

一种稳健的机载雷达杂波多普勒参数估计方法

李刚^① 许稼^{①②} 彭应宁^① 夏香根^③

^①(清华大学电子工程系 北京 100084)

^②(空军雷达学院 武汉 430010)

^③(Department of Electrical and Computer Engineering, University of Delaware, Newark, DE 19716, USA)

摘要: 基于杂波多普勒分布(DDC)模型, 该文研究了杂波协方差矩阵的特征值能量分布特点, 提出了一种稳健的机载雷达杂波多普勒参数估计方法。该方法对杂波多普勒中心估计的精度和现有常见方法可比拟, 而对杂波谱宽估计的精度优于现有常见方法, 尤其适用于机载雷达运动目标检测(MTD)等实际应用背景下数据样本较少的情况。仿真实验证明了该方法的有效性。

关键词: 机载雷达; 杂波; 多普勒参数估计

中图分类号: TN959.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)12-2867-04

A Robust Algorithm of Doppler Parameters Estimation for Airborne Radar

Li Gang^① Xu Jia^{①②} Peng Ying-ning^① Xia Xiang-gen^③

^①(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

^②(Airforce Radar Academy, Wuhan 430010, China)

^③(Department of Electrical and Computer Engineering, University of Delaware, Newark, DE 19716, USA)

Abstract: Based on the Doppler Distributed Clutter (DDC) model, this paper studies the distribution of eigenvalues of the clutter covariance matrix and proposes a robust algorithm of Doppler parameters estimation for airborne radar. Compared with existing methods, the proposed algorithm has comparable performance for Doppler centroid estimation and shows superiority for Doppler spread estimation. The proposed algorithm is competent for most practical applications of airborne radar such as moving target detection (MTD) using Pulse-Doppler (PD) radar, especially for few sampling case. Numerical simulations prove the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: Airborne radar; Clutter; Doppler parameters estimation

1 引言

杂波多普勒参数估计一直是雷达信号处理中的热点问题。例如: 在机载脉冲多普勒(PD)雷达运动目标检测(MTD)中, 来自地面的杂波分布广、强度大, 而且雷达平台运动导致多普勒谱宽严重扩展, 这使得运动目标在多普勒域淹没在杂波中而不易被检测到。这时雷达必须准确估计杂波多普勒中心和谱宽, 以达到更好地抑制杂波、提高运动目标检测性能的目的^[1]。

传统的杂波多普勒参数估计多基于快速傅里叶变换(FFT)。在杂波多普勒中心估计方面, 文献[2]总结了一类相关求零点的方法, 包括能量均衡法、符号相关法等, 文献[3]提出了杂波谱质心法, 文献[4]提出了极坐标质心法; 在杂波谱宽估计方面, 文献[3]提出了多普勒频率方差质心法, 文献[5]提出了杂波谱积分法。这些基于 FFT 的方法简单有效, 但在数据样本较少时精度不佳。

文献[6]提出一种多普勒分布式杂波(DDC)模型, 通过杂波协方差矩阵的参数化表达有效描述了杂波的二阶统计特性。针对 DDC 模型, 文献[7]提出一种用非线性算子估计杂波多普勒参数的方法, 其基本思想是“两点源”近似, 即在谱宽较窄的情况下, 杂波的能量集中体现在其协方差矩阵的两个主要特征值上, 杂波可近似为两个单频信号的叠加。然而当机载雷达方位向波束较宽时, 多普勒扩展将更为严重, 杂波的能量将扩散到其协方差矩阵的多个主要特征值上, “两点源”近似将导致较大的估计误差。本文基于 DDC 模型, 利用“多点源”近似, 提出了一种稳健的杂波多普勒参数估计方法, 其稳健性体现在: (1)对杂波谱宽不敏感, 可根据不同谱宽自适应地确定“多点源”的个数, 对较窄和较宽的杂波谱均有精确的估计性能; (2)对数据样本数量不敏感, 即使在数据样本较少时也具有精确的估计性能; (3)对杂波谱具体形状不敏感, 只要求杂波谱具有对称性、就可用多普勒中心和谱宽两个参数来建模。

