

4 仿真结果分析

以下实验环境为 CPU AMD 1.5 G × 2,显卡
GeFore FX 5400,内存 2 G,操作系统为 Windows XP
DirectX9.0。

4.1 扇形扫描理想仿真结果与分析

利用 2005 年 4 月 30 日 12 时 06 分福建长乐多
普勒天气雷达站 SA 格式探测资料为实验数据,模
拟相控阵雷达扇形扫描的仿真结果。当日有对流云
在天气雷达站东南侧维持,最大回波强度达 50 dBZ
左右(图 4)。

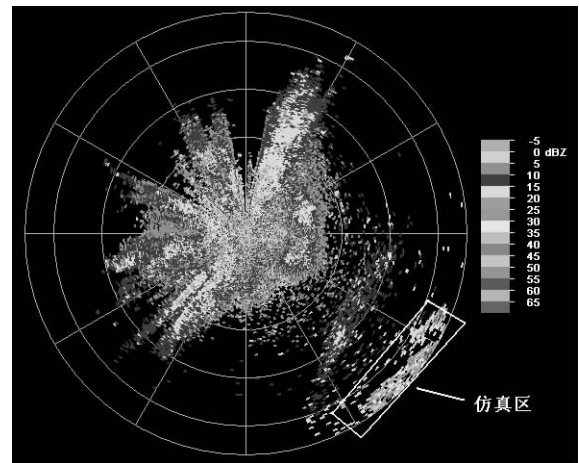


图 4 2005 年 4 月 30 日 12 时 06 分福建长乐多普勒雷达
的反射率因子回波(仰角为 0.5°)

Fig. 4 Doppler radar reflectivity factor echo in Changle
Station of Fujian province at 12:06 BST April 30,
2005 (elevation is 0.5°)

图 5 为模拟飞行高度为 5 000 m 时,利用实验
数据(2005 年 4 月 30 日 12 时 06 分,仰角为 0.5° ,
 1.5° , 2.4° , 3.4° , 4.3° , 6.0° , 9.9° 等 7 个不同仰角
的数据)对对流云区域进行扇形扫描的反射率因子
(dBZ)仿真结果剖面图,横坐标表示天线扫描的水平范围,纵坐标表示天线扫描的垂直范围(俯角向
下为正),单位均为($^\circ$),采用 SPLINE 插值方式,仿
真程序设计环境为 MATLAB2008。其中图 5a 的径
向距离为 55 km;图 5b 的径向距离为 55 km;图 5c
的径向距离为 225 km;图 5d 的径向距离为 225 km。

将机载雷达扇形扫描的仿真结果与实时地基雷
达观测结果(图 4)进行对比,发现仿真结果反映了
不同高度层回波大小的变化,与相应高度实际雷
达回波分布(图略)有较好的相关性。其中在图 5c
与图 5d 中,由于径向距离较长(225 km),故波束底
部探地,若模拟的地表为水平面,则仿真结果中将
包含地物杂波部分(图形底部,矩形阴影区)。

