

杂波背景中雷达目标极化检测的比较研究

李 军 王雪松 李金梁 王 涛

(国防科技大学电子科学与工程学院, 长沙 410073)

摘 要: 该文导出了高斯随机极化波的瞬态 Stokes 矢量的联合概率密度函数, 由此导出了基于 Stokes 矢量的极化检测器及其检测概率、虚警概率的解析表达式, 并给出了该检测器在不同杂波极化度条件下的检测性能理论曲线。对基于 Stokes 矢量和基于 Jones 矢量的极化检测器进行了比较研究, 给出了大脉冲数条件下二者检测性能差异的解析表达式, 证明了基于 Stokes 矢量的极化检测器是正交双极化接收、非相参积累条件下的最优检测器。

关键词: 极化检测; Stokes 矢量; Jones 矢量; 瞬态极化

中图分类号: TN957.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2010)07-1010-06

Comparative Study of Polarimetric Detection of Radar Targets in Clutter

LI Jun WANG Xue-song LI Jin-liang WANG Tao

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In this paper, we derive the joint probability density functions for the instantaneous Stokes vectors of Gaussian randomly-polarized waves, according to which we derive the polarimetric detectors based on Stokes vectors, whose detection performance is then analyzed. We derive the analytical expressions for detection and false alarm probabilities of the detectors, based on which we obtain the detectors' performance curves for target detection in clutter with different polarization degrees. Detectors based on Stokes vectors and Jones vectors are then comparatively studied. An analytical expression of the performance variance is deduced for the case of large number of pulses, and it is proved that the detector based on Stokes vectors is the optimal polarimetric detector for noncoherent radars with orthogonally-polarized reception channels.

Key words: polarimetric detection, Stokes vector, Jones vector, instantaneous polarization

1 引言

通常情况下, 雷达目标回波和杂波具有不同的极化统计特性。采用全极化发射、接收天线, 对雷达接收信号进行极化检测, 可有效增强雷达的目标探测能力。极化检测的一种方法是根据接收机输出的二维 Jones 矢量信号进行似然比检测^[1, 2]。与 Jones 矢量相比, Stokes 矢量具有更为直观的几何解释 (Poincare 极化球)。近年来随着瞬态极化理论^[3, 4]的发展, 基于 Stokes 矢量的极化检测技术受到更多的关注。例如, 李永祯等人^[5, 6]研究了基于瞬态 Stokes 子矢量的微弱信号检测, 并给出了检测性能的仿真结果; 刘涛等人^[7, 8]定义了极化聚类中心, 在此基础上研究了基于 Stokes 矢量的微弱目标检测算法, 给出了大独立采样数条件下检测概率的近似解析表达式。

本文在上述研究的基础上, 系统地研究了基于 Stokes 矢量的极化检测技术, 导出了基于 Stokes 矢量的极化检测器及其检测性能的解析表达式, 并与基于 Jones 矢量的极化检测器进行了比较研究, 给出了大脉冲数条件下二者检测性能差异的解析表达式, 证明了在非相参积累的条件下, 基于 Stokes 矢量的极化检测器实现了正交双极化接收雷达的最优目标检测。

2 基于 Stokes 矢量的极化检测

2.1 目标回波 Stokes 矢量的统计特性

对于确定极化的非起伏雷达目标, 其散射回波在水平、垂直极化基 (\hat{h}, \hat{v}) 下的 Jones 矢量可表示为:

$$\mathbf{e}(t) = \mathbf{e}_0 + \mathbf{n}(t) = \begin{bmatrix} a_h(t) e^{j\phi_h(t)} \\ a_v(t) e^{j\phi_v(t)} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 \mathbf{e}_0 、 \mathbf{n} 分别为目标回波和杂波的 Jones 矢量。假设杂波服从零均值复高斯分布,则 \mathbf{e} 服从非零均值的复高斯分布,其概率密度函数为:

$$f(\mathbf{e}) = \frac{1}{\pi^2 |\Sigma|} \exp\left\{- (\mathbf{e} - \mathbf{e}_0)^H \Sigma^{-1} (\mathbf{e} - \mathbf{e}_0)\right\} \quad (2)$$

