

# 基于 WLS-TIR 的多目标识别认知雷达 波形自适应方法

范梅梅<sup>1</sup>, 廖东平<sup>1</sup>, 丁小峰<sup>2</sup>, 黎 湘<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073; 2. 中国人民解放军 96627 部队, 北京 100085)

**摘 要:** 针对多个雷达目标的识别问题, 研究认知雷达的波形自适应方法, 对目标冲激响应线性加权求和获得多个目标的加权表示, 基于互信息准则, 通过最大化接收到的信号与目标冲激响应线性加权和(WLS-TIR)的互信息获得了针对多目标识别的最优波形, 给出了权值的计算方法和多目标识别的自适应机制. 仿真实验表明, 本文提出的方法相对于传统的线性调频信号(LFM)对多目标的识别性能有明显的提高, 并具有较强的实用性和可行性.

**关键词:** 认知雷达; 雷达目标识别; 多目标; 波形自适应设计

**中图分类号:** TN957.51      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2012) 01-0073-05

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.01.012

## Adaptive Waveform Design Based on WLS-TIR for Multiple Targets Recognition in Cognitive Radar

FAN Mei-mei<sup>1</sup>, LIAO Dong-ping<sup>1</sup>, DING Xiao-feng<sup>2</sup>, LI Xiang<sup>1</sup>

(1. School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

2. Unit 96627 of PLA, Beijing 100085, China)

**Abstract:** A method of adaptive waveform design for multiple targets recognition is proposed. It includes three main parts: first, a new information theoretic criterion which is the mutual information between the received signal and the weighted linear sum of the target impulse responses (WLS-TIR) is proposed; second, a method of calculating the weights is developed; third, a strategy of adaptively adjusting the waveforms for multiple targets recognition is present. The simulation results show that the proposed method increases the performance of a radar system apparently for multiple targets recognition, besides, it is realistic and feasible.

**Key words:** cognitive radar; radar target recognition; multiple targets; adaptive waveform design

### 1 引言

目标识别是现代雷达发展的一个重要方向. 现有的目标识别技术主要关注于两个方面的研究: 特征提取与选择、识别算法与分类器设计<sup>[1]</sup>. 一方面, 对回波数据某种表征(高分辨距离像、RCS等)的特征提取与选择必将造成目标信息的部分损失, 这种信息的损失增加了目标识别的难度; 另一方面, 现有雷达系统首先要实现对目标的检测、跟踪等功能, 其发射波形并不是针对目标识别而设计且不能自动调整, 因此目标回波并不能充分体现各类目标间的差异, 增加了识别算法选择的难度, 同时难以保证满意的识别效果, 使目标识别技术从理论研究到成熟应用存在很大的差距.

认知雷达能够根据对当前目标及所处环境的所有知识而自适应的、智能的、动态的最优化并重新配置发射波形, 因而可以改善系统性能<sup>[2]</sup>. 由于其发射波形可以根据雷达系统当前任务及目标状态自适应调整, 因此研究认知雷达的发射波形自适应方法有望大幅度提高其识别性能, 实现真正意义上的目标识别雷达.

雷达系统希望在发射信号能量及观测时间约束下获得最佳识别性能<sup>[3]</sup>. 现有文献中针对宽带雷达的扩展目标识别最优波形设计方法主要有两类: 一类通过最大化目标类别间的某种距离测度求解最优波形<sup>[4~6]</sup>, 得到的最优波形往往将信号的能量集中在一段频率上, 且对目标冲激响应的精确度要求较高, 限制了其在实际中的应用; 另一类是基于信息论的方法, 通过最大化观测信

号与目标之间的互信息获得最优波形<sup>[7,8]</sup>.然而这些方法中仅考虑了一个目标,与现代雷达同时处理多个目标的能力不相匹配,因此迫切需要研究针对多个目标识别的最优波形设计方法.

