

文章编号:1001-9014(2006)04-0311-05

一种基于广义似然比检测的雷达目标识别新方法

王党卫, 马兴义, 王少刚, 关鑫璞, 粟毅
(国防科学技术大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:为了实现发射周期内目标的实时识别,首先建立了 E 脉冲激励下目标回波的二元假设检验模型,在此基础上导出了识别目标的广义似然比检测量,并从理论上给出了计算目标识别概率的解析表达式.基于数值计算的三种细导线目标散射场数据的仿真实验以及理论计算结果表明,本文提出的基于广义似然比检测目标识别新方法的实验目标识别性能与其理论计算值是一致的,且其目标识别性能优于直接发射 E 脉冲目标识别方法.

关键词:目标识别;似然比检测;波形综合
中图分类号:TN959.17 **文献标识码:**A

NEW APPROACH TO RADAR TARGET IDENTIFICATION USING A GENERALIZED LIKELIHOOD RATIO TEST

WANG Dang-Wei, MA Xin-Yi, Wang Shao-Gang, Guan Xin-Pu, Su Yi
(School of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract:To accomplish the target identification in real time during a pulse repetition period, a binary hypothesis test model was firstly established for the scattering signature of a conducting target illuminated by an E-pulse waveform. According to the model, a generalized likelihood ratio test rule was developed for the target identification, and then the analytical expression to calculate the target identification performance was theoretically given. The simulation and analytically calculated results based on scattering signatures of three finite thin wire targets show that the simulation performance of the proposed method is excellently consistent with its analytical results, and is superior to that of the method using directly transmitted E pulse.

Key words:target identification; likelihood ratio test; waveform synthesis

引言

随着现代导弹突防技术的发展,目标识别技术已成为当前反导武器研究的热点,其中大量诱饵中弹头的识别尤为重要.目标极点特征是迄今为止所获得的唯一一个能用于描述目标散射特性而又与目标本身姿态无关的特征量.近几十年来,基于目标极点特征的谐振区雷达目标识别技术一直是人们研究的热点.诸多方法中尤以 Chen 等人提出的使用特殊波形激励目标得到期望后期响应输出的 E 脉冲雷达目标识别方法最具有代表性^[1-4].相对于敏感于目标姿态角的高分辨和成像体制雷达目标识别方法^[5,6],该方法对特定目标的全姿态角识别存在唯一的鉴别信号,且识别过程需要的存储量仅为 10^2 数量级,远远低于高分辨和成像雷达目标识别技术

需要的 10^8 数量级存储单元^[7].然而,为了识别目标,该方法通常只有在发射完目标库中所有目标的 E 脉冲波形后,才能完成对目标的识别,是一种串行识别过程,实效性差,难以满足现代反导武器目标识别系统的实时性要求.

为了实现发射周期内的实时目标识别,本文首先建立了 E 脉冲激励下目标回波的二元假设检验模型,把目标识别问题转化为特定目标有/无的二元检测问题,并根据先验已知的目标极点信息给出了识别目标的广义似然比检测量,在此基础上,从概率论的基本理论出发,推导出了该广义似然比检测量的概率密度表达式,并给出了理论解析计算目标识别概率的方法,最后,通过理论计算的三种细导线目标极点和散射场数据验证了本文方法的目标识别性能,并与理论结果进行了对比.

收稿日期:2005-04-01,修回日期:2006-02-21

Received date: 2005-04-01, revised date: 2006-02-21

作者简介:王党卫(1976-),男,陕西咸阳人,博士生,主要从事雷达目标特性与目标识别、信号处理的研究.

仿真结果表明,本文提出的基于广义似然比检测目标识别新方法的实验识别性能与其理论计算值是一致的,且其目标识别性能优于直接发射 E 脉冲目标识别方法.