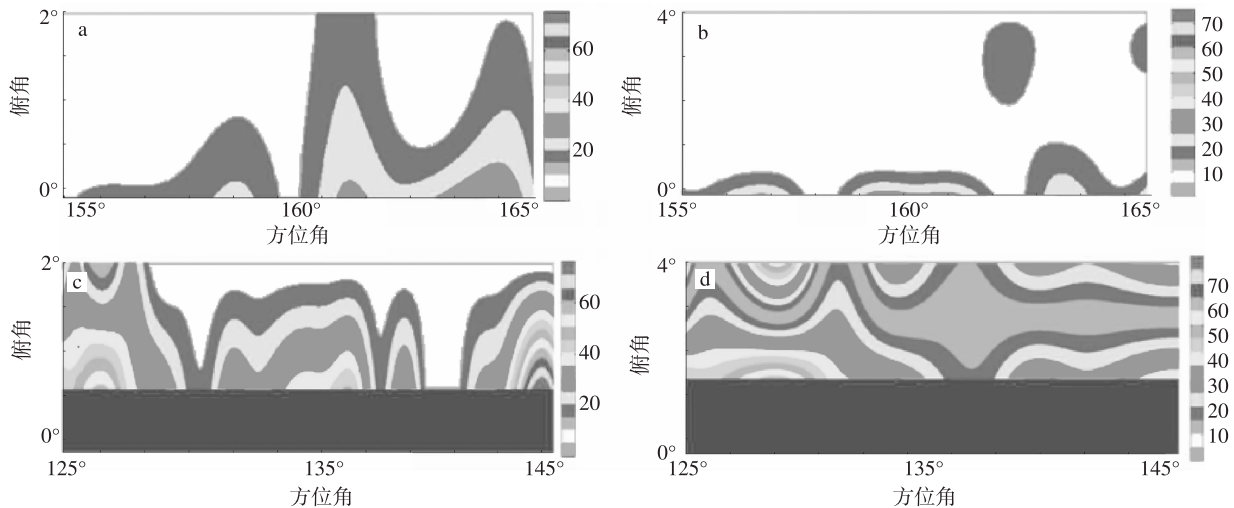


图 5 扇形扫描时反射率因子仿真结果(单位:dBZ)

Fig. 5 The simulation reflectivity factor by the sector scanning pattern(units:dBZ)

由于采用扇形扫描时获取扫描区域有限,故在数据仿真显示时插值方法非常重要。本文研究了常用的四种插值方式在扇形扫描仿真中的应用,并对其插值效果。表 1 反映了利用试验数据在俯角为 $0 \sim 2^\circ$,方位角为 $155 \sim 165^\circ$,径向距离为 50 km 时,采用不同插值方式(任朗,2002)的数据对比统计结果。其中,Nearest 插值是直接找到最近的数据点,用该点的值作为插值结果;Linear 插值采用已知数据两点之间连线的方式,根据要插值的点在线上的位置计算插值结果;Cubic 插值,利用三次多项式,获得平滑插值曲线,从而计算插值结果;Spline 插值,利用散点分布及已知数据,根据这些点在平面内的二维坐标,采用数学方法求出待求点的数值。

表 1 中,奇异值点的数目主要是决定于该点数值与原始数值的差(设阈值为 3 dBZ)和该点数值与周围 8 个点平均值的差(平均值三倍范围内)。由表 1 看出,Spline 插值在平滑效果和运算时间上有一定的优势。

表 1 理想情况下仿真扇形扫描时利用不同插值方式的对比

Table 1 Comparing with different interpolation ways for simulation sector scanning at ideal conditions

插值方式	实际数据点/个	插值数据点/个	奇异值点/个	运算时间/s
Nearest	30 × 110	200 × 200	710	0.3
Linear	30 × 110	200 × 200	290	5.2
Cubic	30 × 110	200 × 200	23	13.9
Spline	30 × 110	200 × 200	26	10.7

4.2 圆锥扫描理想仿真结果与分析

分别采用福建厦门雷达站 2005 年 4 月 30 日 12 时 06 分、2007 年 8 月 17 日 21 时 23 分、2008 年 3 月 6 日 7 时 30 分、2009 年 4 月 19 日 18 时 16 分 4 次不同天气过程的 SA 雷达基数据作为实验数据。模拟飞行高度为 5 000 m,俯角为 2.5° ,模拟回波强度扫描距离为 230 km,模拟多普勒径向速度扫描距离为 130 km。仿真程序设计环境为 Visual Studio 2008,并采用 C++ 与 MATLAB 混合编程技术。以下仿真结果均在理想过程中完成,即不考虑旁瓣回波、地面起伏,飞机穿云观测限制,并假设飞机速度恒定且可测。

图 6a、d、g、j 分别为四个不同时刻且仰角为 0.5° 的回波反射率因子雷达产品图(距离库 230 km,库长 1 km)。图 6b、e、h、k 为未采用地物回波消除算法得到的仿真结果,图 6c、f、i、l 为应用了地物回波消除算法得到的仿真结果。图 6m、p、s、v 分别为四个不同时刻且仰角为 0.5° 的地基雷达多普勒径向速度产品图(速度库 230 km,库长 1 km)。图 6n、q、t、w 为未采用径向速度退模糊算法得到的仿真结果。图 6o、r、u、x 为应用了径向速度退模糊算法得到的仿真结果。

考虑到机载雷达空中探测的特点,模拟探测中心周围的回波为大气层中气象目标的反射率因子回波。模拟探测中心外围的回波为近地面回波。故由图 6 可见,在反射率因子探测方面,机载雷达理想模型仿真结果与实际地基探测结果总体上有较高的相似度,主要区别位于回波中心附近,这主要是由于地基雷达回波中心为近地面,而机载雷达的中心附近

