

一种简单的相干雷达极化恒虚警检测算法

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 西安 710071)

摘要: 该文提出了高斯杂波背景下一种结构简单的相干雷达极化恒虚警检测算法。利用雷达回波的极化信息来提高检测性能, 推导出了虚警概率表达式。研究结果表明, 该相干雷达极化恒虚警检测算法相对于杂波协方差矩阵有恒虚警的性质。该检测算法比极化广义似然比检测算法计算量小, 易于工程实现, 适合于强信杂比和目标信号导向矢量未知的情况。同时仿真分析了不同极化状态时的检测性能。

关键词: 相干雷达, 极化, 恒虚警

中图分类号: TN957.51 文献标识码: A 文章编号: 1009-5896(2005)07-1069-04

A Simple Polarimetric CFAR Detector for Coherent Radar

Liu Li-dong Wu Shun-jun Sun Xiao-wen

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

Abstract A simple polarimetric CFAR detector for coherent radar against a Gaussian background is presented. The expression of PFA for the detector is derived. It is shown that the proposed detector has the constant false alarm properties with respect to the covariance matrix of the clutter. With respect to the polarimetric generalized likelihood ratio test detector, the proposed one has less complexity. It is appropriate to high SCR and unknown steering vector case. The performance in different polarimetric cases is analyzed.

Key words Coherent radar, Polarimetric, CFAR

1 引言

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。在相干雷达系统中, 需要从杂波中检测雷达目标。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相干雷达检测, Kelly 提出了广义似然比检验(GLRT)算法^[2]。该检测算法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(LRT), 其对于杂波协方差矩阵有恒虚警的性质。Park 等人^[3]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 GLRT 算法。Pastina 等人^[4]将文献[3]中的结果推广到 3 个或更多个极化通道情况(PGLRT)。研究结果表明, 利用多个极化通道的回波信号可以进一步增强对目标的检测能力。Zhang^[5]提出了一种结构简单的恒虚警检测结构。该检测算法与文献[2]中 GLRT 检测算法在大辅助数据量时检测性能相近, 但计算复杂度大为降低。Park 等人^[6]将文献[5]中的结果推广到双极化通道单

脉冲情况。本文采用文献[7]中的雷达极化回波模型, 利用雷达回波的极化信息来提高检测性能, 将文献[5,6]中的检测算法结构推广到一般极化接收通道一般相干脉冲数情况, 提出了一种结构简单的极化相干雷达恒虚警检测算法, 称之为简单极化检测(SPD)算法。同时推导出了虚警概率表达式。研究结果表明, 该检测算法相对于杂波协方差矩阵有恒虚警的性质。同时采用文献[7]中的极化雷达回波模型, 仿真分析了不同极化状态时检测性能。

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, 并且可以在两个极化方向上并行接收雷达回波。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。这里我们考虑一般意义 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:

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

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

$$S = I_L \otimes s, \quad a = \begin{bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_L \end{bmatrix}$$

$L=3$, 为

$$S = \begin{bmatrix} s & 0 & 0 \\ 0 & s & 0 \\ 0 & 0 & s \end{bmatrix}, \quad a = \begin{bmatrix} a_{HH} \\ a_{VV} \\ a_{HV} \end{bmatrix}$$

$$s = [1, \exp(j2\pi f_d), \dots, \exp(j2\pi(N-1)f_d)]^T$$

s 是 $N \times 1$ 维导向矢量, f_d 是目标相对于脉冲重复频率(PRF)的归一化多普勒频率。 I_L 是 L 阶单位阵, \otimes 表示直积, a_1, \dots, a_L 是相对应回波通道的复幅度。 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, 其相同的 $LN \times LN$ 维杂波协方差矩阵为如下分块矩阵形式:

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

$L=3$, 为

$$R = \begin{bmatrix} R_{HH/HH} & R_{HH/VV} & R_{HH/HV} \\ R_{VV/HH} & R_{VV/VV} & R_{VV/HV} \\ R_{HV/HH} & R_{HV/VV} & R_{HV/HV} \end{bmatrix}$$

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。

所以, X 的概率密度为^[8]

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

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

$|R|$ 是对 R 求行列式, H_0 假设目标不存在, 回波信号只包含杂波, H_1 假设目标存在, 回波信号包含目标信号加杂波, X^H 表示对 X 共轭转置。

3 简单结构的相干雷达极化恒虚警检测结构

由文献[5], 我们得到一种检测算法的结构:

$$X^H M^{-1} X \begin{cases} > \eta, H_1 \\ < \eta, H_0 \end{cases} \quad (5)$$

$$M = \sum_{k=1}^K X_k X_k^H \quad (6)$$

多极化通道的广义似然比检测算法表示为^[4]

$$\frac{X^H M^{-1} S (S^H M^{-1} S)^{-1} S^H M^{-1} X}{1 + X^H M^{-1} X} \begin{cases} > \eta, H_1 \\ < \eta, H_0 \end{cases} \quad (7)$$