1 目标识别二元检测模型的建立

设某目标库具有 M 个待识别目标,其中第 i 个目标冲击响应的后时部分记为

$$r_i^s(t) = \sum_{n=1}^{N_i} a_n^i e^{\sigma_n^i t} \cos(\omega_n^i t + \varphi_n^i), t > T_L \quad (1)$$

其中 σ_n ($\sigma_n < 0$) 和 ω_n 分别为目标复谐振频率的实部和虚部, a_n 及 φ_n 为相应的幅度和相位, T_L 为目标后时响应的开始时间.

按文献[1]中的定义,用于识别第 i 个目标的 E 脉冲信号 $e_i(t)$ 与目标的后时响应 $r_i^s(t)$ 的卷积,在 $t > T_L + T_e$ (其中 T_e 为目标 E 脉冲的持续时间) 时等于零,即

$$\begin{aligned} c_i(t) &= e_i(t) * r_i^s(t) \\ &= \int_{T_L}^{\infty} r_i^s(t-t') e_i(t') dt' \\ &= \int_{T_L}^{T_L+T_e} r_i^s(t-t') e_i(t') dt' = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

其中目标的 E 脉冲

$$e_i(t) = \sum_{k=1}^{K_i} b_k^i f_k(t) \quad (3)$$

$$f_k(t) = \begin{cases} 1, & (k-1)\Delta t \leq t \leq k\Delta t \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中 Δt 为采样间隔,且第 i 个目标的 E 脉冲波形系数 b_k^i 与目标极点 s_k^i 存在以下关系

$$\sum_{k=1}^{K_i} b_k^i e^{s_k^i \Delta t k} = \sum_{k=1}^{K_i} b_k^i (z_k^i)^k = 0, \quad z_k^i = e^{s_k^i \Delta t} \quad (5)$$

其中 $K_i = 2N_i$. 显然,如果我们预先测得了目标的主极点,给定子脉冲的宽度 Δt 后,则通过式(5)可综合出库中第 i 个目标对应的 E 脉冲.

设空中待识别目标为目标库中的第 k 个目标,发射机当前发射的 E 脉冲波形为 $e_i(t)$,则对于 $t > T_L$,发射波形与目标在空中卷积以后,其回波可表示为

$$y(t) = e_i(t) * r_k^s(t) + n(t) \quad (6)$$

其中 $n(t)$ 为系统噪声. 通常系统实际处理的是该回波的离散序列,由文献[8]可知,为了达到最优的目标识别性能,其 E 脉冲子脉冲的宽度应该等于该雷达系统接收机的时域采样间隔,据此,本文以下论述中,目标库中各目标 E 脉冲子脉冲的宽度全部等于接收机采样间隔. 设发射 E 脉冲波形为 $e_i(t)$ (其包

含的子脉冲个数为 $2N_i$),接收采样间隔为 Δ_i ,回波包含的采样数为 q 时,则式(6)可表示为如下的矩阵形式:

$$y_{ik} = F_i r_k + n \quad (7)$$

其中 $y_{ik} = [y_{ik}(1) \ y_{ik}(2) \ \dots \ y_{ik}(q)]^T$,

$$r_k = [r_k(1) \ r_k(2) \ \dots \ r_k(q-2N_i+1)]^T,$$

$$n = [n(1) \ n(2) \ \dots \ n(q)]^T,$$

$$F_i = \begin{bmatrix} e_i(1) & 0 & 0 & \dots \\ \vdots & e_i(1) & 0 & \dots \\ e_i(2N_i) & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & e_i(2N_i) & \ddots & 0 \\ \vdots & 0 & \ddots & e_i(1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots \end{bmatrix}_{q \times (q-2N_i+1)}$$

由中心极限定理可知,系统热噪声采样序列矢量 n 应为均值为零,方差为 $\sigma^2 I$ (这里 I 为 $q \times q$ 的单位阵)的高斯随机变量.