文献[9]研究了多个点目标识别的变周期调频连续波信号,解决了虚假目标和速度分辨力的问题.文献[10]针对多目标跟踪问题,提出了对各接收波束与目标回波互信息线性加权求和(Weighted Linear Sum of Mutual Information, WLS-MI)的准则.但该方法需求解高次方程,且方程次数随目标数目增加,当目标较多(多于三个)时最优波形的确定比较困难,并且没有给出权值的计算方法.

本文针对多目标识别问题研究发射波形自适应设计的方法,主要贡献包括:(1)提出一种新的基于信息论的准则函数,将多个目标冲激响应的线性加权和(Weighted Linear Sum of Target Impulse Response, WLS-TIR)视为一个大的目标冲激响应,通过最大化接收信号与WLS-TIR的互信息获得最优波形.推导了WLS-TIR的谱方差与回波信号谱方差的关系,为应用基于信息论的波形设计方法提供了理论依据;(2)提出了一种根据各假设的先验概率分配情况计算权值的方法;(3)给出了一种针对多目标识别的认知雷达系统自适应机制.

## 2 问题描述

假定同一波束内存在距离上可分辨的  $L$  个目标.每个目标都可视为冲激响应为  $g_l(t)$ ,  $l=1, \dots, L$  的线性时不变系统.各目标都是  $M$  类目标中的某一类,则对各目标的识别都可以看作是一个  $M$  元假设检验过程.目标假设  $H_i$ ,  $i=1, 2, \dots, M$  通过目标冲激响应  $h_i(t)$ ,  $i=1, 2, \dots, M$  表示.认知雷达的任务即是在能量限定条件下,通过合理的配置发射波形实现对  $L$  个目标识别的有效性和正确性.

雷达接收的回波信号可表示为

$$y(t) = x(t) * g_1(t) + \dots + x(t) * g_L(t) + n(t) \quad (1)$$

其中,  $x(t)$  表示发射信号,限定其能量为  $\epsilon$ .  $n(t)$  为接收机内的加性噪声,  $y(t)$  表示接收信号.本文的信号模型忽略了杂波的影响.假设各目标冲激响应和噪声相互独立,并假定  $n(t)$  为均值为 0、功率谱密度为  $P_m(f)$  的高斯白噪声.

## 3 基于 WLS-TIR 的多目标识别最优波形

### 3.1 回波信号谱方差与目标谱方差的关系

回波信号谱方差与目标谱方差的关系是利用互信息理论求解最优波形的基础<sup>[7]</sup>.多目标的 WLS-TIR 可由下式表示

$$\mathbf{g}(t) = \sum_{l=1}^L \alpha_l^{1/2} g_l(t) \quad (2)$$

其中,  $\alpha_l$  为加权系数,且  $\sum_{l=1}^L \alpha_l = 1$ .则回波信号为

$$\mathbf{z}(t) = x(t) * \mathbf{g}(t) = x(t) * \sum_{l=1}^L \alpha_l^{1/2} g_l(t) \quad (3)$$

对式(2)进行傅里叶变换有

$$\mathbf{G}(f) = \sum_{l=1}^L \alpha_l^{1/2} \mathbf{G}_l(f) \quad (4)$$

其中,  $\mathbf{G}_l(f)$  为第  $l$  个目标冲激响应的傅里叶变换.  $g_l(t)$  在多元假设间的不确定性使其成为一个随机过程,故  $\mathbf{g}(t)$  和  $\mathbf{G}(f)$  也都为随机过程.则有

$$E\{|\mathbf{G}(f)|^2\} = |\mu_G(f)|^2 + \sigma_G^2(f) \quad (5)$$

其中,  $\mu_G(f)$ 、 $\sigma_G^2(f)$  分别为  $\mathbf{G}(f)$  的均值和谱方差.令  $X(f)$ 、 $\mathbf{Z}(f)$  分别表示  $x(t)$  和  $\mathbf{z}(t)$  的傅里叶变换,则有

