

# 基于谱范数的矩阵 CFAR 检测器

赵文静, 金明录, 刘文龙

(大连理工大学信息与通信工程学院, 辽宁大连 116024)

**摘 要:** 基于信息几何的矩阵恒虚警率 (Constant False Alarm Rate, CFAR) 检测器为雷达目标检测问题提供了新的解决思路, 其主要组成部分是均值矩阵的估计和检测统计量的计算, 且检测性能与矩阵流形上的几何测度有紧密关系. 现有的信息几何测度都是从 Frobenius 范数考虑, 本文则基于谱范数考虑了矩阵流形上的几何测度和均值矩阵估计问题. 将均值矩阵估计问题转化为矩阵流形上的优化问题, 根据目标函数的性质得到了计算简便的近似均值矩阵. 利用不同方法得到的均值矩阵, 提出了几种新的基于谱范数的矩阵 CFAR 检测器. 通过检测势分析和仿真实验验证了其检测性能优于现有的其他矩阵 CFAR 检测器, 复杂度分析也表明了其计算复杂度低于现有的其他矩阵 CFAR 检测器, 为海杂波背景下的雷达目标检测提供了新的有效技术手段.

**关键词:** 雷达目标检测; 恒虚警率; 海杂波; 信息几何

**中图分类号:** TN957.51

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112 (2019)09-1951-06

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.09.019

## Matrix CFAR Detector Based on Matrix Spectral Norm

ZHAO Wen-jing, JIN Ming-lu, LIU Wen-long

(School of Information and Communication Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

**Abstract:** Information geometry based matrix CFAR (Constant False Alarm Rate) detector provides a way to the problem of radar target detection, which mainly consists of the estimation of mean matrix and the calculation of test statistics. The detection performance is closely related to the geometric measures on the matrix manifold. The existing geometric measures are considered from Frobenius norm. By contrast, this paper considers the geometric measure and the estimation of mean matrix by utilizing matrix spectral norm on matrix manifold. The mean matrix estimation is transformed into the optimization problem on the matrix manifold. The approximate mean matrix with low computational complexity is obtained according to the properties of the objective function. In addition, we propose several matrix CFAR detectors based on different mean matrix estimation methods. Finally, the detection power analysis and simulation results show that the detection performance of the proposed methods with lower computational complexity are superior to other existing matrix CFAR detectors. It provides a new effective technique for radar target detection under sea clutter background.

**Key words:** radar target detection; constant false alarm rate (CFAR); sea clutter; information geometry

## 1 引言

信息几何作为数学的一个新的分支, 一直受到数学界及工业界的广泛关注. 它为研究统计问题的内在几何性质开辟了新的视角, 同时也为信号处理问题提供了有用的工具, 在图像处理、信号检测和参数估计等领域有广泛的应用<sup>[1-3]</sup>. 最近, 文献[4]将信息几何应用于雷达信号处理问题中, 提出了基于信息几何的矩阵 CFAR 检测方法. 这类检测器主要是将雷达目标检测问

题转化为由协方差矩阵构成的矩阵流形上的几何问题<sup>[5]</sup>, 其关键点是估计参考单元内协方差矩阵的均值矩阵及对两矩阵之间的不相似性度量. 因此, 矩阵流形上几何度量及均值矩阵的估计问题受到了广泛的关注.

矩阵流形上的几何度量表示流形上两个点的不相似度, 当其满足正定性、对称性及三角不等式时可以作为两个点之间的距离, 否则并不是真正意义上的距离. 黎曼距离作为流形上的经典度量具有完备的性质. 然而, 基于黎曼距离的矩阵 CFAR 方法的检测性能并不理

想. 文献[6~8]利用 Kullback-Leibler (KL) 散度, symmetrized Kullback-Leibler (sKL) 散度和 total Kullback-Leibler (tKL) 散度设计了改进的矩阵 CFAR 检测方法并得到较好的检测性能. 由于不同几何测度对应不同的检测性能, 因此, 一种直观的思想是采用其他几何测度估计均值矩阵及度量矩阵间的不相似性, 从而进一步提高检测性能.

