

◇ 研究报告 ◇

主动声纳恒包络波形设计及其性能分析*

刘大利^{1,2†} 张剑波³ 颜恒平³ 龙帮强¹ 赵旭琛¹

(1 天津工业大学电气工程与自动化学院 天津 300387)

(2 中国科学院声学研究所 声场声信息国家重点实验室 北京 100190)

(3 海鹰企业集团有限责任公司 无锡 214061)

摘要 为了解决伪随机编码调相信号峰均比过高问题,为主动声纳设计恒包络的伪随机编码 MSK 调制波形。通过分析 MSK 信号表达式,得到波形的复包络信号。使用遗传算法优化伪随机序列,降低波形的自相关旁瓣,可减小声纳的虚警概率。通过优化复包络信号的自相关函数旁瓣值和互相关函数值,得到自相关性能和正交性能优良的恒包络波形,可以缓解多部声纳间的同频干扰。通过仿真分析波形的模糊度图可知,波形具有良好的频率分辨率和距离分辨率。该波形设计可以取代峰均比过高的编码调相信号,满足主动声纳对运动目标的探测需求。

关键词 主动声纳,恒包络,MSK,遗传算法,正交波形

中图分类号: TB566

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2016)06-0553-06

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2016.06.012

Constant envelop waveforms design and performance analysis for active sonar

LIU Dali^{1,2} ZHANG Jianbo³ YAN Hengping³ LONG Bangqiang¹ ZHAO Xuchen¹

(1 School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)

(2 State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(3 HaiYing Enterprise Group Co. Ltd., Wuxi 214061, China)

Abstract In order to solve the high peak to average power ratio (PAPR) problem of phase-modulated signals by pseudo random codes, constant envelop waveforms modulated by pseudo random codes and minimum shift keying (MSK) method were designed for active sonar. The complex envelop signals were obtained, after analyzing the expression of MSK signals. The pseudo random codes optimized by genetic algorithm can reduce the autocorrelation sidelobe values of waveforms and the false alarm probability of active sonar. Constant envelop waveforms with excellent autocorrelation and orthogonality performances can be obtained by optimizing the autocorrelation sidelobe and cross-correlation values of complex envelope signals, which can alleviate interference between multiple active sonars. Ambiguity function shows that the designed waveforms has good frequency resolution and range resolution, which means that designed MSK waveforms can replace phase-modulated signals with high peak-to-average power ratio, and can be used for active sonar detecting moving targets.

Key words Active sonar, Constant envelop, MSK, Genetic algorithm, Orthogonal waveforms

2016-03-02 收稿; 2016-05-19 定稿

*声场声信息国家重点实验室开放课题 (SKLA201503), 天津市自然科学基金 (16JCQNJC01400), 国家自然科学基金 (61601322)

作者简介: 刘大利 (1984-), 男, 河北保定人, 博士, 讲师, 研究方向: 信号与信息处理。

†通讯作者 E-mail: liudalidl@139.com

1 引言

主动声纳是实现水下目标定位、跟踪、分类、识别的关键技术,而发射波形是影响主动声纳性能的主要因素之一。常见的声纳波形有单频脉冲(CWP)、线性调频脉冲(LFM)、双曲调频脉冲(HFM)、编码调相脉冲(CMP)等信号以及它们的各种组合形式^[1]。

编码调相脉冲通常使用伪随机序列(如m序列)调制脉冲信号的相位,其模糊度图呈现“图钉型”,具有优良的距离分辨率和速度分辨率。为了达到某种探测性能,各种各样的优化算法用于设计伪随机序列。Deng Hai使用模拟退火算法设计了正交伪随机二相码和多相码,设计的序列具有良好的自相关性能和互相关性能^[2-3]。刘波等人使用遗传算法进一步对正交多相码进行优化^[4]。互熵算法(Cross entropy)^[5]、序列二次规划算法(Sequential quadratic programming)^[6]、混沌序列^[7]、禁忌搜索^[8]、二阶锥规划(Second order cone programming)^[9]以及混合算法^[10]等算法也用于设计各种伪随机多相序列,用于优化探测波形的自相关性能和正交性能。