其中 $\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{hh} & \sigma_{hv} \\ \sigma_{hv}^* & \sigma_{vv} \end{bmatrix}$ 为 \mathbf{e} 的协方差矩阵,上标“*”表示

复共轭,“H”表示共轭转置。

令 $\phi = \phi_v - \phi_h$, 则 (a_h, a_v, ϕ) 的联合概率密度函数可表示为^[9]:

$$f(a_h, a_v, \phi) = \frac{2a_h a_v}{\pi |\Sigma|} I_0(\xi) e^{-e_0^H \Sigma^{-1} e_0 - e^H \Sigma^{-1} e} \quad (3)$$

其中 $\xi = 2 |e^H \Sigma^{-1} e_0|$, $I_0(\cdot)$ 为第一类零阶修正 Bessel 函数。

目标散射回波的时域瞬态 Stokes 矢量定义为^[3]:

$$\mathbf{J}(t) = \mathbf{R}(\mathbf{e}(t) \otimes \mathbf{e}^*(t)) = \begin{bmatrix} g_0(t) \\ g_1(t) \\ g_2(t) \\ g_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_h^2(t) + a_v^2(t) \\ a_h^2(t) - a_v^2(t) \\ 2a_h(t)a_v(t)\cos\phi(t) \\ 2a_h(t)a_v(t)\sin\phi(t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中“ \otimes ”表示 Kronecker 积,

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & j & -j & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

并满足: $2\mathbf{R}^{-1} = \mathbf{R}^H$ 。

根据 Kronecker 积的性质,可推知:

$$\begin{aligned} \xi^2 &= 4 (\mathbf{e} \otimes \mathbf{e}^*)^H (\Sigma^{-1} \mathbf{e}_0 \otimes (\Sigma^{-1})^* \mathbf{e}_0^*) \\ &= (\mathbf{e} \otimes \mathbf{e}^*)^H \mathbf{R}^H \mathbf{R} (\Sigma^{-1} \otimes (\Sigma^{-1})^*) \mathbf{R}^H \mathbf{R} (\mathbf{e}_0 \otimes \mathbf{e}_0^*) \\ &= \mathbf{J}^T \mathbf{A} \mathbf{J}_0 \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $\mathbf{A} = \mathbf{R}(\Sigma^{-1} \otimes (\Sigma^{-1})^*) \mathbf{R}^H$, $\mathbf{J}_0 = \mathbf{R}(\mathbf{e}_0 \otimes \mathbf{e}_0^*)$,

$\mathbf{J} = \mathbf{R}(\mathbf{e} \otimes \mathbf{e}^*)$ 。

记瞬态 Stokes 子矢量 $\mathbf{g} = [g_1, g_2, g_3]^T$, 其中上标“T”表示转置,则有 $g_0 = \|\mathbf{g}\| = (g_1^2 + g_2^2 + g_3^2)^{1/2}$ 。根据式(3)~(6)可知 \mathbf{g} 的联合概率密度函数:

$$f(\mathbf{g}) = \frac{f(a_h, a_v, \phi)}{J(a_h, a_v, \phi)}$$

$$= \frac{1}{4\pi |\Sigma|} \frac{1}{\|\mathbf{g}\|} I_0\left(\sqrt{\mathbf{J}^T \mathbf{A} \mathbf{J}_0}\right) e^{-\mathbf{J}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{J}_0 - \mathbf{J}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{J}} \quad (7)$$

其中, $\mathbf{J} = \frac{1}{|\Sigma|} [\sigma_{vv}, -\sigma_{hv}^*, -\sigma_{hv}, \sigma_{hh}]^T$, $\mathbf{J}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{J} = \mathbf{e}^H \Sigma^{-1} \mathbf{e}$,

$J(a_h, a_v, \phi) = 4g_0 \sqrt{g_0^2 - g_1^2}$ 为变换 $\mathbf{g} = [g_1, g_2, g_3]^T$ 的雅可比行列式。

令 $\mathbf{e}_0 = [0, 0]^T$, 则根据式(7)可得零均值复高斯分布随机极化波的 Stokes 子矢量的联合概率密度函数:

$$f_0(\mathbf{g}) = \frac{1}{4\pi |\Sigma|} \frac{1}{\|\mathbf{g}\|} \exp\{-\mathbf{J}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{J}\} \quad (8)$$

