

基于 FPGA 的北斗三号卫星 B2a 码发生器实现

臧志斌,夏传福,吴小鸥,马 军,傅 宁

(国网思极神往位置服务(北京)有限公司,北京 102211)

摘 要:卫星信号捕获和跟踪中,本地复现的测距码具有举足轻重的地位。针对于中国新发射的北斗三号卫星,提出了在 FPGA 内实现 B2a 信号测距码发生器的方法。以北斗三号卫星 B2a 的测距码为研究对象,详细解释了 B2a 测距码发生器的设计原理,其中包含 Weil 码以及 Gold 码发生器的关键模块分析,利用 FPGA 模块化地设计了可扩展的 B2a 测距码发生器模块,通过预留的寄存器初始化接口,可以实现不同 PRN 号卫星的测距码,解决了产生任意卫星号测距码的复杂问题,对于北斗三号导航接收机设计具有一定的参考意义。

关键词:北斗三号;B2a;测距码;现场可编程逻辑门阵列;伪随机码;分层码;导频通道

中图分类号:TN961

文献标识码:A

DOI: 10.19358/j.issn.2096-5133.2020.04.011

引用格式:臧志斌,夏传福,吴小鸥,等.基于 FPGA 的北斗三号卫星 B2a 码发生器实现[J].信息技术与网络安全,2020,39(4):58-62.

Implementation of Beidou-3 satellite B2a code generator based on FPGA

Zang Zhibin, Xia Chuanfu, Wu Xiaou, Ma Jun, Fu Ning

(State Grid ShenWang LBS(Beijing) Co., Ltd., Beijing 102211, China)

Abstract: The local copy ranging code is of great importance to satellite signal acquisition and tracking. According to the newly launched Beidou-3 satellites in China, a method to realize the B2a signal ranging code generator by FPGA was proposed. Based on B2a signal ranging code generator of Beidou-3, the design principle of B2a ranging code generator was explained in detail, including the analysis of key modules of Weil code and Gold code generator. A scalable Beidou-3 ranging code generator was designed and implemented by using FPGA, through the reserved register initialization interface, the ranging codes of different PRN satellites can be generated, and the complicated problem of generating any satellite ranging codes can be solved. The design has certain reference meaning for the design of the navigation receivers of Beidou-3.

Key words: Beidou-3; B2a; ranging code; FPGA; PRN code; hierarchical code; pilot channel

0 引言

在 2017 年 11 月 5 日和 2018 年 1 月 12 日,中国成功发射北斗卫星系统的第 24、25、26、27 颗卫星,标志着我国“第三步”的全球组网新时代的开启。2018 年 11 月中旬,中国发射的两颗北斗三号卫星,使北斗三号基本系统完成组网,从而标志着北斗三号基本系统建设已经完成,并且开始提供全球服务^[1]。截止到 2019 年 9 月,我国已经完成了 25 颗北斗三号卫星的发射,可对周边包括“一带一路”的国家提供卫星导航服务;而到 2020 年,我国总拟发射北斗三号卫星 35 颗,能够真正地将北斗导航系统推向全球^[2]。北斗三号导航卫星系统的定位精度为 2.5~5 m,测速精度为 0.2 m/s,授时精度

为 20 ns,每次短信字数也相应增加^[3-4]。

北斗三号卫星较之前两代卫星区别不仅在于卫星组网从区域走向全球,而且在载荷、星间链路、激光通信等方面也有进步。另外,北斗三号系统在频点上也做了一些调整,能够和 GPS 的民用频点兼容使用^[5]。B2a 是目前空间接口控制文件公开的播发民用信号之一,其调制方式兼容 GPS L5。对于 B2a 信号的研究,不仅有利于北斗三号的推广使用,提高定位精度,还对未来与 GPS 良好互操作性打下基础^[6]。

1 B2a 编码原理

1.1 B2a 信号体制

根据文献[7],B2a 信号结构如表 1,包含导频分量和数据分量双通道调制,并且采用 QPSK(10)

