

GPS 伪随机码的软件和硬件仿真实现

陈利军, 李芳, 崔静

(军械工程学院 信息工程系, 石家庄 050003)

摘要: 目前四大全球卫星导航定位系统中, 美国的 GPS 是发展最早也是应用面最广的系统, GPS 提供民用的标准定位服务和军规的精确定位服务; 为研究 GPS 卫星导航电文的产生机理和针对 GPS 的导航对抗技术, 在详细介绍 GPS 伪随机码的基本原理和 C/A 码生成电路的基础上, 通过 MATLAB 和 FPGA 分别对 C/A 码进行了软件和硬件仿真实现; 基于 MATLAB 的软件仿真采用循环程序实现了 m 序列和 C/A 码, 基于 FPGA 的硬件仿真首先构建一个 D 触发器元件, 然后利用该元件通过并行指令实现 m 序列, 最终生成 C/A 码; 两种方法虽然采用不同的思路和技术, 但是得到了一致的 C/A 码信号样式; 伪随机码的产生是 GPS 实现扩频通信的重要环节, 通过对 GPS 伪随机码的仿真实现, 有助于对 GPS 卫星信号的捕获研究和针对 GPS 的欺骗式干扰研究。

关键词: GPS; 伪随机码; C/A 码; 仿真; MATLAB; FPGA

Implementation of Software Simulation and Hardware Simulation for GPS' Pseudo-random Noise Code

Chen Lijun, Li Fang, Cui Jing

(Department of Information Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: At present, in the four global satellite navigation and positioning systems, American GPS is the earliest and widely used system. GPS provides Standard Positioning Service (SPS) and Precise Positioning Service (PPS). For studying the navigation data of GPS and the Counter Technology to GPS, this paper introduces the basal theory of GPS' Pseudo-random Noise Code and the circuit which produces the C/A code. Then it emulates the C/A code of GPS by MATLAB and FPGA. The software simulation by MATLAB uses the circular sentences to implement the m -sequence and the C/A code. The hardware simulation by FPGA produces a D-Trigger first, then it uses the D-Trigger and parallel sentences to implement the m -sequence and the C/A code. Although the two methods use different thinking and technologies, they get the same C/A code. GPS' Pseudo-random Noise Code is the important segment to spread spectrum communication. This study to GPS' Pseudo-random Noise Code will contribute to the research on capturing GPS signal and deception jamming to GPS.

Keywords: GPS; pseudo-random noise code; C/A code; simulate; MATLAB; FPGA

0 引言

卫星导航系统是一种基于卫星的无线电导航系统, 目前四大全球卫星导航定位系统有美国的 GPS 系统、欧洲的“伽利略”系统、俄罗斯的“格洛纳斯”系统和中国的“北斗”系统, 其中 GPS 是发展最早、应用也最广的系统。GPS 是全球定位系统 (global position system) 的英文缩写, 其系统组成包含空间部分 (24 颗卫星, 截止 2010 年 4 月, 实际共有 33 颗卫星)、用户部分 (用户接收机) 和地面监控部分 (1 个主控站, 5 个监控站, 3 个注入站)。GPS 卫星导航定位信号的发送属于一种噪声通讯, 它将卫星信号淹没在噪声之中, 不仅不易被捕获而且由于发射功率小, 能极大地节省卫星电能^[1]。噪声通信由信息论的奠基人香农于 20 世纪 40 年代末期首先提出。香农编码定理指出: 只要信息速率 R_s 小于信道容量 C , 则总可以找到某种编码方法, 使在码字相当长的条件下, 能够几乎无差错地从遭受到高斯白噪声干扰的信号中恢复出原发送信息。20 世纪 60 年代中期, 随着伪随机噪声编码技术的问

世, 噪声通讯才得到真正应用。

1 伪随机码基本原理

伪随机噪声码 (pseudo-random noise code, 伪随机码或伪噪声码) 是一个具有一定周期的二进制离散符号串。图 1 表示一种极简单的伪随机码, 它可以有两种表述形式: 二进制信号波形, 记作 $x(t)$ 和二进制符号序列, 记作 $\{x\}$ 。二进制信号波形取值 -1 或 1, 二进制符号序列取值 1 或 0。