2 DDC 模型

假设一个相干处理间隔(CPI)内包含 K 个连续脉冲, 在第

2006-05-26 收到, 2006-10-08 改回

国家自然科学基金(60502012), 国家部级基金(51407030203 JW141)和航天支撑基金(J04-2005047) 资助课题

k 个脉冲, 雷达接收到来自某个距离单元的回波信号可表示为^[6]

$$x_k = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} F(\theta)\gamma(\theta)e^{j4\pi(k-1)v\sin\theta/\lambda}d\theta + n_k \quad (1)$$

其中 θ 为方位角; $F(\theta)$ 为归一化的天线单向增益; $\gamma(\theta)$ 为杂波单元反射率, 在均匀场景中可认为 $\gamma(\theta)$ 对不同 θ 是独立同分布的零均值复随机变量, 且满足 $E[\gamma(\theta)\gamma^*(\theta')] = S\delta(\theta - \theta')$; v 为雷达平台前向运动速度; λ 为雷达波长; 加性高斯白噪声 n_k 服从 $N(0, \sigma_n)$ 分布。设雷达脉冲重复频率为 f_p , 定义归一化的多普勒频率为 $f = 2v\sin\theta/(\lambda f_p)$ 。在许多机载雷达的实际应用中, 如机载PD雷达MTD, 方位向天线波束宽度区间 $[\theta_{\min}, \theta_{\max}]$ 约为几度(具体参数可参见后文的仿真实验部分和文献[1-7]中的实例), 此时 $\sin(\theta) \approx \theta$, 式(1)可近似写为

$$\begin{aligned} x_k &\approx \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} F(\theta)\gamma(\theta)e^{j4\pi(k-1)v\sin\theta/\lambda}d\theta + n_k \\ &= Q \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} F(f)\gamma(f)e^{j2\pi(k-1)f}df + n_k \\ &\approx Q \int_{-\infty}^{\infty} F(f)\gamma(f)e^{j2\pi(k-1)f}df + n_k \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $Q = \lambda f_p/(2v)$ 为实常数, $[f_{\min}, f_{\max}]$ 表示天线能量主要聚集的归一化多普勒频率区间。式(2)可写成 \mathbf{x} 的矢量函数形式

$$\mathbf{x} = Q \int_{-\infty}^{\infty} F(f)\gamma(f)\mathbf{a}(f)df + \mathbf{n} \quad (3)$$

其中 $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_K]^T$, $\mathbf{n} = [n_1, n_2, \dots, n_K]^T$, $\mathbf{a}(f) = [1, e^{j2\pi f}, \dots, e^{j2\pi(K-1)f}]^T$ 。 \mathbf{x} 的协方差矩阵为

$$\mathbf{R}_x = E(\mathbf{x}\mathbf{x}^H) = Q^2 \mathbf{R}_s + \sigma_n^2 \mathbf{I}_K \quad (4)$$

其中 $\mathbf{R}_s = \int_{-\infty}^{\infty} |F(f)|^2 \cdot \mathbf{a}(f)\mathbf{a}^H(f)df$ 是能量归一化的杂波协方差矩阵。假设雷达具有高斯型双向功率增益方向图, 即

$$|F(f)|^2 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_f} \exp\left[-\frac{(f - f_{dc})^2}{2\sigma_f^2}\right] \quad (5)$$

其中 f_{dc} 和 σ_f 分别为高斯杂波谱的多普勒中心和谱宽参数, σ_f 与真实谱宽 B 的关系为 $\sigma_f = B/(2f_p)$ 。把式(5)代入 \mathbf{R}_s 表达式得到

$$(\mathbf{R}_s)_{mn} = e^{j2\pi(m-n)f_{dc}} e^{-[2\pi(m-n)\sigma_f]^2/2} \quad (6)$$

此即为文献[6]提出的DDC模型, 所需解决的问题是基于这一模型从回波数据中估计 f_{dc} 和 B 。

3 新的杂波多普勒参数估计方法

3.1 协方差矩阵特征分析

从上节可知DDC模型和空间分布信号源模型具有类似的数学形式, 因此可以借用空间分布信号源参数估计的方法来估计杂波多普勒参数。文献[8]提出的S-MUSIC算法利用了“两点源”近似: 当空间分布信号源角扩展较小时, 它可用两个“点目标”来近似。文献[7]采用了类似的思想, 认为杂波多普勒信号可用两个单频信号的叠加来近似。这种思想在

