

基于 LPI 评估因子约束下雷达最优检测波形设计

王 森, 宋耀良, 金聪伟, 朱雨婷, 杜 爽

南京理工大学 江苏南京

【摘要】针对雷达目标检测和射频隐身波形综合设计问题, 本文提出了一种在隐身测度的约束下求解最优检测波形的设计方法。该方法在基于最大化信干噪比准则下, 使用最大边缘分配算法将有限的能量离散化并在频域上将离散的能量进行分配得到满足隐身测度约束条件的最优探测发射波形能量谱, 并使用波形能量谱进行时域波形的合成。仿真实验表明, 该方法得到的波形与传统常用的隐身波形相比有更好的隐身性能和探测性能。

【关键词】波形设计; 目标检测; 隐身测度; 最大边缘分配法

【基金项目】国家重点研发计划“政府间国际科技创新合作”重点专项(2022YFE0122300); 国家自然科学基金国际交流项目(62211530440)

【收稿日期】2023 年 4 月 14 日 **【出刊日期】**2023 年 6 月 23 日 **【DOI】**10.12208/j.jcea.20231013

Radar optimal detection waveform design for LPI evaluation factor constraint

Sen Wang, Yaoliang Song, Congwei Jin, Yuting Zhu, Shuang Du

Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu

【Abstract】For the waveform design problem of joint radar target detection and RF stealth, this paper proposes a design method to solve the optimal detection waveform under the constraint of stealth measure. This method uses the maximum marginal allocation algorithm to discretize the finite energy and allocate the discrete energy in the frequency domain to obtain the optimal detection emission waveform energy spectrum that satisfies the stealth measurement constraint based on Maximum Signal to Interference and Noise Ratio criterion. Then the waveform energy spectrum is used to synthesize the time domain waveform. Simulation experiments show that the waveform obtained by this method has better stealth performance and detection performance compared with the commonly stealth waveform.

【Keywords】Waveform design; Target detection; Stealth measure; The maximum marginal allocation algorithm

引言

近年来, 伴随着电子信息技术在军事领域上的发展与应用, 作为一种探测和追踪目标的设备, 雷达系统在现代战争中扮演着越来越重要的角色。但是雷达面临的环境也日趋复杂, 在战场上, 雷达信号随时都会被敌方侦察机截获, 一旦我方雷达被发现, 就面临着敌方各种干扰和反辐射导弹的精确打击, 为了保证雷达在战场中的生存能力, 必须提高雷达的射频隐身性能^[1], 然而, 在保证射频隐身的同时, 雷达必须能够检测到敌方目标。因此, 如何设计一种既能够保证射频隐身又能够最大程度的

提高雷达探测能力的探测波形成为一个关键问题。

波形设计是一个带有约束的最优化问题, 根据雷达任务的不同, 选择不同的优化准则和约束条件, 为了提高雷达的检测性能, 可以使用信噪比, 信干噪比或者检测概率作为准则函数^[2]。Steven Key^[3]以检测概率为准则函数, 研究了高斯点目标在杂波环境影响下的最佳发射信号及其相应的最佳探测器的设计。M R Bell^[4]推导了扩展目标在只有高斯噪声情况下的最优检测波形。R A Romero^[5]以最大化信干噪比为准函数, 推导了扩展目标在杂波和噪声环境中的最优波形的能量谱。但是上述文献在设计

最优检测波形是并没有考虑雷达的隐身性能。为了提高雷达的隐身性能, 施荣华^[6]等以降低 MIMO 雷达天线阵列的峰值旁瓣电平为目的, 提出一种粒子群算法与遗传算法相结合的混合布阵方法。杨宇晓^[7]等提出一种以最大条件熵为优化目标, 通过设计跳频周期和跳频间隔对最大条件熵进行优化计算, 获得了最大的跳频周期和最小的截获概率。对于能衡量雷达波形隐身性能的度量函数, Fancey^[8]等基于信号的功率谱分布提出了一种能衡量信号低截获性能的 LPI 评估因子, Jun Chen^[9]等基于 Wigner 矩阵的渐近谱分布, 提出了一种评估 LPI 波形的有效度量 NA-KLD。