按照式(2)中 E 脉冲的定义可知当发射的 E 脉冲波形与目标匹配时,目标回波的后时响应会被发射 E 脉冲完全消灭.若设 E 脉冲长度为 T_e ,则当 $t > T_L + T_e$ 时,式(7)变为

$$y = n \quad (8)$$

当发射 E 脉冲与目标不匹配时,目标后时响应不能完全被发射脉冲消灭,设 $N_e = T_e/\Delta_i$,则当 $t > T_L + T_e$ 时,式(7)应为

$$y = G_i r_k + n' \quad (9)$$

其中 $G_i = F_i(N_e+1:q, 1:q-2N_i+1)$ 和 n' 分别由矩阵 F_i 的第 N_e+1 至第 q 行 $1:q-2N_i+1$ 列和 n 的第 N_e+1 至第 q 行的元素构成.显然,对第 k 个目标的识别,实际可通过检验式(8)中是否有其他非噪声信号来完成.据此,对应于发射的 E 脉冲 $e_i(t)$,本文建立如下目标识别二元假设检验模型

$$\begin{cases} H_0: & y = n' \\ H_1: & y = G_i r_k + n' \end{cases} \quad (10)$$

其中, H_0 代表空中目标是目标库中第 k 个目标, H_1 代表空中目标非第 k 个目标.

2 目标识别新方法的广义似然比检测测量

通常,目标库中各目标的极点可以通过暗室测量或数值计算获得.设第 k 个目标的主极点为 $\{s_1, s_2, \dots, s_N\}$,则假设 H_1 可写为

$$H_1: y = G_i B_k a_k + n' \quad (11)$$

其中 $a_k = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_N]^T$,

$$\mathbf{B}_k = \text{Re} \begin{bmatrix} e^{s_1 T_L} & e^{s_2 T_L} & \dots & e^{s_N T_L} \\ e^{s_1 (T_L + \Delta_i)} & e^{s_2 (T_L + \Delta_i)} & \dots & e^{s_N (T_L + \Delta_i)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ e^{s_1 (T_L + q\Delta_i)} & e^{s_2 (T_L + q\Delta_i)} & \dots & e^{s_N (T_L + q\Delta_i)} \end{bmatrix}.$$

显然当假设 \mathbf{a}_k 已知时,式(10)二元假设检验的似然比可用假设 H_1 和 H_0 的条件概率密度函数表示为

$$L(y) = \frac{p(\mathbf{y} | \mathbf{a}_k, H_1)}{p(\mathbf{y} | \mathbf{a}_k, H_0)} \underset{<H_0}{>H_1} > \eta. \quad (12)$$

由于 \mathbf{n} 为均值为零,方差为 $\sigma^2 \mathbf{I}$ 的高斯白噪声,因而,两种假设下目标回波的条件概率密度函数均可解析表示为

$$p(\mathbf{y} | \mathbf{a}_k, H_0) = \frac{1}{(2\pi)^{d/2} \sigma^d} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma^2} \mathbf{y}^H \mathbf{y} \right], \quad (13)$$

$$p(\mathbf{y} | \mathbf{a}_k, H_1) = \frac{1}{(2\pi)^{d/2} \sigma^d} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma^2} (\mathbf{y} - \mathbf{G}_1 \mathbf{B}_k \mathbf{a}_k)^H (\mathbf{y} - \mathbf{G}_1 \mathbf{B}_k \mathbf{a}_k) \right], \quad (14)$$

其中 $d = q - N_e$. 由于式(14)中 \mathbf{a}_k 是未知的,因而还不能直接使用式(12)判定目标是否存在,为此,本文使用如下广义似然比检测量^[9]

$$L_g(\mathbf{y}) = \frac{\max_{\mathbf{a}_k} p(\mathbf{y} | \mathbf{a}_k, H_1)}{\max_{\mathbf{a}_k} p(\mathbf{y} | \mathbf{a}_k, H_0)} \underset{<H_0}{>H_1} > \eta, \quad (15)$$