均值矩阵估计是提高矩阵 CFAR 检测器性能的另一个关键点. 矩阵流形上均值矩阵的定义是欧氏空间中实数均值计算的一般化, 通过求解矩阵流形上的优化问题而获得, 其求解与矩阵流形上的几何测度有关<sup>[9]</sup>. 文献[9]利用几种类似于欧氏距离的几何测度考虑了协方差矩阵的估计问题, 并验证了几种协方差矩阵估计器的有效性. 以上几种矩阵估计都与矩阵 Frobenius 范数有关, 而矩阵谱范数也是一种比较常用的范数, 基于谱范数的协方差矩阵估计问题也是值得深入研究的<sup>[10]</sup>. 除此之外, 谱范数也被应用于雷达信号处理问题中. 特别地, 文献[11]从广义似然比角度考虑, 提出了基于最大特征值的雷达目标检测方法, 并取得较好的检测性能.

因此, 研究矩阵流形上是否存在其他几何测度以及基于这一几何测度求解矩阵流形上的均值矩阵问题是有意义的. 本文基于矩阵谱范数考虑了矩阵流形上的几何测度和均值矩阵估计问题, 并应用于雷达运动目标 CFAR 检测问题中, 从而提出几种新的矩阵 CFAR 检测算法.

## 2 基于谱范数的几何距离及均值矩阵

基于矩阵流形的几何方法将雷达目标检测问题转化为矩阵流形上的几何问题, 利用几何测度来分析和度量两个点之间的差异性. 本节给出了基于矩阵谱范数的几何度量及相应的均值矩阵估计器.

令  $\mathcal{M}$  表示由厄尔米特正定矩阵 (Hermitian Positive Definite, HPD) 构成的矩阵流形,  $\mathbf{R}$  为矩阵流形  $\mathcal{M}$  上 HPD 矩阵, 则  $\mathbf{R}$  的谱范数定义如下:

$$\|\mathbf{R}\|_2 = \sqrt{\lambda_{\max}(\mathbf{R}\mathbf{R}^H)} = \lambda_{\max}(\mathbf{R}) \quad (1)$$

相应的, 由矩阵谱范数诱导的两个 HPD 矩阵  $\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2$  之间的几何测度定义为

$$d(\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2) = \|\mathbf{R}_1 - \mathbf{R}_2\|_2 \quad (2)$$

显然, 式(2)满足正定性、对称性及三角不等式性质, 因此矩阵谱范数诱导的几何度量可以看作是矩阵流形上的几何距离.

设  $\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \dots, \mathbf{R}_N$  是矩阵流形  $\mathcal{M}$  上的一组协方差矩阵, 矩阵流形  $\mathcal{M}$  上的均值矩阵类似于欧氏空间中实数均值的定义, 可以通过求解下列目标函数的最小优化解获得:

$$f(\mathbf{R}) = \sum_{i=1}^N w_i d^2(\mathbf{R}, \mathbf{R}_i) \quad (3)$$

其中,  $N$  表示协方差矩阵的个数,  $w_i$  表示权重系数且满足  $\sum_{i=1}^N w_i = 1$ . 不失一般性, 假设  $w_i = 1/N$ .

相应的均值矩阵表示为:

$$\hat{\mathbf{R}} = \operatorname{argmin}_{\mathbf{R}} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d^2(\mathbf{R}, \mathbf{R}_i) \quad (4)$$

文献[9]考虑了基于 Frobenius 范数的协方差矩阵估计问题. 然而, 均值矩阵估计依赖于几何测度, 不同测度对应不同的矩阵估计器<sup>[7]</sup>. 基于谱范数距离的均值矩阵估计问题的目标函数表示为:

$$f(\mathbf{R}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|\mathbf{R} - \mathbf{R}_i\|_2^2 \quad (5)$$

且其优化解表示为:

$$\hat{\mathbf{R}} = \operatorname{argmin}_{\mathbf{R}} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|\mathbf{R} - \mathbf{R}_i\|_2^2 \quad (6)$$

基于式(5)的优化问题是矩阵流形上的凸优化问题. 梯度下降法是求解凸优化问题的有效方法,  $f(\mathbf{R})$  的梯度向量可以表示为:

$$\nabla f(\mathbf{R}) = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \|\mathbf{R} - \mathbf{R}_i\|_2 \cdot \nabla_{\mathbf{R}} \|\mathbf{R} - \mathbf{R}_i\|_2 \quad (7)$$

由于式(7)的解析表达式难以求解, 故采用 Matlab 中的优化工具箱求解式(6)的数值解. 但较高的计算复杂度会影响其在实际问题中的应用, 因此我们考虑以下近似方法求解这一问题.

目标函数式(5)满足如下关系:

$$\left\| \mathbf{R} - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{R}_i \right\|_2^2 \leq f(\mathbf{R}) \leq \|\mathbf{R}\|_2^2 + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|\mathbf{R}_i\|_2^2 \quad (8)$$

为了方便, 令

$$f_1(\mathbf{R}) = \left\| \mathbf{R} - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{R}_i \right\|_2^2, \quad (9)$$

$$f_2(\mathbf{R}) = \|\mathbf{R}\|_2^2 + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|\mathbf{R}_i\|_2^2$$

$f_1(\mathbf{R}), f_2(\mathbf{R})$  和  $f(\mathbf{R})$  的最小值满足式如下关系

$$\min f_1(\mathbf{R}) \leq \min f(\mathbf{R}) \leq \min f_2(\mathbf{R}) \quad (10)$$

因此, 优化问题式(6)可以近似的通过求解下列优化问题获得:

$$\min f_1(\mathbf{R}) = \min \left\| \mathbf{R} - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{R}_i \right\|_2^2 \quad (11)$$

式(11)的优化解表示为:

$$\hat{\mathbf{R}}_{\text{mean}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{R}_i \quad (12)$$

实际上, 式(6)是矩阵  $\mathbf{R}_i$  的聚类中心, 式(12)为矩阵  $\mathbf{R}_i$  的算术平均值. 如果  $\mathbf{R}_i$  是 i. i. d 分布, 则该聚类中心依概率收敛于均值矩阵. 且如果  $\mathbf{R}_i$  为各态历过程,

则式(12)的算术平均趋于均值矩阵. 因此, 式(12)可以作为优化解式(6)的近似解.

由于式(2)满足三角不等式, 则式(5)满足如下不等关系:

$$\left| \|R\|_2^2 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|R_i\|_2^2 \right| \leq f(R) \leq \|R\|_2^2 + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|R_i\|_2^2 \quad (13)$$

$$\text{令 } f_3(R) = \left| \|R\|_2^2 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|R_i\|_2^2 \right| \quad (14)$$

由于谱范数的梯度运算没有闭式解析式, 因此式(14)的最小优化解  $\hat{R}$  是难以获得的, 但是该解  $\hat{R}$  的谱范数容易求解, 且满足如下关系:

$$\|\hat{R}\|_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|R_i\|_2 \quad (15)$$

综上所述, 本文给出了三种不同的均值矩阵求解方法, 在谱范数框架下的均值矩阵估计问题可以归纳为如下优化问题:

$$\hat{R} = \operatorname{argmin}_R f(R)$$

当  $f(R)$  分别取式(5)、式(12)和式(14)时, 对应不同的均值矩阵估计方法, 由此可以引出三种基于谱范数的矩阵 CFAR 检测算法, 具体算法步骤在下一节说明.

### 3 基于谱范数的矩阵 CFAR 检测方法

#### 3.1 基于谱范数的矩阵 CFAR 器

不失一般性, 雷达目标检测问题可以表示为如下的二元假设检验问题<sup>[11,12]</sup>:

$$\begin{cases} H_0: \begin{cases} y = c \\ y_l = c_l, l = 1, 2, \dots, N \end{cases} \\ H_1: \begin{cases} y = ap + c \\ y_l = c_l, l = 1, 2, \dots, N \end{cases} \end{cases} \quad (16)$$

其中,  $a$  为目标回波信号的复幅度,  $p$  是目标信号的导向矢量,  $c$  表示待检测单元的海杂波向量,  $c_l$  为参考单元内的杂波数据.

针对检测问题式(16), 一般的矩阵 CFAR 检测器的检测机制如图 1 所示, 其主要组成部分是均值矩阵的估计、距离的计算和门限的确定.

不同几何测度可以引出不同的矩阵 CFAR 检测器. 本文考虑基于谱范数的均值矩阵和检测统计量的计算, 这类检测器统称为基于谱范数的矩阵 CFAR 检测器. 根据第 2 节中 3 种均值矩阵的估计方法, 得到三种基于谱范数的矩阵 CFAR 检测子算法, 分别记为算法 A、B、C, 具体算法步骤如算法 1 所述.

