

针对目标识别的波形优化设计方法

纠 博 刘宏伟 胡利平 吴顺君

(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: 针对宽带雷达多类目标识别波形优化中的方位敏感性、距离敏感性和初相不确定性问题, 该文在高斯色噪声背景下提出一种基于遗传算法和最大滑动相关分类器的波形优化方法, 简称为 GASC 方法。该方法定义目标回波和同类模板之间的匹配系数与该目标回波和异类模板之间匹配系数的差为匹配距离, 以最大化各类目标之间的匹配距离的最小值作为优化准则, 并约束发射信号幅度是恒定的, 然后通过遗传算法进行求解, 得到优化波形信号。仿真结果表明, 与现有方法相比, 该方法能更好地增加各类目标之间的可分性, 进而提高目标的识别性能。

关键词: 宽带雷达; 目标识别; 波形设计; 遗传算法; 滑动相关分类器

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)11-2585-06

A Method of Waveform Design for the Recognition of Radar Targets

Jiu Bo Liu Hong-wei Hu Li-ping Wu Shun-jun

(National Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Aiming at the problems of the target-aspect sensitivities, the time-shift sensitivities and the initial phase uncertainty in the waveform design for the recognition of broadband radar targets, a novel method termed GASC (Genetic Algorithm and Slide Correlation method) is proposed which is based on genetic algorithm and slide correlation classifier in the presence of additive colored Gaussian noise. This method gives a new optimization measurement called matched distance which is defined as the matched coefficient between the echoes and the templates of same class of target minus the matched coefficient between the echoes and the templates of different class of target, and the optimization is done via maximizing the minimal matched distance of all kinds of target with the constraint that the magnitude of the transmit pulse is constant. Using genetic algorithm, the optimized waveform is obtained. The experimental results prove the efficiency of the proposed method. Compared to the available approaches, the GASC can increase the class separability and obtain the better performance.

Key words: Broadband radar; Target recognition; Waveform Design; Genetic algorithm (GA); Slide correlation classifier

1 引言

感知雷达是雷达发展的一个重要方向^[1], 它的一个重要功能就是通过对环境的分析进行智能化的信号处理, 以达到最好的效果。由于雷达是通过对目标回波的分析来进行检测、跟踪和识别的, 因此根据背景和目标的具体情况选择相应的发射波形就成了雷达智能信号处理中的一个重要组成部分, 于是波形优化设计技术将在雷达的发展中起着更加重要的作用。目标识别技术也是现代雷达发展和性能扩展的一个重要方面, 现有关于目标识别的研究主要关注于识别算法, 如果目标回波不能充分体现各类目标特性的差异, 就会给识别算法的选择增加很大

的难度, 同时也很难得到满意的识别效果。如果能设计一组可以充分体现不同类目标之间的差异的发射波形, 不仅可以提高系统的识别性能, 还能降低识别算法的复杂度, 这对于目标识别来说具有非常重要的意义。

针对目标检测波形优化问题, 文献[2, 3]以最大化目标回波信号输出的 SINR 为准则, 根据目标的冲击响应提出了有限能量有限时宽的宽带雷达信号的发射-接收联合优化设计方法。针对目标识别的波形优化是希望找到能够较好地体现异类目标回波之间差异又具有良好的抗噪性能的发射信号, 文献[4, 5]在文献[2, 3]的基础上, 利用马氏距离给出了针对两类目标固定冲击响应的波形优化方法。

雷达目标识别波形优化设计以提高目标识别性能为目的, 而只有将波形优化方法与目标识别的算法结合起来, 才能更好地提高雷达目标识别率。雷

2008-11-03 收到, 2009-03-23 改回

教育部长江学者及创新团队支持计划(IRT0645)和国家自然科学基金(60772140)资助课题

达回波具有距离敏感性、目标方位敏感性、幅度敏感性和初相不确定性的特点。这使得目标回波信号具有较大不确定性，给目标识别波形优化带来很大的困难，也会大大降低文献[4-10]等已有方法的优化性能。