显然,最大化 $p(\mathbf{y} | \mathbf{a}_k, H_1)$ 等价于最小化 $\|\mathbf{y} - \mathbf{G}_1 \mathbf{B}_k \mathbf{a}_k\|^2$. 由文献[9]的结论可知, \mathbf{a}_k 的最小二乘解可表示为

$$\mathbf{a}_{kL} = [(\mathbf{G}_1 \mathbf{B}_k)^H (\mathbf{G}_1 \mathbf{B}_k)]^{-1} (\mathbf{G}_1 \mathbf{B}_k)^H \mathbf{y}, \quad (16)$$

把式(16)、式(14)和式(13)代入式(15),并两边取自然对数整理可得

$$l_g(\mathbf{y}) = \mathbf{y}^H (\mathbf{G}_1 \mathbf{B}_k) [(\mathbf{G}_1 \mathbf{B}_k)^H (\mathbf{G}_1 \mathbf{B}_k)]^{-1} (\mathbf{G}_1 \mathbf{B}_k)^H \mathbf{y} \underset{<H_0}{>H_1} > 2\sigma^2 \ln \eta. \quad (17)$$

如式(17)所示,如果预先设定了检测门限,则利用目标极点和 E 脉冲波形的先验知识计算出不等式左边的值,通过和门限比较大小,便可判定空中目标是否为待识别目标. 显然,为了发现并识别大量诱饵中的弹头目标,只需持续发射与弹头相匹配的 E 脉冲即可通过该判决式在单发射周期内完成弹头与诱饵的辨识.

3 目标识别新方法性能的理论分析

通常服从有偏 χ^2 分布的随机变量 x , 其概率密度函数可表示为^[10]

$$p(x; v, \theta) = e^{-\frac{\theta}{2}} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{\theta}{2}\right)^k x^{\left(\frac{1}{2}v+k+1\right)} e^{-\frac{1}{2}x}}{k! 2^{\left(\frac{1}{2}v+k\right)} \Gamma\left(\frac{1}{2}v+k\right)}, \quad x > 0 \quad (18)$$

其中 v 为随机变量的自由度, θ 为偏心率. 其累积概率分布函数定义为

$$F(x; v, \theta) = P\{\chi'^2(v, \theta) \leq x\} = e^{-\frac{\theta}{2}} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{\theta}{2}\right)^k}{k! 2^{\left(\frac{1}{2}v+k\right)} \Gamma\left(\frac{1}{2}v+k\right)} \int_0^x \tau^{\left(\frac{1}{2}v+k+1\right)} e^{-\frac{1}{2}\tau} d\tau. \quad (19)$$

若令 $\mathbf{P} = (\mathbf{G}_1 \mathbf{B}_k) [(\mathbf{G}_1 \mathbf{B}_k)^H (\mathbf{G}_1 \mathbf{B}_k)]^{-1} (\mathbf{G}_1 \mathbf{B}_k)^H$, 则由文献[9]可知,该矩阵为幂等 Hermitian 矩阵,其特征值为 1 或 0,且秩为 N (目标主极点的个数). 设 $\mathbf{y}_{ik} = \sigma \mathbf{z}$, 则对于假设 H_0 , 当发射 E 脉冲 $e_i(t)$ 与待识别目标匹配时, \mathbf{z} 为均值 $\mu_z = 0$, 方差 $\sigma_z = \mathbf{I}$ 的高斯随机变量,相应地,其检验统计量服从无偏 χ^2 分布,即

$$\mathbf{y}^H \mathbf{P} \mathbf{y} \sim \sigma^2 \chi'^2(N, 0), \quad (20)$$

而对于假设 H_1 , 当发射 E 脉冲 $e_i(t)$ 与待识别目标不匹配时, \mathbf{z} 为均值 $\mu_z = \mathbf{G}_1 \mathbf{B}_k \mathbf{a}_k / \sigma$, 方差 $\sigma_z = \mathbf{I}$ 的高斯随机变量,相应地,其检验统计量服从有偏 χ^2 分布,即

$$\mathbf{y}^H \mathbf{P} \mathbf{y} \sim \sigma^2 \chi'^2\left(N, \frac{1}{\sigma^2} (\mathbf{G}_1 \mathbf{B}_k \mathbf{a}_k)^H (\mathbf{G}_1 \mathbf{B}_k \mathbf{a}_k)\right). \quad (21)$$

