

文章编号: 2095-4980(2019)01-0074-05

正交混沌二相编码 OFDM 雷达信号

王嵩乔¹, 许蕴山¹, 郝志梅²

(1.空军工程大学 航空航天工程学院, 陕西 西安 710038; 2.北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘 要: 针对距离欺骗干扰对雷达探测性能的影响, 在波形设计中应尽量满足雷达发射信号的正交特性, 即雷达发射波形具有更低的互相关和自相关旁瓣。采用具有良好自相关特性的混沌二相编码正交频分复用(OFDM)雷达信号, 提出一种基于混沌粒子群算法的正交混沌二相编码 OFDM 雷达信号。以自相关和互相关联合最优作为适应值函数, 利用混沌粒子群算法优化设计正交编码脉冲串信号。仿真实验结果证明, 基于混沌粒子群优化的正交混沌二相编码 OFDM 雷达信号自相关旁瓣和互相关的最大值为-22.33 dB, 具有良好的相关特性, 对抗距离欺骗干扰有一定效果。

关键词: 正交波形; 混沌粒子群; 正交频分复用; 抗干扰

中图分类号: TN957

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201901.0074

Orthogonal chaotic binary phase coded OFDM radar signals

WANG Songqiao¹, XU Yunshan¹, HAO Zhimei²

(1.Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an Shaanxi 710038, China;

2.School of Electronics and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: For the influence of distance deception jamming on radar detection performance, the orthogonal characteristics of radar signals should be satisfied in waveform design, and radar waveforms should have lower cross-correlation and auto-correlation side-lobes. The chaotic binary-phase coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing(OFDM) radar signal with good autocorrelation characteristics is adopted, then an orthogonal chaotic binary phase coded OFDM radar signal based on chaotic particle swarm optimization is proposed. The joint optimization of auto-correlation and cross-correlation is used as fitness function, the orthogonal coded pulse sequence signals are designed by using chaotic particle swarm optimization. The simulation results show that the chaotic binary-phase coded OFDM radar based on chaotic particle swarm optimization has a good cross-correlation and auto-correlation side-lobes whose maximum value is -22.33 dB, and it has a certain effect on the anti-distance deception.

Keywords: orthogonal waveform; chaotic particle swarm optimization; Orthogonal Frequency Division Multiplexing; anti-jamming

距离欺骗干扰主要是敌方侦察机截获到雷达信号, 并附加时间延迟, 与回波信号一同发射, 使得接收机产生距离欺骗的效果^[1-2]。如果增大干扰能量, 可起到压制效果。而距离欺骗干扰对相位编码信号产生一定的影响^[3], 其中, 有效的解决办法就是利用波形捷变理论, 发射一组正交的脉冲串, 使得每个脉冲具有良好的自相关性及脉冲间具有良好的互相关特性。文献[4-6]研究相位编码特性和运用遗传算法来设计多组正交的发射波形, 验证正交波形在抗干扰方面的可行性。文献[7]主要分析在多输入多输出雷达中, 根据多输入多输出雷达的特性设计正交相位编码信号, 使得信号正交性更强, 抗干扰能力也大大提高。另外, 基于正交频分复用(OFDM)技术的雷达波形本身具有良好的相关特性, 在提高分辨率和抗干扰性能等方面具有一定的优越性^[8-11], 在波形设计中得到广泛关注。文献[12]将混沌序列引入 OFDM 信号, 设计一种混沌二相编码 OFDM 雷达信号, 得出该信号具有良好的相关特性, 信号灵活性和复杂性也可以产生抗干扰效果。文献[13]分析了混沌相位编码的抗干扰能力, 同时利用波形捷变理论, 对压制干扰和欺骗干扰都具有明显的效果。

本文在混沌二相编码 OFDM 雷达信号的基础上, 利用混沌粒子群算法优化混沌初值, 产生一组相互正交的

收稿日期: 2017-08-21; 修回日期: 2017-12-25

基金项目: 航空科学基金资助项目(20155596024; 2014ZC07002)

混沌编码序列,使每个脉冲具有正交关系,并分析该信号的正交性能以及抗距离欺骗干扰的效果。

1 正交混沌二相编码 OFDM 波形设计

单脉冲相位编码 OFDM 雷达信号表达式为:

$$s(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=1}^M w_n a_{n,m} \text{rect}[t - (m-1)t_b] \exp(j2\pi f_n t) \quad (1)$$