2.2 检测器设计

对于杂波,令

$$\mathbf{J}_{k,n} = \mathbf{R}(\mathbf{n}_k \otimes \mathbf{n}_k^*) = [\|\mathbf{g}_{k,n}\|, \mathbf{g}_{k,n}^T]^T \quad (9)$$

其中, $k = 1, 2, \dots, N$, N 为发射脉冲数, \mathbf{n}_k 为杂波 Jones 矢量,并且 $\{\mathbf{n}_k\}$ 相互独立。当存在目标回波时,令

$$\mathbf{J}_{k,n} = \mathbf{R}((\mathbf{e}_0 + \mathbf{n}_k) \otimes (\mathbf{e}_0 + \mathbf{n}_k)^*) = \mathbf{J}_0 + \mathbf{J}'_{k,n} \quad (10)$$

其中, $\mathbf{J}'_{k,n} = \mathbf{J}_{k,n} + \mathbf{R}(\mathbf{n}_k \otimes \mathbf{e}_0^* + \mathbf{e}_0 \otimes \mathbf{n}_k^*) = [\zeta, \mathbf{g}'_{k,n}]^T$ 。

假设杂波功率远大于接收机热噪声功率,因此忽略接收机热噪声,雷达采用水平、垂直极化的双极化接收通道,则基于 Stokes 矢量的目标检测(以下简称 Stokes 检测)可表示为如下的二元假设检验:

$$H_0: \mathbf{g}_k = \mathbf{g}_{k,n} \quad (11)$$

$$H_1: \mathbf{g}_k = \mathbf{g}_0 + \mathbf{g}'_{k,n}$$

其中 $k = 1, 2, \dots, N$ 。上述模型对应的对数似然比判决为:

$$\ln \Lambda(\mathbf{g}) = \ln \frac{\prod_{k=1}^N f(\mathbf{g}_k | H_1) H_1}{\prod_{k=1}^N f(\mathbf{g}_k | H_0) H_0} \underset{<}{>} \ln \eta \quad (12)$$

将式(7)、(8)代入式(12),整理可得检验统计量:

$$\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \ln I_0\left(\sqrt{\mathbf{J}_k^T \mathbf{A} \mathbf{J}_0}\right) \underset{<}{>} \frac{1}{N} \ln \eta + \mathbf{J}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{J}_0 \quad (13)$$

其中 $\mathbf{J}_k = \mathbf{R}(\mathbf{e}_k \otimes \mathbf{e}_k^*)$, \mathbf{e}_k 为第 k 个脉冲的 Jones 矢量。

式(13)即为基于 Stokes 矢量的最优检测器结构,但其包含复杂的非线性运算,不利于系统实现。因此考虑对其进行简化,以获得易于实现的检测器结构。

对于 $x < 1$, 函数 $\ln I_0(x)$ 可做如下近似^[10]:

$$\ln I_0(x) = \ln \left(1 + \frac{x^2}{4} + \frac{x^4}{64} + \dots \right) \cong \frac{x^2}{4} + O(x^4) \quad (14)$$

其中 $O(x^4)$ 表示当 $x \rightarrow 0$ 时, x^4 的同阶无穷小量。由上式可知,在低信杂比条件下,式(13)可表示为:

$$T = \sum_{k=1}^N \frac{1}{\sqrt{\mathbf{J}_0^H \mathbf{A} \mathbf{J}_0}} \mathbf{J}_k^T \mathbf{A} \mathbf{J}_0 \begin{matrix} H_1 \\ > \\ H_0 \end{matrix} \frac{4 \ln \eta + 4N \mathbf{l}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{J}_0}{\sqrt{\mathbf{J}_0^H \mathbf{A} \mathbf{J}_0}} = \gamma \quad (15)$$

其中 T 为检验统计量, γ 为判决门限。

对于 $x > 1$, $\ln I_0(x) \approx x$ 。因此, 在高信杂比条件下, 式(13) 可近似为:

$$T' = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \sqrt{\mathbf{J}_k^H \mathbf{A} \mathbf{J}_0} \begin{matrix} H_1 \\ > \\ H_0 \end{matrix} \frac{1}{N} \ln \eta + \mathbf{l}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{J}_0 = \gamma' \quad (16)$$