$$E\{|\mathbf{Z}(f)|^2\} = |X(f)|^2 E\{|\mathbf{G}(f)|^2\} \quad (6)$$

不妨假设  $E\{\mathbf{G}(f)\} \neq 0$ , 则  $E\{\mathbf{Z}(f)\} \neq 0$ . 定义

$$\tilde{\mathbf{z}}(t) = \mathbf{z}(t) - E\{\mathbf{z}(t)\} \quad (7)$$

上式中  $E\{\mathbf{z}(t)\}$  对应  $\mu_G(f) \neq 0$  的信号部分.对  $\tilde{\mathbf{z}}(t)$  进行傅里叶变换

$$\tilde{\mathbf{Z}}(f) = \mathbf{Z}(f) - A \quad (8)$$

根据  $E\{\mathbf{z}(t)\}$  的定义,  $A$  为常数,且有

$$A = F(E\{\mathbf{z}(t)\}) = X(f) \mu_G(f) \quad (9)$$

其中,  $F(\cdot)$  表示傅里叶变换.则

$$\begin{aligned} E\{|\tilde{\mathbf{Z}}(f)|^2\} &= E\{|X(f)\mathbf{G}(f) - X(f)\mu_G(f)|^2\} \\ &= |X(f)|^2 \sigma_G^2(f) \end{aligned} \quad (10)$$

由式(8)和(9)可知  $\tilde{\mathbf{Z}}(f)$  的均值为 0, 其方差为:

$$\sigma_{\tilde{\mathbf{Z}}}^2(f) = E\{|\tilde{\mathbf{Z}}(f) - \mu_{\tilde{\mathbf{Z}}}(f)|^2\} = E\{|\tilde{\mathbf{Z}}(f)|^2\} \quad (11)$$

综上可得到回波信号的谱方差为

$$\sigma_Z^2(f) = \sigma_{\tilde{\mathbf{Z}}}^2(f) = |X(f)|^2 \sigma_G^2(f) \quad (12)$$

### 3.2 基于 WLS-TIR 的最优波形

根据式(2),雷达接收到的信号重新写为

$$y(t) = x(t) * \mathbf{g}(t) + n(t) = x(t) * \sum_{l=1}^L \alpha_l^{1/2} g_l(t) + n(t) \quad (13)$$

对式(13)进行傅里叶变换,有

$$\mathbf{Y}(f) = \mathbf{Z}(f) + \mathbf{N}(f) = X(f)\mathbf{G}(f) + \mathbf{N}(f) \quad (14)$$

则  $\mathbf{Y}(f)$  为一个随机过程,又由目标响应与噪声间的独立性,根据式(12),得到观测信号的谱方差

$$\sigma_Y^2(f) = \sigma_Z^2(f) + \sigma_N^2(f) = |X(f)|^2 \sigma_G^2(f) + \sigma_N^2(f) \quad (15)$$

由于各目标相互独立,  $\mathbf{g}(t)$  的谱方差为

$$\sigma_G^2(f) = \sum_{l=1}^L \alpha_l \sigma_{G_l}^2(f) \quad (16)$$

其中,  $\sigma_{G_l}^2(f)$  为第  $l$  个目标的谱方差.

由式(15)可知,当  $\mathbf{g}(t)$  服从零均值高斯分布时,观测信号与 WLS-TIR 之间的互信息为<sup>[7]</sup>:

$$I(y(t); \mathbf{g}(t) | x(t)) = \tilde{T} \int_w \ln \left[ 1 + \frac{2 |X(f)|^2 \sigma_c^2(f)}{TP_m(f)} \right] df \quad (17)$$

上式中  $\tilde{T}$  为观测时间,  $w$  为信号带宽. 利用 Lagrange 乘子技术可求得最优波形

$$|X(f)|^2 = \max \left[ 0, \frac{\tilde{T}}{\lambda} - \frac{P_m(f)\tilde{T}}{2\sigma_c^2(f)} \right] \quad (18)$$

其中  $\lambda$  为 Lagrange 乘子,其值由下式确定

$$\epsilon = \int_w \max \left[ 0, \frac{\tilde{T}}{\lambda} - \frac{P_m(f)\tilde{T}}{2\sigma_c^2(f)} \right] df \quad (19)$$

将式(16)代入式(18)获得多目标识别的最优波形为

$$|X(f)|^2 = \max \left[ 0, \frac{\tilde{T}}{\lambda} - \frac{P_m(f)\tilde{T}}{2 \sum_{l=1}^L \alpha_l \sigma_{c_l}^2(f)} \right] \quad (20)$$

由上式可获得最优波形幅度谱,利用波形合成技术可获得最优时域信号<sup>[11]</sup>.

