

# 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

李海\* 李怡静 吴仁彪

(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:** 该文提出一种载机偏航下基于广义相邻多波束(GMB)自适应处理的低空风切变风速估计的方法, 该方法首先利用基于回波数据的杂波距离依赖性补偿方法对杂波进行距离依赖性矫正, 估计出杂波协方差矩阵。然后同时组合空域的相邻多个波束与时域的相邻多个多普勒通道来计算降维变换矩阵, 并对待测距离单元内的雷达回波数据进行降维处理, 进而构造GMB自适应处理器的最优自适应权矢量对降维后的回波数据实现自适应滤波。最后完成载机偏航下风场速度的准确估计。仿真结果验证了该方法能够在载机偏航情况下, 获得风场速度的有效估计。

**关键词:** 机载气象雷达; 载机偏航; 低空风切变; 广义相邻多波束; 风速估计

中图分类号: TN959.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)07-1728-07

DOI: 10.11999/JEIT180758

## Generalized Adjacent Multi-beam Adaptive Processing Based Low-altitude Wind-shear Wind Speed Estimation under Aircraft Yawing

LI Hai LI Yijing WU Renbiao

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

**Abstract:** This paper presents a method of low-altitude wind-shear speed estimation based on Generalized adjacent Multi-Beam (GMB) adaptive processing under aircraft yawing. The clutter range-dependence compensation method based on echo data is first used to correct the range dependence of clutter for estimating the clutter covariance matrix. Then the dimension-reduced transform matrix is calculated by combining adjacent multiple beams in the airspace and adjacent multiple Doppler channels in time domain simultaneously, and the radar echo data of the measured range bin is reduced in dimension, and then the optimal weight vector of the GMB adaptive processor is constructed to filter adaptively the dimension-reduced data. Finally, the accurate estimation of the wind speed under the aircraft yawing is got. The simulation results show that the proposed method can obtain an effective estimation of wind speed under aircraft yawing.

**Key words:** Airborne weather radar; Aircraft yawing; Low-altitude wind-shear; Generalized adjacent Multi-Beam (GMB); Wind speed estimation

### 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, 它的特点是危害极大、破坏力强、持续时间短、变化多端等<sup>[1]</sup>。低空风切变多发生在飞机的起

飞和进近阶段, 由于飞行高度比较低, 当飞行员无法及时调整姿态时, 很有可能导致空难事故的发生<sup>[2]</sup>, 这对民航飞行安全威胁尤为巨大<sup>[3]</sup>。当机载气象雷达检测低空风切变时, 由于处于下视工作模式而面临着大量杂波, 致使风切变信号淹没在地杂波环境中, 当地杂波抑制效果不好时, 会使后续风速估计变得困难。在实际的复杂飞行环境下, 若飞机受到空气中强气流、机动飞行(如转弯)影响时, 会导致飞机偏航。载机偏航会导致杂波谱将在时域展宽<sup>[4]</sup>, 杂波自由度增加, 增加杂波抑制难度, 使得后续风速估计变得更加困难, 因此研究载机偏航下的低空风切变风速估计具有重要意义。

当前低空风切变风速估计方法主要有利用模式分析的扩展Prony方法<sup>[5]</sup>、基于压缩感知的低空风

收稿日期: 2018-08-03; 改回日期: 2019-01-11; 网络出版: 2019-02-14

\*通信作者: 李海 elisha1976@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61571442, 61471365, U1633106), 中国民航大学蓝天青年学者培养经费, 中央高校基本科研业务费项目(3122017007)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61571442, 61471365, U1633106), The Foundation for Sky Young Scholars of Civil Aviation University of China, The National University's Basic Research Foundation of China (3122017007)

切变风速估计方法<sup>[6]</sup>、基于空时自适应处理(Space-Time Adaptive Processing, STAP)的低空风切变风速估计方法<sup>[7]</sup>、基于M-CAP的低空风切变风速估计方法<sup>[8,9]</sup>。利用模式分析的扩展Prony方法通过建立地杂波与低空风切变信号的双谱模型,能够有效地在地杂波背景中检测低空风切变,且计算量小;压缩感知方法在脉冲数较少且信噪比较低时能够实现风速的精确估计;STAP方法将相控阵天线引入机载气象雷达中,能够自适应抑制地杂波并且精确估计风场速度;基于M-CAP方法采用了降维结构,不仅降低了运算量,且能够获得风速的有效估计。但是上述方法并没有考虑载机偏航这一误差,在载机偏航情况下的低空风切变检测研究还未有文献报道。

基于此,本文提出了一种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方法。该方法首先使用波束形成器,同时形成多个空域波束;其次在空域主波束和相邻波束后面级联多普勒滤波器;最后根据线性约束最小方差准则构造广义相邻多波束(Generalized adjacent Multi-Beam, GMB)自适应处理器来实现地杂波的抑制和风场速度的准确估计。仿真结果表明,该方法能够在载机偏航的情况下获得准确的低空风切变风速估计结果。

## 2 回波信号模型描述

机载前视阵模型如图1所示,其中参考坐标系的原点设在载机的正下方,在载机航向垂直的方向均匀放置 $N$ 个阵元,阵元间距 $d=0.5\lambda$ ,其中 $\lambda$ 为雷达工作波长。设飞机的速度为 $V$ ,其飞行高度为 $H$ 。载机偏航时,飞机会以原来速度向前飞行,但机头方向会偏离原来航向,与 $X$ 轴夹角为 $\theta_p$ , $\theta_p$ 为载机偏航角。设雷达系统脉冲重复频率(Pulse Repetition Frequency, PRF)为 $f_r$ ,一个相干处理时间(Coherent Processing Interval, CPI)内有 $K$ 个脉冲。 $\theta_{l,m}$ 为地面杂波散射单元的水平方位角, $\varphi_{l,m}$ 为其俯仰角。 $\theta_0$ 为风场信号的水平方位角, $\varphi_l$ 为其俯仰角。第 $l$ 个待测距离单元内的回波数据用 $\mathbf{X}_l$ 来