调制方式调制在 1 176.45 MHz 频点上。

B2a 信号采用主码和子码的分层码结构,由主码和子码相异或构成,子码的码元宽度和主码的周期相同,子码码元起始时刻与主码第一个码元的起始时刻严格对齐,时序对应关系如图 1 所示。

表 1 B2a 信号结构

信号	信号分量	载波频率/MHz	调制方式	符号速率/sps	服务类型
B2a	数据分量	1 176.45	QPSK(10)	200	RNSS
	导频分量			0	

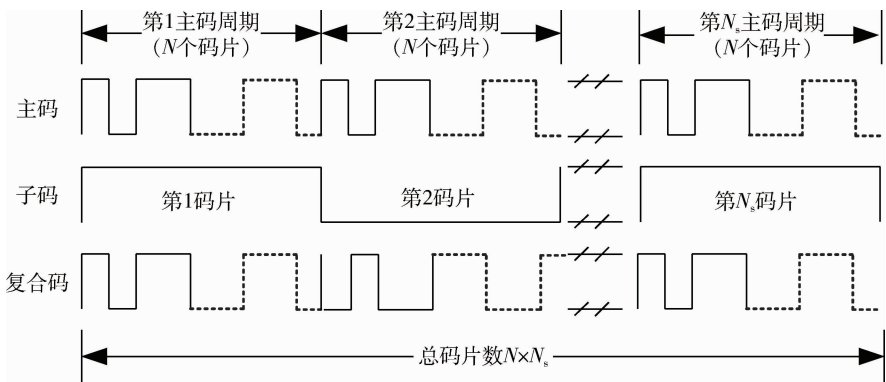


图 1 主码、子码时序关系示意图

B2a 信号主码的码速率为 10.23 Mcps,码长为 10 230,由两个 13 级线性反馈移位寄存器通过移位和模二加生成的 Gold 码扩展得到。B2a 数据分量主码、导频分量主码的生成多项式分别如式(1)、(2)所示:

$$\begin{cases} g_1(x) = 1 + x + x^5 + x^{11} + x^{13} \\ g_2(x) = 1 + x^3 + x^5 + x^9 + x^{11} + x^{12} + x^{13} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} g_1(x) = 1 + x^3 + x^6 + x^7 + x^{13} \\ g_2(x) = 1 + x + x^5 + x^7 + x^8 + x^{12} + x^{13} \end{cases} \quad (2)$$

对于不同卫星,B2a 数据分量的子码相同,采用固定的 5 位码序列作为子码,子码序列为 00010,高位先传;B2a 导频分量的子码码长为 100,由长度为 1 021 的 Weil 码通过截断得到。

1.2 B2a 信号主码结构

由于 B2a 数据分量和导频分量的主码发生器结构类似,因此本文主要分析 B2a 数据分量的主码发生器,导频分量的主码发生器可参考数据分量的主码发生器。根据式(1)可以得到 B2a 数据分量的主码发生器如图 2 所示。与原 B1I、B2I 的 Gold 发生器不同的是^[8],B2a 数据分量主码采用 13 级非线性

性移位寄存器。寄存器 1 的初始值与 B1I、B2I 的一样,所有卫星采用相同的初始值,但是 B2a 寄存器的初始值与之不同,其初始值全为 1;寄存器 2 的初始值根据不同卫星的 PRN 号采用不同的数值,对应的寄存器 2 初始值表在接口文件中给出。

1.3 B2a 信号子码

B2a 数据分量的子码采用固定的 5 位码序列(00010),在实现方式上可以利用在基带中捕获到的信号,设置历元时,在每逢 4 的整数个主码周期将主码码片取反(即与 1 异或),其他主码周期输出主码码片值不变。

B2a 导频分量的子码是采用长度为 1 021 的 Weil 码通过截断得到。Weil 码是一种性能优良的码片,它的相关性能非常好,且具有相对灵活的可选序列长度^[9]。Weil 码的产生是基于有限长的伪随机序列——勒让德序列。它的长度为质数。式(3)定义的是长度为 N 的勒让德序列,对于固定长度的 N,有且仅有一个勒让德序列^[10],B2a 中的 N 代表 1 021。

$$L(k) = \begin{cases} 0, & k = 0 \\ 1, & k \neq 0, \text{ 且存在整数 } x, \text{ 使得 } k = x^2 \bmod N \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