### 3.3 权值计算方法

认知雷达系统识别目标的过程可以看作是一个序贯假设检验过程,希望在保证识别概率的同时提高识别效率下.多目标情况下,各目标识别的难易程度有所区别,识别出最后一个目标后该序贯假设检验过程才能够结束.因此,某次发射后,如果一个目标属于各假设的概率与平均概率差异较大,即越容易识别时,则下一次发射时对该目标分配较少的权值;反之,如果目标属于各假设的概率与平均概率差异不大,该目标比较难识别,则下一次发射波形时需给该目标分配较大的权值.同时,对于先被识别出的目标,以后的发射中令其权值为 0,即发射信号仅与未被识别的目标相适应,从而提高对多个目标识别的整体效率.基于以上描述,本文提出通过下式计算加权系数:

$$\alpha_l = \begin{cases} \frac{\left[ \sum_{i=1}^M \text{abs}(p_{li} - \frac{1}{M}) \right]^{-1}}{\sum_{l=1}^{M_m} \left[ \sum_{i=1}^M \text{abs}(p_{li} - \frac{1}{M}) \right]^{-1}}, & \text{第 } l \text{ 个目标待识别} \\ 0, & \text{第 } l \text{ 个目标已识别} \end{cases} \quad (21)$$

其中,  $p_{li}$  为第  $l$  个目标属于第  $i$  类的概率,  $M_m$  ( $M_m \leq L$ ) 为未被识别的目标数.

## 4 多目标识别问题的自适应机制

本文的认知雷达系统对多目标识别过程如下:

(1)根据初始的先验信息  $\alpha_l = 1/L$ ,  $P_{li} = 1/M$  发射最优波形;

(2)对各个目标的接收信号分别进行假设检验,并与阈值进行比较.如果识别出了所有的目标,则停止发射信号,雷达对目标的问询过程结束.否则,需要再次发射信号,进入新一轮问询.

(3)更新下一次发射的先验信息,主要包括以下四个更新过程:

① 根据贝叶斯准则更新各假设的先验概率;

② 根据下式更新各目标的谱方差<sup>[3]</sup>;

$$\sigma_{c_l}^2(f) = \sum_{i=1}^M P_{li} |H_i(f)|^2 - \left| \sum_{i=1}^M P_{li} H_i(f) \right|^2 \quad (22)$$

③ 根据式(21)更新各目标的加权系数.

④ 根据式(16)更新 WLS-TIR 的谱方差.

(4)根据更新的先验信息计算下一次发射的最优波形.

重复(2)~(4)直到所有目标都被识别出来.

## 5 仿真实验

设定目标冲激响应和信号的长度都为 63 个采样点.  $h_i(t)$  都是具有给定功率谱密度的零均值高斯随机过程的样本函数,仿真中认为该冲激响应确定且已知.各次实验仿真环境完全相同,且各信号具有相同的能量、带宽和时宽.分别从识别效率和正确识别概率两个方面比较不同波形的目标识别性能.通过 1000 次的 Monte Carlo 实验获得识别目标所需的平均发射脉冲次数及平均识别概率.

