

有源假目标极化识别方案的设计与性能分析

李永祯^{1,2}, 王国玉², 汪连栋², 刘 进¹, 王雪松¹

(1. 国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073; 2. 解放军 63880 部队, 河南洛阳 471003)

摘 要: 本文研究了有源多假目标的极化识别及其性能评估问题. 首先给出了极化雷达对目标和有源假目标干扰的接收信号模型, 然后根据有源真假目标回波特性的差异提出了识别检验量, 并给出了有源假目标的极化识别方案. 最后, 研究了识别检验量的统计特性, 从理论上分析、评估了真假目标极化识别的性能.

关键词: 有源假目标; 极化; 目标识别; 统计分布

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 09-1642-05

Algorithm Designing and Performance Evaluating of Polarization Recognition of Active-Decoys and Radar Targets

LI Yong-zhen^{1,2}, WANG Guo-yu², WANG Lian-dong², LIU Jin¹, WANG Xue-song¹

(1. School of Electronic Science and Engineering, NUDT, Changsha, Hunan 410073, China;

2. PLA unit 63880, Luoyang, Henan 471003, China)

Abstract: The problem of algorithm designing and performance evaluating of polarization recognition of active decoys and radar targets is studied. Firstly, the received signal models of radar targets and active decoys to polarimetric radar are presented. Secondly, two local identification statistical tests based on the differences of active decoys and radar targets are derived. Thirdly, a polarization identification scheme of active decoys is represented. Finally, statistics of two local identification tests are discussed and the performance of polarization identification algorithm is theoretically analyzed and evaluated.

Key words: active decoy; polarization; recognition; statistical distribution

1 引言

随着数字射频存储技术和微电子等技术的快速发展, 有源干扰系统能够以灵活多变的方式自主转发雷达发射信号来压制和欺骗雷达系统, 使得常规的重频捷变、脉宽鉴别、自相关分析法和波形分析法等一些在时域、频域识别方法在一定程度上难以奏效, 从而严重地消耗雷达资源, 使雷达产生混批、饱和等现象^[1, 2, 6], 这对现代雷达防御系统无疑是一个很大的威胁.

目前, 具有极化测量能力的雷达系统逐渐成为当前雷达技术发展的一个主流方向, 极化信息的充分利用为雷达系统削弱恶劣电磁环境的影响、对抗有源干扰、抑制环境杂波、反隐身和识别目标等方面, 提供了颇具潜力的技术途径, 可以有效地提高现代雷达的性能^[3]. 在对抗有源干扰方面, 现有研究工作多数是针对极化度较高的单极化压制式干扰辐射源的, 而对于有源假目标等欺骗式干扰的极化识别研究较少^[3-6]. 文献[6~8]从理

论上探讨了利用极化特性进行识别和抑制多假目标干扰的可行性及原理, 并结合实测数据定性分析了识别性能, 表明极化雷达可以有效识别单极化有源假目标干扰. 但是, 这些文献没有给出识别检验参量的统计分布, 识别判决门限的选取带有一定的盲目性, 难以定量分析真假目标极化识别的性能.

本文首先从雷达相干信号仿真的角度出发, 给出了极化雷达对目标和有源假目标干扰的接收信号模型; 而后具体分析了目标和有源假目标之间的区别, 根据有源真假目标回波特性的差异提出了两个局部识别判决检验量, 并给出了有源假目标的极化识别方案; 最后分析了两个局部判决检验量的统计分布, 导出了目标和有源假目标的正确判决概率和误判率与信噪比(干噪比)和目标(有源假目标)的极化特性之间的关系, 并从理论上分析、评估了极化识别算法的性能. 本文的工作对有源假目标干扰极化识别的工程实现具有重要参考意义.

2 极化雷达的接收信号模型

不失一般性,不妨设极化雷达两副正交天线是水平和垂直极化天线,这是目前极化雷达常采用的极化组态.由于有源假目标和雷达目标独立占据不同的分辨单元,下面分别讨论目标和假目标干扰的接收信号模型.

