

复杂海杂波背景下分数低阶匹配滤波检测方法

郑作虎,王首勇

(空军预警学院重点实验室,湖北武汉 430019)

摘要: 针对在复杂海杂波背景下,雷达目标检测中动目标检测(Moving Target Detection, MTD)技术的检测性能显著下降的问题,以及局部最优检测器(Locally Optimum Detector, LOD)仅适用于低信杂比背景下弱目标检测的问题,基于分数低阶统计量理论,提出了一种分数低阶匹配滤波检测方法. 该方法通过幂变换抑制杂波的非高斯特性,通过应用杂波分数低阶协方差矩阵特征值分解的方法白化相关杂波,在此基础上应用匹配滤波进行目标积累,以提高信杂比. 通过仿真和实测数据,对所提出方法的检测性能进行了验证,并且与 MTD 和 LOD 进行了比较. 结果表明,本文所提出方法能较好地解决非高斯相关杂波背景下的目标检测问题,检测性能明显优于 MTD 和 LOD 方法.

关键词: 非高斯相关杂波; 幂变换; 分数低阶协方差; 杂波白化

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2016)02-0319-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2016.02.011

Radar Target Detection Method of Fractional Lower Order Matched Filter in Complex Sea Clutter Background

ZHENG Zuo-hu, WANG Shou-yong

(Key Research Lab, Wuhan Air Force Early Warning Academy, Wuhan, Hubei 430019, China)

Abstract: The detection performance of the Moving Target Detection (MTD) method of the radar target descends badly in complex sea clutter background, Also, The Locally Optimum Detector only works well for the weak target in the low signal clutter ratio background, Therefore, a fractional lower order matched filter detection method is proposed, which is obtained based on the fractional lower order statistics. The proposed method suppresses the non-Gaussian clutter by the signed power and whitens the correlated clutter by decomposing the clutter fractional lower order covariance matrix, at last the matched filter is used to get higher signal clutter ratio. Simulations and real data results show that, the detection performance of the proposed method obviously outperforms the MTD and LOD method in non-Gaussian correlated clutter background.

Key words: non-Gaussian correlated clutter; signed power; fractional lower order covariance; clutter whitening

1 引言

在雷达目标检测中,动目标检测(Moving Target Detection, MTD)^[1]技术被广泛应用,该技术在高斯独立杂波、较高信杂比条件下具有较好的检测性能,但在实际应用中,如雷达在低仰角探测或在高分辨率雷达情况下,雷达杂波通常具有显著的非高斯特性^[2,3],1999年,澳大利亚国防科学与技术组织(National Defense Science and Technology Organization, DSTO)通过对大量实测海杂波数据进行分析后指出^[4],海杂波的统计特性严重偏离高斯分布,同时具有复杂的相关性.在此背景下,尤

其是低信杂比时,MTD技术不能对信号进行有效积累,导致信杂比损失严重.杂波的非高斯特性和相关性严重影响了雷达目标的检测性能,因此,研究非高斯相关杂波背景下的目标检测方法具有重要的理论和实际意义.球不变随机过程^[5](Sphere Invariability Random Process, SIRP)的联合分布模型能较好地描述非高斯相关杂波,在此基础上如何建立似然比检测模型也被广泛研究^[6],但检测统计量不易导出、实现过程困难,难以应用于实际.文献^[7]提出的局部最优检测器(Locally Optimum Detector, LOD)是适用于弱目标检测的近似广义似然比检测方法,由高斯线性结构的匹配滤波器

和相应的非线性权值构成,通过增大弱信号的权值来实现低信杂比背景下的目标检测,但减小强信号的权值同时也导致了检测性能的下降.为实现非高斯相关杂波背景下对目标的有效检测,本文从实际应用出发,不涉及杂波的多维联合分布,仅考虑杂波的一维分布特性和杂波过程的相关性,通过抑制杂波的非高斯特性和消除杂波过程的相关性以达到改善信杂比的目的.

分数低阶统计量是描述非高斯过程相关性的有力工具,1993年由 Shao 和 Nikias 在 Alpha 稳定分布的基础上提出^[8,9].该分布是一种能较好地描述非高斯分布的概率分布模型.但由于除了几个特例外,不存在概率密度函数(probability density function, PDF)解析表达式,基于 Alpha 稳定分布的检测方法,通常基于特定的特征指数或者对 PDF 进行近似,文献[10]给出了特征指数 $\alpha = 1.85$ 条件下基于似然比检验的检测方法,文献[11]利用柯西分布模型(特征指数 $\alpha = 1$ 的 Alpha 稳定分布)提出了柯西局部最优检测器,文献[12]利用高斯混合模型对 Alpha 稳定分布的 PDF 进行近似,提出了相应的局部最优检测器.因此本文基于分数低阶统计量理论,提出了一种分数低阶匹配滤波检测方法.该方法应用分数低阶统计量理论中的幂变换抑制杂波的非高斯特性,通过杂波分数低阶协方差矩阵特征值分解得到的矩阵用于白化杂波,在此基础上应用匹配滤波实现对目标信号的有效积累.

