

北斗系统伪随机码的硬件仿真与演化设计

刘 伟, 陈利军

(陆军工程大学 信息工程系, 石家庄 050003)

摘要: 作为国家战略空间基础设施, 北斗卫星导航系统 (BeiDou Navigation Satellite System, BDS) 可以提供民用的标准定位服务和军用的精确定位服务, 对我国的国防和经济建设意义重大; 为研究 BDS 信号的产生机理和导航服务技术, 在介绍伪随机码基本原理及 BDS 的 C_{B1I} 码和 C_{B2I} 码产生方法的基础上, 基于 FPGA 硬件对该码生成器进行了硬件仿真实现; 通过定义 11 位寄存器用来描述 11 级移位寄存器各级的状态, 以此为基础生成了 m 序列, 并最终生成了 C_{B1I} 码和 C_{B2I} 码; 通过 Modelsim 软件进行了仿真实验, 下载至 FPGA 进行了硬件实现实验, 验证了该生成电路能准确得到目的 C_{B1I} 码和 C_{B2I} 码; 设计了基于 Nios II 和虚拟可重构 (Virtual reconfigurable circuits, VRC) 阵列的演化电路来实现该电路的方法, 以可编程逻辑器件实现码生成电路, 有助于对空间中 BDS 码生成器的抗干扰能力和自修复能力的研究。

关键词: 北斗卫星导航系统; 伪随机码; 仿真; 现场可编程门阵列; 演化硬件

Hardware Simulation and Design of EHW for BDS' Pseudo-random Noise Code

Liu Wei, Chen Lijun

(Dept. of Information Engineering, Shijiazhuang Campus of Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: As a national strategic space infrastructure, BDS (BeiDou Navigation Satellite System) can provide civil standard positioning service and military precise positioning service. It is significant to the national defense and economic construction of our country. For studying the mechanism of BDS signal and the technology of navigation service, this paper introduced the basal theory of pseudo-random code and the generation method of BDS' C_{B1I} code and C_{B2I} code generation method. Then it accomplished hardware simulation experiment of the code based on FPGA. Defined the 11 register in order to describe the state of 11 levels shift register, on this basis, generated the m sequence, and finally generated the C_{B1I} code and C_{B2I} code. Accomplished simulation experiment by Modelsim software, accomplished hardware implementation experiment by downloading to the FPGA. That verifies the circuit is feasible to generate the C_{B1I} code and C_{B2I} code. This paper designed the circuit of evolution based Nios II and VRC array to realize target circuit. This study of the code generation circuit based on programmable logic devices will contribute to the research on anti-interference ability and self-repairing ability of BDS' code generation circuit in space.

Keywords: BDS; pseudo-random noise code; simulate; FPGA; EHW

0 引言

北斗卫星导航系统 (BDS) 简称北斗系统, 是中国自主研发的全球卫星导航系统。整个系统由空间段、地面段和用户段三部分组成, 其中, 空间段由 5 颗静止轨道卫星和 27 颗中地球轨道卫星和 3 颗倾斜地球同步轨道卫星组成。目前, 北斗卫星导航系统已覆盖亚太地区, 民用定位精度优于 10 s, 测速精度优于 0.2 m/s, 授时精度优于 50 ns, 预计将在 2020 年左右覆盖全球^[1]。

北斗系统在向地面发送信号时, 采用扩频通信的方式。它将信号扩展到很宽的频带上, 如果信号的总能量不变, 则频谱的展宽必定导致各频谱成分的幅度下降, 即让信号的功率谱密度降低, 这使得信号在传输时完全淹没在噪声中, 只有在接收

端通过相关处理将信号恢复成窄带信号, 才会得到有用的发端信息。

香农指出, 在高斯噪声的干扰下, 在有限平均功率的信道上, 可实现有效和可靠通信的最佳信号是具有白噪声统计特性的信号。但是人们至今无法实现对白噪声的调制、检测及控制, 因此只能用类似于白噪声特性的伪随机噪声码来逼近它。

1 伪随机噪声码

白噪声是一种随机过程, 其瞬时值服从高斯分布, 功率在很宽的频带内都是均匀分布的, 其自相关函数具有类似 δ 函数的形状。

$$R_{xx}(\tau) \stackrel{\text{def}}{=} \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t)x(t-\tau)dt \quad (1)$$

