基于遗传算法的正交多相码产生技术研究

万莎莎[1]　蒋碧颖[2]
（1. 河海大学 计算机与信息学院 南京 211100；2. 中国电子科技集团公司第二十八研究所 南京 210007）

摘　要：正交信号设计是MIMO背景下的雷达信号产生的关键技术之一，为了降低正交多相码设计的复杂度，提高雷达的相关性能，本文采用了一种基于遗传算法的正交多相码设计方法。该方法利用Hadamard矩阵的严格正交性，首先构造一类Hadamard矩阵，从中选取初始码序列；然后把“和函数”作为代价函数，采用遗传算法求解出近似最优的信号组。整个实验通过MATLAB仿真实现。仿真结果表明，该方法在保证低自相关旁瓣量和低互相关量的同时，能够保证设计出的信号符合严格正交性。

关键词：MIMO；正交多相码；Hadamard矩阵；遗传算法；MATLAB
中图分类号：TN957.3　　**文献标识码**：A　　**国家标准学科分类代码**：510.70

Research on orthogonal polyphase code generation technology based on genetic algorithm

Wan Shasha[1]　Jiang Biying[2]
（1. College of Computer and Information, Hohai University, Nanjing 211100, China;
2. The 28th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210007, China）

Abstract: The orthogonal signal design is one of the key technologies in the radar signal generation technology under the background of MIMO. In order to reduce the complexity of design and improve the performance of radar, a new method based on genetic algorithm is adopted. The method utilizes the strict orthogonality of Hadamard matrix. Firstly, a kind of Hadamard matrix is constructed, and the initial code sequence is selected. Then, the “and signal” is used as the cost function, and the genetic algorithm is used to solve the approximate optimal signal set. The algorithm is implemented by Matlab. The simulation results show that the method can ensure the low autocorrelation sidelobe and low cross-correlation sidelobe, at the same time, it can ensure the signal designed to meet the strict orthogonality.

Keywords: MIMO; orthogonal polyphase code; Hadamard matrix; genetic algorithm; MATLAB

1　引　言

基于MIMO的雷达信号产生技术的研究由来已久，美军于1999年就开始了相关的研究，并在之后进行了广泛应用[1]，而其中的正交波形的设计是其核心技术之一。常见的正交波形有正交离散频率编码信号[2]、正交多相编码信号、正交频分复用-线性调频信号[3]。

在对正交多相码进行设计时，利用传统的遗传算法进行优化，很容易导致局部最优解，因此本文提出了一种基于Hadamard矩阵的正交多相码设计方法，可以有效地在整个搜索域内快速得到近似最优解。

本设计方案在保证信号间严格正交的同时，还保证了较低的自相关旁瓣量和互相关旁瓣量[4]，提高了雷达的检测性能和杂波对消效果。

收稿日期：2016-12

2　正交相位编码信号原理

假设MIMO雷达发射天线为L个，每根天线上信号的相位长度为N，那么这个信号组就可以表示为[5]：

$$s_l(t)=e^{j\phi i(n)}\quad n=1,2,\cdots,N;l=1,2,\cdots,L \tag{1}$$

若相位数为M个，那么，

$$\varnothing_1(n)\in\left\{0,\frac{2\pi}{M},2\frac{2\pi}{M},\cdots,(M-1)\frac{2\pi}{M}\right\}=\{\psi_1,\psi_2,\cdots,\psi_M\} \tag{2}$$

因此，整个码组信号相位的矩阵就可以表示为：

$$\boldsymbol{S}(L,N,M)=\begin{bmatrix}\varnothing_1(1) & \varnothing_1(2) & \cdots & \varnothing 1(N)\\ \varnothing_2(1) & \varnothing_2(2) & \cdots & \varnothing_1(N)\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ \varnothing_L(1) & \varnothing_L(2) & \cdots & \varnothing_L(N)\end{bmatrix} \tag{3}$$

根据以上提到的正交码组设计的思想，码组的自相关和互相关特性应满足下面的公式：

$$A(\varnothing_l,k)=\begin{cases}\dfrac{1}{N}\sum\limits_{n=1}^{N-k}e^{j(\varnothing_l(n)-\varnothing_l(n+k))}=0,0\leqslant k<N\\ \dfrac{1}{N}\sum\limits_{n=-k+1}^{N}e^{j(\varnothing_l(n)-\varnothing_l(n+k))}=0,-N<k<0\end{cases}$$

$$l=1,2,\cdots,L \tag{4}$$

$$C(\varnothing_p,\varnothing_q,k)=\begin{cases}\dfrac{1}{N}\sum\limits_{n=1}^{N-k}e^{j(\varnothing_q(n)-\varnothing_p(n+k))}=0,0\leqslant k<N\\ \dfrac{1}{N}\sum\limits_{n=-k+1}^{N}e^{(\varnothing_q(n)-\varnothing_p(n+k))}=0,-N<k<0\end{cases}$$

$$p\neq q,p,q=1,2,\cdots,L \tag{5}$$

因此，只要能求出满足式(4)、(5)的信号组，就可以得到前面所要的相位矩阵。但是当 L 很大时，直接求出满足上面要求的信号组是几乎不可能的，因此可以将式(4)、(5)转化为求自相关和互相关值和的最小值，也就是求出“和函数”[6]的最小值，它的表达式如式(6)所示。

$$E=\sum_{l=1}^{L}\max_{k\neq 0}|A(\varnothing_l,k)|+$$

$$\sum_{p=1}^{L-1}\sum_{q=p+1}^{l}\max_{k}|C(\varnothing_p,\varnothing_q,k)| \tag{6}$$

对于给定的 L、M、N，根据这个“和函数”，就可以得到满足本文设计要求的正交多相码。

3 基于 Hadamard 矩阵的正交多相码矩阵设计

Hadamard 矩阵是一个以 1 和 −1 为元素构成的方阵，简称 H-矩阵[7]。H-矩阵的任意两行的实内积为零，也就是说行与行之间是正交的。同时，H-矩阵有这样一个性质，H-矩阵的阶数为 m，m=1,2 或(mod4)。证明如下：

当 m=1,2 时，H-矩阵分别为式(1)和$\begin{pmatrix}1&1\\1&-1\end{pmatrix}$，显然符合 H-矩阵的要求，当 m≥3 时，若 $\boldsymbol{H}=(h_{ij})$为一个 m 阶 H-矩阵，那么有：

$$\sum_{j=L}^{m}(h_{1j}+h_{2j})(h_{1j}+h_{2j})=\sum_{j=1}^{m}h_{1j}^2=m \tag{7}$$

在式(7)中，根据 H-矩阵的性质，有 $h_{1j}+h_{2j}=\pm 2.0$，$h_{1j}+h_{3j}=\pm 2.0$，式(7)中左边的和式中每项都是 4 的倍数，因此 m 一定是 4 的倍数。

至于 H-矩阵的构造方法，文献[8]中详细介绍了几种构造方法，此处不再详细介绍。因此，我们可以产生符合上述条件的任意长度的 H-矩阵，在该矩阵中，若令 1 和 −1 分别对应相位 π 和 0，根据 H-矩阵的性质，那么通过这种方法产生的矩阵码组满足正交二相码的条件。但是本文要得到的是正交多相码，因此需要对该矩阵进行一定的操作，从而实现相位的拓展。以正交四相码为例构造的类 H-矩阵的形式为：

$$\boldsymbol{C}=\begin{pmatrix}\boldsymbol{H}&\mathrm{j}\boldsymbol{H}\\-\mathrm{j}\boldsymbol{H}&\boldsymbol{H}\end{pmatrix} \tag{8}$$

式(8)中矩阵 $\boldsymbol{H}$ 为一个 N 阶的 H-矩阵，通过上述过程构造出了 $2N$ 阶的矩阵 $\boldsymbol{C}$，通过简单的证明可以得知矩阵 $\boldsymbol{C}$ 也是一个正交矩阵，此处不再证明。以此类推，我们可以得到相的类 H-矩阵，并且由于 H-矩阵可以基于 4 的倍数无限制的扩展，本文设计出的正交多相码的长度也可以无限制的扩展。虽然相位数的增加能够提升相位自由度，改善多相码的自相关和互相关特性，但是，相位数的增加也会大大提高复杂度，因此，本文采用正交四相码进行研究。

设计出来的类 H-矩阵虽然保证了信号间的严格正交性，但并没有考虑它的相关旁瓣量的影响，因此为了得到低相关旁瓣量的信号组，我们要在类 H-矩阵形成的空间域上，利用遗传算法进行优化选择。

4 遗传算法优化过程

遗传算法[9-10]是模拟自然界中生物的遗传和进化过程而形成的一种算法，它是一种自适应的全局优化概率搜索算法。它通过遗传算子来产生新的个体，主要操作有选择、交叉及变异。它的基本流程为：首先对所要解决的问题进行编码形成种群，然后以种群中的个体为对象，对这些对象进行反复的迭代计算，然后通过对这些个体进行代价函数的计算进行适应度的评估，然后进行选择、交叉、变异来产生新的个体，一直进行循环，直到满足条件为止，适用于解决复杂的非线性多目标优化问题。因此本文采用遗传算法来进行正交多相码的设计，其算法流程如下。

1)生成类 H-矩阵 $\boldsymbol{C}$ 作为初始严格正交空间的一组值，然后产生初始种群，即对设置好种群大小的每个个体的染色体进行编码。根据正交矩阵的性质，列变换不会影响矩阵的正交性，因此，可以将类 H-矩阵进行列变换而形成的编码空间，作为遗传算法的搜索域。每个染色体的编码由两部分组成：(1)对初始矩阵空间进行列重排的结果，在 MATLAB 中可以用 randperm()来实现；(2)编码为对进行列重排后的矩阵随机进行行抽取。例如需要编码长度 N=16，信号的长度 L=4 的信号组，染色体编码形式如下：

$$\underbrace{15,13,8,9,1,11,2,7,6,14,5,3,4,10,16,12}_{s}\ \underbrace{8,7,6,3}_{q}$$

编码的含义：个体中的前 N 个编码为将初始矩阵按照 15, 13, 8, 9, 1, 11, 2, 7, 6, 14, 5, 3, 4, 10, 16, 12 的顺序进行列重排，形成新的矩阵。个体中的后 Q 个编码的含义为将进行列重排后的矩阵的第 8,7,6,3 行，去进行下一步的适应度值的计算。通过这种方法，可以大大地减少计算量，加快搜索速度。

2)适应度值的计算。适应度值的计算即为式(6)的“和函数”，每次计算都只计算步骤 1)中抽取的 Q 行进行计算。

3)遗传算法的算子操作设计。

(1)选择算子，选择算子是从当前的群体中选出适应度高的个体，使其有机会作为父代来产生新的个体。本文

的选择算子选取经典的赌轮盘算法。

(2)交叉算子,交叉操作是遗传算法中核心的部分,通过该算子可以得到新一代个体,新个体继承了父代的优良的基因。通常是按照某种方式将群体内的个体两两搭配成对,然后以某个概率交换它们的部分染色体。下面是交叉算子的具体流程:①设 $P1$ 和 $P2$ 是配成对的两个父代个体,要交配的基因个数为随机产生的的 1～N 间的 A 个随机数;②对于父代染色体 $P1$ 和 $P2$,将染色体中的 A 个基因均用－1 代替,同时将这 A 个基因填入子代染色体 $C1$ 和 $C2$ 相应的位置中,其余位置全为 0;③将 $P1$($P2$)中不为－1 的基因从左到右扫描,依次填入 $C2$($C1$)中为 0 的位置上。

假设 $P1=[1,2,3,5,4,8,9,6,7]$,$P2=[2,5,8,4,9,1,6,3,7]$,若要交换的基因为(2,5),那么,执行过程如下:

$P1=[1,-1,3,-1,4,8,9,6,7]$,

$P2=[-1,-1,8,4,9,1,6,3,7]$;

$C1=[0,2,0,5,0,0,0,0,0]$,

$C2=[2,5,0,0,0,0,0,0,0]$;