优化所得的伪随机序列具备良好的相关性能,但是使用伪随机编码直接调制信号的相位,会导致相邻码元间相位跳变,经过带限处理后,引起信号幅度的变化,影响波形的峰均比(PAPR)。信号PAPR过高时会严重影响功率放大器的工作,减小声纳声源级,降低了系统探测性能。

文章将通信领域中的最小频移键控(Minimum-shift keying, MSK)调制引入主动声纳的波形设计中。MSK调制使用二相码调制载波的频率,同时保证波形相位的连续,使波形具备恒包络

特性。文章借鉴文献[2-10]对编码调相信号的优化过程,通过设计伪随机二相码,优化MSK信号的自相关性能和互相关性能,使之适合水下探测。在上文提到的众多智能优化算法中,文章选用通用性强、效率较高的遗传算法进行二相码的优化。优化所得的MSK波形,不仅具有包络恒定的优点,而且具备良好的相关性能,可以弥补编码调相信号的不足,应用到水声探测领域。

2 MSK信号分析

MSK信号可以表示为^[11]

$$s(t) = A \cos \left[2\pi f_c t + a(t) \frac{\pi t}{2T_b} + \phi(t) \right], \quad (1)$$

其中, A 为信号幅度; f_c 为信号的中心频率; T_b 为一个码元的持续时间; $a(t)$ 为信息码元序列, $a(t) = \sum_n a_n g(t - nT_b)$, a_n 为信息码元, $a_n = \pm 1$; $\phi(t)$ 为初始相位序列, $\phi(t) = \sum_n \phi_n g(t - nT_b)$, ϕ_n 为第 n 个码元对应的初始相位; $g(t)$ 定义为

$$g(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < T_b, \\ 0, & \text{其他}. \end{cases} \quad (2)$$

为了保证各码元对应信号的相位连续性,需要满足 $\phi_n = \phi_{n-1} + (a_{n-1} - a_n)n\pi/2$, 即

$$\phi_n = \begin{cases} \phi_{n-1}, & a_n = a_{n-1}, \\ \phi_{n-1} \pm n\pi, & a_n \neq a_{n-1}. \end{cases} \quad (3)$$

公式(3)说明第 n 个码元的初始相位 ϕ_n 与当前输入码元 a_n 、前一码元 a_{n-1} 及其相位 ϕ_{n-1} 有关。假设 ϕ_n 初始相位参考值为0,则 $\phi_n = 0$ 或 $\pi \pmod{2\pi}$ 。

对公式(1)三角函数展开,可以得到

$$\begin{aligned} s(t) = A & \left[\cos \left(a(t) \frac{\pi t}{2T_b} \right) \cos \phi(t) - \sin \left(a(t) \frac{\pi t}{2T_b} \right) \sin \phi(t) \right] \cos(2\pi f_c t) \\ & - A \left[\sin \left(a(t) \frac{\pi t}{2T_b} \right) \cos \phi(t) + \cos \left(a(t) \frac{\pi t}{2T_b} \right) \sin \phi(t) \right] \sin(2\pi f_c t). \end{aligned} \quad (4)$$

考虑到 $\sin \phi(t) = 0$, $\cos \phi(t) = \pm 1$, $a(t) = \pm 1$, 则 $\cos \left(a(t) \frac{\pi t}{2T_b} \right) = \cos \left(\frac{\pi t}{2T_b} \right)$, $\sin \left(a(t) \frac{\pi t}{2T_b} \right) = a(t) \sin \left(\frac{\pi t}{2T_b} \right)$, 公式(4)可简化为

$$\begin{aligned} s(t) = & \cos \phi(t) \cos \frac{\pi t}{2T_b} \cos(2\pi f_c t) \\ & - a(t) \cos \phi(t) \sin \frac{\pi t}{2T_b} \sin(2\pi f_c t). \end{aligned} \quad (5)$$

$s(t)$ 可以分解为同相分量和正交分量两部分,即

$$\begin{cases} I(t) = \cos \phi(t) \cos \frac{\pi t}{2T_b}, \\ Q(t) = a(t) \cos \phi(t) \sin \frac{\pi t}{2T_b}, \end{cases} \quad (6)$$