式中: N 为子载波个数; M 为码元个数; $f_n = f_c + (n-1)\Delta f$ 是第 n 个子载波的频率, f_c 为载波初始频率; t_b 为码元宽度,为了保证相位编码 OFDM 雷达信号各个载频间严格的正交性,选取 $\Delta f = \frac{1}{t_b}$; w_n 为各子载波的加权方式;

$a_{n,m}$ 为第 n 个子载波第 m 个码元的相位编码序列。

本文采用混沌二相编码方式,根据混沌映射产生一组混沌序列,将这些混沌序列一一映射到编码信号的相位中。假设混沌二相编码 OFDM 雷达信号子载波个数为 N ,码元数为 M 。给定混沌初值,生成一组长度为 $N \times M$ 的混沌序列,每个序列记为 x_k 。将混沌序列量化为二相编码:

$$a_{n,m} = \begin{cases} -1, & x_k \leq E \\ 1, & x_k > E \end{cases} \quad (2)$$

式中:

$$E = \frac{\sum_{k=1}^{N \times M} x_k}{N \times M} \quad (3)$$

根据上式二相量化规则,将混沌序列映射到每个码元中,生成混沌二相编码 OFDM 雷达信号。

为了使混沌二相编码 OFDM 雷达信号具有更强的抗欺骗干扰特性,需要保证该编码信号具有正交特性。因此,对混沌二相编码 OFDM 脉冲串信号进行设计。假设一共发射 L 个脉冲信号,为了使信号具有正交关系,研究信号的自相关和互相关性能。混沌二相编码 OFDM 雷达信号的自相关旁瓣峰值(Auto-correlation Sidelobe Peak, ASP)和互相关峰值(Cross-correlation Peak, CP)表达式为:

$$ASP(a_{n,m}^{(l)}, k) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^{M-|k|} a_{n,m}^{(l)} \cdot a_{n,m+|k|}^{(l)*}, \quad (k \neq 0, l=1, 2, \dots, L) \quad (4)$$

$$CP(a_{n,m}^{(l)}, a_{n,m}^{(q)}, k) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^{M-|k|} a_{n,m}^{(l)} \cdot a_{n,m+|k|}^{(q)*}, \quad (l \neq q, l=1, 2, \dots, L, q=1, 2, \dots, L) \quad (5)$$

使用混沌粒子群算法对混沌编码序列进行优化,降低混沌二相 OFDM 雷达信号相关性。

基本粒子群的迭代公式如下:

$$v(t+1) = wv(t) + c_1 \text{rand}(p_{\text{best}} - x(t)) + c_2 \text{rand}(g_{\text{best}} - x(t)) \quad (6)$$

式中: $v(t)$ 表示当前时刻粒子速度; c_1, c_2 为学习因子; w 为加权系数; p_{best} 和 g_{best} 分别表示个体最优值和整个种群的最优值。

$$x(t+1) = x(t) + v(t+1) \quad (7)$$

式中 $x(t)$ 表示当前时刻粒子位置。

由于基本粒子群存在早熟收敛,精确度较差等问题,因此,设计出混沌粒子群优化算法,其主要思想为:先利用混沌序列的随机性和遍历性进行初始化,在搜索过程中,当粒子陷入局部最优解时,以每次得到的最优解为基础产生一组新的混沌序列,选取所有混沌序列中最优值来替代原来的最优值,这样可以摆脱普通粒子群算法容易陷入局部最优等问题^[14]。

实际应用中,正交特性可以根据需要设定自相关和互相关所占有的比重。本文中,正交波形设计以同时满足自相关和互相关最低为基础,选取自相关和互相关最大值最小作为其适应值函数,数学表达式可以表示为:

$$\text{fitness} = \min \max \left\{ \max_{k \neq 0; l=1, 2, \dots, L} ASP(a_{n,m}^{(l)}, k), \max_{l=1, 2, \dots, L-1; q=l+1, l+2, \dots, L} CP(a_{n,m}^{(l)}, a_{n,m}^{(q)}, k) \right\} \quad (8)$$