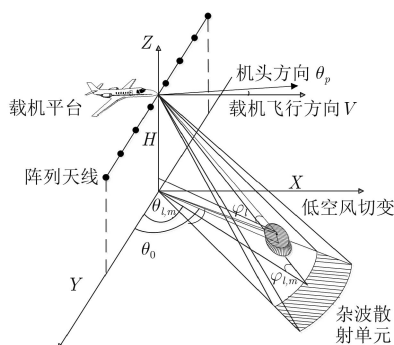


图1 机载前视阵模型图

表示,其回波信号模型为

$$\mathbf{X}_l = \mathbf{S}_l + \mathbf{C}_l + \mathbf{N}_l \quad (1)$$

其中, $\mathbf{S}_l$ 为第 $l$ 个待测距离单元内的低空风切变回波信号数据, $\mathbf{C}_l$ 为第 $l$ 个待测距离单元内的地杂波回波数据,在这里假设杂波无起伏无模糊<sup>[10]</sup>, $\mathbf{N}_l$ 为服从高斯分布的加性白噪声。

第 $l$ 个待测距离单元内的低空风切变回波信号数据 $\mathbf{S}_l$ 可表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_l &= \Gamma \cdot \mathbf{H}_l(f_d, \psi_0)_{NK \times 1} \\ &= \Gamma \cdot \mathbf{H}_t(f_d)_{K \times 1} \otimes \mathbf{H}_s(\psi_0)_{N \times 1} \end{aligned} \quad (2)$$

其中

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_t(f_d)_{K \times 1} \\ = [1 \ e^{j\pi f_d} \ \dots \ e^{j\pi(K-1)f_d}]_{K \times 1}^T \odot \mathbf{g}(\sigma_f) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_s(\psi_0)_{N \times 1} = [1 \ e^{j2\pi d \cos \psi_0 / \lambda} \ \dots \\ e^{j(N-1)2\pi d \cos \psi_0 / \lambda}]_{N \times 1}^T \odot \mathbf{g}(\sigma_{\psi_0}) \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $\otimes$ 为Kronecker积, $\odot$ 为Hadamard积。 $\Gamma$ 为第 $l$ 个待测距离单元的风场回波复幅度, $\psi_0$ 为风场信号空间锥角,且 $\cos \psi_0 = \cos(\theta_0 + \theta_p) \cos \varphi_l$ , $f_d$ 为该距离单元内风切变信号的归一化多普勒中心频率。 $\mathbf{H}_l(f_d, \psi_0)_{NK \times 1}$ 为该距离单元内的风切变信号的空时导向矢量, $\mathbf{H}_t(f_d)_{K \times 1}$ 为时域导向矢量, $\mathbf{H}_s(\psi_0)_{N \times 1}$ 为空域导向矢量。 $\mathbf{g}(\sigma_f) = [1 \ e^{-2\pi^2 \cdot 1 \cdot \sigma_f} \ \dots \ e^{-2\pi^2 \cdot (K-1) \cdot \sigma_f}]^T$ 为风场信号的频率扩展函数, $\mathbf{g}(\sigma_{\psi_0}) = [1 \ e^{-1/2(1-2\pi d/\lambda)^2 \sigma_{\psi_0}} \ \dots \ e^{-1/2((N-1) \cdot 2\pi d/\lambda)^2 \sigma_{\psi_0}}]^T$ 为风场信号的角度扩展函数<sup>[11]</sup>。其中 $\sigma_{\psi_0} = \sigma_{\theta_0}^2 \cos^2 \varphi_l \sin^2 \theta_0 + \sigma_{\varphi_l}^2 \sin^2 \varphi_l \cos^2 \theta_0$ , $\sigma_{\theta_0}$ 表示 $\theta_0$ 方向上的角度扩展, $\sigma_{\varphi_l}$ 表示 $\varphi_l$ 方向上的角度扩展<sup>[12]</sup>。

## 3 基于回波数据的杂波距离依赖性矫正

由于机载前视阵气象雷达天线轴向与载机航向垂直,它的杂波回波功率谱在方位-多普勒平面上呈半圆分布,而由于杂波空时分布随着距离的变化而改变,使得杂波分布存在距离依赖性<sup>[13]</sup>,导致杂波谱展宽,这种现象在近程更为严重。近程距离单元杂波严重的距离依赖性,导致了杂波回波的分布特性不满足独立同分布。当载机偏航时,天线轴向偏离原来方向导致天线阵由前视阵变成了斜视阵,使得杂波功率谱在方位-多普勒平面上呈半椭圆分布,这同样使得杂波具有距离依赖性,且不能准确地估计待测距离单元的杂波协方差矩阵,从而使得杂波抑制性能严重下降,所以需要在地杂波进行距离依赖性矫正。本文采用基于回波数据的杂波距离依赖性矫正方法,该方法能够直接从雷达接收的数