其中, $a(t)$ 和 $\cos \phi(t)$ 包含了全部输入码元信息, $\sin \frac{\pi t}{2T_b}$ 和 $\cos \frac{\pi t}{2T_b}$ 可以视为波形加权函数。 $s(t)$ 的复包络信号表示为

$$u(t) = I(t) + jQ(t), \quad (7)$$

即 $s(t)$ 可以表示为

$$s(t) = \operatorname{Re}[u(t) \exp(2\pi f_c t)]. \quad (8)$$

复包络信号 $u(t)$ 包含了 $s(t)$ 除频谱位置外的所有信息, 通过优化码元集合 $\{a_n\}$, 可以得到不同的复包络信号 $u(t)$, 获取性能各异的发射波形 $s(t)$ 。

3 MSK 码元的优化

主动声纳通常使用匹配滤波器进行回波检测, 在目标判决时, 为了减小虚警数、降低判决难度, 希望回波经过匹配滤波处理后具有尖锐的峰值和尽可能低的旁瓣值。因此, 声纳波形应该具有足够低的自相关旁瓣值。当多部声纳编队工作时, 为了避免互相干扰, 需要在空间、时间或频率等维度将多个发射波形分离。为了进一步降低发射干扰, 多部声纳可以发射一组正交波形。因此, 波形设计时不仅要求信号本身具有良好自相关性能, 正交波形两两之间应具有低的互相关值。下面分别介绍单个波形的自相关性能优化方法和正交信号自相关和互相关性能优化方法, 以及使用遗传算法优化 MSK 信号的具体步骤。

3.1 自相关性能的优化

主动声纳通常使用匹配滤波器检测目标回波, 为了减少虚警, 希望发射波形的自相关函数旁瓣尽可能低。通过优化复包络 $u(t)$ 中包含的码元序列 $\{a_n\}$, 可以得到低自相关旁瓣的恒包络 MSK 信号。

$u(t)$ 信号的自相关函数可以表示为

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t) u^*(t - \tau) dt, \quad (9)$$

以自相关函数的最大旁瓣值作为优化过程的目标函数, 可以表示为

$$E(\mathbf{A}) = \max_{|\tau| > \tau_m} \{|R(\tau)|\}, \quad (10)$$

其中, 矢量 $\mathbf{A}$ 为目标函数的变量, 表示码元序列 $\{a_n\}$; τ_m 为自相关函数的主瓣宽度, 取决于系统容忍的目标距离分辨率。

通过智能优化算法设计伪随机码元序列 $\mathbf{A}$, 使得目标函数 $E(\mathbf{A})$ 最小, 得到对应的复包络信号 $u(t)$, 即可获得自相关旁瓣值最低的声纳波形。

3.2 正交信号的优化

主动声纳编队工作时, 为了降低声纳之间的同频干扰, 希望多部声纳之间的探测波形互相正交。假设系统中有 M 部声纳, 发射波形分别 $u_1(t)$, $u_2(t), \dots, u_M(t)$, 每个波形的码元个数为 N , 码元集合可以表示为一个矩阵, 即

$$\mathbf{A}_{M \times N} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{M1} & a_{M2} & \cdots & a_{MN} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

其中 $a_{ij} = \pm 1$, 表示第 i 个波形 $u_i(t)$ 的第 j 个码元。通过优化码元矩阵 $\mathbf{A}$, 可以得到具有良好自相关性能和正交性能的恒包络 MSK 信号。

两个复包络信号 $u_i(t)$ 和 $u_j(t)$ 的互相关函数可以表示为

$$R_{ij}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} u_i(t) u_j^*(t - \tau) dt. \quad (12)$$

为了优化波形的自相关性能和正交性能, 以自相关函数的最大旁瓣值以及互相关函数的最大值的和作为优化过程的目标函数, 可以表示为

$$E(\mathbf{A}) = \sum_{i=1}^M \max_{|\tau| > \tau_m} \{|R_i(\tau)|\} + \lambda \sum_{i=1}^M \sum_{j=i+1}^M \max \{|R_{ij}(\tau)|\}, \quad (13)$$