我们发现式(5)与式(7)相比较, 大大减少了计算量, 有利于算法实现。而且, 式(5)不需要像式(7)那样知道目标导向矢量 s , 降低了系统的复杂度。在假设 H_0 时, 由 T^2 检验定理^[9], 得检验统计量式(5)等效于

$$\frac{t}{\tau} \begin{cases} > \eta, H_1 \\ < \eta, H_0 \end{cases} \quad (8)$$

其中, t 是自由度为 $2LN$ 的 Chi 随机变量, τ 是自由度为 $2(K-LN+1)$ 的卡方分布随机变量。所以, 虚警概率为

$$\begin{aligned} P_{fa} &= P(\eta > \eta_0 | H_0) = P(t > \eta_0 \tau | H_0) \\ &= \int_0^\infty \left[\int_{\eta_0/\tau}^\infty f_t(t|H_0) dt \right] f_\tau(\tau|H_0) d\tau \end{aligned} \quad (9)$$

$$f_t(t|H_0) = \frac{t^{LN-1} \exp(-t)}{(LN-1)!} \quad (10)$$

$$f_\tau(\tau|H_0) = \frac{\tau^{K-LN} \exp(-\tau)}{(K-LN)!} \quad (11)$$

所以

$$P_{fa} = \sum_{k=0}^{LN-1} \frac{(K-1-k)!}{(K-LN)!(LN-1-k)!} \eta_0^{LN-1-k} \left(\frac{1}{1+\eta_0} \right)^{K-k} \quad (12)$$

从虚警概率表达式我们可以看到, 虚警概率只与维数 K, L, N 有关, 而与杂波协方差矩阵无关, 实现了恒虚警检测。当 $L=1$ 和 $L=2, N=1$ 时, 式(12)分别对应于文献[5,6]中虚警概率结果。本文中的式(12)适用于任意极化通道任意相干脉冲数情况。对于检测概率, 由于无法得到一般意义上的闭式解, 我们通过蒙特卡罗仿真方法进行分析。

4 仿真分析

我们通过蒙特卡罗仿真方法对不同数目极化通道的自适应匹配滤波算法在不同极化状态时的检测性能进行分析。由互易原理^[1]知道, HV 和 VH 回波可以被认为带有相同的极化信息, 所以这里我们只考虑 HH, VV, HV 这3种极化通道回波情况。为此, 我们选择下列参考情况进行比较。相干脉冲数等于8, 虚警概率设为 $P_{fa} = 10^{-5}$ 。3个极化通道的杂波模型选择文献[7]中的杂波模型, 为零均值复高斯随机变量, 协方差矩阵采用式(1)的定义, 并有以下假设: (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^[3]，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 $\eta_{HH} = \eta_{VV}$ ，HV 通道的杂波功率为 $\eta_{HV} = \alpha \cdot \eta_{HH}$ ，即 $R_{HH/HH} = R_{VV/VV} = \eta_{HH}C, R_{HV/HV} = \alpha\eta_{HH}C$ ；(4)两个共极化通道的互相关因子设为 ρ_p ，则 $R_{HH/VV} = R_{VV/HH} = \rho_p \cdot \eta_{HH}C$ 。因此，杂波协方差矩阵：

$$R = \eta_{HH} \begin{bmatrix} C & \rho_p \cdot C & 0 \\ \rho_p \cdot C & C & 0 \\ 0 & 0 & \alpha C \end{bmatrix} \quad (13)$$

为了进行性能分析，我们采用 Swerling 1 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。在进行性能评估时，归一化目标多普勒频率设为 $f_d = 1/8$ 。为了定义极化目标模型，我们先确定协方差矩阵 R_t ，我们作以下假设：(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_i^2 ，而 HV 通道的功率为 $\alpha\sigma_i^2$ ；(3)两个共极化通道的互相关因子设为 ρ_i 。

因此，

$$R_t = \sigma_i^2 \begin{bmatrix} 1 & \rho_i & 0 \\ \rho_i & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_i \end{bmatrix} \quad (14)$$

对于所有比较，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 ($\alpha = 0.1$)，目标功率在交叉极化通道也设为比共极化通道小 10dB ($\alpha_i = 0.1$)。因此，在交叉极化通道的信杂比与共极化通道的相同。作为参考，单通道检测是对 HH(或 VV)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(P_d)作为 HH 通道的信杂比(SCR)的函数。

图 1 是在 $N=8, \rho_i = 0.9, \rho_p = 0.9$ ，接收极化通道数 $L=3$ ，辅助数据量 K 分别取 48,96,144 时本文算法(SPD)与极化广义似然比检测(PGLRT)算法的检测性能曲线。从中我们可以看到，随着辅助数据量的增大，两种检测算法的检测性能都得到改善，这是因为随着辅助数据量的增加，对杂波协方差矩阵的估计就更加准确，估计损失减小了。另一方面，在相同辅助数据量时，极化广义似然比检测算法都比对应的本文算法有大约 2 dB 的检测增益，而且这个差值在两者之间近似于一致，这是因为极化广义似然比检测算法是从最大似然准则推导出的，并且极化广义似然比检测算法利用了导向矢量