2.1 雷达目标的接收信号模型

若在当前脉冲重复周期(PRT)内水平天线发射信号,那么结合相干信号仿真^[9]和雷达极化理论^[3]易得,目标在雷达接收天线端口处的后向散射波为

$$e_s(t) = \frac{g_m}{4\pi R^2} A_m(t - \tau) e^{j2\pi f_d(t - \tau)} S_1 h_m \quad (1)$$

其中, g_m 是水平天线的电压增益; R 为目标与雷达之间

的距离; $A_m(t) = \sqrt{\frac{P_t}{4\pi L_t}} \exp(j2\pi f_d t) \mathcal{U}(t)$, f_d 为发射信号载频; $\mathcal{U}(t)$ 为发射信号的复调制函数; P_t 为发射峰值功率; L_t 为发射综合损耗等; τ 为目标的回波时延, $\tau = \frac{2R}{C}$, $C = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$; f_d 为目标的多普勒频率; $S_1 = \begin{bmatrix} S_{HH1} & S_{HV1} \\ S_{VH1} & S_{VV1} \end{bmatrix}$ 为雷达目标在当前姿态、当前频率下的极化散射矩阵,且对于互易性目标而言, $S_1^T = S_1$; $h_m = [1, 0]^T$ 表示天线的极化形式.

因而,对于增益和频率等特性相同的水平天线和垂直天线而言,二者的接收电压为

$$v_{m1}(t) = g_m^2 S_{HH1} X(t) + n_{m1}(t) \quad (2)$$

和

$$v_{c1}(t) = g_m^2 S_{HV1} X(t) + n_{c1}(t) \quad (3)$$

其中, $X(t) = \frac{k_{RF}}{4\pi R^2 L_R} A_m(t - \tau) e^{j2\pi f_d(t - \tau)}$, k_{RF} 为射频放大系数, L_R 为接收损耗; $n_{m1}(t)$ 和 $n_{c1}(t)$ 分别为两正交天线接收通道的接收机噪声,服从正态分布,即有 $n_{m1} \sim N(0, \sigma_m^2)$, $n_{c1} \sim N(0, \sigma_c^2)$, $\sigma_c^2 = \sigma_m^2 = \sigma_0^2$.

同理,在下一个脉冲重复周期内,垂直天线发射信号,两正交天线的接收电压为

$$v_{m2}(t) = g_m^2 S_{HV2} X(t) + n_{m2}(t) \quad (4)$$

和

$$v_{c2}(t) = g_m^2 S_{VH2} X(t) + n_{c2}(t) \quad (5)$$

其中, $S_2 = \begin{bmatrix} S_{HH2} & S_{HV2} \\ S_{VH2} & S_{VV2} \end{bmatrix}$ 为雷达目标在当前姿态下的极化散射矩阵.由于雷达的脉冲重复周期一般在毫秒量级甚至更小,在此期间目标的姿态变化很小,或者讲雷达目标的极化散射特性变化微乎其微,即 $S_1 \approx S_2 = S$,这对于大多数飞行目标是满足的.

2.2 有源假目标干扰的接收信号模型

在水平垂直极化基下,任一有源假目标干扰信号在雷达接收天线端口处可表示为

$$e_j(t) = h_{j1} J_1(t)$$

其中, $J_1(t)$ 为假目标干扰的调制信号,可为任意波形,一般为了避免被雷达从时域和频域识别,其特性应与目标散射波的调制特性相近; $h_{j1} = [h_{jH1}, h_{jV1}]^T$ 为当前干扰信号的极化形式, $\|h_{j1}\| = 1$.

那么,水平天线和垂直天线的接收电压分别为

$$v_{m1}(t) = k_a g_m h_{jH1} J_1(t) + n_{m1}(t) \quad (6)$$

和

$$v_{c1}(t) = k_a g_m h_{jV1} J_1(t) + n_{c1}(t) \quad (7)$$

其中, $k_a = \frac{k_{RF}}{L_R} B_f$, B_f 为干扰信号带宽与接收带宽不匹配引起的损耗等.