2 基于 Alpha 稳定分布的非高斯相关杂波模型

Alpha 稳定分布是一种较为理想的描述非高斯相关杂波的概率分布模型,对于复随机变量 X ,其实部和虚部均可用特征函数表示^[8]:

$$\varphi(t) = \exp\{j\omega t - \gamma|t|^\alpha [1 + j\beta \text{sign}(t)\omega(t, \alpha)]\} \quad (1)$$

式中: $0 < \alpha \leq 2$ 为特征指数, $\gamma > 0$ 为分散系数, $-1 \leq \beta \leq 1$ 为对称参数, $\beta = 0$ 时为复对称 Alpha 稳定分布(Symmetric Alpha Stable, SaS), $-\infty < u < \infty$ 为位置参数.当 $\alpha = 2$ 时为高斯分布,随着 α 减小,非高斯特性越明显, $\text{sign}(\cdot)$ 为符号函数,且

$$\omega(t, \alpha) = \begin{cases} \tan \frac{\alpha\pi}{2}, & \alpha \neq 1 \\ \frac{2}{\pi} \log|t|, & \alpha = 1 \end{cases} \quad (2)$$

对于复 SaS 分布随机变量,当特征指数 $0 < \alpha < 2$ 时,由于只存在阶数小于 α 的统计矩,二阶统计量理论已不再适用,因此,在此基础上,1993年由 Shao 和 Nikias 提出了分数低阶统计量概念,随后成为研究非高斯相关随机变量的有力工具.两个服从复 SaS 分布随机过程 $x_1(n)$ 和 $x_2(n)$ 的分数低阶协方差(Fractional Lower Order Covariance, FLOC)定义为^[13]:

$$R_d(k) = E[[x_2(n)]^{(A)} ([x_1(n+k)]^{(B)})^*] \quad (3)$$

式中: $0 \leq A < \alpha/2, 0 \leq B < \alpha/2$,其中幂变换定义为

$$x^{(A)}(n) = \begin{cases} |x(n)|^{A-1}x(n), & x(n) \text{ 为复变量} \\ |x(n)|^A \text{sign}(x(n)), & x(n) \text{ 为实变量} \end{cases} \quad (4)$$

3 分数低阶匹配滤波检测方法

3.1 非高斯相关杂波的幂变换处理

设某一距离单元的复包络观测信号为

$$x(n) = s(n) + v(n), n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (5)$$

$$s(n) = ae^{j(\omega_0 n + \varphi)} = \beta e^{j\omega_0 n}$$

式中: a 为多普勒信号幅度, φ 为初相, $\beta = ae^{j\varphi}$ 看作复常量, ω_0 为目标多普勒角频率, N 为相干脉冲间隔(Coherent Pulse Interval, CPI)长度, $v(n)$ 为非高斯相关杂波.式(5)的矢量表示式为:

$$\mathbf{x} = \mathbf{s} + \mathbf{v} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{x} = [x(0), x(1), \dots, x(N-1)]^T$.

为了消除杂波的非高斯特性,本文采用幂变换方法,按式(4)对观测信号矢量进行幂变换处理

$$\mathbf{x}^{(p/2)} = \begin{bmatrix} x^{(p/2)}(0) \\ x^{(p/2)}(1) \\ \vdots \\ x^{(p/2)}(N-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |x(0)|^{p/2-1}x(0) \\ |x(1)|^{p/2-1}x(1) \\ \vdots \\ |x(N-1)|^{p/2-1}x(N-1) \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: $A = p/2, p$ 为分数低阶矩阶数 $0 \leq p < \alpha$.由上式可知,当杂波 \mathbf{v} 具有较强的非高斯特性,即具有幅值较大的强尖峰时,对杂波进行幂变换,因为 $p/2 < 1$,表明幂变换可以降低强尖峰的幅值,因此能较好地抑制杂波的非高斯特性.

为了验证幂变换抑制杂波非高斯特性的有效性,把零均值复 SaS 分布作为非高斯杂波分布模型,非高斯相关杂波的仿真产生和参数设置见 5.1 节.图 1(a)给出了 $\alpha = 1, \gamma = 1$ 时非高斯杂波幂变换前后实部的 PDF 曲线,从图中可以看出幂变换后的杂波实部的 PDF 曲线几乎与高斯杂波($\alpha = 2, \gamma = 1$)的 PDF 曲线重合.为能更清楚观察幂变换前后杂波 PDF 尾部的变化,图 1(b)给出了 PDF 的尾部曲线.

3.2 相关杂波的白化处理

经过幂变换抑制杂波的非高斯特性之后,通过白化处理消除杂波的相关性.对于相关杂波进行白化处理,本文应用的方法是:首先计算杂波的分数低阶相关矩阵,根据相关矩阵的特征值分解得到白化矩阵,使杂波的相关矩阵变换为对角矩阵.首先,根据式(7),杂波矢量 \mathbf{v} 的分数低阶相关矩阵表示为

$$\mathbf{R}_v = E[\mathbf{v}^{(p/2)} (\mathbf{v}^{(p/2)})^H] \quad (8)$$

然后,对上式进行特征值分解

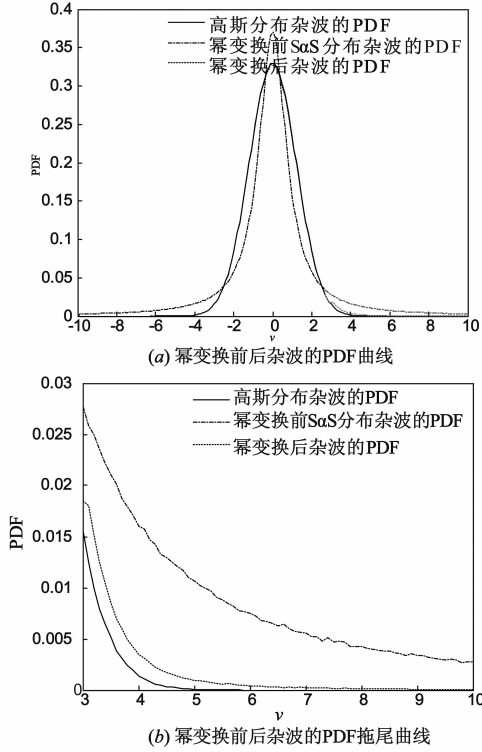


图1 幂变换前后杂波的PDF曲线比较

$$\mathbf{R}_v = \mathbf{Q}\mathbf{A}\mathbf{Q}^H \quad (9)$$

式中:对角矩阵 \mathbf{A} 和酉矩阵 \mathbf{Q} 分别为矩阵 \mathbf{R}_v 的特征值矩阵和对应的特征向量矩阵.