#### 算法 1 基于谱范数的矩阵 CFAR 检测器算法

1. 根据接收向量计算每一个单元内的协方差矩阵.
2. 估计均值矩阵

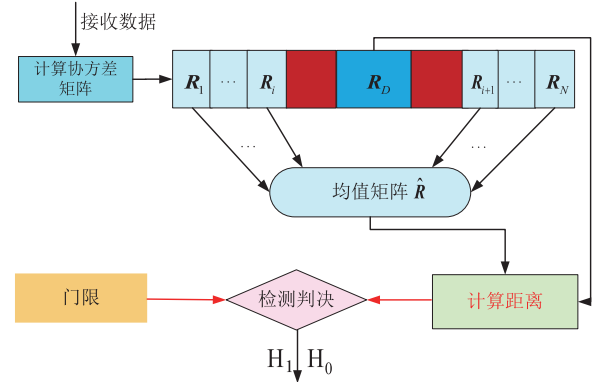


图1 矩阵CFAR检测器示意图

算法 A: 基于式(5)利用 Matlab 优化工具箱求解均值矩阵  $\hat{R}$

算法 B: 基于式(12)求解均值矩阵  $\hat{R}$

算法 C: 基于式(14)求解均值矩阵的谱范数  $\|\hat{R}\|_2$

#### 3. 计算检测统计量

算法 A、B: 根据式(2)计算检测单元矩阵和均值矩阵之间的谱范数距离

$$d_{SN}(R_D, \hat{R}) = \|R_D - \hat{R}\|_2$$

算法 C: 求解检测单元矩阵的谱范数和均值矩阵的谱范数之比

$$\|R_D\|_2 / \|\hat{R}\|_2$$

#### 4. 判决检测

为了方便, 将基于式(5)、式(12)估计均值矩阵的检测方法分别记为 SN, SNA. 对于 HPD 矩阵, 谱范数和最大特征值是等价的. 因此算法 C 实际上是从基于谱范数优化问题的近似求解中重新导出了文献[11]中的最大特征值的检测方法(M-MED), 并将其也纳入基于谱范数的矩阵 CFAR 检测器中, 有重要的意义.

#### 3.2 计算复杂度分析

为了简便, 将基于 KL 散度、Riemannian 距离及 tKL 散度的矩阵 CFAR 方法分别记为 KLD、REM 和 tKL. 本节比较并分析了所提方法与现有几种矩阵 CFAR 检测方法的计算复杂度. 以 tKL 方法为例, tKL 散度和 tKL 中心的计算复杂度分别为  $O(M! + 4M^3 + M + 22)$ ,  $O(NM! + (N+1)M^3 + (2N-1)M^2 + 10)$ , 因其需要求解矩阵逆矩阵及矩阵的行列式, 故引起较高的计算复杂度. 然而, 所提 SNA 方法不需要求解矩阵逆矩阵, 且均值矩阵估计比 tKL 方法简单. 因此, 与 tKL 方法相比, SNA 方法的计算复杂度较低. 类似的, 将所提方法与其他几种方法的计算复杂度进行比较, 结果如表 1 所示, 其中  $M$  为脉冲串长度,  $N$  为参考单元个数,  $n_i$  为迭代次数.

表 1 几种检测方法的计算复杂度

算法	指数运算	对数运算	幂运算	基本运算量
SNA	×	×	×	$O(M^3 + NM^2)$
M-MED	×	×	×	$O((N+1)M^3 + N)$
KLD	×	×	×	$O(M! + (N+3)M^3 + (N+1)M^2 + M - 1)$
REM	√	√	√	$O(n_t((3N+2)M^3 + NM^2) + 3M^3 + M - 1)$
tKL	×	√	×	$O((N+1)M! + (N+5)M^3 + (2N-1)M^2 + M + 32)$

### 3.3 矩阵 CFAR 检测器的检测势分析

矩阵 CFAR 检测器的检测性能与矩阵流形上的几何测度是紧密相连的,对于矩阵流形上不同的度量方法,其度量单位不同,而检测势的定义采用两距离之比避免了度量单位的影响.本文对所提检测器与现有的 tKL, KLD 及 REM 检测器的检测势进行分析,得出了所提方法的检测性能优于现有的矩阵 CFAR 检测方法的原因.