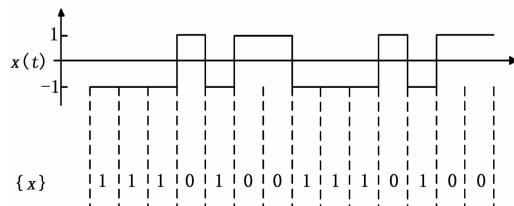


图 1 伪随机码的表述形式

对二进制符号序列作模二和运算, 二进制信号波形作相乘运算时遵循的运算规则如表 1 所示。

伪随机码采用一种具有特殊反馈电路的移位寄存器产生。该移位寄存器称为最长线性移位寄存器 (其反馈电路是线性的), 它产生的伪随机码也称为 m 序列。图 2 所示为一个四级

收稿日期: 2015-10-27; 修回日期: 2015-11-21。

作者简介: 陈利军 (1973-), 男, 四川邛崃人, 硕士, 主要从事计算机系统结构、嵌入式系统应用方向的研究。

表 1 两种表述方式及其运算规则

表述方式	$\{x\}$			$x(t)$		
	1	0		-1	1	
运算规则	模 2 运算			乘法运算		
	a	b	$a \oplus b$	a	b	$a \times b$
	0	0	0	1	1	1
	0	1	1	1	-1	-1
	1	0	1	-1	1	-1
	1	1	0	-1	-1	1

m 序列发生器, 它包括 4 个 D 型触发器 (存储单元)、模二和反馈电路、置 1 脉冲和时钟脉冲产生器。置 1 脉冲将使各个 D 型触发器置 1, 该状态作为触发器的初始状态, 以后每来一个时钟脉冲, 存储单元的值都顺序地右移一个单元, 而最后一个存储单元的值作为输出。在该图中, D_3 、 D_4 的状态经模二和反馈至 D_1 [2-3]。

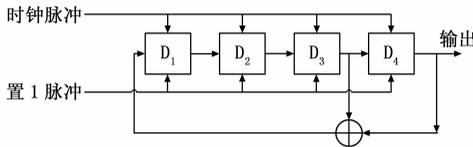


图 2 四级 m 序列发生器示意图

该 m 序列的状态序列如表 2 所示。

表 2 四级 m 序列发生器各级状态序列

状态编号	各级状态				模 2 和反馈	D_4 输出的序列
	D_1	D_2	D_3	D_4	$D_3 \oplus D_4$	
1	1	1	1	1	0	1
2	0	1	1	1	0	1
3	0	0	1	1	0	1
4	0	0	0	1	1	1
5	1	0	0	0	0	0
6	0	1	0	0	0	0
7	0	0	1	0	1	0
8	1	0	0	1	1	1
9	1	1	0	0	0	0
10	0	1	1	0	1	0
11	1	0	1	1	0	1
12	0	1	0	1	1	1
13	1	0	1	0	1	0
14	1	1	0	1	1	1
15	1	1	1	0	1	0

当上述四级 m 序列发生器进入第 15 个状态时, D_3 和 D_4 的模二和为 1, 因此下一个时钟脉冲各级又会进入初始状态 1, 这样就会形成一个周期性的状态序列。

m 序列发生器的反馈逻辑通常采用特征多项式来表示, 即:

$$F(x) = C_0x^0 + C_1x^1 + C_2x^2 + \dots + C_r x^r = \sum_{i=0}^r C_i x^i \quad (1)$$

式 (1) 中, C_i 表示第 i 级移位寄存器反馈线。当 $C_i = 0$ 表示反馈线不存在, $C_i = 1$ 表示反馈线存在。其中 C_0 始终取

1, 表示总反馈线存在, 若 $C_0 = 0$ 则表示无反馈, 无反馈无法产生 m 序列。依据式 (1), 图 2 所示电路的特征多项式为:

$$F(x) = 1 + x^3 + x^4 \quad (2)$$

根据表 2 可见, m 序列具有以下特性:

1) n 级移位寄存器所产生的 m 序列的长度周期为 $LP = 2^n - 1$, 如图 2 所示, 长度周期 $LP = 2^4 - 1 = 15$ bit。

2) 在 m 序列的一个周期中, 输出的“1”的个数比“0”的个数多 1, 如表 2 中 D_4 的输出序列 111100010011010, 含 8 个 1, 7 个 0。

3) 一个周期的 m 序列等价平移后与原 m 序列进行模二和, 其结果是一个结构不变的等价平移 m 序列。

如将表 2 中 D_4 的输出序列前移 1 个时钟周期, 得到等价平移序列与原 m 序列进行模二和运算, 其结果是一个结构不变的等价平移序列, 如图 3 所示。

$$\begin{array}{r} 1\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0 \\ \oplus 0\ 1\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1 \\ \hline 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 1 \end{array}$$

图 3 由 m 序列得到结构不变的等价平移序列

4) m 序列具有良好的相关性。设 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 为同周期 T 的序列, 两者之间的互相关系数 (表示 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 之间的“相似”程度) 定义为:

$$\rho(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x_1(t)x_2(t-\tau) dt \quad (3)$$

其中: τ 为 $x_2(t)$ 相对于 $x_1(t)$ 的时间延迟。当 $x_1(t) = x_2(t)$ 时, $\rho(\tau)$ 就是自相关系数。对于时元 t_k 离散采样的自相关系数为:

$$\rho(\tau) = \frac{1}{LP} \sum_{k=1}^{LP} x(t_k)x(t_k - \tau) \quad (4)$$

按二进制信号波形乘法运算规则, m 序列的自相关系数为:

$$\rho(\tau) = \begin{cases} 1 & \tau = iTP, i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \\ -\frac{1}{TP} & \tau = j\tau_0, j \text{ 等于 } 0 \text{ 和 } LP \text{ 的整倍数以外的任何数} \end{cases} \quad (5)$$

其中: TP 为 LP 对应的时间周期。当 m 序列延迟整数倍周期后, 其二进制信号波形取值与原二进制信号波形取值对应位相同, 因此按式 (4) 运算结果为 1; 当 m 序列延迟非整数倍周期后, 其二进制信号波形是一个结构不变的等价平移 m 序列, 原 m 序列与其等价平移 m 序列进行模二和, 其结果是一个结构不变的等价平移 m 序列, 在该序列中 -1 的个数比 +1 的个数多 1, 因此按式 (4) 运算结果为 $-\frac{1}{TP}$ [4]。式 (5) 对应的 m 序列自相关系数波形如图 4 所示。

通过 m 序列自相关系数波形图可以看到, 如果两序列之间的时延不为长度周期的整数倍, 则相关系数总小于 1, 反之则等于 1。GPS 信号接收机正是利用了这一原理来捕获、识别不同卫星的信号 [5]。

2 GPS 卫星的伪随机码

GPS 卫星发射的导航定位信号包括两个载波, 两个伪随

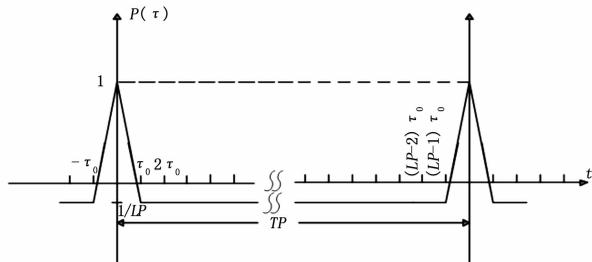


图 4 m 序列自相关系数波形图

机码 (C/A 码和 P 码, C/A 码民用, P 码军用) 和一个 D 码, 这里只对 C/A 码进行介绍。

C/A 码属于一种复合码被称为 Gold 码, 由美国学者 R. Gold 提出, 它由两个周期和速率相同而码元结构不同的 m 序列 $G_1(t)$ 和 $G_2(t)$ 组合而成。C/A 码发生器示意图如图 5 所示。

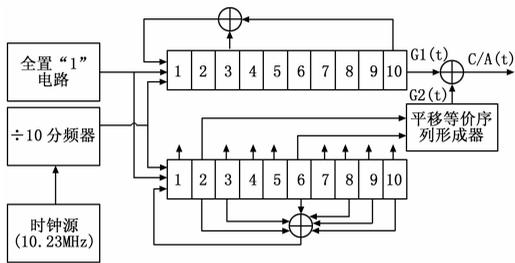


图 5 C/A 码发生器示意图

两个 m 序列 $G_1(t)$ 和 $G_2(t)$ 的特征多项式分别为:

$$G_1(x) = 1 + x^3 + x^{10} \quad (6)$$

$$G_2(x) = 1 + x^2 + x^3 + x^6 + x^8 + x^9 + x^{10} \quad (7)$$

$G_1(t)$ 和 $G_2(t)$ 两个 m 序列由于采用 10 级移位寄存器, 所以均有 1023 个码元。 $G_1(t)$ 采用移位寄存器的末级输出。 $G_2(t)$ 选择其中两级作模二和运算后输出, 如图 5 所示选择了第 2、第 6 级作模二和运算。 $G_2(t)$ 移位寄存器的每一级输出相互都是结构不变的等价平移 m 序列, 两个结构不变的等价平移 m 序列进行模二和运算, 其结果还是一个结构不变的等价平移 m 序列。选取中间不同的两级寄存器进行模二和运算, 其平移量存在不同。因此 $G_2(t)$ 选取不同的两级抽头作模二和运算, 最终会产生不同 GPS 卫星各自的 C/A 码^[6]。