那么杂波白化处理矩阵设为

$$\mathbf{L} = \mathbf{Q}\mathbf{A}^{-1/2} \quad (10)$$

设白化处理前的相关杂波矢量 $\bar{\mathbf{v}} = \mathbf{v}^{(p/2)}$, 经白化处理后为

$$\bar{\mathbf{v}} = \mathbf{L}^H \bar{\mathbf{v}} = \mathbf{A}^{-1/2} \mathbf{Q}^H \mathbf{v}^{(p/2)} \quad (11)$$

$\bar{\mathbf{v}}$ 的相关矩阵为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}[\bar{\mathbf{v}}\bar{\mathbf{v}}^H] &= \mathbf{E}[\mathbf{A}^{-1/2} \mathbf{Q}^H \mathbf{v}^{(p/2)} (\mathbf{v}^{(p/2)})^H (\mathbf{A}^{-1/2} \mathbf{Q}^H)^H] \\ &= \mathbf{A}^{-1/2} \mathbf{Q}^H \mathbf{R}_v \mathbf{Q} \mathbf{A}^{-1/2} = \mathbf{I} \end{aligned} \quad (12)$$

由上式可知, 经过白化处理后杂波相关矩阵为单位阵. 经幂变换的观测信号和目标信号白化处理后表示为

$$\bar{\mathbf{x}} = \mathbf{L}^H \bar{\mathbf{x}} = \mathbf{A}^{-1/2} \mathbf{Q}^H \mathbf{x}^{(p/2)} \quad (13)$$

$$\bar{\mathbf{s}} = \mathbf{L}^H \bar{\mathbf{s}} = \mathbf{A}^{-1/2} \mathbf{Q}^H \mathbf{s}^{(p/2)} \quad (14)$$

式中: $\bar{\mathbf{x}} = \mathbf{x}^{(p/2)}$ 和 $\bar{\mathbf{s}} = \mathbf{s}^{(p/2)}$ 分别为白化处理前的观测信号和目标信号矢量.

3.3 高斯独立杂波背景下的匹配滤波器

在高斯独立杂波背景下, 匹配滤波具有最优的积累性能, 经幂变换和白化处理后, 杂波已逼近于高斯独立分布, 因此, 再应用匹配滤波对信号进行积累. 以输出信杂比最大为准则, 根据柯西-施瓦兹不等式, 得到最佳匹配滤波器系数.

令滤波器系数为 $\bar{\mathbf{c}} = [\bar{c}(0) \ \bar{c}(1) \ \cdots \ \bar{c}(N-1)]^T$,

则滤波器在 $n = N - 1$ 时刻的输出可表示为

$$y = \bar{\mathbf{c}}^H \bar{\mathbf{x}} = \bar{\mathbf{c}}^H \bar{\mathbf{s}} + \bar{\mathbf{c}}^H \bar{\mathbf{v}} \quad (15)$$

由上式可得滤波器输出信杂比为

$$\text{SCR}(\bar{\mathbf{c}}) = \frac{|\bar{\mathbf{c}}^H \bar{\mathbf{s}}|^2}{\bar{\mathbf{c}}^H \mathbf{R}_v \bar{\mathbf{c}}} = \frac{|\bar{\mathbf{c}}^H \bar{\mathbf{s}}|^2}{\bar{\mathbf{c}}^H \bar{\mathbf{c}}} \quad (16)$$

式中: $\mathbf{R}_v = \mathbf{E}[\bar{\mathbf{v}}\bar{\mathbf{v}}^H] = \mathbf{I}$. 根据柯西-施瓦兹不等式, 有

$$\text{SCR}(\bar{\mathbf{c}}) = \frac{|\bar{\mathbf{c}}^H \bar{\mathbf{s}}|^2}{\bar{\mathbf{c}}^H \bar{\mathbf{c}}} \leq \frac{(\bar{\mathbf{c}}^H \bar{\mathbf{c}})(\bar{\mathbf{s}}^H \bar{\mathbf{s}})}{\bar{\mathbf{c}}^H \bar{\mathbf{c}}} \quad (17)$$

当滤波器系数

$$\bar{\mathbf{c}} = k\bar{\mathbf{s}} = k\mathbf{A}^{-1/2} \mathbf{Q}^H \mathbf{s}^{(p/2)} \quad (18)$$

输出信杂比达到最大值. 式中系数 k 为任意常数, 取 $k = 1$.

非高斯相关杂波背景下的分数低阶匹配滤波器 (Fractional Lower Order Matched Filter, FLOMF) 由上述三部分组成, 如图 2 所示.

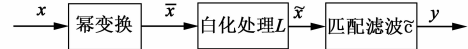


图2 非高斯相关杂波背景下分数低阶匹配滤波器示意图

FLOMF 的运算步骤包括:

Step 1 杂波幂变换处理 $\mathbf{v}^{(p/2)} = |\mathbf{v}|^{p/2-1} \mathbf{v}$;

Step 2 计算杂波矢量 \mathbf{v} 的分数低阶相关矩阵 $\mathbf{R}_v = \mathbf{E}[\mathbf{v}^{(p/2)} (\mathbf{v}^{(p/2)})^H]$;

Step 3 计算广义匹配滤波器 (包括白化处理和匹配滤波) 系数 $\bar{\mathbf{c}} = \mathbf{R}_v^{-1} \mathbf{s}^{(p/2)}$;

Step 4 计算检测统计量 $y = \bar{\mathbf{c}}^H \mathbf{x}^{(p/2)}$.

