

doi: 103969/j.issn.0490-6756.2017.01.016

非线性时变机载雷达微下击暴流目标 回波建模与算法设计

刘小洋^{1,2}, 曾孝平¹

(1. 重庆大学信息与通信工程博士后流动站, 重庆 400030; 2. 重庆理工大学计算机科学与工程学院, 重庆 400054)

摘要: 为了有效分析微下击暴流产生机理以及在非对称风场条件下微下击暴流的风速估计和回波谱, 利用网格划分法的基本原理, 结合多普勒效应建立了微下击暴流目标回波数学模型, 并提出了一种机载雷达微下击暴流信号的处理算法. 在非对称风场情形下仿真分析了顺风、偏风、侧风以及逆风时微下击暴流的风速估计以及功率谱. 仿真结果表明, 在不同距离门上的顺风、逆风、侧风以及偏风的风速变化符合微下击暴流的特征, 非对称风场下的微下击暴流雨回波三维功率谱分布与非对称风场中的径向速度分布一致.

关键词: 微下击暴流; 网格划分; 功率谱; 多普勒效应

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0490-6756(2017)01-0095-06

Modeling and algorithm design of the nonlinear time-varying airborne radar microburst target

LIU Xiao-Yang^{1,2}, ZENG Xiao-Ping¹

(1. Postdoctoral Research Station of Information and Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China

2. School of Computer Science and Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: In order to analyze generating mechanism of microburst wind shear and wind speed estimation and echo spectrum under asymmetric wind field. The mathematical model of wind shear target echo is established by using mesh generation, combined with Doppler effect, the airborne radar wind shear signal processing algorithm is presented. The wind speed estimation and the rain echo power spectrum are simulated under following wind, partial wind, cross wind and against the wind. The simulation results showed that wind-speed alterations is suitable for the actual wind characteristic under following wind, partial wind, cross wind and against the wind in different range gates. Asymmetric three-dimensional wind shear off the wind rain echo power spectrum distribution with asymmetric wind field in the radial velocity distribution the three-dimensional rain echo power spectrum distribution of wind shear is consistent with the radial velocity distribution under asymmetric field wind.

Keywords: Microburst; Mesh Generation; Power Spectrum; Doppler Effect

收稿日期: 2016-01-08

基金项目: 重庆市博士后研究人员科研项目特别资助 (Xm2015029); 重庆市科委基础与前沿研究计划项目 (cstc2014jcyjA40007); 重庆市教委科学技术研究项目 (KJ1500926); 国家自然科学基金重大研究计划 (91438104).

作者简介: 刘小洋(1980-), 男, 安徽安庆人, 博士, 副教授, 研究方向为雷达信号处理等. E-mail: lxy3103@163.com

1 引言

航空界中,一般把风速或风向两者之一发生突变或同时发生变化的现象称之为风切变,而将高度在 600 m 以下区域发生的风切变称为低空风切变.微下击暴流是低空风切变最重要的一种形式^[1-4].

在飞机起飞或降落过程中,低空风切变(微下击暴流)对飞机造成致命性伤害,严重时候会造成机毁人亡的结果.在 2014~2015 年期间发生几起的空难事故(如复兴航空公司 GE222 航班等)均与微下击暴流低空风切变有关,造成人员伤亡数百人,直接财产损失达数百亿^[5,6].

文献[7-9]主要研究了微下击暴流模型的成因和特性,但没有风场的影响.文献[10,11]主要研究了微下击暴流对载机所造成的危害,采用蒙特卡罗贝叶斯方法进行处理,但没有讨论非对称风场的风速估计分析.文献[12-18]分别研究了机载雷达的微下击暴流的物理特性,虽然考虑了对称风场的影响,但是没有考虑非对称风场的影响.

本文利用网格划分法的基本原理,结合多普勒效应,建立了微下击暴流目标数学模型和非对称风场模型并提出了相应的算法,通过对微下击暴流回波数据的仿真分析,研究了在顺风、偏风、侧风以及逆风情形下的微下击暴流的风速估计和其功率谱.

2 微下击暴流目标回波信号建模

2.1 网格划分法

机载气象雷达波束照射区域范围广,整个地面都是散射源,除一些大的建筑物可以看成点杂波外,其余都是一种分布散射现象.对于机载气象雷达波束照射地面区域的回波信号模拟^[19-22],一般采用网格划分法,它能够实现某区域分布式信号模拟,其原示意图如图 1 所示.