其中, 前半部分表示 M 个自相关函数旁瓣最大值的和, 用于约束 M 个波形的自相关性能; 后半部分表示 $M(M+1)/2$ 个互相关函数最大值的和, 用于约束 M 个波形之间的正交性能; $R_i(\tau)$ 表示 $u_i(t)$ 的自相关函数; λ 为加权因子, 调整 M 个波形的相关性能和正交性能的权重。

通过智能优化算法设计伪随机码元矩阵 $\mathbf{A}$, 使得目标函数 $E(\mathbf{A})$ 最小, 得到对应的 M 个复包络信号, 即可获得一组既具有良好自相关性能又具有良好正交性能的声纳波形。

3.3 遗传算法优化 MSK 信号

遗传算法是解决最优化问题的一种启发式搜索算法,借鉴了遗传、突变、自然选择和杂交等生物学现象。遗传算法优化 MSK 信号时,码元矩阵 $\mathbf{A}$ 本身即可作为染色体的编码。遗传算法用于优化码元矩阵的基本步骤如下:

(1) 初始化:随机产生 P 个码元矩阵 $\mathbf{A}$,作为初始种群。

(2) 种群评估:按照公式 (10) 或 (13) 计算目标函数 $E(\mathbf{A})$,由 $E(\mathbf{A})$ 得到种群的适应度函数,适应度函数决定了个体被选择到下一代的概率大小。适应度函数为一个正数,保证 $E(\mathbf{A})$ 越小的个体适应度越大,所以,第 i 个个体的适应度可以表示为

$$F(A_i) = \left(\max_j E(A_j) - pE(A_i) \right)^q, \quad (14)$$

其中 $0 < p < 1, q > 0$,用于调整个体之间的差异性。

(3) 选择算子:根据个体的适应度函数 $F(A_i)$,采用轮盘赌方式进行选择操作,即个体被选中的概率为

$$p(A_i) = \frac{F(A_i)}{\sum F(A_i)}. \quad (15)$$

(4) 交叉算子:利用单点交叉方式重组个体,即随机选择两个父代个体,随机产生交叉点位置,将两个码元矩阵进行交叉,生成两个新个体。

(5) 变异算子:按照提前设置的变异概率 p_m ,对每个个体随机产生变异位置,改变码元矩阵 A_i 变异位置处的码元值。

结束:如果目标函数 $E(\mathbf{A})$ 达到预设目标值,或迭代次数达到预设最大值,终止遗传算法,否则回到步骤 (2) 继续优化。

4 仿真及结果分析

4.1 自相关函数优化结果及模糊度图分析

使用遗传算法按照公式 (10) 优化波形的自相关函数。使用优化所得二进制码分别生成 MSK 调制波形和编码调相信形,如图 1 所示。可以明显看出图 1(a) 显示的 MSK 波形在码元变化处相位连续,保证了波形的恒包络特性;图 1(b) 显示了编码调相信号在码元变化处,相位发生 180° 跳变,相位突变的波形在带通处理后会产信号幅度变化,甚至生成“尖刺”,破坏了包络的恒定。

优化过程中,设置初始种群大小为 500,迭代次数为 500 时终止优化,设置码元数为 256,码元速

率为 1000 Baud/s,即波形的时长为 256 ms。初始种群的二进制码随机产生,对应波形的自相关旁瓣值约为 15 dB。优化后的波形自相关旁瓣最大值为 -22.14 dB,自相关函数如图 2 所示。良好的自相关性说明该波形在匹配滤波处理后,可以降低目标判决的难度和虚警,提高声纳探测性能。

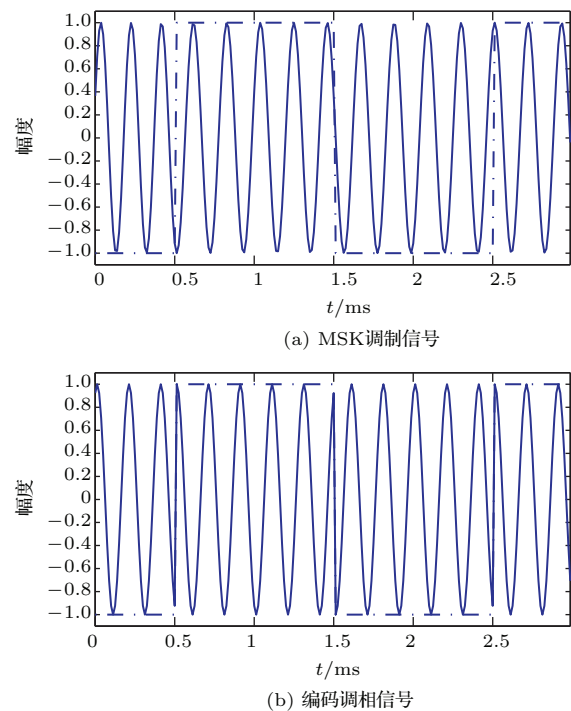


图 1 MSK 和编码调相信号的比较

Fig. 1 Comparison of MSK and CMP signals

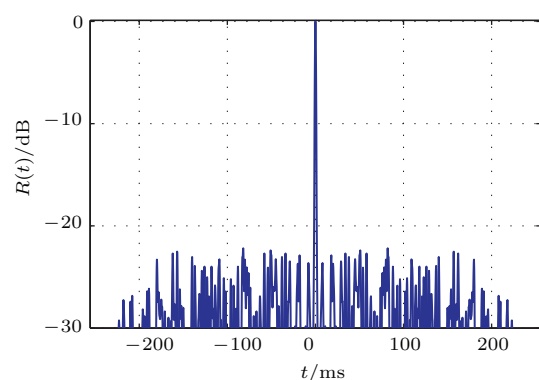


图 2 优化所得波形的自相关函数

Fig. 2 The autocorrelation of the optimized waveform

为了检验设计波形的多普勒频率分辨率和距离分辨率,分析波形的模糊函数如图 3 所示。图 3(a) 显示了设计波形呈现“图钉型”模糊度图,说明 MSK 信号与伪随机编码调相信号具有类似的分辨

性能;图3(b)显示了波形在 -3 dB 处的模糊图,可以据此计算出该波形的距离分辨率和速度分辨率。图3(b)中,横轴表示延时量, $\tau_{-3\text{ dB}} = 1.12\text{ ms}$,距离分辨率 $\Delta R = c\tau_{-3\text{ dB}}/2 \approx 0.84\text{ m}$ (水中声速 $c =$

1500 m/s);纵轴表示归一化的频率, $\delta_{-3\text{ dB}} = 10^{-3}$,速率分辨率 $\Delta v = cf_d/(2f_0) = c\delta/2 \approx 0.75\text{ m/s}$ 。信号的模糊度图说明设计的恒包络信号基本满足声纳探测对距离和速度分辨率的需求。

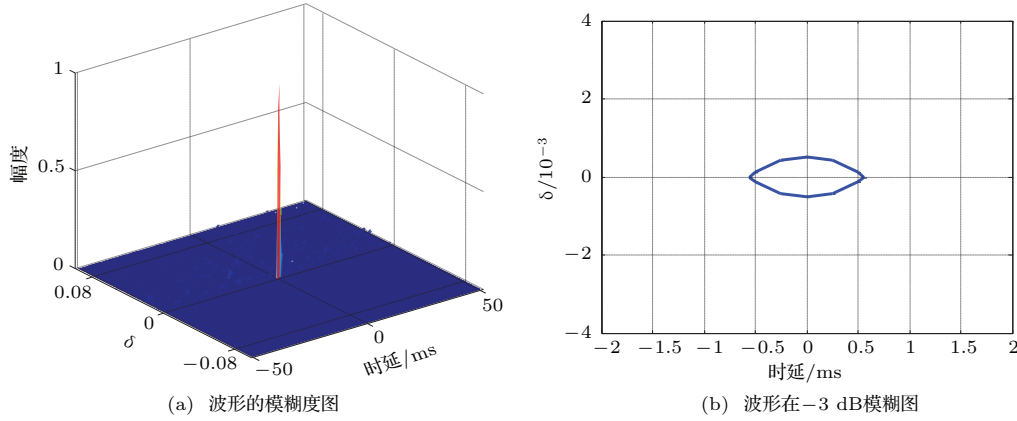


图3 优化所得波形的模糊度图和 -3 dB 模糊图

Fig. 3 The ambiguity function and -3 dB section of the optimized waveform

4.2 正交波形的优化结果

使用遗传算法按照公式(13)优化波形的自相关旁瓣值和互相关函数,设置波形个数为3,码元数为256,码元速率为 1000 Baud/s ,即3个波形的时长均为 256 ms 。优化过程中,种群大小为500,迭代