其物理概念是: $x(t)$ 与其延迟 τ 的 $x(t-\tau)$ 相比, 如 $\tau \neq 0$, 则 $R_{xx}(\tau)$ 为 0; 如 $\tau=0$, 则 $R_{xx}(\tau)$ 为常数。

我们定义码序列的自相关函数为:

$$R_x(j) = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P x_i x_{i+j} \quad (2)$$

式中, P 为码周期, x_{i+j} 为对 x_i 移位 j 后的码序列。而当码序列的自相关函数具有:

收稿日期: 2017-11-29; 修回日期: 2017-12-28。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61271152)。

作者简介: 刘伟 (1994-), 男, 陕西长武人, 硕士研究生, 主要从事嵌入式系统应用方向的研究。

陈利军 (1973-), 男, 四川邛崃人, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事嵌入式系统应用方向的研究。

$$R_x(j) = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P x_i x_{i+j} = \begin{cases} 1, & j = mP \\ -\frac{1}{N}, & j \neq mP \end{cases}$$

$$m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (3)$$

形式, 称之为伪随机码, 又称为狭义伪随机码。

m 序列是一种应用广泛的狭义伪随机序列, 具有良好的自相关函数, 并且具有易于产生和复制的优点。 m 序列是由多级移位寄存器通过线性反馈产生的最长的码序列。在二进制移位寄存器中, 若 n 为移位寄存器的级数, 则共有 2^n 个状态, 除去全 0 状态外还有 $2^n - 1$ 个状态, 则它能产生的最长的码序列为 $2^n - 1$ 位。我们通常用特征多项式的形式来表示一个序列:

$$G(x) = G_0 + C_1 x^1 + C_2 x^2 + \dots + C_n x^n = \sum_{i=0}^n C_i x^i \quad (4)$$

其中: x 的幂次表示寄存器的级数, 对应的 C_i 取值为 0 或者 1, 表示该级寄存器是否参与反馈。特征多项式一旦确定, 码序列发生器的结构也随之确定, 其所生成的序列也就确定了。

图 1 给出了 5 级 m 序列发生器的示意图, 其对应的特征多项式为 $G(X) = 1 + X^2 + X^5$ 。根据图 1, 假设寄存器的一种初始状态, 即可产生与特征多项式对应的码序列, 周期为 $P = 2^n - 1 = 2^5 - 1 = 31$ 。

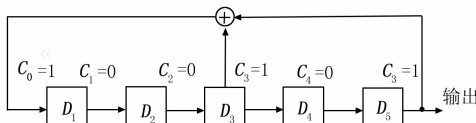


图 1 $n=5, C_i=100101, m$ 序列发生器

我们假设初始状态为 00001, 则该序列发生器各级随着时钟周期 CP 的变化状态如表 1 所示。

由表 1 可知, 经过 31 个时钟脉冲之后, 码序列发生器又回到初始的状态, 这期间输出级的输出序列为 1000 0100 1011 0011 1110 0011 0111 0101。

m 序列具有以下性质:

- 1) 初始状态的不同只是决定了输出 m 序列的起始位置不同, 而不同的反馈系数将产生不同的码序列。
- 2) m 序列和其移位后的序列逐位模二加, 所得到的序列还是该 m 序列, 只是起始位置不同。
- 3) m 序列的自相关函数为:

$$R_x(j) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i x_{i+j} = \begin{cases} 1, & j = 0 \\ -\frac{1}{N}, & j \neq 0 \end{cases} \quad (5)$$

假设码序列周期为 P , 码元宽度为 T_c , 那么自相关系数是以 PT_c 为周期的函数, 在 $|\tau| \leq T_c$ 范围内, 自相关系数为:

$$R_x(\tau) = 1 - \left(\frac{P+1}{P}\right) \frac{|\tau|}{T_c}, \quad |\tau| \leq T_c \quad (6)$$

自相关系数随 τ/T_c 的波形如图 2 所示。由图 2 可知, m 序列的自相关系数在 $\tau=0$ 处出现尖峰, 并以 PT_c 时间为周期重复。尖峰底宽为 $2T_c$, T_c 越小, 峰越尖锐, 周期 P 越大, $|-1/P|$ 就越小, m 序列的自相关性就越好^[2-4]。

通过自相关系数波形图可以看出, 如果两序列之间的时延不是长度周期的整数倍, 那么相关系数非常小。北斗系统正是利用伪随机码的这一特点来捕获和识别不同卫星的信号。

表 1 $n=5, C_i=100101, m$ 序列发生器状态表

CP	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5 (输出)	$D_3 \oplus D_5$
0	0	0	0	0	1	1
1	1	0	0	0	0	0
2	0	1	0	0	0	0
3	0	0	1	0	0	1
4	1	0	0	1	0	0
5	0	1	0	0	1	1
6	1	0	1	0	0	1
7	1	1	0	1	0	0
8	0	1	1	0	1	0
9	0	0	1	1	0	1
10	1	0	0	1	1	1
11	1	1	0	0	1	1
12	1	1	1	0	0	1
13	1	1	1	1	0	1
14	1	1	1	1	1	0
15	0	1	1	1	1	0
16	0	0	1	1	1	0
17	0	0	0	1	1	1
18	1	0	0	0	1	1
19	1	1	0	0	0	0
20	0	1	1	0	0	1
21	1	0	1	1	0	1
22	1	1	0	1	1	1
23	1	1	1	0	1	0
24	0	1	1	1	0	1
25	1	0	1	1	1	0
26	0	1	0	1	1	1
27	1	0	1	0	1	0
28	0	1	0	1	0	0
29	0	0	1	0	1	0
30	0	0	0	1	0	0
31	0	0	0	0	1	1

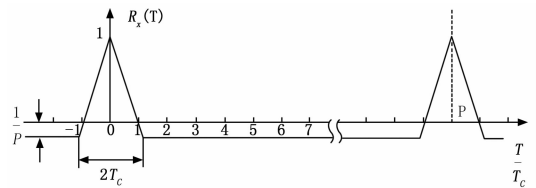


图 2 m 序列的自相关系数

m 序列的抗干扰性较强, 有着优良的相关特性且易产生。但不足的是 m 序列的数目少, 不能满足作为地址码的需求。1967 年, R. Gold 提出的 Gold 序列很好地解决了这类需求。Gold 序列是在 m 序列的基础上得到的, 但它的条数远远多于 m 序列, 并且具有着良好的自相关和互相关特性, 因此得到广泛应用^[5]。

2 北斗系统的伪随机码

在北斗系统运转中, 为实现卫星对地面目标的定位, 对应卫星会向地面发送测距码来测量和目标之间的距离。当使用伪随机码作为测距码时, 由于伪随机码具有着良好的自相关性, 我们可以在接收端得到经过传播而产生平移的信号, 通过调整

平移量,与发送端原有的信号进行相关性计算,使两者相关系数达到最大,通过平移量来推算信号在传播路径上耗费的时间,进而转化为卫星到测站的距离。

北斗系统是一种无线电导航定位系统,卫星导航信号包括 B_1, B_2, B_3 三个频点,每个频点信号都是由 I, Q 两个支路的测距码和导航电文正交调制在载波上构成。其中 B_1 和 B_2 频点的测距码(简称为 C_{B1I} 码和码)的码速率为 2.046 Mcps,码长为 2046^[6-7]。我们将以 C_{B1I} 码和码为例,对北斗系统的伪随机码进行分析和硬件实现。

C_{B1I} 码和码均由两个序列 G_1 和 G_2 模二加,产生平衡 Gold 码后截短 1 码片产生。 G_1 和 G_2 序列分别由 11 级线性移位寄存器产生,因此均有 2046 个码元。其生成多项式为:

$$G_1(X) = 1 + X + X^7 + X^8 + X^9 + X^{10} + X^{11} \quad (7)$$

$$G_2(X) = 1 + X + X^2 + X^3 + X^4 + X^5 + X^8 + X^9 + X^{11} \quad (8)$$

G_1 序列的初始相位为: 01010101010, G_2 序列的初始相位为: 01010101010。 C_{B1I} 码和码发生器如图 3 所示。

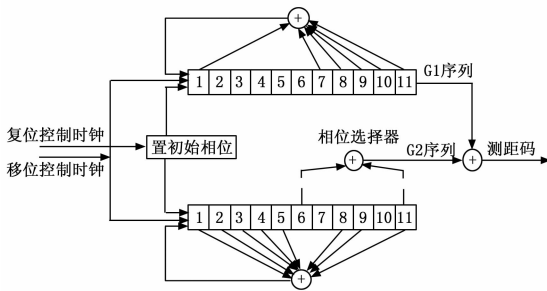


图 3 G_{B1I} 码和 C_{B2I} 码发生器示意图

G_1 序列采用寄存器的末级输出, G_2 序列采用寄存器其中两个抽头的模二加进行输出。通过对产生 G_2 序列的移位寄存器不同抽头的模二加可以实现 G_2 序列相位的不同偏移,与 G_1 序列模二加后可产生不同卫星的测距码。本次仿真以图 1 为例, G_2 序列的生成采用第 6 级和第 11 级进行模二加^[8-9]。

3 基于 FPGA 的 C_{B1I} 码和 C_{B2I} 码仿真实现

本次仿真采用 Altera 公司的 Cyclone III 代的系列芯片 EP3C16Q240C8N,在 Quartus II 环境采用 Verilog HDL 语言进行硬件描述^[10]。定义 11 位寄存器用来描述 11 级移位寄存器各级的状态,将需要输出的抽头连接至模二加模块。继而生成 G_1 序列和 G_2 序列,最终将两序列连接至模二加模块生成目的 C_{B1I} 码和码。Verilog HDL 源程序如下:

```

module BDCODE(clk,Cb);
input clk;
output Cb; //声明输出的 C_B1I码和码
//11 位寄存器表示 11 级移位寄存器的状态,设置初始状态
reg[1:11] q1 = 11'b01010101010;
reg[1:11] q2 = 11'b01010101010;
reg g1,g2,Cb; //声明 G1 序列,G2 序列,C_B1I码和码寄存器
//G1 序列的生成
always@(posedge clk)
begin
q1[1]<=q1[1]^q1[7]^q1[8]^q1[9]^q1[10]^q1[11];
q1[2:11]<=q1[1:10];
g1<=q1[11];
end

```

```

end
//G2 序列的生成
always@(posedge clk)
begin
q2[1]<=q2[1]^q2[2]^q2[3]^q2[4]^q2[5]^q2[8]^q2[9]^q2
[11];
q2[2:11]<=q2[1:10];
g2<=q2[6]^q2[11];
end
//码和码的生成
always@(posedge clk)
begin
Cb<= g1^g2;
end
endmodule

```

编译并综合工程后,通过 Quartus II 自带的 RTL Viewer 工具就可以看到综合后的原理图,如图 4 所示。

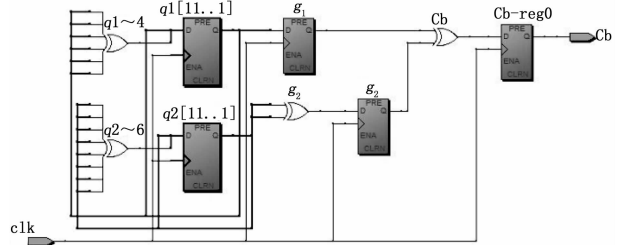


图 4 综合后 RTL Viewer 生成的原理图

分配好输出引脚后下载至 EP3C16Q2440C8N 芯片实现北斗系统 码和 码的硬件生成器。本文采用 ModelSim 进行仿真,生成的 码和 码仿真结果如图 5 所示。

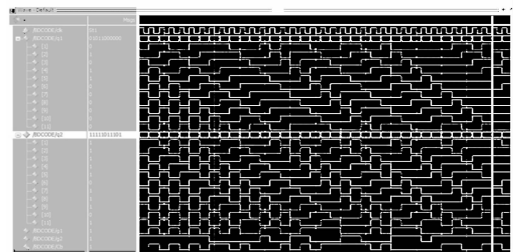


图 5 码生成器仿真结果

配置输入与输出引脚,将核心板的 50 MHz 时钟信号作为生成码电路的输入时钟 clk,编译工程并下载至 EP3C16Q240C8N 核心板上,将生成的 C_{B1I} 码和码输出至示波器,生成信号如图 6 所示。

可以看到,生成的 C_{B1I} 码和码波形由于过冲和震荡而失真,但是作为二值的数字信号,这并不影响其值的判定。

4 码生成器的演化设计

4.1 演化硬件技术

演化硬件技术 (Evolvable Hardware, EHW) 是一种以仿生方式建立代偿机制的技术,其基本思想是基于进化算法,对集成电路芯片中可重配置的逻辑单元进行重配和组合,使得系统在执行某项特殊任务时,其体系结构、连接方式以及局部功能会根据环境的变化进行自动演化从而实现动态调整。在现代战争中,武器装备面对着十分复杂的电磁环境,演化硬件技术

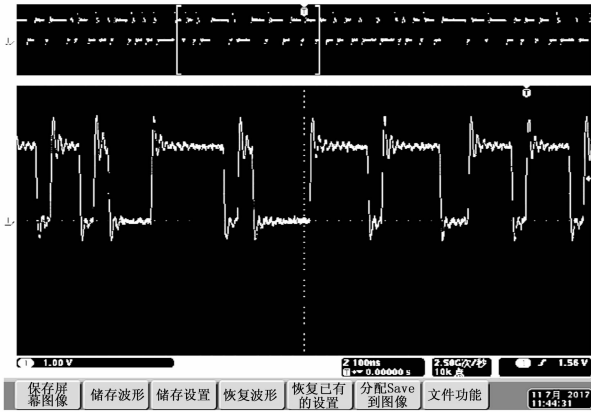


图 6 码生成器实验输出结果

可以使装备在复杂环境下实现“自适应、自诊断、自修复”，从更深层次上为武器装备防护提供了一种十分高效的解决方案^[11]。

在实现演化硬件时，可采用“可编程片上系统（System On a Programmable-Chip, SOPC）+ 虚拟可重构（Virtual reconfigurable circuits, VRC）技术”的设计方案。基于 VRC 技术的实现方法，其基本思想是通过硬件描述语言产生一个虚拟配置位流层，实现实际 FPGA 器件与虚拟电路结构的映射关系。这种方法较易开展，拥有良好的灵活性和通用性。SOPC 采用可编程逻辑技术将整个系统集成到一个芯片上，同时具有以下优点：它具有片上系统的特点，即由单个芯片完成整个系统的主要逻辑功能，又是可编程系统，同时具备在软件和硬件上的在线编程能力，还可以对应用程序进行重复修改，具有很好的设计灵活性。Nios II 就是一种较为优秀的 SOPC 产品系列。另外，采用“SOPC+VRC”的设计方案还具有演化时间短，可独立运行的优点，且可以脱离 PC 机实现片上演化^[12-15]。

5.2 系统架构和 VRC 阵列的搭建

本文设计了一种北斗伪随机码生成器的演化电路，整个演化系统由 Nios II 软核和针对目标电路定制的 VRC 阵列构成。如图 7 所示，Nios II 软核运行演化算法，生成染色体位串；与 VRC 阵列相互通信，将位串下载至 VRC 阵列生成具体电路，并接收 VRC 阵列的输出结果进行适应度评估。该演化电路相比于传统的冗余备份方式，具有自组织且冗余利用率高的特点。

可编程单元（Programable Element, PE）是 VRC 阵列的基本元素，其内部结构如图 8 所示，包括一个多路信号选择器和一个 D 触发器。4 位长的控制信号 D_sel (3..0) 用来控制 Data_in (10..0) 这 11 个数据的选择，将选择结果送至 D 触发器，经过一个时钟沿将结果送至 D_out。将其封装成整体的元件如图 9 所示。

在构建首尾确定的 VRC 阵列过程中，我们将 12 个 PE 单元分为 2 种：首尾级 PE 和中间 PE。这两种 PE 单元的区别仅在于送入多路信号选择器的信号数量不同。如图 10 所示，首级 PE 负责接收置初始相位信号和异或器的负反馈；尾级 PE 接收中间 PE 的输入，并选择其中的一个将结果输出。中间 PE 共有 10 个，可接收首级 PE 和其他中间 PE 的输入并选择其中一个进行输出。每个 PE 单元的输出都会送往选择异或

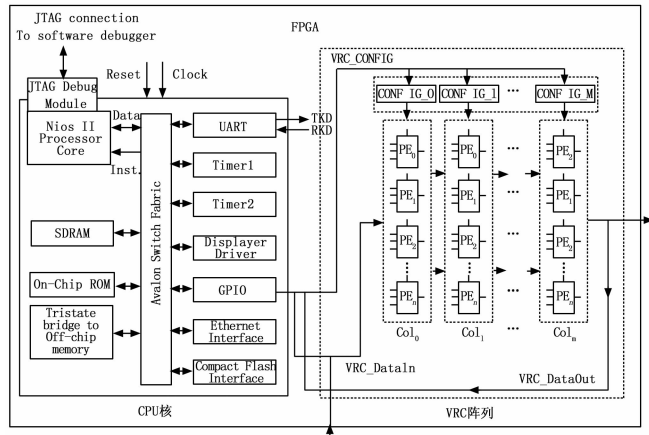


图 7 系统框架

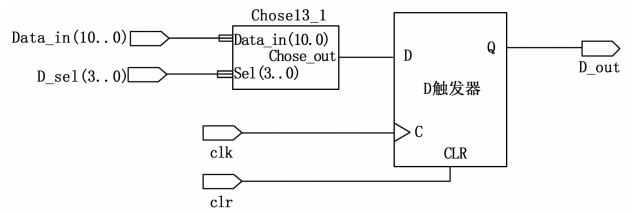


图 8 PE 单元的内部结构

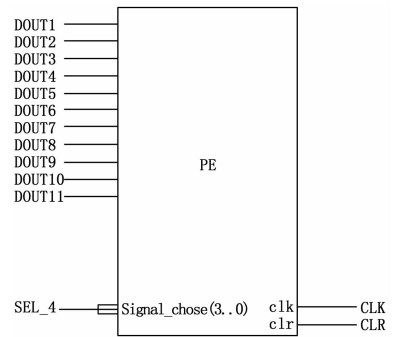


图 9 封装后的 PE 单元

模块，在 12 位编码的控制下实现特定 PE 单元的异或，并将异或结果送给首级 PE 实现反馈。由于每个 PE 单元和其他 PE 单元之间都是有可能互通的，因此这是一个网状的 VRC 阵列。通过演化算法控制这 12 个 PE 单元的内部结构和连接关系，最终生成目标电路。

Nios II 中运行演化算法，将演化结果以二进制编码的形式送至 VRC 阵列以生成具体电路。其中，首级 PE 不需要选择信号因此不需要编码。10 个中间 PE 均需要 4bit 编码来选择 10 个输入信号的哪一位，尾级 PE 需要 4bit 编码来选择 11 个输入信号的哪一位。还需要 12bit 编码来控制选择异或器的 12 个输入开关。因此共需要 $4\text{bit} \times 10 + 4\text{bit} + 12\text{bit} = 56\text{bit}$ 的编码来控制整个 VRC 阵列的演化。

为了应对复杂太空环境所造成的元件损坏，目前较为普遍的备份方式是将整个电路进行整体备份，当工作电路中的某元件发生损坏，直接启用备份电路，这种方法所需要的冗余量很大。而本文设计的演化电路，当其中一个 PE 单元发生损坏时，由于有着冗余的存在，其余的 PE 单元将在演化算法的组

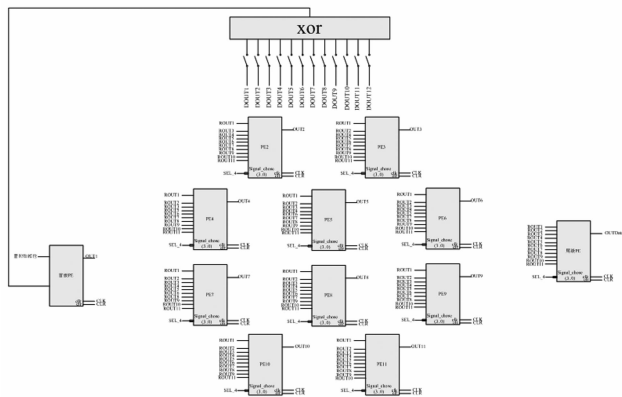


图 10 首尾确定的 VRC 阵列结构

织下生成同样功能的电路，对于冗余的利用率更高。

6 结束语

伴随着空间技术的广泛应用，恶劣的太空环境已经成为空间设施正常工作所要面对的第一道难关^[16]。强烈的电磁辐射会导致电路元件的电平反转甚至设施的损坏。以可编程逻辑器件来实现码生成器电路，并提出了一种演化硬件实现码生成电路的方法，有助于对空间中北斗系统伪随机码生成器的抗干扰能力和自修复能力的研究。

参考文献:

[1] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件公开服务信号 [OL/EB] (2016-11-7) [2017-7-15]. <http://www.beidou.gov.cn/attach/2016/11/07/13411.pdf>.

[2] 暴宇, 李新民. 扩频通信技术及应用 [M]. 第二版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2011.

[3] Chen Z, Tang T H. Coding technology in Galileosystembased on chaotic spreading spectrum CDMA [J]. Information & Electronic Engineering, 2010, 8 (2): 25-31.