式(15)、(16) 即代表了 Stokes 检测在不同信杂比条件下的准最优检测器结构。

3 检测性能分析

3.1 检测性能的理论分析

由以上的分析过程可知, 检验统计量 T 、 T' 可分别用 Jones 矢量表示为:

$$T = \sum_{k=1}^N \frac{2}{\mathbf{e}_0^H \Sigma^{-1} \mathbf{e}_0} |\mathbf{e}_0^H \Sigma^{-1} \mathbf{e}_k|^2 \quad (17)$$

$$T' = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N |\mathbf{e}_0^H \Sigma^{-1} \mathbf{e}_k| \quad (18)$$

由此可知, 低、高信杂比条件下的 Stokes 检测分别对应平方律、线性律包络检波。由于线性检波和平方律检波系统的检测性能差别很小^[10], 以下仅针对平方律检波展开讨论。

记 $\tilde{T} = \mathbf{e}_0^H \Sigma^{-1} \mathbf{e} / \sqrt{\mathbf{e}_0^H \Sigma^{-1} \mathbf{e}_0 / 2}$, 则 \tilde{T} 为复高斯随机矢量的线性变换, 因此 \tilde{T} 仍服从复高斯分布, 其均值和方差分别为:

$$\begin{aligned} E\{\tilde{T} | H_0\} &= 0 \\ E\{\tilde{T} | H_1\} &= \sqrt{2\mathbf{e}_0^H \Sigma^{-1} \mathbf{e}_0} \\ \text{var}\{\tilde{T} | H_0\} &= \text{var}\{\tilde{T} | H_1\} = 2 \end{aligned} \quad (19)$$

记 $\tilde{T} = T_R + jT_I$, 则由复高斯随机变量的性质可知, T_R 、 T_I 为相互独立的高斯随机变量, 其方差为

$$\text{var}(T_R) = \text{var}(T_I) = \text{var}(\tilde{T})/2 = 1 \quad (20)$$

由此可知, 在 H_0 假设下, T 为 $2N$ 个独立的标准高斯随机变量的平方和, 因此其服从自由度为 $n = 2N$ 的 χ^2 分布, 相应的概率密度函数:

$$f_{\chi_n^2}(x) = \frac{x^{n/2-1}}{2^{n/2} \Gamma(n/2)} e^{-x/2} U(x) \quad (21)$$

其中 $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数, $U(\cdot)$ 为单位阶跃函数。由上式可知, 虚警概率可表示为:

$$P_F = \int_{\gamma}^{\infty} f_{\chi_n^2}(x) dx = Q_{\chi_n^2}(\gamma) \quad (22)$$

其中 $Q_{\chi_n^2}(\gamma)$ 为 χ_n^2 变量的右尾概率^[11]。

在 H_1 条件下, T 服从自由度为 $n = 2N$ 的非中心 χ^2 分布, 其概率密度函数:

$$f_{\chi_n^2(\zeta)}(x) = \frac{1}{2} (x/\zeta)^{\frac{n-2}{4}} e^{-\frac{x+\zeta}{2}} I_{n/2-1}(\sqrt{\zeta x}) U(x) \quad (23)$$

其中 $\zeta = 2N \mathbf{e}_0^H \Sigma^{-1} \mathbf{e}_0$ 为非中心参量, $I_r(\cdot)$ 为 r 阶第一类修正 Bessel 函数。由此可知检测概率:

$$P_D = \int_{\gamma}^{\infty} f_{\chi_n^2(\zeta)}(x) dx = Q_{\chi_n^2(\zeta)}(\gamma) \quad (24)$$

其中 $Q_{\chi_n^2(\zeta)}(\gamma)$ 为非中心 χ_n^2 变量的右尾概率。

3.2 检测性能的仿真实验

令 $\mathbf{e}_0 = 2^{-1/2} \cdot [1, j]^T$ (即目标回波为左旋圆极化波), $N = 1$, $\Sigma = \sigma^2 \mathbf{I}$, 其中 \mathbf{I} 为单位矩阵, Monte Carlo 仿真次数为 10^5 , 则 Stokes 检测概率曲线如图 1 所示, 其中虚线为根据式(24) 得到的理论值, 实线为仿真值, 检测门限由式(22) 确定, $\text{SCR} = \mathbf{e}_0^H \mathbf{e}_0 / 2\sigma^2$ 为信杂比(单个脉冲的目标回波总功率与杂波总功率之比)。由图 1 可知, 理论分析结果与仿真结果较好地吻合。

