

回波功率筛选与数字地表分类数据辅助的低空风切变风速估计方法

李海* 宋迪 程伟杰 王杰

(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: 针对非均匀杂波环境下, 低空风切变风速估计不准的问题, 该文提出一种回波功率筛选与数字地表分类数据(DLCD)辅助的低空风切变风速估计方法。该方法首先利用样本回波功率对训练样本进行初选, 然后利用DLCD计算各样本间的相似度, 并从功率较大的训练样本中选取样本相似度较高的训练样本估计待测距离单元的杂波协方差矩阵, 最后利用广义相邻多波束(GMB)-局域联合处理(JDL)的方法实现低空风切变风速的有效估计。

关键词: 风速估计; 低空风切变; 非均匀杂波; 回波功率筛选; 数字地表分类数据

中图分类号: TN959.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)08-2286-06

DOI: 10.11999/JEIT190894

Echo Power Screening and Digital Land Classification Data-assisted Wind Speed Estimation of Low-altitude Wind-shear

LI Hai SONG Di CHENG Weijie WANG Jie

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

Abstract: In order to solve the problem of inaccurate estimation of low-altitude wind-shear wind speed under non-uniform clutter environment, a kind of low-altitude wind-shear wind speed estimation method based on echo power screening and Digital Land Classification Data (DLCD)-assisted is proposed. The method firstly uses the sample echo power to select initially the training samples, then uses the DLCD to calculate the similarity between the samples, and selects the training samples with higher sample similarity from the higher-powered training samples to estimate the clutter covariance matrix, finally uses the Generalized adjacent Multiple-Beam (GMB)-Joint Domain Localized (JDL) method to achieve wind speed effective estimation of low-altitude wind-shear.

Key words: Wind speed estimation; Low-altitude wind-shear; Non-uniform clutter; Echo power screening; Digital Land Classification Data(DLCD)

1 引言

低空风切变是一种能够引起空难事故的灾难性天气, 它具有持续时间短、瞬间强度大、作用区域小、危害性高等特点^[1]。当飞机在起飞或者降落阶段遭遇低空风切变时, 飞行员若没有足够的时间和空间调整飞机姿态, 将有可能导致空难的发生^[2],

因此低空风切变的检测和预警成为当前民航领域的一项重要课题, 而风切变风速估计作为整个风切变检测流程的基础^[3], 直接影响了风切变检测的准确程度。

机载气象雷达是民航飞机不可或缺的电子设备, 它是民航飞机的“双眼”^[4]。近些年来, 将双极化相控阵体制引入到机载气象雷达已经成为发展趋势^[5], 较传统的单天线雷达, 相控阵雷达的回波信号中含有目标空域信息, 使得空时联合处理成为可能, 在强杂波背景下的目标检测和参数估计性能更加优越^[6]。空时自适应处理(Space-Time Adaptive Processing, STAP)^[7]是机载相控阵雷达杂波抑制与目标检测的关键技术, 它能够利用雷达回波的空时耦合特性实现杂波抑制和信号匹配^[8]。在均匀杂波环境下, 可以利用统计的方法, 将临近的距离单元作为训练样本对待测距离单元的杂波协方差矩阵进行估计, 进而得到一个最大似然准则下的最优滤波

收稿日期: 2019-11-07; 改回日期: 2021-06-15; 网络出版: 2021-06-25

*通信作者: 李海 elisha1976@163.com

基金项目: 民机项目(MJ-2018-S-28), 天津市自然科学基金(20JCZDJC00490), 航空基金项目(20182067008), 中央高校基本科研业务费项目(3122018D008), 中国民航大学蓝天教学名师培养经费

Foundation Items: The Civil Aircraft Project (MJ-2018-S-28), The Key Project of Tianjin Natural Fund (20JCZDJC00490), The Aviation Foundation of China (20182067008), The Basic Scientific Research Project of Universities of The CPC Central Committee (3122018D008), The Training Funds for Famous Blue Sky Teachers of Civil Aviation University of China

器^[9]，但在雷达的实际工作环境中，由于地表起伏等原因，不同的训练样本之间很难满足独立同分布的条件，同时不同距离单元的杂波回波功率存在严重的非均匀性，导致估计得到的杂波协方差矩阵失配，无法充分抑制强杂波，严重影响风速估计结果的准确性。