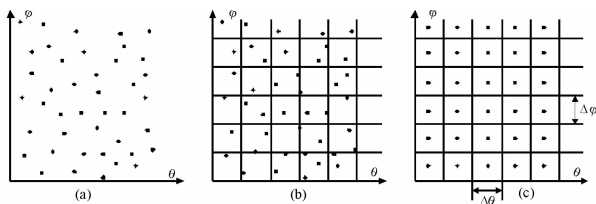


图 1 网格映像法示意图
Fig. 1 The map of grid image

图 1(a)表示的是在 $\theta - \varphi$ 平面内任意位置内的点散射集合体;图 1(b)表示将由距离分辨率和频率分辨率构成的网格叠加在此平面内;图 1(c)

表示的是在每个单元内,将所有的散射体合并成为一个新的点散射体,它位于单元中心.

2.2 非对称风场模型

(1) 传统风场模型

根据微下击暴流变化特性,传统的风场模型^[20-21]如下式.

$$\begin{cases} v_x = M_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \\ v_y = M_1 [1 - \cos(\omega_0 t + \varphi_0)] \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, v_x 、 v_y 分别表示风切变的径向分量和切向分量; M_0 与 M_1 是其对应的幅值; $\omega_0 = 2\pi/t_0$ 为角速度;其中的 t_0 为表示飞行目标经过风切变风场的时间; φ_0 为初相位.

(2) 非对称风场建模

传统的风场模型不能够完全描述实际机场周围的微下击暴流变化情况,且是随时间而变化.下面将建立能够真实反映低空风切变的风场.

飞机的径向距离 d 为

$$d = \sqrt{(X - a_x)^2 + (Y - a_y)^2} \quad (2)$$

式(2)中, X 、 Y 分别为不同方向上的位置坐标; a_x 、 a_y 是风场中心位置.

设 X 、 Y 向的扭曲因子为 ξ 、 ψ , 令 $f = \sqrt{\xi^2 + \psi^2}$. 同时构建与扭曲因子 ξ 、 ψ 等有关的参量 δ :

$$\delta = k \cdot R \cdot \left\{ \frac{X - a_x}{d} \cdot \frac{\xi}{f} + \frac{Y - a_x}{d} \cdot \frac{\psi}{f} \right\} \cdot f \quad (3)$$

式(3)中, R 为非对称风场半径; k 为比例系数.

接下来构建一个与飞机位置、微下击暴流位置等相关的参量 l , 如下式.

$$l = \delta + \sqrt{\delta^2 + R^2 \cdot (1 - f^2)} \quad (4)$$

径向速度分布变量 V_{rd} 如下式所示.

$$\begin{cases} V_{rd} = 0; & H \geq h_a \\ V_{rd} = 0.35 \cdot G_w \cdot v_0 \cdot \\ \left\{ \frac{l}{h_{\max}^2} \cdot (h_a \cdot H); \text{其他} \right. \end{cases} \quad (5)$$

式(4)中, H 是飞行目标的高度; G_w 是风场增益因子; v_0 是初始速度; h_{\max} 是水平气流高度上限.

2.3 微下击暴流目标回波信号建模

设载机在目标视线方向上的速度为 V , 单元平均径向速度为 V_r (指向雷达为正), 载机与散射单元起始距离为 r , 载机离微下击暴流气象散射单元的距离 $r(t)$ 则随时间的变化表示为

$$r(t) = r - Vt - V_r t \quad (6)$$

相位 $\gamma = -4\pi r(t)/\lambda + \psi$ 的时间变化率为

$$\frac{d\gamma}{dt} = -\frac{4\pi dr(t)}{\lambda} \frac{dt}{dt} \quad (7)$$

设雷达的发射功率为 P_i , 天线增益为 G , 目标斜距为 R , 雷达工作波长为 λ , 目标的散射率为 ρ , L 为系统损耗, η 是目标的体反射率, V_c 是雨目标体积单元, r 为雷达到目标的距离. 则由基本雷达方程可以推得微下击暴流目标雨回波的平均功率为

$$P = \frac{P_i G^2 \lambda^2 \rho}{(4\pi)^3 r^4 L} \quad (8)$$

设目标的有效散射面积为 σ' , 则微下击暴流目标雨回波的平均功率为

$$P = \frac{P_i G^2 \lambda^2 \sigma'}{(4\pi)^3 r^4 L} = \frac{P_i G^2 \lambda^2 \eta V_c}{(4\pi)^3 r^4 L} \quad (9)$$

其中, V_c 为波束照射的体积, 目标的体反射率如下式.

$$\eta = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 D^6 \quad (10)$$

式(10)中, D 是圆球之直径, $|K|^2$ 为散射粒子的介电常数, 对于冰与水常取 0.20, 0.93; $Z = \sum D^6$, 称为反射率因子.