目标回波的初相不确定性会对通过加减计算测度的识别方法(如最大欧氏距离识别方法)产生很大的影响，如果去除相位信息，不仅会减少目标回波包含的信息量，还会增加优化的复杂度。此外，对目标识别雷达来讲，获取良好的识别性能是以较高的回波信噪比为基础的，因此，波形优化时也应考虑这一因素。现有大多数波形优化算法的代价函数仅仅考虑了识别率，而对回波信噪比问题考虑较少。在实际雷达中，雷达发射机的峰值功率往往有限，为获取好的探测性能，通常幅度不作调制，以保证雷达的辐射功率。文献[4,5]得到的优化波形具有调幅特性，因此会降低雷达的辐射功率，使雷达接收的目标回波信号信噪比降低，不利于识别。针对这些问题，本文给出了一种针对最大滑动相关识别方法的波形优化算法，它利用遗传算法进行求解，简称为GASC方法。

2 波形优化问题分析

假设一个有限时宽的信号 f 照射到冲击响应为 w_l 的第 l 类目标，其中 $l=1, 2$ ，信道噪声为广义静态噪声，记为 n ，其功率谱密度记为 $G_n(w)$ 。由于目标回波信号存在多重反射现象，目标冲击响应 w_l 是一个长度无限的时间向量，目标回波 s 也是一个长度无限的向量。由于多重反射后信号能量逐渐减弱，对优化计算来说截取有限长度已经足够，这一长度取决于信号带宽和目标尺寸等参数。令向量 $f = [f_0, f_1, \dots, f_{N-1}]^T$ 表示发射信号的时域离散采样，向量 $s = [s_0, s_1, \dots, s_{M-1}]^T$ 表示目标回波的时域离散采样，其中 T 表示转置。那么 $M \times N$ 的目标响应卷积矩阵 q_l 可表示为

$$q_l = \begin{pmatrix} w_{l0} & 0 & \dots & 0 \\ w_{l1} & w_{l0} & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ w_{lN-1} & w_{lN-2} & \dots & w_{l0} \\ w_{lN} & w_{lN-1} & \dots & w_{l1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{lM-1} & w_{lM-2} & \dots & w_{lN-1} \end{pmatrix} \quad (1)$$

接收到的长度为 M 的目标回波信号向量 s 可以表示为 $M \times N$ 的目标响应卷积矩阵 q_l 和长度为 N 的目标发射信号向量 f 的乘积，故第 l 类目标回波可表示为

$$s_l = q_l f \quad (2)$$

当然，长度为 M 离散回波信号向量 r_l 不仅有目标回波信号向量 s ，也包含了噪声 n ，记为

$$r_l = s_l + n \quad (3)$$

此时，通过最大化两类目标之间的马氏距离可得，优化信号：

$$f_{\text{opt}} = \arg \max_f f^H \Omega f \quad (4)$$

其中

$$\Omega = (q_1 - q_2)^H R^{-1} (q_1 - q_2) \quad (5)$$

这里 R 表示噪声的时域自相关矩阵，且 R 是 $M \times M$ 的 Hermitian-Toeplitz 矩阵，表示为

$$R = \begin{pmatrix} v_0 & v_1 & \dots & v_{M-1} \\ v_1^* & v_0 & \dots & v_{M-2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{M-1}^* & v_{M-2}^* & \dots & v_0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

其中

$$v_i = \frac{1}{2\pi} \int G_n(w) e^{j i w} dw, \quad i=0, 1, \dots, M-1 \quad (7)$$

式(7)中 $G_n(w)$ 表示噪声的功率谱密度函数。

每一类目标的匹配滤波器可表示为

$$h_l = \alpha_l R^{-1} s = \alpha_l R^{-1} q_l f \quad (8)$$

其中 α_l 是一个常数，用来控制滤波器的幅度，如果采用最大滑动相关方法进行识别，可以把匹配滤波器作为识别时采用的匹配模板，取 $\alpha_l = 1 / \|R_n^{-1} q_l f\|^2$ 对模板进行归一化处理。然后采用各类目标的匹配模板对回波信号进行匹配滤波，就可以根据输出的峰值幅度信息判断目标的类别。文献[4, 5]的优化是基于转台模型建立的，并没有考虑到目标的方位敏感性和平移敏感性，目标回波的初相不确定性也会严重影响各类目标回波之间的马氏距离的计算。同时优化波形具有调幅特性，这会降低雷达的辐射功率，使雷达接收的目标回波信号信噪比降低，不利于识别。

3 GASC 波形优化方法

通常情况下，目标回波包含了一个未知的随机初相，即

$$s_l = \exp(j\phi_l) \cdot q_l f, \quad l=1,2 \quad (9)$$

对于目标回波幅度敏感性的问题，在识别前要对样本做归一化处理，归一化后的目标回波为

$$s'_l = \exp(j\phi_l) \cdot q_l f / \|q_l f\|^2, \quad l=1,2 \quad (10)$$

这里 $\|\cdot\|$ 表示向量的 F-范数， $\|\cdot\|^2$ 表示向量的能量。

定义目标回波与匹配模板之间最大滑动相关值为匹配系数，这也是最大滑动相关分类器用以判别

目标类别的标准。定义第 l 类目标到第 k 类目标之间匹配距离为

$$d_{lk} = \max \left\{ \left| \rho(\mathbf{h}_l, \mathbf{s}_l) \right| \right\} - \max \left\{ \left| \rho(\mathbf{h}_k, \mathbf{s}_l) \right| \right\} \\ = \frac{\mathbf{f}^H \mathbf{q}_l^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{q}_l \mathbf{f}}{\|\mathbf{R}^{-1} \mathbf{q}_l \mathbf{f}\|^2} - \max \left\{ \left| \rho \left(\frac{\mathbf{R}^{-1} \mathbf{q}_k \mathbf{f}}{\|\mathbf{R}^{-1} \mathbf{q}_k \mathbf{f}\|^2}, \mathbf{q}_l \mathbf{f} \right) \right| \right\} \quad (11)$$

这里 $\rho(\cdot, \cdot)$ 表示两个向量的滑动相关函数。

对于第 1 类目标与第 2 类目标之间的识别问题, d_{12} 和 d_{21} 这两个参数体现了最大滑动相关分类器的识别效果, 分别记为

$$d_{12} = \max \left\{ \left| \rho(\mathbf{h}_1, \mathbf{s}'_1) \right| \right\} - \max \left\{ \left| \rho(\mathbf{h}_2, \mathbf{s}'_1) \right| \right\} \\ = 1 - \max \left\{ \left| \rho \left(\frac{\mathbf{R}^{-1} \mathbf{q}_2 \mathbf{f}}{\|\mathbf{R}^{-1} \mathbf{q}_2 \mathbf{f}\|^2}, \frac{\mathbf{q}_1 \mathbf{f}}{\|\mathbf{q}_1 \mathbf{f}\|^2} \right) \right| \right\} \quad (12)$$

$$d_{21} = \max \left\{ \left| \rho(\mathbf{h}_2, \mathbf{s}'_2) \right| \right\} - \max \left\{ \left| \rho(\mathbf{h}_1, \mathbf{s}'_2) \right| \right\} = d_{12} \quad (13)$$

此时优化问题就是要找到能最大化第 1 类目标与第 2 类目标之间的匹配距离的信号, 代价函数可表示为

$$\mathbf{f} = \arg \max_{\mathbf{f}} (d) \\ \text{s.t. } d = 1 - \max \left\{ \left| \rho \left(\frac{\mathbf{R}^{-1} \mathbf{q}_2 \mathbf{f}}{\|\mathbf{R}^{-1} \mathbf{q}_2 \mathbf{f}\|^2}, \frac{\mathbf{q}_1 \mathbf{f}}{\|\mathbf{q}_1 \mathbf{f}\|^2} \right) \right| \right\} \\ \|f\|^2 = 1 \quad (14)$$

式(14)并没有考虑到目标回波幅度对于识别的影响, 对于归一化的目标回波来说, 目标回波幅度不会对识别效果产生影响。而实际中, 回波中是包含噪声和杂波的, 相对于噪声和杂波来说, 目标回波的幅度越强, 噪声和杂波的影响也就越小, 回波信号在归一化后也就更接近于目标回波信号, 这不仅可以提高抗噪性能, 还有利于目标的检测。