本文将雷达的检测性能和隐身性能相结合, 在检测性能方面将最大化信干噪比作为优化准则函数, 而信干噪比的频域表达式与波形的能量谱有关, 所以同样选取和波形的频谱有关 LPI 评估因子作为评估波形低截获性能的测度, 将这两个准则函数联合起来, 使用最大边缘分配算法求解最优波形的能量谱, 并合成时域波形。该方法得到的波形, 比传统常用的隐身波形有更好的隐身性能和检测性能。

1 问题描述

信干噪比 (SINR) 是反映雷达检测性能的一个重要的参数, SINR 越大, 雷达检测性能越好, 所以雷达最优检测波形设计, 可以通过最大化 SINR 实现。杂波环境中, 分布式目标的检测问题的信号模型如图 1 所示, 其中, $s(t)$ 表示雷达发射波形, 其傅里叶变换 $S(f)$; $g(t)$ 是分布式目标的冲击响应, 其功率谱密度为 $G(f)$; $c(t)$ 表示功率谱密度为 $S_{cc}(f)$ 的杂波冲击响应, 它与雷达发射信号卷积得到杂波; $n(t)$ 表示噪声信号, 功率谱密度为 $S_{nn}(f)$ 。

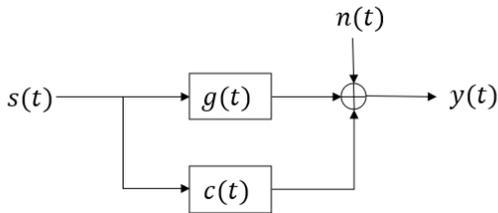


图 1 杂波环境中分布式目标检测的信号模型

则可以得到 SINR 谱密度为

$$R_{SINR(f)} = \frac{G(f)|S(f)|^2}{S_{cc}(f)|S(f)|^2 + S_{nn}(f)} \quad (1)$$

由于雷达信号是平稳的, 则在信号带宽 w 内, 雷达接收端的 SINR 可以表达为:

$$SINR = \int_{-\frac{w}{2}}^{\frac{w}{2}} \frac{G(f)|S(f)|^2}{S_{cc}(f)|S(f)|^2 + S_{nn}(f)} df \quad (2)$$

在隐身性能方面, Fancey 的 LPI 评估因子的表达式如式 (2) 所示:

$$\gamma = P_{max}^{3.2} * (S_p * \beta)^{0.6} \quad (3)$$

其中 γ 表示信号的雷达低截获性能的评估因子, γ 值越低表示信号的低截获性能越好, P_{max} 表示雷达信号的功率谱峰值功率, S_p 是功率谱直方图中的峰值尖峰, 即在峰值功率附近出现的频率主要分布频段, β 表示计算评估因子用到的采样点数量, 使用的采样点是在峰值功率谱附近占总功率 97% 的部分。

在 LPI 评估因子和能量约束下的雷达发射波形最优化问题为:

$$\begin{aligned} \max_{|S(f)|^2} SINR &= \int_{-\frac{w}{2}}^{\frac{w}{2}} \frac{G(f)|S(f)|^2}{S_{cc}(f)|S(f)|^2 + S_{nn}(f)} df \\ \text{s.t.} \quad \int_{-\frac{w}{2}}^{\frac{w}{2}} |S(f)|^2 df &\leq E \\ \gamma &\leq \gamma_{max} \end{aligned} \quad (4)$$