矩阵流形具有与欧氏空间不同的几何结构,其曲率沿着各个方向是不同的,使得矩阵流形上不同的几何测度具有不同的各向异性因子<sup>[7]</sup>.在任一矩阵  $R$  处的各向异性因子定义为:

$$AI = \min_{\alpha} d(R, \alpha I) \quad (17)$$

其中,  $d(R, \alpha I)$  表示矩阵  $R$  与  $\alpha I$  之间的距离,  $\alpha$  为常数.

假设在  $R_1$  和  $R_2$  处的各向异性因子分别为  $AI_1$  和  $AI_2$ ,  $R_1$  和  $R_2$  之间的检测势定义为  $R_1$  和  $R_2$  之间的各向异性因子之比:

$$D_p(R_1, R_2) = \frac{AI_1}{AI_2} \quad (18)$$

对矩阵 CFAR 检测器来说,  $R_1$  和  $R_2$  分别表示检测单元的协方差矩阵和参考单元协方差矩阵的均值矩阵.检测势的大小反映了检测单元的协方差矩阵与参考单元的均值矩阵在流形上的局部几何结构的相似程度.如果分母比分子大,则两点处的局部几何结构越相似,其检测势越大,反之,其检测势越小.文献[7]表明:矩阵 CFAR 检测方法的检测性能与检测势有较大的关系,检测势越大表明检测单元的协方差矩阵与均值矩阵越不相似,对应的检测性能越好.

根据以上分析,在 K 分布海杂波环境下,生成 50 个距离单元的杂波数据,并在第 25 个距离单元内加入信杂比为 10dB 的目标信号.根据式(18)求解每一个距离单元内的检测势,并对检测势进行归一化处理,得到归一化检测势.对基于谱范数的几何测度和现有几何测度的归一化检测势进行比较,结果如图 2 所示.在含有目标的距离单元中的检测势大于非目标距离单元的检

测势,说明非目标单元中的矩阵与其均值矩阵的局部几何结构相似,而目标单元越不相似.与现有几何测度相比,基于矩阵谱范数的几何测度的归一化检测势在非目标单元内具有最小的值,且目标单元与非目标单元差异性更大,这说明所提检测器具有较大的检测势,其对应较好的检测性能,下一节的仿真实验也进一步验证了这一结论.

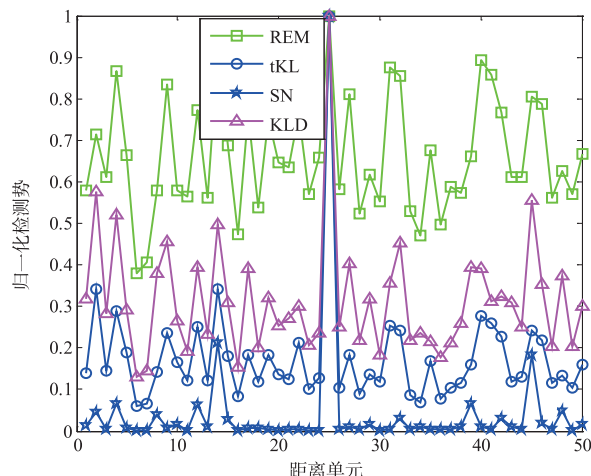


图2 几种矩阵CFAR检测器的检测势比较

## 4 仿真实验

### 4.1 基于仿真数据的实验

本文的仿真实验参数设置如下:虚警概率为  $10^{-3}$ , 脉冲重复频率为 1000Hz, 参考单元个数为 16, 在一个相干处理间隔内假设雷达发送 8 个脉冲, 且假设海杂波服从 K 分布. 图 3 展示了 SN, SNA, M-MED, KLD, REM 及 tKL 方法的检测概率随信杂比变化曲线. 从图 3 可知, M-MED 方法的性能比 KLD 和 tKL 方法的性能有一定的提高, 但 SN 和 SNA 方法的性能略优于 M-MED 方法. SNA 方法与 SN 方法的性能有微小的差别, 这说明了采用近似均值矩阵式(12)是比较准确的. SNA 方法不仅具有较低的计算复杂度且性能也有一定的提升, 这对于实际雷达目标检测具有重要的意义.