据出发,对近端和远端的回波数据进行杂波距离依赖性矫正。

设近程距离单元的回波数据用  $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_M$  表示,即5倍载机高度以内斜距所对应的距离门的回波数据。除此之外的远程距离单元回波数据用  $\mathbf{X}_{M+1}, \mathbf{X}_{M+2}, \dots, \mathbf{X}_L$  表示。则近程和远程距离单元回波数据的协方差矩阵分别为

$$\mathbf{R}_1 = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \mathbf{X}_i \mathbf{X}_i^H \quad (5)$$

$$\mathbf{R}_2 = \frac{1}{L-M} \sum_{i=M+1}^L \mathbf{X}_i \mathbf{X}_i^H \quad (6)$$

为进行杂波距离依赖性矫正,需要求出满足式(7)的补偿矩阵  $\mathbf{T}_R$ <sup>[14]</sup>

$$\mathbf{T}_R \mathbf{R}_1 \mathbf{T}_R^H = \mathbf{R}_2 \quad (7)$$

由于矩阵  $\mathbf{R}_1$  和  $\mathbf{R}_2$  均为对称矩阵,所以在这里需要对矩阵  $\mathbf{R}_1$  和  $\mathbf{R}_2$  进行特征值分解来求解式(7)中的  $\mathbf{T}_R$ 。对  $\mathbf{R}_1$  和  $\mathbf{R}_2$  进行特征分解得到

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{R}_1 &= \mathbf{u}_1 \mathbf{\Lambda}_1^{1/2} \mathbf{\Lambda}_1^{1/2} \mathbf{u}_1^H \\ \mathbf{R}_2 &= \mathbf{u}_2 \mathbf{\Lambda}_2^{1/2} \mathbf{\Lambda}_2^{1/2} \mathbf{u}_2^H \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

其中,  $\mathbf{u}_1, \mathbf{\Lambda}_1$  与  $\mathbf{u}_2, \mathbf{\Lambda}_2$  分别是  $\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2$  特征分解后所得特征向量矩阵和对角矩阵。由于  $\mathbf{R}_1$  和  $\mathbf{R}_2$  均为对称矩阵,所以  $\mathbf{u}_1$  与  $\mathbf{u}_2$  为正交矩阵,  $\mathbf{\Lambda}_1$  与  $\mathbf{\Lambda}_2$  为实对角矩阵,那么  $\mathbf{\Lambda}_1^{1/2} = (\mathbf{\Lambda}_1^{1/2})^H, \mathbf{\Lambda}_2^{1/2} = (\mathbf{\Lambda}_2^{1/2})^H$ 。将式(8)代入式(7)可得

$$\left( \mathbf{T}_R \mathbf{u}_1 \mathbf{\Lambda}_1^{1/2} \right) \left( \mathbf{T}_R \mathbf{u}_1 \mathbf{\Lambda}_1^{1/2} \right)^H = \left( \mathbf{u}_2 \mathbf{\Lambda}_2^{1/2} \right) \left( \mathbf{u}_2 \mathbf{\Lambda}_2^{1/2} \right)^H \quad (9)$$

由式(9)可以得到  $\mathbf{T}_R \mathbf{u}_1 \mathbf{\Lambda}_1^{1/2} = \mathbf{u}_2 \mathbf{\Lambda}_2^{1/2}$ ,则可以求得补偿矩阵  $\mathbf{T}_R$  为

$$\mathbf{T}_R \mathbf{u}_1 \mathbf{\Lambda}_1^{1/2} = \mathbf{u}_2 \mathbf{\Lambda}_2^{1/2} \quad (10)$$

则经过距离依赖性矫正处理后的回波数据为

$$\mathbf{Y}_i = \begin{cases} \mathbf{T}_R \mathbf{X}_i, & i=1, 2, \dots, M \\ \mathbf{X}_i, & i=M+1, M+2, \dots, L \end{cases} \quad (11)$$

估计第  $l$  个待测距离单元的杂波协方差矩阵为

$$\mathbf{R}_l = \frac{1}{L} \sum_{i=1, i \neq l}^L \mathbf{Y}_i \mathbf{Y}_i^H \quad (12)$$

#### 4 基于广义相邻多波束自适应处理的风速估计

基于广义相邻多波束自适应处理的低空风切变风速估计方法由于采用相邻多个多普勒通道,增加了时域自由度,所以当对待测距离单元的回波数据

进行杂波滤波时能够更好地补偿载机偏航带来的时域误差。该方法首先使用波束形成器,同时形成5个空域波束。其次在空域主波束和相邻波束之后再级联多普勒滤波器(DF),同时组合空域的相邻多个波束和时域的相邻多个多普勒通道求解降维变换矩阵。然后根据线性约束最小方差准则求出GMB自适应处理器的最优权矢量,进行杂波抑制。最后搜索使得该处理器输出信号功率最大的多普勒中心频率,进而得到待测距离单元的风速估计值。该方法结构图如图2所示。该方法的关键就是求解降维变换矩阵和低空风切变风速估计,下面分别进行论述。