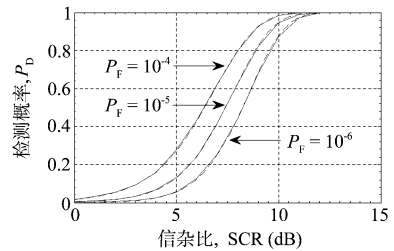


图1 Stokes 检测概率的仿真实验

根据上文的分析, 式(15) 为最优检测器在低信杂比条件下的近似。为比较最优、准最优检测的性能差异, 仿真得到检测概率曲线如图 2 所示, 其中实线为最优检测概率的仿真值, 虚线为根据式(24) 得到的准最优检测概率的理论值, 仿真参数同图 1。

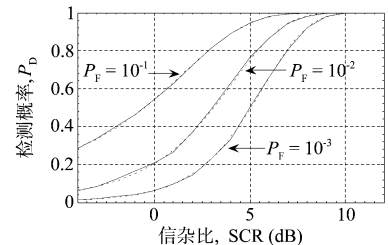


图2 Stokes 最优检测与准最优检测性能比较

图 2 表明, 准最优、最优检测的检测性能差别很小。对于分别采用平方检波律和线性检波律的 Stokes 检测器, 仿真实验表明二者性能差别同样很小。

3.3 杂波极化度对检测性能的影响

式(24)表明,检测性能与非中心参量 ζ ,从而与杂波协方差矩阵 Σ 密切相关。当 $\Sigma = \sigma^2 \mathbf{I}$ 时,有 $\zeta = 2N\mathbf{e}_0^H \mathbf{e}_0 / \sigma^2$,此时检测性能完全取决于信杂比,与信号极化方式无关。

当杂波的两个极化分量具有一定的相关性时,假设 $\sigma_{hh} = \sigma_{vv} = \sigma^2$,并令:

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{hh} & \sigma_{hv} \\ \sigma_{hv}^* & \sigma_{vv} \end{bmatrix} = \sigma^2 \begin{bmatrix} 1 & \rho_0 e^{j\beta} \\ \rho_0 e^{-j\beta} & 1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

其中 $0 < \rho_0 < 1$,则根据:

$$\lambda_2 \mathbf{x}^H \mathbf{x} \leq \mathbf{x}^H \Sigma^{-1} \mathbf{x} \leq \lambda_1 \mathbf{x}^H \mathbf{x} \quad (26)$$

其中 $\lambda_1 = 1/(1 - \rho_0)\sigma^2$ 、 $\lambda_2 = 1/(1 + \rho_0)\sigma^2$ 为矩阵 Σ^{-1} 的特征值,可知:

$$\frac{2N}{(1 + \rho_0)} \frac{\mathbf{e}_0^H \mathbf{e}_0}{\sigma^2} \leq \zeta \leq \frac{2N}{(1 - \rho_0)} \frac{\mathbf{e}_0^H \mathbf{e}_0}{\sigma^2} \quad (27)$$

由极化度 D_p 的定义^[12]可知:

$$D_p = \frac{\sqrt{(\sigma_{hh} - \sigma_{vv})^2 + 4|\sigma_{hv}|^2}}{\sigma_{hh} + \sigma_{vv}} = \rho_0 \quad (28)$$

由式(27)、(28)可知,随着杂波极化度增加(ρ_0 增大), ζ 的变化范围增大。特别的,当 $\rho_0 \rightarrow 1$ 时, ζ 的最大值 $\zeta_{\max} \rightarrow \infty$ 。而由式(24)可知, ζ 值越大,检测性能越好。由此可推知,高的杂波极化度更有利于改善检测性能。