K 分布的形状参数反应了不同的海态, 形状参数越小表明海杂波环境越复杂, 海尖峰明显. 本文考虑了不同 K 分布形状参数(0.5、1 和 5)的仿真环境, 对所提方法与 tKL 方法进行比较, 结果如图 4 所示. 在每一种形状参数下, SN 方法的性能比 tKL 方法均有较大的提高.

### 4.2 基于实测数据的仿真实验

本节利用 1993 年 IPIX 雷达实测海杂波数据对几种算法的检测性能进行比较. 从图 5 中可知, 在 2 组数据下, 几种算法的性能各不相同, 其主要原因是 2 组杂波数据是在不同时刻, 不同外界环境下收集的海杂波

数据,反应了不同的海面状况.然而,在 2 组实测海杂波数据下,所提 SN 和 SNA 方法的检测性能优于其他几种

方法,这也进一步验证了所提方法的鲁棒性.

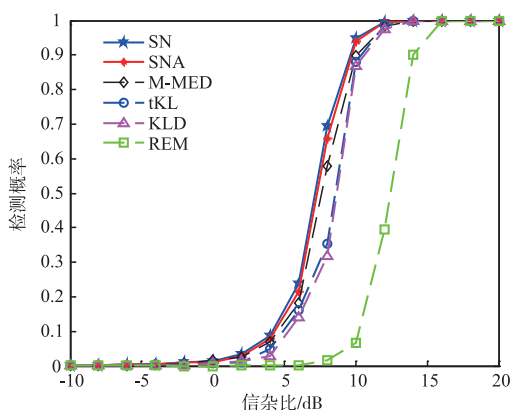


图3 K分布海杂波环境下几种算法的检测性能比较

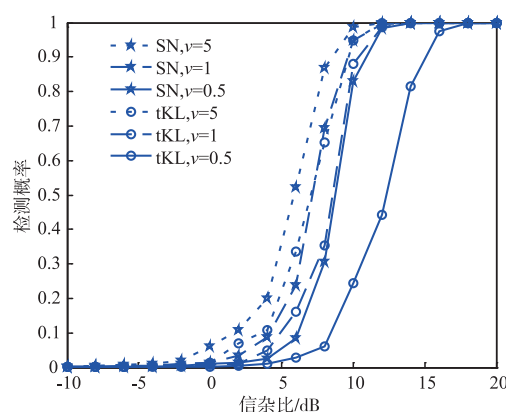
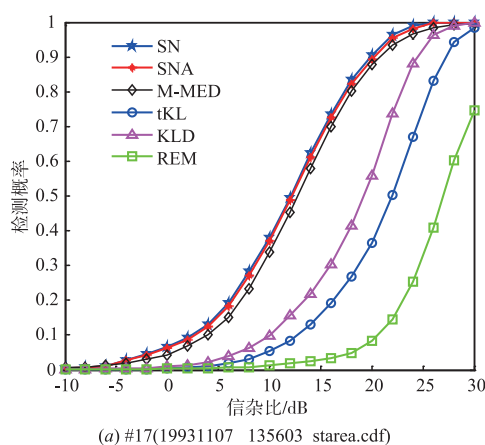
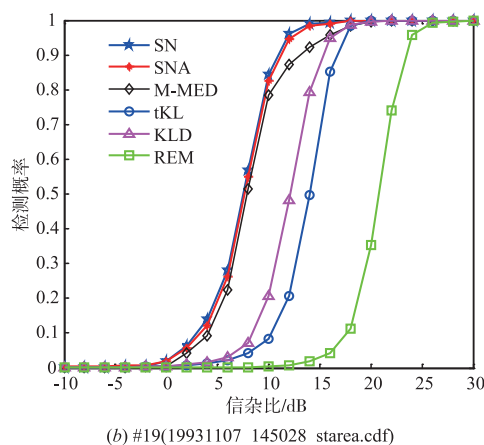


图4 在不同K分布形状参数下,所提方法与tKL方法的性能比较



(a) #17(19931107\_135603\_starea.cdf)



(b) #19(19931107\_145028\_starea.cdf)