3 基于 MATLAB 的 C/A 码仿真实现

本文采用 MATLAB 仿真模拟 $G_1(t)$ 、 $G_2(t)$ 和 C/A 码的产生。由于不同 GPS 卫星的 $G_2(t)$ 选取不同的两级抽头作模二和运算, 因此各颗卫星的 $G_2(t)$ 输出相对于移位寄存器末级输出的平移量 (时延) 是不同的。本文采用 1×37 的矩阵来构建不同卫星 $G_2(t)$ 的输出平移量。仿真代码如下所示:

```
%构建 37 颗 GPS 卫星的 G2(t) 输出平移量矩阵
g2_delay = [5,6,7,8,17,18,139,140,...948,950];
```

```
%构建 G1(t)
Reg1 = -1 * ones(1,10);
for i = 1:1023,
% G1(t)采用移位寄存器的末级输出
```

```
g1(i) = Reg1(10);
% 第 3、第 10 级寄存器的输出模二
feedback1 = Reg1(3) * Reg1(10);
% 寄存器逐级右移
Reg1(2:10) = Reg1(1:9);
% 第 3、第 10 级寄存器的输出模二和后反馈到第 1 级寄存器
Reg1(1) = feedback1;
end
```

```
%构建 G2(t)
Reg2 = -1 * ones(1,10);
for i=1:1023,
g2(i) = Reg2(10);
feedback2 = Reg2(2) * Reg2(3) * Reg2(6) * Reg2(8) * Reg2(9) * Reg2(10);
Reg2(2:10) = Reg2(1:9);
Reg2(1) = feedback2;
End
```

```
%输入卫星编号
num_sta = input('请输入卫星编号');
%获得平移量
g2_timeslice = g2_delay(1,num_sta);
%根据平移量得到 G2(t)最终输出
g2_shift(1:g2_timeslice) = g2(1023 - g2_timeslice + 1:1023);
g2_shift(g2_timeslice + 1:1023) = g2(1:1023 - g2_timeslice);
g2 = g2_shift
```

```
% G1(t)与 G2(t)模二和得到 C/A 码
ca = g1 .* g2;
```

在得到 C/A 码的基础上, 通过将二进制信号波形转换为二进制符号序列并绘制二维图形, 可得到对应 GPS 卫星在一个周期内的 C/A 码, 如图 6 所示。



图 6 C/A 码的二进制符号序列

4 基于 FPGA 的 C/A 码仿真实现

本文采用 Xilinx 公司的 SPARTAN6 系列芯片 XC6SLX45, 在 Xilinx ISE Design Suite 12.2 平台上利用 VHDL 语言首先构建初始状态为“1”的 D 触发器元件, 并以该元件为基础构建 $G_1(t)$ 、 $G_2(t)$ 和 C/A 码生成电路。对于 $G_2(t)$ 信号, 选择第 2 级、第 6 级寄存器输出产生。C/A 码生成器代码如下所示。

```
--D 触发器元件生成程序
entity D_CODE is
```

```

port(d,clk: in std_logic;q:out std_logic);
end D_CODE;
architecture Behavioral of D_CODE is
begin
process(clk)
variable i : std_logic:=0';
begin
if(clk'event and clk = '1') then
case i is
--当 i 初值为 0,触发器第一拍输出 1
when '0'=> q<='1'; i:='1';
--第一拍之后触发器的输出由输入决定
when others=> q<=d; end case;
end if;
end process;
end Behavioral;

```

--G1(t)、G2(t)和 C/A 码生成程序

```

entity D_GPS_CODE is
port(clk:in std_logic;g1:inout std_logic;a1:inout std_logic;g2:in-
out std_logic;a2:inout std_logic;ca:out std_logic);
end D_GPS_CODE;

```

```

architecture Behavioral of D_GPS_CODE is
component D_CODE
port(d,clk: in std_logic;q:out std_logic);
end component;

```

```

signal q1:std_logic_vector(0 to 10);
signal q2:std_logic_vector(0 to 10);

