

文章编号:1004-9037(2014)04-0642-06

## 机载气象雷达充塞系数估计方法

何 力<sup>1,2</sup> 李 勇<sup>1,2</sup> 刘 丽<sup>1,2</sup>

(1. 雷达成像与微波光子技术教育部重点实验室(南京航空航天大学),南京,210016;

2. 南京航空航天大学电子信息工程学院,南京,210016)

**摘要:**机载气象雷达的基本任务是探测航路前方气象目标的位置和强度,而表征气象目标强度的物理量是反射率因子,通常依据气象雷达方程来估计。当雷达载台位于高空、对中远距离低高度的气象目标进行观测时,由于雷达波束的不完全充塞,反射率因子的估计值会小于实际值,严重影响对目标危险等级的判别。本文将充塞系数引入气象雷达方程,提出了一种基于雷达实时工作参数的充塞系数估算方法,并详细分析了不同系统参数下充塞系数变化情况。仿真气象目标数据的处理结果表明,该方法能有效地提高反射率因子的估计精度。

**关键词:**机载气象雷达;气象雷达方程;充塞系数;反射率因子;参数估计

中图分类号:TN959

文献标志码:A

## Beam Filling Coefficient Estimation Method for Airborne Weather Radar

He Li<sup>1,2</sup>, Li Yong<sup>1,2</sup>, Liu Li<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Radar Imaging and Microwave Photonics of Ministry of Education, Nanjing, 210016, China(Nanjing University of Aeronautics & Astronautics);

2. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** The basic task of an airborne weather radar is to detect the position and intensity of meteorological targets ahead of the plane. The intensity of the meteorological targets can be represented by the physical quantity called reflectivity factor, which is often estimated from the weather radar equation. When observing the middle- or long-range meteorological targets at low altitude from a high-altitude radar platform, due to the incomplete beam filling, the measurement result of the reflectivity factor is much less than the actual value. This effect seriously lowers down the accuracy of determining the hazard level of the target. This paper firstly introduces a beam filling coefficient into the weather radar equation and then presents its estimation method based on the real-time radar operating parameters. The variation of the filling coefficient is fully analyzed under different radar system parameters. Finally, the validity of the proposed method is verified by processing the raw-data of the simulated meteorological targets. Simulation results show an effective improvement of the accuracy of the reflectivity factor.

**Key words:** airborne weather radar; meteorological radar equation; beam filling coefficient; radar reflectivity factor; parameter estimation

## 引 言

机载气象雷达能够实时有效地探测载机运动

前方的雷暴、暴雨、飏线、冰雹等灾害性天气,已经成为了民航客机、运输机等大飞机必不可少的电子设备。机载气象雷达信号处理核心目标是实现气象目标信息的精确感知,这也是决定雷达性能的主

要因素。在气象学中用反射率因子度量气象目标的实际危害程度,即气象目标的反射率因子越大,则表明其回波强度越高,气象状况越恶劣<sup>[1-2]</sup>。所以,获知符合实际天气情况的反射率因子对保障飞机飞行安全具有重要意义。气象雷达方程是测量反射率因子的基础,影响气象雷达方程准确性的因素有很多,比如电磁波在空间中的衰减、天线辐射不均匀、波束充塞程度等<sup>[3-4]</sup>。

机载气象雷达工作原理与常规雷达一样,但前者探测的气象目标具有微粒性、叠加性、随机性等特征<sup>[5]</sup>。研究气象粒子的有效散射面积问题,常用理想球状粒子的抽象模型等效这些微粒,例如雷达波探测降水云体,被照射到的降水粒子会散射雷达波,气象雷达回波是波束覆盖范围内所有气象粒子后向散射的叠加<sup>[1,6]</sup>。在距离近时,波束的线宽度小,探测到的云体能够全部充满整个波束;在距离远时,波束线宽度大,探测到的云体不能完全充满整个波束。这种波束充塞程度的变化,若不予考虑,则必然对远距离气象回波的信息提取带来误差<sup>[7]</sup>。对机载气象雷达波束充塞程度的研究,公开文献较少。已有的充塞系数估计问题分析,均针对的是地基气象雷达系统,且多采用经验数据,不能适应机载情况的要求。