次数为500时终止优化。初始种群的二源码随机产生,对应波形的自相关旁瓣值约为 15 dB ,两两互相关值约为 15 dB 。设计的三个波形的相关函数如图4所示。图4(a)~4(c)分别显示了三个波形的自相关函数,自相关函数旁瓣最大值分别为 -18.91 dB 、

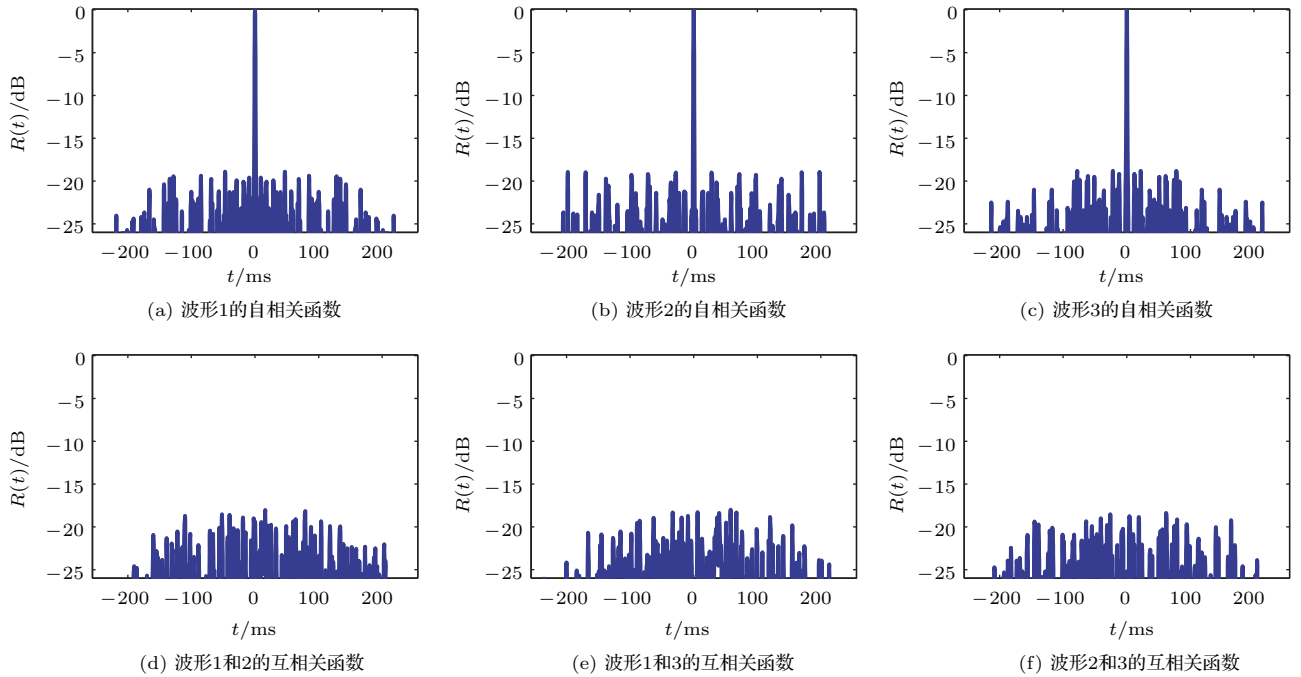


图4 优化所得正交波形的相关性能

Fig. 4 The autocorrelations and cross-correlations of the optimized orthogonal waveforms