其中优化目标为二相编码序列,可以转化为对混沌初值的优化,根据混沌粒子群算法选取 L 个混沌初值,使得适应值函数值最小。

基于混沌粒子群算法的正交混沌二相编码 OFDM 雷达信号的设计流程为：

- 1) 初始化, 用混沌映射产生一组长度为 L 的序列；
- 2) 将这组序列分别代入适应值函数, 选取使适应值函数最小的序列作为初始解；
- 3) 利用粒子群基本迭代公式, 改变粒子的位置和速度, 重新计算适应值函数, 得到当次迭代的最小适应值和相应的最优序列；
- 4) 以当次最(优)序列为基础, 利用混沌映射产生一组新的序列, 并计算所有新序列的适应值函数, 与步骤 3) 中的最优解比较, 如果优于步骤 3) 中的最优解, 则将其作为群体的最优解；
- 5) 达到最大迭代次数, 终止；否则继续执行步骤 3)。

2 仿真验证和性能分析

假设混沌二相编码 OFDM 雷达载波数 $N=8$, 码元数 $M=128$, 发射脉冲数 $L=3$, 码元宽度 $t_b=1\ \mu\text{s}$, 载频 $f_c=1\ \text{GHz}$, 以 Logistic 映射产生混沌二相编码序列, 采用布莱克曼窗加权方式。混沌粒子群算法中 $c_1=2, c_2=2, w=0.729$, 迭代次数为 30, 种群大小为 50。经过仿真可得, 当 3 个脉冲混沌初值分别为 0.58, 0.19 和 0.54 时, 适应值函数达到最小值。图 1 和图 2 分别为混沌二相编码 OFDM 雷达信号的自相关函数和互相关函数图, 可以得出该信号具有良好的相关特性, 其自相关旁瓣和互相关最大值为 $-22.33\ \text{dB}$, 表明基于混沌粒子群优化的混沌二相编码 OFDM 雷达信号具有正交特性。

