

一种基于 AR 模型的矩阵 CFAR 检测器

赵兴刚¹, 郑岱堃², 王首勇², 刘俊凯²

(1. 中国人民解放军 66136 部队, 北京 100042; 2. 空军预警学院空天预警装备系, 湖北武汉 430019)

摘要: 矩阵恒虚警 (Constant False Alarm Rate, CFAR) 检测器是根据信息几何理论利用检测单元相关矩阵与参考单元矩阵黎曼均值间的测地线距离作为检测统计量进行检测. 本文根据尤尔-沃克方程中相关矩阵与自回归 (Auto-Regressive, AR) 谱之间的一一对应关系, 将矩阵 CFAR 检测器中两矩阵间的距离转化为两 AR 谱之间的距离, 提出了一种基于 AR 模型的矩阵 CFAR 检测器, 该检测器能利用分辨率更高的 AR 模型进行谱估计, 并将功率谱整体进行检测, 能充分利用回波的多普勒信息, 非常适用于频域扩展目标的检测, 通过利用具有频域扩展特性的尾流实测数据对该方法和传统方法的检测性能进行比较分析, 验证了本文所提检测器的有效性.

关键词: 信息几何; AR 模型; 测地线距离; 飞机尾流

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2017)12-3019-06

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

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.12.026

A Matrix CFAR Detector Based on AR Model

ZHAO Xing-gang¹, ZHENG Dai-kun², WANG Shou-yong², LIU Jun-kai²

(1. Troop 66136 of PLA, Beijing 100042, China;

2. Air/Space Early Warning Equipment Department, Air Force Early Warning Academy, Wuhan, Hubei 430019, China)

Abstract: The matrix constant false alarm rate (CFAR) detector uses the geodesic distance between the correlation matrix of the test cell and matrix Riemannian mean of the reference cells to detect target according to the information geometry theory. Based on the one-to-one corresponding relations between correlation matrix and AR (Auto-Regressive) spectrum, an improved matrix CFAR detector based on AR model is proposed with the distance between two matrices changed by the distance between two AR spetrum. The proposed detector is of higher frequency resolution and detects the spectrum of wake vortex in whole, fully taking advantage of the Doppler information of wake vortex. The detection performance of the proposed method and traditional methods is compared by using actual measured wake vortex data.

Key words: information geometry; AR model; geodesic distance; aircraft wake vortex

1 引言

尾流是飞机飞行时产生的固有气体动力学现象, 属于一种极强的湍流, 流动强烈且不规则, 当飞机进入前机尾流时, 会出现机身抖动、下沉、翻转等现象, 严重时会导致坠毁, 因此, 尾流是影响飞机飞行安全的重要因素^[1]. 另外, 尾流作为任何飞行器的固有特征, 具有空间尺度大, 驻留时间长等特点, 因而, 通过研究隐身飞机尾流的电磁散射特性, 开发新型雷达探测技术来检测隐身目标尾流的存在, 有望成为一种新的反隐身途径^[2,3]. 但是由于在实际检测中, 尾流目标回波的信噪比通常较低, 且回波能量在频域较为分散, 因而雷达系统对于尾流检测往往面临诸多困难, 现有国内外对于飞机尾流的研究也多

集中于对尾流散射特性的分析、仿真和建模^[4,5]上, 在检测方法上仍主要是基于传统脉冲多普勒 (Pulse Doppler, PD) 雷达中的快速傅里叶变换恒虚警 (Fast Fourier Transform + Constant False Alarm Rate, FFT + CFAR) 处理的方式, 其检测效果并不能满足实际需求.

近年来, 信息几何理论已在多个领域得到广泛应用^[6,7]. 在雷达信号处理中, 文献^[8~10]利用信息几何理论给出了一种矩阵 CFAR 检测器^[8~10], 是利用检测单元的相关矩阵与参考单元相关矩阵黎曼均值间的测地线距离进行检测, 有效克服了传统 FFT + CFAR 检测方法在短脉冲条件下的功率谱污染和能量泄露等问题^[11,12]. 本文在矩阵 CFAR 的基础上, 根据尤尔-沃克 (Yule-Walker) 方程中相关矩阵与自回归谱的一一对应

关系,利用 AR 流形^[13]上两 AR 模型间的测地线距离作为矩阵 CFAR 检测器中的检测统计量,提出了一种基于 AR 模型的矩阵 CFAR 检测器. 首先,使用参数谱估计方法比 FFT 处理具有更高的频率分辨率,其次,该方法将功率谱作为整体进行检测,能更充分地利用回波谱中所包含的多普勒信息,非常适用于频域扩展目标的检测,因而本文将尾流检测作为应用实例对本文提出的基于 AR 模型的矩阵 CFAR 检测器进行了性能验证分析,并与传统方法进行了对比,验证了本文方法的有效性.