假设观测信号 $x(n)$ 的 CPI 个数为 N , 数据样本个数为 M , 则 FLOMF 的算法复杂度为:

$$\begin{aligned} O(\text{FLOMF}) &= 2NM + \frac{N(N+1)}{2}M + N^3 + 2N + N^2 + 3NM \\ &= N \left(N(N+1) + \frac{M}{2}(N+11) + 2 \right) \end{aligned} \quad (19)$$

实际中目标多普勒频率通常是未知的, 式(18)需要知道多普勒频率, 因此需采用覆盖整个多普勒频率范围的多通道 FLOMF 进行目标检测, 选择其输出最大值作为检测统计量, 如图 3 所示.

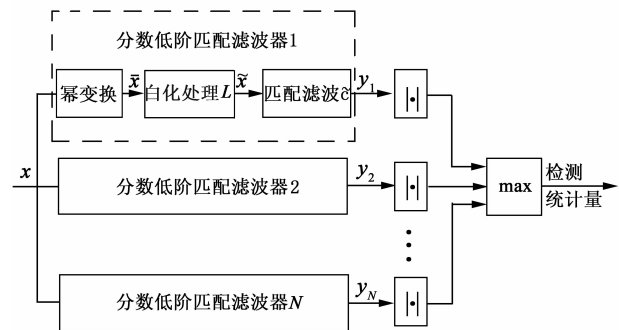


图3 非高斯相关杂波背景下雷达目标检测框图

4 分数低阶矩阶数 p 的选择

由式(8)、(18)可知,阶数 p 直接影响杂波分数低阶相关矩阵的估计和目标信号的幂变换,最终影响对目标信号的检测性能,因此需要合理选择 p 值。

对于零均值高斯分布随机变量 X ,方差即为二阶原点矩,而复 $S\alpha S$ 分布的分散系数 γ 类似于高斯分布的方差,特别当 $\alpha=2$ 时, γ 等于二阶矩的一半^[8],即 $E|X|^2=2\gamma$ 。因此,将此关系推广到 $\alpha<2$ 的情况,在 $\alpha<2$ 时零均值复 $S\alpha S$ 分布随机变量 X 的 γ 和分数低阶矩之间关系为

$$E|X|^p = 2\gamma, 0 < p < \alpha \quad (20)$$

随机变量 X 的分数低阶矩为^[14,15]

$$E|X|^p = C_2(p, \alpha) \gamma^{p/\alpha} \quad (21)$$

式中:

$$C_2(p, \alpha) = \frac{2^{p+1} \Gamma((1+p)/2) \Gamma(-p/\alpha)}{\alpha \sqrt{\pi} \Gamma(-p/2)} \quad (22)$$

根据式(20)~(22)可得

$$\frac{2^p \Gamma((p+1)/2) \Gamma(-p/\alpha)}{\alpha \sqrt{\pi} \Gamma(-p/2)} \gamma^{p/\alpha} = \gamma \quad (23)$$

对于给定的 α 和 γ ,上式无法得到 p 值的解析解,因此,可通过计算不同 p 值时上式两边的差值,选择差值最小时对应的 p 值。

5 实验结果与讨论

为检验本文方法检测性能,在仿真和实测数据条件下,根据不同的模型参数和目标多普勒频率,分别验证了幂变换抑制非高斯特性对检测性能的改善以及白化处理消除杂波相关性对检测性能的改善,并比较分析了本文方法与 MTD、LOD 的检测性能。

5.1 仿真数据条件下的性能分析

在仿真分析中,采用复 $S\alpha S$ 分布来描述非高斯相关杂波^[16]:

$$v(n) = \gamma^{1/\alpha} A^{1/2}(n) [G_1(n) + jG_2(n)] \quad (24)$$

式中: $A(n)$ 、 $G_1(n)$ 、 $G_2(n)$ 分别为独立过程 $\eta(n)$ 、 $g_1(n)$ 和 $g_2(n)$ 激励一阶自回归(Auto Regressive, AR)模型的输出,即

$$\begin{aligned} A(n) &= bA(n-1) + d_a \eta(n) \\ G_1(n) &= cG_1(n-1) + d_g g_1(n) \\ G_2(n) &= cG_2(n-1) + d_g g_2(n) \end{aligned} \quad (25)$$

式中: $\eta(n) \sim S_{\alpha/2}([\cos(\pi\alpha/4)]^{2/\alpha}, 1, 0)$, $g_1(n) \sim N(0, 2)$, $g_2(n) \sim N(0, 2)$, $d_a = (1 - b^{\alpha/2})^{2/\alpha}$, $d_g = \sqrt{1 - c^2}$ 。在仿真过程中,参数分别取值 $b = -0.1$, $c = -1$, $\gamma = 1$, α 分别取 2.0、1.75 和 1.5。利用 $\log|S\alpha S|$ 方法^[17]通过杂波样本对 γ 、 α 进行估计,分数低阶矩阶数 $p = 2, 0.5$ 和 0.3 。

设同一距离单元的观测信号为 $x(n) = s(n) + v(n)$, $n=0, 1, \dots, N-1$, 其中 $s(n) = ae^{j(2\pi f_d n + \varphi)}$, a 为信号幅度, f_d 为目标多普勒频率, 脉冲重复频率 $f_r = 1000\text{Hz}$, 初相 $\varphi = 0$, 相干脉冲间隔 $N = 64$ 。 $v(n)$ 为复 $S\alpha S$ 分布杂波。

