

恒虚警极化自适应子空间检测器

刘立东, 吴顺君, 孙晓闻

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 陕西西安 710071)

摘要: 本文研究了在未知统计特性的局部均匀高斯杂波环境中的相干雷达极化自适应目标检测问题. 基于广义似然比检验提出极化自适应子空间检测器, 并推导出虚警概率和检测概率的理论表达式. 研究结果证明该算法在均匀杂波环境和局部均匀杂波环境都有恒虚警的性质. 比较了均匀杂波环境下极化自适应子空间检测器、极化广义似然比检验和极化自适应匹配滤波器算法的检测性能. 仿真分析了不同极化状态局部均匀杂波环境下极化自适应子空间检测器算法在的检测性能.

关键词: 局部均匀; 高斯; 极化; 子空间检测

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2005) 09-1553-04

A CFAR Polarimetric Adaptive Subspace Detector

LIU Li-dong, WU Shun-jun, SUN Xiao-wen

(National Key Lab of Radar Signal Processing, Xidian Univ., Xi'an, Shanxi 710071, China)

Abstract: This paper deals with coherent radar polarimetric adaptive detection of targets in partially-homogeneous Gaussian clutter background with unknown covariance matrix. Based on generalized likelihood ratio test (GLRT), polarimetric adaptive subspace detector (PASD) is derived. The theoretical expressions of PFA and PD for PASD are derived. The proposed detection algorithm ensures the constant false alarm rate (CFAR) in homogeneous and partially-homogeneous clutter background. We resort to simulation to analyse the performance of PGLRT, PAMF, PASD in homogeneous clutter and PASD in partially-homogeneous clutter in different polarimetric cases.

Key words: partially-homogeneous; Gaussian; polarimetric; subspace detection

1 引言

美国林肯实验室的研究结果认为, 中、低分辨率的雷达回波中包含多个不同散射体的不同散射波的叠加, 目标回波矢量和杂波矢量都可以认为近似服从零均值的复高斯概率分布^[1]. 本文也采用这个假设模型. 对于在未知杂波协方差矩阵的高斯杂波中非极化相干雷达检测, Kelly 提出了广义似然比检测器 (GLRT)^[2], 该检测器借助于与待检测单元有相同分布的不含信号的一系列辅助数据对检测单元进行似然比检验, 其对于杂波协方差矩阵有恒虚警的性质. 继而又提出了复杂度较低的自适应匹配滤波检测器 (AMF)^[3]. 在局部均匀环境中, 即待检测单元的主数据与辅助数据有相同的杂波协方差矩阵结构, 但杂波功率可能不同, 但所有的辅助数据有相同的杂波功率, Sharf 提出了自适应子空间检测器 (ASD), 能够在主辅数据杂波功率不一致的情况下作到恒虚警检测^[4].

另一方面, 在雷达系统中, 利用极化分集可以显著地增强雷达系统的检测性能, 特别是有助于雷达对弱目标的检测^[5,6]. Park 等提出了在未知目标和杂波极化特征条件下结

合两个极化通道的极化广义似然比检验 (PGLRT) 算法^[7]. Pastina 等将文[7]中的结果推广到三个或更多个极化通道情况, 研究结果表明, 利用多个极化通道的回波信号能够进一步增强对目标的检测能力^[8]. 文献[9,10]分别提出了两个极化通道和三个或更多个极化通道的自适应匹配滤波器 (PAMF). 所提出的算法与文[8]中的两个极化通道的 PGLRT 算法检测性能相近, 但计算复杂度较低. A Maio 又将极化分集运用到高分辨雷达检测中提出了有渐近恒虚警性质的极化高分辨雷达检测算法^[11].

本文采用文献[6]中的雷达回波模型, 基于广义似然比检验提出极化自适应子空间检测算法 (PASD), 目的是更多的利用雷达回波的极化信息来提高检测性能. 文章组织如下: 第二章介绍极化相干雷达回波模型, 第三章推导极化自适应子空间检测器, 第四章进行性能分析, 第五章作出总结.

2 极化雷达回波模型

雷达系统发射机可以交替发射两个线极化波, 水平极化 H, 垂直极化 V, 可以在两个极化方向上并行接收雷达回波.