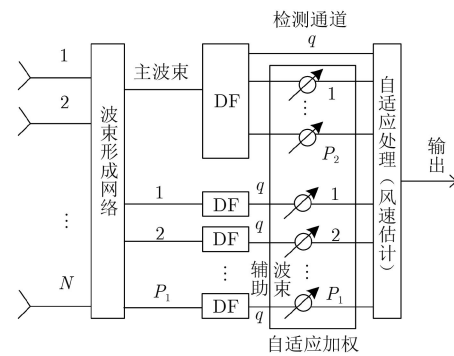


图2 广义相邻多波束自适应处理器结构图

#### 4.1 求解降维变换矩阵

该方法原理图如图3所示,在空域相邻波束中选取中间波束为空域主波束,且其对应低空风切变信号锥角  $\psi_0$  方向,其余的为空域辅助波束。并在空域主波束和辅助波束之后级联多普勒滤波器,设DF中第  $q$  ( $q=1, 2, \dots, K$ ) 个多普勒通道内的风场信号的归一化多普勒频率为  $f_q$  ( $f_q \in [-1, 1]$ )。该方法同时组合空域的相邻多个波束与时域的相邻多个多普勒通道来计算降维变换矩阵,该降维变换矩阵分两部分求解。首先在空域主波束后级联的DF中,选取第  $q$  个多普勒通道为多普勒检测通道,第  $(q-1)$

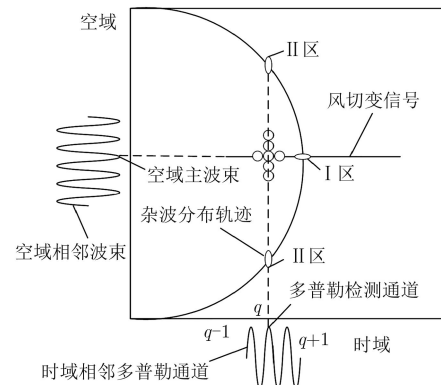


图3 广义相邻多波束自适应处理方法原理图

和 $(q+1)$ 个多普勒通道为辅助通道来进行多普勒滤波，这一过程可表示为

$$\mathbf{T}_{11} = \begin{bmatrix} [\boldsymbol{\beta}_s(\psi_0) \otimes \boldsymbol{\beta}_t(f_{q-1})]^T \\ [\boldsymbol{\beta}_s(\psi_0) \otimes \boldsymbol{\beta}_t(f_q)]^T \\ [\boldsymbol{\beta}_s(\psi_0) \otimes \boldsymbol{\beta}_t(f_{q+1})]^T \end{bmatrix}_{NK \times 3}^T \quad (13)$$

其次在空域辅助波束后级联的DF中，选取第 $q$ 个多普勒通道为多普勒检测通道来进行多普勒滤波，而这一过程可表示为

$$\mathbf{T}_{12} = \begin{bmatrix} [\boldsymbol{\beta}_s(\psi_1) \otimes \boldsymbol{\beta}_t(f_q)]^T \\ [\boldsymbol{\beta}_s(\psi_2) \otimes \boldsymbol{\beta}_t(f_q)]^T \\ [\boldsymbol{\beta}_s(\psi_4) \otimes \boldsymbol{\beta}_t(f_q)]^T \\ [\boldsymbol{\beta}_s(\psi_5) \otimes \boldsymbol{\beta}_t(f_q)]^T \end{bmatrix}_{NK \times 4}^T \quad (14)$$

以上整个过程可以等效为降维变换矩阵 $\mathbf{T}_l = [\mathbf{T}_{11}, \mathbf{T}_{12}]_{NK \times 7}$ 。其中

$$\boldsymbol{\beta}_s(\psi_p) = \mathbf{B}_s \odot \mathbf{H}_s(\psi_p) = \begin{bmatrix} b_{s1} & b_{s2} e^{j\pi \cos(\psi_p)} & \dots \\ b_{sN} e^{j\pi(N-1) \cos(\psi_p)} \end{bmatrix}^T \odot \mathbf{g}(\sigma_{\psi_p}) \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\beta}_t(f_q) &= \mathbf{B}_t \odot \mathbf{H}_t(f_q) \\ &= [b_{t1} b_{t2} e^{j\pi f_q} \dots b_{tK} e^{j\pi(K-1)f_q}]^T \odot \mathbf{g}(\sigma_f) \end{aligned} \quad (16)$$

其中， $\boldsymbol{\beta}_s(\psi_p)$  ( $p=0, 1, 2, 4, 5$ ) 分别表示空域范围内的5个空域波束的加权空间导向矢量， $\boldsymbol{\beta}_t(f_q)$  表示归一化多普勒频域内第 $q$ 个多普勒通道的加权时间导向矢量。对导向矢量进行切比雪夫加权，这样可以有效削减空时2维旁瓣杂波分量，使得杂波仅限于空域主波束和多普勒检测通道两条通道内。 $\mathbf{B}_s = [b_{s1} b_{s2} \dots b_{sN}]^T$  和  $\mathbf{B}_t = [b_{t1} b_{t2} \dots b_{tK}]^T$  分别为空域和时域的切比雪夫加权矢量。

## 4.2 低空风切变风速估计

根据线性约束最小方差准则对第 $l$ 个待测距离单元内第 $q$ 个多普勒通道的最优权矢量 $\mathbf{W}_{lq}$ 进行求解，可描述为以下数学优化问题

$$\left. \begin{aligned} \min \quad & \mathbf{W}_{lq}^H \hat{\mathbf{R}}_l \mathbf{W}_{lq} \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{W}_{lq}^H \boldsymbol{\beta}_{lq} = 1 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

其中， $\hat{\mathbf{R}}_l = \mathbf{T}_l^H \mathbf{R}_l \mathbf{T}_l$  为第 $l$ 个待测距离单元内降维变换后的杂波协方差矩阵， $\boldsymbol{\beta}_{lq}$  为第 $l$ 个待测距离单元内降维变换后的低空风切变的空时导向矢量， $\boldsymbol{\beta}_{lq}$  为

$$\boldsymbol{\beta}_{lq} = \mathbf{T}_l^H \boldsymbol{\beta}_l(f_q, \psi_0) = \mathbf{T}_l^H \boldsymbol{\beta}_t(f_q) \otimes \boldsymbol{\beta}_s(\psi_0) \quad (18)$$

其中

$$\boldsymbol{\beta}_t(f_q) = [b_{t1} b_{t2} e^{j\pi f_q} \dots b_{tK} e^{j\pi(K-1)f_q}]^T \odot \mathbf{g}(\sigma_f) \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\beta}_s(\psi_0) &= [b_{s1} b_{s2} e^{j\pi \cos(\psi_0)} \dots \\ & b_{sN} e^{j\pi(N-1) \cos(\psi_0)}]^T \odot \mathbf{g}(\sigma_{\psi_0}) \end{aligned} \quad (20)$$

其中， $f_q$  为上文中假定的归一化多普勒频率，且取值范围为 $[-1, 1]$ 。 $\psi_0$  为风场信号空间锥角。 $\boldsymbol{\beta}_l(f_q, \psi_0)$  为构造的第 $l$ 个待测距离单元内风场信号的空时导向矢量。则第 $l$ 个待测距离单元内第 $q$ 个多普勒通道的最优权矢量 $\mathbf{W}_{lq}$  为

$$\mathbf{W}_{lq} = \mu \hat{\mathbf{R}}_l^{-1} \boldsymbol{\beta}_{lq} = \frac{\hat{\mathbf{R}}_l^{-1} \boldsymbol{\beta}_{lq}}{\boldsymbol{\beta}_{lq}^H \hat{\mathbf{R}}_l^{-1} \boldsymbol{\beta}_{lq}} \quad (21)$$

该方法同时组合了空域的相邻多个波束和时域的相邻多个多普勒通道来共同实现2维杂波的对消。并且本文对导向矢量进行切比雪夫加权，削减了2维旁瓣杂波分量，使得剩余杂波集中在主瓣杂波区(I区)和多普勒通带杂波区(II区)。I区的杂波可通过时域的多个相邻多普勒通道有效对消。II区的杂波可通过空域的相邻波束实现相消处理。则求得的最优权矢量 $\mathbf{W}_{lq}$  能够自适应抑制第 $l$ 个待测距离单元内第 $q$ 个多普勒通道内的杂波，并能补偿因载机偏航所带来的时域误差，同时还能积累主瓣方向上的风切变信号。此时第 $l$ 个待测距离单元内风切变信号的多普勒频率可用式(22)作为代价函数来进行估计

$$\hat{f}_l = \arg \max_{f_q} \mathbf{W}_{lq}^H \mathbf{X}_{lT} \quad (22)$$

当代价函数达到最大时，所对应的即为参数估计结果。其中， $\mathbf{X}_{lT}$  为第 $l$ 个待测距离单元内经过降维处理后的回波数据，且 $\mathbf{X}_{lT} = \mathbf{T}_l^H \mathbf{X}_l$ 。求出该待测距离单元内低空风切变风速的估计值 $\hat{v}_l$ ，则 $\hat{v}_l$  表达式为

$$\hat{v}_l = \frac{\lambda \hat{f}_l f_r}{4} \quad (23)$$

## 5 方法流程

基于GMB自适应处理的低空风切变风速估计方法的关键步骤为

步骤1 利用先验信息对回波数据进行载机速度补偿，补偿载机平台运动所造成的多普勒频偏，即 $\mathbf{x}_l = \mathbf{X}_l e^{-j\Omega}$ ，其中 $\mathbf{X}_l$  表示第 $l$ 个待测距离单元的雷达回波数据， $\Omega = 4\pi V \cos \theta_0 \cos \varphi_l / (\lambda f_r)$ ， $\mathbf{x}_l$  表示第 $l$ 个待测距离单元内经过速度补偿后的雷达回波数据；

步骤2 采用基于回波数据的杂波距离依赖性矫正方法对全谱域回波数据进行距离依赖性矫正，然后估计待测距离单元的杂波协方差矩阵；

步骤3 求解降维变换矩阵 $\mathbf{T}_l$ ，对待测距离单

元的雷达回波数据进行降维处理;

步骤4 根据线性约束最小方差准则求解待测距离单元内GMB自适应处理器的最优权矢量;

步骤5 对待测距离单元内的回波数据进行自适应滤波并匹配风切变信号;

步骤6 求出使得GMB自适应处理器信号输出功率最大的多普勒检测通道的多普勒频率,从而来估计待测距离单元的风场速度。

## 6 仿真结果及分析

在本文中,设低空风切变风场位于飞机正前方8.5~16.5 km处,载机速度87.5 m/s,高度600 m,天线阵为阵元数8相干处理脉冲数64的均匀线阵,主瓣方向对准90°,雷达工作波长0.05 m,脉冲重复频率7 kHz,最小可分辨距离150 m,信噪比

5 dB,杂噪比40 dB。

正常情况下,机载气象雷达回波信号空时2维谱如图4(a)所示,从图4(a)中可以看出前视阵雷达地杂波的空时2维谱在角度多普勒域呈半圆形,风切变是分布式目标,它的风速及风向都在不断变化,所以它的回波功率在多普勒域和角度域存在一定展宽,功率谱呈现为一条窄带。从图4中还可以看出地杂波的功率远大于低空风切变回波信号的功率,这使得风切变的回波多普勒信息完全被地杂波淹没,这给低空风切变的探测和参数估计带来困难。图4中(b)为载机偏航时的雷达回波信号的空时2维谱,其中偏航角为6°,可以看出载机偏航导致地杂波的空时2维谱在角度多普勒域不再是半圆形,而是变成了半椭圆形。