其中 γ_{max} 表示 LPI 评估因子的阈值。

2 基于最大边缘分配算法的波形设计

2.1 波形能量谱设计

基于最大边缘分配算法^[10]的波形设计是将固定的能量离散化, 然后把每一份离散的能量分配给可以获得最优效果的频域上, 首先将 SINR 和能量约束离散化, 离散化之后的 SINR 为:

$$SINR = \sum_{k=1}^N \frac{G(f_k)|S(f_k)|^2}{S_{cc}(f_k)|S(f_k)|^2 + S_{nn}(f_k)} \Delta f \quad (5)$$

其中, $k = 1, 2, \dots, N$, $f_k = k * \Delta f$, 并且 $\Delta f = w/N$ 。令:

$$SINR(k) = \frac{G(f_k)u(k)}{S_{cc}(f_k)u(k) + S_{nn}(f_k)} \quad (6)$$

离散化后的能量约束为:

$$\sum_{k=1}^N |S(f_k)|^2 \Delta f = E \quad (7)$$

令:

$$u(k) = |S(f_k)|^2 \quad (8)$$

将离散的能量约束简化为:

$$\sum_{k=1}^N u(k) = \frac{E}{\Delta f} = u_{max} \quad (9)$$

将 u_{max} 离散化, 等分为 M 份, 每一份能量为 Δ , $u_{max} = M\Delta$ 。

在最大边缘分配算法中, 如果在没有隐身约束的情况下, 只用每次都将 Δ 能量分配给可以获得最大 SINR 的频段。当所有能量分配完成之后就可以得到最优探测的雷达波形能量谱。当有隐身约束条件时, 分配能量之后的频谱必须要满足 LPI 评估因子的约束, 即将能量分配到所有满足约束条件并可以得到最大 SINR 的频段上。

设第 k 个频段分布 $m\Delta$ 能量时对应的 SINR (k) 可以用矩阵 A 中的元素 $A(k, m)$ 表示:

$$A(k, m) = \frac{m\Delta G(f_k)}{m\Delta S_{cc}(f_k) + S_{nn}(f_k)} \quad (10)$$

其中 $k = 1, 2, \dots, N$, $m = 1, 2, \dots, M$ 。

则该算法具体步骤如下:

①设置 LPI 评估因子的阈值 γ_{max} , 根据能量约束 E 求取 u_{max} , 并设置 M 对 u_{max} 离散化, 得到最小能量分配单元 Δ , 令 $j = 1$;

②根据式(10)求取矩阵 A , 并初始化能量矩阵 u , $u(k) = 0$, $k = 1, 2, \dots, N$;

③对 $A(k, 1)$ ($k = 1, 2, \dots, N$)从大到小进行排序: $[A(d_1, 1), A(d_2, 1) \dots A(d_N, 1)]$;

④为能量谱赋值 $u(d_j) = u(d_j) + \Delta$, 根据能量谱求解 LPI 评估因子是否满足约束条件, 如果满足, 进行下一步, 如果不满足约束条件, 令 $u(d_j) = u(d_j) - \Delta$, $j=j+1$, 并返回步骤③;

⑤更新矩阵 A , 对于所有的 m , $m = 1, 2, \dots, M$, 令 $A(d_j, m) = A(d_j, m+1) - A(d_j, 1)$;

⑥返回第③步, 一直到所有能量分配完成结束循环。

循环结束后输出的 u , 就是所求的在 LPI 评估因子约束下的最优探测波形的能量谱。

2.2 时域波形的合成

根据上文求得的能量谱 u 进行时域波形的合成, 假设时域波形是恒包络波形, 令 $s(m) = e^{j*\varphi(m)}$ ($m = 0, 1, 2, \dots, M-1$)表示信号的时域波形, 最小化信号的傅里叶变换和期望能量谱的平方根之间的均方误差来进行时域波形的合成^[11], 即:

$$J(\varphi) = \sum_{k=0}^{N-1} [A(k) - |S(k)|]^2, \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (11)$$