对于两类目标识别的优化问题来说, 不仅要最大化 d_{12} 和 d_{21} 这两个参数, 还要最大化两类目标回波能量 $\|\mathbf{q}_1 \mathbf{f}\|^2$ 和 $\|\mathbf{q}_2 \mathbf{f}\|^2$, 而我们又很难找到一个能体现可分性的最优的代价函数综合进行优化。采用未归一化的目标回波计算两类目标之间的匹配距离, 即

$$d'_{12} = \max \left(\left| \rho(\mathbf{h}_1, \mathbf{s}_1) \right| \right) - \max \left(\left| \rho(\mathbf{h}_2, \mathbf{s}_1) \right| \right) \\ = \frac{\mathbf{f}^H \mathbf{q}_1^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{q}_1 \mathbf{f}}{\|\mathbf{R}^{-1} \mathbf{q}_1 \mathbf{f}\|^2} - \max \left\{ \left| \rho \left(\frac{\mathbf{R}^{-1} \mathbf{q}_2 \mathbf{f}}{\|\mathbf{R}^{-1} \mathbf{q}_2 \mathbf{f}\|^2}, \mathbf{q}_1 \mathbf{f} \right) \right| \right\} \quad (15)$$

$$d'_{21} = \max \left(\left| \rho(\mathbf{h}_2, \mathbf{s}_2) \right| \right) - \max \left(\left| \rho(\mathbf{h}_1, \mathbf{s}_2) \right| \right) \\ = \frac{\mathbf{f}^H \mathbf{q}_2^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{q}_2 \mathbf{f}}{\|\mathbf{R}^{-1} \mathbf{q}_2 \mathbf{f}\|^2} - \max \left\{ \left| \rho \left(\frac{\mathbf{R}^{-1} \mathbf{q}_1 \mathbf{f}}{\|\mathbf{R}^{-1} \mathbf{q}_1 \mathbf{f}\|^2}, \mathbf{q}_2 \mathbf{f} \right) \right| \right\} \quad (16)$$

d'_{12} , d'_{21} 中包含了两类目标之间的匹配距离 d_{12} , d_{21} , 和两类目标回波能量 $\|\mathbf{q}_1 \mathbf{f}\|^2$, $\|\mathbf{q}_2 \mathbf{f}\|^2$, 那么最大化 d'_{12} , d'_{21} 就可以达到增大两类目标之间可分性的同时增大目标的回波能量, 将对匹配距离的优化和对回波能量的优化有机的结合起来, 建立优化函数如下:

$$\mathbf{f} = \arg \max_{\mathbf{f}} (d) \\ \text{s.t. } d < \frac{\mathbf{f}^H \mathbf{q}_1^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{q}_1 \mathbf{f}}{\|\mathbf{R}^{-1} \mathbf{q}_1 \mathbf{f}\|^2} - \max \left\{ \left| \rho \left(\frac{\mathbf{R}^{-1} \mathbf{q}_2 \mathbf{f}}{\|\mathbf{R}^{-1} \mathbf{q}_2 \mathbf{f}\|^2}, \mathbf{q}_1 \mathbf{f} \right) \right| \right\} \\ d < \frac{\mathbf{f}^H \mathbf{q}_2^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{q}_2 \mathbf{f}}{\|\mathbf{R}^{-1} \mathbf{q}_2 \mathbf{f}\|^2} - \max \left\{ \left| \rho \left(\frac{\mathbf{R}^{-1} \mathbf{q}_1 \mathbf{f}}{\|\mathbf{R}^{-1} \mathbf{q}_1 \mathbf{f}\|^2}, \mathbf{q}_2 \mathbf{f} \right) \right| \right\} \\ \|f\|^2 = 1 \quad (17)$$

从式(15)和式(16)可以看出, 式(17)的优化不仅包含了两类目标之间相关性的优化, 还包含了对两类目标回波能量的优化; 即可以降低两类目标回波之间的相关性, 又可以增大目标回波的信噪比, 提高目标的检测概率。