(1)给定误判率(0.01),比较各种波形的目标识别效率,以识别出所有目标所需的发射信号次数表示.对于三个以下目标,基于 WLS-MI 的方法和本文提出方法都可以提高识别性能,图 1 分别给出了 LFM 信号、基于 WLS-MI 的方法和本文提出方法识别两目标时的平均发射脉冲次数;而对于三个以上目标的场景,基于 WLS-MI 的方法难以获得最优波形,而本文方法仍然可以获得明显优于 LFM 信号的性能,图 2 给出了四个目标的假定下,本文方法相对于 LFM 信号对识别效率的改善;

(2)识别概率是目标识别问题的一个最直观指标,因此图 3 比较了本文所提方法与 LFM 信号在限定发射脉冲次数(10 次)下的正确分类概率.

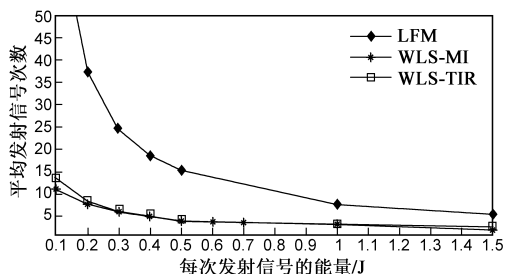


图1 两目标时平均发射信号次数随信号能量变化关系

此外,为说明所提权值更新方法对多目标识别的作用,图4给出发射信号能量为 $\epsilon = 0.2\text{J}$ 时某次实验中四个目标的先验概率及权值随信号发射次数的变化过程。

通过以上实验结果,得出以下三点结论:

(1)图1表明基于WLS-TIR的方法与基于WLS-MI的方法对两个目标识别的效率都明显优于LFM信号,且两者性能相当.但从前文的分析和实际仿真实验来看,基于WLS-TIR的方法的求解难易程度要明显优于基于WLS-MI的方法.而图2表明了本文方法在识别多个目标时的高效性与可行性,图3又从识别率的角度证明了本文方法的优势;

(2)比较图1和图2可看出,当目标数目增加时,LFM信号的识别效率没有明显变化;而本文方法随着目标数目的增多略有下降,但仍然远高于LFM信号;

(3)从图4可以看出,发射三次信号后第二个目标就已经被识别出来了,此后第二个目标的权值为0,即相当于三个目标的场景.根据结论(2)可知权值的引入提高了整体的识别性能。