(上接第 138 页)

的分析精度，优化了 K 均值聚类效果和以此做决策分析的准确度。但是，基于人工蜂群优化的 K 均值聚类算法也有其局限性，即引入很大的时间复杂度。下一步的研究目标是，利用人工蜂群算法和 K 均值算法结合的混合聚类算法优势的同时，从进一步改进蜂群算法的角度，加快算法的寻优和收敛速度，降低混合聚类算法的时间复杂度。

参考文献:

[1] 孙吉贵, 刘杰, 赵连宇. 聚类算法研究 [J]. 软件学报, 2008, 19 (1): 48-61.

[2] Han J W, Kamber M, Pei J. 数据挖掘概念与技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.

[3] 李春生, 王耀南. 聚类中心初始化的新方法 [J]. 控制理论与应用, 2010, 27 (10): 1435-1440.

[4] 陶新民, 徐晶, 杨立标. 一种改进的粒子群和 K 均值混合聚类算法 [J]. 电子与信息学报, 2010, 32 (1): 92-97.

[5] Lu B, Ju F. An optimized genetic K-means clustering algorithm [A]. CSIP 2012; Proceedings of the 2012 International Conference

[4] Lee J H, Shim D S. Fast acquisition of GPS L5 PRN an nh code using L1 signal for software receivers [J]. International Journal of Control Automation & Systems, 2016 (2): 25-31.

[5] Diesposti R S. Global position system (GPS) user receiver and geometric surface processing for all-in-view coherent GPS signal PRN codes acquisition and navigation solution: US, US 7688261 B2 [P]. 2010. <http://www.freepatentsonline.com/7688261.html>.

[6] 刘天昱. 北斗卫星导航系统 B1 频段信号分析研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2013.

[7] 梁银龙. 北斗卫星系统中伪码捕获技术的研究 [D]. 合肥: 安徽大学, 2016.

[8] 惠楠, 黄海生, 李鑫. 一种北斗二号测距码生成器的设计 [J]. 西安邮电大学学报, 2012, 17 (3): 38-40.

[9] 中国卫星导航定位协会. 卫星导航定位与北斗系统应用 [M]. 北京: 测绘出版社, 2015.

[10] 苏扬, 钱皓. 基于 FPGA 的跳频通信系统开发 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (10).

[11] 陈利光. 适合于硬件进化的 FPGA 平台设计实现 [D]. 上海: 复旦大学, 2009.

[12] 朱继祥, 李元香, 夏学文, 等. 基于演化硬件的在线自适应系统 [J]. 计算机科学, 2009, 36 (7): 267-269.

[13] Stoica A. Evolvable Hardware: From On-Chip Circuit Synthesis to Evolvable Space Systems [A]. IEEE International Symposium on Multiple-Valued Logic [C]. IEEE Computer Society, 2000: 161.

[14] Salvador R, Otero A, Mora J, et al. Self-Reconfigurable Evolvable Hardware System for Adaptive Image Processing [J]. IEEE Transactions on Computers, 2013, 62 (8): 1481-1493.

[15] Rajaram U, Perinbam R P. EHW Architecture for Design of FIR Filters for Adaptive Noise Cancellation [J]. International Journal of Computer Science & Network Security, 2009 (1): 41-48.

[16] 李鹤峰, 党亚民, 秘金钟, 等. 北斗卫星导航系统的发展、优势及建议 [J]. 导航定位学报, 2013, 1 (2): 49-54.

on Computer Science and Information Processing [C]. Piscataway: IEEE, 2012: 1296-1299.

[6] Lloyd S P. Least squares quantization in PCM [J]. Information Theory, 1982, 28: 128-137

[7] Karaboga D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization [R]. Technical Report-TR06. Kayseri: Erciyes University, 2005.

[8] Karaboga D, Akay B. On the performance of artificial bee colony optimization algorithm [J]. Applied Soft Computing, 2008, 8 (1): 687-697.

[9] Basturk B, Karaboga D. An artificial bee colony algorithm for numeric function optimization [A]. IEEE Swarm Intelligence Symposium [C]. Indian, 2006.

[10] 毕晓君, 王艳娇. 加速收敛的人工蜂群算法 [J]. 系统工程与电子技术, 2011, 31 (4): 1107-1110.

[11] Bi X, Gong R. Hybrid clustering algorithm based on artificial bee colony and K-means algorithm [J]. Application Research of Computers, 2012, 29 (6): 2040-2042.

[12] UCI. Data sets [EO/OL]. <http://archive.ics.uci.edu/ml/datasets.html>