收稿日期: 2004-10-18; 修回日期: 2005-02-21

基金项目: 国防预研基金 (No. 00J7.2.8.DZ0152)



这样就接收到两个共极化雷达回波 HH 和 VV, 以及两个交叉极化雷达回波 HV 和 VH. 这里考虑一般意义 L 个极化回波接收通道情况. 假设阵列由 N 个天线单元构成, 产生 L 个 $N \times 1$ 维复矢量, X_1, \dots, X_L ($L=3$ 时, X_{HH}, X_{VV}, X_{HV}), 这 L 个复矢量组成一个更长的 $LN \times 1$ 维复矢量 $X = [X_1^T, \dots, X_L^T]^T$ ($L=3$ 时, $X = [X_{HH}^T, X_{VV}^T, X_{HV}^T]^T$). 对于待检测单元的矢量数据 X , 称之为主数据. 同时假设存在 K 个不含有信号且与 X 有相同杂波协方差矩阵的矢量数据 $X_k, k=1, \dots, K$, 称之为辅助数据.

对目标的检测问题就变为下列二元假设检验:

$$H_0 \begin{cases} X = n, \\ X_k = n_k, k=1, \dots, K. \end{cases} \quad H_1 \begin{cases} X = Sa + n, \\ X_k = n_k, k=1, \dots, K. \end{cases} \quad (1)$$

H_0 表示目标不存在的假设, 回波信号只包含杂波, H_1 表示目标存在假设, 回波信号包括杂波和目标回波. 其中,

$$S = I_L \odot s_0, \quad a = \begin{bmatrix} a_1 \\ \dots \\ a_L \end{bmatrix}$$

s_0 是 $N \times 1$ 维导向矢量, I_L 是 L 阶单位阵, \odot 表示直积, a_1, \dots, a_L 是相对回波通道的复幅度. n 和 n_k 是 $LN \times 1$ 维独立同分布的零均值复高斯随机矢量, 具有相同的 $LN \times LN$ 维杂波协方差矩阵结构和可能不同的局部杂波功率, 并且所有辅助数据有相同的杂波功率, 即

$$E[n n^H] = \sigma_0 R, \quad E[n_k n_k^H] = \sigma_1 R$$

$$R = \begin{bmatrix} R_{1/1} & \dots & R_{1/L} \\ \dots & \ddots & \dots \\ R_{L/1} & \dots & R_{L/L} \end{bmatrix} \quad (2)$$

R 表示主辅数据杂波协方差矩阵结构, σ_0, σ_1 分别表示主数据和辅助数据的杂波功率因子. 每个子块表示一对极化通道的谱特性. 主对角线上的子块表示单个极化通道的时域协方差矩阵, 非主对角线上的子块表示不同极化通道的互协方差矩阵.

X 的概率密度函数为^[12]

$$f(X | \sigma_0 R, H_0) = [(\sigma_0)^{-LN} |R|]^{-1} \exp(-\sigma_0^{-1} X^H R^{-1} X) \quad (3)$$

$$f(X | a, \sigma_0 R, H_1) = [(\sigma_0)^{-LN} |R|]^{-1} \exp[-\sigma_0^{-1} (X - Sa)^H R^{-1} (X - Sa)] \quad (4)$$

$|R|$ 表示对 R 求行列式, X^H 表示对 X 求共轭转置.

3 相干雷达极化自适应子空间检测器

H_1 对 H_0 的似然比为

$$\frac{\max_a \max_{\sigma_0} f(X | a, R, H_1)}{\max_{\sigma_0} f(X | R, H_0)} > \quad (5)$$

将式(3)和式(4)带入式(5), 得

$$\frac{|X^H R^{-1} X|^2}{\max_a |(X - Sa)^H R^{-1} (X - Sa)|^2} > \quad (6)$$

要使式(6)的左边最大化, 也就等同于求下面的最小二乘问题

$$\min_a (X - Sa)^H R^{-1} (X - Sa) \quad (7)$$

由文[13], 得到 a 的最小二乘估计

$$\hat{a} = (S^H R^{-1} S)^{-1} S^H R^{-1} X$$

代入式(6), 得到

$$\frac{X^H R^{-1} S (S^H R^{-1} S)^{-1} S^H R^{-1} X}{X^H R^{-1} X} > \quad (8)$$

用 K 个辅助数据产生 $\sigma_1 R$ 的最大似然估计 $\frac{1}{K} M$ 代替 R ,

$$M = \sum_{k=1}^K X_k X_k^H$$

最终得到极化自适应子空间检测算法

$$\frac{X^H M^{-1} S (S^H M^{-1} S)^{-1} S^H M^{-1} X}{X^H M^{-1} X} > \quad (9)$$

从式(9)可以看出, 在假设 H_0 时, 极化自适应子空间检测算法与主数据和辅助数据的杂波功率因子 σ_0, σ_1 无关, 即关于杂波功率因子有恒虚警的性质. 文献[4]是对于一个极化通道情况, 本文将自适应子空间检测器推广到 L 个极化通道情况, 目的在于能够充分利用回波的极化组合信息, 进一步提高对目标判决的检测能力.