围绕非均匀杂波环境下的STAP问题，研究者开展了大量的研究，提出了很多具有重要意义和实际应用价值的杂波抑制算法，主要包括功率选择训练法(Power Selected Training, PST)^[10]、非均匀检测器法(NonHomogeneity Detector, NHD)^[11,12]、知识辅助法^[13]等，这些方法大都应用于某种特定的杂波非均匀情况下的点目标的检测和参数估计，应用于非均匀杂波环境下的低空风切变检测和风速估计的文献还未曾看到。

针对上述情况，本文提出一种回波功率筛选与DLCD(Digital Land Classification Data)辅助的低空风切变风速估计方法，该方法首先根据样本回波功率的大小对训练样本进行筛选，选择回波功率较大的训练样本估计杂波协方差矩阵，可以加深滤波器凹口，充分抑制功率非均匀的强杂波，然后利用数字地表分类数据DLCD计算各样本间的相似度，并从功率较大的训练样本中再次挑选出样本相似度较高的训练样本估计待测距离单元的杂波协方差矩阵，尽可能保证挑选出的训练样本和待测距离单元的杂波具有相同的分布，最后利用广义相邻多波束-局域联合处理(Generalized adjacent Multiple-Beam-Joint Domain Localized, GMB-JDL)的方法获得风场速度的准确估计。

2 机载前视阵雷达回波模型

机载前视阵几何模型图如图1所示，载机速度为 V ，飞行高度为 H ，雷达天线收发共置，为均匀 N 元线阵，阵元间隔 $d = 0.5\lambda$ ，其中 λ 为雷达工作波长。假设在相干处理时间(Coherent Processing Interval, CPI)内，相干处理周期数为 K ，脉冲重复

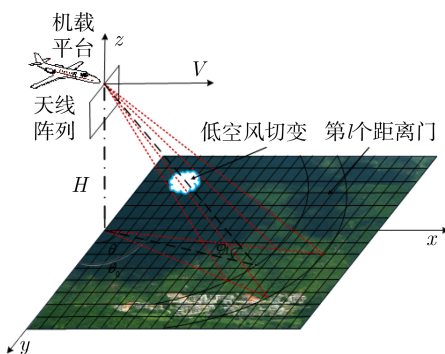


图1 机载前视阵几何模型图

周期为 T_r ，雷达在其探测范围内有 L 个距离单元，第 l 个距离单元的回波数据 $\mathbf{x}(l)$ ($l = 1, 2, \dots, L$)可表示为

$$\mathbf{x}(l) = \mathbf{s}(l) + \mathbf{c}(l) + \mathbf{n} \quad (1)$$

其中， \mathbf{n} 为高斯白噪声， $\mathbf{c}(l)$ 为第 l 个距离单元的非均匀地杂波，它是在Ward模型的基础上融合DEM数据和DLCD仿真得到的^[14]， $\mathbf{s}(l)$ 为第 l 个距离单元的低空风切变信号，可表示为

$$\mathbf{s}(l) = \Gamma \cdot \mathbf{A}(\psi_0, f_l) = \Gamma \cdot \mathbf{A}_t(f_l) \otimes \mathbf{A}_s(\theta_0, \varphi_l) \quad (2)$$

其中， Γ 为该距离单元风场信号回波复幅度， $\mathbf{A}(\psi_0, f_l)$ 为该距离单元风场信号空时导向矢量， ψ_0 为风场信号空间锥角， $\cos \psi_0 = \cos \theta_0 \cos \varphi_l$ ， $\mathbf{A}_t(f_l)$ 为该距离单元风场信号的时域导向矢量， f_l 为该距离单元内目标回波的多普勒中心频率， \otimes 表示Kronecker积， $\mathbf{A}_s(\theta_0, \varphi_l)$ 为该距离单元风场信号的空域导向矢量， θ_0 和 φ_l 分别表示风场信号的方位角和俯仰角。 $\mathbf{A}_t(f_l)$ 和 $\mathbf{A}_s(\theta_0, \varphi_l)$ 可以分别表示为^[15]

$$\mathbf{A}_t(f_l) = \mathbf{a}_t(f_l) \odot \mathbf{g}(\sigma_f) \quad (3)$$

$$\mathbf{A}_s(\theta_0, \varphi_l) = \mathbf{a}_s(\theta_0, \varphi_l) \odot \mathbf{g}(\theta_0, \varphi_l) \quad (4)$$