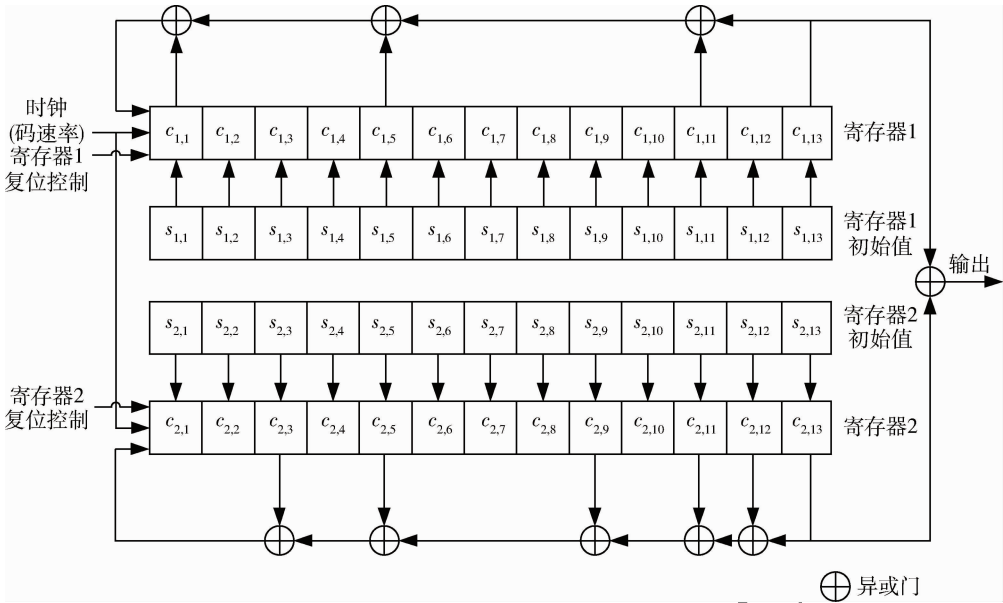


图 2 B2a 数据分量的主码发生器

其中,mod 表示模除运算。

因此,长度为 N 的 Weil 码序列定义如式(4)所示:

$$W(k;w) = L(k) \oplus L((k+w) \bmod N), k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (4)$$

其中, w 表示两个勒让德序列之间的相位差。

B2a 导频分量子码的截取方式为循环截取,即截断序列如式(5)所示:

$$c(n;w;p) = W((n+p-1) \bmod 1021;w), n = 0, \dots, 99 \quad (5)$$

其中, p 为截取点,表示从 Weil 码的第 p 位开始截取,取值范围为 $1 \sim 1021$, w 取值为 $1 \sim 510$ 。

2 B2a 码发生器的设计与实现

2.1 B2a 信号主码

FPGA 内有丰富的触发器资源,非常适合移位操作。根据 B2a 数据分量主码发生器框图,可以得出 $g1$ 和 $g2$ 码的实现过程,式(6)、式(7)分别表示的是 $g1$ 、 $g2$ 寄存器组的更新过程。

$$\begin{cases} C_1 = c_{1,1} \oplus c_{1,5} \oplus c_{1,11} \oplus c_{1,13} \\ c_{1,1} = C_1 \\ c_{1,i} = c_{1,i-1}, i = 2, \dots, 13 \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} C_2 = c_{2,3} \oplus c_{2,5} \oplus c_{2,9} \oplus c_{2,11} \oplus c_{2,12} \oplus c_{2,13} \\ c_{2,1} = C_2 \\ c_{2,i} = c_{2,i-1}, i = 2, \dots, 13 \end{cases} \quad (7)$$