同理,在下一个脉冲重复周期内,水平天线和垂直天线的接收电压为

$$v_{m2}(t) = k_a g_m h_{jH2} J_2(t) + n_{m2}(t) \quad (8)$$

和

$$v_{c2}(t) = k_a g_m h_{jV2} J_2(t) + n_{c2}(t) \quad (8)$$

其中, $J_2(t)$ 为假目标干扰在此 PRT 内的调制信号,与 $J_1(t)$ 的主要区别是为了模拟目标运动而带来的相位和幅度变化; $h_{j2} = [h_{jH2}, h_{jV2}]^T$ 为当前 PRT 内干扰信号的极化形式,由于干扰姿态在两个脉冲期间变化很小,对于单极化干扰源而言,其极化形式可近似认为不变,即 $h_{j2} \approx h_{j1} = h$.

3 有源假目标的极化识别方案设计

下面从目标和有源假目标两个角度来具体分析二者具有的特性和区别,为真假目标的鉴别提供基础.从目标的角度来看,由式(3)和式(4)直观可见,对于在两个 PRT 内被动接收的天线而言,在不考虑接收机噪声的情况下,其接收电压相减,根据目标极化散射矩阵的互易性可得

$$\Delta_1 = v_{m2}(t) - v_{c1}(t) \approx 0 \quad (10)$$

而对于假目标干扰而言,由式(7)和式(8)可见, Δ_1 为

$$\Delta_1 = v_{m2J}(t) - v_{c1J}(t) = k_a g_m [h_{jH2} J_2(t) - h_{jV1} J_1(t)] \neq 0 \quad (11)$$

从干扰的角度分析,由式(6)~式(9)直观可见,对于有源假目标干扰而言,在不考虑接收机噪声的情况下,雷达接收信号具有如下关系

$$\begin{aligned} \Delta_2 &= v_{m1J}(t) v_{c2J}^*(t) - v_{m2J}(t) v_{c1J}^*(t) \\ &= k_a^2 g_m^2 J_1(t) J_2^*(t) (h_{jV1} h_{jH2}^* - h_{jV2} h_{jH1}^*) = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

而对于目标而言,显然有

$$\Delta_2 = g_m^4 (S_{VV} S_{HH}^* - S_{HV} S_{HV}^*) |X(t)|^2 \neq 0 \quad (13)$$

这也就是说,对于目标而言, Δ_1 等于零,而 Δ_2 一般情况下不等于零;对于干扰而言, Δ_1 一般情况下不等于零,而 Δ_2 等于零.这为真假目标的识别提供两条重要依据,并可

以给出真假目标识别的判决检验量 η_1 和 η_2 定义为

$$\eta_1 = |\Delta_1|^2, \quad \eta_2 = |\Delta_2|^2$$

由前分析可知, η_1 和 η_2 是从不同侧面反映了真假目标之间的差异, 本文采用首先根据 η_1 和 η_2 分别判断检测点迹的真假, 并给出局部判决结果, 而后采用融合的方法给出最后识别结果. 为了保证雷达目标的误判率保持在恒定水平内, 本文从目标的角度来分析有源假目标的正确识别率和误判率. 即有

$$\mu_1 = \begin{cases} 1, & \eta_1 \geq \beta_1 \\ 0, & \eta_1 < \beta_1 \end{cases}, \quad \mu_2 = \begin{cases} 1, & \eta_2 \leq \beta_2 \\ 0, & \eta_2 > \beta_2 \end{cases}$$

其中, β_1 和 β_2 为局部判决门限. 融合的方法采用 OR 逻辑, 即

$$u = \begin{cases} 0, & \text{if } u_1 = u_2 = 0 \\ 1, & \text{other} \end{cases} \quad (14)$$

当 $\mu = 1$ 时, 判断该检测点迹为真目标, 反之则为有源假目标. 图 1 给出了有源假目标的极化识别方案.