图5 基于实测海杂波数据几种算法的检测性能比较

## 5 结论

在矩阵流形上,本文利用谱范数引入了新的几何测度,并讨论了均值矩阵的估计问题,进而提出了基于谱范数距离的矩阵 CFAR 检测器.检测势分析、基于仿真数据和实测数据的仿真结果都表明,所提矩阵 CFAR 检测器与现有的矩阵 CFAR 检测器相比具有更好的性能.但是,基于谱范数距离的均值矩阵求解复杂,无解析表达式.为此,根据基于谱范数的均值矩阵优化目标函数的不等式关系,给出了近似的均值矩阵估计方法,并提出了低复杂度的矩阵 CFAR 检测器,且其性能已逼近 SN 方法.此外,根据目标函数的另一种不等式关系,把已有的 M-MED 方法也纳入到基于谱范数的矩阵 CFAR 检测器中,有重要的意义.本文提出的基于谱范数的 CFAR 检测器拓展了信息几何在雷达信号处理中的应用,为海杂波背景下的雷达目标检测提供了新的有效技术手段.

## 参考文献

[1] 黎湘,程永强,王宏强,等.信息几何理论与应用研究进

展[J].中国科学:信息科学,2013,43(6):707-732.

[2] 孙华飞,彭林玉,张真宁.信息几何及其应用[J].数学进展,2011,40(3):257-269.

[3] AMARI S I. Information Geometry and Its Applications [M]. Tokyo, Japan: Springer, 2016. 1-12.

[4] ARNAUDON M, BARBARESCO F, YANG L. Riemannian medians and means with applications to radar signal processing[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2013, 7(4): 595-604.

[5] CHENG Y Q, HUA X Q, WANG H Q, et al. The geometry of signal detection with applications to radar signal processing[J]. Entropy, 2016, 18(11): 1-17.

[6] 赵兴刚,王首勇.基于 K-L 散度和散度均值的改进矩阵 CFAR 检测器[J].中国科学:信息科学,2017,47(2):247-259.

[7] HUA X Q, CHENG Y Q, WANG H Q, et al. Geometric means and medians with applications to target detection [J]. IET Signal Processing, 2017, 11(6): 711-720.

[8] HUA X Q, CHENG Y Q, WANG H Q, et al. Matrix CFAR detectors based on symmetrized Kullback-Leibler and total



- Kullback-Leibler divergences [J]. Digital Signal Processing, 2017, 69: 106 – 116.
- [9] CUI G L, LI N, PALLOTTA L, et al. Geometric barycenters for covariance estimation in compound-Gaussian clutter [J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2017, 11 (3): 404 – 409.
- [10] AUBRY A, DE MAIO A, PALLOTTA L. A geometric approach to covariance matrix estimation and its applications to radar problems [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2018, 66 (4): 907 – 922.
- [11] 赵文静, 刘畅, 等. K 分布海杂波背景下基于最大特征值的雷达信号检测算法 [J]. 电子与信息学报, 2018, 40 (9): 2235 – 2241.
- Zhao Wen-jing, Liu Chang, et al. Maximum eigenvalue based radar signal detection method for K distribution sea clutter environment [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2018, 40 (9): 2235 – 2241. (in Chinese)
- [12] ZHAO W J, JIN M L, LIU W L. A modified matrix CFAR detector based on maximum eigenvalue for target detection in the sea clutter [A]. 2018 IEEE Radar Conference [C]. Oklahoma, USA: IEEE, 2018. 0896 – 0901.

## 作者简介



**赵文静** 女, 1990 年 1 月出生于辽宁省朝阳市. 博士. 主要研究方向为信息几何、信号处理及目标检测.

E-mail: wenjingzhao2015@mail.dlut.edu.cn



**金明录** 男, 1958 年 2 月出生于吉林省图们市. 现为大连理工大学信息与通信工程学院教授、博士生导师, 从事信号处理与通信系统基础理论与技术方面的研究工作.

E-mail: mljin@dlut.edu.cn



**刘文龙** 男, 1974 年 12 月出生于辽宁省大连市. 现为大连理工大学信息与通信工程学院教授、博士生导师. 从事 MIMO 及 SM 系统检测问题等方面的研究工作.

E-mail: liuwl@dlut.edu.cn