理论上,由于复 $S\alpha S$ 分布不存在二阶谱密度,因此本文描述复 $S\alpha S$ 分布杂波谱应用文献[18]中复数形式的分数低阶协方差谱

$$S(e^{j\omega}) = \sum_{k=-(N-1)}^{N-1} \frac{\sum_{n=L_1}^{L_2} v(n+k)v^*(n)}{L_2 - L_1} e^{-j\omega k} \quad (26)$$

式中: $L_1 = \max(0, -k)$, $L_2 = \min(N-k, N)$ 。

图4为 $\alpha=1.5$ 时复 $S\alpha S$ 杂波的归一化分数低阶协方差谱曲线。从图中可以看出,复 $S\alpha S$ 分布杂波谱中心在多普勒零频处,杂波谱 3dB 带宽为 $[-32\text{Hz}, 32\text{Hz}]$, 由 AR 模型参数 b 、 c 控制。

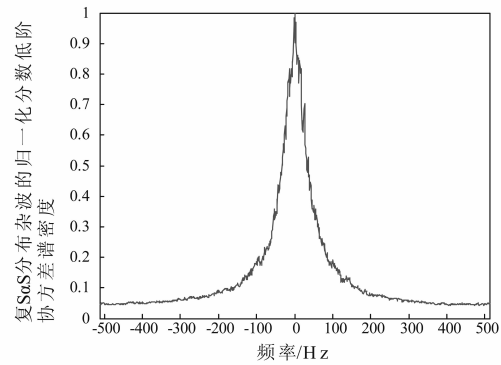


图4 复分布杂波的分数低阶协方差谱密度曲线(50次平均)

下面分析白化处理前后杂波和信号的谱特性。将图2中的白化处理看作白化滤波器,设独立杂波 $v(n) \sim N(0, \sigma_v^2)$ 作为滤波器的输入,则滤波输出信号的功率谱密度为

$$P(f) = \sigma_v^2 |H(f)|^2 \quad (27)$$

式中: $H(f)$ 为白化滤波器的频率响应。图5给出了白化处理的频率响应幅值曲线(样本数为 10^5 的平均曲线,下同),由于白化矩阵是根据杂波相关矩阵求出(式(10)),因此,频率响应自适应于杂波的谱特性。图6给出了杂波白化前后(式(11)中 \bar{v} 和 \tilde{v})功率谱曲线比较,从图6中可以看出,经过白化处理之后,杂波的功率谱基本为直线,相关杂波变换为独立杂波。图7给出了目标信号经白化处理前后(式(14)中 \bar{s} 和 \tilde{s})的功率谱曲线,其中, $f_{d1} = 62.5\text{Hz}$ (处于强杂波谱区), $f_{d2} = 375\text{Hz}$ (处于弱杂波谱区)。图8给出了观测信号白化前后(式(13)中 \bar{x} 和 \tilde{x})功率谱曲线,从图8中可以看出,白化处理较好地消除了杂波的相关性,而信号谱的谱峰始终处于目标多普勒频率处。

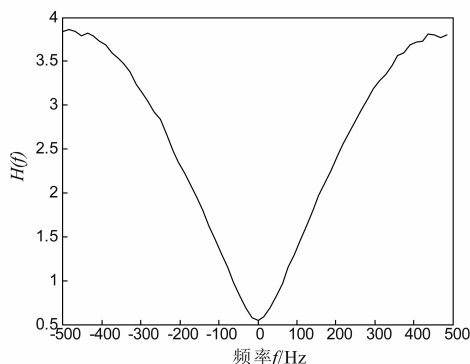


图5 白化处理的频率响应幅度谱曲线

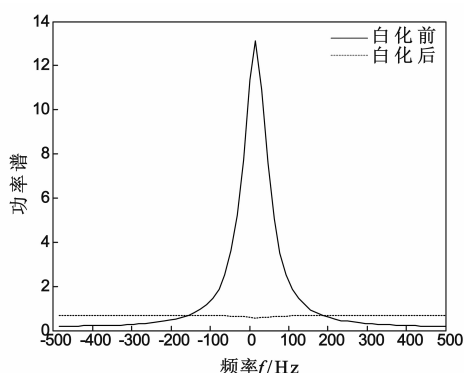


图6 杂波白化前后功率谱曲线

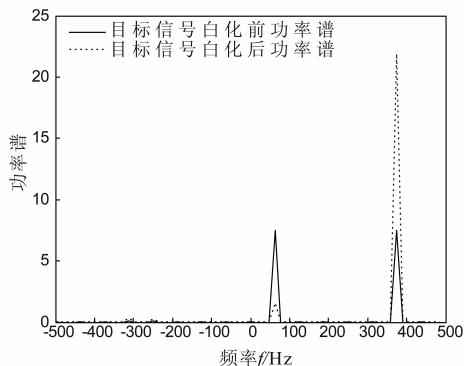


图7 目标信号白化前后功率谱曲线

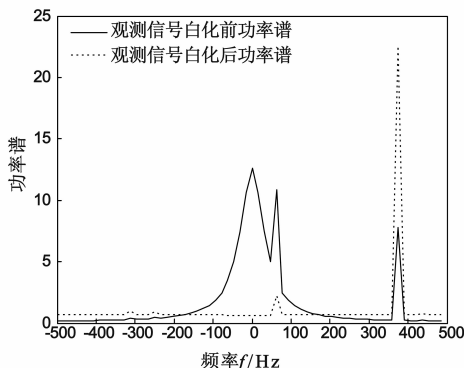


图8 观测信号白化前后功率谱曲线(SCR=-10dB)

为了综合分析本文方法的检测性能,根据图4杂波

分数低阶协方差谱密度曲线,在仿真中分别选取目标多普勒频率为 f_{d1} 和 f_{d2} ,在不同 α 参数条件下,给出了本文方法与MTD、LOD方法的检测性能曲线.仿真中虚警概率设为 $p_f = 10^{-3}$.

