

# 利用函数拟合的低空风切变三维建模与雷达回波仿真

韩雁飞 刘 夏 李 海 卢晓光

(中国民航大学天津市智能信号与图像处理重点实验室, 天津 300300)

**摘 要:** 高保真的低空风切变数据是进行低空风切变检测和飞行性能分析的必要基础。为解决低空风切变危险性高、发生突然且持续时间短等带来的真实数据不易获取的难题, 本文提出了一种利用函数拟合的低空风切变三维建模方法。该方法依据风切变的流体力学特征, 通过函数拟合的方式建立风场类型及特征可变的三维密度场和速度场, 并按照现有机载气象雷达在风切变探测模式下的天线扫描与工作方式, 实现低空风切变雷达回波仿真。仿真结果表明: 该方法可灵活快速地实现低空风切变三维风场建模, 雷达回波的速度估计结果较好地反映了低空风切变径向速度沿距离方向呈现反“S”型特征分布的特点。

**关键词:** 机载气象雷达; 低空风切变; 三维风场建模; 函数拟合; 回波仿真

**中图分类号:** TN959.4    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1003-0530(2015)09-1180-08

## The 3D Modeling and Radar Echo Simulation of Low-Altitude Wind Shear Using Function Fitting

HAN Yan-fei LIU Xia LI Hai LU Xiao-guang

(Tianjin Key Laboratory for Advanced Signal Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** The high fidelity data of low-altitude wind shear is the necessary foundation for flight performance analysis and low-altitude wind shear detection. To solve the difficult problem of real data obtainment, which is caused by the characteristics of suddenness, short duration and high hazard, a three-dimensional modeling method of low-altitude wind shear via function fitting is proposed in this paper. On the basis of hydrodynamic characteristics of wind shear, the three-dimensional density and velocity field is simulated by using the function fitting method. Then, according to the scanning process of airborne weather radar, which is under the wind shear detection mode, the radar echo simulation of the low-altitude wind shear is realized. Results of simulation have proved that the method can realize the three-dimensional wind field modeling of low-altitude wind shear flexibly and quickly. The wind speed estimation of echo signals can indicate the relationship between the Doppler velocity and distance which has the distribution characteristics of “S” shape.

**Key words:** airborne weather radar; low-altitude wind shear; 3D model of wind field; function fitting; echo simulation

### 1 引言

在民用航空器起飞和着陆阶段, 风向或风速在不同或者相同高度(约在 600 米左右)的小范围内发生剧烈改变的大气现象, 被称为低空风切变<sup>[1]</sup>。低空风切变发生突然且持续时间较短, 被世界航空界公认为飞机起飞和着陆阶段的一种危险性极高

的恶劣天气现象, 因此对低空风切变的探测和预报存在较大的难度和潜在危险。目前, 如何探测、回避以及应对低空风切变以减轻其危害程度成为国际航空领域一致公认的重要研究课题之一。

高保真的低空风切变数据是进行飞行性能影响分析、低空风切变检测与危险性评估等技术探索的必要基础。不同于一般目标的建模, 低空风切变

是一种分布式气象目标,其不仅在时间维具有相关性,在空间维也具有相关性。常用的低空风切变的建模方法主要分为如下三类<sup>[2]</sup>:第一类,基于外场实测数据的建模方法,美国的JAWS模型<sup>[3]</sup>和NIMROD项目<sup>[4]</sup>是该类建模方法的典型代表。JAWS以机场的气象雷达网和塔台组成的监测网的实际测量数据为依据建立风场模型,NIMROD则通过多种气象监测手段进行为期2年的气象观测,从中挑选相关的风切变数据进行研究。该类建模方法是在对真实数据进行长时间的观察和测量的基础上展开的,工程量巨大,耗时较长且成本较高。第二类,基于大气动力学和微物理方程求解的建模方法,主要包括TASS模型<sup>[5]</sup>和美国俄克拉何马大学提出的ARPS模型<sup>[6]</sup>等,该类建模方法需要大型计算机进行长时间地模拟计算仿真,一般耗时约为几天;第三类,基于工程化的建模方法,该类模型根据物理概念用简单的数学形式拟合而成,可以实现快速的风场建模,其具有生成数据快速,简单灵活,使用方便等特点。主要包括偶极子面元模型、涡环模型和Dryden模型等<sup>[7]</sup>。

航空气象学根据飞机的运动方向与于风速矢量之间的相对关系,把风切变分为顺风切变、逆风切变,侧风切变和下击气流切变(下击暴流)等。强烈的下沉气流在撞击地面后会沿地表辐散出流,极易形成低空风切变。低空风切变中最危险的一种形式为微下击暴流(一般呈对称分布),其在径向上具有辐散速度特征,且正负速度差达到10 m/s或者以上,尺度范围一般小于4 km。1988年Oseguera和Bowles<sup>[8]</sup>提出了一种利用流体方程建立的微下击暴流轴对称解析理论模型,即为OB模型。该模型可用来模拟微下击暴流的平均速度分布。其后Vicroy和Chay等人对OB模型进行了一系列的改进,通过重新拟合更符合实际风速剖面的函数,提出了OBV模型<sup>[9]</sup>和改进的OBV模型<sup>[10]</sup>。2006年,Nagata等人<sup>[11]</sup>提出了一种先对目标进行等比例缩放,再对目标特性进行测量的紧凑场测量法。该方法在实验室建立一个缩小的模型,利用高密度液体在低密度液体中的扩散现象,通过粒子成像测速PIV技术对液体中的示踪粒子进行观察,记录示踪粒子在一定时间的位移,从而计算得到相应的速度场分布。通过这种等比例缩放的模型,模拟微下击暴流的产生以及发展过程。

在进行低空风切变检测技术的研究和低空风

切变对飞行性能的影响分析时,需要快速地建立具有不同风场特征的风场模型。为解决上述问题,鉴于工程化的风场建模方法具有简单、灵活和计算量小的特点,本文提出了一种利用函数拟合的低空风切变三维建模方法。该方法依据风切变的流体力学特征,结合小尺度气象学与大气动力学的特点,通过函数拟合的方式建立风场类型及特征可变的三维密度场和速度场。按照现有机载气象雷达在风切变探测模式下的天线扫描与工作方式实现低空风切变的雷达回波仿真。仿真结果表明:该方法可灵活快速地实现低空风切变三维风场建模,雷达回波的速度估计结果较好地反映了低空风切变径向速度沿距离方向呈反“S”型特征的分布特点。

## 2 基于函数拟合的低空风切变三维风场建模

基于工程化的风场建模方法不仅要求实时快速,计算量尽可能的小,同时还要求模型使用足够灵活,能方便的生成多种类型的风切变风场数据。本文依据风切变的流体力学特征,并结合小尺度气象学与大气动力学的特点,通过函数拟合的方式建立三维的低空风切变风场模型,包括密度场和速度场。该模型的计算量较小,可快速地生成风场类型及特征可变的的风场数据。

假设风场中心位置为 $(x_0, y_0)$ ,设置气流入口半径为 $r$ ,风场上限高度为 $h_{\max}$ ,风场横向尺度( $X$ 方向)上限设为 $x_{\max}$ ,风场纵向尺度( $Y$ 方向)上限设为 $y_{\max}$ ,大气环境初始风速为 $v_0$ ,上述场景参数的设置决定了风场的位置、几何尺寸、基本空间形状和环境风速等特征。通过设置气流入口半径 $r$ 和初始风速 $v_0$ ,可以建立一个方向向下的柱形气流,规定 $v_0$ 垂直向下为其正方向,对于下冲气流来说,其值一般为正。依据风切变的流体力学特征,通过函数拟合的方式可以利用 $v_0$ 建立三维的风场模型,包括下冲气流的垂直风速,下冲气流的水平风速等。利用低空风切变的小尺度气象特征与大气动力学的特点,并结合低空风切变的密度分布特性,实现基于函数拟合的密度场生成。

### 2.1 下冲气流的垂直风速

取风场任意横向截面,则风场中心位置为 $(x_0, y_0)$ ,中心位置相对于风场横向尺度上限 $x_{\max}$ 和纵向尺度上限 $y_{\max}$ 的比例关系可以表示为:

$$\begin{cases} x_0 = \frac{x_{\max}}{2} \\ y_0 = \frac{y_{\max}}{2} \end{cases} \quad (1)$$

在该截面上,任意一点的位置表示为 $(x, y)$ ,则 $r_c$ 为任意一点距离风场中心的距离。

$$r_c = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \quad (2)$$

为了使模型更加符合真实的风切变风场特征,从而生成不同切变类型的风场,包括顺风切变、逆风切变和下击气流切变等,本文分别引入 $X$ 和 $Y$ 方向上的扭曲因子 $g_x$ 和 $g_y$ <sup>[12]</sup>,其中 $g_r$ 为其算术均值。通过改变这两个扭曲因子可以使生成的风场达到相应偏置的效果,从而能快速的生成对称风场、逆风风场、顺风风场等多种低空风切变风场类型。

$$g_r = \sqrt{g_x^2 + g_y^2} \quad (3)$$

$$\Delta r = r \times \left( \frac{\Delta x}{r_c} g_x + \frac{\Delta y}{r_c} g_y \right) \quad (4)$$

公式(4)中 $\Delta r$ 表示引入扭曲因子 $g_x$ 和 $g_y$ 后,风场中任意一点 $(x, y)$ 相对于风场中心距离的变化量,其中 $\Delta x = x - x_0$ ,  $\Delta y = y - y_0$ 。故该点所对应的风场特征半径 $r_s$ 表示为:

$$r_s = \Delta r + \sqrt{\Delta r^2 + r^2(1 - g_r^2)} \quad (5)$$

根据流体的数学特征,微下击暴流在垂直方向上的速度分布满足如公式(6)所示的比例关系,其中 $g_0$ 为速度增益,假设 $g_0 = 1$ ,  $h$ 表示点 $(x, y)$ 的高度值。

$$\begin{cases} v_{z_0} = g_0 \times v_0 & h \geq h_{\max} \\ v_{z_0} = g_0 \times v_0 \times \left( 1 + \left( \frac{h_{\max} - h}{h_{\max}} \right)^2 \right) & h < h_{\max} \end{cases} \quad (6)$$