2 矩阵 CFAR 检测器

根据信息几何理论,一个厄米特正定矩阵空间可以构成一个矩阵流形^[9],则雷达回波的相关矩阵就对应了矩阵流形上的点,就可以利用流形上两点之间的测地线距离来衡量两个矩阵间的差异,并进而可根据测地线距离求出流形上的黎曼矩阵均值. 类比于常规 CFAR 检测方法,文献[8,9]利用检测单元回波相关矩阵与多个参考单元相关矩阵黎曼均值之间的测地线距离作为检测量进行检测,并称之为矩阵 CFAR 检测器.

2.1 测地线距离

设雷达中某个距离单元观测到的复信号矢量为 $\mathbf{x} = [x(0), x(1), \dots, x(n-1)]^T$, n 为一个相干脉冲间隔 (Coherent Pulse Interval, CPI) 内的序列长度,假设 \mathbf{x} 服从零均值复高斯矢量分布 $N(0, \mathbf{R})$, \mathbf{R} 为 \mathbf{x} 的相关矩阵,考虑由相关矩阵 $\mathbf{R} \in H(n)$ 参数化的概率分布函数族 $S = \{p(\mathbf{x} | \mathbf{R}) | \mathbf{R} \in H(n)\}$, 其中 $H(n)$ 为 $n \times n$ 维厄米特正定矩阵空间,则在一定的拓扑和微分结构下, S 可以构成一个以 \mathbf{R} 为自然坐标的流形,并称之为矩阵流形^[6].

可由 Fisher 信息矩阵 $G(\mathbf{R}) = [E(\partial_i \ln p(\mathbf{x} | \mathbf{R}) \partial_j \ln p(\mathbf{x} | \mathbf{R}))]$ 得到流形 S 上的黎曼度规^[10],并进而根据黎曼度规可得流形上与度规相适配的联络,则对于流形上给定的两点 \mathbf{R}_1 和 \mathbf{R}_2 ,就可得到两点间的测地线 $\mathbf{R}(t)$, $t \in [0, 1]$

$$\mathbf{R}(t) = \mathbf{R}_1^{1/2} (\mathbf{R}_1^{-1/2} \mathbf{R}_2 \mathbf{R}_1^{-1/2})^t \mathbf{R}_1^{1/2} \quad (1)$$

并有 $\mathbf{R}(0) = \mathbf{R}_1$, $\mathbf{R}(1) = \mathbf{R}_2$, 将黎曼度规沿 $\mathbf{R}(t)$ 积分,就可得 \mathbf{R}_1 和 \mathbf{R}_2 之间的测地线距离为^[9]

$$d(\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2) = \|\log(\mathbf{R}_1^{-1/2} \mathbf{R}_2 \mathbf{R}_1^{-1/2})\| = \sqrt{\sum_{k=1}^n \log^2(\lambda_k)} \quad (2)$$

式中 $\|\cdot\|$ 代表弗洛宾尼斯 (Frobenius) 范数,且 $\|A\| = \text{tr}(AA^T)$, tr 为矩阵的迹. λ_k 为矩阵 $\mathbf{R}_1^{-1/2} \mathbf{R}_2 \mathbf{R}_1^{-1/2}$ 的第 k 个特征值.

2.2 黎曼均值

黎曼均值 $\bar{\mathbf{R}}$ 是使得目标函数

$$f_r(\mathbf{R}) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N d^2(\mathbf{R}_k, \mathbf{R})$$

取最小值时所对应的矩阵,当 $N=2$ 时, $\bar{\mathbf{R}}$ 等于 \mathbf{R}_1 和 \mathbf{R}_2 间的测地线在 $t=0.5$ 处的值^[8]

$$\bar{\mathbf{R}}_r = \mathbf{R}_1^{1/2} (\mathbf{R}_1^{-1/2} \mathbf{R}_2 \mathbf{R}_1^{-1/2})^{1/2} \mathbf{R}_1^{1/2} \quad (3)$$