式中, C_1 、 C_2 表示寄存器 1、寄存器 2 的反馈值, $c_{1,i}$ 、 $c_{2,i}$ 分别表示寄存器 1、寄存器 2 第 i 位的内容。在主码发生的起始时刻,寄存器 1 和寄存器 2 同步复位(寄存器 1 的初始值为 111111111111,寄存器 2 的初始值通过配置得到),而后在每一个时钟上升沿来临的时刻,第 2~13 位寄存器内容被前一位寄存器内容更新,第 1 位寄存器内容被反馈值更新。值得注意的是,寄存器 1 在 8190 码片时发生截断。

图 3 所示是主码发生器模块的接口示意图。为了节省 FPGA ROM 的容量,寄存器 2 的初始值在 FPGA 内留有接口,通过外部寄存器配置写入;而寄存器 1 初始值是固定的,可以固化于 FPGA 内。为了后续捕获信号时能够调整主码相位,在 FPGA 内预留有码相位偏移接口,以及三路码片超前码、即时码和滞后码;码片捕获精度为半个码片,因此主码产生时钟为 20.46 MHz。

2.2 B2a 信号子码

根据 B2a 子码的结构与编码原理,不同 PRN 号的卫星,它的截取点 p 和相位差 w 设置不同,对应的 Weil 码是相同的。因此导频子码的生成关键在于生成 Weil 码。由于 Weil 码生成过程包含有模除操作,勒让德序列基于同余理论构建,无法用简单的电路结构实时生成。在本文中,提出一种产生 B2a 导频子码的方案,先利用软件生成 Weil 码,定义一个长度为 N 的一维数组 $L[N]$ 并且所有元素初始化

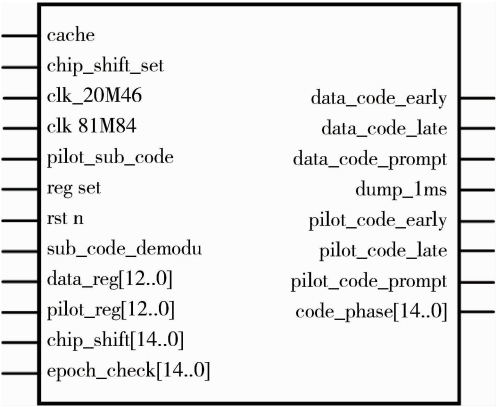


图3 主码发生器模块接口示意图

为0, k 从 $0 \sim N-1$ 遍历, 求出 $t = k^2 \bmod 1\ 021$, 数组 L 在 t 元素处置1。

接着, 把生成好的 Weil 码存储于 FPGA 的 ROM 中, 生成不同 PRN 卫星的导频子码时再根据子码参数(截取点和相位差)实时从 ROM 中读取, 由于导频子码的长度是 100, 因此只需循环读取 ROM 中的 100 个值即可。B2a 导频子码的周期是 100 ms, 同样地, 历元设置后, 当历元计数到 100 ms 的整数倍时, 开始产生导频子码, 再与 B2a 导频主码异或, 即

