

基于遗传算法搜索低旁瓣最大长度序列*

何飞¹, 刘肃¹, 张立军², 鲁辉², 郑占旗², 廖先华¹

(1. 兰州大学物理科学与技术学院, 兰州 730000; 2. 中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

摘要: 最大长度序列通过线性反馈移位寄存器产生, 广泛应用于脉冲压缩雷达中。针对不同反馈连接产生序列的非周期自相关函数旁瓣特性不同, 而目前尚无有效办法寻找具有低旁瓣特性的最大长度序列, 利用遗传算法搜索线性反馈移位寄存器的最佳反馈连接, 该反馈连接产生最大长度序列非周期自相关函数特性非常好。通过 MATLAB 仿真了遗传算法搜索过程、最大长度序列非周期自相关函数, 给出了 4~15 级线性反馈移位寄存器反馈连接表, 并对最大长度序列非周期自相关函数进行加窗处理, 获得了更好的旁瓣抑制效果。

关键词: 最大长度序列; 自相关函数; 线性反馈移位寄存器; 遗传算法; 脉冲压缩

中图分类号: TN957 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)10-3629-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.10.007

Searching low sidelobes maximal length sequence based on genetic algorithm

HE Fei¹, LIU Su¹, ZHANG Li-jun², LU Hui², ZHENG Zhan-qi², LIAO Xian-hua¹

(1. College of Physical Science & Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. Institute of Microelectronics, The Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China)

Abstract: Maximal length sequences that generated by linear feedback shift register, widely used in pulse compression radar. For sequences of different feedback have different sidelobe characteristics of aperiodic autocorrelation function, currently, there is no effective way to find the maximum length sequence with a low sidelobe characteristics. This paper searched the best feedback of linear feedback shift register. The aperiodic autocorrelation function characteristics of maximal length sequence were very good generated by this feedback. It used MATLAB to simulate the search process of genetic algorithm, aperiodic autocorrelation function of maximal length sequence, gave 4~15 feedback table of linear feedback shift register. And it used windowing in aperiodic autocorrelation function of maximal length sequence, obtained a lower side-lobe level.

Key words: maximal-length sequence (MLS); autocorrelation function (ACF); linear feedback shift register (LFSR); genetic algorithm (GA); pulse compression

最大长度序列 (MLS) 是伪随机序列的一种, 具有理想的自相关函数 (ACF)。它可以通过线性反馈移位寄存器 (LFSR) 获得, 广泛应用于脉冲压缩雷达当中^[1~3]。

对于脉冲雷达, 当输出完一个完整的序列后, 需要截断寄存器输出, 因此需要非周期 ACF 特性更好的 MLS。剑桥大学的 Peterson 等人给出了产生 MLS 的 LFSR 反馈连接表^[4,5]。而这些反馈连接产生的 MLS 非周期 ACF 的旁瓣峰值电平 (peak-sidelobe level, PSL) 并不是最低的。

2009 年, 印度国家技术研究所的 Sahoo 等人^[6]利用遗传算法 (GA) 搜索了最佳脉压编码, 编码长度为 49~100, 主要用于通信。本文利用 GA 搜索非周期 ACF 特性更好的 MLS, 并给出了 4~15 级 LFSR 的反馈连接表, 主要应用于脉冲压缩雷达中。

1 最大长度序列概述

MLS 是 LFSR 所能产生的最长序列, 具有理想的 ACF。图

1 为给出的 n 级 LFSR 示意图。

如果选择适当的反馈连接, 就能输出最长序列, 它就是在序列重复之前所能形成的最长 0、1 序列。 n 级移位寄存器能够产生的最长序列的长度为

$$N = 2^n - 1 \quad (1)$$

可以获得的最长序列的总数为

$$M = \frac{N}{n} \prod_i \left(1 - \frac{1}{p_i}\right) \quad (2)$$

其中: p_i 是 N 的素因数。 n 级 LFSR 存在许多不同的反馈连接, 同时能够产生不同的 MLS, 这些序列的周期 ACF 完全相同, 但非周期 ACF 却不相同。因此需要根据用途产生符合要求的 MLS。而脉冲压缩雷达需要 MLS 非周期 ACF 特性好。描述 ACF 特性的一个重要参数是 PSL。MLS 的 ACF 主瓣峰值电平均为 N , 因此 PSL 越小 MLS 的 ACF 特性就越好。

收稿日期: 2012-03-23; 修回日期: 2012-04-15 基金项目: 国家“973”计划资助项目 (2010CB327506)

作者简介: 何飞 (1986-), 男, 宁夏银川人, 硕士研究生, 主要研究方向为雷达信号处理 (hefei@ime.ac.cn); 刘肃 (1953-), 男, 教授, 博导, 副院长, 中国电子学会半导体与集成技术分会委员, 中国物理学会表面与界面物理专业委员会委员, 中国电子学会高级会员, 甘肃物理学会常务理事, 中国高校实验物理教学研究会理事, 主要研究方向为半导体器件与集成电路、静电感应器件为主的电力电子器件、宽禁带半导体薄膜材料及器件、有机发光器件及薄膜光伏电池等; 张立军 (1963-), 男, 研究员, 博导, 主要研究方向为微波大功率及固态功率技术、微电子技术、微波高频段与毫米波段准光与空间功率合成等; 鲁辉 (1981-), 男, 河南商丘人, 助理研究员, 博士, 主要研究方向为雷达系统、信号处理; 郑占旗 (1982-), 男, 河南郑州人, 助理研究员, 硕士, 主要研究方向为微波器件与模块; 廖先华 (1983-), 男, 四川宜宾人, 硕士研究生, 主要研究方向为雷达系统、信号处理。

2 遗传算法概述

通过以上对 MLS 的介绍可知, n 阶 LFSR 的每一种反馈连接, 产生的序列长度都有可能不同, 究竟哪种反馈连接是最佳连接, 则是一个寻优过程。GA 是寻优的有力工具。它是借鉴生物界自然选择和群体进化机制形成的一种全局寻优算法。与传统的优化算法相比, GA 具有如下优点^[7]:

- a) 不是从单个点, 而是从多个点构成的群体开始搜索。
- b) 在搜索最优解过程中, 只需要目标函数值转换成问题空间的决策变量, 并求得个体的适应值。
- c) 搜索过程不易陷入局部最优解。

目前该算法已渗透到许多领域, 并解决了各领域很多的复杂问题。

GA 寻优的大致思路是: 将问题空间的决策变量通过一定编码方法表示成遗传空间的一个个体, 它是一个基因型串结构数据; 同时, 将目标函数值转换成适应值, 用它来评价个体的优劣, 并作为遗传操作的依据。遗传操作包括选择、交叉和变异三个算子。用适者生存的原则选出适应值好的个体, 淘汰差的个体。选出来的个体参与交叉和变异, 产生适应性更好的子代, 然后循环操作选择、交叉、变异, 从而搜索出适应值最好的个体。GA 的基本步骤如下^[8]:

- a) 在一定编码方案下, 随机产生一个初始种群。
- b) 用相应的解码方法, 将编码后的个体转换成问题空间的决策变量, 并求得个体的适应值。
- c) 按照个体适应值的大小, 从种群中选出适应值较大的一些个体构成交配池。
- d) 由交叉和变异这两个遗传算子对交配池中的个体进行操作, 并形成新一代的种群。
- e) 反复执行步骤 b) ~ d), 直到满足收敛判据为止。

GA 采用的收敛判据为规定遗传代数、连续几次得到的最优个体的适应值没有变化或变化很小等。使用 GA 需要决定的运行参数有编码串长度、种群大小、交叉和变异概率。

3 最大长度序列求解方法及非周期自相关函数特性分析

3.1 求解最大长度序列的方法

以上分别介绍了 MLS 和 GA 的特点。因此, 将两者结合起来建模, 就能找到产生 MLS 的 LFSR 的最佳反馈连接方案。目标函数可以定为 MLS 的非周期 ACF。适应值则是非周期 ACF 的主瓣峰值与 PSL 之比。选出最大适应值, 它就对应了最佳的 MLS。

下面详细介绍利用 GA 求解 MLS 方法:

a) 编码。GA 不对优化问题的实际决策变量进行操作, 而是通过编码将决策变量表示成串结构数据。考虑到本文求解的方便性, 采用二进制编码方案。 n 级 LFSR 反馈函数可以写为^[9]

$$f(x) = C_0 + C_1x + C_2x^2 + \cdots + C_nx^n = \sum_{i=0}^n C_i x^i \quad (3)$$

$$C_0 = C_n = 1$$

式(3)也称为 MLS 的特征多项式, 式中的加法为模二相加。 C_i 可以取 0 或 1, 取 0 表示断开, 即无反馈; 取 1 表示闭合, 即有反馈。假设 5 级 LFSR, 5, 2 级存在反馈, 则特征多项式可以写为

$$f(x) = 1 + x^2 + x^5 \quad (4)$$

用向量可以表示为

$$[C_1, C_2, C_3, C_4, C_5] = [0, 1, 0, 0, 1] \quad (5)$$

由此可知, 要求解 n 级 LFSR 的最佳反馈, 就需要用 n 位二进制数进行编码。共有 2^n 种编码方案, 随机选取一定数量的编码方案作为遗传算法的初始种群。

b) 解码。解码的过程就是将二进制数转换成要求解的变量, 然后求解该变量的适应值。在本文中, 不需要解码, 但需要求解初始种群中个体适应值, 即由第一步随机产生特征多项式的形式, 求出它们产生的序列, 然后进一步求解出该序列的非周期 ACF, 找出非周期 ACF 的最大值(主瓣峰值)和第二个最大值(PSL)。这两个最大值的比值即为适应值。

c) 选择。选择就是按照适者生存原则, 选出最佳个体(对应最大适应值), 同时丢弃最差个体(对应最小适应值), 处在中间的个体参与轮盘赌选择。本文抛弃标准 GA 采用的轮盘赌选择, 而对所有个体按适应值从小到大进行排序, 复制最大适应值对应的个体取代排在前 5 位的个体, 同时保存最佳个体, 直接进入下一代(不参加步骤 d) e))。这样做的好处是, 保证了种群品质的不断提高; 另外, 当父代具有优良品质时, 通过交叉和变异, 有可能使得其子代具有更加良好的适应值; 同时, 也加快了 GA 的收敛速度。

d) 交叉。交叉是产生新个体的主要方法, 它决定了 GA 的全局搜索能力。交叉是按照一定的概率选取某个节点作为交叉起点。由于子代继承了父代优良基因, 因而能够具有更好的适应性。本文采用单点交叉, 其方法如图 2 所示。

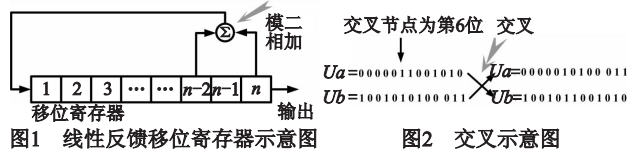


图1 线性反馈移位寄存器示意图

图2 交叉示意图

e) 变异。变异提高了对局部的搜索能力。变异的操作如图 3 所示。然后循环步骤 b) ~ e)。本文采用的收敛判据为规定遗传代数, 即搜索到规定遗传代数时, 停止。

图 4 是用 MATLAB 仿真对长度为 11 级 LFSR 反馈连接搜索情况。仿真参数为 $\min_var = 0$; $\max_var = 2^{11}$; $\text{popsize} = 50$; $p_c = 0.99$; $p_m = 0.1$; $T = 30$ 。其中 $\min_var$ 为最小搜索范围, $\max_var$ 为最大搜索范围, popsize 为选取的种群大小, p_c 为交叉概率, p_m 为变异概率。

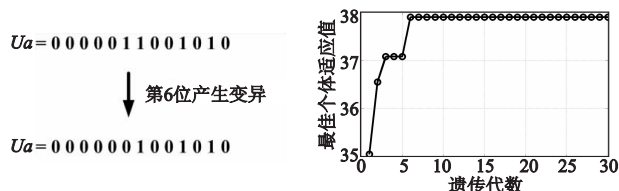


图3 变异示意图

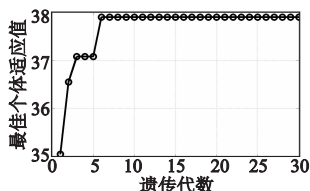


图4 最佳个体适应值增长情况

通过图 4 可以看出, 第六代就已经收敛。经计算, 选择出来的最佳个体适应值为 37.91(主瓣峰值)。最佳个体对应的特征多项式为

$$f(x) = 1 + x^3 + x^4 + x^5 + x^6 + x^9 + x^{11} \quad (6)$$

式(6)能够产生 MLS 为 $N = 2^{11} - 1 = 2047$ 。图 5 为式(6)产生 2047 位 MLS 非周期 ACF 图。从图 5 可以看出, 该 MLS 非周期 ACF 特性非常好, 经计算 PSL 衰减达到 -31.57 dB。

图 6 为 12 级 LFSR 反馈连接的搜索情况。仿真参数仅改

变 $\max_var = 2^{12}$ 。从图 6 可以看出,第八代收敛。经过计算,搜索到最佳个体的适应值为 53.88 (主旁瓣比)。最佳个体对应的特征多项式为

$$f(x) = 1 + x + x^2 + x^3 + x^4 + x^7 + x^{10} + x^{11} + x^{12} \quad (7)$$

式(7)产生 4 095 位 MLS。图 7 给出了 4 095 位 MLS 非周期 ACF 图。从图 7 可以看出,该 MLS 的非周期 ACF 比图 5 的更好。经计算,PSL 衰减达到 -34.63 dB。

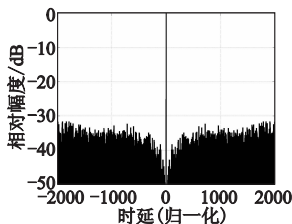


图5 2 047位最大长度序列非周期自相关函数图

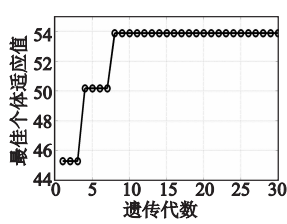


图6 最佳个体适应值增长情况

3.2 最大长度序列非周期自相关函数特性分析

表 1 和 2 分别列出了 Peterson 等人给出的和本文给出的 LFSR 反馈连接及其产生 MLS 非周期 ACF 的 PSL 值。

表 1 Peterson 等人给出的反馈连接和求出的 PSL 值

阶数	最大序列长度	级间反馈连接	旁瓣电平衰减/dB	PSL
4	15	4,3	-12.40	3.6
5	31	5,3	-14.26	6
6	63	6,5	-18.84	7.2
7	127	7,6	-19.15	14
8	255	8,6,5,4	-22.11	20
9	511	9,5	-24.29	31.2
10	1 023	10,7	-26.29	49.6
11	2 047	11,9	-28.93	73.2
12	4 095	12,11,8,6	-33.05	91.2
13	8 191	13,12,10,9	-36.31	125.2
14	16 383	14,13,8,4	-37.63	215.2
15	32 767	15,14	-39.70	339.2

表 2 本文给出的反馈连接和求出的 PSL 值

阶数	最大序列长度	级间反馈连接	旁瓣电平衰减/dB	PSL
4	15	4,3	-12.40	3.6
5	31	5,2	-15.85	5
6	63	6,5	-18.84	7.2
7	127	7,5,4,3,2,1	-21.25	11
8	255	8,5,3,1	-24.73	14.8
9	511	9,8,6,5,3,2	-26.86	23.2
10	1 023	10,9,7,3	-29.07	36
11	2 047	11,9,6,5,4,3	-31.57	54
12	4 095	12,11,10,7,4,3,2,1	-34.63	76
13	8 191	13,12,11,10,8,1	-37.19	113.2
14	16 383	14,11,9,8,7,4,2,1	-39.54	172.8
15	32 767	15,13,9,8,4,3	-42.50	245.6

通过对比表 1 和 2 可以看出,本文给出反馈连接产生 MLS 的非周期 ACF 的 PSL 比 Peterson 等人的更低,因此更加适合应用到脉冲压缩雷达中。

另外,从图 5 和 7 可以看出,最大旁瓣出现的位置都离主瓣较远,因此可以推断,通过加窗可以对旁瓣有很好的抑制效果。图 8 显示了 4 095 位 MLS 非周期 ACF 加汉明窗后的情况。从图 8 可以看出,加汉明窗后,相对图 7 的旁瓣抑制效果非常明显。经计算,PSL 衰减达到 -38.20 dB。

表 3 给出了本文反馈连接产生 MLS 非周期 ACF 加汉明窗后 PSL 值。

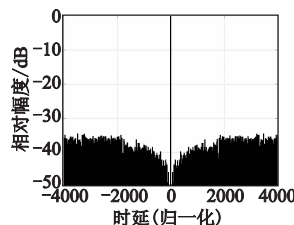


图7 4 095位最大长度序列非周期自相关函数图

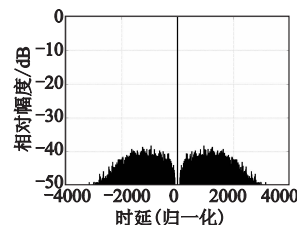


图8 4 095位最大长度序列非周期自相关函数加汉明窗效果图

表 3 MLS 的 ACF 加汉明窗后 PSL 值

阶数	最大序列长度	主瓣峰值	旁瓣电平衰减/dB	PSL
4	15	15.0	-15.93	2.40
5	31	31.0	-18.05	3.88
6	63	63.0	-22.28	4.85
7	127	127.0	-21.86	10.25
8	255	255.0	-26.09	12.65
9	511	511.0	-28.62	18.95
10	1 023	1 023.0	-30.26	31.41
11	2 047	2 047.0	-34.71	37.62
12	4 095	4 095.0	-38.20	50.38
13	8 191	8 191.0	-41.15	71.74
14	16 383	16 383.0	-42.88	117.63
15	32 767	32 767.0	-47.05	145.58

从表 3 可以看出,加汉明窗后,MLS 的非周期 ACF 主瓣峰值并未衰减,而 PSL 相比表 2 的衰减相当多,如 MLS 为 32 767 时,加汉明窗后,PSL 衰减将近 5 dB。这说明通过加窗处理后 MLS 的 ACF 特性更好,因此非常适合应用到脉冲压缩雷达中。

4 结束语

本文针对 LFSR 输出的 MLS 非周期 ACF 特性不同,利用遗传算法推算出 4~15 级 LFSR 的最佳反馈连接。通过对比 Peterson 等人给出的反馈连接,说明该组反馈连接产生的 MLS 非周期 ACF 特性更好。另外,非周期 ACF 加汉明窗后,对 PSL 的抑制效果更佳。因此对脉冲压缩雷达编码方案具有重要的参考价值。

参考文献:

- [1] RICHARDS M A. 雷达信号处理基础[M]. 邢孟道,等译. 北京:电子工业出版社,2008:160.
- [2] JOBST W, WHITED L, SMITH D. Target detection and tracking in shallow water using maximal length sequences[C]//Proc of International Waterside Security Conferences. 2010:1-5.
- [3] PRUDYUS I, SUMYK M. Multiphase signals based on recurrent sequences of maximal length[C]//Proc of International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science. 2004:360-362.
- [4] SKOLNIK M I. 雷达手册[M]. 王军,林强,米慈中,等译. 2 版. 北京:电子工业出版社,2003:397-399.
- [5] SKOLNIK M I. Radar handbook[M]. 3rd ed. [S. l.]: McGraw-Hill, 2008:402-405.
- [6] SAHOO A K, PANDA G, PRADHAN P M. Efficient design of pulse compression codes using multiobjective genetic algorithm. [C]//Proc of World IEEE Conferences on Nature & Biologically Inspired Computing. 2009:324-329.
- [7] 常洪江. 遗传算法综述[J]. 电脑学习,2010,6(3):115-116.
- [8] 申艳芬,董丽丽,张翔,等. 基于改进遗传算法的给水管网最短路径求解[J]. 计算机仿真,2011,28(2):260-263.
- [9] MAHAFAZ B R, ELSHERBENI A Z. 雷达系统设计 MATLAB 仿真[M]. 朱富国,黄晓涛,黎向阳,等译. 北京:电子工业出版社,2009:156.