当 $N>2$ 时,很难得到 $\bar{\mathbf{R}}$ 的解析表达式,文献[10]利用梯度下降算法给出了 $\bar{\mathbf{R}}$ 的迭代计算方法,通过利用测地线方程,取切向量的方向为目标函数的负梯度方向,就可以得到递推计算黎曼均值的梯度下降算法. 对于矩阵流形上给定的 N 个点 \mathbf{R}_k , $k=1, \dots, N$, 梯度下降算法的迭代计算表达式为

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{R}}_r^{i+1} = & (\bar{\mathbf{R}}_r^i)^{1/2} e^{\frac{\tau}{N} \sum_{k=1}^N \log((\bar{\mathbf{R}}_r^i)^{-1/2} \mathbf{R}_k (\bar{\mathbf{R}}_r^i)^{-1/2})} \\ & \cdot (\bar{\mathbf{R}}_r^i)^{1/2}, 0 \leq \tau \leq 1 \end{aligned} \quad (4)$$

根据式(4),选择迭代的初始值 $\bar{\mathbf{R}}_r^0$ 和步长 τ ,就可以对矩阵的黎曼均值进行迭代运算,黎曼均值的估计精度由迭代次数 n_s 决定,通常 n_s 越大,估计精度越高.

2.3 矩阵 CFAR 检测器

有了测地线距离和黎曼均值,就可以得到矩阵 CFAR 检测器,实现过程是首先根据雷达观测数据计算参考单元和检测单元的相关矩阵,然后将这些矩阵统一看做矩阵流形上的点,进而用检测单元相关矩阵与参考单元相关矩阵黎曼均值之间的测地线距离作为检测量与门限比较,实现目标检测,其处理流程如图 1 所示.

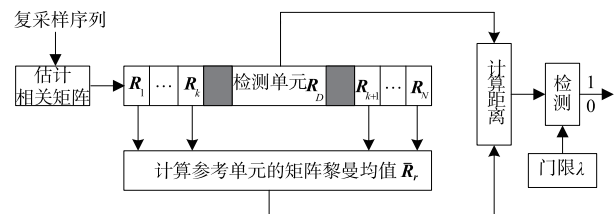


图1 矩阵CFAR检测器

检测统计量的表达式为

$$T = d(\mathbf{R}_D, \bar{\mathbf{R}}_r) = \|\log(\mathbf{R}_D^{-1/2} \bar{\mathbf{R}}_r \mathbf{R}_D^{-1/2})\| > \lambda \quad (5)$$

式中 \mathbf{R}_D 为图 1 中检测单元的相关矩阵, $d(\cdot, \cdot)$ 为测地线距离, $\bar{\mathbf{R}}_r$ 为参考单元矩阵的黎曼均值,可分别由式(2)和(4)计算得到. 从理论上讲,相关矩阵包含了回波的所有信息,因而直接用矩阵进行检测就避免了常规 CFAR 中 CPI 脉冲数较少时 FFT 处理的性能损失;且相比于传统 CFAR 中杂波功率的一阶估计(算术平均),黎曼均值是利用了流形上的内在结构对均值进行估计,受杂波环境影响更小,因而在一些强的非均匀杂波背景下,具有更稳健的恒虚警特性.

3 基于 AR 模型的矩阵 CFAR 检测器

根据求解 AR 模型的 Yule-Walker 方程可知,相关矩阵与 AR 谱之间存在一一对应关系,则可根据图 1 所示矩阵 CFAR 检测器中的 \mathbf{R}_D 和 $\bar{\mathbf{R}}$ 分别对应求出一个 AR 参数谱. 首先,相比于 FFT 处理,参数谱估计方法具有更高

的频率分辨率;其次,参数谱估计是把观测序列看成白噪声激励一个线性系统模型产生,则根据信息几何理论,就可以将参数化的功率谱集合看作一个微分流形,模型参数为流形的坐标,流形上两个 AR 谱之间的距离就可以反映回波整体多普勒信息的变化,将其用于信号检测,能在频域充分利用回波能量,取得较好的检测效果。

3.1 两 AR 模型间的测地线距离

AR 模型的功率谱表达式为^[15]

$$P(\omega) = \sigma^2 \frac{1}{\left| 1 + \sum_{k=1}^p a_k e^{-j\omega k} \right|^2} \quad (6)$$

式中, p 为模型的阶数,参数化的 AR 谱集合 $S = \{P(\omega, a) \mid a = (a_1, \dots, a_p) \in \Theta\}$ 在一定的正则条件下可以构成一个流形^[9],在此可以称之为 AR 流形,参数 a 即可作为流形的坐标.在 AR 流形上直接求解两点间的测地线距离是非常复杂的,根据求解 AR 模型 Yule-Walker 方程的 Levinson 递推算法^[13]可知,相关矩阵与 AR 模型反射系数之间具有一一对应关系,因而就可以通过坐标转换,将矩阵流形的坐标由相关矩阵转换为 AR 模型的反射系数,进而在矩阵流形上求解两 AR 模型间的测地线距离。

令 R 为观测数据矢量 x 的复相关矩阵,则概率分布函数集合 $M = \{p(x|R) \mid R \in \Theta\}$ 就可构成一个矩阵流形, R 为 M 的坐标, Θ 为共轭对称正定矩阵空间.根据相关矩阵 R 与 AR 模型反射系数之间的对应关系, M 的坐标就可以由 AR 模型的反射系数表示为 $[r_0, \mu_1, \dots, \mu_{N-1}]$, r_0 为相关矩阵 R 的对角线元素值,此时矩阵流形 M 上的 Kahler 度量可以表示为^[13]

$$ds^2 = N \left(\frac{dr_0}{r_0} \right)^2 + \sum_{i=1}^{N-1} (N-i) \frac{d\mu_i^2}{(1 - |\mu_i|^2)^2} \quad (7)$$

设 A 和 B 为 M 上的两点,坐标分别为 $[r_0^A, \mu_1^A, \dots, \mu_{N-1}^A]$ 和 $[r_0^B, \mu_1^B, \dots, \mu_{N-1}^B]$,则由 A 和 B 确定的测地线方程为^[11]

$$\gamma(t, A, v) = (\gamma_0(t), \gamma_1(t), \dots, \gamma_{N-1}(t)) \quad (8)$$

其中, $\gamma_0(t) = r_0^A e^{v_0/r_0^A t}$, 当 $1 \leq k \leq N-1$ 时

$$\gamma_k(t) = \frac{(\mu_k^A + e^{i\theta_k}) e^{2|\mu_k^A|t/(1-|\mu_k^A|^2)} + (\mu_k^A - e^{i\theta_k})}{(1 + \mu_k^{A*} e^{i\theta_k}) e^{2|\mu_k^A|t/(1-|\mu_k^A|^2)} + (1 - \mu_k^A e^{i\theta_k})}$$

其中, $\theta_k = \arg \mu_k^B$. 根据式(8),沿 $\gamma(t, A, v)$ 对 Kahler 度量 ds^2 进行积分就可以得到 A 和 B 间的测地线距离为^[12]

$$d(A, B) = \left(N \left(\ln \frac{r_0^A}{r_0^B} \right) + \sum_{i=1}^{N-1} (N-i) \frac{1}{2} \ln \frac{1 + \tau_i}{1 - \tau_i} \right)^{1/2}, \quad (9)$$

$$\tau_i = \left| \frac{\mu_i^B - \mu_i^A}{1 - \mu_i^A \mu_i^B} \right|$$

3.2 基于 AR 模型的矩阵 CFAR

设矩阵 CFAR 检测器中参考单元矩阵黎曼均值 \bar{R} ,

对应求出的 AR 谱的反射系数为 $[r_0^v, \mu_1^v, \dots, \mu_{N-1}^v]$,检测单元相关矩阵 R_D 对应 AR 谱的反射系数为 $[r_0^x, \mu_1^x, \dots, \mu_{N-1}^x]$,根据式(9)可得基于 AR 模型的矩阵 CFAR 检测器的检测统计量为

$$T_g(x) = d([r_0^v, \mu_1^v, \dots, \mu_{N-1}^v], [r_0^x, \mu_1^x, \dots, \mu_{N-1}^x]) > \lambda \quad (10)$$

当 $T_g(x)$ 超过 λ 时,判定目标存在,反之,则不存在.检测器的实现流程如图 2 所示。

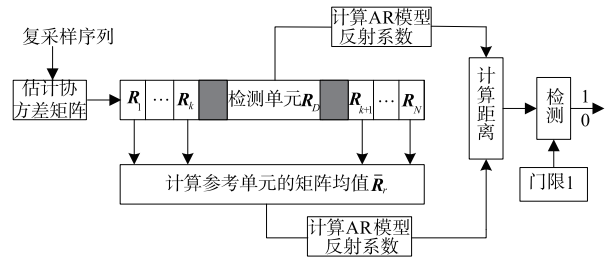


图2 基于AR模型的矩阵CFAR检测器

由于很难确定 $T_g(x)$ 服从的概率分布形式,在此就没有给出检测门限的解析表达式,实际应用时可根据虚警概率利用蒙特卡洛方法仿真得到。

4 检测性能分析

上面得到了基于 AR 模型的矩阵 CFAR 检测器,其突出优势在于对具有复杂扩展频谱特性目标的检测,在实际应用中,飞机尾流则属于一种典型的频域扩展目标,其独特的频谱特性使得传统的 FFT + CFAR 检测方法性能较差,而利用本文所提方法就可以有效克服频谱展宽对于目标检测性能的影响,从而取得较好的检测效果。