## 1 问题描述

雷达脉冲具有一定宽度  $\tau$ ,发射到空间中占有一定长度  $h$ 。可以知道波束在距离  $R$  到距离  $R + h/2$  范围内的粒子散射的回波可以同时到达天线,称  $h/2$  为波束有效照射深度。波束在有效照射深度内的体积大小是有效照射体积  $V$ 。假定雷达发射电磁波在空间没有衰减,并且天线辐射强度均匀,此时雷达气象基本方程为<sup>[1]</sup>。

$$P_r = \frac{P_t G_0^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} V \sum_{\text{单位体积}} \sigma_i = \frac{P_t G_0^2 \lambda^2 h \theta \varphi}{512 \pi^2 R^2} \sum_{\text{单位体积}} \sigma_i = \frac{P_t G_0^2 \lambda^2 c \tau \theta \varphi}{512 \pi^2 R^2} \eta \quad (1)$$

式中: $P_t$  是雷达发射功率; $G_0$  是天线波束轴方向上的增益; $R$  是目标斜距; $\lambda$  是雷达工作波长; $c$  是光速; $\tau$  是脉冲宽度; $\theta$  是水平波束角宽度; $\varphi$  是垂直波束角宽度,雷达反射率  $\eta$  与单位体积气象粒子有效散射截面积总和  $\sum_{\text{单位体积}} \sigma_i$  相等。

反射率因子与雷达反射率  $\eta$  的关系如下<sup>[3]</sup>

$$\eta = \frac{\pi^5}{\lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 Z \quad (2)$$

式中: $m$  是散射粒子的复折射率,  $\left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2$  表示复数模的平方。在温度是  $0^\circ$ ,  $\lambda = 3.2 \text{ cm}$  时,  $\left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2$  的经验值是 0.93。

雷达气象基本方程中假定了雷达波束在有效照射体积内全部充满了云或降水粒子。根据式(1, 2),在不考虑波束充塞程度情况下,反射率因子  $Z$  的估算公式为

$$Z = \frac{P_r 512 \lambda^2 R^2}{P_t G_0^2 \pi^3 c \tau \theta \varphi} \left| \frac{m^2 + 2}{m^2 - 1} \right|^2 \quad (3)$$

显然,波束充满云或降水粒子时的雷达回波功率  $P'_r$  比实际雷达波束未充满时的功率  $P_r$  大。可以知道,充塞系数等于或者小于 1,充塞系数  $\psi$  为

$$\psi = \frac{P_r}{P'_r} \quad (4)$$

所以在考虑波束的充塞程度情况下,反射率因子  $Z'$  估算公式为

$$Z' = \frac{P_r 512 \lambda^2 R^2}{\psi P_t G_0^2 \pi^3 c \tau \theta \varphi} \left| \frac{m^2 + 2}{m^2 - 1} \right|^2 \quad (5)$$

在利用雷达基本气象方程估算反射率因子  $Z$  时,如果不考虑波束充塞程度,将会造成估算值偏小。

## 2 充塞系数估计

当雷达波束完全处于降水云体的上下边界,如图 1 中波束扫描到云体 A,可以认为充塞系数  $\psi = 1$ 。随着探测距离的增大,图 1 中波束扫描到云体 B 和 C 时,降水粒子没有充满波束,此时  $\psi$  值小于 1。充塞系数既取决于降水粒子对波束的垂直充塞系数  $\psi_v$ ,也取决于水平充塞系数  $\psi_h$ ,有

$$\psi = \psi_v \times \psi_h \quad (6)$$

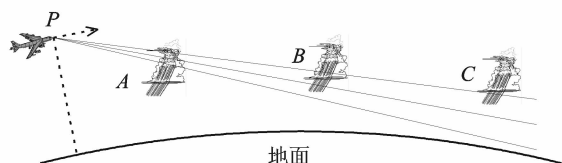


图 1 机载气象雷达工作示意图

Fig. 1 Working geometry of airborne weather radar

水平充塞系数可表示为

$$\psi_h = \frac{L}{R \theta} \quad (7)$$

式中: $L$  为波束内降水云体水平尺度; $\theta$  为以弧度为单位的波束水平宽度。由于降水或云体的水平尺度通常很大,故水平充塞系数在一般情况下都等于 1,只有在降水或云体的边缘处才小于 1。