3.1 基于相位调制的优化方法

由于实际中雷达发射机的额定功率是有限的, 而恒模的相位调制信号可以使发射机一直处在峰值功率下工作, 充分发挥发射机的辐射功率, 以更大的发射信号能量换取更大的回波信杂噪比。本文采用相位调制信号作为优化信号, 假设离散信号模型为

$$\mathbf{f} = \beta \exp(j \cdot \mathbf{b}) \quad (18)$$

其中相位向量 $\mathbf{b} = [b_0, b_1, \dots, b_{N-1}]^T$; β 是一个常数, 表示信号的幅度, 它的大小取决于雷达发射机的额定功率。对 \mathbf{f} 进行归一化处理, $\beta = 1/\sqrt{N}$, 此时基于相位调制的波形优化就变成求解最优的相位向量 \mathbf{b} , 代价函数可写为

$$\mathbf{b} = \arg \max_{\mathbf{b}} (d) \\ \text{s.t. } d < \frac{\mathbf{f}^H \mathbf{q}_1^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{q}_1 \mathbf{f}}{\|\mathbf{R}^{-1} \mathbf{q}_1 \mathbf{f}\|^2} - \max \left\{ \left| \rho \left(\frac{\mathbf{R}^{-1} \mathbf{q}_2 \mathbf{f}}{\|\mathbf{R}^{-1} \mathbf{q}_2 \mathbf{f}\|^2}, \mathbf{q}_1 \mathbf{f} \right) \right| \right\} \\ d < \frac{\mathbf{f}^H \mathbf{q}_2^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{q}_2 \mathbf{f}}{\|\mathbf{R}^{-1} \mathbf{q}_2 \mathbf{f}\|^2} - \max \left\{ \left| \rho \left(\frac{\mathbf{R}^{-1} \mathbf{q}_1 \mathbf{f}}{\|\mathbf{R}^{-1} \mathbf{q}_1 \mathbf{f}\|^2}, \mathbf{q}_2 \mathbf{f} \right) \right| \right\} \\ \mathbf{f} = \exp(j \cdot \mathbf{b}) / \sqrt{N} \quad (19)$$

式(19)是一个多维多峰的非线性优化问题, 很难找到简单快捷的解析方法进行求解, 所以我们采用遗

传算法进行搜索寻找最优解。遗传算法^[11]是由美国芝加哥大学的 Holland 教授提出的, 该算法仿照生物进化和遗传的规律, 利用复制、交叉、突变等操作, 遵循优胜者繁殖、劣败者消失的自然进化规则, 在全局范围内寻找问题的最优解。它尤其适用于传统搜索方法难以解决的复杂和非线性问题。

3.2 针对多类方位不确定目标的 GASC 优化方法

通常情况下, 目标可能属于多个类别, 而且目标的方位角很难准确得到, 而只能测得一个大概的角域。由于雷达回波随着目标方位会发生剧烈且不规律的变化, 因此可以将目标可能的角域细分为多个小角域, 并认为在每个小角域内目标响应是缓变的。假设有 L 类相互独立的目标, 将目标可能存在的方位角域划分为 A 个小角域, 在每个小角域内目标响应服从高斯分布, 且对于发射信号来说每一类目标都可以看作是一个随机的、线性的、时不变的系统。令 w_{la} 表示第 l 类目标在第 a 个小角域的冲击响应, 与之对应的卷积矩阵 q_{la} 可根据式(1)类推可得, 那么第 l 类目标在第 a 个小角域下的目标回波可表示为

$$s_{la} = \exp(j\varphi) \cdot q_{la} f, \quad a = 1, 2, \dots, A \quad (20)$$

针对多类目标方位不确定性波形优化问题, 文献[12,13]采用最大化各个可能的方位下各类目标之间欧氏距离的平均值来进行优化的, 下文简称为 MESMD 方法, 但它是以优化方位总体可分性为标准, 优化波形往往把能量集中在一个或少数几个频段上, 不能照顾到每一个方位的目标回波。针对这个问题, 将 GASC 方法扩展如下。

对于方位不确定性目标的识别来说, 通常识别中会采用一个或者多个模板进行匹配, 这并不会给优化方法带来本质性的改变, 下面以一个模板为例介绍扩展后的 GASC 方法。

设第 l 类目标的模板为

$$m_l = R^{-1} q_l f, \quad l = 1, 2, \dots, L \quad (21)$$

令 d_{ka} 表示在第 a 个小角域内第 l 类目标和第 k 类目

标之间的匹配距离, 即

$$d_{ka} = \max \left\{ \left| \rho(h_l, s_{la}) \right| \right\} - \max \left\{ \left| \rho(h_k, s_{la}) \right| \right\} \quad (22)$$

那么对于 A 个小角域内的 L 类目标来说, 我们希望找到发射信号

$$\left. \begin{aligned} f &= \arg \min_f (d) \\ \text{s.t. } d &> \max \left\{ \left| \rho \left(\frac{R^{-1} q_k f}{\|R^{-1} q_k f\|^2}, q_{la} f \right) \right| \right\} \\ &- \max \left\{ \left| \rho \left(\frac{R^{-1} q_l f}{\|R^{-1} q_l f\|^2}, q_{la} f \right) \right| \right\} \\ d &> \max \left\{ \left| \rho \left(\frac{R^{-1} q_l f}{\|R^{-1} q_l f\|^2}, q_{ka} f \right) \right| \right\} \\ &- \max \left\{ \left| \rho \left(\frac{R^{-1} q_k f}{\|R^{-1} q_k f\|^2}, q_{ka} f \right) \right| \right\} \\ \|f\|^2 &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

其中 $l = 1, 2, \dots, L; k = l + 1, l + 2, \dots, L; a = 1, 2, \dots, A$ 。

下面即可转化为相位调制信号模型下的代价函数, 并利用遗传算法对这个非线性优化问题进行求解, 这里不再赘述。

4 仿真结果

假设需要设计一个中心频率 $f_0 = 1.5$ GHz, 带宽 $B = 500$ MHz, 时宽 $T = 0.1 \mu s$ 的信号, 取采样率 $f_s = 500$ MHz, 发射信号 f 的长度 $N = f_s T = 50$ 。零均值高斯分布的色噪声的功率谱密度如图 1 所示。采用一种电磁特性软件对两种坦克和一个消防车这 3 类目标做仿真试验, 在俯仰角为 10° , 方位角为 0° 下产生目标冲击响应数据, 每一组数据包含了各类目标在此方位角附近的 1.5° 方位角域内的冲击响应。将 3 类目标方位可能分布的 1.5° 角域划分为 10 个小的角域, 各个小角域内各类目标的冲击响应如图 2, 图 3 和图 4 所示。

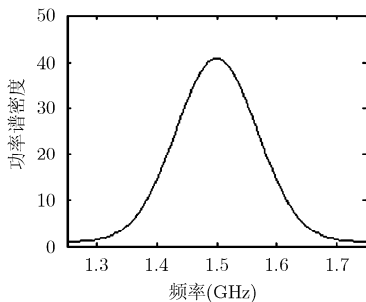


图 1 噪声的功率谱密度

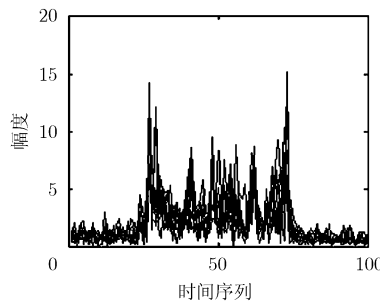


图 2 第 1 类目标冲击响应的幅度特性

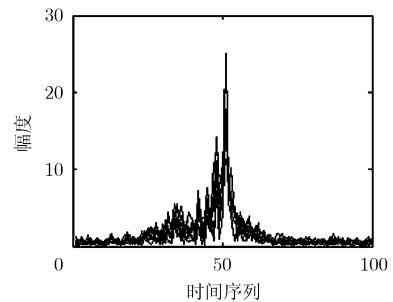


图 3 第 2 类目标冲击响应的幅度特性

在图 1 所示噪声背景下, 采用 MESMD 方法和 GASC 方法进行优化, 得到优化信号的频域幅度特性分别如图 5 和图 6 所示。从图 5 和图 6 中可以看出, MESMD 优化信号将更多的能量集中于少数一段频点, 类似于一个窄带信号, 而 GASC 优化信号的能量分布相对更加均匀, 这使得它们可以尽量照顾到每个小角域内各类目标回波之间的可分性。在同样的目标特性和环境下, 采用相同能量的线性调频信号, GASC 优化信号和 MESMD 优化信号作为发射信号, 等概率照射在 1.5° 角域内各方位的目标上, 将得到的回波叠加如图 1 所示的色噪声后生成 30000 测试个样本。根据目标响应特性求出每类目标的匹配模板, 然后采用最大滑动相关分类器对 30000 个测试样本进行识别, 两种能量下得到的识别率如表 1 所示。在白噪声背景和同样的目标特性下进行优化和识别, 各类目标的识别率如表 2 所示。

表 1 和表 2 中单位能量发射信号的对应的优化值, 代表了采用各种发射信号时各类目标在各个小角域下回波的最差的可分性。如果这个优化值为负数就表示所有类目标在所有可能的方位下的回波在

无噪声干扰情况下是可分的, 优化值越小发射信号的抗噪性能就越好。从表 1 和表 2 中可以看出各个发射信号的优化值与它们对应的目标识别率完全对应, 优化值越小识别率越高。GASC 优化信号的识别性能要明显优于线性调频信号和 MESMD 信号, 这说明 GASC 方法可以兼顾到各个方位下各类目标特性之间的差异, 从而得到较好的可分性。

5 结束语

雷达回波具有平移敏感性、方位敏感性和初相不确定性的特点, 这给目标识别和针对目标识别的波形优化带来了很大的困难。针对这个问题, 本文提出了一种针对最大滑动相关识别方法的波形优化算法, 简称为 GASC 方法。它通过最大化各类目标之间的匹配距离达到增加各类目标之间可分性的目的, 并约束发射信号的幅度是恒定的, 得到了一个非线性代价函数, 然后利用遗传算法进行求解, 在保证发射机的辐射功率的基础上, 取得了较好的识别性能。但由于遗传算法的运算量很大, 这限制了波形设计的实时性, 同时它也不能保证得到的优化信号是全局最优解, 因此找到一个简单有效的解析

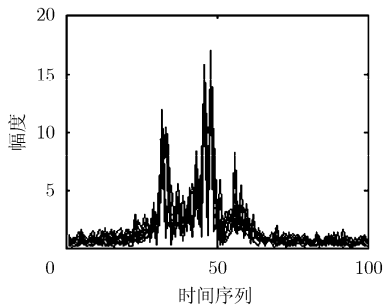


图 4 第 3 类目标冲击响应的幅度特性

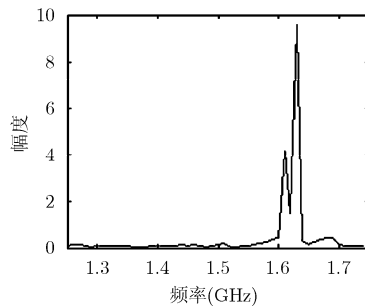


图 5 MESMD 优化信号频域特性

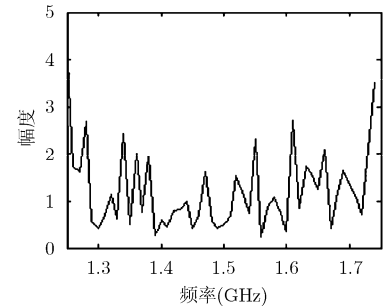


图 6 GASC 优化信号的频域特性

表 1 图 1 所示噪声背景下 3 种不同发射信号对应的目标识别率(%)

| 单位能量发射信号 对应的优化值 | 能量 ξ | | | | 能量 1.5ξ | | | | |
|--------------------|----------|-------|-------|-------|-------------|-------|-------|-------|-------|
| | 目标 1 | 目标 2 | 目标 3 | 平均 | 目标 1 | 目标 2 | 目标 3 | 平均 | |
| 线性调频信号 | 5.6814 | 60.42 | 100 | 74.04 | 78.15 | 62.21 | 100 | 74.42 | 78.88 |
| GASC 信号 | -0.3299 | 82.83 | 99.65 | 94.44 | 92.30 | 93.25 | 100 | 99.24 | 97.50 |
| MESMD 信号 | 7.5645 | 63.61 | 86.04 | 59.21 | 69.62 | 64.46 | 92.42 | 58.01 | 71.63 |