现采用国防科技大学于 2008 年秋季在南京某研究所实验基地开展的尾流探测实验所取得的实测数据^[2],来验证基于 AR 模型的矩阵 CFAR 检测器对飞机尾流的探测性能.该探测实验采用的是某型号 X 波段 PD 天气雷达(具体参数略),在斜入射观测条件下所获得的某型号运输机起飞阶段的尾流回波数据.该型号运输机的主要参数如表 1 所示。

表 1 某型号运输机参数

参数	翼展 (m)	最大起飞重量 (kg)	空重 (kg)	最大巡航速度 (m/s)
值	29.2	2.4×10^4	1.5×10^4	124

实验中雷达天线有两种工作模式:扫描模式和凝视模式,其中凝视模式下雷达天线仰角为 10° ,尾流目标距离雷达约为 1.4km;雷达波束与飞机航线的夹角约为 35° .实验过程中天气晴朗,飞机尾流受空气干扰较小,散射特性较为稳定。

本节采用的是凝视模式下的回波数据,数据大小为 32×94976 ,即共有 32 个距离单元,每个单元共采集 94976 个

I、Q 两路脉冲数据,根据尾流目标与雷达之间的距离(1.4km)可以计算出尾流回波数据主要集中在第 12 个距离单元,对该单元的回波数据进行短时 Fourier 变换,可得尾流回波时频图^[2]如图 3 所示。

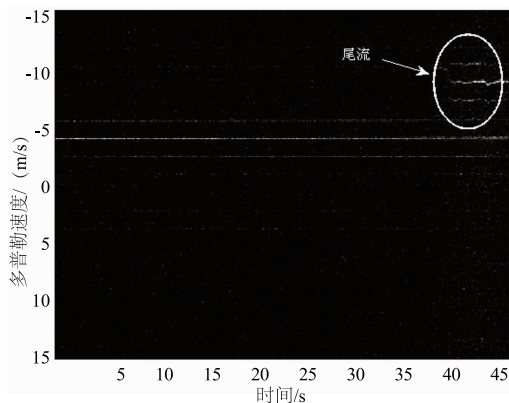


图3 尾流回波时频图

从图 3 中可看出白色圆圈内三条较为明显的谱线即为尾流回波,中间从开始到结束一直存在的谱线为噪声干扰,尾流回波持续时间约为 10s,需要说明的是该时频图像是利用第 12 单元所有 94976 个脉冲数据得到的,因而能比较明显地看到尾流目标,但这并不适用于实际检测,不具有实时性,在此只是为了说明尾流目标的存在。

为更清晰地观察尾流回波的功率谱特性,图 4 给出了尾流出现时间内 CPI 脉冲数为 256 时的多普勒速度谱,从中可以看出,尾流谱明显展宽,存在多条谱线,且各谱线的位置、强度都近似呈现对称分布,功率谱展宽使得回波能量分布在多个频点上,传统方法采用的频域单通道检测方法利用信息有限,能量损失严重,因而性能较差。

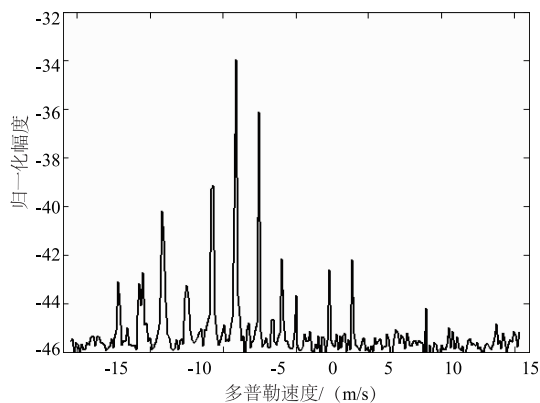


图4 尾流多普勒速度谱

下面就利用上述尾流实测数据来验证本文所提方法的检测性能,采取以下两种验证方法:

(1)不含尾流目标单元实测数据+仿真尾流信号验证验证方法为:(a)计算门限.将不含尾流目标的第 10

距离单元作为检测单元,第 2~9 单元和第 14~21 单元作为参考单元,分别利用常规 FFT+CFAR 检测方法和基于 AR 模型的矩阵 CFAR 检测器对第 10 单元数据进行处理,设定虚警概率为 0.01(因数据量大小限制),算出 CPI 为 256 和 16 时的门限值;(b)利用基于粒子模型的视频回波仿真方法产生尾流信号加到第 10 单元数据中,设定信噪比区间为 -15dB~5dB,计算不同信噪比下两种方法的检测概率值,最终给出检测曲线。

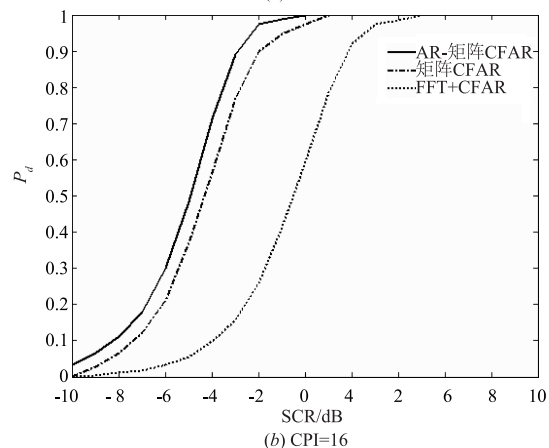
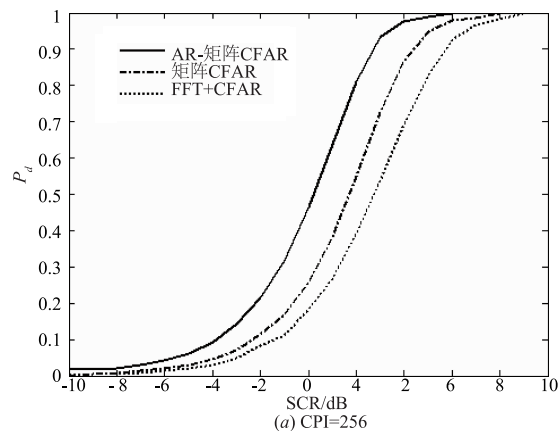


图5 不含尾流目标单元实测数据+仿真尾流信号检测曲线

从图中可以看出,在 CPI = 256,检测概率为 0.6 时,本文方法比传统方法改善约 4dB,比矩阵 CFAR 改善约 0.8dB;在 CPI = 16 时,分别改善约 2.5dB 和 1.5dB.基于粒子模型的视频回波尾流仿真方法是使用一群均匀分布的粒子模拟尾流涡旋的运动,能较好地模拟潮湿大气条件下由大气中的水汽微粒产生的尾流雷达后向散射情况,因而为了对比,在此我们利用高斯仿真噪声数据+仿真尾流信号的方法得到几种方法的检测性能对比如图 6 所示。

可以看到,在仿真噪声数据条件下,当虚警概率为 10^{-2} 时,基于 AR 模型的矩阵 CFAR 检测器相对于传统 FFT+CFAR 检测和矩阵 CFAR 方法的性能改善情况与图 5 相比是相近的,这是因为我们采用的是高斯白噪声来仿真模拟尾流不存在时的回波数据,而所采用实测数据是在晴朗

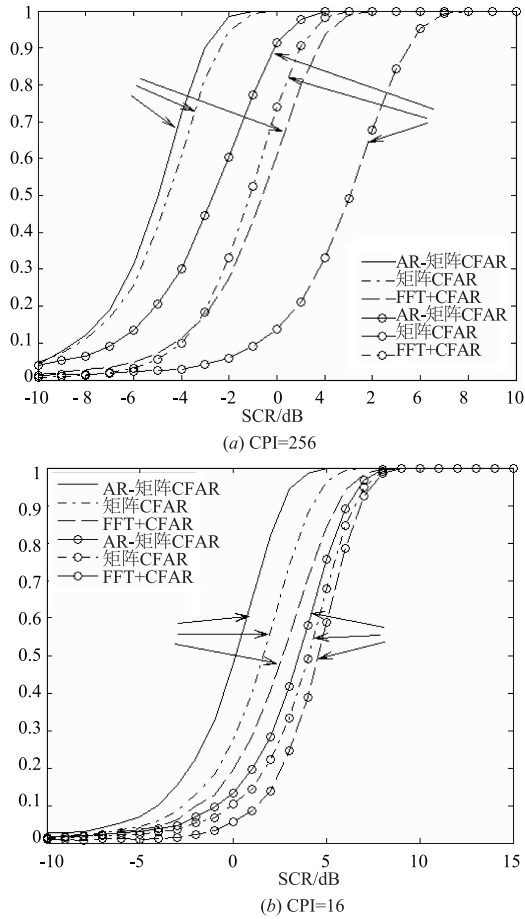


图6 高斯仿真噪声数据+仿真尾流信号检测曲线

天气条件下得到的,受天气干扰和云雨杂波影响较小,因此第 10 单元数据也近似服从高斯白噪声分布,尾流目标信号又是采用相同方法仿真产生的,所以性能改善情况相近.除此之外,我们还增加了虚警概率为 10^{-3} 时对三种方法的比较,并可以看出,随着虚警概率的降低,三者的检测概率值都相应减小,但整体的变化趋势和性能对比情况是与虚警概率为 10^{-2} 时大致相同的.

(2) 含尾流目标单元实测数据验证

验证方法为:(a)计算门限.即将第 12 距离单元作为检测单元,第 3~10 单元和第 14~21 单元作为参考单元,第 11 和 13 单元为保护单元,分别利用常规 FFT + CFAR 检测方法和基于 AR 模型的矩阵 CFAR 检测器对第 12 单元中尾流不存在的时间段内的数据进行处理,设定虚警概率为 0.01,算出 CPI 为 256 和 16 时的门限值;(b)计算检测概率.利用两种检测方法对第 12 单元尾流存在时间段内的数据进行处理,计算出检测统计量,并与门限比较,检测统计量超过门限的次数与总处理次数的比值即为检测概率值.验证结果如表 2 所示.

从表 2 中可以看出,当 CPI = 16 时,尾流是很难被检测到的,FFT + CFAR 方法的检测概率几乎为零,本文

所提方法检测概率也较低;当 CPI = 256 时,两种方法的检测性能都有明显提升,但 FFT + CFAR 方法仍不足以很好地检测到目标,本文方法的检测概率达到 0.89,基本可以实现对尾流目标的检测.

表 2 实测数据验证结果

	CPI = 256		CPI = 16	
	FFT + CFAR	AR-Matrix CFAR	FFT + CFAR	AR-Matrix CFAR
门限	5.83	695.37	0.36	86.99
检测概率	0.34	0.89	接近于 0	0.23

现对基于 AR 模型的矩阵 CFAR 检测器、基本的矩阵 CFAR 检测器以及传统的 FFT + CFAR 处理方法的计算复杂度进行比较分析.从理论上来说,FFT + CFAR 处理方式的运算量主要分为 FFT 处理和单元平均处理两部分;矩阵 CFAR 的运算量主要包含了矩阵黎曼均值和测地线距离的计算;而基于 AR 模型的矩阵 CFAR 检测器则包含了矩阵黎曼均值计算、相关矩阵与 AR 模型间转换和 AR 模型间测地线距离计算三部分.以一次乘法或加法作为一个单位运算量,表 3 给出了三种方法计算复杂度的表达式,其中 n 为脉冲序列长度, N 为参考单元个数, n_s 为黎曼均值迭代计算次数.

表 3 计算复杂度对比

检测器	计算量
FFT + CFAR	$O(2Nn + 3n)$
矩阵 CFAR	$O\{2[(n + n^2)n! + 2n^2] + 2n_s N[(n + n^2)n! + 3n^2]\}$
AR-矩阵 CFAR	$O\{n^2(N + 1) + (n + 1)(n + 2n^2) + 2n_s N[(n + n^2)n! + 3n^2]\}$

从表 3 中可以看出,矩阵 CFAR 检测器和本文方法的计算量都要大于 FFT + CFAR 方法,导致计算量较大的原因主要是在计算矩阵测地线距离过程中的矩阵求逆以及黎曼均值的迭代计算,基于 AR 模型的矩阵 CFAR 检测器使用的是 AR 模型间的测地线距离,没有涉及矩阵求逆,因而其计算量要小于矩阵 CFAR 检测器,而矩阵 CFAR 主要适用于短脉冲条件下,此时矩阵维数较低,求逆运算的计算量也不会太大,而黎曼均值计算的迭代次数可以根据精度要求进行适度调整,可以在 12~20 次范围内进行选择^[15].

5 结束语

本文在矩阵 CFAR 的基础上,将两矩阵间的测地线距离转化为两 AR 模型间的测地线距离,提出了一种基于 AR 模型的矩阵 CFAR 检测器,并利用飞机尾流实测数据对检测性能进行了验证分析,取得了较好的效果.实际上,除了距离度量之外,流形上还有更多的几何量如联络、曲率等需要被进一步挖掘和利用,以更好地促

进信息几何理论在雷达目标检测方法中的应用,希望在以后的研究中取得新的进展。

参考文献

- [1] BURNHAM D C, HALLOEK J N. Decay characteristics of wake vortices from jet transport aircraft[J]. *Journal of Aircraft*, 2012, 50(1): 82 – 87.
- [2] 李军, 周彬, 王雪松, 等. 晴空飞机尾流的雷达探测性能分析[J]. *电子与信息学报*, 2009, 31(12): 2853 – 2857.
LI Jun, ZHOU Bin, WANG Xue-song, et al. Radar detection performance of aircraft wake vortices in clear air[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(12): 2853 – 2857. (in Chinese)
- [3] LI J B, WANG X S, WANG T. Modeling the dielectric constant distribution of wake vortices[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, 47(2): 820 – 831.
- [4] HANSON J M, MARCOTTE F J. Aircraft wake vortex detection using continuous-wave radar[J]. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 1997, 18(3): 348 – 357.
- [5] IANNUZZELLI R J, SCHEMM C E, MARCOTTE F J, et al. Aircraft wake detection using bistatic radar: analysis of experimental results[J]. *Johns Hopking APL Technical Digest*, 1998, 19(3): 299 – 314.
- [6] 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.
- [7] 赵兴刚, 王首勇. 雷达目标检测的信息几何方法[J]. *信号处理*, 2015, 31(6): 631 – 637.
ZHAO Xing-gang, WANG Shou-yong. Information geometry method of radar target detection[J]. *Signal Processing*, 2015, 31(6): 631 – 637. (in Chinese)
- [8] BARBARESCO F. Interactions between symmetric cone and information geometries: bruhat-tits and siegel spaces models for high resolution autoregressive Doppler imagery[J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2009, 5416(1): 124 – 163.
- [9] BARBARESCO F. Innovative tools for radar signal processing based on Cartan's geometry of SPD matrices & information geometry[A]. *Radar Conference [C]*. Rome: IEEE, 2008. 1 – 6.
- [10] 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.
- [11] 陈建军, 黄孟俊, 赵宏钟, 等. 相参雷达时频域 CFAR 检测门限获取方法研究[J]. *电子学报*, 2013, 41(8): 1634 – 1639.
CHEN Jian-jun, HUANG Meng-jun, ZHAO Hong-zhong, et al. Research on estimated threshold of CFAR detection in time-frequency domain for coherent radar[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2013, 41(8): 1634 – 1639. (in Chinese)
- [12] 简涛, 何友, 苏峰, 等. SIRV 杂波下距离扩展目标 CFAR 检测器[J]. *电子学报*, 2010, 38(12): 2740 – 2744.
JIAN Tao, HE You, SU Feng, et al. Range-spread target CFAR detection under SIRV clutter[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(12): 2740 – 2744. (in Chinese)
- [13] AMARI S, NAGAOKA H. *Methods of Information Geometry*[M]. England: Oxford University Press, 2000. 25 – 32.
- [14] 刘俊凯, 王雪松, 王涛. 飞机尾流的频域 CFAR 检测性能分析[J]. *现代雷达*, 2009, 31(12): 62 – 65.
LIU Jun-kai, WANG Xue-song, WANG Tao. Analysis of frequency-domain CFAR detection performance for aircraft wake vortex[J]. *Modern Radar*, 2009, 31(12): 62 – 65. (in Chinese)
- [15] 王首勇, 万洋, 刘俊凯, 等. 现代雷达目标检测理论与方法(第二版)[M]. 北京: 科学出版社, 2015.

作者简介



赵兴刚 男, 1988 年生于山东昌乐, 现为空军预警学院在读博士研究生, 研究方向为空天目标检测。
E-mail: 565484636@qq.com

郑岱堃(通信作者) 男, 1986 年生于山东泰安, 现为空军预警学院讲师, 博士, 主要研究方向为雷达目标检测与跟踪。
E-mail: zheng_af@163.com

王首勇 男, 1956 年生于河南滑县, 现为空军预警学院教授、博士生导师, 主要研究方向为现代雷达信号处理。
E-mail: sywang_mail@163.com

刘俊凯 男, 1979 年生于河北景县, 现为空军预警学院讲师, 博士, 主要研究方向为新体制雷达探测技术。
E-mail: liujkradar@163.com