垂直充塞系数可以表示为

$$\psi_v = \frac{H_t - H_b}{R\varphi}$$

(8)

式中： $H_t$  为波束内云或降水粒子的上界高度； $H_b$  为下界高度； $\varphi$  为以弧度为单位的波束垂直宽度。本文不考虑水平充塞系数影响，认为  $\psi_h = 1$ ，所以  $\psi \approx \psi_v$ 。

通常在气象雷达回波处理中，无法确定  $H_t$  和  $H_b$  的值。根据机载气象雷达工作特点，研究出一种基于雷达工作参数的充塞系数估算方法。由于机载气象雷达探测距离一般都在几百公里，不能忽略地球曲线的影响，雷达探测到距离  $R$  处示意图如图 2 所示。

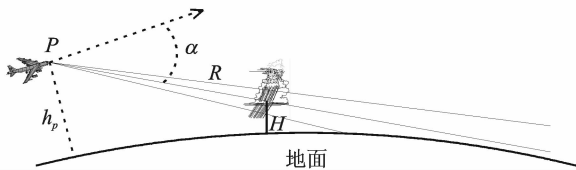


图 2 雷达探测到距离  $R$  处示意图

Fig. 2 Radar detection to the range of  $R$

图 2 中， $P$  点为载机位置， $h_p$  是载机飞行高度， $\alpha$  是下俯角， $R_e$  是地球半径， $H$  是雷达探测到距离  $R$  处波束中心距地面高度，可以知道

$$H = -R_e + \sqrt{(R_e + h_p)^2 + R^2} - 2(R_e + h_p)R\sin\alpha$$

(9)

随着雷达探测距离  $R$  增大，波束线宽度越大，这样就有可能造成波束下边界扫描到地面。所以充塞系数的估算分两种情况进行讨论。

雷达探测到距离  $R$  处波束下边界没有照射到地面，充塞系数的估算如下

$$\psi = \psi_v = \begin{cases} 0 & H - \frac{R\varphi}{2} > H_u \text{ 或 } H + \frac{R\varphi}{2} < H_b \\ 0.5 + \frac{H - H_b}{R\varphi} & H - \frac{R\varphi}{2} < H_b \text{ 且 } H_b < H + \frac{R\varphi}{2} \leq H_u \\ \frac{H_u - H_b}{R\varphi} & H - \frac{R\varphi}{2} \leq H_b \text{ 且 } H + \frac{R\varphi}{2} \geq H_u \\ 1 & H - \frac{R\varphi}{2} > H_b \text{ 且 } H + \frac{R\varphi}{2} < H_u \\ 0.5 + \frac{H_u - H}{R\varphi} & H_u > H - \frac{R\varphi}{2} > H_b \text{ 且 } H + \frac{R\varphi}{2} > H_u \end{cases}$$

(10)

式中： $H_u$  为降水云体顶端距地面高度， $H_b$  为降水云体底端距地面高度； $\varphi$  为垂直方向角宽度。

同样，雷达探测到距离  $R$  处波束下边界照射到地面，充塞系数估算如下

$$\psi = \psi_v = \begin{cases} 0 & H + \frac{R\varphi}{2} < H_b \\ 0.5 + \frac{H - H_b}{R\varphi} & H_b < H + \frac{R\varphi}{2} \leq H_u \\ \frac{H_u - H_b}{R\varphi} & H + \frac{R\varphi}{2} \geq H_u \end{cases}$$

(11)

3 充塞系数变化仿真结果

通过第 2 节充塞系数的估算方法讨论，知道充塞系数与实际降水云体的高度、雷达波束宽度、下俯角和探测距离等有关。下面分别仿真分析了在这 3 种因素下，充塞系数随雷达探测距离的变化情况。