因此, 给定反射率因子, 计算出 η , 从而求得目标雨回波平均功率. 假设雷达发射信号为常用的窄带信号, 可近似写成

$$S(t) = \sqrt{2P_i} u(t) e^{j2\pi f t} \quad (11)$$

设 γ 为复反射系数, 令

$$K = \left[\frac{\lambda^2}{(4\pi)^3 R^4 L} \right]^{1/2} G \gamma \quad (12)$$

则回波信号的数学表达式可以写成

$$S_r(t) = \sqrt{2P_i} K S[t - \tau(t)] = K u[t - \tau(t)] e^{j2\pi f [t - \tau(t)]} \quad (13)$$

其中, 时延 τ 为时间的函数, 即

$$\tau(t) = \frac{2r(t)}{c+V} \approx \frac{2r(t)}{c}; \quad V \ll c, \quad (14)$$

将式(2)代入式(10)得到下式.

$$\tau(t) = \frac{2r}{c} - \frac{2V}{c}t - \frac{2V_r}{c}t \quad (15)$$

将上式代入式(13)得到

$$S_r(t) = \sqrt{2P_i} K u \left[t - \frac{2r}{c} + \frac{2V}{c}t + \frac{2V_r}{c}t \right] \cdot e^{j2\pi f \left[t - \frac{2r}{c} + \frac{2V}{c}t + \frac{2V_r}{c}t \right]} \quad (16)$$

其中, $2r/c = \tau$ 为目标回波的延迟, $(2V/c + 2V_r/c)$ f 为目标回波的多普勒频移.

因此, 对于微下击暴流气象目标散射体, 雷达的目标回波信号可以表示为

$$V(t, r) = A \exp \left[j2\pi f \left(t - \frac{2r}{c} \right) + j\psi \right] \cdot$$

$$u \left(t - \frac{2r}{c} + \frac{2V}{c}t + \frac{2V_r}{c}t \right) \quad (17)$$

其中, $2r$ 为入射波和散射波传播的总路径长度; ψ 为由散射体引入随机相位; f 为载频; A 为回波信号幅度; $A = \sqrt{2P}$, P 为微下击暴流目标雨回波的平均功率.

微下击暴流信号回波由两部分组成, 气象回波和地杂波, 所以建信号模型必须建两个模型. 信号模型中数据的处理是在零中频之后, 如图 2 所示.



图 2 目标回波信号处理阶段

Fig. 2 The processing stage of target echo signal

令 V_i 、 V_a 分别为微下击暴流散射微元和飞机沿径向的速度分量; $\beta = 2\pi/\lambda$ 为常数; $\Delta\omega = \omega_i + \omega_a = \beta(V_i - V_a) = 2\pi(V_i - V_a)/\lambda$, $\bar{\varphi}_i$ 为散射体随机相位; $\Delta\bar{\varphi}$ 为发射相位误差; $\bar{n}_i(nT_s)$ 、 $\bar{n}_q(nT_s)$ 为相互独立的接收机噪声. n 代表第 n 个脉冲; T_s 代表脉冲时间间隔, 则目标回波信号的同相分量 I 和正交分量 Q 分别表示为

$$I(nT_s) = \sum_{i=1}^N A_i \cos[\bar{\varphi}_i + \beta(V_i - V_a)nT_s + \Delta\bar{\varphi}] + \bar{n}_i(nT_s) \quad (18)$$

$$Q(nT_s) = \sum_{i=1}^N A_i \sin[\bar{\varphi}_i + \beta(V_i - V_a)nT_s + \Delta\bar{\varphi}] + \bar{n}_q(nT_s) \quad (19)$$

3 微下击暴流信号处理流程

仿真流程以一次方位步进扫描(方位角变化一个步进量)为基本仿真周期(循环); 一个方位的一次扫描完成后, 飞机位置根据飞机速度和扫描所需时间进行更新; 根据天线扫描方式调整天线的扫描方位角和俯仰角的步进值和范围, 调整扫描线; 每一个扫描仿真根据实际设定目标参数、地杂波、飞机参数等变化; 仿真过程(循环)按方位扫描方式重复进行. 其仿真流程示意图如图 3 所示.

