

基于双门限控制的机载气象雷达地杂波抑制方法

韩雁飞 吴仁彪* 李海

(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: 针对机载气象雷达工作于风切变模式时的地杂波抑制问题, 该文提出了一种双门限控制的自适应地杂波抑制方法。该方法在有效估计杂波谱中心和谱宽的基础上, 利用每个距离单元的回波功率信息设计双门限控制的自适应凹口滤波器, 在最大程度上滤除地杂波的同时, 减小杂波残余对风切变信号的影响。仿真结果表明, 该方法具有良好的杂波抑制效果, 并能有效地提高风切变信号风速估计的准确性。

关键词: 机载气象雷达; 地杂波抑制; 双门限控制; 自适应滤波器; 风切变

中图分类号: TN959.4

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2013)01-0097-08

DOI: 10.3724/SP.J.1300.2013.20057

Ground Clutter Suppression with Dual-threshold Controlled Method for Airborne Weather Radar

Han Yan-fei Wu Ren-biao Li Hai

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

Abstract: In this paper, a new method of dual-threshold controlled adaptive clutter suppression is proposed for an airborne weather radar operated in the wind shear mode. To reliably estimate the center frequency and bandwidth of the clutter spectrum, the echo power in each range cell is used to design a dual-threshold controlled adaptive notch filter. This filter can reject the maximum amount of ground clutter, while reducing the effect of clutter residue on the wind shear signal. Results of our simulation have confirmed that this method has a superior clutter suppression performance, and can effectively improve the wind speed estimate accuracy of the wind shear signal.

Key words: Airborne weather radar; Ground clutter suppression; Dual-threshold controlled; Adaptive filter; Wind shear

1 引言

航空运输业是在大气中完成的, 大气的千变万化直接影响到航空运输的安全、正点及效益。低空风切变是人们公认的在航空器起飞和着陆阶段对飞行安全危害最大的天气现象, 微下击暴流就是一种典型的低空风切变现象, 其在径向上具有辐散速度特征, 且正负速度差达到10 m/s或以上, 持续时间不超过10 min^[1], 此时气流犹如发生了剪切运动一样, 如图1所示。当飞机遇上低空风切变时, 往往由于飞行高度太低, 缺乏足够的空间进行机动而发生机毁人亡的严重事故。目前装机的机载气象雷达已经具备前视风切变探测的功能, 但是由于低空风切变具有发生突然、持续时间短、尺度小和不易检

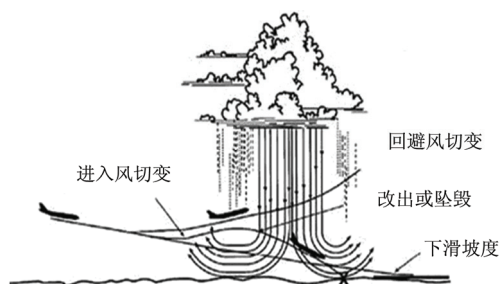


图1 低空风切变对飞机的影响示意图

Fig. 1 The schematic diagram of the effect of low-altitude wind shear on aircraft

测等特点^[2], 要实现有效的低空风切变检测, 仍有很多关键问题需要解决。

机载气象雷达是飞机探测前方灾害天气, 保障飞行安全的重要机载导航设备。当机载气象雷达下视工作时, 天线波束照射区内地面散射体的回波通

2012-08-06 收到, 2012-09-13 改回; 2012-12-10 网络优先出版
国家自然科学基金项目(61071194, 60979002)和中国民航大学基金
项目(2011kyE06)资助课题

*通信作者: 吴仁彪 rbwu@cauc.edu.cn

过天线进入接收机,形成地杂波。由于低空风切变通常发生在起飞和降落阶段,微弱的气象回波常会淹没在很强的地杂波背景之中,给风切变检测带来困难。而且载机平台的运动会使回波信号中的地杂波频谱发生偏移及展宽,更为有效地实现地杂波抑制增添了难度。因此,在严重而复杂的机场动、静地杂波背景下,研究风切变模式下的地杂波抑制技术,对于有效地检测低空风切变信号和改善机载气象雷达系统性能都具有十分重要的现实意义。

地基气象雷达的杂波抑制技术较为成熟,多采用 FIR 或 IIR 滤波器、椭圆滤波器^[3]和回归滤波器^[4]等滤除零多普勒频率附近的杂波成分。Siggia 等人^[5]提出一种基于高斯型自适应处理(Gaussian Model Adaptive Processing, GMAP)的地杂波抑制方法,该方法是一种应用于地基气象雷达的频域滤波方法,在杂波频谱展宽时该方法的抑制效果较差,且存在较大的杂波残余^[6]。对于双线性偏振多普勒地基气象雷达,Svetlana M. Bachmann 等人提出了一系列地杂波抑制的改进算法^[6-8]。由于机载平台的运动会造成回波信号频谱展宽,所以传统的地基气象雷达杂波抑制方法难以直接应用到机载气象雷达的探测工作中。