令 $\beta = 0, P_F = 10^{-6}$,其它参数同图 1,根据式(24)得到不同杂波极化度条件下的 Stokes 检测概率如图 3 所示。

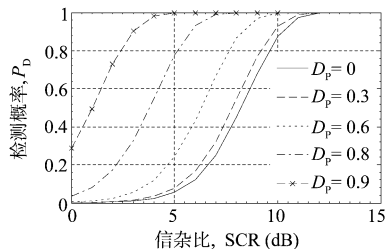


图 3 不同杂波极化度条件下的 Stokes 检测概率

由图 3 可知,与完全未极化杂波($D_p = 0$)中的检测性能相比,部分极化杂波中的 Stokes 检测性能有所改善。例如,对于 $P_D = 0.9$, ρ_0 从 0 增加到 0.3,检测性能改善了 0.4dB; ρ_0 从 0.6 增加到 0.9,检测性能改善了 5.3dB。这表明杂波极化度越高,检测性能改善越显著。

上述杂波极化度对检测性能的影响,可以解释如下:当杂波为完全未极化波时,目标回波与杂波的极化特性差异与目标极化无关,因此检测性能与目标极化无关;随着杂波极化度的增加,杂波极化趋于稳定,此时通过调整雷达发射极化,可使得目标回波与杂波的

极化特性差异增大,从而改善雷达检测性能。

3.4 目标极化特性对检测性能的影响

上述分析表明,在部分极化杂波条件下,检测性能随目标极化特性的变化呈现出一定的差异。为进行定量分析,令 $N = 1, P_F = 10^{-6}, D_p = 0.3, \beta = \pi/4, \mathbf{e}_0 = 2^{-1/2} \cdot [1, j]^T, 2^{-1/2} \cdot [1, -j]^T, [1, 0]^T$,其分别对应为左旋圆极化(L)、右旋圆极化(R)、水平线极化(H),则 Stokes 检测概率如图 4 所示。

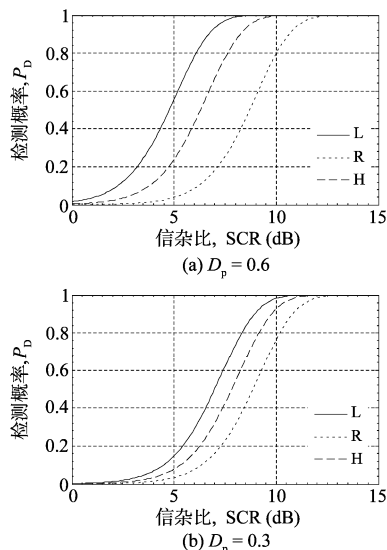


图 4 不同目标极化条件下的 Stokes 检测概率

图 4 表明,当目标极化变化时,目标检测性能表现出较大的差异。例如,对于 $P_D = 0.9$,当 $D_p = 0.6$ 时,检测性能差异可达 4dB 以上。此外,图 4 表明检测性能差异随杂波极化度的增加而增大,这进一步验证了前面的分析结果。

4 与基于 Jones 矢量的极化检测的比较

4.1 相参雷达体制

由前文可知,Stokes 检测与基于 Jones 矢量的检测器(以下简称 Jones 检测)具有如下的等效关系:在小信杂比条件下,Stokes 检测等效为采用平方律包络检波的 Jones 检测;高信杂比条件下,Stokes 检测等效为采用线性包络检波的 Jones 检测。由式(17)可知,Stokes 检测器对回波脉冲进行非相参积累。因此,与相参的 Jones 检测相比,Stokes 检测存在性能损失。

在相参条件下,每个脉冲的目标回波 Jones 矢量具有确定的相位关系,相应的检验统计量为:

$$T_e = \text{Re} \left[\sum_{k=1}^N \mathbf{e}_0^H \Sigma^{-1} \mathbf{e}_k \right] \quad (29)$$

其中 \mathbf{e}_k 为第 k 个脉冲对应的 Jones 矢量。易知 T_e 为实高斯随机变量,相应的检测概率可表示为:

$$P_D = Q\left(Q^{-1}(P_F) - \sqrt{d^2}\right) \quad (30)$$

其中 Q 函数定义为: $Q(x) = \int_x^\infty (2\pi)^{-1/2} e^{-t^2/2} dt$, $Q^{-1}(\cdot)$ 为 Q 函数的逆函数, $d^2 = 2N\mathbf{e}_0^H \Sigma^{-1} \mathbf{e}_0$ 称为偏移系数^[11]。