4 仿真结果分析

4.1 仿真参数设置

设定方位角是从 -35° 开始扫描的, 方位角的变化范围为 $-35^\circ \sim 35^\circ$. 雷达天线的初始俯仰角设为 -1° , 当雷达天线的俯仰角调整到一定角度

时,则要根据雷达天线扫描方式还原为 -1° .

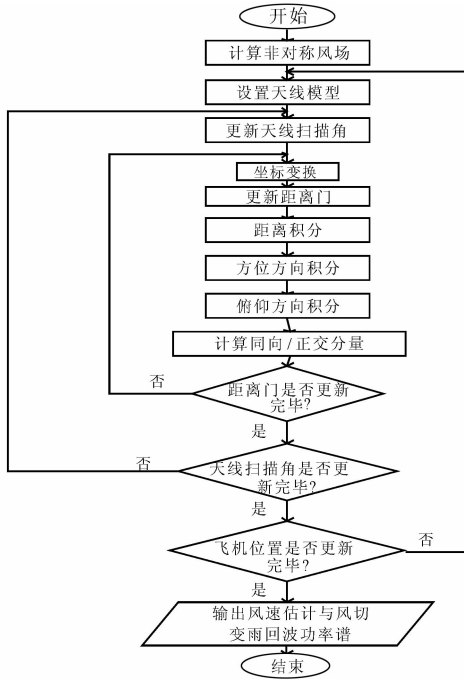


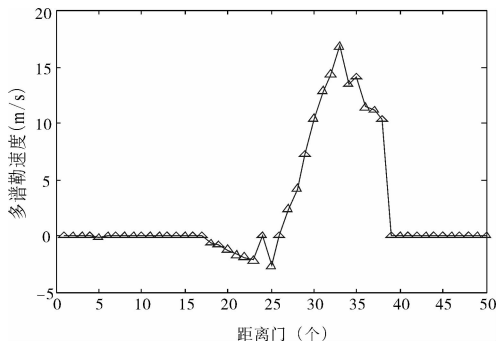
图 3 主程序仿真流程图

Fig. 3 The main program flow chart of the simulation

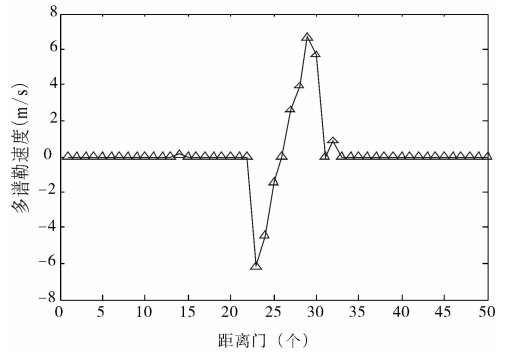
4.2 仿真结果分析

4.2.1 非对称风场下风速估计 为了分析飞机在不同风场条件下所遇到的风速变化,下面将对非对称风场(顺风、侧风、逆风和偏风)条件下的风速进行仿真分析.不同情形下的仿真图如图 4 所示.

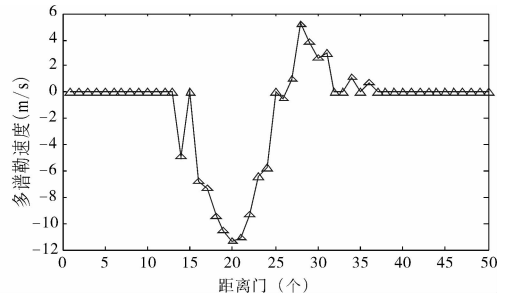
图 4(a)~(d)所示的分别是反射率为 25 dB 下的顺风、逆风、侧风以及偏风条件下第 30 根扫描线上不同距离门上的风速变化.图 4(a)~(d)中曲线的斜率反映了微下击暴流低空微下击暴流对飞机的危险程度,斜率越大(曲线表现得越陡峭),飞机所遇到的危险程度就越大.图 4(a)~(d)中清楚地显示了潜在的微下击暴流,如图 4(d)径向风速分量经历了从逆风 5 m/s 到顺风 14 m/s 的剧烈变化.通过危险因子的计算就可得出微下击暴流的危险程度了.