其中， $\mathbf{a}_t(f_l) = [1 e^{j\pi f_l} \dots e^{j\pi(K-1)f_l}]^T$ 为该距离单元多普勒中心频率为 f_l 的点目标的时域导向矢量， \odot 为Hadamard积， $\mathbf{g}(\sigma_f) = [1 e^{-2\pi^2 \sigma_f^2} \dots e^{-2\pi^2(K-1)\sigma_f^2}]^T$ 为频率扩展函数，其中， σ_f 为多普勒谱宽。 $\mathbf{a}_s(\theta_0, \varphi_l) = [1 e^{j2\pi d \cos \theta_0 \cos \varphi_l / \lambda} \dots e^{j2\pi d(N-1) \cos \theta_0 \cos \varphi_l / \lambda}]^T$ 为该距离单元风场中心上点目标的空域导向矢量， $\mathbf{g}(\theta_0, \varphi_l) = [1 e^{(2\pi d)^2 \Delta / (2\lambda)^2} \dots e^{(2\pi(N-1)d)^2 \Delta / (2\lambda)^2}]^T$ 为风场信号的角度扩展函数，其中， $\Delta = \sigma_\theta^2 \cos^2 \varphi_l \sin^2 \theta_0 + \sigma_\varphi^2 \sin^2 \varphi_l \cos^2 \theta_0$ ， σ_θ 和 σ_φ 分别为 θ_0 和 φ_l 方向上的角度扩展^[1]。

3 回波功率筛选与DLCD辅助的低空风切变风速估计方法

本文所提回波功率筛选与DLCD辅助的低空风切变风速估计方法，首先利用回波功率对训练样本进行初选，从中选择功率较大的训练样本；其次利用DLCD计算样本相似度对初选出来的训练样本进行2次筛选，从中选择样本相似度高的训练样本估计待测距离单元的杂波协方差矩阵，最后利用GMB-JDL的方法实现低空风切变风速的有效估计。

3.1 样本挑选及杂波协方差矩阵估计

样本挑选及杂波协方差矩阵估计的重点在于样本挑选，其中样本挑选包括回波功率筛选和样本相似度筛选。

机载气象雷达全距离单元的回波功率可以表示为

$$\mathbf{P} = [P(1) P(2) \dots P(l) \dots P(L)] \quad (5)$$

其中, $P(l)$ 为第 l 个距离单元的回波功率, $P(l)$ 可以用式(6)进行计算

$$P(l) = \mathbf{x}^H(l)\mathbf{x}(l) \quad (6)$$

其中, $(\cdot)^H$ 表示共轭转置。以第 l 个距离单元为待测距离单元, 根据回波功率 \mathbf{P} , 从样本中挑选出不包含待测距离单元且功率大于等于以3倍降维处理器系统自由度所对应的功率为门限值的 I 个距离单元作为训练样本, 令 \mathbf{II}_l 为经过功率初选得到的 I 个训练样本所构成的集合, 则

$$\mathbf{II}_l = \{\mathbf{x}(r) | P(r) \geq P_s, r = 1, 2, \dots, l-1, l+1, \dots, L\} \quad (7)$$

其中, P_s 为3倍降维处理器系统自由度所对应的功率门限值(I 的取值应满足两倍以上降维处理器系统自由度^[7], 即 $I \geq 2[u+z-1+(\alpha-1)(\beta-1)]$, 其中, $[u+z-1+(\alpha-1)(\beta-1)]$ 为降维处理器系统自由度, u, z 分别为GMB算法选取的波束与多普勒通道数目, α, β 分别为JDL算法选取的波束与多普勒通道数目。这里取3倍降维处理器系统自由度为门限是为样本的2次筛选留出余度)。这样可以有效地加深自适应滤波器凹口, 抑制强杂波。将集合 \mathbf{II}_l 中的元素排列开来

$$\mathbf{II}_l = [II_l(1) II_l(2) \dots II_l(i) \dots II_l(I)] \quad (8)$$

其中, $II_l(i)$ 表示经过功率初选得到的第 i ($i = 1, 2, \dots, I$)个训练样本。为了在此基础上获得与待测距离单元独立同分布的训练样本, 还需要根据DLCD计算样本相似度。