因此,对待识别目标的正确识别概率可由下式求出

$$P_d = P\{l_g(\mathbf{y}) | H_0 < 2\sigma^2 \ln \eta\} = P\{\sigma^2 \mathbf{z}^H \mathbf{P} \mathbf{z} | < 2\sigma^2 \ln \eta\} = F(2 \ln \eta; N, 0), \quad (22)$$

相应地,其他目标被错误识别为待识别目标的概率可表示为

$$P_F = F(2 \ln \eta; N, \frac{1}{\sigma^2} (\mathbf{G}_1 \mathbf{B}_k \mathbf{a}_k)^H (\mathbf{G}_1 \mathbf{B}_k \mathbf{a}_k)). \quad (23)$$

4 理论计算与仿真实验结果及分析

为了验证本文目标识别新方法可行性以及理论计算其目标识别性能方法的正确性,本文使用长度分别为 $L, 0.9L$ 和 $1.1L$, 底面半径与长度比为定值的 3 种导线目标第一支极点中的前 4 个低频极点设计目标的发射 E 脉冲(3 个目标前 4 个低频主极点详见表 1), 并合成相应目标冲击响应的后时部分. 设定目标基准长度为 1.2m, 回波中的噪声为均值为

表 1 3 种细导线目标 4 个正频主极点
Table 1 Four main poles of three thin wire targets

	$L=1.2\text{m}$ (单位 10^8)	$L=1.08\text{m}$ (单位 10^8)	$L=1.32\text{m}$ (单位 10^8)
极点 1	$-0.322 + 1.201i$	$-0.376 + 1.337i$	$-0.295 + 1.091i$
极点 2	$-0.487 + 2.432i$	$-0.564 + 2.716i$	$-0.417 + 2.212i$
极点 3	$-0.583 + 3.669i$	$-0.703 + 4.101i$	$-0.490 + 3.323i$
极点 4	$-0.659 + 4.878i$	$-0.810 + 5.488i$	$-0.540 + 4.428i$

零的高斯白噪声. 给定峰值信噪比, 该噪声方差可通过 $SNR = 10\log_{10}(A_{\max}^2/\sigma^2)$ 计算得到, 其中 A_{\max} 为 1.2m 目标合成后时响应的最大幅值(注: 本文以下所有实验使用的 $t > T_L + T_s$ 时的接收回波信号采样序列长均为 100).

实验一: 目标正确识别概率、其他目标被错误识别成待识别目标概率与门限的关系

设定长度 1.2m 目标为待识别目标, 给定信噪比, 变化检测门限 $2\ln\eta$, 利用仿真数据, 通过蒙特卡罗实验得到的目标正确识别概率 P_d 和长为 1.32m 目标被识别成待识别目标的概率 P_F (单个门限下独立进行 200 次实验) 以及使用式 (22) 和式 (23) 理论计算的对应参数的 P_d 和 P_F , 如图 1(a) 和图 1(b) 所示.

由图 1 实验结果可以看出, 两种信噪比条件下, 随着门限的增大, 正确识别率和其他目标被识别为待识别目标的概率均增大, 而当信噪比增加时, 在一定门限取值范围内, 其他目标被识别为待识别目标的概率则显著减小, 这表明发射 E 脉冲与待识别目标匹配和不匹配时, 本文方法的对数似然比(见式 (17))取值存在着明显的不同, 分别服从一定的分布规律. 随着信噪比的增加, 这种不同, 逐渐增大, 因而, 通过设置固定的门限便可判定待识别目标是否为期望的目标, 且目标识别概率与门限值的关系可以通过理论解析计算得出. 如图 1 所示, 理论计算结果与通过蒙特卡罗仿真实验得到的结果相当吻合.

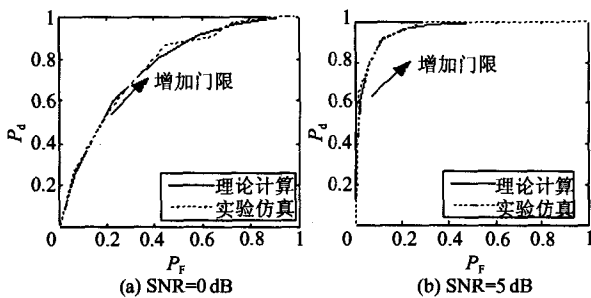


图 1 不同信噪比时实验仿真和理论计算的 ROC 曲线
Fig. 1 Simulated and analytically calculated ROC curves with different SNR

实验二: 变化目标时, 目标正确识别概率与其他目标被错误识别成待识别目标概率与门限的关系

变换待识别目标为长度 1.32m 的细导线, 给定信噪比, 变化检测门限 $2\ln\eta$, 通过蒙特卡罗实验和理论计算得到的目标正确识别概率 P_d 和长为 1.08m 目标被识别成待识别目标的概率 P_F 构成的 ROC 曲线如图 2(a) 和图 2(b) 所示.

由实验结果可以看出, 变化待识别目标以后, 本文方法目标正确识别概率与目标识别错误概率变化的规律与实验一中得到的结论是一致的(如所示), 均随着门限值的增加逐渐增加, 且当信噪比变化时, 给定门限以后, 目标错误识别概率大大降低, 这是因为, 当发射 E 脉冲与待识别目标不匹配时, 随着信噪比的增加, 式 (21) 中概率密度函数的离心率增大, 式 (17) 表示的似然比取值增大, 与发射 E 脉冲待匹配待识别目标时似然比取值范围的距离增大, 即类间距离增加, 从而使得目标的错误概率大大降低. 此外, 由于不同目标 E 脉冲具有不同的能量, 且本文实验中信噪比的定义均使用相同的信号幅度作为参考, 因而本文方法对于库中不同的目标具有不同的目标识别概率, 这可从图 1 和 2 的实验结果对比发现.

实验三: 其他目标被错误识别成待识别目标概率与信噪比的关系

设定长 1.2m 导线为带识别目标, 识别率定为 95% 时, 改变信噪比, 库中其他 2 个目标被错误识别成待识别目标的实验统计概率和理论计算概率如图 3 所示. 使用相同仿真数据, 相应信噪比下通过直接发射 E 脉冲比较能量识别数识别目标的错误识别概率叠加于图 3.

由实验结果可以看出, 相同的目标识别错误概率条件下, 本文提出新方法把其他 2 个目标错误识

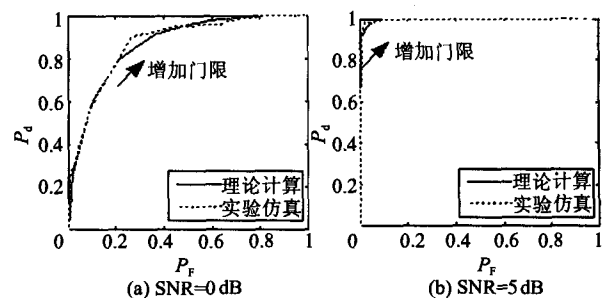


图 2 不同信噪比时实验仿真和理论计算的 ROC 曲线
Fig. 2 Simulated and analytically calculated ROC curves with different SNR

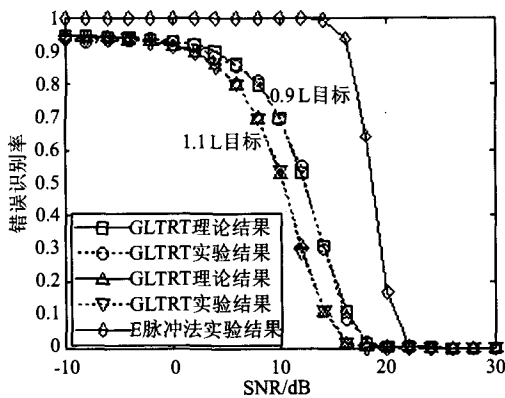


图3 不同信噪比时本文方法与E脉冲法对库中目标错误识别率曲线

Fig.3 Incorrect identification ratio of the proposed method and E-pulse technique as a function of SNR