多个极化通道的极化广义似然比检验算法表示为^[8]

$$\frac{X^H M^{-1} S (S^H M^{-1} S)^{-1} S^H M^{-1} X}{1 + X^H M^{-1} X} > \quad (10)$$

多个极化通道的极化自适应匹配滤波器算法表示为^[10]

$$\frac{X^H M^{-1} S (S^H M^{-1} S)^{-1} S^H M^{-1} X}{X^H M^{-1} X} > \quad (11)$$

4 检测性能分析

由文献[4]和[7], 式(9)可以表示为

$$\frac{\tau}{\tau + 1 - \tau} > \quad (12)$$

即

$$\tau > \frac{1 - \tau}{1 - \tau}$$

τ 是检测门限, τ 是由于估计杂波协方差矩阵引起的损失因子, 其分布为^[8]

$$f(t) = \frac{K!}{[L(N-1)]! [K-L(N-1)]!} \times (1-t)^{L(N-1)-1} \times t^{K-L(N-1)} \quad (13)$$

在假设 H_0 时, t 和 μ 都是中心卡方分布, 自由度为 $2L$ 和 $2(K-LN+1)$ ^[14], t 和 μ 的概率密度函数分别为

$$f_t(t|H_0) = \frac{t^{L-1}}{(L-1)!} \exp(-t) \quad (14)$$

$$f(\mu|H_0) = \frac{\mu^{K-LN}}{(K-LN)!} \exp(-\mu) \quad (15)$$

于是, 得到 L 个极化通道的自适应匹配滤波器的虚警概率表达式

$$PFA_{PASD} = P(t > \frac{1}{1-t} (1-t)) = \int_0^1 \frac{L-1}{(K-LN+L-1-k)!} \left[\frac{(1-t)}{1-t} \right]^{L-1-k} \left[\frac{1-t}{1-t} \right]^{K-LN+L-k} dt \quad (16)$$

$$PFA_{PASD} = \int_0^1 PFA_{PASD} f(t) dt \quad (17)$$

虚警概率只与 L, N, K 有关, 与杂波协方差矩阵无关, 从而实现了恒虚警检测。

在假设 H_1 时, t 是非中心卡方分布, 自由度为 $2L$, 非中心参数为 μ , μ 是理想匹配滤波器的输出信噪比 SNR_0 , t 的概率密度函数为

$$f_t(t|H_1) = \sum_{n=0}^m \frac{\mu^n}{n!} \exp(-\mu) \frac{t^{m+L-1}}{(m+L-1)!} \exp(-t) \quad (18)$$

的分布与假设 H_0 时相同。经过推导, 得到 L 个极化通道数的自适应匹配滤波器的检测概率为

$$PD_{PASD} = P(t > \frac{1}{1-t} (1-t) | H_1) = \int_0^1 \sum_{i=0}^{K-LN} \frac{\exp[-\frac{\mu(1-t)}{1-t}]}{(K-LN-i)!} \left[\frac{1-t}{1-t} \right]^{K-LN-i} \left[\frac{(1-t)}{1-t} \right]^L \times \sum_{m=0}^{K-LN-i} C_{K-LN-i+L-1}^m \frac{(K-LN-i)!}{(K-LN-i-m)!} \left[\frac{\mu(1-t)^2}{(1-t)(1-t)} \right]^{K-LN-i-m} \exp\left[-\frac{\mu(1-t)^2}{(1-t)(1-t)}\right] dt \quad (19)$$

$$\mu = SNR_0 = a^H (S^H R^{-1} S) a$$

$$PD_{PASD} = \int_0^1 PD_{PASD} f(t) dt \quad (20)$$

当 $L=1$ 对应于文献[6]中检测概率结果。本文中的式(17)、(20)适用于任意极化通道数情况。

由互易原理知道, HV 和 VH 回波带有相同的极化信息, 这里只考虑 HH、VV、HV 三种极化通道回波情况, 即当 $L=3$ 时, 对均匀杂波环境中 PASD、PAMF 和 PGLRT 三种算法的检测性能进行比较。阵列数 N 设为 4, 虚警率设为 10^{-4} , 对应的辅助数据采样数 K 设为 24, 72 分别为对应检测矢量维数的 2, 6 倍。由图 1 发现, 在辅助数据采样数 K 为待检测矢量维数的 2 倍时, 在信噪比较低时, PASD 检测性能优于 PAMF, 在信噪比较高时, PAMF 检测性能优于 PASD, 但两者