由于复 $S\alpha S$ 分布理论上不存在有限的方差,因此在检测仿真分析中采用文献[8]中定义的广义信杂比,对于式(5)中的观测信号,广义信杂比为^[8]:

$$GSCR = 10 \log \left(\frac{1}{\gamma N} \sum_{n=0}^{N-1} |s(n)|^2 \right) \quad (28)$$

为了分析比较本文方法与MTD的检测性能,图9给出了不同 α 参数和目标多普勒频率条件下两种方法的检测性能曲线.实验结果表明,当 $\alpha = 2, 1.75$ 和 1.5 ,目标多普勒频率为 f_{d1} 时,本文方法 $P_d = 0.5$ 时较MTD信杂比分别改善了约2.83dB、9.37dB、15.85dB;目标多普勒频率为 f_{d2} 时,本文方法 $P_d = 0.5$ 时较MTD信杂比分别改善了约4.54dB、9.97dB、16.59dB.

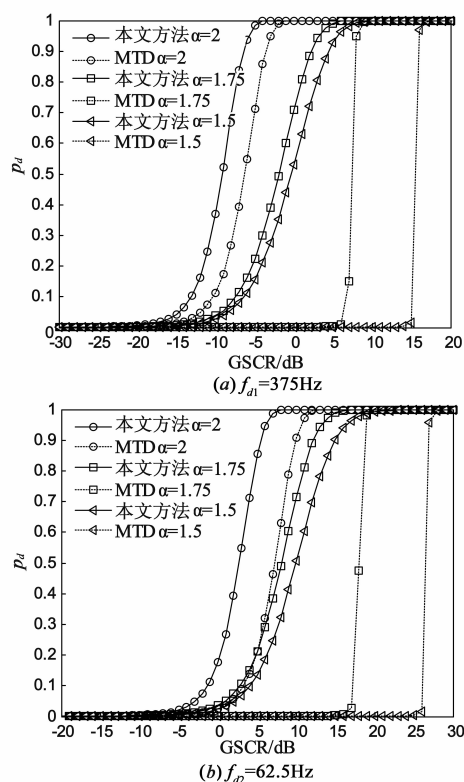


图9 本文方法与MTD检测性能的比较

为了进一步比较本文方法的检测性能,下面给出了本文方法与LOD的检测性能比较.基于K分布杂波的LOD的检测统计量为^[7]

$$\lambda_{\text{LOD}}(\mathbf{x}) = \mathbf{p}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{x} \frac{c K_{N-v+1}(c \sqrt{\mathbf{x}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{x}})}{\sqrt{\mathbf{x}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{x}} K_{N-v}(c \sqrt{\mathbf{x}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{x}})} \quad (29)$$

式中: \mathbf{p} 为信号导向矢量; \mathbf{R} 为杂波相关矩阵; $K_N(\cdot)$ 为

N 阶第二类修正贝塞尔函数; c 为 K 杂波尺度参数; v 为形状参数.

由式(29)可知, 基于 K 分布杂波的 LOD 结构由两部分组成, 其中, $\mathbf{p}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{x}$ 为高斯相关杂波背景下最优检测器, 余下部分为相应非线性权值, 其检测性能依赖于杂波尺度参数 c 、第二类修正贝塞尔函数 $K_N(\cdot)$ 和二次型 $\mathbf{x}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{x}$.

为了分析比较本文方法与 LOD 的检测性能, 图 10 给出了不同 α 参数和目标多普勒频率条件下两种方法的检测性能曲线. 实验结果表明, 当 $\alpha = 2, 1.75$ 和 1.5 , 目标多普勒频率为 f_{d1} 时, 本文方法 $P_d = 0.5$ 时较 LOD 信杂比分别改善了约 1.51dB 、 9.21dB 、 15.94dB ; 目标多普勒频率为 f_{d2} 时, 本文方法 $P_d = 0.5$ 时较 LOD 信杂比分别改善了约 4.95dB 、 8.88dB 、 13.44dB .

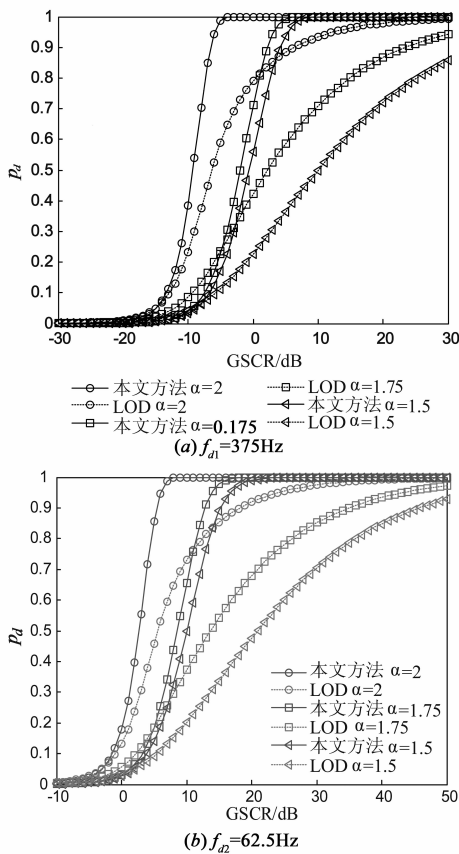


图 10 本文方法与LOD检测性能的比较

5.2 实测数据条件下的性能分析

实测数据为加拿大 McMaster 大学利用 IPIX (Intel-ligent PIXel processing) 雷达所采集的海杂波数据^[19], 为了验证本文方法检测性能, 首先选用了#310 组数据中的纯海杂波数据和仿真目标信号, 比较分析了不同信杂比、不同目标多普勒频率条件下本文方法与 LOD、MTD 的检测性能; 其次, 采用#310、#320 共 2 组带目标的海杂波数据, 比较分析了三种方法在目标单元的检

测性能.