DLCD中包含了雷达作用范围内每个地表散射点的地貌分类码, 假设在DLCD中, 地貌类型被分为 Q 类, 则对于由回波功率筛选出的训练样本的集合 \mathbf{II}_l 中的第 i 个训练样本来说, 可以定义一个地貌特征矢量

$$\mathbf{W}_i = \frac{1}{M_i} [\tau_1 o_1 \dots \tau_q o_q \dots \tau_Q o_Q] \quad (9)$$

其中, M_i 为第 i 个训练样本对应的距离单元内包含的地表散射点的总数(DEM和DLCD均是实际地形空间分布特征的离散化模型, 采用等间隔的正方形网格来表示地表网格点的地理信息, 这里的地表散射点也即网格点), o_q 为第 q 类地貌的地貌分类码, τ_q 为该距离单元第 q 类地貌的地表散射点数量。

假设待测距离单元的地貌特征矢量为 \mathbf{W}_{CUT} , 则第 i 个训练样本与待测距离单元的样本相似度可由式(10)计算

$$A_i = (\mathbf{W}_{\text{CUT}} - \mathbf{W}_i)^H (\mathbf{W}_{\text{CUT}} - \mathbf{W}_i) \quad (10)$$

由此可以得到根据功率已经筛选出的 I 个训练样本的样本相似度

$$\mathbf{A} = [A_1 A_2 \dots A_i \dots A_I] \quad (11)$$

其中, A_i ($i = 1, 2, \dots, I$)越小, 表示样本的相似度越高。根据样本相似度 \mathbf{A} , 从 \mathbf{II}_l 中选取相似度较高的 Y 个训练样本估计待测距离单元杂波协方差矩阵^[16], 此时 Y 的选取要大于或等于降维处理器系统自由度的两倍^[7]。以两倍降维处理器系统自由度所对应的样本相似度为门限值, 令 \mathbf{E}_l 为样本相似度小于等于这一门限值的 Y 个训练样本所构成的集合, 则

$$\mathbf{E}_l = \{II_l(i) | A_i \leq A_s, i = 1, 2, \dots, I\} \quad (12)$$

其中, A_s 为两倍降维处理器系统自由度所对应的样本相似度门限值。将集合 \mathbf{E}_l 中的元素排列开来

$$\mathbf{E}_l = [\Psi_l(1) \Psi_l(2) \dots \Psi_l(y) \dots \Psi_l(Y)] \quad (13)$$

其中, $\Psi_l(y)$ 表示经过样本相似度筛选得到的第 y ($y = 1, 2, \dots, Y$)个训练样本。则估计得到待测距离单元的杂波协方差矩阵为

$$\mathbf{R}_c(l) = \frac{1}{Y} \sum_{y=1}^Y \Psi_l(y) \Psi_l^H(y) \quad (14)$$

3.2 基于GMB-JDL的低空风切变风速估计

基于GMB-JDL的低空风切变风速估计方法的原理图如图2所示, 从图2可以看出, 该方法是将GMB方法和JDL方法相结合, 在适当增加辅助波束和辅助多普勒通道的基础上, 同时结合了两种算法的优点, 大大降低了运算量和对训练样本的要求, 提高了低空风切变风速估计的稳健性。

在降维STAP方法中, 降维处理的关键是构造合适的降维变换矩阵。当风场信号的方位已知时, 假定第 l 个距离单元风场信号的空时导向矢量为 $\mathbf{A}(\psi_0, f_u)$, 其中, f_u 表示该距离单元风场信号主多普勒通道的归一化多普勒频率($f_u \in [-1, 1]$), 则由图2可知, GMB-JDL方法的降维变换矩阵 \mathbf{T}_l 可以表示为

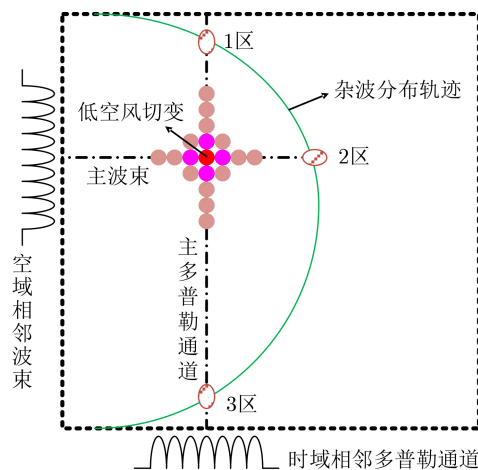


图2 GMB-JDL原理图

$$\mathbf{T}_l = [\mathbf{T}_1 \ \mathbf{T}_2 \ \mathbf{T}_3] \quad (15)$$

其中,

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{T}_1 &= \mathbf{B}_t(f_u)_{K \times 1} \otimes \left[\mathbf{B}_s(\psi_0 - \frac{(u-1)}{2} \Delta\psi), \dots, \right. \\ &\quad \left. \mathbf{B}_s(\psi_0), \dots, \mathbf{B}_s(\psi_0 + \frac{(u-1)}{2} \Delta\psi) \right]_{N \times u} \\ \mathbf{T}_2 &= \mathbf{B}_s(\psi_0)_{N \times 1} \otimes \left[\mathbf{B}_t(f_u - \frac{(z-1)}{2} \Delta f), \dots, \right. \\ &\quad \mathbf{B}_t(f_u - \Delta f), \mathbf{B}_t(f_u + \Delta f), \dots, \\ &\quad \left. \mathbf{B}_t(f_u + \frac{(z-1)}{2} \Delta f) \right]_{K \times (z-1)} \\ \mathbf{T}_3 &= \left[\mathbf{B}_t(f_u - \frac{(\beta-1)}{2} \Delta f), \dots, \mathbf{B}_t(f_u - \Delta f), \right. \\ &\quad \mathbf{B}_t(f_u + \Delta f), \dots, \mathbf{B}_t(f_u + \frac{(\beta-1)}{2} \Delta f) \left. \right]_{K \times (\beta-1)} \\ &\quad \otimes \left[\mathbf{B}_s(\psi_0 - \frac{(\alpha-1)}{2} \Delta\psi), \dots, \mathbf{B}_s(\psi_0 - \Delta\psi), \right. \\ &\quad \left. \mathbf{B}_s(\psi_0 + \Delta\psi), \dots, \mathbf{B}_s(\psi_0 + \frac{(\alpha-1)}{2} \Delta\psi) \right]_{N \times (\alpha-1)} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

其中, \mathbf{T}_1 为多普勒通道与 u 个空域相邻波束组成的降维变换矩阵, \mathbf{T}_2 为主波束与 $(z-1)$ 个时域相邻多普勒通道组成的降维变换矩阵, \mathbf{T}_3 为 $(\alpha-1)$ 个相邻波束和 $(\beta-1)$ 个相邻多普勒通道组成的降维变换矩阵, Δf 和 $\Delta\psi$ 分别表示相邻多普勒通道的频率差值和相邻波束的角度差值. $\mathbf{B}_t(f_u) = \Theta_t \odot \mathbf{A}_t(f_u)$, $\mathbf{B}_s(\psi_0) = \Theta_s \odot \mathbf{A}_s(\psi_0)$ 分别为构造的该距离单元内低空风切变信号的加权时域、空域导向矢量, Θ_t 和 Θ_s 分别表示时域和空域的静态加权矢量. 适当加权后, 剩余杂波主要集中在主瓣杂波区(2区)和多普勒通带杂波区(1区和3区), 利用多个相邻波束和相邻多普勒通道可以实现对上述杂波区的对消^[7].

计算得到降维变换矩阵 \mathbf{T}_l 以后, 根据 LCMV 准则, 可将第 l 个距离单元内的 GMB-JDL 降维处理器可表示为式(17)所示数学优化问题

$$\left. \begin{aligned} \min \quad & \mathbf{w}_T^H(l) \mathbf{R}_T(l) \mathbf{w}_T(l) \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{w}_T^H(l) \mathbf{B}_T(l) = 1 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

其中, $\mathbf{R}_T(l) = \mathbf{T}_l^H \mathbf{R}_e(l) \mathbf{T}_l$ 为降维杂波协方差矩阵, $\mathbf{B}_T(l) = \mathbf{T}_l^H \mathbf{B}_t(f_u) \otimes \mathbf{B}_s(\psi_0)$ 为该距离单元内降维变换后低空风切变信号的空时导向矢量. 此时, 降维处理器的最优权重矢量^[7,9]为

$$\mathbf{w}_T(l) = \frac{\mathbf{R}_T^{-1}(l) \mathbf{B}_T(l)}{\mathbf{B}_T^H(l) \mathbf{R}_T^{-1}(l) \mathbf{B}_T(l)} \quad (18)$$