谱宽较窄的时候是适宜的, 此时杂波的能量集中体现在其协方差矩阵的两个大特征值上; 然而在机载雷达方位向波束较宽时, 多普勒扩展更为严重, 杂波的能量将扩散到其协方差矩阵的多个特征值上, “两点源”近似必将导致较大的估计误差。通过下面的例子来阐明这一论断。假设一个CPI内连续脉冲数 $K=16$, 针对不同的谱宽参数 σ_f , 对式(6)中的 \mathbf{R}_s 做特征分解。定义占全体特征值能量95%的几个大特征值为“主要特征值”, 图1给出了主要特征值个数随不同的谱宽参数 σ_f 变化的曲线。当 σ_f 趋于0时, 主要特征值个数为1, 杂波近似为单频信号; 当 $0.008 < \sigma_f < 0.024$ 时, 主要特征值个数为2, 杂波可用“两点源”近似; 当 $0.024 < \sigma_f < 0.34$ 时, 主要特征值个数在2-15之间, “两点源”近似必然带来较大的误差, 应用“多点源”来近似杂波; 当 $\sigma_f > 0.34$ 时, 所有特征值已无主次之分, 杂波近似为白噪声。

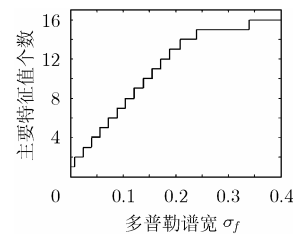


图1 不同的杂波谱宽参数下杂波协方差矩阵特征值分布 (CPI内脉冲数 $K=16$)

实际应用时, 从接收数据中只能得到 \mathbf{R}_x 而不能直接得到 \mathbf{R}_s , 因此必须考虑噪声对特征值分布的影响。定义杂波噪声功率比 $\text{CNR} = Q^2 S/\sigma_n^2$, 则根据式(4)可知 $e_x = e_s + 1/\text{CNR}$, 其中 e_x 和 e_s 分别是 \mathbf{R}_x 和 \mathbf{R}_s 的归一化特征值。当CNR较大时, $e_x \approx e_s$, 噪声对特征值能量分布的影响可以忽略; 当CNR较小时, e_s 与 $1/\text{CNR}$ 可比较, 噪声将导致 \mathbf{R}_x 和 \mathbf{R}_s 的特征值能量分布具有较大差别。在常见的机载雷达应用中(如PD雷达MTD中), 来自地面的杂波功率一般远大于噪声功率, 尤其在城市和山区CNR可达60-90dB^[1], 因此在这种实际应用背景下, 可以认为 \mathbf{R}_x 和 \mathbf{R}_s 的特征值能量分布基本相同。

3.2 多点源近似估计杂波多普勒参数

下面给出基于“多点源”近似估计杂波多普勒参数的方法。

(1) 用 L 个距离单元的回波信号估计协方差矩阵:

$$\hat{\mathbf{R}}_x = \sum_{l=1}^L \mathbf{x}(l)\mathbf{x}^H(l)/L$$

(2) 对 $\hat{\mathbf{R}}_x$ 做特征分解, 以95%为能量门限确定主要特征值的个数 N , 这时杂波可用 N 个单频信号的叠加来近似, 即

$$\mathbf{x} \approx \sum_{i=1}^N \gamma_i \mathbf{a}(f_i) + \mathbf{n}, \quad \text{其中 } \gamma_i \text{ 为第 } i \text{ 个单频信号的复幅度, } \mathbf{a}(f_i) = [1, e^{j2\pi f_i}, \dots, e^{j2\pi(K-1)f_i}]^T;$$

(3) 用多个单频信号频率估计算法(如MUSIC^[9])从回波数据中估计出该 $\{f_i, i = 1, 2, \dots, N\}$;

(4) 估计杂波多普勒中心和谱宽为

$$\left. \begin{aligned} \hat{f}_{dc} &= \sum_{i=1}^N f_i / N \\ \hat{B} &= \sqrt{\sum_{i=1}^N (f_i - \hat{f}_{dc})^2 / N} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