为了验证本文方法的检测性能, 首先采用该雷达采集的#310 组数据, 其中包含 14 个距离单元, 每个距离单元由 131072 个采样样本组成. 仿真中取纯海杂波样本(样本数为 1310720)进行分析. 将本文方法应用于实测数据时, 需要对杂波参数进行估计, 利用 $\log |S\alpha S|$ 方法对杂波样本估计可得 $\alpha = 1.56$, $\gamma = 0.31$, 此时 $p = 0.74$.

图 11 给出了杂波样本的归一化分数低阶协方差谱密度曲线. 从图中可以看出, 由于海情(如海浪、海风等)的影响, 杂波谱存在频移和展宽, 杂波谱中心在 -99Hz 处, 主杂波谱 3dB 带宽为 $[-168\text{Hz}, -47\text{Hz}]$. 根据谱密度曲线, 仿真中分别选取目标多普勒频率处于强杂波谱区及边缘和弱杂波谱区三种情况进行分析, 因此目标多普勒频率分别取 $f_d = 375$ 、 -250 和 -187.5Hz , 其余信号参数取值同 5.1.

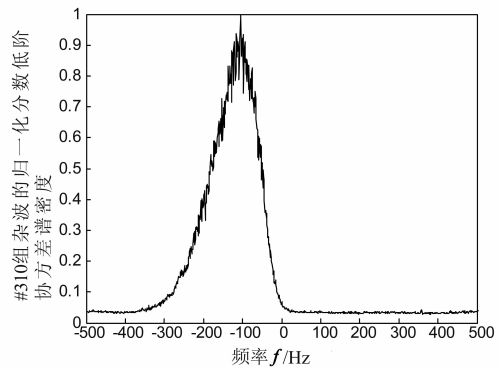


图 11 杂波样本的归一化分数低阶协方差谱密度曲线

为了分析比较本文方法与 MTD 的检测性能, 在实测数据条件下, 图 12 给出了不同目标多普勒频率条件下两种方法的检测性能曲线. 从图中可以看出, 当 $f_d = 375$ 、 -250 和 -187.5Hz , 本文方法在 $P_d = 0.5$ 时所需信杂比较 MTD 分别改善了约 9.00dB 、 7.41dB 和 4.25dB .

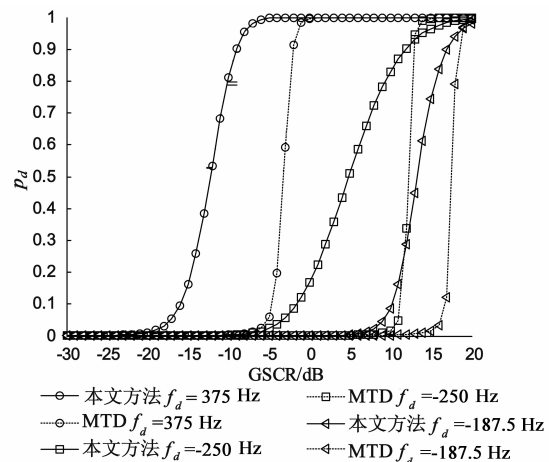


图 12 本文方法与MTD检测性能的比较

为了分析比较本文方法与 LOD 的检测性能,在实测数据条件下,图 13 给出了不同目标多普勒频率条件下两种方法的检测性能曲线.从图中可以看出,当 $f_d = 375$ 、 -250 和 -187.5 Hz 时,本文方法在 $P_d = 0.5$ 时所需信杂比较 LOD 分别改善了约 8.77 dB、3.86 dB 和 3.03 dB.

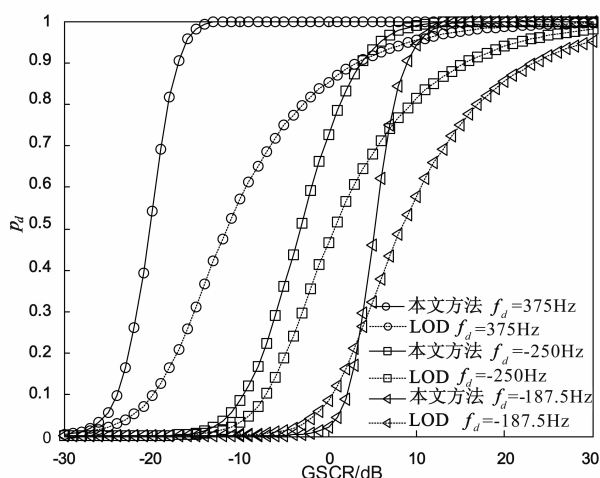


图13 本文方法与LOD检测性能的比较

为了进一步验证方法的检测性能,采用#310、#320共2组带目标的海杂波数据进行分析.待检测目标为1个直径1m的球形密封救生器,表面包了一层铝箔以增加雷达截面积.其中主目标单元均为第7距离单元,次目标单元为第6、8、9距离单元.分别采用每组数据的第1距离单元的纯海杂波数据作为参考单元数据,比较分析了本文方法与LOD、MTD在目标单元的检测性能.表1给出了三种方法在目标单元的检测概率.从仿真结果可以看出,三种方法在主目标单元的检测性能优于在次目标单元的检测性能,本文方法的检测性能明显优于LOD与MTD.