-18.94 dB 和 -18.84 dB; 图 4(d)~4(f) 分别显示了三个波形的两两互相关函数, 互相关函数最大值分别为 -18.04 dB、-18.01 dB 和 -18.38 dB。图 4 中的自相关函数和互相关函数表明设计的三个波形既具有良好的自相关性能, 可降低声纳目标判决难度, 又具备良好的正交性能, 用于缓解多部声纳协同探测时的干扰。

由仿真结果可知, 与目前常用的声纳波形相比, 优化所得的 MSK 信号既具有 CW、LFM 等常规信号的包络恒定特性, 又具备编码调相信号良好的距离、速度分辨率和正交性能, 是一种性能优良的主动声纳探测波形。

5 结论

文章使用遗传算法优化伪随机编码, 为主动声纳设计了恒包络的 MSK 调制信号。设计所得信号不仅相位连续, 还具有较低的自相关旁瓣值和较高的距离、速度分辨率。通过优化 MSK 波形的自相关函数和互相关函数, 得到的波形具有良好的脉压性能和正交性能, 可以用于多部声纳协同探测, 缓解声纳间的同频干扰。遗传算法属于启发式随机搜索算法, 理论上能获得全局最优解, 但是容易陷入局部最优, 影响最终性能。为了提高 MSK 信号性能, 需要进一步优化遗传算法的各项参数, 或者选用性能更好的全局优化算法。

参 考 文 献

- [1] 朱堃. 主动声纳检测信息原理—上册: 主动声纳信号和系统分析基础[M]. 科学出版社, 北京, 2014.
- [2] DENG H. Synthesis of binary sequences with good autocorrelation and crosscorrelation properties by simulated annealing[J]. IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., 1996, 32(1): 98-107.
- [3] DENG H. Polyphase code design for orthogonal netted radar systems[J]. IEEE Trans. Signal Process., 2004, 52(11): 3126-3135.
- [4] 刘波, 何子述. 基于遗传算法的正交多相码设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2008, 22(2): 62-66.
LIU Bo, HE Zishu. Genetic algorithm based MIMO radar polyphase code design[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2008, 22(2): 62-66.
- [5] KHAN H A, ZHANG Y, JI C, et al. Optimizing polyphase sequences for orthogonal netted radar[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2006, 13(10): 589-592.
- [6] 胡亮兵, 刘宏伟, 吴顺君. 基于约束非线性规划的 MIMO 雷达正交波形设计[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(1): 64-68.
HU Liangbing, LIU Hongwei, WU Shunjun. Orthogonal waveform design for MIMO radar via constrained nonlinear programming[J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(1): 64-68.
- [7] 申东, 张林让, 刘昕, 等. 基于混沌序列的 MIMO 雷达正交多相码波形设计[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2011, 47(1): 100-105.
SHEN Dong, ZHANG Linrang, LIU Xin, et al. Polyphase orthogonal code waveform design based on chaotic sequences for MIMO radar[J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2011, 47(1): 100-105.
- [8] 刘大利, 刘云涛, 蔡惠智. 基于禁忌搜索的正交多相码波形设计[J]. 应用声学, 2012, 31(3): 209-214.
LIU Dali, LIU Yuntao, CAI Huizhi. Orthogonal polyphase code waveforms design using tabu search[J]. Applied Acoustics, 2012, 31(3): 209-214.
- [9] 黄中瑞, 牛朝阳, 张剑云. 基于序列锥规划的 MIMO 雷达正交连续相位编码波形设计[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(9): 2000-2009.
HUANG Zhongrui, NIU Chaoyang, ZHANG Jianyun. Design for orthogonal serial phase code waveform of MIMO radar based on sequential cone programming[J]. Systems Engineering and Electronics, 2015, 37(9): 2000-2009.
- [10] 王伟, 赵俊杰, 王辉. 基于混合算法的 MIMO 雷达正交多相码设计[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(2): 294-298.
WANG Wei, ZHAO Junjie, WANG Hui. Design of orthogonal polyphase code for MIMO radar based on hybrid algorithm[J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(2): 294-298.
- [11] 郑文秀. MSK 信号的参数估计[J]. 电路与系统学报, 2011, 16(2): 23-27.
ZHENG Wenxiu. Parameter estimation of MSK signals[J]. Journal of Circuits and Systems, 2011, 16(2): 23-27.