需要说明的是：(1)由图 1 可知，在 $0.008 < \sigma_f < 0.024$ 时杂波协方差矩阵的主要特征值个数为 2，这与 S-MUSIC 算法的“两点源”假设相吻合，因此 S-MUSIC 算法可看作本算法在杂波谱较窄时的特例，而后面的仿真将证明，在杂波谱较宽时本文的方法明显优于 S-MUSIC 算法；(2)虽然在介绍 DDC 模型时和分析杂波特征值分布时假设杂波谱为高斯函数型，但是在具体的算法实现过程中却没有利用这一信息，因此本文方法和 S-MUSIC 类似，对用双参数(多普勒中心和谱宽)建模的对称形杂波谱都是适用的。

4 仿真实验

本节给出一些仿真实验来验证所提出的算法的有效性。作为比较，同时给出基于 FFT 的算法(用质心法^[3]估计杂波多普勒中心，用积分法^[5]估计杂波谱宽参数)和 S-MUSIC 算法^[8]的均方根误差(RMSE)以及 Cramer-Rao 界(CRB)。关于 CRB 的计算参见文献[6]，这里仅给出结论。设未知参数向量为 $z = [S, \sigma_n^2, f_{dc}, \sigma_f]^T$ ，则参数估计 RMSE 的 CRB 由下式决定

$$\sqrt{E[(z_m - \hat{z}_m)^2]} \geq (\mathbf{F}^{-1})_{mm} \quad (8)$$

其中 \mathbf{F} 为 Fisher 信息矩阵。

$$(\mathbf{F})_{mn} = L \cdot \text{tr} \left[\mathbf{R}_x^{-1} \frac{\partial \mathbf{R}_x}{\partial z_m} \mathbf{R}_x^{-1} \frac{\partial \mathbf{R}_x}{\partial z_n} \right] \quad (9)$$

L 为参考距离单元数， $\text{tr}(\cdot)$ 表示矩阵的迹。

如上节所述，在杂波谱较窄时，本文的方法演化为 S-MUSIC 算法，其性能可参见文献[8]，在下面的仿真中我们只分析杂波谱较宽的情况。设计一部正侧视机载 PD 雷达，系统参数于表 1 中列出。可计算出杂波谱宽为 $B = 2v\beta/\lambda \approx 120.43\text{Hz}$ ，归一化后的杂波谱宽参数 $\sigma_f = B/(2f_p) \approx 0.06$ ；由于雷达采用正侧视，杂波多普勒中心 $f_{dc} = 0$ ；设雷达具有高斯型双向功率增益方向图；取参考距离单元数 $L=64$ ；针对每一组参数做 500 次蒙特卡罗实验。

表 1 仿真机载 PD 雷达参数列表

飞行高度	$h = 3000\text{m}$
方位角波束宽度	$\beta = 1.5^\circ$
载波波长	$\lambda = 0.03\text{m}$
信号带宽	$B = 70\text{MHz}$
脉冲重复频率	$f_p = 1000\text{Hz}$
载机速度	$v = 69\text{m/s}$

实验 1 CPI 内脉冲数固定为 $K=16$ ，CNR 从 15dB 变

化到 60dB，图 2 和图 3 分别画出了应用各种算法估计杂波多普勒中心 f_{dc} 和谱宽 B 的误差。由于杂波特征值矩阵的主要特征值个数为 5(见图 1)，因此基于“两点源”近似的 S-MUSIC 算法有较大估计误差。在 $\text{CNR} < 25\text{dB}$ 时，受噪声对 \mathbf{R}_x 和 \mathbf{R}_s 特征值能量分布差异的影响，本文的方法性能有所损失。而在 $\text{CNR} > 25\text{dB}$ 时(这对应着机载 PD 雷达 MTD 等常见的实际应用背景)，在杂波多普勒中心 f_{dc} 估计方面，本文所提方法的精度略优于质心法，在杂波谱宽 B 估计方面，本文方法比积分法具有明显的精度优势。