**实验 1** 在不同下俯角下充塞系数随探测距离的变化

气象雷达探测的云体高度已知以及波束宽度一定，雷达下俯角的变化能够影响充塞系数的变化。仿真参数见表 1。

表 1 实验 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters in test 1

云体垂直高度/km	1~7
载机飞行高度/km	10
垂直波束宽度/(°)	3.5
脉冲宽度/ $\mu$ s	6
最大探测距离/km	700

机载气象雷达在下俯角分别为  $0.5^\circ$ ， $2^\circ$ ， $4^\circ$ ， $5.5^\circ$  条件下工作，充塞系数随探测距离  $R$  变化如图 3。

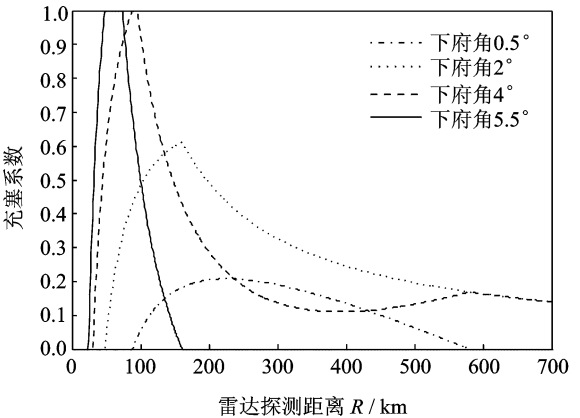


图 3 不同下俯角条件下充塞系数与探测距离  $R$  的关系曲线

Fig. 3 Filling coefficient versus detection range  $R$  with different elevation angle

图 3 反映了气象雷达探测距离 700 km 内,充塞系数在不同下俯角随距离变化的曲线。从图 3 可以看出,在不同下俯角情况下,充塞系数随探测距离的增大基本上都是按先增大后减小的规律变化,并且下俯角越大,变化的幅度越大。在超出 200 km 探测距离,充塞系数的值基本都小于 0.5。

实验 2 不同波束宽度下充塞系数随探测距离  $R$  的变化

气象雷达探测的云体高度已知以及下俯角一定,雷达波束宽度的变化也能影响充塞系数的变化。仿真条件见表 2。

表 2 实验 2 仿真参数

Table 2 Simulation parameters in test 2

云体垂直高度/km	1~7
载机飞行高度/km	10
下俯角/(°)	4
脉冲宽度/ $\mu$ s	6
最大探测距离/km	700

机载气象雷达在波束宽度分别为  $1.5^{\circ}$ ,  $3.5^{\circ}$ ,  $5.5^{\circ}$  条件下工作,充塞系数随探测距离  $R$  变化如图 4。

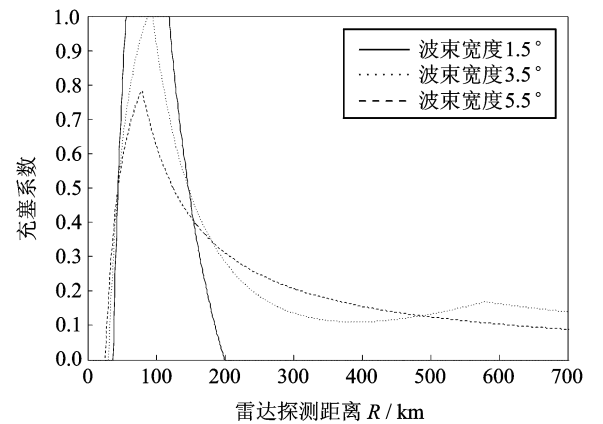


图 4 不同波束宽度条件下充塞系数与观测  $R$  的关系曲线

Fig. 4 Filling coefficient versus detection range  $R$  with different beamwidth

从图 4 看出,不同的波束宽度情况下,充塞系数随着探测距离增大也是基本按先增大后减小的规律变化,并且波束宽度越小,充塞系数变化幅度越大。在探测距离大于 150 km 时,充塞系数基本都小于 0.5。

实验 3 不同云体高度下充塞系数随探测距离  $R$  的变化

雷达波束宽度和下俯角一定,探测不同高度的

云体情况下,充塞系数也有变化。仿真参数见表 3。

表 3 实验 3 仿真参数

Table 3 Simulation parameters in test 3

载机飞行高度/km	10
垂直波束宽度/(°)	3.5
脉冲宽度/ $\mu$ s	6
下俯角/(°)	4
最大探测距离/km	700

云体底端高度均为 1 km,机载气象雷达探测顶部高度分别是 5,7,9 km 的云体时,充塞系数随探测距离变化如图 5。

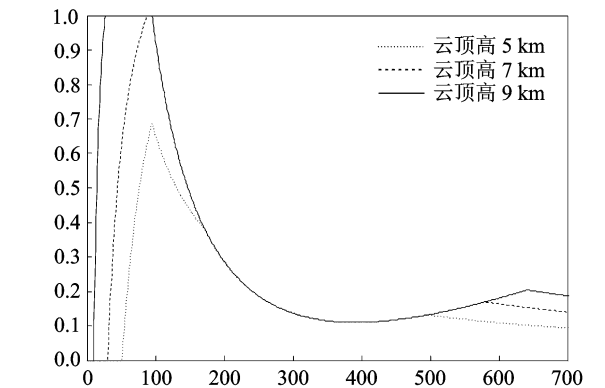


图 5 不同云体高度下充塞系数与距离  $R$  的关系曲线  
Fig. 5 Filling coefficient versus detection range  $R$  with different target height

从图 5 可以看出,载机飞行一定高度,在一定的下俯角和波束宽度下,探测不同高度的云体,充塞系数随探测距离的变化基本上同样按先增大后减小的规律变化。云体越高,同一探测距离上波束充塞程度越大。

从上面的仿真分析中知道,充塞系数随探测距离基本按照先增大后减小的规律变化。在近距离,充塞系数随距离快速增大达到最大值,再随着距离增大逐渐减小。在中远距离,充塞系数一般都小于 0.5,这在雷达气象回波处理中将影响到估算的反射率因子准确性。

4 反射率因子估算验证结果

在雷达气象回波处理中,研究充塞系数的主要意义是提高估算雷达反射率因子  $Z$  的精度。本节中,通过判断反射率因子的测量精度来进一步验证本文研究的充塞系数估计方法的有效性。假定在载机正前方 100,300,450 km 处存在 3 朵降水云

体,仿真参数见表 4。

表 4 雷达系统及目标仿真参数

Table 4 Simulation parameters of the radar system and targets

载机飞行高度/km	10	雷达探测最远距离/km	700
云体大小/km	90×90×6	云体高度/km	1~7
反射率因子/dB	50	雷达发射功率/W	150
天线增益	10 <sup>3.5</sup>	脉冲宽度	6 μs
下俯角/(°)	0.5	垂直波束宽度/(°)	3.5

采用文献[8-13]中方法,仿真得到载机正前方波位雷达气象回波功率如图 6 所示。

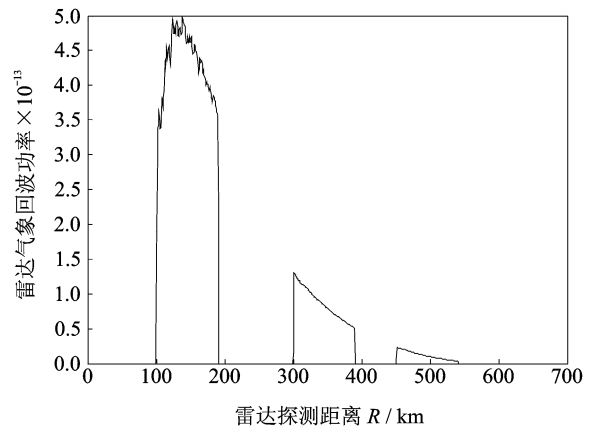


图 6 回波信号功率与观测距离关系曲线

Fig. 6 Received power versus detection range

利用式(3),并结合仿真得到的载机正前方三朵降水云团的雷达回波信号,就可以估算出雷达反射率因子  $Z$  的大小,具体结果如图 7(a)。可以看出,直接估算的反射率因子大小与实际的反射率因子大小有 5~15 dB 的误差。根据图 3 中下俯角为 0.5° 的充塞系数随距离  $R$  变化关系,知道 100~190 km 的波束充塞程度由小到大,通过这段探测距离的雷达回波直接估算的反射率因子误差也是由大到小。同样 300~390 km 和 450~540 km 的充塞程度均为由大到小,通过这两段探测距离的雷达回波信号直接估算的反射率因子误差是由小到大的。由此可以推断,充塞系数越小,由雷达回波功率直接估算反射率因子大小的误差越大。比较式(3,5),充塞系数与直接估算的雷达反射率因子误差关系与推断的一致。结合上一节图 3 中下俯角为 0.5° 的充塞系数随距离  $R$  变化关系,利用式

(5),估算反射率因子大小,结果如图 7(b)。可以直观地看出引用充塞系数后,估算的反射率因子大小与理论值的误差明显减小。

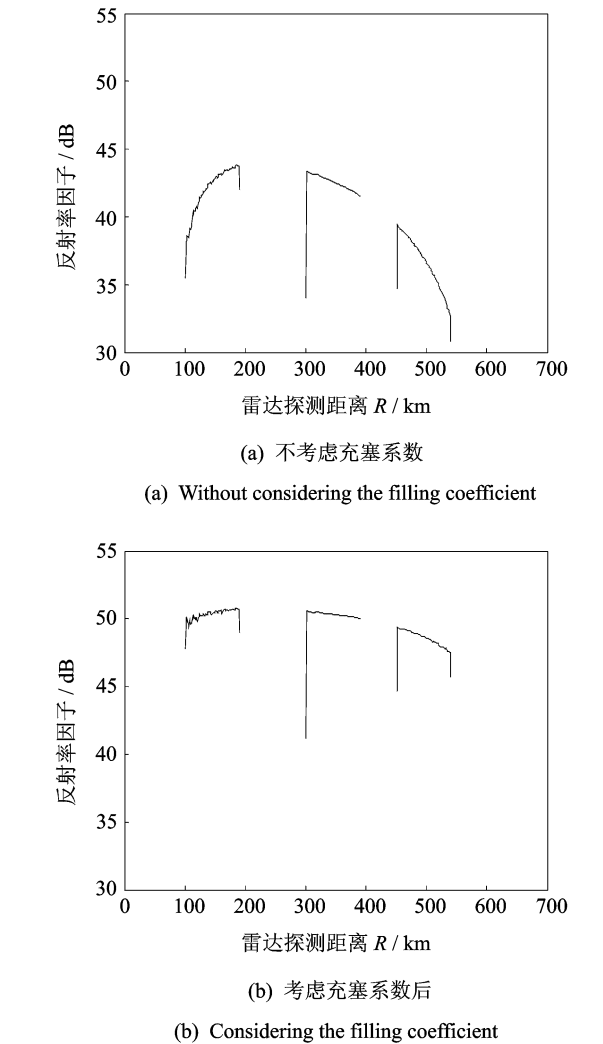


图 7 反射率因子估计结果比较

Fig. 7 Comparison of the estimation results of the reflectivity factor

表 5 分别给出了考虑充塞系数前后反射率因子测量结果的均值及其均方根误差。可见,引入充塞系数后,在观测距离 100~450 km 变化范围内,反射率因子均方根误差均小于 2 dB,测量精度显著提高。

表 5 反射率因子估计结果的均值及均方根误差比较  
Table 5 Comparison of the mean value and the RMSE of the reflectivity factor

云体位置/km	理论值/dB	不考虑充塞系数		考虑充塞系数	
		估算反射率因子的均值	RMSE	估算反射率因子的均值	RMSE
100	50	42.16	7.98	50.37	0.48
300		42.55	7.46	50.32	0.35
450		36.67	13.45	48.60	1.49