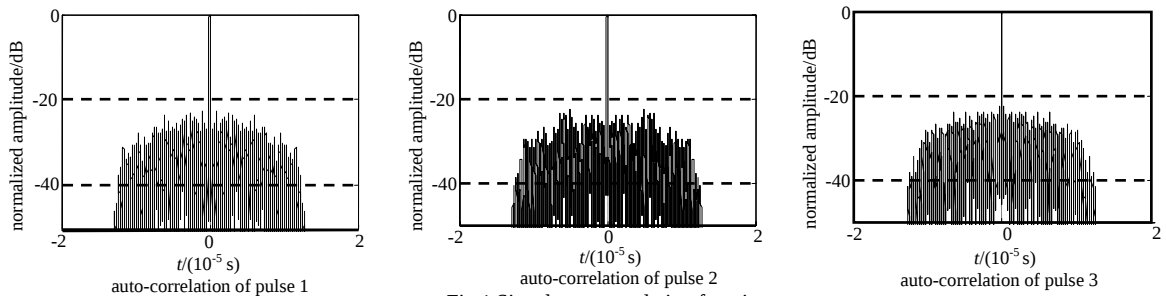


Fig.1 Signal auto-correlation functions

图 1 信号自相关函数

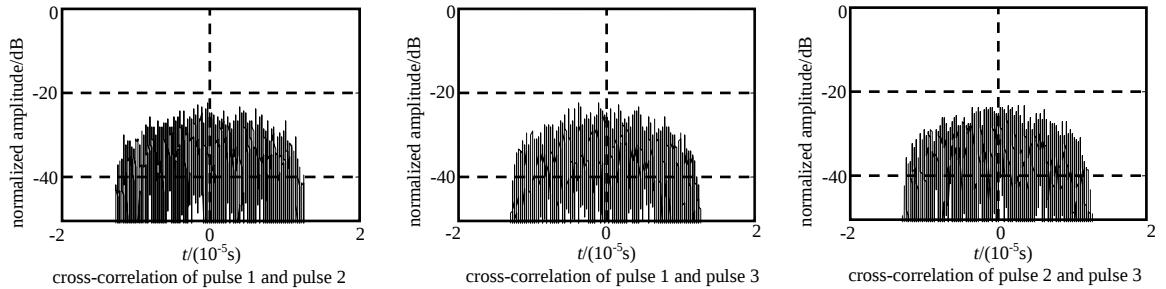


Fig.2 Signal cross-correlation functions

图 2 信号互相关函数

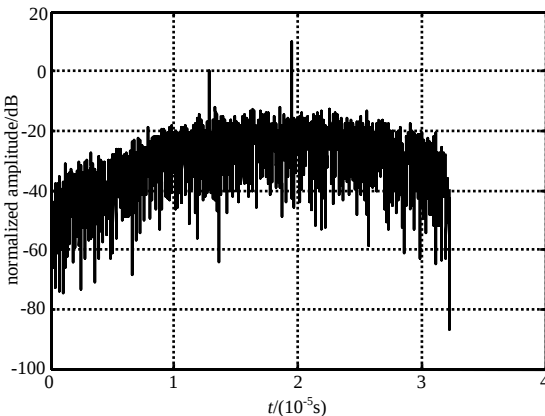


Fig.3 Pulse signals with the same chaotic initial value

图 3 混沌初值相同脉冲信号

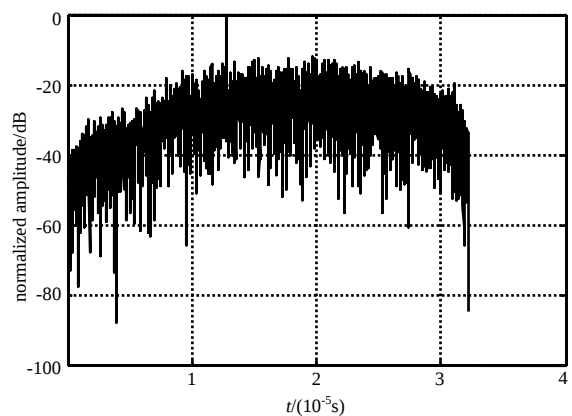


Fig.4 Pulse signals with different chaotic initial values

图 4 混沌初值不同脉冲信号

根据距离欺骗干扰的特性,利用波形捷变的理论进行分析、研究该信号的抗距离欺骗干扰效果。在信号参数不变条件下,以第一个和第二个脉冲为例,验证信号的抗距离欺骗干扰能力。假设干扰机截获第一个脉冲,经过处理,在第二个脉冲周期内发射,设置假目标距离为 1 km,信干比为-10 dB。图 3 和图 4 分别为选取相同混沌初值的二相编码 OFDM 脉冲串和正交混沌二相编码 OFDM 脉冲串在距离欺骗干扰下的脉冲压缩效果图。可以看出,混沌初值相同的二相编码 OFDM 信号受到干扰的影响,无法检测到目标,而混沌初值不同的正交二相编码 OFDM 信号脉压最大旁瓣为-12.38 dB,可以有效检测到目标。因此,基于混沌粒子群算法的正交混沌二相编码 OFDM 雷达信号具有抗距离欺骗干扰特性。

3 结论

本文针对距离欺骗干扰提出一种抗干扰雷达信号,在混沌二相编码 OFDM 雷达信号基础上,用混沌粒子群算法以自相关和互相关最小为适应值函数,设计出一种基于混沌粒子群算法的混沌二相编码 OFDM 雷达信号。对该信号的正交性和抗距离欺骗干扰特性进行验证分析,仿真验证可得,基于混沌粒子群算法混沌二相编码 OFDM 雷达信号具有良好的自相关和互相关特性,在抗距离欺骗干扰时具有较好的效果。

参考文献:

- [1] 鲍大祥. 雷达干扰分类判别方法研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2015. (BAO Daxiang. A study of radar jamming type discrimination[D]. Xi'an, China: Xidian University, 2015.)
- [2] OLIVIER K, CILLIERS J E, DU-PLESSIS M. Design and performance of wideband DRFM for radar test and evaluation[J]. Electronics Letters, 2011, 47(14): 824-825.
- [3] 张新相, 吴铁平, 陈天麒. 随机信号雷达抗干扰性能分析[J]. 电波科学学报, 2008, 23(1): 189-194. (ZHANG Xinxiang, WU Tieping, CHEN Tianqi. ECCM capabilities of random signal radar[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2008, 23(1): 189-194.)
- [4] 黎薇萍, 陶海红, 廖桂生, 等. 抗干扰多波形优化设计技术[J]. 电波科学学报, 2010, 25(5): 940-946. (LI Weiping, TAO Haihong, LIAO Guisheng. Anti-jamming multi-waveform optimization design technology[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2010, 25(5): 940-946.)
- [5] 林厚宏. 基于波形捷变的雷达抗干扰技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016. (LIN Houhong. Research on radar anti jamming technology based on waveform agility[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.)
- [6] DENG H. Poly-phase code design for orthogonal netted radar system[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2004, 52(11): 3126-3135.
- [7] 张田仓. MIMO 雷达正交连续相位编码波形研究[J]. 现代导航, 2016, 8(4): 299-304. (ZHANG Tiancang. Research on orthogonal serial phase-code waveform of MIMO radar[J]. Modern Navigation, 2016, 8(4): 299-304.)
- [8] 张民, 刘海鹏, 蔡兆晖. 基于组合窗的 OFDM-NLFM 信号设计[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(2): 287-292. (ZHANG Min, LIU Haipeng, CAI Zhaohui. Design of OFDM-NLFM signal based on combined windows[J]. Systems Engineering and Electronics, 2016, 38(2): 287-292.)
- [9] 顾陈, 张劲东, 朱晓华. 基于 OFDM 的多载波调制雷达系统信号处理及检测[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(6): 1298-1300. (GU Chen, ZHANG Jindong, ZHU Xiaohua. Signal processing and detecting for multicarrier modulated radar system based on OFDM[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(6): 1298-1300.)
- [10] 霍凯, 赵晶晶. OFDM 新体制雷达研究现状与发展趋势[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(11): 2776-2789. (HUO Kai, ZHAO Jingjing. The development and prospect of the new OFDM radar[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(11): 2776-2789.)
- [11] 陈欢. OFDM 雷达信号性能分析与优化[D]. 重庆: 重庆大学, 2015. (CHEN Huan. Analysis and optimization of the performance of OFDM radar signal[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2015.)
- [12] 黄琼丹, 李勇, 付银娟. 多载频类随机相位编码雷达信号设计与特性分析[J]. 西北工业大学学报, 2013, 31(6): 947-951. (HUANG Qiongdan, LI Yong, FU Yinjuan. Design and characteristic analysis of multi-carrier random phase coded radar signal[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2013, 31(6): 947-951.)
- [13] 郑明峰. 相位编码 OFDM 雷达关键技术的仿真实现及抗干扰性能研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016. (ZHENG Mingfeng. Research on key techniques and anti-jamming performance and implementation of simulation software system for phase coded OFDM radar[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.)

- [14] 唐美芹,马锴,魏新江,等. 一种基于混沌粒子群优化的 OFDM 系统资源分配算法[J]. 控制与决策, 2012,27(7):1096-1100.
(TANG Meiqin, MA Kai, WEI Xinjiang, et al. OFDM resource allocation algorithm based on chaos particle swarm optimization[J]. Control and Decision, 2012,27(7):1096-1100.)

作者简介:



王嵩乔(1993-), 男, 辽宁省营口市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为雷达信号、信息处理.email:595182404@qq.com.

许蕴山(1968-), 男, 河北省正定县人, 教授, 主要研究方向为雷达信号与信息处理.

郝志梅(1979-), 女, 山东省蓬莱市人, 博士研究生, 主要研究方向为低截获与抗干扰技术.

第三届全国复杂电磁环境技术及应用学术会议 第二轮通知

为加强我国复杂电磁环境研究领域学术交流, 拓展科研人员研究视野, 活跃学术氛围, 推动我国复杂电磁环境及相关技术的发展, 拟定于2019年4月9日至12日举办第三届全国复杂电磁环境技术及应用学术会议, 特邀请贵单位积极组织参与, 踊跃投稿。现将有关事项通知如下。

一、时间和地点 时 间: 2019年4月9日至12日 (4月9日报到) 地 点: 河南·洛阳 (洛阳大酒店)

表1 会议日程简表

时间	会议日程安排
4月9日	代表报到
4月10日(上午)	开幕式、合影、大会特邀报告
4月10日(下午)	大会特邀报告、参观实验室
4月11日	分组报告、评选优秀论文、闭幕式
4月12日	自由交流, 代表返程

具体日程安排、特邀报告信息将在会议网站和微信公众号上陆续更新, 敬请关注。

二、主办单位

中国兵工学会复杂辐射场技术及应用专业委员会

电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室

中物院复杂电磁环境科学与技术重点实验室

电磁环境效应国家级重点实验室

电磁兼容性国家级重点实验室

电子测试技术重点实验室

三、承办单位

高功率微波技术重点实验室

中国电子科技集团公司第四十一研究所

《强激光与粒子束》编辑部

四、协办单位

合肥博雷电气有限公司 苏州泰思特电子科技有限公司

五、支持刊物

《强激光与粒子束》 《太赫兹科学与电子信息学报》

《现代应用物理》 《电子对抗》

《航天电子对抗》 《通信对抗》

更多详情登录网站: <http://www.iaeej.com>