当雷达回波信号通过 GMB-JDL 降维处理器后, 可以在降维的基础上实现地杂波抑制和风切变

信号匹配, 此时, 可用式(19)作为代价函数估计待测距离单元风场回波信号的多普勒频率

$$\hat{f}_l = \arg \max_{f_l} \mathbf{w}_T^H(l) \mathbf{x}_T(l) \quad (19)$$

其中, $\mathbf{x}_T(l) = \mathbf{T}_l^H \mathbf{x}(l)$, 进而得到第 l 个距离单元的风速估计为

$$\hat{v}_l = \frac{\lambda \hat{f}_l}{4T_r} \quad (20)$$

4 方法流程

回波功率筛选与 DLCD 辅助的低空风切变风速估计的方法流程如图3所示, 本文所提方法可以有效地抑制非均匀地杂波并进行风速估计, 其关键处理步骤为:

- 步骤1 计算各距离单元的回波信号功率, 筛选出功率较大的训练样本;
- 步骤2 根据 DLCD 中的地貌分类码计算样本相似度;
- 步骤3 从功率较大的训练样本中选择样本相似度较高的训练样本估计杂波协方差矩阵;
- 步骤4 通过 GMB-JDL 的方法实现杂波抑制和风切变信号匹配;
- 步骤5 构造功率输出代价函数估计各距离单元风场回波信号的多普勒频率。

5 仿真结果及分析

(1) 仿真条件描述

本文假定风场位于载机前方 8.5~16.5 km 处, 雷达与载机的其他仿真参数设置如表1所示。

(2) 仿真结果分析

图4为仿真的机载气象雷达回波信号空时2维谱。

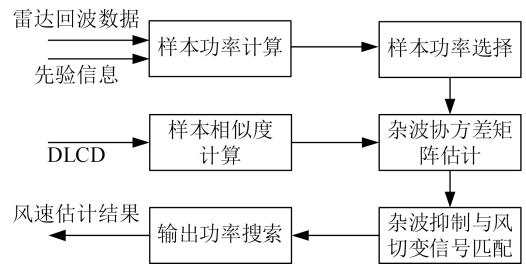


图3 DLCD辅助的低空风切变风速估计流程图

表1 雷达与载机仿真参数设置

参数名称	数值	参数名称	数值
飞行高度(m)	600	阵元数	8
载机速度(m/s)	75	采样周期数	32
雷达工作波长(m)	0.05	主瓣方向(°)	(60, 0)
脉冲重复周期(ms)	0.143	杂噪比(dB)	40
距离分辨率(m)	150	信噪比(dB)	5

由图4可以看出,当机载气象雷达工作在前视模式时,低空风切变的空时2维谱为一条窄带,地杂波的空时2维谱为椭圆形。低空风切变场的回波功率远小于地杂波的回波功率,致使风场回波的多普勒信息被地杂波的多普勒信息所淹没,严重影响了低空风切变的检测及参数估计。

图5为均匀杂波环境与非均匀杂波环境的特征谱对比图。由图5可以看出,相比于均匀杂波,非均匀杂波大特征值的功率要高于均匀杂波,同时大特征值的个数也会增加,这会导致杂波自由度估计不准确,为功率非均匀的杂波抑制带来困难。

图6为以10, 50, 90和130号距离单元为待测距离单元计算得到的样本相似度。由图6可以看出,以不同的距离单元为待测距离单元计算得到的各样本相似度是不同的,说明在非均匀地杂波中,并不

是所有的训练样本都满足独立同分布的条件,为了有效地估计待测距离单元的杂波协方差矩阵,需要根据样本相似度选取合适的训练样本。

图7为本文所提方法与其他方法的风速估计结果对比图。由图7可以看出,本文所提方法在非均匀杂波环境下依然可以较好地估计出风场速度。对比图显示非均匀杂波环境下,最优STAP的估计结果相对于GMB-JDL方法还要差,主要是因为非均匀杂波环境下,用于估计杂波协方差矩阵所需的IID的训练样本数严重不足,而GMB-JDL方法作为一种稳健的降维STAP的方法,对训练样本数的需求没有那么高。

本文所提方法与其他方法的风速估计均方根误差如表2所示,由表2可以看出,本文所提方法在非均匀杂波环境下的均方根误差最小。

6 结束语

本文提出一种回波功率筛选与DLCD辅助的低空风切变风速估计方法,该方法将回波功率筛选与样本相似度计算结合,从回波功率大的训练样本中再次筛选出样本相似度高的训练样本估计杂波协方差矩阵,这样可以加深滤波器凹口,充分抑制功率非均匀的强杂波,同时保证挑选出的训练样本可以

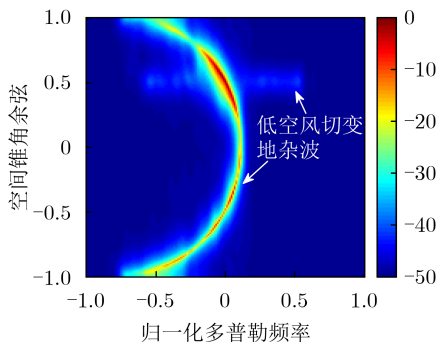


图4 雷达回波信号的空时2维谱

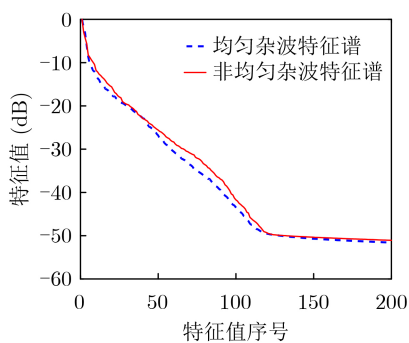


图5 特征谱对比图

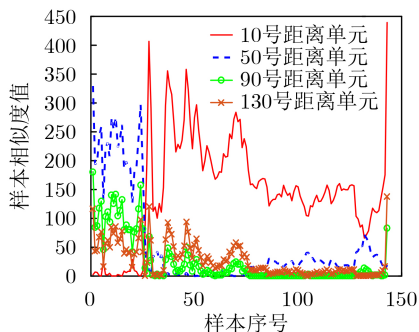


图6 各距离单元的样本相似度

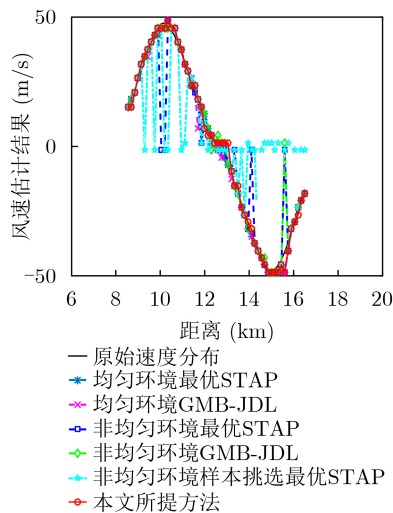


图7 风速估计结果对比图

表2 风速估计均方根误差

风速估计方法	均方根误差(m/s)
均匀环境最优STAP	1.8128
均匀环境GMB-JDL	2.0617
非均匀环境最优STAP	12.0579
非均匀环境GMB-JDL	8.6787
非均匀环境样本挑选最优STAP	24.4810
本文所提方法	6.0489

和待测距离单元的杂波具有相同的分布, 最后利用 GMB-JDL 的方法实现低空风切变风速的有效估计, 降低了对训练样本数的需求, 文中的仿真及实验结果证明了所提方法的有效性。