其中 $A(k)$ 是期望能量谱的平方根, $S(k)$ 是恒包络信号的离散傅里叶变换, 设 $\phi(k)$ 是 $S(k)$ 的相位, 式(11)可以变换为:

$$J(\varphi) = \sum_{k=0}^{N-1} [A(k)e^{j*\phi(k)} - S(k)]^2 \quad (12)$$

令:

$$x = [A(0)e^{j*\phi(0)}, A(1)e^{j*\phi(1)}, \dots, A(N-1)e^{j*\phi(N-1)}]^T \quad (13)$$

$$s = [s(0), s(1), \dots, s(M-1)]^T \quad (14)$$

离散傅里叶变换矩阵为 W , 则:

$$S = Ws \quad (15)$$

最小二乘误差可以用矢量形式表示为:

$$J(\varphi) = (x - Ws)^H(x - Ws) \quad (16)$$

当 $J(\varphi) = 0$ 时, s 的最小线性二乘估计为:

$$\hat{s} = (W^H W)^{-1} W^H x \quad (17)$$

由于 W 是离散傅里叶变换矩阵, 则 $W^H W = (1/N) I_M$, I_M 是 M 阶的单位矩阵, 则:

$$\hat{s} = \left(\frac{1}{N}\right) W^H x \quad (18)$$

由于向量 x 取决于 S 的相位 $\phi(k)$, 而 S 又取决于信号, 因此可以通过迭代求解。

3 仿真结果分析

仿真参数设置如下, 如图2所示假设目标谱方差和杂波谱方差是已知的, 采样点数为1950, 发射信号总能量 $E = 1$, 噪声的功率谱密度 $S_{nn}(f) = 0.1$ 。

图3是没有 LPI 评估因子时的雷达最优检测波

形的能量谱, 即仅在能量约束下基于最大 SINR 准则的最优探测波形设计, 可以看出主要把能量分配到目标响应强和杂波响应较小的频段上, 如归一化频率中的 0.4 频率, 分配了最多的能量, 在目标响应强和杂波响应强的频段分配较少能量, 如频率-0.4 和 0.2, 在杂波强目标弱的频段分配少量能量。

图 4 是在不同 LPI 评估因子约束下的雷达最优检测波形能量谱, 所以设置可以看出, 随着评估因子约束阈值的减小, 功率谱的峰值一直在降低, 主要是因为 LPI 评估因子和雷达波形的能量谱峰值有关, 由式 (3) 可知, LPI 评估因子主要和雷达功率谱峰值功率有关, 峰值功率越高, 评估因子越大, 所以为了提高雷达的低截获性能, 降低 LPI 评估因子, 要减小雷达的峰值功率, 将多余的能量分配到其他能获得 SINR 的频谱上。

图 5 是当 LPI 约束 $\gamma_{max} = 10$ 时的时域波形合成的能量谱和期望的能量谱图, 可以看出合成的时域

波形能量谱和期望的能量谱有差别, 并且峰值比期望的峰值高, 则合成的时域波形的 SINR 要比期望最优的低, 而 LPI 评估因子要比期望能量谱的高, 经过计算合成的时域波形的 SINR 比期望的低 0.0175dB, 合成的能量谱评估因子为 57.56, 期望的 LPI 评估因子为 9.9351, 这种情况主要是因为设计波形时, 先设计能量谱, 然后进行时域波形的合成, 所以设计能量谱时要把合成时域波形的能量谱和期望能量谱的差别考虑进去。

表 1 显示了基于图 1 中已知的目标谱和杂波谱, 几个常用的雷达隐身信号和不同约束下的 SINR 和 LPI 评估因子对比, 从表中可以看出, 在 LPI 评估因子约束下可以得到比常用的隐身波形有更好的 SINR 和更好的低截获性能的波形。随着 LPI 评估因子约束的增加, 得到信号的 SINR 也增加, 有更好的探测性能, 但是同时低截获性能降低, 甚至会低于常用的雷达发射信号。