则交叉结果为:$P1=[8,2,4,5,9,1,6,3,7]$,$P2=[2,5,1,3,4,8,9,6,7]$。

(3)变异算子,变异算子是以一定的概率改变种群中的某一个个体的部分基因,变异发生的概率很低。对于本文中的变异算子,分为两部分:①对于父代个体 P,从前半部分的 N 个基因中随机产生 B 个基因,对这 B 个基因从左到右进行扫描,找到这 B 个基因,并将其所在的位置进行循环位移。②对于父代个体的第二部分,用随机产生 1～N 中的 Q 个数代替就可以了。

假设 $P=[1,2,3,5,4,8,9,6,7]$,要进行变异的基因为(2,5,8),将其循环位移后变为(8,2,5),那么变异后的个体变为 $P=[1,8,3,2,4,5,9,6,7]$。

4)终止条件判断,设置遗传次数 T,若 $t \leqslant T$,则转移到第一步继续运算,否则,则以进化过程中所得到的具有最大适应度值的个体作为最优解输出。

5 正交多相码仿真结果

设置编码长度为 $N=40$,信号个数 L 选择为 4,相位个数选择为 4 相,最大遗传代数设置为 60,用 MATLAB 对正交四相码的生成过程进行仿真。所需要的遗传的最大适应度值的变化如图 1 所示。

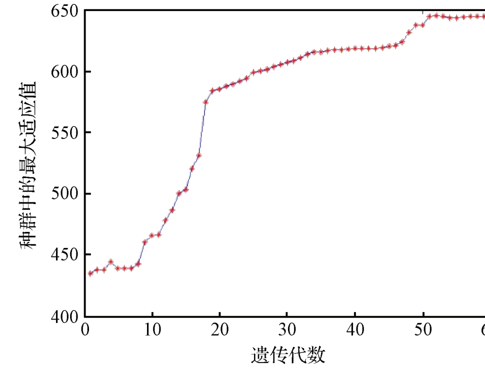

图 1 遗传的最大适应度值

从图 1 可以看出,随着遗传代数的增大,适应度的值也一直在增大,最后趋于稳定值,说明在到达接近 60 代时,所得到的最优解趋于最大值,满足了我们的要求。将所得到的染色体对 40×40 的类 H-矩阵进行列重排,并取出相关性能最好的 4 行,分析他们的性能如下:设计出的正交四相码序列自相关性整体图如图2所示,互相关性整体图如图 3 所示。

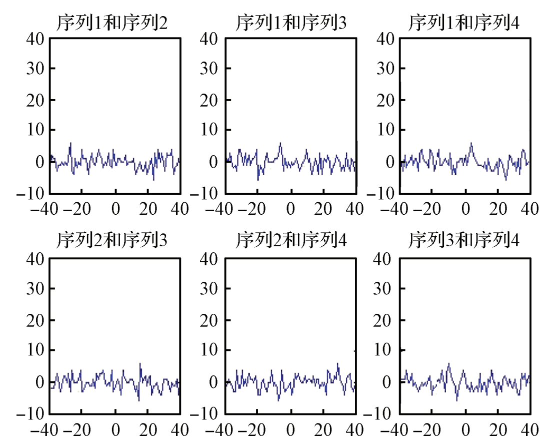

图 2 序列的自相关性

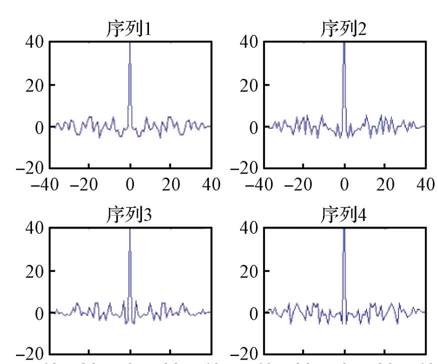

图 3 序列的互相关性

从图 2 可以看出,序列的自相关旁瓣值很低,可以使雷达获得更高的距离分辨率。从图 3 可以看出,每个序列间的互相关值很小,并且位于零点的互相关值为 0,可以使得信号的抗截获性能更高,且更容易检测出弱目标和降低了虚假目标出现的概率。并且由于设计出来的信号组由 H-矩阵构造,满足严格正交性,使得信号在角度测量精度和杂波对消效果上得到了很大提升。

(下转第 48 页)