新一代的机载相控阵火控或预警雷达重点研究的是点目标的检测问题,除了采用动目标显示(Moving Target Indication, MTI)^[9]和动目标检测(Moving Target Detector, MTD)^[10]等方法,多采用空时 2 维自适应信号处理技术^[11]抑制杂波。但是对于单天线的机载气象雷达,其探测的气象目标是分布式的,故传统的机载杂波抑制方法也难以直接应用在机载气象雷达中。手动调整天线俯仰角是最基本的机载气象雷达地杂波抑制方法,该方法虽然简单,但是会削弱气象回波信号强度,同时还会加重飞机操控人员的负担。文献[12]提出在数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)上利用地形可视性判断算法计算地杂波距离单元的方法,在时域直接剔除回波中存在的地杂波,但该方法仅适用于机载气象雷达工作于气象模式时的地杂波抑制。文献[13]和文献[14]分别提出基于复系数格型滤波器和最小均方误差噪声相消器的自适应杂波抑制方法,该类方法的杂波抑制效果受参考信号的影响较大,合适的参考信号不易选取,限制了该类方法的工程应用。

从本质上说,有效地滤除杂波可等效为设计一个合适的杂波抑制滤波器。基于这种思想,本文提出一种基于双门限控制的自适应地杂波抑制方法。该方法利用极坐标质心法估计接收信号的谱中心与

谱宽,并利用每个距离单元的回波功率信息,自适应地调整滤波器的凹口,以达到抑制地杂波的目的。通过仿真实验证实,该方法在有效地滤除地杂波的同时,能够减小杂波残余对有用气象信号的影响,从而提高低空风切变信号风速估计的准确性与可靠性。本文内容安排如下,第 2 节分析了机载气象雷达地杂波的频谱特点,第 3 节给出基于双门限控制的自适应杂波抑制方法以及处理流程,第 4 节对本文的基于双门限控制的自适应杂波抑制方法进行仿真实验验证,第 5 节是结论。

2 机载气象雷达地杂波频谱分析

在起飞和降落阶段,风切变模式下的机载气象雷达下视工作时,接收到的回波信号中不仅包括有用的气象目标回波,还包括杂波信号和各种干扰噪声等。假设回波信号由 3 部分组成:气象目标信号、杂波信号和噪声信号。因此,接收信号 $x(t)$ 可理想化地描述为

$$x(t) = s(t) + c(t) + n(t) \quad (1)$$

式中, $s(t)$ 表示气象目标回波信号, $c(t)$ 表示地杂波信号, $n(t)$ 表示噪声信号。

为了有效地克服地杂波对气象目标信号检测的影响,首先必须了解地杂波信号的幅度特性和频谱特性。

(1) 杂波幅度分布模型

当雷达接收信号用复信号表示时,可以认为地杂波的实部和虚部信号均为独立同分布的高斯随机过程,即地杂波的幅度(复信号的模值)符合瑞利分布^[15]。此时其概率密度函数可表示为

$$f(x) = \frac{x}{b^2} \exp\left[-\frac{x^2}{2b^2}\right], \quad x \geq 0, b > 0 \quad (2)$$

(2) 杂波频谱分布模型

雷达杂波幅度的概率密度分布模型描述了杂波信号在时域的 1 维表示,为了更好地描述杂波的分布特性,选择观察杂波频域的 2 维分布特性,即建立杂波的频谱分布模型。一般认为,地杂波的频谱可采用高斯模型表示,称为高斯谱^[15],其表达式为

$$S(f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_c^2}} \exp\left[-\frac{(f-f_c)^2}{2\sigma_c^2}\right] \quad (3)$$

式中, f_c 为杂波频谱的中心频率,表示地杂波的平均多普勒频率; σ_c 为地杂波频谱的标准差,表示杂波频谱的展宽程度。

3 基于双门限控制的自适应杂波抑制方法

当机载气象雷达工作于风切变模式时,探测的

地面杂波区域面积较大，杂波强度远大于目标信号强度。同时载机平台的运动和天线扫描等因素会导致主杂波中心频率发生多普勒频移和主、副瓣杂波的频谱展宽。由式(3)可知，高斯型杂波谱的频谱特性仅由杂波谱中心频率 f_c 和杂波谱宽 σ_c 所决定。因此，可以将杂波抑制的滤波器设计问题转化为杂波谱中心频率和谱宽的估计问题。

直接对时域数据进行 FFT 处理，相当于用一组矩形窗滤波器进行滤波处理。由于矩形窗旁瓣较高，当杂波功率较大时，会存在因为旁瓣进入的杂波能量较大而淹没有用信号的现象。本文采用窗函数加权的方法对接收到的数据进行预处理，再利用傅里叶变换将其变换到频域。这种加窗预处理可以有效地减小强低频分量对高频分量的污染，即减小地杂波对有用气象信号的影响。通过衡量窗函数的主瓣宽度和旁瓣峰值，本文选择 Hanning 窗加权^[3]。

利用惯导系统和无线电高度表等机载导航设备提供的惯导参数和无线电高度等数据，可获得精确的飞机俯仰、方位和地速等信息。将此作为先验信息可粗略地估计出杂波区域和谱宽，利用地速信息可将杂波频谱中心补偿到零频附近。然后采用“极

坐标质心法”^[16]，在极坐标体系下利用谱线幅值对相应的频率点进行加权，实现更加精确的杂波中心频率和谱宽估计。最后利用每个距离单元的回波功率信息设计双门限控制的自适应凹口滤波器，在滤除强杂波的同时，减少杂波抑制时对目标信号的白化。基于双门限控制的自适应杂波抑制方法的工作原理框图如图 2 所示。

3.1 杂波谱中心与谱宽估计

机载气象雷达下视工作时，波束照射区域的杂波单元如图 3 所示。假设飞机速度为 V ，雷达发射波长为 λ ，天线方位向波束宽度为 θ_B ，杂波单元的方位角为 θ ，俯仰角为 ϕ ，飞机对地高度为 h ，飞机到杂波单元的距离为 R ，飞机速度矢量方向与地面杂波单元波束入射线之间的夹角为 ψ ，并有 $\cos \psi = \cos \phi \cos \theta$ 。

由于载机平台的运动和波束扫描时的方位与俯仰不同，所以每个单元的地杂波特性也不同，具体表现在不同距离单元的杂波谱的中心频率和谱宽不同。主瓣杂波在分辨单元中的多普勒频率为^[9]

$$f_d = \frac{2V}{\lambda} \cos \psi = \frac{2V}{\lambda} \cos \phi \cos \theta \quad (4)$$

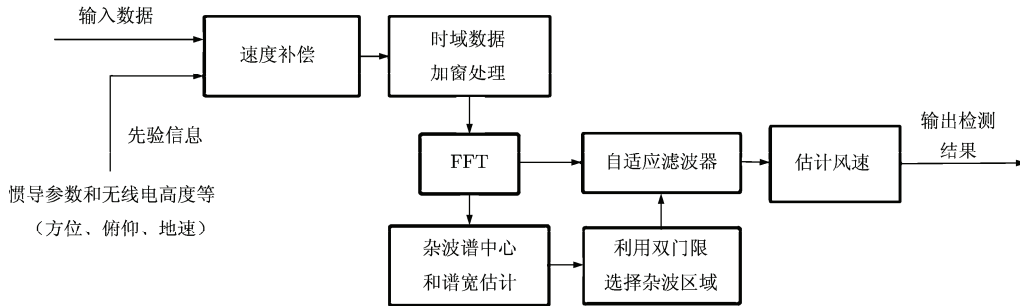


图 2 本文方法的工作原理框图

Fig. 2 The principle structure of the proposed method

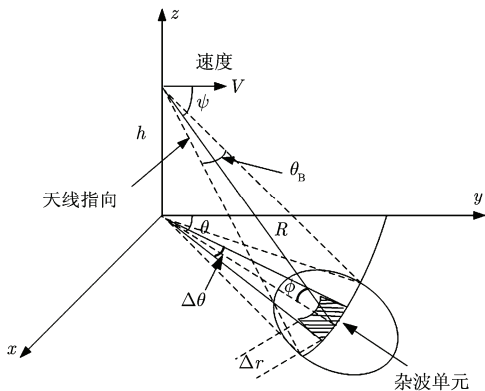


图 3 机载气象雷达的杂波单元示意图

Fig. 3 The clutter geometry of airborne weather radar

假设第 k 个距离单元的第 n 个脉冲回波信号为 $Z_{nk} = I_{nk} + jQ_{nk}$ ，其中 I_{nk} 与 Q_{nk} 分别为回波信号的同相分量与正交分量，则 Z_{nk} 的功率谱 $S(f_i)$ 可通过傅里叶变换得到

$$S(f_i) = \left| \sum_{n=1}^N Z_{nk} \exp\left(-j2\pi \frac{ni}{N}\right) \right|^2 \quad (5)$$

利用极坐标质心法估计的杂波谱中心频率可以表示为^[16]

$$\hat{f}_c = \frac{1}{2\pi T_r} \arg \left(\frac{\sum_{i=1}^M S(f_i) \exp(j2\pi f_i)}{\sum_{i=1}^M S(f_i)} \right) \quad (6)$$

式中, T_r 表示脉冲重复时间, f_i 表示归一化的频率值, M 表示计算的多普勒通道总数。类似的, 谱宽估计结果可以表示为

$$\hat{\sigma}_c^2 = \frac{1}{4\pi^2 T_r} \arg \left(\frac{\sum_{i=1}^M S(f_i) \exp(j4\pi^2 (f_i - \hat{f}_c)^2)}{\sum_{i=1}^M S(f_i)} \right) \quad (7)$$

此时, 杂波谱的均方根带宽 σ_c 与高斯杂波谱的 3 dB 带宽之间的关系为^[17]

$$\Delta f_{3\text{dB}} = 2\sqrt{2 \ln 2} \sigma_c \approx 2.355 \sigma_c \quad (8)$$

3.2 自适应杂波抑制

由于飞机高度低, 杂波的回波功率较强, 微弱的低空风切变信号常会淹没在地杂波中。使用固定凹口滤波器的传统地杂波抑制方法, 难以有效地滤除旁瓣杂波, 存在很大的“杂波残余”^[6], 并且在有用信号与杂波频谱重叠和邻近的区域, 存在杂波滤除过剩, 使有用信号的信息大量损失的现象。基于频域处理的自适应杂波抑制方法^[17]认为高斯型杂波谱的杂波能量主要分布在 $[(f_c - 3\Delta f_{3\text{dB}}), (f_c + 3\Delta f_{3\text{dB}})]$ 范围内, 通过估计杂波谱宽, 将对应的多普勒通道的输出直接置零的方法抑制杂波。该方法在一定程度上减少了杂波抑制时, 频谱重叠和邻近区域的有用信号损失, 但是仍然存在杂波残余较强, 淹没有用气象信号, 影响风速估计精度的现象。

由于地面结构不同和路径衰减等原因, 不同距离单元的回波功率强度是不同的。回波功率越大意味着该距离单元的杂波信号越强, 杂波对有用信号的影响也就越大。反之, 回波功率小意味着该距离单元的杂波相对较弱, 对有用信号的影响也相对较弱。为了在最大程度上滤除地杂波, 提高风切变信号风速估计的准确性, 本文在有效估计杂波谱中心和谱宽的基础上, 提出了一种“双门限控制的自适应杂波抑制方法”。其思想在于利用不同距离单元信号的回波功率强度控制谱宽, 使得杂波较强的距离单元的谱宽门限相对较大, 杂波较弱的距离单元的谱宽门限相对较小。同时, 利用回波功率强度设定幅度控制门限值, 通过统计每个距离单元超限区域的多普勒通道数, 设计自适应的凹口滤波器。考虑波束照射的地面区域所对应的最大距离单元以内的雷达回波数据, 基于双门限控制的自适应地杂波抑制方法的基本流程如图 4 所示, 具体实现步骤如下:

(1) 计算每个距离单元的回波功率, P_k 表示第 k 个距离单元的回波功率, 其中 $1 \leq k \leq K$, K 表示

波束照射的地面区域所对应的最大距离单元数;

(2) 以 P_k 的最小值 P_{\min} 作为参考值, 设定控制因子 $\eta_k = P_k / P_{\min}$, 即得到每个距离单元相对于最小回波功率所在单元的比例系数;

(3) 利用控制因子调节谱宽门限, 使得谱宽门限与杂波功率成正比。在杂波功率较强的距离单元, 谱宽门限值较大, 即该距离单元杂波抑制的区域较大。反之, 杂波功率较弱的距离单元, 杂波抑制的区域较小。由此实现最大程度上的滤除杂波, 减少杂波残余的目的。待分析的杂波区域谱宽门限表示为

$$\sigma_k = \Delta f_{3\text{dB}} \eta_k = 2\sqrt{2 \ln 2} \sigma_c \frac{P_k}{P_{\min}} \quad (9)$$

(4) 计算每个距离单元的回波信号频谱幅度的平均值

$$\bar{S}_k = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left| \sum_{n=1}^N Z_{nk} \exp(-j2\pi \frac{ni}{N}) \right| \quad (10)$$

(5) 杂波功率较强的距离单元的频谱幅度平均值相对较大, 杂波功率较弱的距离单元的频谱幅度平均值相对较小。以每个距离单元的回波信号频谱幅度的平均值 \bar{S}_k 为参考值, 利用控制因子调节幅度控制门限, 使得幅度门限与杂波功率成反比, 即回波功率强的距离单元的幅度门限略低, 回波功率弱的距离单元的幅度门限略高, 达到最大限度地减少杂波残余的目的。幅度控制门限表示为 $\xi_k = |\bar{S}_k| / \eta_k$;

(6) 统计每个距离单元的杂波区域中超过幅度控制门限的多普勒通道数;

(7) 利用超限的通道数目, 设计自适应的凹口滤波器滤除杂波频谱成份;

(8) 对杂波抑制后的回波进行风速估计及后续的风切变信号检测步骤。

4 仿真结果及分析

参照 WXR-2100 型机载气象雷达设定仿真参数: 飞机高度 600 m, 飞机速度 75 m/s, 雷达发射功率 100 W, 波束宽度 3.5° , 波束下视角 2.75° , 脉冲重复频率 7000 Hz, 发射脉宽 $1\mu\text{s}$, 天线增益 30 dB, 相干脉冲数 128, 杂噪比 30 dB, 信噪比 5 dB。按照文献[18]和文献[19]分别对一个相干脉冲时间内的风切变和地杂波信号进行仿真, 工作于风切变模式下的机载气象雷达回波信号频谱如图 5 所示。不同距离单元的回波幅度不同, 且随探测距离的增加呈下降趋势。加入地速补偿后, 主杂波集中在零多普勒频率附近, 在 3–11 km 处存在风切变信号, 其水平风速沿距离呈现出反“S”特性。

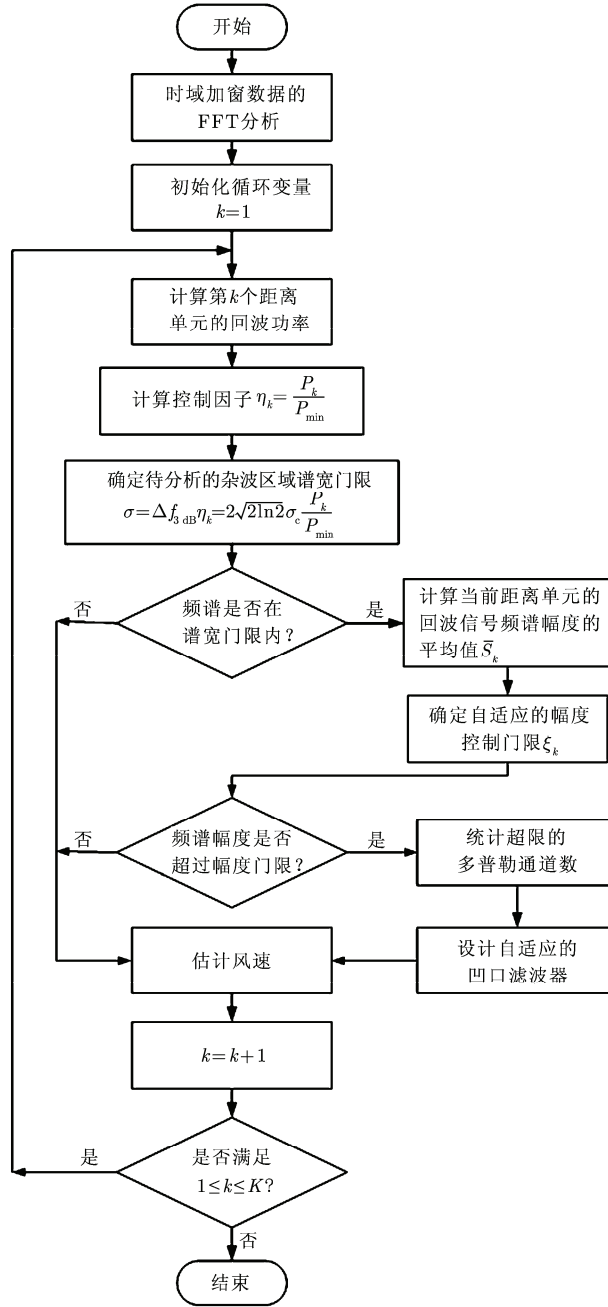


图 4 双门限控制的自适应杂波抑制方法的流程图

Fig. 4 The flowchart of dual-threshold controlled adaptive clutter suppression method

按照不同距离单元信号的回波功率强度控制谱宽，从而确定待分析的杂波区域。同时，依据回波功率强度设定幅度控制门限值，通过统计每个距离单元超限区域的多普勒通道数，设计自适应的凹口滤波器。以第 25, 40, 57 和 78 号距离单元 (3.75 km, 6 km, 8.55 km 和 11.7 km) 的滤波器频率响应为例，该方法按照不同距离单元的回波特点，自适应的形成凹口抑制地杂波信号。不同距离单元的自适应凹口滤波器频率响应如图 6(a) 所示。利用极坐标质心法估计滤波后信号的中心频率，即估计风切变信号

的水平风速。杂波抑制后速度估计结果随距离的分布如图 6(b) 所示。

保持其他参数不变，将杂噪比增加到 40 dB，得到的不同距离单元的自适应凹口滤波器频率响应如图 7(a) 所示，杂波抑制后速度估计结果如图 7(b) 所示。

由仿真结果可见，3 种方法在 0-2 km 和 11-15 km 处的速度估计均存在较大波动，这是由于该区域没有风切变信号，只有噪声和杂波信号，可以认为此处估计的是噪声速度。重点观察存在风

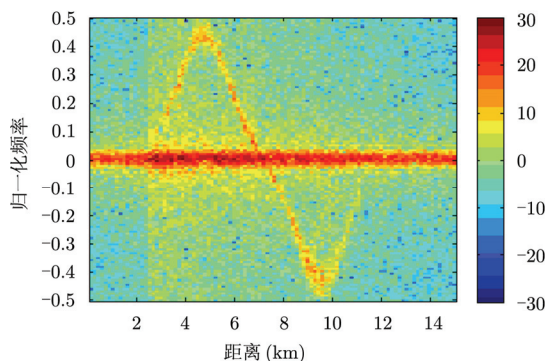
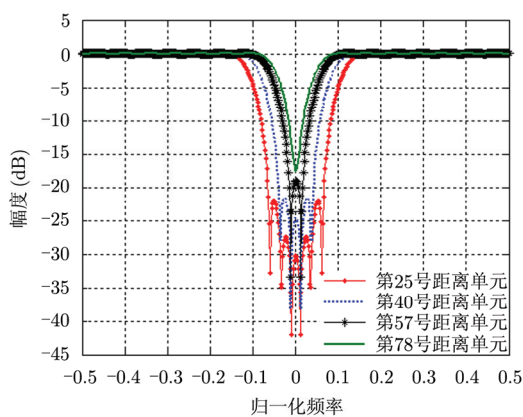


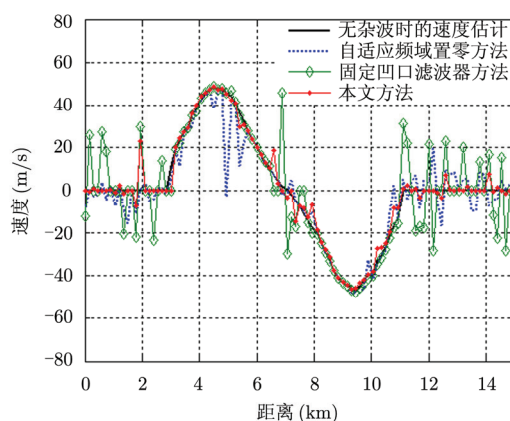
图5 风切变模式下的机载气象雷达回波频谱图

Fig. 5 The spectrum of airborne weather radar echoes in wind shear mode



(a) 不同距离单元的频率响应

(a) The frequency response in different ranges

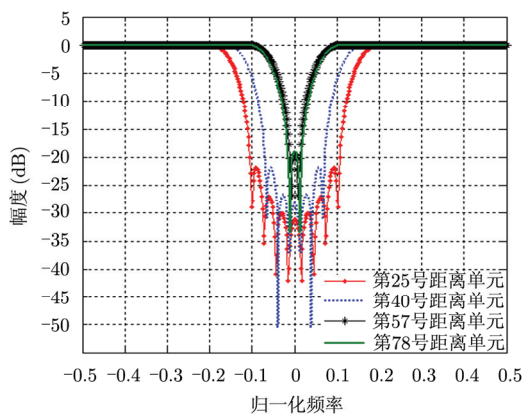


(b) 不同杂波抑制方法的估计结果对比

(b) The comparison of estimate results by different methods

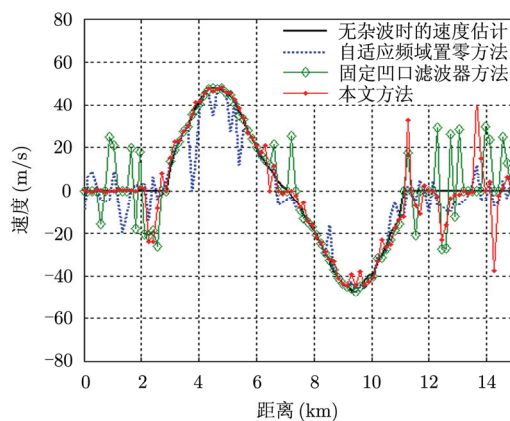
图6 杂噪比为 30 dB 的仿真结果

Fig. 6 The simulation results under the condition of clutter-to-noise ratio of 30 dB



(a) 不同距离单元的频率响应

(a) The frequency response in different ranges



(b) 不同杂波抑制方法的估计结果对比

(b) The comparison of estimate results by different methods

图7 杂噪比为 40 dB 的仿真结果

Fig. 7 The simulation results under the condition of clutter-to-noise ratio of 40 dB

切变信号的区域(3–11 km处), 在风切变信号频谱与地杂波频谱重叠和邻近区域(6–8 km处), 采用

固定凹口滤波器抑制杂波的方法在抑制杂波的同时损失了大量有用信号的频谱信息, 从而使得风速估

计结果产生较大偏差；采用自适应频域置零抑制杂波的方法，虽然在频谱重叠区域的估计效果较好，但是对于杂波功率较强区域(4-6 km 处)，杂波残余较强，淹没了有用信号，使得速度估计的偏差较大；本文所提出的方法，利用每个距离单元的功率信息设定控制门限，实现自适应的凹口滤波器。这样既保证了在杂波功率较强区域有效地抑制杂波，减少杂波残余，也兼顾到在频谱重叠区域，通过缩减凹口宽度，减少杂波抑制时对有用信号的白化。对比图 6 和图 7 的速度估计结果可知，3 种杂波抑制方法的抑制效果均会受到杂波强度的影响，但是

可以明显地看出，当杂噪比增大时，本文方法的杂波抑制效果仍然优于其余两种方法。

以杂噪比为 30 dB 的仿真数据为分析对象，图 8(a)-8(c)表示采用不同方法滤除杂波后风速估计偏差的概率分布图。由仿真结果可见：采用固定凹口滤波器和自适应频域置零方法滤除杂波后的风速估计精度较低；本文所提方法在风速估计偏差为零时的概率最大，速度偏差多集中在零值附近，并且最大的速度偏差均小于其余两种方法。即本文方法在有效滤除杂波的同时，得到了较高的风切变信号风速估计精度。

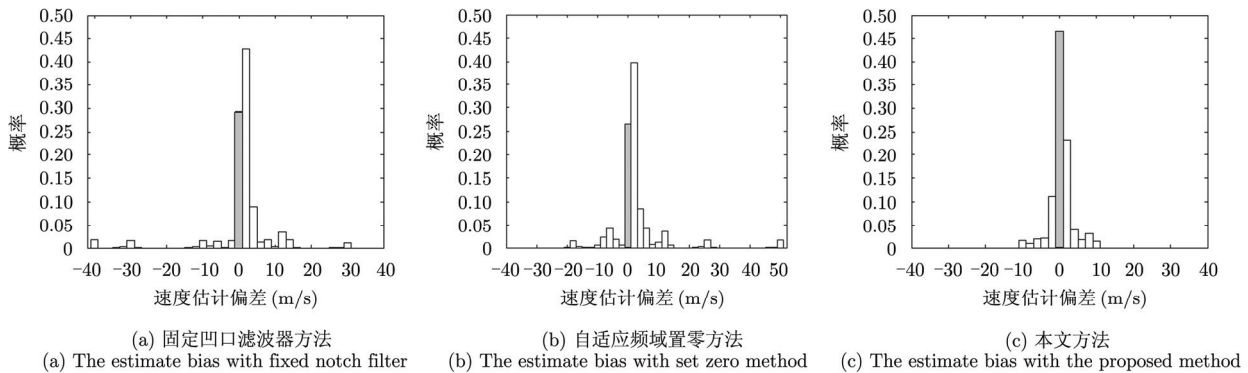


图 8 不同方法抑制杂波后的风速估计偏差

Fig.8 The wind speed estimate bias with different clutter suppression methods

5 结束语

本文在机载气象雷达地杂波频谱分析的基础上，利用机载导航设备提供的先验信息和极坐标质心法，有效地估计出杂波谱中心和谱宽。在此基础上提出了采用双门限控制的自适应杂波抑制新方法。本文详细介绍了该方法的基本流程，并通过仿真实验证明了该杂波抑制方法的有效性与可靠性。与传统的固定凹口滤波器和自适应的频域置零方法相比，该方法大大改善了杂波的抑制效果，减小了杂波残余对有用信号的影响和杂波抑制时有用信号的损失，最终实现了提高风速估计精度的目的。

参考文献

- [1] 赵东彦, 白洁. 多普勒天气雷达识别和预警下击暴流[J]. 气象科技, 2007, 35(5): 631-636.
Zhao Dong-yan and Bai Ji. Review of researches on identification and warning of downbursts with Doppler radar[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2007, 35(5): 631-636.
- [2] Deshpande M D and Leo Staton. Determination of windspeed within a weather storm using airborne Doppler radar[C]. IEEE Proceedings of Southeastcon(SECON 1991), Williamsburg, VA, USA, Apr. 7-10, 1991: 508-519.
- [3] Golden J. Clutter mitigation in weather radar systems filter design & analysis[C]. Proceedings of the Thirty-Seventh Southeastern Symposium on System Theory (SSST'05), Atlanta, USA, Mar. 20-22, 2005: 386-390.
- [4] Torres S M and Zrnic D S. Ground clutter canceling with a regression filter[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1999, 16(10): 1346-1372.
- [5] Siggia A D and Passarelli R E, Jr.. Gaussian Model Adaptive Processing (GMAP) for improved ground clutter cancellation and moment calculation[C]. Proceedings of the Third European Conference on Radar Meteorology (ERAD 2004), Visby, Sweden, Sept. 6-10, 2004: 67-73.
- [6] Bachmann S M and Zrnic D S. Suppression of clutter residue in weather radar reveals birds' corridors over urban area[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2008, 5(2): 128-132.
- [7] Bachmann S M. Using the existing spectral clutter filter with the nonuniformly spaced time series data in weather radar[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2008, 5(3): 400-403.
- [8] Bachmann S M and Tracy M. Data driven adaptive identification and suppression of ground clutter for weather

