

基于对数行列式散度与对称对数行列式散度的高频地波雷达目标检测器

叶磊^① 王勇^{①②} 杨强^{*①②} 邓维波^{①②}

^①(哈尔滨工业大学电子与信息工程学院 哈尔滨 150001)

^②(对海监测与信息处理工业和信息化部重点实验室 哈尔滨 150001)

摘要: 高频地波雷达(HFSWR)利用电磁波绕射原理进行目标探测,具有超视距的特性。然而,探测距离的增加会使得雷达目标回波能量减弱,进而使得雷达探测能力下降。为了改善高频地波雷达的探测性能,该文提出了一种基于信息几何理论的局域联合矩阵恒虚警率(CFAR)检测器,利用信号在角度、多普勒速度和距离的多维信息进行检测;并使用对数行列式散度(LDD)和对称对数行列式散度(SLDD)代替黎曼距离(RD)作为距离度量。最后,实验结果验证了该文提出的检测器能够有效地改善雷达对目标的检测性能。

关键词: 高频地波雷达; 目标检测; 信息几何; 对数行列式散度

中图分类号: TN958.93

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)08-1931-08

DOI: 10.11999/JEIT181078

High Frequency Surface Wave Radar Detector Based on Log-determinant Divergence and Symmetrized Log-determinant Divergence

YE Lei^① WANG Yong^{①②} YANG Qiang^{①②} DENG Weibo^{①②}

^①(School of Electronics and Information Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

^②(Key Laboratory of Marine Environmental Monitoring and Information Processing, Ministry of Industry and Information Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: High Frequency Surface Wave Radar (HFSWR) utilizes electromagnetic wave diffracting along the earth to detect targets over the horizon. However, the increase of target distance decreases the received echo energy, and this degrades the detection capability. A joint domain matrix Constant False Alarm Rate (CFAR) detector is proposed to improve the detection performance. It employs the multi-dimensional information of signal in azimuth, Doppler velocity and range domain to detect target, and Log-Determinant Divergence (LDD) and Symmetrized Log-Determinant Divergence (SLDD) are used to replace the Riemannian Distance (RD) as the measure of distance. Finally, the experiment results show that the detector presented by the paper can improve the detection performance effectively.

Key words: High Frequency Surface Wave Radar (HFSWR); Target detection; Information geometry; Log-Determinant Divergence (LDD)

1 引言

高频地波雷达(High Frequency Surface Wave

Radar, HFSWR)在高频波段(3~30 MHz)利用垂直极化电磁波绕海洋表面传播,实现对海面舰船以及低空飞行的飞机的探测与跟踪,其具有全天候、探测范围大以及超视距的优点^[1,2]。然而由于杂波的影响以及探测目标距离的增加,目标的回波能量变小,从而导致信号与干扰噪声比(Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR)变低。这就使得在相同虚警概率的情况下,雷达对目标的检测概率降低。因此,在这些情况下如何提高对目标的检测能力,对高频地波雷达而言具有重要的实际意义与应用价值。

收稿日期: 2018-11-23; 改回日期: 2019-04-23; 网络出版: 2019-04-28

*通信作者: 杨强 yq@hit.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61701140, 61571159, 61171182), 中央高校基本科研业务费专项资金(HIT.MKSTISP.2016 13, HIT.MKSTISP.2016 26)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61701140, 61571159, 61171182), The Fundamental Research Funds for the Central Universities (HIT.MKSTISP.2016 13, HIT.MKSTISP.2016 26)

为了提升HFSWR的探测性能,许多不同种类的方法已经被提出^[3-5]。其中,文献^[3]提出了一种基于统计分析理论的异常值剔除的检测方法,该方法能在一定程度上减少虚警的情况,但是对SINR较低的目标其探测性能改善不大。Turley^[4]提出了一种使用峰值检测和序贯检测结合的方法,实现自适应检测。Li等人^[5]提出了一种基于背景感知技术的目标检测方法,将检测背景分为不同的检测区域实现多策略检测,该方法能够利用在角度-多普勒域的信号2维信息进行探测,优化了检测性能。

本文提出一种基于信息几何理论的多维信息检测方法,以此来进一步提升雷达对目标的检测性能。本方法将速度-角度-距离的3维数据信息投影到黎曼流形上,通过比较检测单元与参考单元在流形空间上的几何距离来判断是否存在目标,这样就将1维的幅度检测或2维的信号检测扩展到了多维度的信息检测。利用更多维度的信息,可以更好地将目标与背景信息进行分离,从而能够有效地提升对目标的探测能力。

本文所提多维检测方法,首先通过空时局域联合(Joint Domain Localized, JDL)处理获得信号的角度-多普勒维度信息。局域联合处理方法是一种降低维度的空时自适应处理算法,最早应用于机载雷达中对地杂波进行杂波抑制^[6],之后还应用在岸基和舰载高频地波雷达的杂波抑制中^[7,8]。本文主要利用局域联合处理获得信号的多维信息,然后基于局域联合处理区域(Localized Processing Region, LPR)数据的协方差矩阵结合信息几何理论,在距离维度上构建矩阵恒虚警率检测器。信息几何理论最早是由科学家Rao^[9]提出来的,它是一种基于信息论、几何学和统计学知识相结合的新兴理论。在Rao之后有大量的学者对其进行研究并将其应用于统计推断、神经网络、模式分析、信号处理等等领域^[10-13]。本文利用信息几何理论将获得的协方差矩阵投影到黎曼流形上,通过比较检测单元与参考单元均值间的距离来判断检测单元是否存在目标。