令 $\Sigma = \sigma^2 \mathbf{I}$, 则由上式可知: 达到特定检测性能所需的单个脉冲信杂比为:

$$\xi_{c,N} = \xi_{c,0}/N = \left[Q^{-1}(P_F) - Q^{-1}(P_D)\right]^2 / 4N \quad (31)$$

其中 $\xi_{c,0} = \left[Q^{-1}(P_F) - Q^{-1}(P_D)\right]^2 / 4$ 为单脉冲检测所需信杂比。

对于 $N \gg 1$, 式(15)中检验统计量 T 近似服从高斯分布, 因此达到相同检测性能所需的单脉冲信杂比 ξ_N 可近似为:

$$\xi_N = \frac{Q^{-1}(P_F) - Q^{-1}(P_D)}{2\sqrt{N}} \quad (32)$$

根据式(31)、(32), Stokes 检测性能损失可表示为:

$$L_N = \frac{\xi_N}{\xi_{c,0}/N} = \frac{2\sqrt{N}}{Q^{-1}(P_F) - Q^{-1}(P_D)} \quad (33)$$

由式(33)可知, 对于给定的检测概率和虚警概率, 检测性能损失近似与发射脉冲数的平方根成正比。

令 $P_F = 10^{-4}$, 分别根据式(24)、式(30)得到非相参、相参检测概率曲线如图5所示, 其中实线和虚线分别对应 Stokes、Jones 检测概率。

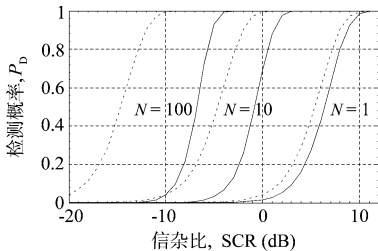


图5 相参、非相参极化检测性能比较

根据图5可知, 对于 $P_D = 0.9$, $N = 1, 10, 100$ 时的性能损失分别为 0.8 dB、3.2 dB 和 7.2 dB, 这表明性能损失随发射脉冲数的增多而增大。对于 $N = 100$, 式(33)的计算结果与根据图5所得结果较为接近: 对于大部分检测概率区间, 其绝对误差小于 1 dB, 并且信杂比越小, 误差越小。由此可推知, 对于 $N > 100$, 式(33)的近似效果较好。

4.2 非相参雷达体制

从回波信息利用的角度看, 由 Jones 矢量到 Stokes 矢量的变换过程中, 损失了目标回波的初始相位信息, 因此 Stokes 检测主要适用于非相参雷达系统。可以证

明, Stokes 检测实现了非相参、双极化接收条件下的最优目标检测, 其证明如下:

基于 Jones 矢量的非相参检测模型可表示为:

$$H_0: \mathbf{e}_k \sim N_c(0, \Sigma) \quad (34)$$

$$H_1: \mathbf{e}_k \sim N_c(e^{j\theta_k} \mathbf{e}_0, \Sigma)$$

其中 $k = 1, 2, \dots, N$, θ_k 为在 $[0, 2\pi]$ 内均匀分布的随机相位, Σ 为杂波协方差矩阵, \mathbf{e}_k 为第 k 个脉冲对应的 Jones 矢量, $\mathbf{e}_k \sim N_c(\boldsymbol{\mu}, \Sigma)$ 表示 \mathbf{e}_k 服从均值为 $\boldsymbol{\mu}$ 、协方差矩阵为 Σ 的复高斯分布。在 $\{\mathbf{e}_k\}$ 相互独立的条件下, 上述模型对应的广义似然比可表示为:

$$\begin{aligned} \Lambda(\mathbf{e}) &= \prod_{k=1}^N E\{\exp\{\operatorname{Re}[2e^{-j\theta_k} \mathbf{e}_0^H \Sigma^{-1} \mathbf{e}_k]\}\} \\ &= \prod_{k=1}^N \int_0^{2\pi} \frac{1}{2\pi} \exp\{\operatorname{Re}[2e^{-j\theta_k} \mathbf{e}_0^H \Sigma^{-1} \mathbf{e}_k]\} d\theta_k \end{aligned} \quad (35)$$

其中 $E\{\cdot\}$ 表示对 θ_k 取统计平均。上式取对数可得:

$$\ln \Lambda(\mathbf{e}) = \sum_{k=1}^N \ln I_0\left(2 \left|\mathbf{e}_0^H \Sigma^{-1} \mathbf{e}_k\right|\right) = \sum_{k=1}^N \ln I_0\left(\sqrt{\mathbf{J}_k^T \mathbf{A} \mathbf{J}_k}\right) \quad (36)$$

式(36)与式(13)比较可知, 在杂波统计特性和目标回波极化已知的条件下, Stokes 检测实现了正交双极化接收、非相参雷达系统的最优目标检测, 其检测性能与非相参 Jones 检测性能相同。

5 结束语

本文针对窄带极化雷达系统, 系统地研究了高斯杂波背景下基于 Stokes 矢量的极化检测器, 并与基于 Jones 矢量的极化检测器进行了比较研究。结果表明, 基于 Stokes 矢量的极化检测器是正交双极化接收、非相参雷达的最优检测器。

在实际的战场环境中, 雷达必然面临复杂多变的电磁干扰和杂波环境, 这些干扰和杂波常常呈现出非高斯分布、非线性变化等特点, 此外雷达目标的极化散射特性也往往是起伏变化的。所以我们下一步的工作重点是研究起伏目标在非高斯、非线性干扰和杂波环境中的最优检测技术。

参考文献

- [1] Pastina D, Lombardo P, Bucciarelli T. Adaptive polarimetric target detection with coherent radar Part I: detection against Gaussian background[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2001, 37(4): 1194-1206.
- [2] De Maio A, Alfano G, Conte E. Polarization diversity detection in compound-Gaussian clutter[J]. IEEE Transac-

tions on Aerospace and Electronic Systems. 2004, 40 (1): 114-131.

- [3] 王雪松. 宽带极化信息处理的研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 1999.
- [4] 李永祯. 瞬态极化统计特性及处理的研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2004.
- [5] 李永祯, 肖顺平, 王雪松, 庄钊文. 基于 ISVS 的微弱信号检测[J]. 电子学报. 2005, 33(6): 1028-1031.
- [6] 李永祯, 谭芳, 汪连栋, 王雪松. 基于 Stokes 子矢量估计的弱信号检测[J]. 雷达科学与技术. 2007, 5(1): 29-33.
- [7] 刘涛, 王雪松, 李永祯, 徐振海, 肖顺平. 基于瞬态极化统计量的微弱信号检测[J]. 应用科学学报. 2007, 25(2): 117-123.
- [8] 刘涛, 王雪松, 李永祯, 徐振海, 肖顺平. 基于瞬态极化统计量的微弱信号检测及优化算法设计[J]. 电子学报. 2008, 36(6): 1158-1163.
- [9] 李永祯, 王雪松, 汪连栋, 肖顺平, 王国玉. 非零均值随机极化波的统计特性[J]. 应用科学学报. 2007, 25(1): 6-10.
- [10] Difrancio J V, Rubin W L. Radar detection[M]. Dedham, MA: Artech House, 1980.
- [11] Kay S M. 统计信号处理基础——估计与检测理论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [12] 庄钊文, 肖顺平, 王雪松. 雷达极化信息处理及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.

作者简介



李 军(1980-),男,国防科技大学电子科学与工程学院博士研究生,主要研究方向为雷达目标检测、飞机尾流电磁散射特性及其雷达探测技术。

E-mail:junliseu@gmail.com



王雪松(1972-),男,博士,国防科技大学电子科学与工程学院教授、博导,主要研究方向为新体制雷达探测、雷达极化信息处理等。

E-mail:wxs1019@vip.sina.com



李金梁(1982-),男,国防科技大学电子科学与工程学院博士研究生,主要研究方向为雷达信号处理、电子对抗等。

E-mail:ljl0901@163.com



王 涛(1976-),男,博士,国防科技大学电子科学与工程学院副研究员,主要研究方向为雷达检测理论、目标识别等。

E-mail:wanter2000@gmail.com