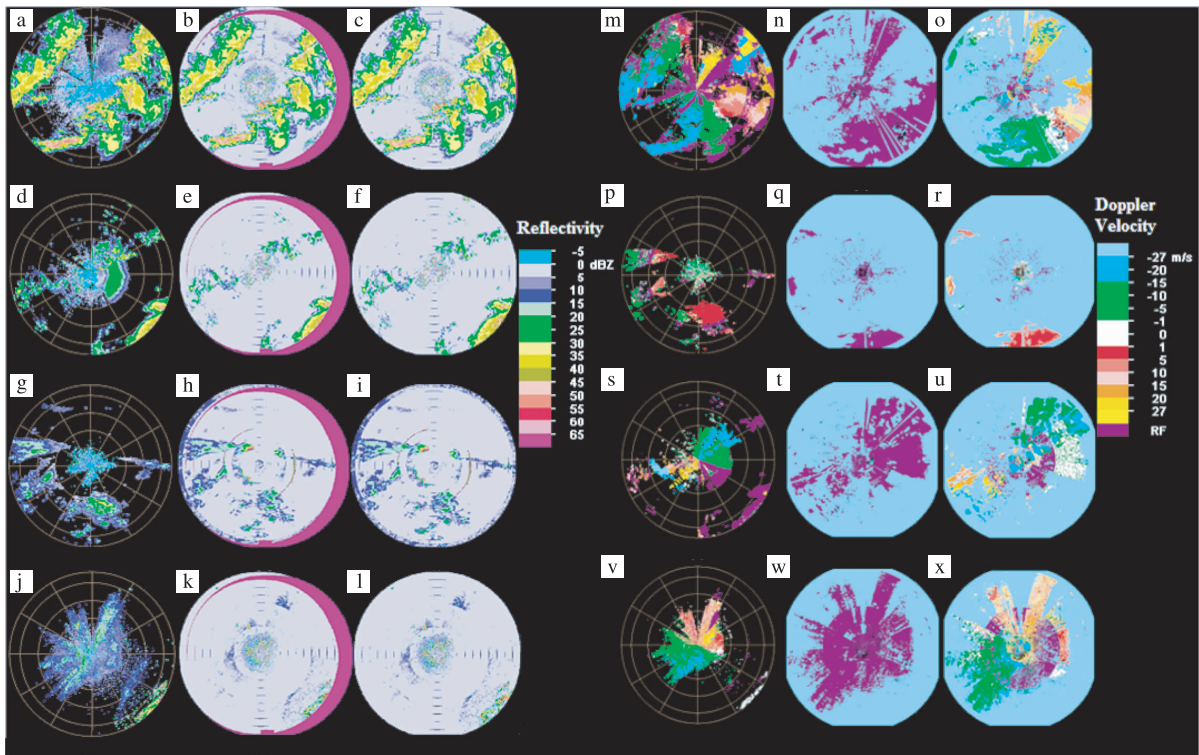


图 6 圆锥扫描时反射率因子及径向速度在理想情况下的仿真结果

Fig. 6 Simulation results of reflectivity and radial velocity with taper scanning pattern at ideal conditions

回波海拔接近于飞机飞行高度。同时,仿真结果也较好地验证了本文提出的机载雷达地物回波消除算法的可靠性。

在多普勒径向速度仿真方面,如图 6 所示,本文所得理想模型能够在距离库 130 km 范围内较好地反映实际径向风场的分布。当采用了径向速度退模糊算法之后,能够在一定程度上消去由于飞行速度带来的相对速度增加值,从而更加准确地反映出实际风场的分布状况(该圆锥扫描仿真过程并未利用实验数据生成三维降水云,故所得结果仅应用于 2 维产品分析)。

4.3 机载雷达连续观测仿真实例

若飞机在飞行过程中,机腹多普勒天气雷达连续开机对气象目标进行扫描,则可获取沿飞行轨迹的相应区域内回波反射率因子或多普勒径向速度(Wakimoto and Murphey, 2008)。采用福建厦门多普勒天气雷达站(地基)观测的 2006 年 8 月 10 日过境福建的台风“桑美”为仿真源数据,设计飞机对台风过程的观测路线(图 7)。观测路线包括穿云观测(路线 1)和绕台风观测(路线 2)。