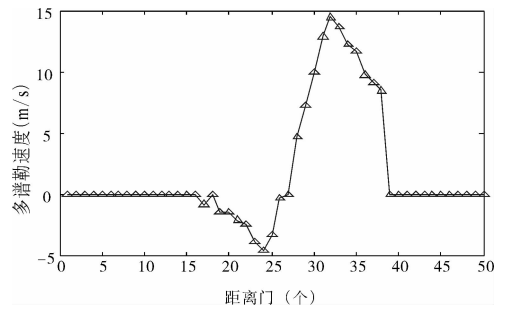
(a) 顺风



(b) 侧风



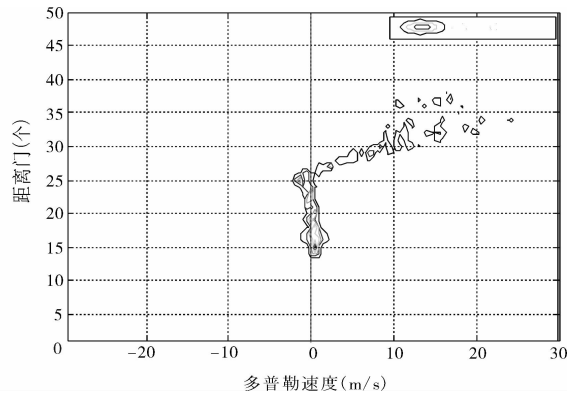
(c) 逆风



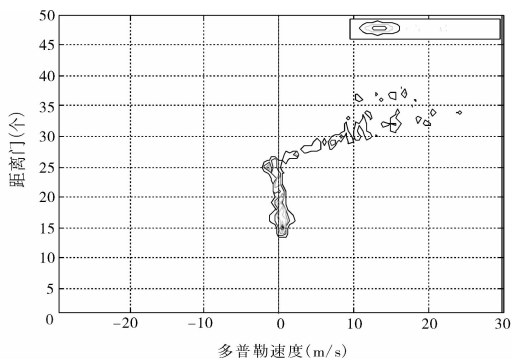
(d) 偏风

图 4 非对称风场条件下的风速估计
Fig. 4 Wind speed estimation under the condition of asymmetric wind field

4.2.2 微下击暴流雨回波谱分析 非对称风场情形下的雨回波功率谱仿真图如图 5 和图 8 所示.