低空风切变的垂直速度在水平径向上分布符合反“S”型特性,依据流体力学原理和微下击暴流的形态特点,类似于半波长离散突风模型的建模方法<sup>[13]</sup>,按照分段拟合的思想,利用垂直气流的径向比率 $r_r$ 将风场区域划分成不同的拟合区域,利用函数拟合的方式计算下冲气流的垂直风速,下冲气流速度的垂直速度 $V_z$ 表示为:

$$\begin{cases} V_z = v_{z_0} & r_r < 1 \\ V_z = v_{z_0} \times \frac{(1 - \cos(r_r \times \pi))}{2} & 1 \leq r_r \leq 2 \\ V_z = 0 & r_r > 2 \end{cases} \quad (7)$$

式中, $v_{z_0}$ 为风场中心处下冲气流的垂直速度, $r_r$ 为

垂直气流的径向比率( $r_r = r_c / r_s$ ),  $r_r < 1$ 表示下沉气流区域,  $1 \leq r_r \leq 2$ 表示涡环区域,  $r_r > 2$ 表示风场出流范围之外的区域。

## 2.2 下冲气流的水平风速

当下冲气流到达地面时,气流会顺势向四周散开,从而形成水平风切变,所以水平风速的大小主要取决于出流所造成的风速分量。出流口形成的水平风切变的风速变化呈非线性分布,出流口的径向风速 $v_{r_{out}}$ 由高度 $h$ 以及入口处环境风速定义 $v_0$ ,其表达式如下:

$$\begin{cases} v_{r_{out}} = 0 & h \geq h_{\max} \\ v_{r_{out}} = g_0 \times v_0 \times \Delta r \times \frac{(h_{\max} - h)}{h_{\max}^2} & h < h_{\max} \end{cases} \quad (8)$$

在近地点处,风场出流口的风速会有一定程度的衰减,一般约为离地面50 m附近。因此需要对出口处的径向风速进行一定程度的修正,即当高度低于50 m时,风场出流口处的径向风速 $v_{r_{out}}$ 的表达式为<sup>[11]</sup>:

$$v_{r_{out}} = v_{r_{out}} \times (0.75 + 0.005 \times h) \quad (9)$$

与下冲气流的垂直风速拟合类似,利用径向比率 $r_r$ 将风场区域划分成不同的拟合区域,通过函数拟合的方式实现径向速度分量的计算,径向风速分量 $v_r$ 表示为:

$$\begin{cases} v_r = v_{r_{out}} \times r_r & r_r < 1 \\ v_r = v_{r_{out}} \times (r_r - 1.3 \times (r_r - 1)^3 + 0.45(r_r - 1)^6) & 1 \leq r_r \leq 2 \\ v_r = \frac{2.3 \times v_{r_{out}}}{r_r} & r_r > 2 \end{cases} \quad (10)$$

其中,当在 $1 \leq r_r \leq 2$ 的涡环区域时,等式右边为拟合余弦函数在 $(r_r - 1)$ 处的幂级数展开。利用径向风速分量 $v_r$ 可求出 $v_r$ 在 $X$ 方向和 $Y$ 方向上的投影,即得出风场的 $X$ 方向速度分量 $V_x$ 和 $Y$ 方向速度分量 $V_y$ 。

$$\begin{cases} V_x = \frac{\Delta x \times v_r}{r_c} \\ V_y = \frac{\Delta y \times v_r}{r_c} \end{cases} \quad (11)$$

## 2.3 下冲气流的密度场

低空风切变不仅在风场分布上具有时间相关性与空间相关性,其气压与密度也遵循一定的规律分布。根据文献[13],由中心区域向外,低空风切变的气压和密度呈现“高-低-高”的分布特性,如图1所示。

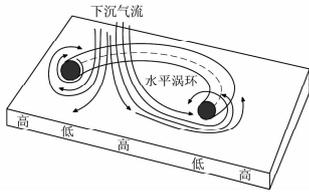


图 1 低空风切变的气压分布示意图

Fig. 1 The pressure distribution of low-altitude wind shear

从图 1 可见,下沉气流撞击的区域产生高气压区,并在中心区域的周围产生环状涡环,涡环中心处为低气压区,随后气压逐渐恢复到正常水平。文献[14]以 TASS 模型为基础,结合气象目标的微物理特性,利用计算流体力学的仿真方法构造低空风切变的三维风场模型。基于计算流体力学仿真的风场中心风速分布切面和气压分布切面分别如图 2 和图 3 所示。