本文主要针对高频地波雷达的回波信号,对其进行空时局域联合处理,并构建矩阵恒虚警率检测器,以此提升雷达的探测性能。第2节介绍对回波信号的空时局域联合处理方法,得到信号的角度-多普勒维度的处理结果;第3节在角度-多普勒域的数据基础上,利用信息几何理论在距离域构建矩阵恒虚警率检测器;第4节实验验证和结果分析;最后总结全文。

2 局域联合处理方法

假设高频地波雷达的接收阵列是具有 N 个阵元的线性均匀阵列,如图1所示。

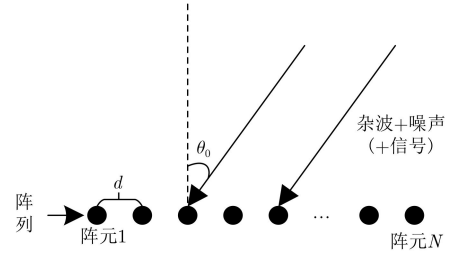


图1 雷达接收阵列

为了简单起见,本文假设天线阵元是相同的、共线的且具有相同的间距 d ;并且相干脉冲序列的脉冲具有一个相同的脉冲重复频率,在一个相干间隔内每个阵元都有 M 个脉冲。每一个接收阵元接收到的时域采样信号为 $\mathbf{x}_{tn} = [\mathbf{x}_{tn1}, \mathbf{x}_{tn2}, \dots, \mathbf{x}_{tnM}]^T$,每一个脉冲对应的阵元通道采样数据为 $\mathbf{x}_{sm} = [\mathbf{x}_{sm1}, \mathbf{x}_{sm2}, \dots, \mathbf{x}_{smN}]^T$,这样, $N \times M$ 维的数据矩阵 \mathbf{X} 可以被表示为

$$\mathbf{X} = [\mathbf{x}_{t1} \mathbf{x}_{t2} \dots \mathbf{x}_{tN}] = [\mathbf{x}_{s1}^T \mathbf{x}_{s2}^T \dots \mathbf{x}_{sM}^T]^T \quad (1)$$

其中,行向量 $[\mathbf{x}_{t1} \mathbf{x}_{t2} \dots \mathbf{x}_{tN}]$ 表示 N 个阵元通道的采样数据,列向量 $[\mathbf{x}_{s1}^T \mathbf{x}_{s2}^T \dots \mathbf{x}_{sM}^T]^T$ 表示 M 个脉冲采样数据。

在没有目标的 H_0 的假设条件下,接收数据回波矩阵 \mathbf{X} 只包含杂波和噪声信息

$$\mathbf{X} = \mathbf{C} + \mathbf{N} \quad (2)$$

其中, \mathbf{C} 表示杂波回波, \mathbf{N} 表示噪声。在有目标的 H_1 的假设条件下,接收数据回波矩阵 \mathbf{X} 在包含杂波和噪声的信息外还包含了信号信息

$$\mathbf{X} = \alpha \mathbf{S} + \mathbf{C} + \mathbf{N} \quad (3)$$

其中, α 代表一个未知的复数常量,表示信号的回波幅度, \mathbf{S} 代表一个已知的信号形式。本文称矩阵 \mathbf{X} 为在假设检验条件下从距离单元上定义的原始数据集。在局域联合处理的方法中,本文将对此原始数据集做空时处理,即计算出不同角度-多普勒的空时导向矢量,将导向矢量信息加到原始数据集上,从而可以获得其在角度-多普勒维度上的数据信息。因此在多普勒频率 f_{d0} 和角度 θ_0 处的输出,可由式(4)–式(7)得出

$$y_0(\theta_0, f_{d0}) = \mathbf{w}^H \mathbf{X} \quad (4)$$

$$\mathbf{w} = \mathbf{w}_s(\theta_0) \otimes \mathbf{w}_t(f_{d0}) \quad (5)$$

$$\mathbf{w}_s(\theta_0) = e^{j2\pi(d/\lambda) \cos(\theta_0)} [0 \ 1 \ \dots \ N-1]^T \quad (6)$$

$$\mathbf{w}_t(f_{d0}) = e^{j2\pi f_{d0} T_p} [0 \ 1 \ \dots \ M-1]^T \quad (7)$$

其中, $\mathbf{w}_s(\theta_0)$ 是 θ_0 角度对应的空间导向矢量, $\mathbf{w}_t(f_{d0})$ 为 f_{d0} 多普勒频率对应的时间导向矢量。且其中 d 是阵元间距, λ 为波长, T_p 为脉冲重复周期, \otimes 表示

克罗内克积， \mathbf{w}^H 为 \mathbf{w} 的共轭转置， $y_0(\theta_0, f_{d0})$ 为在 θ_0 与 f_{d0} 处的计算结果。这样利用以上推导，本文就可以得出时域数据在不同角度-多普勒的输出结果。

局域联合处理是一种在多普勒-角度域上对数据进行处理的方法。信号矢量通过式(4)所示的变换转换到多普勒-角度域上的一个点。如图2(a)所示，一个LPR是由当前信号点以及其周围共 $n_d \times n_a$

个点构成的， n_a 表示选取的角度单元个数， n_d 表示选取的多普勒单元的个数。图2(b)描述了在当前LPR前后选取两个保护单元以及 N 个距离单元数据做杂波估计区域。对于高频地波雷达而言，目标信息在相邻的前后两个角度单元以及多普勒单元扩散较为明显，所以，在选择局域联合处理区域时， n_a 和 n_d 都可以设置为3。

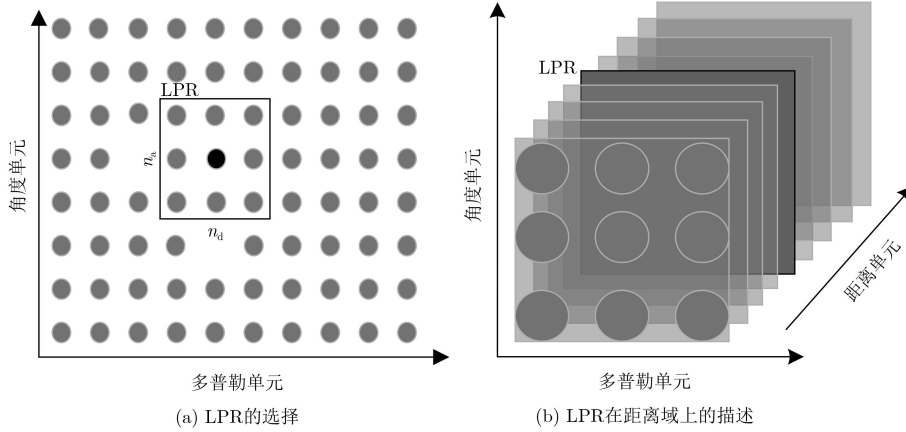


图2 局域联合处理区域

LPR区域内的 $n_d \times n_a$ 数据可以变换成一个 $n_d \times n_a \times 1$ 维度的数据矢量 \mathbf{Y}_n ，则 $\mathbf{R}_n = E[\mathbf{Y}_n \mathbf{Y}_n^H]$ 是其对应的协方差矩阵估计，它可以被表示为

$$\mathbf{R}_n = \begin{bmatrix} c_0 & c_1^* & \cdots & c_{n-1}^* \\ c_1 & c_0 & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & c_1^* \\ c_{n-1} & \cdots & c_1 & c_0 \end{bmatrix}, c_k = E[y_n y_{n-k}^*] \quad (8)$$

由式(8)本文得到的数据协方差矩阵为一正定的Hermite矩阵。根据信息几何理论可知，正定的Hermite矩阵可以构成一个具有负曲率的黎曼流形^[4]。以此可以在黎曼流形上构建矩阵恒虚警率检测器，对目标的有无进行判断。

3 矩阵恒虚警率检测器

在由正定的Hermite矩阵构成的流形中，可以首先计算各个参考单元对应的协方差矩阵的均值 $\bar{\mathbf{R}}$ ，然后将利用协方差矩阵在流形上的几何距离，计算检测单元 \mathbf{R}_D 和参考单元均值 $\bar{\mathbf{R}}$ 间的距离，与门限比较给出判决结果。图3给出了矩阵恒虚警率检测器的几何解释。

当检测单元的LPR中没有目标时，检测单元与杂波参考单元具有相同的分布参数，所以其在黎曼流形上表现为具有最近的几何距离。而当检测单元LPR中具有目标时，其分布特性与背景杂波差异较大，这样就使得检测单元的协方差矩阵与参考单元均值的协方差矩阵间的距离较远。所以其判决准则为

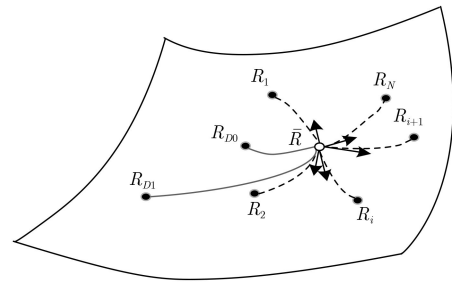


图3 矩阵恒虚警率检测的几何解释

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{H}_1 &= \text{dist}(\mathbf{R}_D, \bar{\mathbf{R}}) > T \\ \mathbf{H}_0 &= \text{dist}(\mathbf{R}_D, \bar{\mathbf{R}}) < T \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

其中， $\text{dist}(\cdot, \cdot)$ 表示两个矩阵间的几何距离， T 代表根据给定的虚警概率得到的检测门限。 \mathbf{H}_1 表示有目标存在， \mathbf{H}_0 为无目标存在。

图4描述了局域联合矩阵恒虚警率检测器的结构。其详细的处理流程如下：

- (1) 利用局域联合处理方法获得不同距离上回波数据的角度-多普勒信息；
- (2) 在当前距离门的检测单元周围选择3个相邻的角度单元与3个相邻的多普勒单元，获得检测单元的LPR数据矩阵；
- (3) 在检测单元前后距离门各设置一个保护单元，并在保护单元前后分别选取 $N/2$ 个距离单元作为进行杂波水平估计的参考单元，获得其LPR数据矩阵；

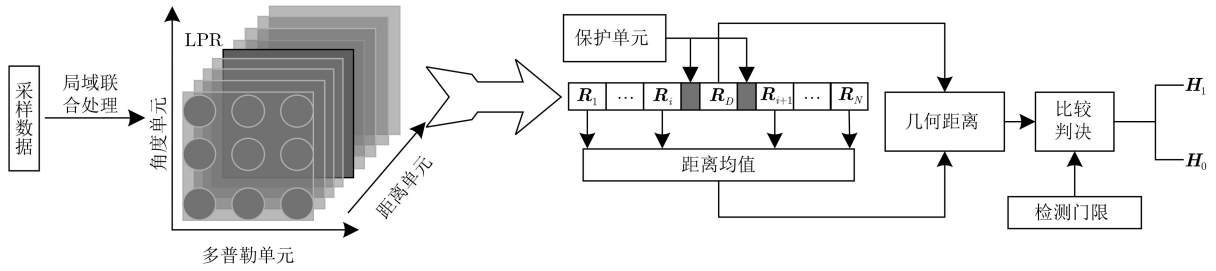


图4 局域联合矩阵恒虚警率检测器结构

(4) 将所获得的数据矩阵转化为 9×1 维的数据矢量，并利用式(8)的方法估计其协方差矩阵，得到正定的Hermit矩阵；

(5) 计算参考单元协方差矩阵在黎曼流形上的几何距离均值矩阵 \bar{R} ；

(6) 计算检测单元 R_D 与 \bar{R} 间的几何距离，并与门限做比较判断当前检测单元是否存在目标；

(7) 按照步骤(2)–步骤(6)，在距离-角度-多普勒进行循环检测，判断各检测单元中是否存在目标。

这样在构建检测器的过程中利用了信号在角度、多普勒以及距离上的多维度信息，代替了传统恒虚警率检测器只是利用信号能量信息进行目标检测，可以更容易地判断检测单元是否存在目标。

在局域联合矩阵恒虚警率检测器中，矩阵间的几何距离以及其距离均值是两个需要被认真研究的重要概念。

3.1 矩阵距离

在欧式空间中，两点之间最短的距离是连接两点间的直线距离，与之类似在黎曼流形空间中，两点间的最短距离是连接两点间测地线的距离。测地距离考虑了流形的空间几何结构，是流形空间一种基本的度量方法，为检测器设计提供了基础。可以利用黎曼度规计算出测地线的长度，因此测地线长度也被称为黎曼距离(Riemannian Distance, RD)。黎曼距离是欧氏空间中的线段在黎曼空间的拓展，其计算方法为^[15]

$$\begin{aligned}
 D_R^2(\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2) &= \|\lg(\mathbf{R}_1^{-1}\mathbf{R}_2)\|_F^2 \\
 &= \|\lg(\mathbf{R}_1^{-1/2}\mathbf{R}_2\mathbf{R}_1^{-1/2})\|_F^2 \\
 &= \text{tr}[\lg^2(\mathbf{R}_1^{-1/2}\mathbf{R}_2\mathbf{R}_1^{-1/2})] \\
 &= \sum_{i=1}^n \lg^2(\lambda_i)
 \end{aligned} \tag{10}$$

其中， λ_k 是矩阵 $\mathbf{R}_1^{-1/2}\mathbf{R}_2\mathbf{R}_1^{-1/2}$ 的特征值，并且 $\|\mathbf{R}\|_F^2 = \langle \mathbf{R}, \mathbf{R} \rangle = \text{Tr}(\mathbf{R}\mathbf{R}^T)$ 。

为了进一步提升检测性能，本文引入了对数行列式散度(Log-Determinant Divergence, LDD)和

对称对数行列式散度(Symmetrized Log-Determinant Divergence, SLDD)代替黎曼距离作为距离度量。

3.1.1 对数行列式散度

对数行列式散度又叫做Stein损失(Stein's loss)^[16]，在信息论、统计学以及机器学习等领域应用广泛。两个矩阵间的对数行列式散度被定义为

$$\begin{aligned}
 D_{LD}(\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2) &= \text{tr}(\mathbf{R}_2^{-1}(\mathbf{R}_1 - \mathbf{R}_2)) - \ln \det(\mathbf{R}_2^{-1}\mathbf{R}_1) \\
 &= \sum_{i=1}^n (\lambda_i - \ln \lambda_i - 1)
 \end{aligned} \tag{11}$$

其中， λ_i 是矩阵 $\mathbf{R}_2^{-1}\mathbf{R}_1$ 的特征值。对数行列式散度可以用来度量不同分布之间的差异，但它不是一种严格的距离定义。因为其不满足三角不等性以及对称性。从式(11)中也可以看出，两个矩阵的不同顺序会得到不同的散度结果。尽管如此，在黎曼流形上，对数行列式散度也是一种有效的度量不同矩阵间差异的方法。

3.1.2 对称对数行列式散度

由于对数行列式散度不具有三角不等性以及对称性，本文引入了对称对数行列式散度的概念。它可以将对数行列式散度转变为满足距离定义的概念。其定义式为

$$\begin{aligned}
 D_{SLD}(\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2) &= \frac{1}{2} (D_{LD}(\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2) + D_{LD}(\mathbf{R}_2, \mathbf{R}_1)) \\
 &= \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^n (\lambda_i - \ln \lambda_i - 1) + \sum_{k=1}^n (\eta_k - \ln \eta_k - 1) \right)
 \end{aligned} \tag{12}$$

其中， λ_i 是矩阵 $\mathbf{R}_2^{-1}\mathbf{R}_1$ 的特征值， η_k 是矩阵 $\mathbf{R}_1^{-1}\mathbf{R}_2$ 的特征值。利用式(12)可以将对数行列式散度变为对称的，从而满足距离的三角不等性及对称性。

3.2 距离均值

在矩阵恒虚警率检测器中矩阵距离均值是另一个十分重要的概念，也可称之为在黎曼流形上的几何均值。它是参考单元矩阵的平均，是对当前检测背景的杂波和噪声水平的估计。Pennec定义了流形上的几何均值的概念，Karcher证明了对于非正曲

率流形其几何均值的存在性和唯一性^[15,17]。几何均值是在流形上让由经验方差定义的目标函数达到局部最小值的一种平均算法，其表达式可被表示为

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{R}} &= \arg \min_{\mathbf{R} \in \mathbb{P}(n)} F(\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \dots, \mathbf{R}_N) \\ &= \arg \min_{\mathbf{R} \in \mathbb{P}(n)} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \text{dist}^2(\mathbf{R}_k, \mathbf{R}) \end{aligned} \quad (13)$$

其中， $\mathbb{P}(n)$ 表示 n 阶正定Hermite矩阵所构成的黎曼流形， F 表示由经验方差定义的目标函数， $\text{dist}(\cdot, \cdot)$ 表示两个矩阵间的距离， $\bar{\mathbf{R}}$ 为计算得到的几何均值。这样就可以根据不同的距离度量方法，得到对应的几何均值结果。

黎曼均值是在以黎曼距离为度量时得到的几何均值结果，基于雅可比场可以得到一种有效的迭代算法计算黎曼均值^[18]，其计算方法为

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{R}}_{t+1} &= \bar{\mathbf{R}}_t^{\frac{1}{2}} \exp \left[-\text{ds} \cdot \bar{\mathbf{R}}_t^{-\frac{1}{2}} \cdot F \cdot \bar{\mathbf{R}}_t^{-\frac{1}{2}} \right] \bar{\mathbf{R}}_t^{\frac{1}{2}} \\ &= \bar{\mathbf{R}}_t^{\frac{1}{2}} \exp \left[\text{ds} \cdot \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \lg \left(\bar{\mathbf{R}}_t^{-\frac{1}{2}} \mathbf{R}_i \bar{\mathbf{R}}_t^{-\frac{1}{2}} \right) \right] \bar{\mathbf{R}}_t^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (14)$$

其中， $\bar{\mathbf{R}}_t$ 表示前一次迭代时的计算结果， $\bar{\mathbf{R}}_{t+1}$ 表示当前迭代次数对应的计算结果， ds 表示步进长度。

图5(a)描述了在以单位矩阵 \mathbf{I} 为初始迭代矩阵时，方差随迭代次数变化的结果。从中可以看出，方差随迭代次数的增加而减小，当迭代次数达到一定值时，方差基本趋于平稳。因此，通过选取合适的迭代次数，该方法能够有效地计算出矩阵的黎曼均值。为了进一步进行量化说明，图5(b)给出了以20次迭代时对应的方差为基准值，6~20次迭代得到的方差与基准值的相对误差。从中可以看出，迭代次数在6~8次之间时，方差计算结果有较大的误差；当迭代次数达到10次时，相对误差在2%以下；当迭代次数达到11次时，相对误差在1%以

下。所以为了尽量提高对黎曼均值估计的准确度以及结合对算法复杂度的综合考虑，在进行算法运算时选择的迭代次数为11次。

根据流形上的几何均值定义可知，使经验方差定义的目标函数达到最小值的矩阵即为其几何均值。在计算不同距离度量对应的几何均值时，可以根据其定义方法进行计算。其目标函数定义为

$$\begin{aligned} F(\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \dots, \mathbf{R}_N) &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (\text{tr}(\mathbf{R}_2^{-1}(\mathbf{R}_1 - \mathbf{R}_2)) \\ &\quad - \ln \det(\mathbf{R}_2^{-1} \mathbf{R}_1)) \end{aligned} \quad (15)$$

对应的梯度函数为

$$\begin{aligned} F(\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \dots, \mathbf{R}_N) &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (\text{tr}(\mathbf{R}_2^{-1}(\mathbf{R}_1 - \mathbf{R}_2)) \\ &\quad - \ln \det(\mathbf{R}_2^{-1} \mathbf{R}_1)) \\ &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (\mathbf{R}_k^{-1} - \mathbf{R}^{-1}) \end{aligned} \quad (16)$$

令目标函数的梯度函数等于0，将均值矩阵分离到等式左边，可以得到其表达式为

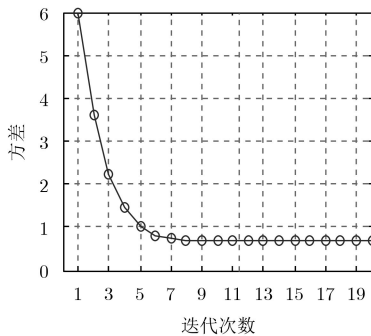
$$\bar{\mathbf{R}} = \left(\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \mathbf{R}_k^{-1} \right)^{-1} \quad (17)$$

在对数行列式散度作为距离度量的情况下，利用式(17)可以有效地计算出几何均值。

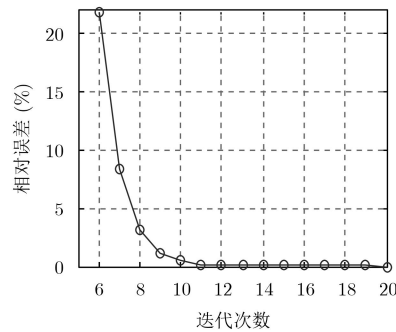
对于对称对数行列式散度而言，其目标函数为

$$\begin{aligned} F(\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \dots, \mathbf{R}_N) &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left(\frac{1}{2} (\text{tr}(\mathbf{R}_2^{-1}(\mathbf{R}_1 - \mathbf{R}_2)) - \ln \det(\mathbf{R}_2^{-1} \mathbf{R}_1)) \right. \\ &\quad \left. + \text{tr}(\mathbf{R}_1^{-1}(\mathbf{R}_2 - \mathbf{R}_1)) - \ln \det(\mathbf{R}_1^{-1} \mathbf{R}_2) \right) \end{aligned} \quad (18)$$

同样，令目标函数的梯度函数等于0，可以得到其表达式为



(a) 方差随迭代次数变化趋势



(b) 相对误差随迭代次数变化曲线

图5 迭代次数选取

$$\bar{\mathbf{R}} = \left(\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \mathbf{R}_k^{-1} \right)^{-1} \quad (19)$$

表1给出了不同的距离度量与对应的几何均值的计算方法。通过比较检测单元的协方差矩阵与几何均值的协方差矩阵之间的差异，可以对当前检测单元是否存在目标进行判决。

4 实验及仿真分析

本节将进行实验及仿真验证，分析本文所提局域联合矩阵恒虚警率检测器的性能，并对在采用不同距离度量的情况下的性能进行分析比较。

4.1 检测性能分析

首先，在高频地波雷达的回波中加入目标，对局域联合矩阵恒虚警率检测器与经典的单元平局恒虚警(Cell Average Constant False Alarm Rate,

CA-CFAR)检测器的性能进行比较分析。其中，雷达工作参数如下：阵元个数 N 为8，阵元间距 d 为14.5 m，工作频率为5.6 MHz，一个相干积累周期的脉冲积累个数 M 为5120。将目标加到第30个距离单元，且其多普勒速度为-4.81 m/s。假设杂波背景服从复高斯分布，在不同的SINR情况下，图6给出了不同检测器的归一化检测统计量的结果。

从图6中可以看出，在相同的SINR情况下，LDD方法具有最好的检测性能，SLDD方法的检测性能优于RD方法的检测性能，且它们对目标的检测能力都要优于经典的CA-CFAR检测器。

为了进一步比较各检测器的性能，本文分析了检测概率随SINR变化的情况。由于本文所提检测器的算法公式比较复杂，难以给出一个明确的检测概率与SINR的关系表达式，所以本文进行了蒙特卡洛仿真实验对其进行分析。图7给出了不同虚警

表 1 不同距离度量方法及其几何均值

度量方法	距离计算	几何均值
RD	$D_R^2(\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2) = \text{tr}[\lg^2(\mathbf{R}_1^{-1/2} \mathbf{R}_2 \mathbf{R}_1^{-1/2})]$	$\bar{\mathbf{R}}_{t+1} = \bar{\mathbf{R}}_t^{1/2} \exp \left[\text{ds} \cdot \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \lg(\bar{\mathbf{R}}_i^{-1/2} \mathbf{R}_i \bar{\mathbf{R}}_i^{-1/2}) \right] \bar{\mathbf{R}}_t^{1/2}$
LDD	$D_{LD}(\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2) = \text{tr}(\mathbf{R}_2^{-1}(\mathbf{R}_1 - \mathbf{R}_2)) - \ln \det(\mathbf{R}_2^{-1} \mathbf{R}_1)$	$\bar{\mathbf{R}} = \left(\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \mathbf{R}_k^{-1} \right)^{-1}$
SLDD	$D_{SLD}(\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2) = \frac{1}{2} (\text{tr}(\mathbf{R}_2^{-1}(\mathbf{R}_1 - \mathbf{R}_2)) - \ln \det(\mathbf{R}_2^{-1} \mathbf{R}_1) + \text{tr}(\mathbf{R}_1^{-1}(\mathbf{R}_2 - \mathbf{R}_1)) - \ln \det(\mathbf{R}_1^{-1} \mathbf{R}_2))$	$\bar{\mathbf{R}} = \left(\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \mathbf{R}_k^{-1} \right)^{-1}$

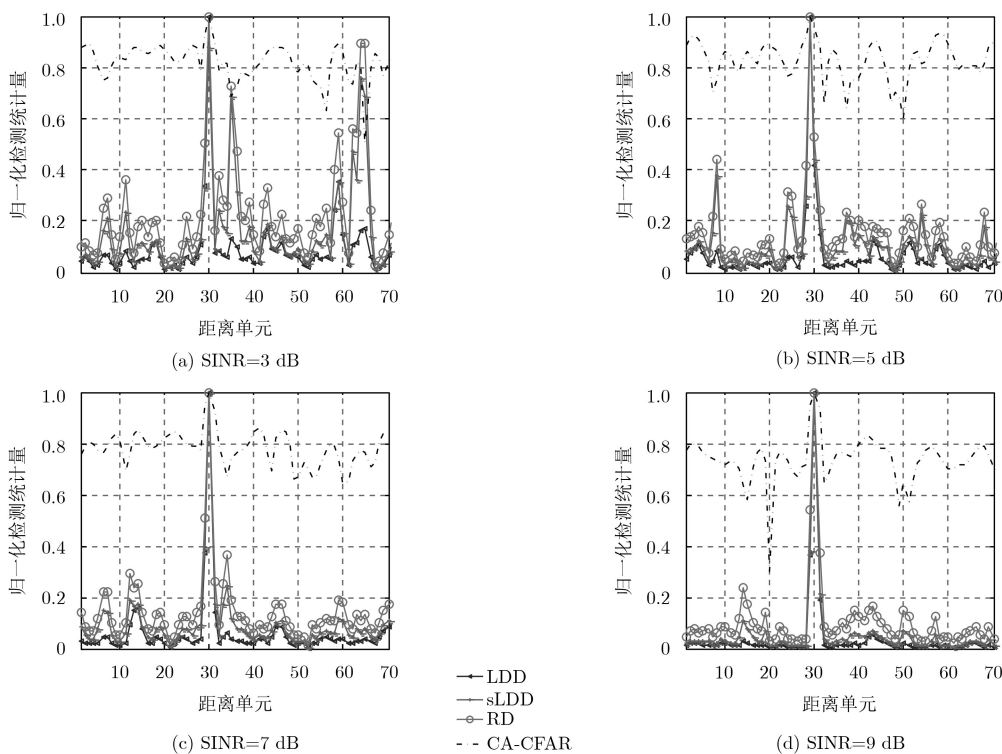


图 6 归一化检测统计量

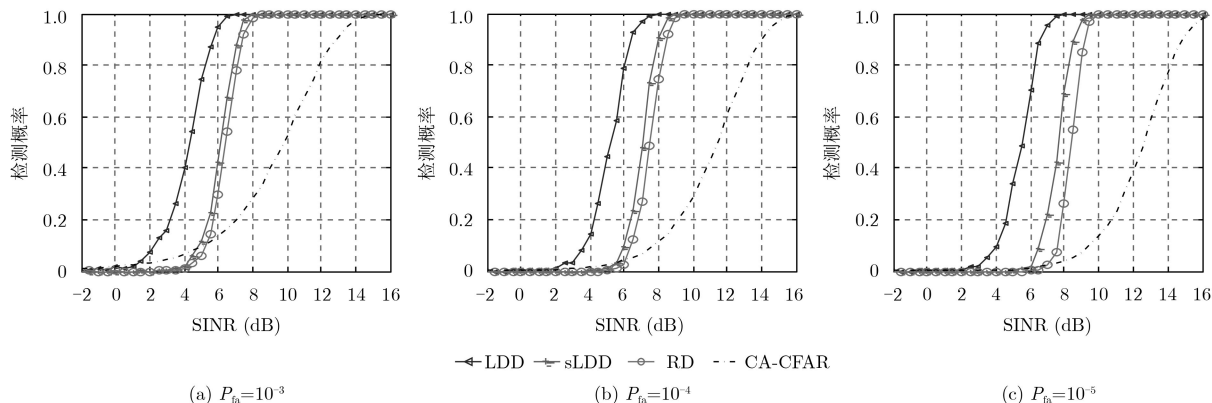


图7 检测概率随SINR变化曲线

概率的情况下，检测概率随SINR变化曲线。从图7中可以看出，在较低SINR情况下几种检测器的检测性能都比较差，当SINR高一些且在相同的SINR情况下，LDD方法具有的检测概率最大，SLDD方法的检测概率大于RD方法，经典的CA-CFAR检测器的检测概率最低。

综合以上两个实验可以看出，LDD方法具有最好的检测性能，SLDD方法优于RD方法且都优于经典的CA-CFAR检测器。

4.2 计算复杂度分析

计算复杂度也是衡量算法性能的重要标准，高频地波雷达的数据处理是以复浮点数进行计算的，所以本文以浮点数运算次数来衡量不同距离度量方法的计算复杂度。

假设， \mathbf{R}_1 和 \mathbf{R}_2 是 n 维正定Hermite矩阵， $\mathbf{R}_1\mathbf{R}_2$ 表示它们的矩阵乘法。对于 \mathbf{R}_1 中的每一行，需要进行 n^2 次的复浮点数乘法以及 $n(n-1)$ 次的复浮点数加法。每次复浮点数乘法需要进行4次浮点数乘法和2次浮点数加法，每次复浮点数加法需要进行2次浮点数加法。因此，1次 n 维矩阵乘法需要的浮点数计算次数为 $6n^3 + 2n^2(n-1)$ 次，也就是

等于 $8n^3 - 2n^2$ 次。表2给出了几种基本矩阵运算时需要的浮点数次数。

基于表2的基本矩阵运算的浮点数计算次数，表3给出了几种度量方法下的计算复杂度。

对于经典的CA-CFAR检测器而言，一次检测过程只需要计算 $n-1$ 次浮点数加法与1次除法，所以其需要的浮点数计算次数为 n 次。从表3给出的各距离度量方法的复杂度可知，本文所提局域联合矩阵恒虚警率检测器的计算复杂度要远大于经典的CA-CFAR检测器。其中LDD算法的计算复杂度最小，RD算法的计算复杂度最大。

5 结束语

本文提出了一种局域联合矩阵恒虚警率检测器，利用高频地波雷达数据的角度-多普勒-距离的多维信息进行目标检测，并利用对数行列式散度与对称对数行列式散度代替黎曼距离作为距离度量。实验结果表明，该检测器相对于经典的CA-CFAR检测器具有更好的检测性能。但是，本文实验背景为复高斯分布，对低空飞机目标的检测较为适用，对于杂波背景较为复杂的舰船目标而言需要在今后

表2 基本矩阵运算的复杂度

矩阵运算	表达式	浮点数计算次数	矩阵运算	表达式	浮点数计算次数
矩阵乘法	$\mathbf{R}_1\mathbf{R}_2$	$8n^3 - 2n^2$	矩阵求逆	\mathbf{R}_1^{-1}	$8n^3 - 2n^2$
矩阵加法	$\mathbf{R}_1 + \mathbf{R}_2$	$2n^2$	矩阵开方	$\mathbf{R}_1^{1/2}$	$24n^3 + 2n^2 - 8n$
矩阵的迹	$\text{tr}(\mathbf{R}_1)$	$8n^2 - 6n - 2$	矩阵指数	$\exp(\mathbf{R}_1)$	$n^4/2 + 24n^3 + 1.5n^2 - n$
矩阵行列式	$\det(\mathbf{R}_1)$	$8n^2 - 2n - 6$	矩阵对数	$\lg(\mathbf{R}_1)$	$n^4/2 + 25n^3 + n^2 - 1.5n$

表3 不同距离度量方法的复杂度

度量方法	距离计算复杂度	几何均值计算复杂度
RD	$n^4/2 + 73n^3 + 5n^2 - 15.5n - 1$	$(N+1)n^4/2 + (41N+88)n^3 - (N+6.5)n^2 - (1.5N+9)n$
LDD	$16n^3 + 14n^2 - 8n - 6$	$8(N+1)n^3 - 2n^2$
SLDD	$32n^3 + 28n^2 - 15n - 11$	$8(N+1)n^3 - 2n^2$

的工作中进一步研究。并且该检测器需要的计算复杂度较大,且不能给出明确的表达式来描述检测概率与SINR之间的关系。所以,未来可以在这些方面继续对算法进行针对性的优化研究。

参考文献

- [1] 姚迪, 张鑫, 杨强, 等. 基于空间多波束的高频地波雷达电离层杂波抑制算法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(12): 2827–2833. doi: [10.11999/JEIT170477](https://doi.org/10.11999/JEIT170477).
YAO Di, ZHANG Xin, YANG Qiang, *et al.* Ionospheric clutter suppression algorithm based on space multibeam for high frequency surface wave radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(12): 2827–2833. doi: [10.11999/JEIT170477](https://doi.org/10.11999/JEIT170477).
- [2] WANG Yiming, MAO Xingpeng, ZHANG Jie, *et al.* Detection of vessel targets in sea clutter using in situ sea state measurements with HFSWR[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2018, 15(2): 302–306. doi: [10.1109/LGRS.2017.2786725](https://doi.org/10.1109/LGRS.2017.2786725).
- [3] 杨强, 刘永坦. 复杂背景下的二维检测研究[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(1): 34–37. doi: [10.3321/j.issn:1001-506X.2002.01.010](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-506X.2002.01.010).
YANG Qiang and LIU Yongtan. 2-D detection in complex background[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2002, 24(1): 34–37. doi: [10.3321/j.issn:1001-506X.2002.01.010](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-506X.2002.01.010).
- [4] TURLEY M D E. Hybrid CFAR techniques for HF radar[C]. *Radar 97*, Edinburgh, UK, 1997: 36–40.
- [5] LI Yang, ZHANG Ning, and YANG Qiang. Characteristic-knowledge-aided spectral detection of high frequency first-order sea echo[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2009, 20(4): 718–725.
- [6] WANG Hong and CAI Lujing. On adaptive spatial-temporal processing for airborne surveillance radar systems[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1994, 30(3): 660–670. doi: [10.1109/7.303737](https://doi.org/10.1109/7.303737).
- [7] ZHANG Xin, SU Yanhua, YANG Qiang, *et al.* Space-time adaptive processing-based algorithm for meteor trail suppression in high-frequency surface wave radar[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2015, 9(4): 429–436. doi: [10.1049/iet-rsn.2014.0300](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2014.0300).
- [8] 衣春雷. 船载高频地波雷达海杂波抑制方法研究[D]. [博士学位论文], 哈尔滨工业大学, 2017.
YI Chunlei. Study on sea clutter suppression for shipborne high frequency surface wave radar[D]. [Ph.D. dissertation], Harbin Institute of Technology, 2017.
- [9] RADHAKRISHNA RAO C. Information and the accuracy attainable in the estimation of statistical parameters[J]. *Bulletin of the Calcutta Mathematical Society*, 1945, 37(3): 81–91.
- [10] WANG Meng, NING Zhenhu, XIAO Chuangbai, *et al.* Sentiment classification based on information geometry and deep belief networks[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 35206–35213. doi: [10.1109/ACCESS.2018.2848298](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2848298).
- [11] 黎湘, 程永强, 王宏强, 等. 雷达信号处理的信息几何方法[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 13: 18.
- [12] ZHANG Fode, NG H K T, and SHI Yimin. Information geometry on the curved q -exponential family with application to survival data analysis[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2018, 512: 788–802. doi: [10.1016/j.physa.2018.08.143](https://doi.org/10.1016/j.physa.2018.08.143).
- [13] TRANSTRUM M K, SARIĆ A T, and STANKOVIĆ A M. Information geometry approach to verification of dynamic models in power systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(1): 440–450. doi: [10.1109/TPWRS.2017.2692523](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2017.2692523).
- [14] HIAI F and PETZ D. Riemannian metrics on positive definite matrices related to means. II[J]. *Linear Algebra and Its Applications*, 2012, 436(7): 2117–2136. doi: [10.1016/j.laa.2011.10.029](https://doi.org/10.1016/j.laa.2011.10.029).
- [15] 刘俊凯, 王雪松, 王涛, 等. 信息几何在脉冲多普勒雷达目标检测中的应用[J]. 国防科技大学学报, 2011, 33(2): 77–80. doi: [10.3969/j.issn.1001-2486.2011.02.018](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-2486.2011.02.018).
LIU Junkai, WANG Xuesong, WANG Tao, *et al.* Application of information geometry to target detection for pulsed-Doppler radar[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2011, 33(2): 77–80. doi: [10.3969/j.issn.1001-2486.2011.02.018](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-2486.2011.02.018).
- [16] STEIN C. Inadmissibility of the usual estimator for the mean of a multivariate normal distribution[C]. *The Third Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, Berkeley, USA, 1956: 197–206.
- [17] HUA Xiaoqiang, CHENG Yongqiang, WANG Hongqiang, *et al.* Geometric means and medians with applications to target detection[J]. *IET Signal Processing*, 2017, 11(6): 711–720. doi: [10.1049/iet-spr.2016.0547](https://doi.org/10.1049/iet-spr.2016.0547).
- [18] LENGLET C, ROUSSON M, DERICHE R, *et al.* Statistics on the manifold of multivariate normal distributions: theory and application to diffusion tensor MRI processing[J]. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 2006, 25(3): 423–444. doi: [10.1007/s10851-006-6897-z](https://doi.org/10.1007/s10851-006-6897-z).

叶磊: 男, 1989年生, 博士, 研究方向为雷达目标检测、信息几何理论.

王勇: 男, 1979年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达信号处理、ISAR图像处理.

杨强: 男, 1970年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达目标检测、新体制信号处理和信源提取.

邓维波: 男, 1961年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为阵列信号处理、雷达系统.