## 5 结束语

飞机探测运动前方的气象目标时,经常通过雷达反射率因子来判断气象强度。因此精确地估算出雷达反射率因子成为雷达气象回波信号处理的关键。机载气象雷达在对中、远距离的气象目标探测时,雷达波束线宽度过大而无法完全充满,这样导致了雷达反射率因子估算值偏小。本文提出了一种基于雷达工作参数下的充塞系数估计方法,并仿真分析了3种情况下充塞系数变化特性。通过对模拟气象回波的处理,比较了引入充塞系数前后反射率因子的估算结果,从而验证了所提出方法的有效性。

### 参考文献:

- [1] 张培昌,杜秉玉,戴铁丕. 雷达气象学[M]. 北京:气象出版社,2001.  
Zhang Peichang, Du Bingyu, Dai Tiepi. Radar meteorology[M]. Beijing: Meteorological Press, 2001.
- [2] 胡明宝. 天气雷达探测与应用[M]. 北京:气象出版社,2007.  
Hu Mingbao. The weather radar detection and application[M]. Beijing: Meteorological Press, 2007.
- [3] 何友,修建娟,张晶炜,等. 雷达数据处理及应用[M]. 2版. 北京:电子工业出版社,2009.  
He You, Xiu Jianjuan, Zhang Jingwei, et al. Radar data processing and application[M]. Second edition. Beijing: Publishing Housing of Electronics Industry, 2009.
- [4] Tim Stewart, James DeArmon, David Chaloux. Using flight information to improve weather avoidance predictions[C] // 2013 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Los Angeles: [s. n.], 2013.
- [5] 潘新明,熊毅. 反射率因子的误差因素分析及解决方法[C] // 雷达气象学与气象雷达委员会第二届学术年会论文集. 合肥:中国气象学会,2006.  
Pan Xinming, Xiong Yi. Reflectivity factor and factor analysis of the error of the solution[C] // Radar Meteorology and Weather Radar Committee of the Second Academic Essays. Hefei: China Meteorologi-

cal Society, 2006.

- [6] VignaI B, G Galli, J Joss, et al. Three methods to determine profiles of reflectivity from volumetric radar data to correct precipitation estimates[J]. Appl Meteor, 2000, 39:1715-1726.
- [7] Wang Jingsi. Radar range equation for meteorological targets[C] // CIE International Conference. Beijing: [s. n.], 1996.
- [8] Woodell D L, Jinkins R D, Meyer N A, et al. Terrain avoidance system and method using weather radar for terrain database generation [P]. USA, 7859448, 2010-12-28.
- [9] 吴仁彪,胡鹏举,卢晓光. 机载气象雷达回波信号仿真系统[J]. 中国民航大学学报, 2011, 30(2): 351-355.  
Wu Renbiao, Hu Pengju, Lu Xiaoguang. Simulation of airborne weather radar signals[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2011, 30(2): 351-355.
- [10] 段化军. 机载气象雷达回波信号模拟与地杂波抑制方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2011.  
Duan Huajun. Study on signal simulation of airborne weather radar and the methods for ground clutter suppression [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2011.
- [11] Fan Yi, Wu Renbiao, Meng Zhichao, et al. Wind shear signal simulation of the airborne weather radar [C] // 2011 IEEE Radar Conference. New York: IEEE, 2011: 710-713.
- [12] Woodell D L, Robertson R E. Adaptive weather radar detection system and method used in continental and maritime environments [P]. USA, 7129885, 2006-10-31.
- [13] Cheong B L, Palmer R D. A time series weather radar simulator based on high-resolution atmospheric models [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2008, 25(2): 230-243.

**作者简介:**何力(1988-),男,硕士研究生,研究方向:机载气象雷达信号处理, E-mail: helinuaa@126.com; 李勇(1977-),男,副教授,研究方向:雷达信号处理、合成孔径成像算法及参数估计, E-mail: limack@nuaa.edu.cn; 刘丽(1989-),女,硕士研究生,研究方向:雷达信号处理, E-mail: nuaaliuli@163.com.