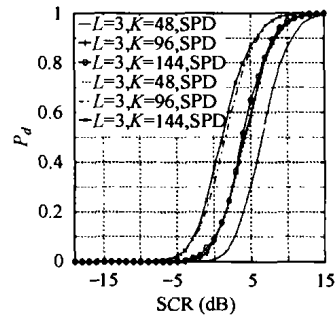


图 1 SPD 与 PGLRT 检测性能比较
($N=8, L=3, K=48, 96, 144$)时

信息，而本文算法不是从最大似然准则推导出的，也未利用导向矢量信息。所以本文算法适合于强信杂比或导向矢量不是精确已知的情况。

图 2 和图 3 的参数设置同上，只是辅助数据量分别为待检测单元维数的 4 倍，图 2 对应的 $\rho_i = 0.00$ ，图 3 对应的 $\rho_i = 0.90$ 。从图 2 中，我们可以看到，本文提出的 SPD 算法检测概率依赖于结合的通道数、杂波极化的相关性质和目标极化的相关性质。从中我们可以看到：(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 $P_d = 0.6$ 时，增益约为 3~4dB；(2)在 HH 通道与 VV 通道杂波存在相关时，多极化通道检测算法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，这样会进一步增强检测性能；(3)对于目标相关因子 $\rho_i = 0$ ，三极化通道检测算法检测性能优于双极化通道检测算法；(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 $\rho_p = 0.99$ 时两者性能几乎一致。图 3 对应于 $\rho_i = 0.90$ 本文 SPD 算法的检测情况，从中我们可以看到：与不相关目标情况相比较，当检测算法抑制相关杂波时，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。

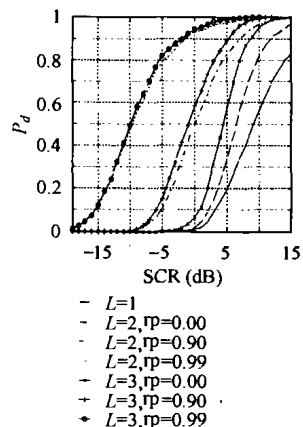


图 2 $\rho_i = 0.00$ 时的
检测概率曲线

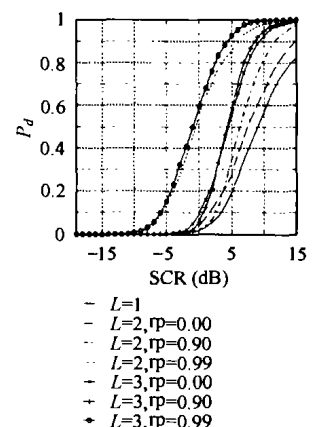


图 3 $\rho_i = 0.90$ 时的
检测概率曲线

5 结束语

本文提出并分析了高斯杂波背景下一种结构简单的相干雷达极化恒虚警检测算法—SPD算法。推导出了虚警概率表达式。研究表明,该检测算法相对于杂波协方差矩阵有恒虚警的性质。而且,比极化广义似然比检测算法计算量小,易于工程实现,适合于强信杂比或目标信号导向矢量不是精确已知的情况。

参考文献

- [1] Giuli D. Polarization diversity in radars. *Proc. IEEE*, 1986, 74(2): 245 – 269.
- [2] Kelly E J. A adaptive detection algorithm. *IEEE Trans. on AES*, 1986, 22(1): 115 – 127.
- [3] Park H, Li J, Wang H. Polarization-space-time domain generalized likelihood ratio detection of radar targets. *Signal Processing*, 1995, 41(2): 153 – 164.
- [4] Pastina D, Lombardo P, Bucciarelli T. Adaptive polarimetric target detection with coherent radar. *IEEE Trans. on AES*, 2001, 37(4): 1194 – 1219.
- [5] Zhang Q T. A CFAR processor for the detection of unknown random signals in nonstationary correlated noise. *Signal Processing*, 1996, 48(1): 17 – 26.
- [6] Park H, Kwang Y, Wang H. An efficient adaptive polarimetric processor with embedded CFAR. *EPRI Journal*, 2003, 25(3): 171 – 178.
- [7] Novak L M, Burl M C. Optimal speckle reduction in polarimetric SAR imagery. *IEEE Trans. on AES*, 1990, 26(2): 293 – 305.
- [8] Goodman N R. Statistical analysis based on a certain multivariate complex distribution. *Annals of Mathematical Statistics*, 1963, 34(1): 152 – 180.
- [9] Muirhead R J. *Aspect of multivariate statistical theory* [M]. New York: John Wiley & Sons, INC, 1982: 88 – 92.

刘立东: 男, 1973年生, 博士生, 研究方向为信号检测与估计、雷达恒虚警处理自适应信号处理.

吴顺君: 男, 1942年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为信号检测和估计、自适应信号处理、高速实时并行信号处理.

孙晓闻: 男, 1975年生, 博士生, 研究方向为雷达系统分析与仿真、雷达信号处理.