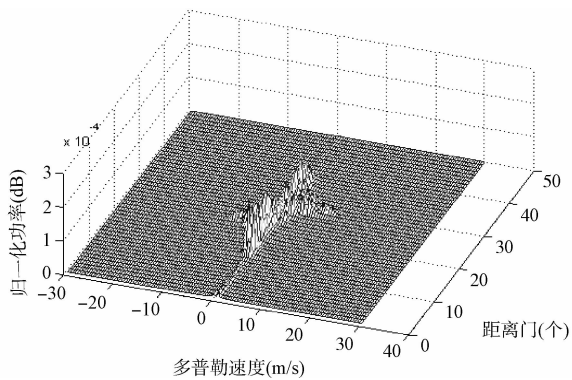
(a) 三维图



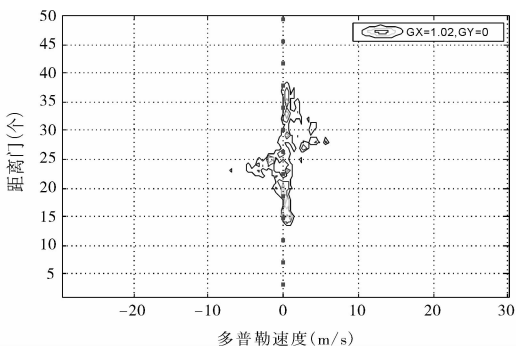
(b) 等高线图

图 5 顺风情形下的雨回波功率谱

Fig. 5 The rain echo power spectrum of following wind



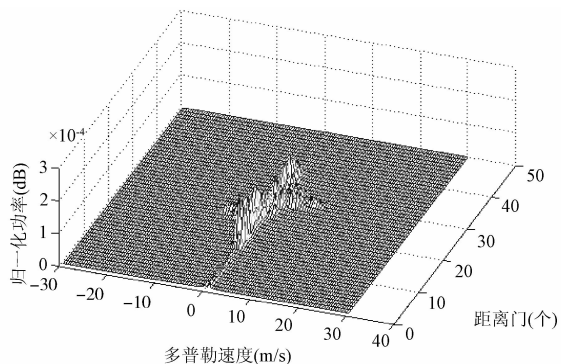
((a) 三维图



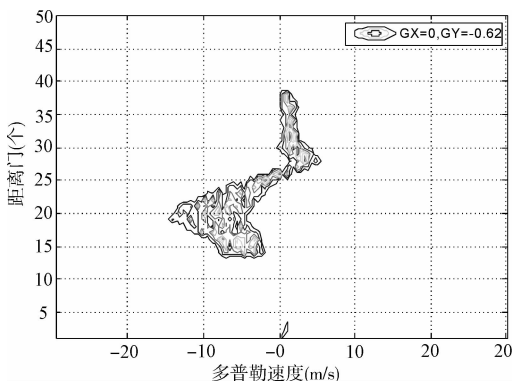
(b) 等高线图

图 6 侧风情形下的雨回波功率谱

Fig. 6 The rain echo power spectrum of side wind



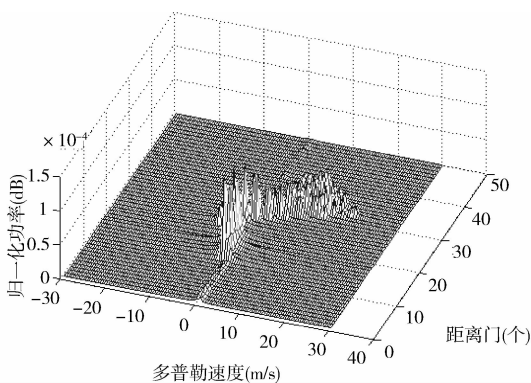
(a) 三维图



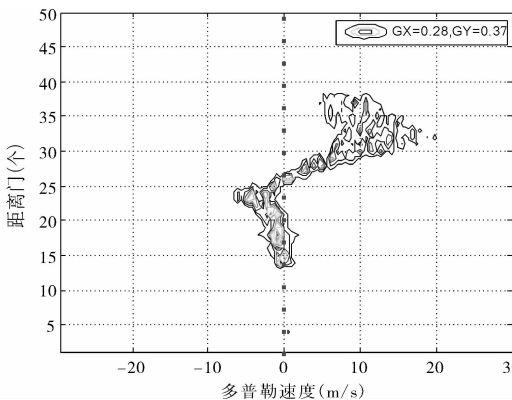
(b) 等高线图

图 7 逆风情形下的雨回波功率谱

Fig. 7 The rain echo power spectrum of against wind



(a) 三维图



(b) 等高线图

图 8 偏风情形下的雨回波功率谱

Fig. 8 The rain echo power spectrum of partial wind

图 5~图 8 分别是顺风、侧风、逆风、偏风情形下(反射率为 25 dB,第三十根扫面线)的雨回波三维功率谱及其等高线图. 四种风场情形下雨回波功率谱分布与风场模型数据中 Y 轴向径向速度分布一致. 从图 5 可以看出,顺风条件下径向速度以正向为主. 从图 6 可以看出,侧风条件下由于 X 轴向风速分量垂直于径向速度,因此 X 轴向速度分量

对雨回波无影响,因此其多普勒速度分布仍然关于零多普勒速度对称且幅度很小.从图 7 可以看出,逆风条件下径向速度以负向为主.偏风条件下径向速度视扭曲因子正负决定,由于图 8 中 Y 轴向扭曲因子为正值,则径向速度以正向为主.

5 结 论

本文从网格划分法基本入手,结合多普勒效应,根据微下击暴流特性建立了微下击暴流目标回波数学模型和非对称风场模型,并提出了目标回波仿真算法.由于实际中,飞机等航行器遭遇微下击暴流时均是非对称风场,这里仿真分析了非对称风场情形下微下击暴流目标回波的风速估计和雨回波功率谱.仿真结果表明了建立的微下击暴流目标回波数学模型和提出的相应算法是合理可行的.