都相对于 PGLRT 能有较明显的损失; 当 K 增加为待检测维数

6 倍时, PAMF 和 PGLRT 检测算法之间的差别减小, 两者检测性能都优于 PASD。但极化自适应子空间检测器相对于杂波协方差矩阵和辅助杂波数据的功率因子都有恒虚警的性质, 适合于局部均匀杂波环境的恒虚警检测, 因而更具有稳健性。

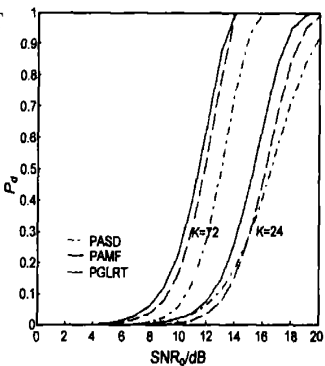


图 1 均匀杂波环境中三种检测算法性能比较

通过蒙特卡罗仿真方法对不同数目极化通

道的极化自适应子空间检测器在不同极化状态时的检测性能进行分析。选择辅助数据量为待检测单元维数的 3 倍, 其他条件同上例。选择类似文献[8]中的极化杂波模型和目标模型。极化杂波模型选择文献[3]中的杂波模型, 为零均值复高斯随机变量, 并假设: (1) 共极化通道和交叉极化通道的杂波分量是相互独立的, 即 $R_{HH/HV} = R_{HV/HH} = R_{VV/HV} = R_{HV/VV} = 0$; (2) 所有极化通道假设有相同的归一化杂波协方差矩阵 C , 为高斯谱模型^[7], 杂波中心频率为零, 杂波谱分布标准差为 0.03; (3) HH 通道和 VV 通道有相同的杂波功率 $\sigma_{HH} = \sigma_{VV}$, HV 通道的杂波功率为 $\sigma_{HV} = r_p \cdot \sigma_{HH}$, 即 $R_{HH/HH} = R_{VV/VV} = \sigma_{HH} C$, $R_{HV/HV} = r_p \sigma_{HH} C$; (4) 两个共极化通道的互相关因子设为 r_p , 则 $R_{HH/VV} = R_{VV/HH} = r_p \cdot \sigma_{HH} C$ 。采用斯威林 I 型目标模型, 每个通道回波为零均值复高斯随机变量。一般地, 各个通道的复幅度 a_1, \dots, a_L 不独立, 因此用目标幅度的协方差矩阵 $R_t = E[aa^H]$ 来定义目标幅度随机变量。先确定协方差矩阵 R_t , 假设: (1) 共极化目标回波幅度与交叉极化目标回波幅度独立; (2) HH 通道和 VV 通道假设有相同的目标功率 σ_t^2 , 而 HV 通道的功率为 $r_t \sigma_t^2$; (3) 两个共极化通道的互相关因子设为 r_t 。主辅数据杂波功率比设为 $\rho = \sigma_0^2 / \sigma_1^2 = 0.65$ 。交叉极化通道的杂波功率设为比共极化通道的杂波功率小 10dB ($\rho = 0.1$)。目标功率在交叉极化通道也设为比共极化通道小 10dB ($r_t = 0.1$), 因此, 在交叉极化通道的信杂比与共极化通道的相同。作为参

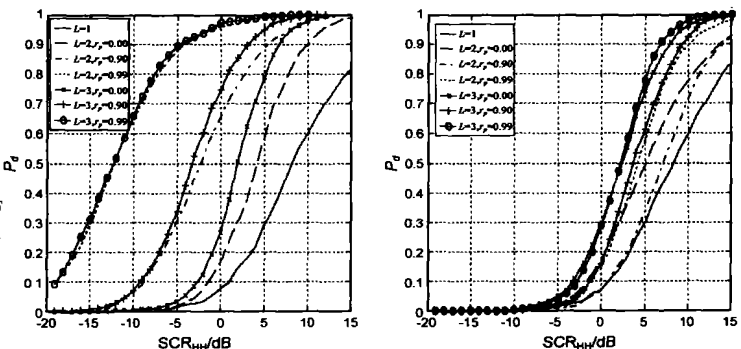


图 2 局部均匀杂波环境中 PASD 检测算法性能

考,单通道检测是对 HH 通道进行的,双通道检测是对 HH 和 VV 通道进行的.为了进行比较,检测概率作为 HH 通道的信杂比(SCR_{HH})的函数.