- radar[C]. 25th Conference on IIPS for Meteorology, Oceanography, and Hydrology, Nashville, TN, USA, Jan. 10-16, 2009: 11. B3.
- [9] Huang Yong, Peng Yingning, and Wang Xiqin. Airborne adaptive MTI scheme with preventing the whitening of the target[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 1999, 14(7): 19-21.
- [10] Kwag Y K. An airborne radar system with adaptive MTD Doppler compensation scheme using DSP based real-time spectral estimation[C]. IEEE Radar Conference, 2008, RADAR'08, May 26-30, 2008: 1-5.
- [11] 保铮, 廖桂生, 吴仁彪, 等. 相控阵机载雷达杂波抑制时的时空二维自适应滤波[J]. 电子学报, 1993, 21(9): 1-7.
Bao Zheng, Liao Gui-sheng, Wu Ren-biao, *et al.* 2-D temporal-spatial adaptive clutter suppression for phased array airborne radars[J]. *Acta Electronica Sinica*, 1993, 21(9): 1-7.
- [12] 秦娟, 吴仁彪, 苏志刚, 等. 基于地形可视性分析的机载气象雷达地杂波剔除方法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(2): 351-355.
Qin Juan, Wu Ren-biao, Su Zhi-gang, *et al.* Ground clutter suppression in airborne weather radar via terrain visibility analysis[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(2): 351-355.
- [13] Keel B M and Baxa E G. Adaptive least square complex lattice clutter rejection filters applied to the radar detection of low altitude windshear[C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP 1990), Albuquerque, NM, USA, Apr. 3-6 1999, 3: 1469-1472.
- [14] Lai Y C and Baxa E G. On the application of the LMS-based adaptive noise canceller in nonstationary environment associated with airborne Doppler weather radar[C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP-1993), Minneapolis, MN, USA, Apr. 27-30, 1993, 3: 25-28.
- [15] 杨凤凤, 周智敏. 基于 ZMNL 法的雷达杂波仿真[J]. 现代雷达, 2003, 25(9): 22-24.
Yang Feng-feng and Zhou Zhi-min. Radar clutter simulation based on ZMNL[J]. *Modern Radar*, 2003, 25(9): 22-24.
- [16] 李刚, 许稼, 彭应宁. 用于机载雷达杂波谱中心估计的极坐标质心法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005, 45(10): 1348-1351.
Li Gang, Xu Jia, and Peng Ying-ning. Polar coordinate centroid method for estimating clutter spectrum centers in airborne radar[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2005, 45(10): 1348-1351.
- [17] 黄勇, 彭应宁, 王秀坛, 等. 基于频域处理的机载雷达自适应杂波抑制方法[J]. 系统工程与电子技术, 2000, 22(12): 4-6.
Huang Yong, Peng Ying-ning, Wang Xiu-tan, *et al.* Adaptive clutter suppression method for airborne radar based on frequency domain processing[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2000, 22(12): 4-6.
- [18] Fan Yi, Wu Renbiao, Meng Zhichao, *et al.* Wind shear signal simulation of the airborne weather radar[C]. 2011 IEEE Radar Conference, Kansas City, MO, USA, May 23-27, 2011: 710-713.
- [19] 秦娟, 吴仁彪, 苏志刚, 等. 机载气象雷达地杂波仿真方法[J]. 现代雷达, 2011, 33(8): 72-75.
Qin Juan, Wu Ren-biao, Su Zhi-gang, *et al.* Ground clutter simulation for airborne forward-looking weather radar[J]. *Modern Radar*, 2011, 33(8): 72-75.

作者简介



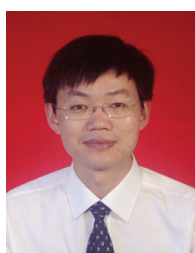
韩雁飞(1987-), 女, 新疆乌鲁木齐人, 中国民航大学通信与信息系统专业硕士研究生, 主要研究方向为机载气象雷达信号处理。

E-mail: yfhan_yjs10@cauc.edu.cn



李海(1976-), 男, 天津人, 中国民航大学副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为干涉合成孔径雷达信号处理, 空时自适应信号处理。

E-mail: lihail976@sina.com



吴仁彪(1966-), 男, 湖北省武汉市人, 中国民航大学教授, 博士生导师, IEEE 高级会员, 民航特聘专家, 主要研究方向为自适应信号处理, 高分辨率雷达成像与自动目标识别, 民航无线电干扰检测与自适应抑制, 民航遥感信息处理与应用。

E-mail: rbwu@cauc.edu.cn