表 2 白噪声背景下 3 种不同发射信号对应的目标识别率(%)

| 单位能量发射信号 对应的优化值 | 能量 ξ | | | | 能量 1.5ξ | | | | |
|--------------------|----------|-------|-------|-------|-------------|-------|-------|-------|-------|
| | 目标 1 | 目标 2 | 目标 3 | 平均 | 目标 1 | 目标 2 | 目标 3 | 平均 | |
| 线性调频信号 | 3.7267 | 67.27 | 99.65 | 75.23 | 80.72 | 75.62 | 100 | 78.44 | 84.69 |
| GASC 信号 | -3.0877 | 85.24 | 99.26 | 92.02 | 92.17 | 94.85 | 100 | 98.81 | 97.89 |
| MESMD 信号 | 10.6572 | 61.62 | 91.63 | 57.64 | 70.30 | 61.63 | 94.81 | 54.08 | 70.17 |

方法是进一步研究的重点。

参 考 文 献

- [1] Haykin S. Cognitive radar: A way of the future [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2006, 23(1): 30-40.
- [2] Pillai S U, Oh H S, Youla D C, and Guerci J R. Optimum transmit-receiver design in the presence of signal-dependent interference and channel noise [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2000, 46(2): 577-584.
- [3] Garren D A, Osborn M K, Odom A C, Goldstein J S, Pillai S U, and Guerci J R. Enhanced target detection and identification via optimised radar transmission pulse shape [J]. *IEE Proceedings Radar, Sonar and Navigation*, 2001, 148(3): 130-138.
- [4] Guerci J R and Pillai S U. Adaptive transmission radar: the next “wave” [C]. National Aerospace and Electronics Conference, 2000. Proceedings of the IEEE 2000, Dayton, OH, USA, 2000: 779-786.
- [5] Guerci J R and Pillai S U. Theory and application of optimum transmit-receive radar [C]. Proceedings of IEEE International Radar Conference, Alexandria, VA, 2000: 705-710.
- [6] Bell M R. Information theory and radar waveform design [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1993, 39(5): 1578-1597.
- [7] Leshem A, Naparstek O, and Nehorai A. Information theoretic adaptive radar waveform design for multiple extended targets[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2007: 1(1): 42-55.
- [8] Goodman N A, Venkata P R, and Neifeld M A. Adaptive waveform design and sequential hypothesis testing for target recognition with active sensors[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2007, 1(1): 105-113.
- [9] Leshem A, Naparstek O, and Nehorai A. Information theoretic radar waveform design for multiple targets [C]. International Waveform Diversity and Design Conference. Pisa, Italy, 2007: 362-366.
- [10] Jun Hyeong Bae and Goodman N A. Adaptive waveforms for target class discrimination [C]. International Waveform Diversity and Design Conference. Pisa, Italy, 2007: 395-399.
- [11] 陈国良, 王熙法, 庄镇泉, 等. 遗传算法及其应用. 北京: 人民邮电出版社, 1999: 75-88.
Chen Guo-liang, Wang Xi-fa, and Zhuang Zhen-quan. Genetic algorithm and applications. Beijing: The People's Posts and Telecommunications Press, 1999: 75-88.
- [12] Pillai S U, Guerci J R, and Pillai S R. Joint optimal tx-rx design for multiple target identification problem [C]. Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop Proceedings, Rosslyn, Virginia, 2002: 553-556.
- [13] Garren D A, Osborn M K, Odom A C, and Goldstein J S. Optimal transmission pulse shape for detection and identification with uncertain target aspect [C]. Radar Conference, 2001. Proceedings of the 2001 IEEE. Atlanta, GA, USA, 2001: 123-128.
- 纠 博: 男, 1982年生, 博士生, 研究方向为自适应信号处理、雷达自动目标识别.
- 刘宏伟: 男, 1971年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达信号处理、雷达自动目标识别等.
- 胡利平: 女, 1979年生, 博士生, 研究方向为合成孔径雷达图像处理及目标识别.
- 吴顺君: 男, 1942年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达信号处理、雷达系统设计与实现等.