参考文献:

[1] Pulat E, Ersan H A. Numerical simulation of turbulent airflow in a ventilated room: Inlet turbulence parameters and solution multiplicity [J]. *Energ Buildings*, 2015, 93(15): 227.

[2] Prabu K, Sriram D. MIMO free-space optical communication employing coherent BPOLSK modulation in atmospheric optical turbulence channel with pointing errors[J]. *Opt Commun*, 2015, 343(15): 188.

[3] Wang F F, Chen D Y, Xu B B, *et al.* Nonlinear dynamics of a novel fractional-order Francis hydro-turbine governing system with time delay[J]. *Chaos Soliton Fract*, 2016, 91(2): 329.

[4] Ding Z, An L W, Dong J X, *et al.* Observer-based fault detection and accommodation for nonlinear time-delay systems with a prescribed performance mechanism [J]. *Appl Math Model*, 2016, 40(19): 8377.

[5] 刘禄波, 罗懋康, 赖莉. Hilbert-Huang 变换在线性正则域的新推广[J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2016, 53(5): 980.

[6] Roberto Z, Silvano V, Mario C. Analytical and numerical solution to the nonlinear cubic Duffing equation: An application to electrical signal analysis of distribution lines[J]. *Appl Math Model*, 2016, 40(21): 9152.

[7] Eliyar A, Babak M, Andre R B, *et al.* Nonlinear model calibration of a shear wall building using time and frequency data features[J]. *Mech Syst Signal Pr*, 2016, 85: 236.

[8] Ke W, Nirmalathas A, Lim C, *et al.* Performance of high-speed reconfigurable free-space card-to-card optical interconnects under air turbulence [J]. *J*

Lightwave Technol, 2013, 31(11): 1687.

[9] Soguero-Ruiz C, Lechuga-Suarez L, Mora-Jimenez I, *et al.* Ontology for heart rate turbulence domain from the conceptual model of Snomed-ct[J]. *IEEE T Bio-med Eng*, 2013, 60(7): 1825.

[10] 达举霞, 韩晓玲. 三阶非线性微分方程边值问题正解的存在性[J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2016, 53(6): 1177.

[11] Xuan T, Zheng Y X, Ghassemlooy Z. Coherent polarization modulated transmission through MIMO atmospheric optical turbulence channel [J]. *J Lightwave Technol*, 2013, 31(20): 3221.

[12] Vu B T, Dang N T, Thang T C, *et al.* Bit error rate analysis of rectangular QAM/FSO systems using an APD receiver over atmospheric turbulence channels[J]. *J Opt Commun Netw*, 2013, 5(5): 437.

[13] Kaur P, Jain V K, Kar S. Performance analysis of FSO array receivers in presence of atmospheric turbulence[J]. *IEEE Photonic Technol*, 2014, 26(12): 1165.

[14] 刘志芳, 李健. 低采样率非线性随机共振微弱信号检测[J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2015, 52(6): 1267.

[15] 何礼, 何培宇, 张晓枫, 等. 一种适合于低空无线信道的改进 SC-FDE 技术[J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2016, 52(2): 306.

[16] 纪娟娟, 郭业才, 张兰芳, 等. 二阶微小项声波动方程的同伦分析近似解[J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2016, 53(5): 1087.

[17] Xiang Z, Milanfar P. Removing atmospheric turbulence via space-invariant deconvolution [J]. *IEEE Trans Pattern Anal*, 2013, 35(1): 157.

[18] Greene A D, Hendricks P J. Turbulent wake of a bridge pier in a tidal current [J]. *IEEE J Oceanic Eng*, 2014, 39(2): 276.

[19] Prabu K, Kumar D S. MIMO free-space optical communication employing coherent BPOLSK modulation in atmospheric optical turbulence channel with pointing errors[J]. *Opt Commun*, 2015, 343(15): 188.

[20] Vachirasricirikul S, Ngamroo I. Robust LFC in a smart grid with wind power penetration by coordinated V2G control and frequency controller [J]. *IEEE T Smart Grid*, 2014, 5(1): 372.

[21] Engelen A, Schmidt S, Buchsteiner M. The simultaneous influence of national culture and market turbulence on entrepreneurial orientation: a nine-country study[J]. *J Int Manag* 2015, 21(1): 18.

[22] 孙玉莹, 任文丽. 基于二重分圆术的二元序列的线性复杂度计算[J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2015, 52(4): 748.