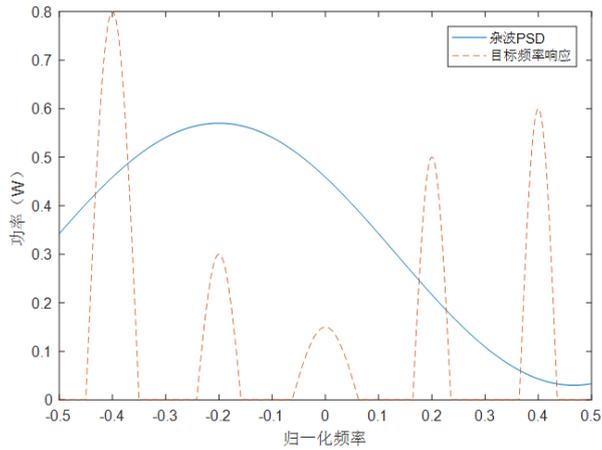


图 2 目标谱和杂波谱

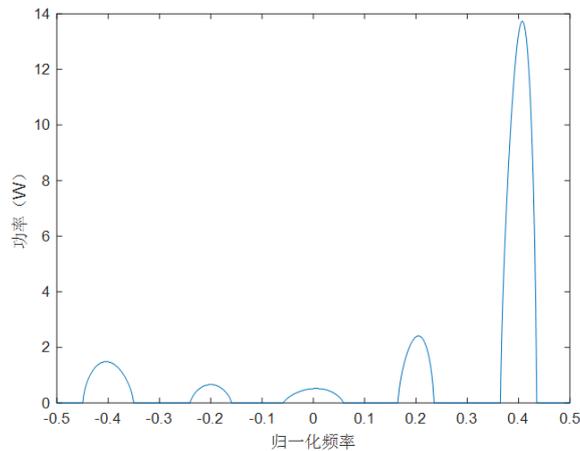


图 3 无评估因子约束时的雷达最优检测波形能量谱

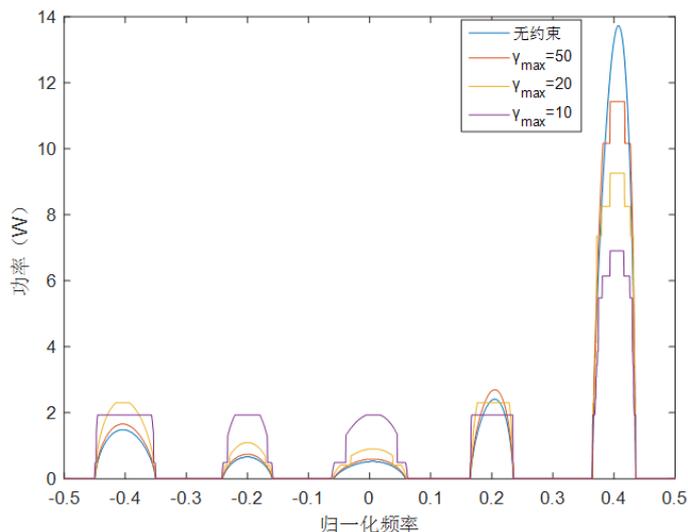


图 4 不同评估因子约束时的雷达最优检测波形能量谱

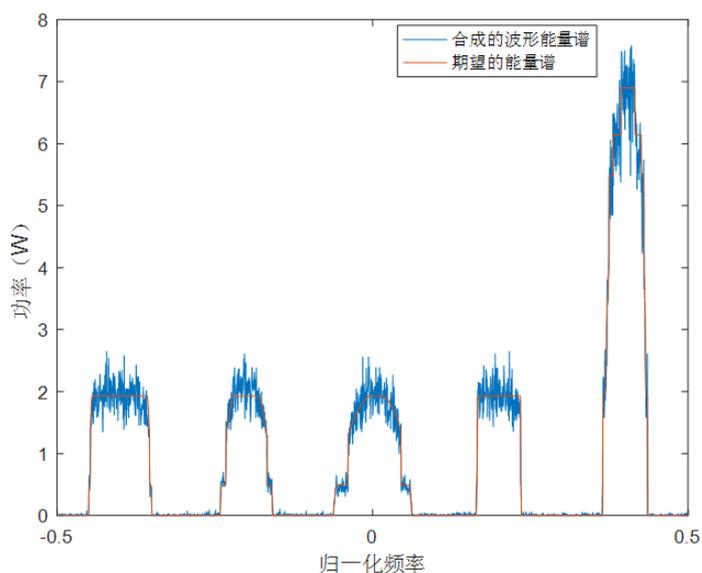


图 5 合成波形能量谱和期望能量谱

表 1 波形 SINR 和 LPI 评估因子对比表

雷达波形	SINR/dB	LPI 评估因子	
LFM	21.6001	877.9879	
Frank	26.0543	554.6626	
Costas	21.9908	633.7127	
Costas-Barker	24.7999	226.5262	
无 LPI 约束	31.5784	484.9584	
LPI 约束 $\gamma_{max} = 10$	期望的能量谱	9.9351	
	合成波形能量谱	31.2721	57.5691
LPI 约束 $\gamma_{max} = 20$	期望的能量谱	31.4990	19.5985
	合成波形能量谱	31.4732	141.4702
LPI 约束 $\gamma_{max} = 50$	期望的能量谱	31.5673	49.8466
	合成波形能量谱	31.5533	332.6763

4 结论

本文提出了一种基于隐身约束下求最优雷达探测波形的设计方法, 该方法通过最大化 SINR 准则设计最优探测波形, 并使用 LPI 评估因子作为隐身测度在设计波形时进行约束。由于 SINR 和 LPI 评估因子都和波形的功率谱有关, 使用最大边缘分配法在频域上将离散的能量分配到满足约束条件下能获得最大收益的频谱上, 最后, 通过这种方法设计的波形比重用的隐身波形有更好的探测性能和隐身性能。

参考文献

- [1] LYNCH D, Jr. 射频隐身导论[M]. 沈玉芳, 译. 西安: 西北工业大学出版社, 2009.
- [2] 王璐璐, 王宏强, 王满喜, 等. 雷达目标检测的最优波形设计综述[J]. 雷达学报, 2016, 5(5): 487 - 498.
- [3] Steven Kay. Optimal signal design for Detection of Gaussian point targets in stationary Gaussian clutter/reverberation[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2007, 1(1): 31-41.
- [4] Bell M R. Information theory and radar waveform design[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1993, 39(5): 1578-1597.
- [5] Romero R A, Bae J, and Goodman N A. Theory and application of SNR and mutual information matched illumination waveforms[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(2): 912-927.
- [6] 施荣华, 朱炫滋, 董健, 等. 基于粒子群-遗传混合算法的 MIMO 雷达布阵优化[J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2013, 44(11): 4499-4505.
- [7] 杨宇晓, 汪飞, 周建江, 等. 跳频周期和跳频间隔的最大条件熵射频隐身设计方法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(4): 841-847.
- [8] C.Fancey, C.M.Alabaster. The Metrication of Low Probability of Intercept Waveform[C], IEEE International Conference on Waveform Diversity and Design (WDD), Niagara Falls, Ontario, Canada, Aug.8-13, 2010, 000058-000062.
- [9] Chen J, Wang F, Zhou J. The metrication of LPI radar waveforms based on the asymptotic spectral distribution of wigner matrices[C]. IEEE International Symposium on Information Theory. IEEE, 2015:331-335.
- [10] KAY S. Waveform design for multistatic radar detection[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009, 45(3), 1153-1166.
- [11] Jackson L B, Kay S M, and Vankayalapati N. Iterative method for nonlinear FM synthesis of radar signals[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2010, 46(2): 910-917.

版权声明: ©2023 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS