

基于相位调制与 OTRD 的雷达波形设计

周 峰, 章 钊*, 张亮亮

(空军工程大学防空反导学院,陕西西安,710051)

摘要 基于噪声与杂波背景下,雷达对微弱目标探测的波形优化问题,以最大化目标回波信干噪比(SINR)为准则,结合相位调制与最优发射接收波形优化方法(OTRD)的各自技术优势,在相位调制信号的基础上进行最优调幅,提出了一种基于相位调制与 OTRD 的综合雷达波形设计方法。通过仿真,得到了相较于前 2 种算法更大的 SINR,特别在较强的杂波环境下,对低可探测目标的探测中,效果尤为明显,雷达的探测性能得到了显著提升。

关键词 目标探测;波形优化;相位调制;OTRD

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2014.01.008

中图分类号 TN953 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2014)01-0034-04

A Waveform Design for Radar Signal Based on Phase Modulate and Optimum Transmit-Receiver Design

ZHOU Feng,ZHANG Zhao*,ZHANG Liang-liang

(Air and Missile Defense College,Air Force Engineering University,Xi'an 710051,China)

Abstract: The radar waveform design for weak target detection in interference and channel noise is considered. Based on the principle of maximizing the SINR, combined with the advantages of the phase-modulate method and the Optimum Transmit-receive Design method (OTRD), a synthesized waveform design method based on phase modulate and OTRD is put forward. Through the simulation, a larger SINR is obtained compared to the previous two methods, the effect is particularly obvious for weak target detection in strong interference, consequently, the function of radar detection is promoted obviously.

Key words: target detection; waveform design; phase modulate; optimum transmit-receiver design(OTRD)

隐身飞机等低可探测目标由于其较小的目标 RCS 和回波功率给雷达目标探测提出了严峻的挑战,如何提升雷达在噪声和强杂波环境下对低可探测目标的探测能力成为迫切需要解决的课题。雷达发射波形直接影响到雷达的目标探测性能、抑制杂波能力,决定了雷达的体制、信号的产生和最佳接收信号处理设备的形式。如何通过波形设计发射一组优化波形,提升回波信号的 SINR,对于目标探测具有重要意义,特别是近年来随着任意波形产生技术、现代数字技术和直接数字合成(DDS)波形技术等软

硬件技术的发展,也使最优波形设计成为可能,波形优化问题也越来越受到人们的重视。

文献[1]基于最大化 SINR 准则,根据目标的冲激响应,在噪声和杂波环境下,提出了针对有限能量、有限时宽信号的 OTRD(Optimum Transmit-Receive Design,OTRD)波形优化设计方法;文献[2~3]研究了在不同噪声与杂波背景和不同工作模式下的波形优化和选择问题;文献[4]基于最大 SINR 准则,研究了一种频率调制的波形设计;文献[5~6]在文献[1]的基础上进一步研究了 OTRD 方法,并

收稿日期:2013-01-15

基金项目:陕西省自然科学基金资助项目(2010JQ800)

作者简介:周 峰(1973—),男,安徽六安人,副教授,主要从事雷达信号处理研究。

* **通信作者:**章 钊(1990—),男,硕士,主要从事雷达信号处理研究。E-mail:zhangzhao0907@163.com

引用格式:周峰,章钊,张亮亮. 基于相位调制与 OTRD 的雷达波形设计[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2014,15(1):34-37. ZHOU Feng,ZHANG Zhao,ZHANG Liangliang. A waveform design for radar signal based on phase modulate and optimum transmit-receiver design [J]. Journal of air force engineering university:natural science edition,2014,15(1):34-37.

基于最大互信息准则,提出了提升雷达对目标识别能力的波形优化设计;文献[7]系统介绍分析了常用雷达发射波形,以及其优缺点;文献[8]基于宽带雷达的特点,提出了基于相位调制的宽带雷达波形优化设计方法(Waveform Design based on Phase Modulate, WDPM)。但这种设计方法在相位调制的基础上,忽略了 OTRD 方法的优势,特别在杂波干扰较大,对低可探测目标的探测中,效果不够理想。基于此,本文结合相位调制与 OTRD 波形优化方法的各自技术优势,提出了一种基于相位调制与 OTRD 的综合波形优化设计方法(Synthesized Waveform Design based on Phase Modulate and OTRD, SWDPO)。

1 问题分析

假设一个有限时宽 t_0 、能量为 E_0 的发射脉冲 f 同时照射到一个冲激响应为 ω 的静止目标和杂波背景上,即:

$$f^H f = E_0 \quad (1)$$

信号模型见图 1。

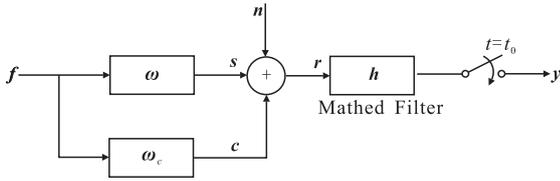


图 1 信号发射-接收模型

Fig. 1 Simplified model of transmit-receive signal

图 1 中: ω_c 为杂波的冲激响应, $G_c(\omega)$ 为其功率谱密度; n 为信道广义静态噪声, $G_n(\omega)$ 为其功率谱密度; h 为匹配滤波器响应; 回波信号 r 为目标回波 s 、杂波 c 与信道噪声 n 的叠加:

$$r = s + c + n \quad (2)$$

令向量 $f = [f_0, f_1, \dots, f_{N-1}]$ 为发射信号的离散时域采样, 向量 $s = [s_0, s_1, \dots, s_{M-1}]$ 为目标回波信号的离散时域采样。由于目标回波存在多重反射现象, 所以 $M > N$ 。可以定义 $M \times N$ 的目标响应卷积矩阵为:

$$\omega = \begin{pmatrix} \omega_0 & 0 & \cdots & 0 \\ \omega_1 & \omega_0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \omega_{N-1} & \omega_{N-2} & \cdots & \omega_0 \\ \omega_N & \omega_{N-1} & \cdots & \omega_1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \omega_{M-1} & \omega_{M-2} & \cdots & \omega_{N-1} \end{pmatrix} \quad (3)$$

则长度为 M 的接收信号 s 可以表示为 $M \times N$ 的目标响应卷积矩阵 ω 和长度为 N 的发射信号的卷积:

$$s = \omega f \quad (4)$$

根据式(2), 经过匹配滤波器后, 系统输出可以表示为:

$$y = h^H r = h^H s + h^H \{c + n\} = y_s + y_x \quad (5)$$

则系统输出的信干噪比 γ 为:

$$\gamma = \frac{E[|y_s|^2]}{E[|y_x|^2]} = \frac{h^H R_s h}{h^H R_x h} \quad (6)$$

式中 R_s 和 R_x 分别为目标回波信号和噪声杂波的时域自相关矩阵, 其值分别为:

$$R_s = E[ss^H] = ss^H \quad (7)$$

$$R_x = E[xx^H] \quad (8)$$

R_x 为 $M \times M$ 的 Hermitian-Toeplitz 矩阵, 可表示为:

$$R_x = \begin{pmatrix} r_0 & \cdots & r_{M-1} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{M-1}^* & \cdots & r_0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

式中:

$$r_l = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} [G_n(\omega) + G_c(\omega) |F(\omega)|^2] e^{il\omega} d\omega \quad (10)$$

下面就是求解发射信号 f 和相对应的匹配滤波器响应 h , 使式(6)中的 γ 最大。

2 OTRD 波形设计方法

根据最大化信干噪比准则, 可得到最优匹配滤波器为:

$$h_{\text{match}} = \alpha R_x^{-1} s = \alpha R_x^{-1} \omega f \quad (11)$$

式中 α 为常数, 将式(11)代入式(6), 可得到匹配滤波器输出信号的信干噪比为:

$$\gamma_{\text{match}} = \max_h \gamma = s^H R_x^{-1} s \quad (12)$$

进一步可得到输出信号的信干噪比为:

$$\gamma_{\text{opt}} = \max_f \gamma_{\text{match}} = \max_f \gamma = f^H \Omega f \quad (13)$$

$$\Omega = \omega^H R_x^{-1} \omega \quad (14)$$

OTRD 方法给出了求解最优发射信号 f 的波形优化迭代步骤, 具体如下:

步骤 1 设定初始值 $k=0$, 任意设计一个时宽为 t_0 、能量为 E_0 的发射信号向量 f_0 ;

步骤 2 使 $f_k \leftrightarrow F_k(\omega)$, 并根据式(9)、式(10), 求出噪声杂波的时域自相关矩阵 R_{xk} ;

步骤 3 根据式(3)、式(14), 以及步骤 2 中的 R_{xk} , 求得 Ω_k ;

步骤 4 求解 Ω_k 最大的特征值 λ_k 和其特征向量 \mathbf{v}_k ;

步骤 5 定义 k 阶误差量 ϵ_k 为:

$$\epsilon_k = \sqrt{2\sqrt{E_0}(\sqrt{E_0} - \mathbf{f}_k^H \mathbf{v}_1^{(k)})} \quad (15)$$

并定义发射信号 \mathbf{f} 的更新迭代公式为:

$$\mathbf{f}_{k+1} = \frac{\mathbf{f}_k + \epsilon_k \mathbf{v}_1^{(k)}}{\sqrt{\left(1 + \frac{\epsilon_k}{\sqrt{E_0}}\right)^2 - \left(\frac{\epsilon_k}{\sqrt{E_0}}\right)^3}} \quad (16)$$

步骤 6 将 \mathbf{f}_{k+1} 重新代入步骤 2, 计算下一个误差值 ϵ_{k+1} , 直至 ϵ 足够小, 则最优发射信号为:

$$\mathbf{f} = \lim_{k \rightarrow \infty} \mathbf{f}_k \quad (17)$$

3 WDPM 波形设计方法

设离散信号模型为:

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

式中: $\mathbf{b} = [b_0, b_1, \dots, b_{N-1}]$ 为相位向量; A 为信号幅度。对 \mathbf{f} 进行归一化处理, $A = 1/\sqrt{N}$ 。此时波形优化设计就是求解一个最优相位向量 \mathbf{b}_{opt} , 使得:

$$\gamma_{\text{opt}} = \max_{\mathbf{f}} \mathbf{f}^H \Omega \mathbf{f} \quad (19)$$

式中 $\mathbf{f} = \frac{1}{\sqrt{N}} \exp(j\mathbf{b})$ 。

求解最优相位向量 \mathbf{b}_{opt} 是一个多维多峰、非线性优化问题。遗传算法^[9]仿照生物进化和遗传的规律, 通过反复迭代运算, 在全局范围内寻找最优解。其主要特点是群体搜索策略和群体中个体之间存在信息交换, 搜索不依赖于梯度信息, 适用于难以解决的复杂非线性问题, 因此, 对于求解最优相位向量 \mathbf{b}_{opt} 具有很好的适用性。

算法包含了编码、计算适应度、交换、复制、交叉、变异、优胜劣汰和可行性判断 7 个步骤。这里选取优化信号的相位向量作为染色体变量, 采用二进制进行编码, 初始种群数 $L = 100$, 搜索相位精度 1° , 采用“轮盘赌”方式选择复制对象, 交叉概率为 0.7, 变异概率为 0.02, 以式(19)为适应度函数对最优二进制码进行搜索。

4 SWDPO 波形设计方法

前 2 种设计方法均在噪声和杂波环境下, 以最大化回波 SINR 为准则, 其中 OTRD 方法通过迭代求解对发射信号 \mathbf{f} 进行优化, 主要包含了幅度调制; 而 WDPM 方法则是对发射信号 \mathbf{f} 的相位通过

遗传算法求得最优解。后者在相位调制的基础上, 忽略了 OTRD 方法的优势, 特别在杂波功率 $G_c(\omega)$ 较大, 目标 RCS 较小时, SINR 下降较为明显。因此, 在有限能量、有限时宽的波形优化中, OTRD 方法与 WDPM 算法都存在一定的劣势。针对这种情况, 笔者提出了一种 SWDPO 波形优化设计方法。该方法综合前 2 者的技术优势, 在 WDPM 相位调制信号的基础上, 再对其进行最优调幅, 得到了相较于前 2 者更大的 SINR。

5 仿真分析

由于应用于目标探测, 因此, 假定雷达工作在 S 波段, 需要优化设计的信号 \mathbf{f} 为中心频率 $f_0 = 2.1$ GHz, 带宽 $B = 200$ MHz, 脉宽 $T = 0.1 \mu\text{s}$, 能量 $E = 1.25 \times 10^{-8}$ J 的线性调频脉冲信号(LFM)。采样率 $f_s = 5$ GHz, 则通过采样得到的发射信号 \mathbf{f} 的长度 $N = f_s T = 500$ 。目标的冲激响应见图 2, 噪声和杂波的功率谱密度见图 3, 通过 OTRD 方法、WDPM 方法以及 SWDPO 方法设计的优化信号相位和幅度分别见图 4~图 5。最后通过与各自优化信号相匹配的滤波器, 得系统输出的 SINR 见表 1。

表 1 不同发射信号的回波信噪比

Tab.1 SINR of different transmit signals dB

方法	OTRD	WDPM	SWDPO	LFM
SINR	19.356	19.769	21.363	1.732

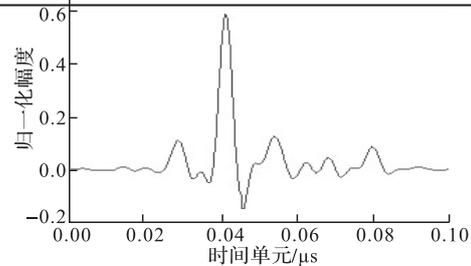


图 2 目标冲激响应

Fig.2 Impulse response of target

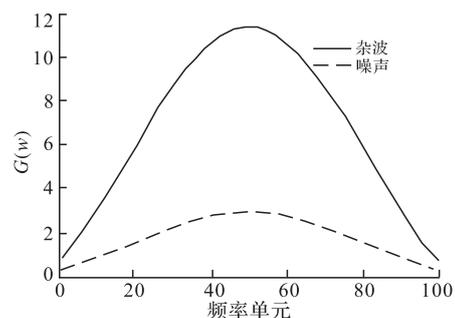


图 3 杂波及噪声功率谱密度

Fig.3 Spectral density of clutter and noise

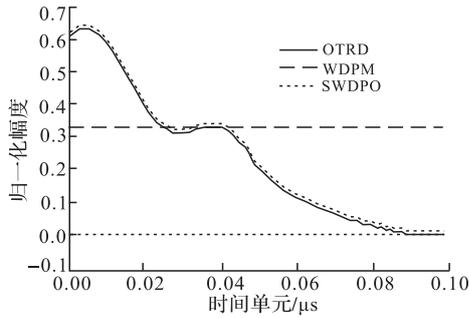


图 4 优化信号幅度

Fig.4 Range of the optimum signal

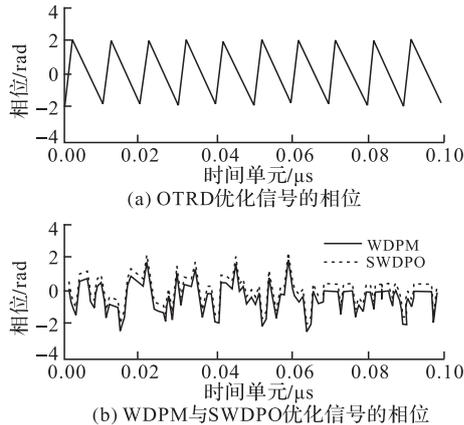


图 5 优化信号相位

Fig.5 Phase of the optimum signal

为了仿真在较大杂波环境下,对低可探测目标的探测,设图 3 中的噪声和杂波功率谱密度分别为 G_{n0} 和 G_{c0} ,并分别在不同情况的噪声和杂波环境下,通过 3 种方法进行了优化设计,最后得到的 SINR 结果见表 2。从表中可以看出,SWDPO 方法由于在 OTRD 方法基础上进行了相位调制,其结果优于后者;又因其在 WDPM 方法之上进行了最优调幅,所以 SINR 得到了进一步提高。在杂波功率增大的情况下,采用 WDPM 方法的 SINR 衰减较为明显,而采用了最优幅度调制的 OTRD 和 SWDPO 方法则衰减较慢。

表 2 不同发射信号在不同背景条件下的回波信干噪比

Tab.2 SINR of different transmit signals in different environment dB

背景条件	OTRD	WDPM	SWDPO	LFM
$G_n = G_{n0}, G_c = 2G_{c0}$	19.128	19.457	21.169	-1.958
$G_n = G_{n0}, G_c = 5G_{c0}$	18.599	18.614	20.755	-7.524
$G_n = G_{n0}, G_c = 10G_{c0}$	17.185	16.534	19.693	-12.896

6 结语

文中以最大化目标回波 SINR 为准则,结合相位调制与 OTRD 波形优化算法的各自技术优势,提出了一种基于相位调制与 OTRD 的综合雷达波形优化设计方法。通过仿真,证明了这种设计方法的

可行性和有效性,特别在强杂波环境,对低可探测目标的探测中,效果尤为明显。但雷达波形设计是一项复杂的工作,需要综合考虑距离速度模糊度、距离速度分辨率、旁瓣控制、带宽控制等多方面因素。因此,如何针对它们制定更加合理有效的优化准则,设计出满足多种指标需求的雷达发射信号,将是下一步继续研究的课题。

参考文献 (References):

- [1] Pillai S U, Oh H S, Youla D C, et al. 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.
- [2] Sandeep P Sira, Douglas Cachran, Darry Morrell, et al. Adaptive waveform design for improved detection of low-RCS targets in heavy sea clutter [J]. IEEE journal of selected topics in signal processing, 2007, 1(1):56-66.
- [3] Sameh M Sowelam, Ahmed H Tewfik. Waveform selection in radar target classification [J]. IEEE transaction on information theory, 2000, 46(3):1014-1029.
- [4] Bhatt T D, Rajan E G, Somasekhar Rao P V D. Design of frequency-coded waveforms for target detection [J]. IET radar sonar navigation, 2008, 10(3):388-394.
- [5] Garren D A, Osborn M K, Odom A C, et al. Enhanced target detection and identification via optimized radar transmission pulse shape [J]. IEEE proc radar sonar navigation, 2007, 6(8):133-138.
- [6] Romero R A, Goodman N A. Waveform design in signal-dependent interference and application to target recognition with multiple transmissions [J]. IET radar sonar and navigation, 2009, 10(23):328-340.
- [7] Nadav Levanon, Eli Mozeson. Radar signals [M]. New York: John Wiley & sons, 2004.
- [8] 纠博,刘宏伟,李亚丽.基于相位调制的宽带雷达波形优化算法[J].电子与信息学报, 2008, 30(9):2038-2041.
- [9] JIU Bo, LIU Hongwei, LI Yali. Waveform design for broadband radar based on phase modulated sinal [J]. Journal of electronics & information technology, 2008, 30(9):2038-2041. (in Chinese)
- [9] 陈国良,王熙法,庄镇泉.遗传算法及应用[M].北京:人民邮电出版社, 1999.
- CHEN Guoliang, WANG Xifa, ZHUANG Zhenquan. Genetic algorithm and its application [M]. Beijing: The people's posts and telecommunications press, 1999. (in Chinese)

(编辑:田新华)