路线 1 采用机腹雷达对混合云进行观测,路线 2 采用机头相控阵雷达对台风眼、眼壁、螺旋雨带等进行观测。设计的仿真载机及雷达参数如表 2 所

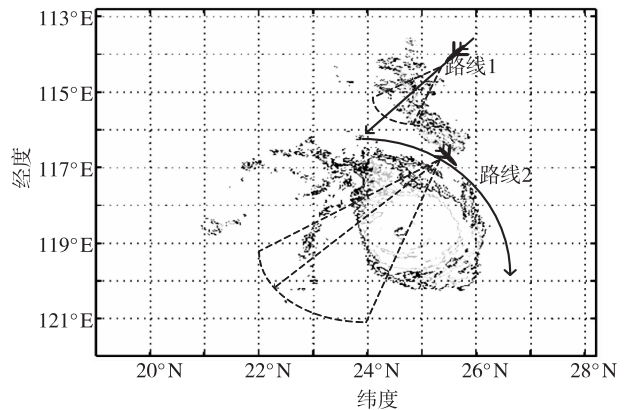


图 7 机载雷达对台风的仿真观测路线

Fig. 7 The simulation route of airborne radar for typhoon observation

示。考虑到模拟数据来源的限制(来源于 S 波段天气雷达)及本文仅研究软件模拟算法,参数设计并未完全按照机载雷达研制方案。

图 8 均为 PPI 仿真扫描结果。其中,图 8a 为线路 1 上的观测结果(强度),在与 GIS 结合后可以明显看出扫描轨迹和每一次扫描引起的地物回波。图 8b、c、d、e、f 分别为在路线 2,俯角为 0.3°时,相控阵扫描每隔 8 min(2006 年 8 月 10 日 09:02 至 09:43)的反射率因子模拟观测结果。由图 8 可以看出,若需要对台风的整体结构进行观测,在设计雷达时需要

表 2 仿真模型雷达参数设计

Table 2 Parametric design of simulated radar model

	载机速度/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	载机高 度/km	雷达体制	扫描 方式	雷达 位置	波段	实际探测 距离/km	覆盖范 围 ¹⁾ / $(^\circ)$	波瓣宽 度/ $(^\circ)$	分辨率		测量范围	
										距离/强度/ m dBZ	反射率因 子/dBZ	径向速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	
路线 1	350	5	脉冲 多普勒	锥形 扫描	机腹	S(受限于模 拟数据来源)	>80(强度) >20(径向速度)	20(天线 俯角)	0.70	150	2	-5~70	-30~30
路线 2	350	5	无源相控阵 /脉冲多普勒	扇形 扫描	机头	S(受限于模 拟数据来源)	>100(强度) >50(径向速度)	120(水平) 90(垂直)	2.5	150	2	-5~70	-30~30

注:1)覆盖范围中的仿真数据库的俯角层数由地基雷达仰角数决定.

尽可能增加探测距离以及天线的覆盖范围,或者增强飞机抗风暴能力,从而可进行穿越对流云的观测。

图 9 为飞机对台风扫描的仿真垂直剖面,可以看出当采用表 2 参数时,垂直扫描能对台风的结构有详尽的显示,台风眼区和台风眼壁等特征都有较好的反映。

利用载机对整个台风区域进行观测后获得的仿真数据,在进行分层插值后,可以获得反射率因子三维分布(图 10a)和回波顶高分布(图 10b),它们可细致地展示整个台风的回波结构,有利于对台风回

波信息的整体收集。

5 结论

本文设计了机载多普勒气象雷达的仿真算法,利用地基雷达数据对机载雷达产品进行仿真,在不考虑旁瓣回波、实际地形及天线具体扫描过程等因素的情况下,建立了仿真扫描的理论模型,得出了具有参考意义的仿真结果供后续研究与讨论。仿真结果表明:

1)利用地基多普勒气象雷达资料仿真的机载

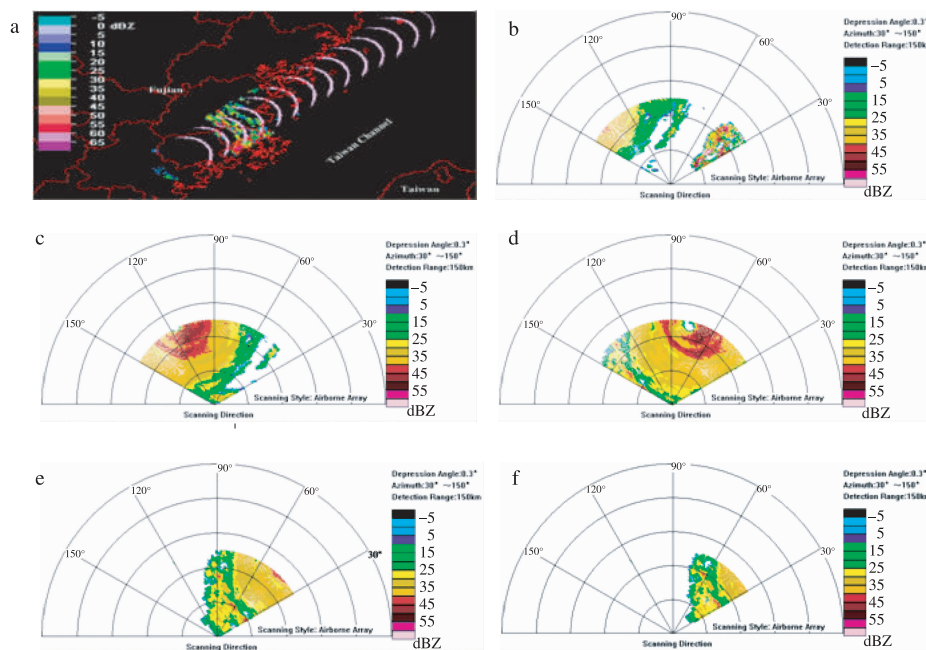


图 8 “桑美”台风连续时次的仿真机载观测结果 a. 线路 1 上的观测结果(强度); b-f. 在路线 2 观测且俯角为 0.3° 时,相控阵扫描每隔 8 min(2006 年 8 月 10 日 09:02 至 09:43)的反射率因子模拟

Fig. 8 Simulation airborne series observation results for Typhoon Saomai a. observation results along the route 1; b-f. observation results of reflectivity divided into every 8 minutes (09:02—09:43, August 10th 2008) along the route 2 when depression angle is 0.3°)

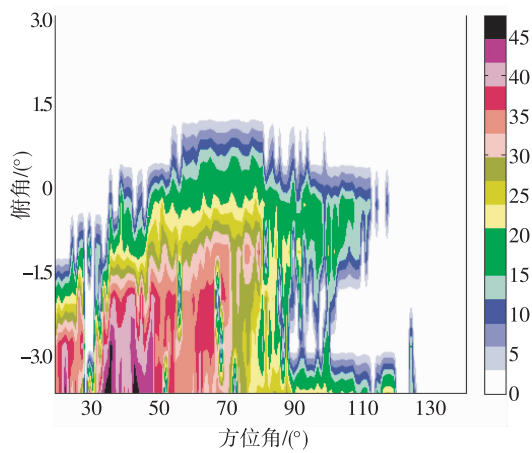


图 9 机载雷达对台风扫描的仿真垂直剖面(单位: dBZ)
 Fig.9 Simulation vertical section scanning of airborne radar towards to typhoon(units: dBZ)