图 2(a) 对应于独立目标幅度情况,即 $r_t = 0.0$,从中可以看到:(1)两个通道 HH 和 VV 的结合相比较单个 HH 或 VV 通道产生很大的检测性能的提高.在 $P_d = 0.5$ 时,增益约为 4~5dB;(2)在 HH 通道和 VV 通道杂波存在相关时,多极化通道检测器能够对杂波进行抑制,而独立的目标回波不会受到抑制的影响,这样会进一步增强了检测性能;(3)对于目标相关因子 $r_p = 0.0$,三极化通道检测器检测性能优于双极化通道检测器;(4)随着 HH 通道和 VV 通道杂波相关因子的增大,三极化通道相对于两极化通道的检测性能的提高在减小,在 $r_p = 0.99$ 时两者性能几乎一致.图 2(b) 对应于 $r_t = 0.9$ 情况,从中可以看到:与不相关目标情况相比较,当自适应检测器抑制相关杂波时,目标回波同时受到了抑制,因此随着杂波相关的增加,性能提高不显著.

5 结论

本文研究了在未知统计特性的局部均匀高斯杂波环境中的自适应目标检测问题.基于广义似然比检验提出极化自适应子空间检测算法,推导出虚警概率和检测概率的理论表达式.研究结果证明该算法在均匀杂波环境和部分均匀杂波环境都有有恒虚警的性质.仿真分析了均匀杂波环境下极化自适应子空间检测算法、极化广义似然比检验算法和极化自适应匹配滤波器算法,以及局部均匀杂波环境下极化自适应子空间检测算法在不同极化状态的检测性能.结果证明极化自适应子空间检测器相对于杂波协方差矩阵和辅助杂波数据的功率因子都有恒虚警的性质,适合于局部均匀杂波环境的恒虚警检测.

参考文献:

- [1] Chaney R D, Burl M C, Novak L M. On the performance of polarimetric target detection algorithms[A]. IEEE Radar Conference[C]. San Jose: IEEE, 1990. 322 - 330.
- [2] Kelly E J. A adaptive detection algorithm[J]. IEEE Trans on AES, 1986, 22(1): 115 - 127.
- [3] Robey F C, Fuhrmann D R, Kelly E J, Nitzberg R. A CFAR adaptive matched filter detector[J]. IEEE Trans on AES, 1992, 28(1): 208 - 216.
- [4] Kraut S, Scharf L L. The CFAR adaptive subspace is a scale-invariant CLRT[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1999, 47(9): 2538 - 2541.
- [5] Guli D. Polarization diversity in radars[J]. Proc IEEE, 1986, 74(2): 245 - 269.
- [6] Novak L M, Burl M C. Optimal speckle reduction in polarimetric SAR imagery[J]. IEEE Trans on AES, 1990, 26(2): 293 - 305.
- [7] Park H, Li J, Wang H. Polarization-space-time domain generalized likelihood ratio detection of radar targets[J]. Signal Processing, 1995, 41(2): 153 - 164.
- [8] Pastina D, Lombardo P, Bucciarelli T. Adaptive polarimetric target detection with coherent radar[J]. IEEE Trans on AES, 2001, 37(4): 1194 - 1219.
- [9] Maio A D, Ricci G. A polarimetric adaptive matched filter[J]. Signal Processing, 2001, 81(3): 2583 - 2589.
- [10] 刘立东, 吴顺君, 王万林. 相干雷达极化自适应匹配滤波器[J]. 西安电子科技大学学报, 2005, 32(1): 98 - 102.
- [11] Maio A D, Ricci G. A polarimetric adaptive matched filter[J]. Signal Processing, 2001, 81(3): 2583 - 2589.
- [12] Goodman N R. Statistical analysis based on a certain multivariate complex distribution[J]. Annals of Mathematical Statistics, 1963, 34: 152 - 180.
- [13] Scharf L L. Statistical Signal Processing[M]. New York: Addison-Wesley, 1991.
- [14] Muirhead R J. Aspects of Multivariate Statistical Theory[M]. New York: Wiley, 1982.

作者简介:

刘立东 男, 1973 年出生于辽宁省营口市, 现为西安电子科技大学博士生, 主要研究方向为雷达恒虚警检测, 阵列信号处理, 自适应信号处理等. E-mail: smartlld@163.com.

吴顺君 男, 1942 年出生于上海市, 西安电子科技大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为自适应信号处理, 高速实时并行信号处理, 信号检测和估计等.

孙晓闻 男, 1975 年出生于河南省新乡市, 博士, 主要研究方向为雷达系统分析与仿真, 雷达信号处理等.