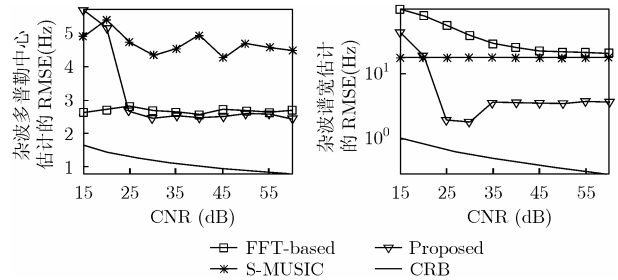


图 2 不同 CNR 情况下 f_{dc} 的估计误差

图 3 不同 CNR 情况下 B 的估计误差

实验 2 CNR 固定为 35dB，CPI 内脉冲数 K 从 16 变化到 30，图 4 和图 5 分别画出了应用各种算法估计杂波多普勒中心 f_{dc} 和谱宽 B 的误差。S-MUSIC 算法假定的“两点源”模型与实际情况失配，因此误差较大。在杂波多普勒中心 f_{dc} 估计方面，本文方法可获得和质心法相比拟的性能；在杂波谱宽参数 B 估计方面，本文方法精度优于积分法，尤其在 CPI 内脉冲数较少时优势更为明显。

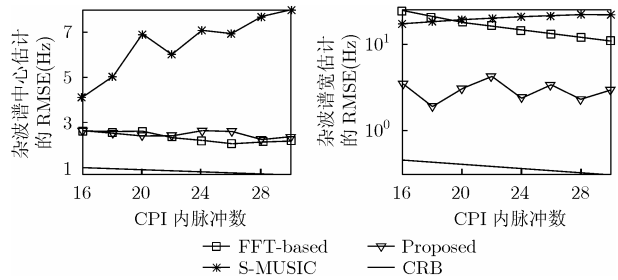


图 4 CPI 内不同脉冲数目情况下 f_{dc} 的估计误差

图 5 CPI 内不同脉冲数目情况下 B 的估计误差

5 结束语

本文基于 DDC 模型，利用“多源”来近似描述杂波，提出了一种稳健的机载雷达杂波多普勒参数估计方法。该方法能够根据不同的杂波谱宽自适应地确定“多源”的个数，对较窄和较宽的杂波谱均有精确的估计性能。仿真实验证明，本文方法对杂波多普勒中心估计的精度和现有常见方法可比拟，对杂波谱宽的估计精度优于现有常见方法，尤其适用于机载雷达 MTD 等实际应用背景下数据样本较少的情

况。

参 考 文 献

- [1] Schleher D. MTI and Pulsed Doppler Radar [M]. London: Artech House Inc., 1991, ch.1-ch.3.
- [2] Bamler R. Doppler frequency estimation and the Cramer-Rao bound [J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 1991, 29(3): 385-390.
- [3] 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. *系统工程与电子技术*, 2000, 22(12): 3-6.
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): 3-6.
- [4] 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. *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.
- [5] Ge F, Peng Y, and Wang X. PSD accumulation for estimating the bandwidth of the clutter spectral [J]. *IEICE Trans. on Communication*, 2002, E852B(4): 1052-1056.
- [6] Xu J, Peng Y, and Wan Q, *et al.* Airborne radar Doppler distributed clutter model and its parameter estimation [J]. *Sci. China, Ser. F*, 2004, 47(5): 577-587.
- [7] 许稼, 彭应宁, 万群等. 基于 DDC 模型的机载雷达多普勒参数估计研究. *电子学报*, 2004, 32(9): 1421-1424.
Xu Jia, Peng Ying-ning, and Wan Qun, *et al.* Doppler parameters estimation for airborne radar based on DDC model [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2004, 32(9): 1421-1424.
- [8] Bengtsson M and Ottersten B. Low-complexity estimators for distributed sources. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2000, 48(8): 2185-2194.
- [9] Schmidt R. Multiple emitter location and signal parameter estimation. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1986, 34(3): 276-280.
- 李 刚: 男, 1979 年生, 博士生, 研究兴趣包括参数估计、合成孔径雷达成像、运动目标检测定位与成像、阵列信号处理等.
- 许 稼: 男, 1974 年生, 副教授, 博士后, 研究领域包括目标检测、参数估计、合成孔径/逆合成孔径成像等.
- 彭应宁: 男, 1939 年生, 教授、博士生导师, 长期从事雷达信号处理研究, 研究领域包括高速实时信号处理和自适应信号处理.
- 夏香根: 男, 1962 年生, 教授, 研究兴趣包括空时码、MIMO 和 OFDM 通信系统以及信号处理.