别成待识别目标需要的信噪比均远低于直接发射E脉冲通过能量数识别目标方法所需的信噪比。这是因为直接发射E脉冲目标识别方法中计算的能量识别数通常要对相应的E脉冲能量进行归一化,而不同的目标其E脉冲能量通常不同,由式(9)可以看出,通过这种归一化处理使得低信噪比时目标能量识别数的最小值发生在最大E脉冲能量目标的概率大大增加,从而造成非最大E脉冲能量待识别目标在低信噪时的高错误识别率。与通过计算能量识别数进行目标识别的策略不同,本文提出的方法,直接利用目标回波似然函数的取值进行目标识别,由于目标回波似然函数分布函数的离心率由回波信号的信噪比决定,因而能量越强的E脉冲与其他目标卷积回波的概率密度函数偏离式(13)所示的正确目标卷积时的概率密度函数越远,较好地克服了由于E脉冲能量不同而导致的目标识别错误。同时,由前面的理论推导可以看出,本文提出方法是一种即发射即识别的实时目标识别方法,完全克服了传统直接发射E脉冲进行目标识别需要几个发射周期的缺陷。

5 结语

本文提出了一种基于最大似然比检测的雷达目

标识别新方法,并给出了理论计算其目标识别性能的方法,由于该目标识别方法直接利用目标回波似然函数的取值进行目标识别,较好地克服了由于E脉冲能量不同而导致的目标识别错误,同时,对于特定目标的识别,该方法是一种即发射即识别的实时目标识别方法,完全克服了传统直接发射E脉冲进行目标识别需要几个发射周期的缺陷,渴望为大量诱饵中弹头识别提供一条有效的途径。

REFERENCES

- [1] Chen K M. Radar waveform synthesis method—a new radar detection scheme [J]. *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, 1981, 29(4): 553—566.
- [2] Baum C E, Rothwell E J, Chen K M, et al. The singularity expansion method and its application to target identification [J]. *Proc. IEEE*, 1991, 79(10): 1481—1492.
- [3] Mooney J E, Ding Z, Riggs L S. Performance analysis of an automated E pulses target discrimination scheme [J]. *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, 2000, 48(3): 619—628.
- [4] Blanco D, Ruiz D P, Alameda E, et al. An asymptotically unbiased E-pulse-based scheme for radar target discrimination [J]. *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, 2004, 52(5): 1348—1350.
- [5] LIU Jing, ZHONG Wei-Cai, LIU Fang, et al. Organizational coevolutionary classification algorithm for radar target recognition. *J. Infrared Millim. Waves* (刘静, 钟伟才, 刘芳, 等. 组织协同进化分类算法用于目标一维像识别. *红外与毫米波学报*), 2004, 23(3): 208—212.
- [6] Kim K T, Seo D K, Kim H T. Efficient Classification of ISAR Images [J]. *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, 2005, 53(5): 1611—1621.
- [7] Brooks J W, Maier M W, Vechinski S R. Applying system identification and neural networks to the efficient discrimination of unexploded ordnance [C]. *Proceedings of the IEEE Aerospace Conference*. USA: 1997 - 02 - 01 ~ 08: 449—467.
- [8] Antony L H S, Shuley N. Consequence of incorrect sampling procedures in resonance-based radar target identification [J]. *IEE Electronics Letters*, 2004, 40(8): 1348—1350.
- [9] Mooney J E, Ding Z, Riggs L S. Robust target identification in white Gaussian noise for ultra wide-band radar systems [J]. *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, 1998, 46(12): 1817—1823.
- [10] Johnson N L, Kotz S, Balakrishnan N. *Continuous univariate distributions* [M]. USA: John Wiley & Sons, 1995, 2: 433—479.