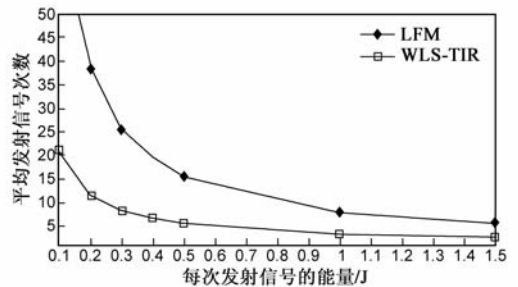


图2 四目标时平均发射信号次数随信号能量变化关系

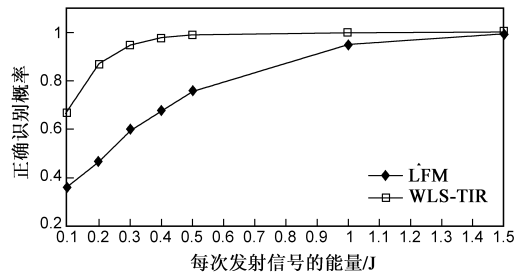


图3 四目标时正确分类概率随信号能量的变化关系

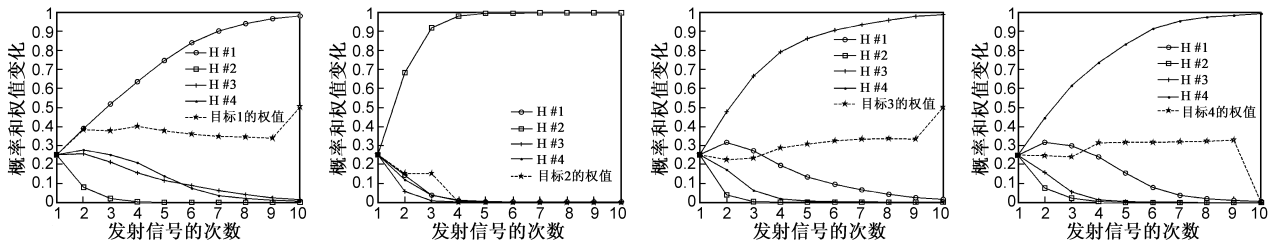


图4 各目标的先验概率及权值随信号发射次数变化过程

## 6 结论

本文研究了多目标识别的发射波形自适应设计的问题.基于互信息理论,提出了一种基于WLS-TIR的最优波形设计方法.该方法将多个目标看作是一个大的目标,其冲激响应为各目标冲激响应的加权线性组合,通过最大化观测信号与该合成大目标的互信息求解最优波形,给出了针对多目标识别的最优波形的解析形式.由于认知雷达系统根据目标当前的状态自适应的调整发射波形,本文给出了多目标识别的自适应机制及根据更新的先验信息计算权值的方法.仿真实验通过与基于WLS-MI的方法及LFM信号的性能比较,证明了本文所提的基于WLS-TIR的方法对于多目标识别的优越性。

### 参考文献

[1] 马林.高分辨雷达目标识别系统技术研究[J].电子学报, 2009, 37(12): 2633 - 2638.  
MA Lin. High resolution radar recognition system research[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(12): 2633 - 2638. (in Chinese)

nese)

[2] Dai FZ, et al. Adaptive waveform design for range-spread target tracking[J]. Electronics Letters, 2010, 46(11): 793 - 794.  
[3] Goodman N A, P R Venkata, M A Neifeld. 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.  
[4] Guerci JR, SU Pillai. Theory and application of optimum transmit-receive radar[A]. IEEE Internal Radar Conference[C]. Alexandria, 2000. 705 - 710.  
[5] 纠博,刘宏伟,等.针对目标识别的波形优化设计方法[J].电子与信息学报, 2009, 31(11): 2585 - 2590.  
Jiu Bo, Liu Hong-wei, et al. A method of waveform design for the recognition of radar targets[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(11): 2585 - 2590. (in Chinese)  
[6] DA Garren, et al. Enhanced target detection and identification via optimized radar transmission pulse shape[J]. IEE Proc Radar Sonar and Navigation, 2001, 148(3): 130 - 138.  
[7] Bell M R. Information theory and radar waveform design[J]. IEEE Trans Inform Theory, 1993, 39(5): 1578 - 1597.

- [8] Romero, RA, N A Goodman. Waveform design in signal-dependent waveform design in signal-dependent interference and application to target recognition with multiple transmissions [J]. IET Radar Sonar and Navigation, 2009, 3(4): 328 - 340.
- [9] 徐涛, 金昶明等. 一种采用变周期调频连续波雷达的多目标识别方法[J]. 电子学报, 2002, 30(6): 861 - 863.  
XU Tao, JIN Chang-ming, et al. A novel method to identify multitarget by FMCW radar[J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(6): 861 - 863. (in Chinese)
- [10] Leshem A, O Napshtek, A Nehorai. Information theoretic adaptive radar waveform design for multiple extended targets [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2007, 1(1): 42 - 55.
- [11] 蒋飞, 刘中, 等. 任意频谱结构的连续混沌调频雷达波形设计[J]. 电子学报, 2010, 38(9): 2195 - 2198.  
JIANG Fei, LIU zhong, et al. Waveform design of arbitrary spectrum structure for continuous-Chaos frequency-modulating radar[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(9): 2195 - 2198. (in Chinese)

## 作者简介



范梅梅 女, 1984年1月生于河北衡水. 分别于2005年和2008年于军械工程学院获学士学位和硕士学位. 现于国防科技大学攻读博士学位. 目前主要从事雷达目标识别、认知雷达波形设计等领域的研究工作.

E-mail: fmmsunshine@sina.com



廖东平 男, 1977年生于湖南邵阳. 2006年获国防科大博士学位, 讲师, 已发表学术论文20余篇. 目前主要从事雷达信号处理、目标识别方面的研究工作.

E-mail: ldpcho@tom.com