参考文献

- [1] 李海, 李怡静, 吴仁彪. 载机偏航下基于广义相邻多波束自适应处理的低空风切变风速估计[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(7): 1728–1734. doi: [10.11999/JEIT180758](https://doi.org/10.11999/JEIT180758).
LI Hai, LI Yijing, and WU Renbiao. Generalized adjacent multi-beam adaptive processing based low-altitude wind-shear wind speed estimation under aircraft yawing[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(7): 1728–1734. doi: [10.11999/JEIT180758](https://doi.org/10.11999/JEIT180758).
- [2] WILSON J W and WAKIMOTO R M. The discovery of the downburst: T. T. Fujita's contribution[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2001, 82(1): 49–62. doi: [10.1175/1520-0477\(2001\)082<0049:TDOTDT>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2001)082<0049:TDOTDT>2.3.CO;2).
- [3] RTCA/DO-220 Minimum operational performance standards for airborne weather radar with forward-looking wind shear capability[S]. Washington DC: RTCA Inc, 2016.
- [4] 李海, 王杰. 基于CMCAP的低空风切变风速估计方法[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(3): 529–533. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2019.03.10](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2019.03.10).
LI Hai and WANG Jie. Low-altitude wind-shear wind speed estimation based on CMCAP[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2019, 41(3): 529–533. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2019.03.10](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2019.03.10).
- [5] LOEW E, SALAZAR J, TSAI P, *et al.* Architecture overview and system performance of the airborne phased array radar (APAR) for atmospheric research[R]. Report of National Center for Atmospheric Research, 2013.
- [6] KLEMM R. Principles of Space-Time Adaptive Processing[M]. London: Institution of Electrical Engineers, 2002: 1–32.
- [7] 王永良, 彭应宁. 空时自适应信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000: 26–87.
WANG Yongliang and PENG Yingning. Space Time Adaptive Processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000: 26–87.
- [8] WARD J. Space-time adaptive processing for airborne radar data systems[R]. Lexington, Massachusetts: Lincoln Laboratory of MIT, 1994: 25–45.
- [9] 王齐珍. 非均匀环境下的机载相控阵雷达STAP算法研究[D]. [硕士论文], 南京航空航天大学, 2009.
WANG Qizhen. Study on STAP algorithm of airborne phased array radar in nonhomogeneous environments[D]. [Master dissertation], Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009.
- [10] RABIDEAU D J and STEINHARDT A O. Improved adaptive clutter cancellation through data-adaptive training[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35(3): 879–891. doi: [10.1109/7.784058](https://doi.org/10.1109/7.784058).
- [11] WANG Yongliang, CHEN Jianwen, BAO Zheng, *et al.* Robust space-time adaptive processing for airborne radar in nonhomogeneous clutter environments[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2003, 39(1): 70–81. doi: [10.1109/taes.2003.1188894](https://doi.org/10.1109/taes.2003.1188894).
- [12] ZHANG Bowen, DAI Zhiguang, and XIE Lan. Secondary non-homogeneity detector for STAP[C]. The 3rd IEEE International Conference on Signal and Image Processing, Shenzhen, China, 2018: 382–384.
- [13] 侯静, 胡孟凯, 王子微. 一种改进的知识辅助MIMO雷达空时自适应处理方法[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(4): 795–800. doi: [10.11999/JEIT180557](https://doi.org/10.11999/JEIT180557).
HOU Jing, HU Mengkai, and WANG Ziwei. An improved knowledge-aided space-time adaptive signal processing algorithm for MIMO radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(4): 795–800. doi: [10.11999/JEIT180557](https://doi.org/10.11999/JEIT180557).
- [14] LI Hai, WANG Jie, FAN Yi, *et al.* High-fidelity inhomogeneous ground clutter simulation of airborne phased array PD radar aided by digital elevation model and digital land classification data[J]. *Sensors*, 2018, 18(9): 2925. doi: [10.3390/s18092925](https://doi.org/10.3390/s18092925).
- [15] BRINGI V N and CHANDRASEKAR V. Polarimetric Doppler Weather Radar: Principles and Applications[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005: 1–100.
- [16] CAPRARO C T, CAPRARO G T, BRADARIC I, *et al.* Implementing digital terrain data in knowledge-aided space-time adaptive processing[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(3): 1080–1099. doi: [10.1109/taes.2006.248199](https://doi.org/10.1109/taes.2006.248199).

李海: 男, 1976年生, 教授, 硕士生导师, 研究方向为机载气象雷达信号处理、分布式目标检测与参数估计、动目标检测与参数估计等。

宋迪: 男, 1996年生, 硕士生, 研究方向为机载气象雷达信号处理。

程伟杰: 男, 1996年生, 硕士生, 研究方向为机载气象雷达信号处理。

王杰: 男, 1992年生, 硕士生, 研究方向为机载气象雷达信号处理。

责任编辑: 余蓉