表1 本文方法与LOD、MTD在目标单元检测概率

	#310组海杂波数据				#320组海杂波数据			
	主目标单元	次目标单元			主目标单元	次目标单元		
		7	6	8		9	7	6
FLOMF	0.52	0.33	0.42	0.07	0.68	0.62	0.58	0.19
LOD	0.18	0.11	0.15	0.01	0.32	0.26	0.21	0.00
MTD	0.18	0.10	0.14	0.01	0.12	0.10	0.09	0.01

6 结论

非高斯相关杂波背景下的目标检测一直是雷达探测技术中的难点,本文基于分数低阶统计量理论,利用幂变换抑制杂波非高斯特性,利用杂波分数低阶协方差矩阵特征值分解的方法消除杂波的相关性,在此基

础上应用匹配滤波实现对目标信号的有效积累.实验结果表明,在非高斯相关杂波背景下,本文方法的检测性能优于MTD和LOD方法,且易于工程实现.

参考文献

- [1] 彭应宁,张文涵,王秀坛,等. 动目标检测(MTD)滤波器组的优化设计新算法[J]. 电子学报,1992,20(3):9-13.
Peng Ying-ning, Zhang Wen-han, Wang Xiu-tan, et al. A novel algorithm for optimal design of filter banks in MTD [J]. Acta Electronic Sinica, 1992, 20(3): 9-13. (in Chinese)
- [2] Sangston K J, Gini F, Greco M S. Coherent radar target detection in heavy-tailed compound-Gaussian clutter [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2012, 48(1): 64-77.
- [3] Fiche A, Cexus J C, Khenchaf A, et al. Characterization of the sea clutter with α -stable distribution [A]. IEEE International Conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) [C]. Munich: IEEE, 2012. 6059-6062.
- [4] Antipov I. Statistical analysis of northern Australian coastline sea clutter data [R]. Edinburgh: DSTO Electronics and Surveillance Research Laboratory, 2001.
- [5] Ollila E, Tayler D E, Koivunen V, et al. Compound-Gaussian clutter modeling with an inverse Gaussian texture distribution [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2012, 19(12): 876-879.
- [6] Conte E, Longo M, Lops M, et al. Radar detection of signals with unknown parameters in K-distributed clutter [J]. IEE Proceedings F, Radar and Signal Processing, 1991, 138(2): 131-138.
- [7] Chakravarthi P R, Weiner D D, Slamani M. Performance of the locally optimum detector in a correlated K-distributed disturbance [A]. IEEE National Radar Conference [C]. Boston: IEEE, 1993. 117-122.
- [8] Nikias C L, Shao M. Signal Processing with Alpha-Stable Distributions and Applications [M]. New York: Wiley, 1995.
- [9] 张金凤,邱天爽,唐洪. α 稳定分布噪声环境下 DLMP 算法的收敛特性分析 [J]. 电子学报, 2007, 35(3): 515-519.
Zhang Jin-feng, Qiu Tian-shuang, Tang Hong. Robustness analysis of DLMP algorithm under α -stable noise environments [J]. Acta Electronic Sinica, 2007, 35(3): 515-519. (in Chinese)
- [10] Tsihrintzis G A, Nikias C L. Evaluation of fractional lower-order statistics based detection algorithms on real radar sea-clutter data [J]. IEE Proceedings, Radar, Sonar and

- Navigation, 1997, 144(1): 29 – 38.
- [11] Briassouli A, Strintzis M G. Locally optimum nonlinearities for DCT watermark detection [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(12): 1604 – 1617.
- [12] Kuruoglu E E, Fitzgerald W, Rayner P. Near optimal detection of signals in impulsive noise modelled with a symmetric-stable distribution [J]. IEEE Communication Letters, 1998, 2(10): 282 – 284.
- [13] Ma X Y, Nikias C L. Joint estimation of time delay and frequency delay in impulsive noise using fractional lower order statistics [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996, 44(11): 2669 – 2687.
- [14] Hari K V S, Lalitha V. Subspace-based DOA estimation using fractional lower order statistics [A]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing [C]. Prague: IEEE, 2011. 2580 – 2583.
- [15] Yahong R Z, Vitor H N. Two variable step-size adaptive algorithms for Non-Gaussian interference environment using fractionally lower-order moment minimization [J]. IEEE Digital Signal Processing, 2013, 23(3): 831 – 844.
- [16] Szajnowski W J, Wynne J B. Simulation of dependent samples of symmetric alpha-stable clutter [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2001, 8(5): 151 – 152.
- [17] Swami A. Non-Gaussian mixture models for detection and estimation in heavy-tailed noise [A]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing [C]. Istanbul: IEEE, 2000. 3802 – 3805.
- [18] 朱晓波, 王首勇. α 稳定分布噪声下信号的分数低阶协方差谱估计 [J]. 空军雷达学院学报, 2006, 20(4): 266 – 269.
Zhu Xiao-bo, Wang Shou-yong. Fractional low-order covariance spectrum estimation of the signal under the α -stable distribution noise [J]. Journal of Air Force Radar Academy, 2006, 20(4): 266 – 269. (in Chinese)
- [19] Rembrandt B, Brian C. The McMaster IPIX radar sea clutter database [EB/OL]. <http://soma.ece.mcmaster.ca/ipix/dartmouth/datasets.html>. 2001.

作者简介



郑作虎 男, 1986 年生于山东潍坊. 空军预警学院重点实验室博士研究生. 研究方向为雷达信号处理.
E-mail: zhengzuohu@yeah.net



王首勇 男, 1956 年生于河南滑县. 空军预警学院重点实验室教授、博士生导师、中国电子学会高级会员. 主要研究方向为现代信号处理、雷达信号处理.