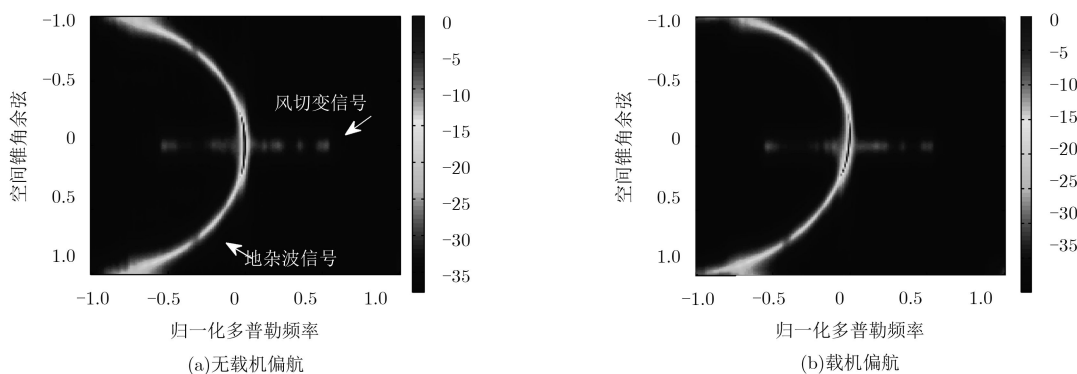


图4 雷达回波信号的空时2维谱

图5为载机在不同偏航情况下利用本文方法对第78号待测距离单元进行GMB自适应处理时的滤波器频响图,可以看出GMB自适应处理器在零频杂波带上形成了凹口。由于随着偏航角度的增加,主杂波频率会发生偏移,而该方法所形成的凹口也会偏移零频,这样可以有效地滤除地杂波。并且还可以看出在归一化多普勒频率为-0.21处形成了有效的信号增益来匹配风切变信号。

图6为在载机偏航误差分别为2°, 4°, 6°情况下利用本文方法得到的风速估计结果对比图。可以看

出,在距离飞机8.5~16.5 km范围内,低空风切变的速度随距离变化呈现反"S"分布,这是低空风切变风场的最显著特征。并从图6中可以看出随着载机偏航角度的增大,该方法依然能够获得准确的风速估计结果,具有一定的鲁棒性。载机偏航导致杂波时域自由度增加,而本文方法由于采用了相邻多个多普勒通道,增加了时域自由度,能够更好地抑制杂波。所以经过实验仿真验证可以得到本文方法在载机偏航情况下能够很好地实现地杂波的抑制以及风速的准确估计。

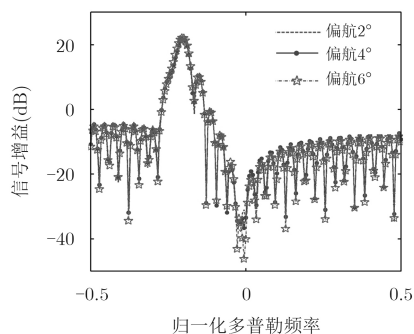


图5 第78号距离单元滤波器频响图

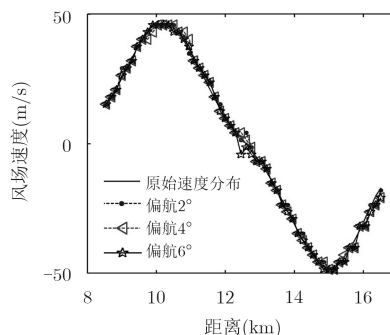


图6 本文方法在不同偏航误差下的风速估计结果对比图

图7(a), 7(b), 7(c)分别是在载机偏航误差为 $2^\circ$ ,  $4^\circ$ ,  $6^\circ$ 情况下, 本文方法同基于空时自适应处理的低空风切变风速估计方法、基于多通道联合自适应处理的低空风切变风速估计方法以及脉冲对处理的低空风切变风速估计方法风速估计结果对比图。由图7可以看出在载机偏航情况下, 由于本文方法能够对空域主波束输出的多个相邻多普勒通道和时域主通道的多个相邻波束进行自适应处理, 增加了时域自由度, 从而能够更好地补偿载机偏航所带来的时域误差, 有更好的地杂波抑制效果。而其它3种方法并没有考虑载机偏航这一误差。因此本文方法

的风速估计效果要优于其它3种方法, 而且随着载机偏航角度的增大, 本文方法优势更加明显。

图8(a), 8(b), 8(c)分别是在载机偏航误差为 $2^\circ$ ,  $4^\circ$ ,  $6^\circ$ 情况下, 当多普勒通道数为3空域波束数为5, 6, 7时的风速估计结果对比图。通过图8的仿真实验结果对比图可以看出在某一偏航误差情况下, 当多普勒通道数不变而增加空域波束数量时, 风速估计结果基本不变。

图9中的(a), (b), (c)分别是在载机偏航误差为 $2^\circ$ ,  $4^\circ$ ,  $6^\circ$ 情况下, 空域波束数为5多普勒通道数为3, 4, 5的风速估计结果对比图。通过图9的仿真实

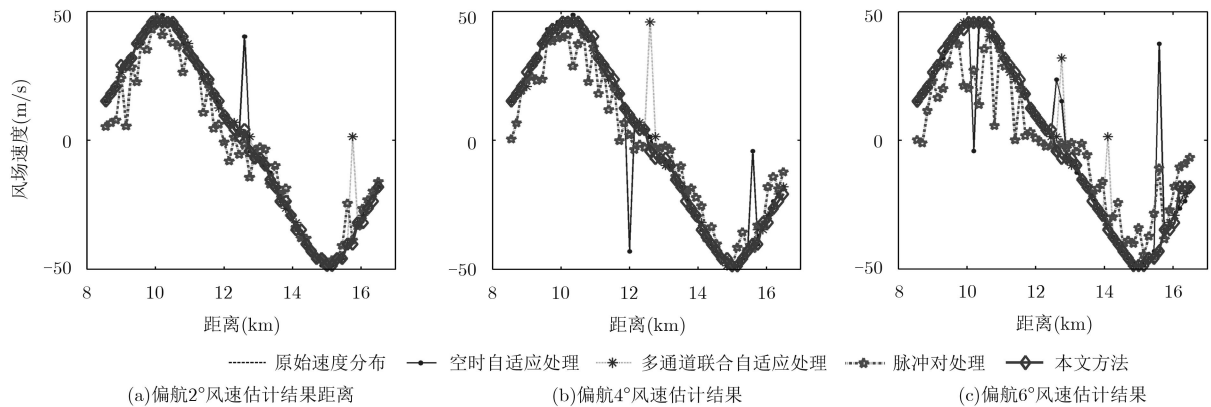


图7 本文方法同其他方法的风速估计结果对比图

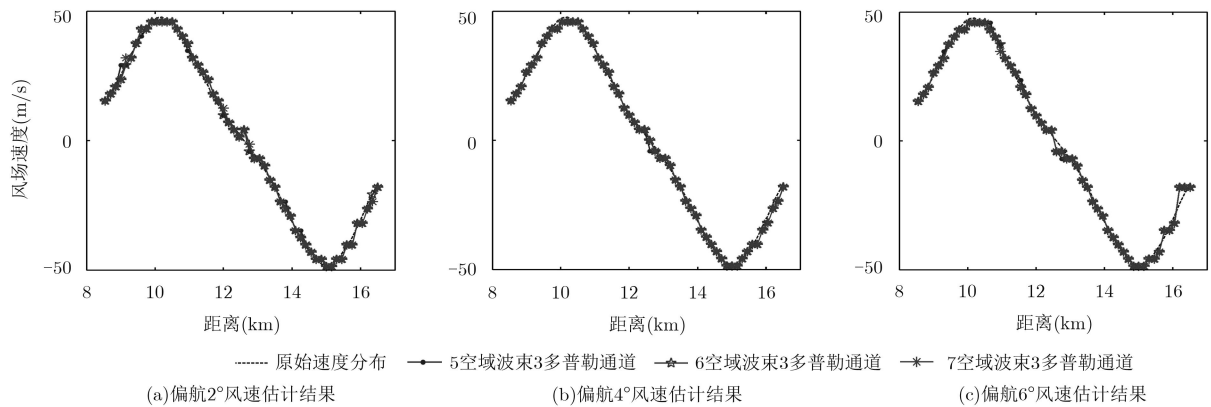


图8 本文方法在不同空域波束数情况下的风速估计结果对比图(多普勒通道数为3)

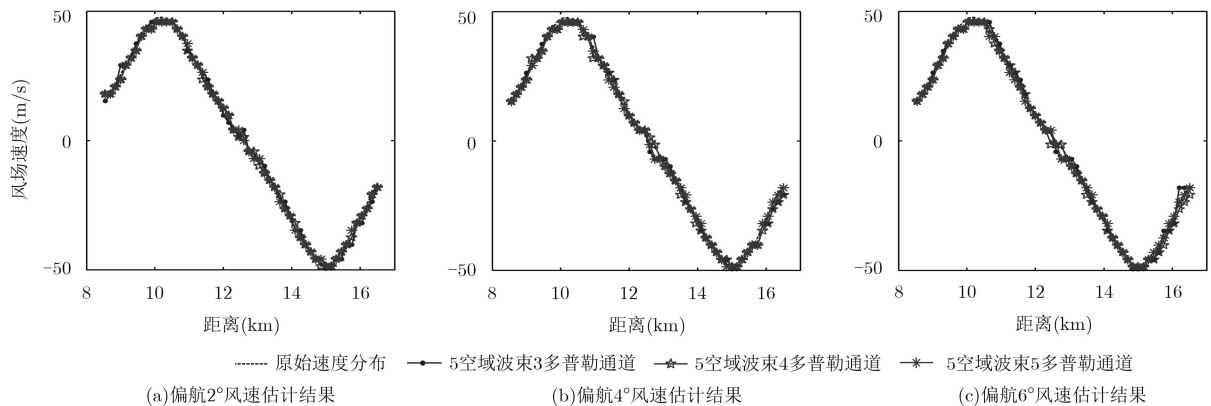


图9 本文方法在不同多普勒通道数情况下的风速估计结果对比图(空域波束数为5)

验结果对比图可以看出在某一偏航误差情况下, 当空域波束数不变而增加多普勒通道数时, 滤波处理效果和风速估计结果基本不变。

## 7 结论

针对载机偏航导致低空风切变检测不准确这一问题, 本文提出了一种基于广义相邻多波束自适应处理的低空风切变风速估计的方法。该方法首先利用波束形成器形成多个波束, 并在主波束和相邻波束后面级联多普勒滤波器。然后构造降维变换矩阵对雷达回波数据进行降维处理。最后构造GMB自适应处理器的最优权矢量对每个多普勒通道进行自适应滤波, 进而完成低空风切变的风速估计。仿真结果表明, 基于GMB自适应处理的低空风切变风速估计方法在载机偏航情况下能够获得风速的准确估计。

## 参考文献

- [1] DESHPANDE M D and STATON L. Determination of windspeed within a weather storm using airborne Doppler radar[C]. IEEE Proceedings of the Southeastcon'91, Williamsburg, USA, 1991: 508–519. doi: [10.1109/SECON.1991.147807](https://doi.org/10.1109/SECON.1991.147807).
- [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] 韩雁飞, 刘夏, 李海, 等. 基于微物理特性的三维低空风切变雷达回波仿真[J]. *系统工程与电子技术*, 2016, 38(2): 298–304. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2016.02.10](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2016.02.10).  
HAN Yanfei, LIU Xia, LI Hai, et al. Microphysics-based radar signal simulation for the three dimensional low altitude wind shear[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2016, 38(2): 298–304. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2016.02.10](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2016.02.10).
- [4] 韩伟, 张道尚, 李智. 载机偏航对雷达目标检测性能的影响分析[J]. *雷达科学与技术*, 2015, 13(2): 167–172. doi: [10.3969/j.issn.1672-2337.2015.02.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-2337.2015.02.012).  
HAN Wei, ZHANG Daoshang, and LI Zhi. Influence of aircraft crabbing on target detection performance of AEW radar[J]. *Radar Science and Technology*, 2015, 13(2): 167–172. doi: [10.3969/j.issn.1672-2337.2015.02.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-2337.2015.02.012).
- [5] 白健, 李勇, 高霞, 等. 基于Prony模型的低空风切变快速检测算法[J]. *计算机测量与控制*, 2009, 17(10): 1889–1891. doi: [10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2009.10.001](https://doi.org/10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2009.10.001).  
BAI Jian, LI Yong, GAO Xia, et al. Low-level wind shear detection algorithm based on Prony model[J]. *Computer Measurement & Control*, 2009, 17(10): 1889–1891. doi: [10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2009.10.001](https://doi.org/10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2009.10.001).
- [6] LI Hai, ZHOU Meng, GUO Qinghua, et al. Compressive sensing-based wind speed estimation for low-altitude wind-shear with airborne phased array radar[J]. *Multidimensional Systems and Signal Processing*, 2018, 29(2): 719–732. doi: [10.1007/s11045-016-0448-6](https://doi.org/10.1007/s11045-016-0448-6).
- [7] 吴仁彪, 张彪, 李海, 等. 基于空时自适应处理的低空风切变风速估计方法[J]. *电子与信息学报*, 2015, 37(3): 631–636. doi: [10.11999/JEIT140697](https://doi.org/10.11999/JEIT140697).
- [8] LI Hai, ZHOU Meng, WU Renbiao, et al. Wind speed estimation for low-altitude wind-shear based on multiple Doppler channels joint adaptive processing[C]. Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Shanghai, China, 2016: 3116–3120. doi: [10.1109/ICASSP.2016.7472251](https://doi.org/10.1109/ICASSP.2016.7472251).
- [9] 李海, 周盟, 陈筱浅, 等. 基于多通道联合自适应处理的微下击暴流中心风速估计方法[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(7): 1619–1625. doi: [10.11999/JEIT161094](https://doi.org/10.11999/JEIT161094).  
LI Hai, ZHOU Meng, CHEN Xiaoqian, et al. Multiple doppler channels joint adaptive processing based central wind speed estimation for microburst[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(7): 1619–1625. doi: [10.11999/JEIT161094](https://doi.org/10.11999/JEIT161094).
- [10] KLEMM R. Principle of Space-time Adaptive Processing[M]. 3rd ed. London, UK: IET Publishers, 2006: 1–133.
- [11] BOYER E, LARZABAL P, ADNET C, et al. Parametric spectral moments estimation for wind profiling radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(8): 1859–1868. doi: [10.1109/TGRS.2003.813487](https://doi.org/10.1109/TGRS.2003.813487).
- [12] 姚晖. 分布式信号源参数估计技术研究[D]. [博士论文]. 解放军信息工程大学, 2013: 9–25.  
YAO Hui. Research on parameter estimation method for distributed sources[D]. [Ph.D. dissertation], PLA Information Engineering University, 2013: 9–25.
- [13] 王娟, 王彤, 吴建新. 非正侧阵机载雷达杂波谱迭代自适应配准方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2017, 39(4): 742–747. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2017.04.08](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2017.04.08).  
WANG Juan, WANG Tong, and WU Jianxin. Registration-based compensation using iterative adaptive approach in non-side-looking airborne radar[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2017, 39(4): 742–747. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2017.04.08](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2017.04.08).
- [14] 文珺, 廖桂生, 李明. 一种机载前视雷达杂波距离依赖性补偿方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2010, 32(6): 1187–1190. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2010.06.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2010.06.017).  
WEN Jun, LIAO Guisheng, and LI Ming. Method to compensate clutter range dependence for airborne forward looking radar[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2010, 32(6): 1187–1190. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2010.06.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2010.06.017).

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。

李怡静: 女, 1994年生, 硕士生, 研究方向为机载气象雷达信号处理。

吴仁彪: 男, 1966年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为空管和民航安全智能信息处理、航空运输大数据、卫星导航抗干扰技术、民航无线电干扰监测与自适应抑制、通用航空、雷达信号处理等。