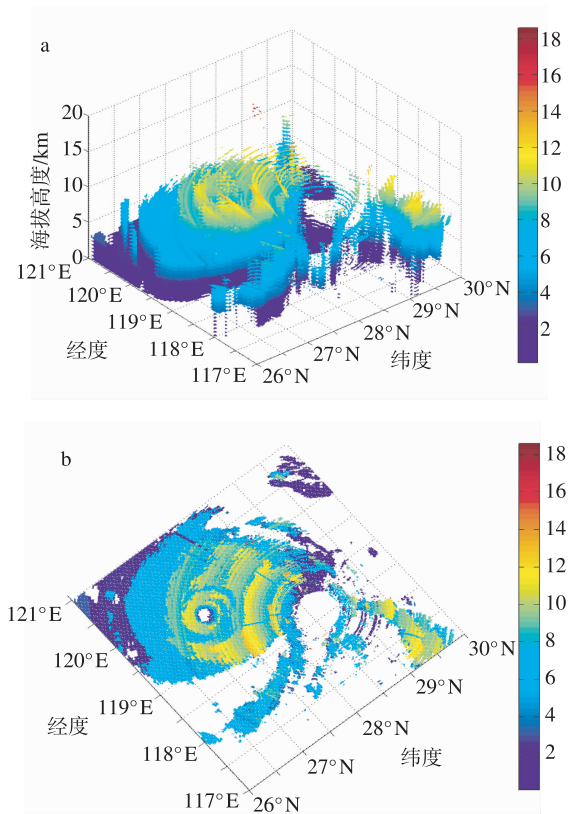


图 10 利用台风“桑美”仿真数据得到的整个台风区的机载雷达模拟观测结果(单位: dBZ)
 a. 反射率因子三维回波; b. 仿真反射率因子回波顶高

Fig. 10 Simulated airborne radar observation of whole typhoon area based on simulation data for Typhoon Saomai (units: dBZ) a. three dimension reflectivity factor; b. echo top of reflectivity factor

雷达探测结果可反映其扫描方式的回波变化。

2) 地基雷达回波中心为近地面,而机载雷达中心附近的回波海拔接近于飞机飞行高度。

3) 最远获取的机载气象雷达反射率因子数据一般为地物回波。在理想情况下,加入径向速度退模糊算法与地物回波去除算法后,理论仿真结果接近于地基雷达探测的实际结果。本文研究所得仿真算法适合于机载多普勒气象雷达实际观测前的各种产品分析与应用。

参考文献:

贲德, 韦传安, 林幼权. 2006. 机载雷达技术[M]. 北京: 电子工业出版社.

蔡亲波, 颜琼丹. 2009. 二维多路多普勒雷达风场自动退模糊算法应用研究[J]. 气象科学, 29(5): 625-632.

陈楠, 徐芬, 顾松山, 等. 2009. 多普勒天气雷达径向速度产品在预报中的应用[J]. 气象科学, 29(3): 421-426.

崔丹, 肖辉, 王振会, 等. 2009. X波段多参数气象雷达对强风暴云雷电个例的探测研究[J]. 大气科学学报, 32(6): 839-850.

郎需兴, 魏鸣, 葛文忠, 等. 2001. 一种新的单多普勒雷达风场反演方法[J]. 气象科学, 21(4): 417-424.

刘黎平, 张沛源, 梁海河, 等. 2003. 双多普勒雷达风场反演误差和资料的质量控制[J]. 应用气象学报, 14(1): 48-52.

刘淑媛, 王洪庆, 陶祖钰, 等. 2004. 一种简易的多普勒雷达速度模糊纠正技术[J]. 应用气象学报, 14(5): 111-116.

裴宇杰, 顾松山, 陈钟荣. 2005. 多普勒天气雷达信息网络服务系统的设计[J]. 南京气象学院学报, 28(1): 125-132.

彭霞云, 闵锦忠, 周振波, 等. 2007. 单多普勒雷达反演风场的质量控制[J]. 南京气象学院学报, 30(1): 79-85.

任朗. 2002. 数学物理基础[M]. 成都: 西南交通大学出版社.

张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕. 2005. 雷达气象学[M]. 北京: 气象出版社.

Hildebrand P H, Oye R, Carbone E. 1981. X-hand vs C-band aircraft radar: The relative effects of beamwidth and attenuation in severe storm situations[J]. J Appl Meteor, 10(33): 1353-1361.

Jorgensen D P, Shepherd R, Goldstein S. 2000. A dual-pulse repetition frequency scheme for mitigating velocity ambiguities of the NOAA P-3 airborne Doppler radar[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 17(5): 585-594.

Merritt P. 1969. Comparison of airborne and ground based weather radars[J]. J Appl Meteor, 14(2): 963-974.

Smith R E, Hung R J. 1975. Observation of severe weather activities by Doppler sounder array[J]. J Appl Meteor, 12(6): 1611-1615.

Wakimoto R M, Murphey H V. 2008. Airborne Doppler radar and sounding analysis of an oceanic cold front[J]. Mon Wea Rev, 8(11): 1475-1491.

Yu C K, Smull B F. 2000. Airborne Doppler observations of a landfalling cold front upstream of steep coastal orography[J]. Mon Wea Rev, 8(6): 1577-1603.

(责任编辑: 刘菲)