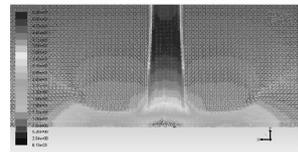


图 2 基于计算流体力学仿真的风场中心风速分布切面



图 3 基于计算流体力学仿真的风场气压分布切面

Fig. 2 The speed distribution section of wind center based on CDF simulation Fig. 3 The pressure distribution section of wind field based on CFD simulation

图 2 和图 3 中横坐标表示水平方向风场位置,以风场中心为原点,规定水平向右为正方向,风场变化范围为-3000 m 到 3000 m;纵坐标表示风场垂直高度,高度范围为 0 m 到 600 m。如图 2 所示,该三维风场的速率分布明显呈现出水平涡旋的特性,在水平涡旋的下方,速率出现最大值,周围的速度出现梯度递减。如图 3 所示,风场的气压分布特性,即为密度场分布特性,呈现“高-低-高”的变化趋势。

基于计算流体力学仿真的方法可以得到较为真实的速度场和密度场分布,但上述方法运算时间较长,不利于在计算资源有限的情况下,在仿真时间步长内实时和快速的得到风场分布特性。为了解决上述问题,本文利用风切变的流体力学特征,结合小尺度气象学特征和气象粒子的微物理特性,利用函数拟合的方法生成下冲气流的密度场分布,该密度分布可以表示为  $r_c, h$  和  $g_r$  的函数,其表达式如下:

$$\rho(r_c, h, g_r) = (g_r \cdot r_c + 1) \frac{1 - h}{9} \cdot \frac{\sin(\pi a r_c)}{\pi a r_c} e^{-(a r_c)^2} + \rho_{air} \quad (12)$$

式中,  $h$  表示风场高度,单位为 km,  $\rho_{air}$  表示环境平均密度,单位  $\text{kg/m}^3$ ,  $a$  表示涡旋控制因子。

为了分析不同高度下的风场密度分布特征,以对称风场为例,高度为 48 m 和 600 m 的密度分布,如图 4 所示。由图 4 可见,高度 48 m 处的密度场分布,中心处密度达到  $1.3 \text{ kg/m}^3$  左右,并在风场中心左右各 1 km 处形成涡环,密度达到最低值,随后逐渐恢复正常水平。高度 600 m 处的密度场分布,最高密度仅为  $1.24 \text{ kg/m}^3$ 。对比分析可知,高度越高,密度分布的波动越小,符合文献[13]所提的低空风切变密度场分布特性。

### 2.4 风场模型数据分析

由于真实的低空风切变复杂多样,其尺度范围和速度分布各不相同,为验证风场的分布特征,采用归一化的参数来评估低空风切变的风场特性。将生成的风场数据与 TASS 模型、液滴扩散模型(利用紧凑场测量法建模)和 NIMROD 模型的风场数据进行对比分析,从而评估本文方法的风场数据质量和建模的准确性。以对称风场为例,风场数据的平均速度纵向剖面,如图 5 所示。

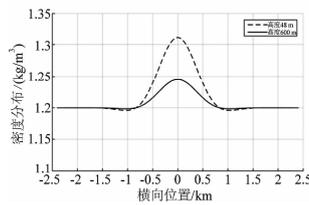


图 4 不同高度下的风场密度分布对比图

Fig. 4 Compare with the density distribution of wind field in different heights

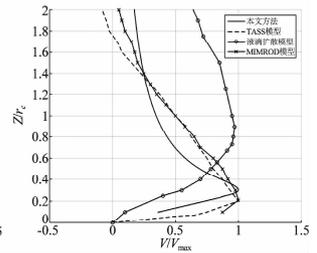


图 5 风场数据的平均速度纵向剖面比较

Fig. 5 Compare with the wind speed vertical profile by different methods

图 5 中横坐标表示归一化的水平风场速率,纵坐标表示风场的地面高度与风场中心横向距离的比值。其中,  $Z$  表示地面高度,为了防止地面对流体的粘滞力产生的边界层效应,取地面高度  $Z$  为 200 m。  $r_c$  为在该高度的横截面上任意一点与风场中心的距离。由图 5 可见,由于模型的尺度范围不同,形成涡环的位置也略有不同,但水平风速均在涡环处达到最大

值。本文方法获得的风场数据变化明显,其变化规律与上述三种风场建模方法的速度变化规律基本吻合,符合微下击暴流(对称风场)的切变特征。

### 3 低空风切变雷达回波仿真

低空风切变属于分布式弥散目标,就湿性低空风切变而言,在风场范围内存在大量的降雨微粒,冰水混合物,小液滴等。不同于一般点目标的雷达回波仿真,机载气象雷达利用雷达波束照射范围内所有的散射点,通过散射点叠加的方式实现雷达回波仿真,将一个波束内所有散射点的回波信号进行相干叠加,即得到一个扫描方位的雷达回波信号<sup>[15]</sup>。

通过散射点叠加获得雷达回波,即通过相干累加生成每个距离单元的回波信号,第 $k$ 个距离单元回波信号 $s_k(t)$ 的表达式如下:

$$s_k(t) = \sum s_{ki}(t) = \sum A_{ki}(t) e^{-j\varphi_{ki}(t)} + N_{k0}(t) \quad (13)$$

其中, $s_{ki}(t)$ 为第 $k$ 个距离单元内第 $i$ 个散射点的雷达回波信号, $A_{ki}(t)$ 为 $t$ 时刻下,第 $k$ 个距离单元内第 $i$ 个散射点的回波幅度, $\varphi_{ki}(t)$ 为 $t$ 时刻下,第 $k$ 个距离单元内第 $i$ 个散射点的相位, $N_{k0}(t)$ 为 $t$ 时刻下的接收机噪声。

根据气象雷达方程,可以得到 $t$ 时刻下,第 $k$ 个距离单元内第 $i$ 个散射点的回波幅度为:

$$A_{ki}(t) = \sqrt{\frac{0.93P_t G^2 \pi^2 Z_e}{64\lambda^2 R_{ki}^4(t)}} \quad (14)$$

其中, $P_t$ 为雷达发射机功率, $G$ 为天线增益, $\lambda$ 为发射信号波长, $R_{ki}(t)$ 为 $t$ 时刻下,第 $k$ 个距离单元内第 $i$ 个散射点与雷达之间的距离, $Z_e$ 为风场的反射率因子。

雷达气象理论中,常以等效反射率因子来度量气象目标的回波强度。该参数与气象目标中单位体积的降水粒子大小,形态,空间分布,相态和密度相关。因此在探测气象目标时,通过等效反射率因子的特征来分辨气象目标的类型。根据文献<sup>[15]</sup>,风场反射率因子表示为:

$$Z_e = \frac{10^{18} \times 720(\rho q_r)^{1.75}}{\pi^{1.75} N_r^{0.75} \rho_r^{1.75}} \quad (15)$$

其中, $\rho$ 为大气的密度(单位 $\text{kg}/\text{m}^3$ ), $q_r$ 为大气水汽与空气的质量比例(单位 $\text{kg}/\text{kg}$ ), $N_r$ 为降雨的截断参数,以湿性低空风切变为例,一般设为 $8 \times 10^6 \text{ m}^{-4}$ ,

$\rho_r$ 表示水的密度(单位 $\text{kg}/\text{m}^3$ )。

当工作波长固定不变时,雷达回波信号的瞬时相位由雷达与微粒之间的相对瞬时位置来决定,在 $t$ 时刻下,第 $k$ 个距离单元内第 $i$ 个散射点的相位表示为:

$$\varphi_{ki}(t) = 2\pi \frac{2R_{ki}(t)}{\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda} 2(R_{k0} - vt) \quad (16)$$

其中, $\lambda$ 为发射信号波长, $v$ 为飞机矢量速度, $R_{k0}$ 为飞机与第 $k$ 个距离单元内第 $i$ 个散射点间的初始距离。由上式可知,气象目标微粒与飞机的相对速度信息可通过相位的形式体现在雷达回波信号中。

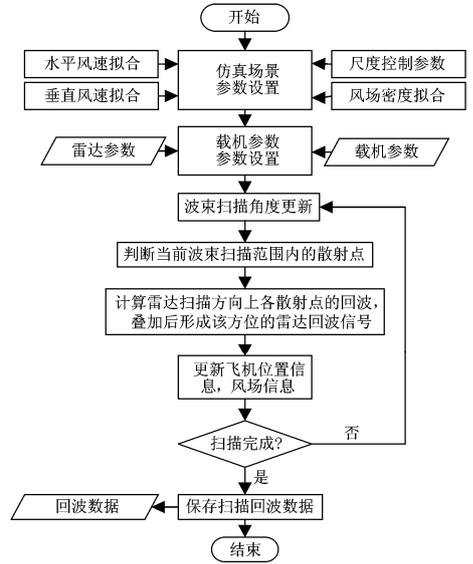


图6 机载气象雷达回波仿真流程图

Fig. 6 The simulation flowchart of airborne weather radar

为了得到高保真的雷达回波仿真信号,依照真实的机载气象雷达在风切变探测模式下的扫描方式及工作过程实现低空风切变雷达回波仿真,机载气象雷达低空风切变回波仿真流程,如图6所示。因为雷达天线始终处于扫描状态,所以根据“停一跳”假设<sup>[16]</sup>,并考虑飞机速度,本文所用的仿真方法的具体实现步骤如下:

**步骤1** 根据低空风切变的气象特征,设定尺度控制参数,选择合理的风切变风场。本文选择水平尺度为4800 m,高度为600 m的圆柱形场景范围。通过下冲气流的水平、垂直风速拟合以及风场密度拟合,从而生成较为真实的低空风切变三维风场,仿真三维场景。

**步骤2** 设置仿真参数。根据飞机的类型,选择合适的飞行参数,为了便于研究飞机在起降阶段遭

遇低空风切变,现设置飞机初始空间坐标(0 m, 0 m, 600 m),飞机矢量速度为(75 m/s, 0 m/s, 0 m/s)。依照真实的机载气象雷达在风切变探测模式下的扫描方式及工作过程设置雷达和天线扫描参数。

**步骤 3** 利用天线波束选择计算的散射点,将当前机载气象雷达波束内的散射点进行相干处理,通过相干叠加的方式生成每个距离单元的雷达回波信号,并同理生成该扫描方位下的雷达回波。

**步骤 4** 保存当前雷达回波数据,利用步骤 2) 中的飞行参数、场景参数和扫描参数等,更新飞机空间坐标位置信息、风场散射点相对位置和机载气象雷达的波束方向等。

**步骤 5** 依据天线扫描的角度范围(-90°至+90°)控制扫描进程。若雷达扫描未完成,则重复步骤 3;若雷达扫描完成,则输出该扫描周期的回波信号。

## 4 仿真结果及分析

### 4.1 风场建模结果

假设风场中心位置为(0, 0),即风场区域位于飞机正前方。风场横向尺度上限  $x_{max}$  为 4800 m,风场纵向尺度上限  $y_{max}$  为 4800 m,风场气流入口处半径  $r$  为 720 m,风场上限高度  $h_{max}$  为 600 m,令  $g_x$  分别取 0, 0.5 和 -0.5,通过改变扭曲因子可以使生成的风场达到相应偏置的效果,从而能快速的生成对称风场、逆风风场、顺风风场等多种低空风切变风场类型。规定 X 轴正向为顺风风向,不同风场类型的三维风场建模结果分别如图 7 ~ 图 9 所示。

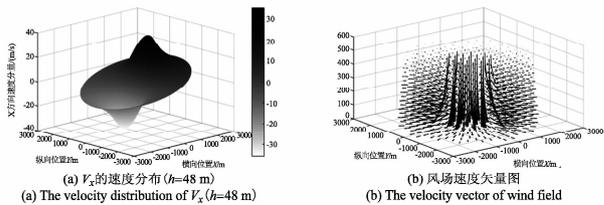


图 7 微下击暴流(对称风场)

Fig. 7 The downbursts (symmetric wind field)

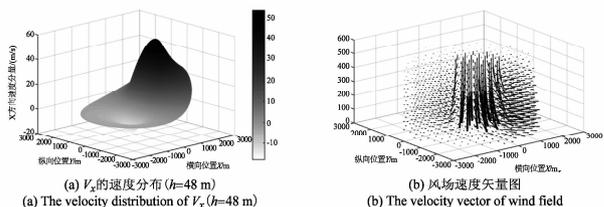


图 8 顺风风场

Fig. 8 The tail wind field

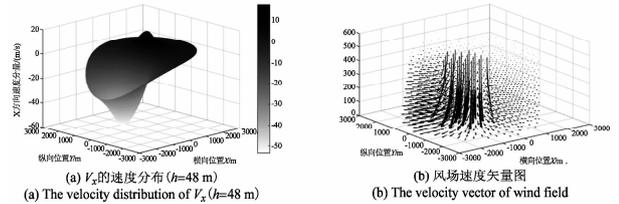


图 9 逆风风场

Fig. 9 The head wind field

图 7 为对称风场的建模结果,其中图 7(a)表示高度为 48 m 处的 X 方向速度分布,由图可见,利用本文方法建模实现的风场速度分布结果较好地反映了低空风切变径向速度沿距离方向呈反“S”特征的分布特点。图 7(b)为对称风场的速度矢量图,从图中能清楚的看到风速度矢量方向和大小的趋势变化。同理,图 8 为顺风风场的建模结果,图 9 为逆风风场的建模结果。如图 8 ~ 图 9 所示,顺风风场和逆风风场仍然呈现出反“S”型的分布特性,不同的地方在于顺风风场的顺风风速较大,逆风风速较小;逆风风场的逆风风速较大,顺风风速较小。通过上述对比,可以看出利用本文方法实现的风场模型符合实际风场的变化规律和特征分布。

### 4.2 密度场建模结果

以对称风场为例,仿真参数设置如下:扭曲因子的算术平均值  $g_r = 0$ ,风场高度  $h = 48$  m,环境平均密度  $\rho_{air} = 1.2$  kg/m<sup>3</sup>,涡旋控制因子取经验值  $a = 1.2$ 。高度为 48 m 处的对称风场密度分布如图 10 所示。

由图 10 可见,在下沉气流撞击地面的中心区域处,空气密度最高,在涡环处达到最低,并逐渐恢复平均密度水平。规定风场方向为 X 轴正向,将高度 48 m 处扭曲因子  $g_x = 0$  的对称风场和  $g_x = 0.5$  的顺风风场的密度分布结果进行比较分析,风场半径与密度分布关系如图 11 所示。

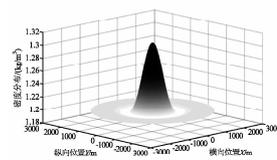


图 10 高度为 48 m 处的风场密度分布  
Fig. 10 The density distribution of wind field( $h = 48$  m)

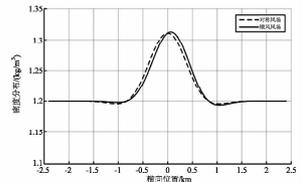


图 11 不同风场的密度分布对比( $h = 48$  m)  
Fig. 11 The density distribution of different wind field( $h = 48$  m)

由图 11 可见,在扭曲因子的作用下,风场的中心密度出现了偏移,顺风的情况下 1 km 处风场涡旋密度相比原来的对称风场密度更低,而-1 km 公里处的涡旋相比原对称风场涡旋处密度较高。这符合风场的流体力学特性,同时也说明通过函数拟合的密度场分布,不仅较好的拟合了风切变风场的变化特性,并在现有计算资源有限的情况下,为风切变仿真提供了较为有效可靠的数据来源。

### 4.3 低空风切变雷达回波信号仿真结果

参考 Rockwell Collins 的 WXR-2100 型机载气象雷达<sup>[17]</sup>在风切变模式下的雷达参数,设置回波仿真参数:脉冲重复频率为 7000 Hz,发射脉宽为 1  $\mu$ s,天线增益为 30 dB,雷达发射功率为 100 W,雷达波束宽度为 3.5°,信噪比为 5 dB,天线扫描角度范围  $\pm 90^\circ$ ,扫描角速度为 45°/s。根据机载气象雷达的低空风切变预警时间要求,需提前 30 s 以上对低空风切变进行预测,设定风场中心坐标为(6000 m, 0 m, 0 m)。利用逐脉冲撒点仿真法实现低空风切变回波信号仿真,对称风场,顺风风场和逆风风场的雷达回波分别如图 12 ~ 图 14 所示。

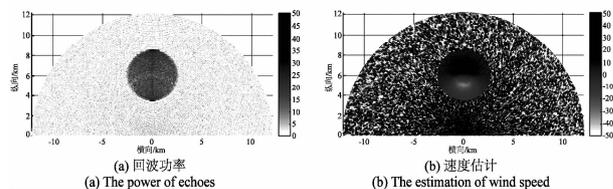


图 12 对称风场的回波仿真结果

Fig. 12 The echo simulation results of symmetric wind field

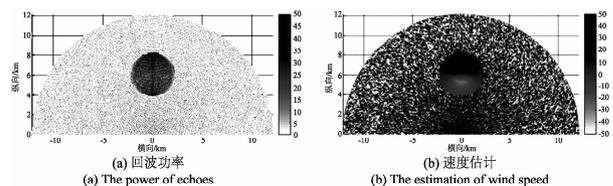


图 13 顺风风场的回波仿真结果

Fig. 13 The echo simulation results of tail wind field

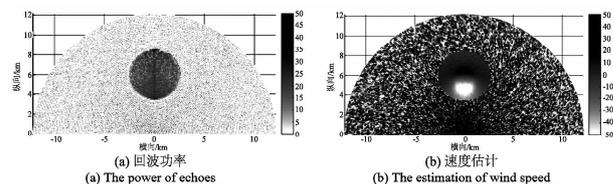


图 14 逆风风场的回波仿真结果

Fig. 14 The echo simulation results of head wind field

图 12 为对称风场的回波仿真结果,其中图 12 (a)为雷达回波功率估计结果,图 12 (b)为雷达回波的速度估计结果。同理,图 13 为顺风风场的回波仿真结果,图 14 为逆风风场的回波仿真结果。

如图 12 ~ 图 14 所示,风切变区域位于扫描中心的正前方,扫描点距离风场中心位置为 6 km,从风场的回波功率可以明显的判断出风场的范围大小。以对称风场的回波仿真结果为例,由速度估计结果可知:在仿真的风场区域,速度估计结果呈对称分布。在风场的中心区域(约为 5 km 到 7 km 处),当穿过风场中心时正向速度急剧变化为负向速度,符合低空风切变的变化特征。对比图 12 ~ 图 14 可知,不同风场类型的回波信号强弱和速度变化范围均不同。在风切变区域之外,杂乱的速度分布是由于噪声引起的。仿真结果表明,回波数据可真实地反映出风切变回波信号的气象特征,符合风切变风场的分布特性,仿真过程设计合理,仿真数据真实有效。

## 5 结论

鉴于工程化的风场建模方法具有简单、灵活和计算量小的特点,本文提出了一种利用函数拟合的机载气象雷达低空风切变三维建模方法。该方法依据风切变的流体力学特征,通过函数拟合的方式建立风场类型及特征可变的三维密度场和速度场。并按照有机载气象雷达在风切变探测模式下的天线扫描与工作方式实现低空风切变的雷达回波仿真。仿真结果表明:该方法可灵活快速地实现低空风切变三维风场建模,仿真过程设计合理,回波数据可真实地反映出低空风切变回波信号的气象特征。

### 参考文献

- [1] Yu Yingjie, Li Yong, Li Jinghua. Simulation and study of windshear signal in airborne pulse Doppler weather radar[C]//3rd International Conference on Computer Science and Network Technology. Dalian: Computer Science and Network Technology (ICCSNT), 2013: 1152-1156.
- [2] 吴仁彪, 孟志超, 范懿, 等. 机载气象雷达风切变信号仿真[J]. 现代雷达, 2012, 34(4): 74-78. Wu Renbiao, Meng Zhichao, Fan Yi, et al. Wind shear signal simulation of the airborne weather radar[J]. Modern Radar, 2012, 34(4): 74-78. (in Chinese)

- [3] Frost W, Chang H P. Simulated flight through JAWS wind shear[J]. *Journal of Aircraft*, 1984, 21(10): 797-802.
- [4] Fujita T T. Manual of downburst identification for project NIMROD[M]. Chicago: University of Chicago, 1978.
- [5] Proctor F H. The terminal area simulation system, Vol. I: theoretical formulation [R]. Springfield: National Aeronautics and Space Administration, DOT/FAA/PM-86/50, NASA Contractor Rep, 1987.
- [6] Xue Ming, Wang Donghai, Gao Jidong, et al. The advanced regional prediction system (ARPS), storm-scale numerical weather prediction and data assimilation[J]. *Meteorol Atmos Phys*, 2003, (82): 139-170.
- [7] 王文龙. 大气风场模型研究及应用[D]. 武汉: 国防科技大学, 2009.  
Wang Wenlong. Atmospheric wind field modeling and its application[D]. Wuhan: National University of Defense Technology, 2009. (in Chinese)
- [8] Oseguera R M, Bowles R L. A simple, analytic 3-dimensional downburst model based on boundary layer stagnation flow[R]. NASA TM 100632, 1988, 1-17.
- [9] Vicroy D D. Assessment of microburst models for down-draft estimation[J]. *Journal of Aircraft*, 1992, 29(6): 1043-1048.
- [10] Chay M T, Albermani F, Wilson R. Numerical and analytical simulation of downburst wind loads[J]. *Engineering Structures*, 2006, 28(2): 240-254.
- [11] Nagata T, Obi S, Masuda S. Statistics of velocity field in laboratory-simulated downburst [J]. *AIAA Journal*, 2006, 44(9): 2061-2070.
- [12] 刘畅, 李滔, 妹江涛, 等. 微下击暴流的三维建模与预警仿真研究[J]. *计算机仿真*, 2011, 28(12): 47-52.  
Liu Chang, Li Tao, Mei Jiangtao, et al. Three-dimensional modeling and simulation of microburst[J]. *Computer Simulation*, 2011, 28(12): 47-52. (in Chinese)
- [13] 肖业伦, 金长江. 大气扰动中的飞行原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993: 21-27.  
Xiao Yelun, Jin Changjiang. Atmospheric disturbances in the principles of flight [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1993: 21-27. (in Chinese)
- [14] 刘夏, 韩雁飞, 李海, 等. 机载气象雷达低空风切变三维回波仿真[C]//西安: 第十三届全国雷达学术年会, 2014: 364-367.

Liu Xia, Han Yanfei, Li Hai, et al. The simulation of airborne weather radar 3D echo signal[C]//Xi'an: 13<sup>th</sup> National Academic Radar Conference, 2014: 364-367. (in Chinese)

- [15] Cheong B L, Palmer R D, Xue Ming. A time series weather radar simulator based on high resolution atmospheric models[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2008, 25(2): 230-243.
- [16] Mark A R. 雷达信号处理基础[M]. 刑孟道, 王彤, 李真芳, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2008: 73-74.  
Mark A R. Fundamentals of radar signal processing[M]. Translated by Xing Mengdao, Wang Tong, Li Zhenfang, et al. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 73-74. (in Chinese)
- [17] Rockwell Collins. WRT-2100 receiver-transmitter component maintenance manual[Z]. Rockwell Collins, Inc, United States of America, 2008.

#### 作者简介



**韩雁飞** 女, 1987年生, 新疆乌鲁木齐人, 中国民航大学电子信息工程学院助教, 硕士, 主要研究方向为机载气象雷达信号处理、低空风切变检测。  
E-mail: yfhan@cauc.edu.cn



**刘夏** 男, 1989年生, 陕西西安人, 中国民航大学信息与通信工程专业硕士研究生, 主要研究方向为机载气象雷达回波信号仿真。  
E-mail: qwel4789cn@gmail.com



**李海** 男, 1976年生, 天津人, 中国民航大学电子信息工程学院副教授, 硕士生导师, 博士, 主要研究方向为自适应信号处理、机载气象雷达信号处理、动目标检测、合成孔径雷达信号处理。  
E-mail: haili@cauc.edu.cn



**卢晓光** 男, 1983年生, 山西忻州人, 中国民航大学电子信息工程学院讲师, 博士, 研究方向为机载气象雷达信号处理。  
E-mail: xglu@cauc.edu.cn