```

```

begin
a1<= q1(3) xor q1(10);
q1(0)<= a1;

```

--调用 D 触发器元件

```

dff1_1: D_CODE port map(q1(0),clk,q1(1));
dff1_2: D_CODE port map(q1(1),clk,q1(2));
dff1_3: D_CODE port map(q1(2),clk,q1(3));
dff1_4: D_CODE port map(q1(3),clk,q1(4));
dff1_5: D_CODE port map(q1(4),clk,q1(5));
dff1_6: D_CODE port map(q1(5),clk,q1(6));
dff1_7: D_CODE port map(q1(6),clk,q1(7));
dff1_8: D_CODE port map(q1(7),clk,q1(8));
dff1_9: D_CODE port map(q1(8),clk,q1(9));
dff1_10: D_CODE port map(q1(9),clk,q1(10));

```

--G1(t)信号

```
g1<=q1(10);
```

```
a2<= q2(2) xor q2(3) xor q2(6) xor q2(8) xor q2(9) xor q2
```

```
(10);
```

```
q2(0)<= a2;
```

--调用 D 触发器元件

```

dff2_1: D_CODE port map(q2(0),clk,q2(1));
dff2_2: D_CODE port map(q2(1),clk,q2(2));
dff2_3: D_CODE port map(q2(2),clk,q2(3));

```

```

dff2_4: D_CODE port map(q2(3),clk,q2(4));
dff2_5: D_CODE port map(q2(4),clk,q2(5));
dff2_6: D_CODE port map(q2(5),clk,q2(6));
dff2_7: D_CODE port map(q2(6),clk,q2(7));
dff2_8: D_CODE port map(q2(7),clk,q2(8));
dff2_9: D_CODE port map(q2(8),clk,q2(9));
dff2_10: D_CODE port map(q2(9),clk,q2(10));

```

--G2(t)信号

```
g2<=q2(2) xor q2(6);
```

--C/A 码

```
ca <= g1 xor g2;
```

```
end Behavioral;
```

在该程序的基础上分配好输入输出管脚后可下载实现 C/A 码硬件生成器。本文利用 ISE 自带的仿真器 Isim, 添加激励源后生成的 C/A 码仿真结果如图 7 所示。

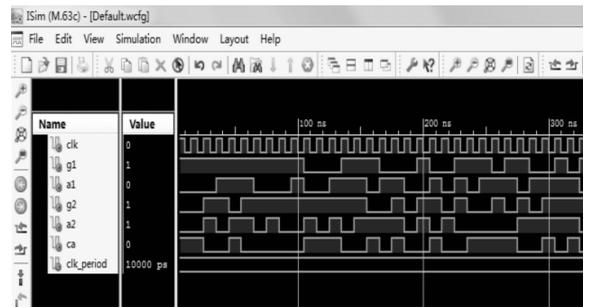


图 7 FPGA 上 C/A 码生成器仿真结果

5 结束语

GPS 卫星发送的 D 码即数据码, 其速率较低, 为 50 bit/s, 采用宽带的 C/A 码对其进行调制后实现 D 码扩频, 而增大频宽, 信号的信噪比会降低, 因此 GPS 卫星信号几乎淹没在各种电磁噪声之中, 要想捕获、识别乃至跟踪它都非常困难。通过以上仿真手段较好地模拟出 GPS 的 C/A 码形成过程和信号样式, 有助于对 GPS 工作原理、卫星信号捕获和欺骗式干扰技术的研究^[7]。

参考文献:

- [1] 雷武虎. 卫星导航定位原理与干扰 [M]. 北京: 解放军出版社, 2010.
- [2] 徐绍铭, 张华海. GPS 测量原理及应用 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2008.
- [3] Kaplan E D, Hegarty C J. GPS 原理与应用 [M]. 2 版. 寇艳红, 译. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [4] 李明峰, 冯宝红. GPS 定位技术及其应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [5] 李亚峰, 王新龙. 一种 GPS 软件接收机信号快速捕获算法研究 [J]. 航空兵器, 2013, 1: 20-26.
- [6] 陈科, 王仕成. 弱信号条件下 GPS 导航技术综述 [J]. 第二炮兵工程学院学报, 2012, 26(3): 90-95.
- [7] 葛含益, 李伟. 武器装备论证仿真模型规范体系总体设计研究 [J]. 军事运筹与系统工程, 2008, 22(3): 50-55.