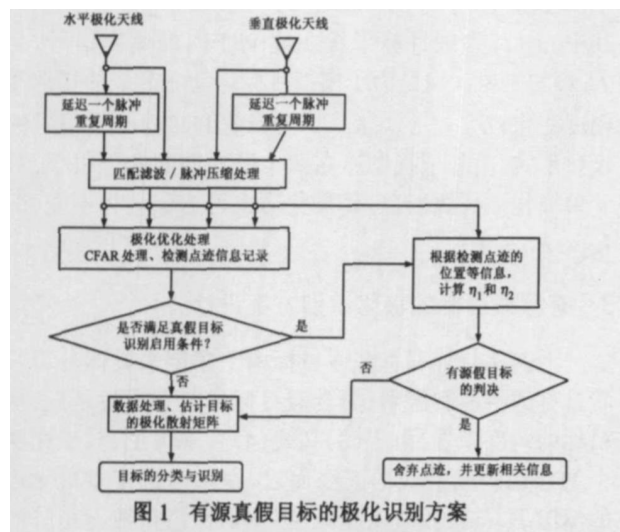


图 1 有源真假目标的极化识别方案

其中, 极化优化处理主要是指采用最优极化检测(OPD)、极化白化滤波器(PWF)、张量合成(SPAN)处理等技术来提高雷达的检测性能; 启用条件的判断主要是根据当前雷达任务、雷达资源和当前波位探测到点迹的数目 M 的相对关系决定. 一般情况下, 若雷达工作于搜索姿态, 可设 $M > 3$ 时, 启用本识别通道; 若在稳定跟踪或制导的过程中, $M \geq 2$ 时, 就可以启动本识别通道来判断是否存在假目标或有源诱饵, 以便后续的拦截能够正确攻击目标.

4 真假目标极化识别的性能分析

4.1 局部判决检验量 η_1 和 η_2 的统计特性

这里为了分析、评估本识别算法的性能, 首先给出两个局部判决检验量 η_1 和 η_2 的统计分布.

(1) η_1 的统计分布

由 $\Delta_1 = v_{m2}(t) - v_{c1}(t)$ 的定义可知, Δ_1 服从正态分

布, 设 $\Delta_1 \sim N(m_1, \sigma_1^2)$. 那么, 在雷达接收信号为目标和干扰情况下 Δ_1 的均值和方差分别为

$$m_1/S = 0, \quad \sigma_1^2/S = 2\sigma_0^2$$

和

$$m_1/J = k_{agm}m_J, \quad \sigma_1^2/J = 2\sigma_0^2$$

其中, $m_J = h_{JH}J_2(t) - h_{JV}J_1(t)$.

进而, 由 $\eta_1 = |\Delta_1|^2$ 可知, η_1 在雷达接收信号为目标和干扰情况下的概率密度函数分别为

$$f(\eta_1/S) = \frac{1}{2\sigma_0^2} \exp\left(-\frac{\eta_1}{2\sigma_0^2}\right) \quad (15)$$

和

$$f(\eta_1/J) = \frac{1}{2\sigma_0^2} \exp\left(-\frac{\eta_1 + k_{agm}^2 m_J^2}{2\sigma_0^2}\right) I_0\left(\frac{2k_{agm} m_J \sqrt{\eta_1}}{2\sigma_0^2}\right) \quad (16)$$

其中, $I_0(z)$ 零阶修正 Bessel 函数.

(2) η_2 的统计分布

由第 2 小节可知, 雷达接收信号无论是目标散射波还是假目标干扰, Δ_2 的概率密度难以给出解析表达式, 因而 Δ_2 的统计分布也难以解析求解, 而由 Δ_2 的定义可近似认为 Δ_2 亦服从正态分布, 设 $\Delta_2 \sim N(m_2, \sigma_2^2)$.

因此, 在雷达接收信号为目标和干扰情况下 Δ_2 的均值和方差分别为

$$m_2/S = g_m^4 |x(t)|^2 m_S, \quad \sigma_2^2/S = 2\sigma_0^4 + \sigma_0^2 g_m^4 |x(t)|^2 E_S$$

和

$$m_2/J = 0, \quad \sigma_2^2/J = 2\sigma_0^4 + \sigma_0^2 k_{agm}^2 (|J_1(t)|^2 + |J_2(t)|^2)$$

其中, $m_S = S_{HH}S_{VV}^* - S_{HV}S_{HV}^*$, $E_S = |S_{HH}|^2 + |S_{HV}|^2 + |S_{VV}|^2 + |S_{HH}|^2$.

进而由 $\eta_2 = |\Delta_2|^2$ 可知, η_2 在雷达接收信号为目标和干扰情况下的概率密度函数分别为

$$f(\eta_2/S) = \frac{1}{2\sigma_0^4 + \sigma_0^2 g_m^4 |x(t)|^2 E_S} \exp\left(-\frac{\eta_2 + g_m^8 |x(t)|^4 m_S^2}{2\sigma_0^4 + \sigma_0^2 g_m^4 |x(t)|^2 E_S}\right) \cdot I_0\left[\frac{2g_m^4 |x(t)|^2 m_S \sqrt{\eta_2}}{2\sigma_0^4 + \sigma_0^2 g_m^4 |x(t)|^2 E_S}\right] \quad (17)$$

和

$$f(\eta_2/J) = \frac{1}{2\sigma_0^4 + \sigma_0^2 k_{agm}^2 (|J_1(t)|^2 + |J_2(t)|^2)} \exp\left(-\frac{\eta_2}{2\sigma_0^4 + \sigma_0^2 k_{agm}^2 (|J_1(t)|^2 + |J_2(t)|^2)}\right) \quad (18)$$

由大量计算机仿真结果可知, η_2 的近似概率密度函数曲线和其统计直方图是一致的, 经概率分布密度拟合优度的 χ^2 检验(检验水平为 0.01)验证了这一结论, 这进一步表明 Δ_2 的正态分布假设是可行的.

4.2 算法性能的理论分析与评估

为了刻画有源真假目标的识别概率随信噪比(SNR)或干噪比(JNR)的变化关系, 首先给出 SNR 和

JNR 的定义为

$$\text{SNR} = \frac{g_m^4 |x(t)|^2 (|S_{HH}|^2 + |S_{HV}|^2 + |S_{VH}|^2 + |S_{VV}|^2)}{4\sigma_0^2}$$

$$= \frac{g_m^4 |x(t)|^2 E_S}{4\sigma_0^2}$$

和

$$\text{JNR} = \frac{k^2 g_m^2 (|J_1(t)|^2 + |J_2(t)|^2)}{4\sigma_0^2}$$

同时, 为了便于分析目标和干扰的极化特性对识别算法的影响, 定义如下两个参数, 目标形状因子 γ 和干扰极化因子 λ 为

$$\gamma = \frac{|S_{WH} S_{HH}^* - S_{HV} S_{HV}^*|}{|S_{HH}|^2 + |S_{HV}|^2 + |S_{VH}|^2 + |S_{VV}|^2} = \frac{m_S}{E_S}$$

和

$$\lambda = \frac{|h_H J_2(t) - h_V J_1(t)|^2}{|J_1(t)|^2 + |J_2(t)|^2} = \frac{|m_I|^2}{|J_1(t)|^2 + |J_2(t)|^2}$$

显然, 根据简单形体目标的极化散射矩阵可知, 对于金属球、平板、三面角反射器、垂直偶极子、水平偶极子等目标而言, 目标形状因子 $\gamma = \frac{1}{2}$, 而对于二面角为 $\gamma = \frac{1}{4}$ 等; 不同目标的形状因子 γ 不同, 从一个侧面定性的描述了目标的极化特性. 而对于干扰极化因子 λ 也侧重描述了干扰的极化特性, 诸如对于圆极化干扰, $\lambda = 1$; 而对于水平或垂直线极化干扰, $\lambda = \frac{1}{2}$.

下面结合两个局部判决检验量 η_1 和 η_2 的统计分布, 具体分析、评估有源真假目标极化识别的性能. 设 P_{d1} 和 P_{d2} 分别为两个局部判决中目标的正确判决概率, α_1 和 α_2 为目标的误判率; P_{f1} 和 P_{f2} 分别为两个局部判决中有源假目标正确识别概率, P_{f1} 和 P_{f2} 为有源假目标误判为目标的概率. 根据“OR”融合规则可知, 目标的正确判决概率 P_D 和有源假目标正确识别概率 P_J 与上述概率参量具有如下关系

$$P_D = 1 - (1 - P_{d1})(1 - P_{d2}) \quad (19)$$

和

$$P_J = P_{d1} P_{d2} \quad (20)$$

相应的, 目标的误判率 α 为

$$\alpha = 1 - P_D = \alpha_1 \alpha_2 \quad (21)$$

由上式可见, 欲使目标的误判率控制内某一恒定水平 α 下, 只要使任一局部判决中目标的误判率不超过该水平即可得以保证.

对于第一个局部判决表达式, 为了保证目标的误判率在一个恒定水平 α 下, 要求

$$\int_{\beta_1}^{\infty} f\left(\eta_1/S\right) d\eta_1 \leq \alpha$$

由此, 可得局部判决门限 $\beta_1 = -2\sigma_0^2 \ln \alpha$. 相应的, 目标的正确识别率为 $P_{d1} = 1 - \alpha$.

此时有源假目标的正确判决率为

$$P_{dJ1} = \frac{1}{2\sigma_0^2} e^{-2\lambda \text{JNR}} \int_{\beta_1}^{\infty} e^{-\frac{\eta_1}{2\sigma_0^2}} I_0\left(\frac{2\sqrt{\lambda \text{JNR} \eta_1}}{\sigma_0}\right) d\eta_1$$

而假目标误判为雷达目标的概率为 $P_{f1} = 1 - P_{dJ1}$.

对于第二个判决表达式, 为了使有源假目标的误判概率保持在一个相对低的水平, 设 $P_{f2} \leq P_{fa}$ 下, 即有

$$\int_0^{\beta_2} f\left(\eta_2/J\right) d\eta_2 \leq P_{fa}$$

由此可得局部判决门限 $\beta_2 = -2\sigma_0^4 (1 + 2\text{JNR}) \ln P_{fa}$. 相应的, 有源假目标的正确判决率为 $P_{dJ2} = 1 - P_{fa}$.

此时目标的正确判决率为

$$P_{d2} = \frac{1}{2\sigma_0^4 (1 + 2\text{SNR})} e^{-\frac{8\gamma^2 \text{SNR}^2}{1 + 2\text{SNR}}} \int_{\beta_2}^{\infty} e^{-\frac{\eta_2}{2(1 + 2\text{SNR})\sigma_0^4}} \cdot I_0\left(\frac{4\gamma \text{SNR}}{\sigma_0^2 (1 + 2\text{SNR})} \sqrt{\eta_2}\right) d\eta_2 \quad (22)$$

而目标的误判概率为 $\alpha_2 = 1 - P_{d2}$.

那么, 雷达目标的正确判决概率 P_D 可简化表示为

$$P_D = 1 - \alpha (1 - P_{d2}) \quad (23)$$

而有源假目标的正确判决概率可简化为

$$P_J = P_{dJ1} (1 - P_{fa}) \quad (24)$$

图 2 给出了雷达目标和有源假目标干扰的正确判决概率随着信噪比(干噪比)的变化曲线, 其中, 雷达目标的误判概率不超过 $\alpha = 10^{-4}$, 有源假目标的局部误判概率 $P_{fa} = 10^{-2}$, 目标形状因子 $\gamma = \frac{1}{2}$, 干扰极化因子 $\lambda = \frac{1}{2}$.

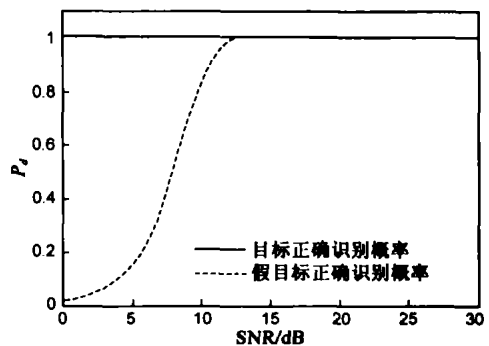


图 2 雷达目标和有源假目标正确判决概率随着信噪比(干噪比)的变化曲线

由图 2 和式(23)可见, 从目标识别的角度来看, 已检测的目标的正确判决概率基本不随信噪比的变化而变化, 且与目标的形状因子参数 γ 关系不大, 主要取决于预先设定的误判率水平 α 值; 而有源假目标干扰的正确判决概率随着干噪比和干扰极化因子的变化而变化, 对于圆极化干扰基本上在干噪比低于 10dB 的情况下就能够完全识别, 这与文献[7]中结合实测数据仿真

得到的结论是一致的。

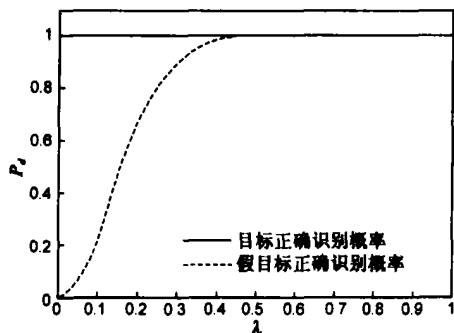


图3 雷达目标和有源假目标的正确判决概率随着干扰极化因子的变化曲线

图3给出了雷达目标和有源假目标干扰的正确判决概率随着干扰极化因子 λ 的变化曲线,其中,信噪比(干噪比) $\text{SNR} = 10\text{dB}$,其他参数与图2一致。由图3可见,有源假目标干扰的正确判决概率与干扰极化因子密切相关,随着干扰极化因子 λ 的减小,在同一干噪比条件下,正确识别的概率亦在减小。特别的,当干扰极化因子等于零时,即有

$$h_{\text{JH}}J_2(t) = h_{\text{JV}}J_1(t)$$

有源假目标干扰就难以利用极化信息进行有效识别。这对于有源干扰系统的优化设计具有重要参考意义。

5 结束语

有源假目标干扰是雷达电子战中使用广泛的一种军事行动,可以起到抑制、削弱、扰乱雷达的正常工作,多次战争表明它具有出奇制胜的作战效果。目前大多数国家正在大力开展研制雷达自适应抗干扰系统和雷达自动目标识别系统,利用目标散射信号与假目标干扰信号参量的差异来鉴别真假目标,诸如信号载频的差异、脉冲宽度的差异、脉冲重复频率的差异、信号调制方式的差异、频谱宽度的差异、频谱内部结构的差异和极化的差异等。

从本文的分析结果来看,有源真假目标极化特性的差异可以从一个角度增强或者达到完全识别有源假目标干扰的目的。这说明,干扰的极化设计不仅仅考虑接收功率的损失问题,还需要考虑极化的可识别性问题,也就是说为了取得对抗优势,有源电子干扰必须采用合理的极化调制或全极化体制。本文的工作对于导弹防御系统和弹道导弹突防优化设计均有着重要的借

鉴意义。

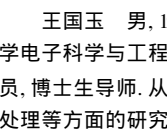
参考文献:

- [1] D C 施莱赫. 信息时代的电子战[M]. 成都: 信息产业部电子二十九研究所, 2000.
- [2] (俄) 维利卡洛夫, 等. 弹道导弹突防中的电子对抗[M]. 成都: 信息产业部电子二十九研究所, 2001.
- [3] 庄钊文, 肖顺平, 王雪松. 雷达极化信息处理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [4] D Giuli. Polarization diversity in radars[J]. Proc of the IEEE, 1986, 74(2): 245-269.
- [5] 王雪松. 宽带极化信息处理的研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 1999. 6.
- [6] 李永祯. 瞬态极化统计特性与处理的研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2004. 12.
- [7] 李永祯, 王雪松, 等. 有源诱饵的极化鉴别研究[J]. 国防科技大学报, 2004, 26(3): 83-88.
- [8] 李永祯, 王雪松, 肖顺平, 庄钊文. 有源假目标的高分辨率极化鉴别研究[J]. 兵工学报, 2005, 26(6): 754-760.
- [9] 王国玉. 基于雷达对抗的战区导弹突防仿真研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 1999. 9.

作者简介:



李永祯 男, 1977 年 12 月出生于内蒙古化德县, 现为国防科技大学讲师, 解放军第三十三基地博士后, 从事雷达极化信息处理、目标识别等方面的研究工作。获军队科技进步二等奖 2 项, 出版专著 1 部。在国内外发表学术论文 50 余篇。
E-mail: e0061@sina.com



王国玉 男, 1962 年出生于安徽巢湖, 1999 年毕业于国防科技大学电子科学与工程学院, 获博士学位, 现为解放军第三十三基地研究员, 博士生导师。从事电子信息对抗系统及其评估、综合信息感知与处理等方面的研究工作。



汪连栋 男, 1966 年出生于天津市, 2004 年于国防科技大学获工学博士学位, 现为解放军第三十三基地研究员。从事电子信息系统试验、仿真与评估方面的研究工作。