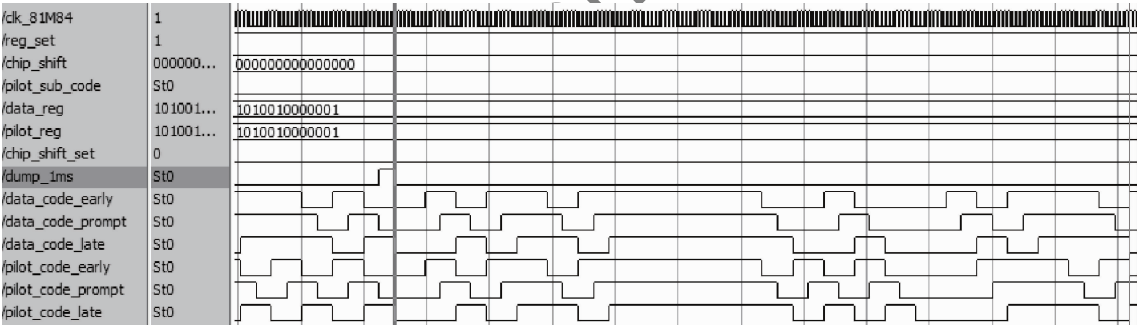


图5 主码发生器仿真波形图

图5中, $data_code_early$ 、 $data_code_prompt$ 、 $data_code_late$ 分别表示数据分量主码的超前码、即时码以及滞后码; 同样地, $pilot_code_early$ 、 $pilot_code_prompt$ 、 $pilot_code_late$ 分别表示导频分量主码的超前码、即时码以及滞后码。超前码与即时码、即时码与滞后码仅相差半个码片的宽度, 因此在此分析超前码片。dump_1ms 表示一主码周期的结束, 当 dump_1ms 下降沿来临之时表示新的主码周期开始产生, 从图中可看出产生的数据分量主码和导频分量主码超前码头 24 码片分别为 (010 110 111 111 001 000 101 110)₂ (或 (26771056)₈)、(010 110 111 111 010 100 011 101)₂ (或 (26772435)₈), 与控制

可产生 B2a 导频组合码, 如图4所示, 在导频子码模块中预留有子码发生器使能时钟接口 (sub_code_enable), 在历元满足上述条件时, 可产生导频子码。

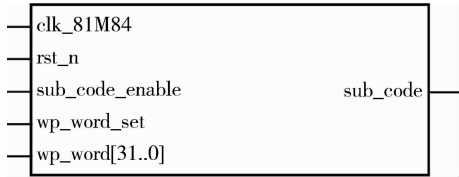


图4 导频子码发生器模块

3 B2a 码发生器的仿真

本次仿真编码工具采用的是 Quartus II 13.1sp1 版本, 芯片选取的是 Altera EP3C120F484C7, 仿真软件采用的是 Modelsim 10.1c, 主码和子码的仿真参数均选取为 PRN 号为 1 号星的参数。

3.1 主码发生器仿真

图5给出了主码发生器模块的仿真波形图。其中, B2a 数据分量、导频分量的寄存器 2 初始值 (pilot_reg、data_reg) 均设置为 1000000100101, 即均设置为 PRN 号为 1 号星的主码参数, 并且设置码偏移 (chip_shift) 为 0。

接口文件中 B2a 数据分量、导频分量主码具体参数表对比, 仿真结果正确。

3.2 导频子码发生器仿真

图6给出的是导频子码发生器模块的仿真波形图。其中, 相位差 w 、截取点 p 分别设置为 123、138, 即仿真 PRN 号为 1 的卫星导频分量子码。

从图6可以看出, 当写入截取点 138 时, 由于在双口 ROM 读取时需要先打一拍之后才能出数据, 因此在 ROM 地址值 (address_a、address_b) 有效之后的第二地址导频子码 (sub_code) 才有效, 可以得到输出导频子码头 24 码片为 (011 010 000 110 011 000 101 000...) (或 (32063050...))₈, 与控制接口

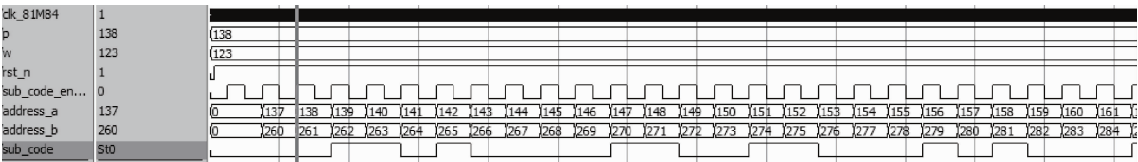


图 6 导频子码发生器模块仿真波形图

文件中 B2a 导频分量子码具体参数表对比,仿真结果正确。

4 结束语

本文根据北斗三号卫星 B2a 信号测距码发生器的原理,利用 Verilog 语言,采用模块化设计方法,给出了基于 FPGA 的 B2a 主码(Gold 码)以及导频子码(Weil 码)的设计方案,并提出了基于历元计数的子码解调方案。仿真结果表明,本设计可以实现北斗三号 B2a 本地复制伪码的产生,并且提供了扩展性接口,为后续 B2a 信号捕获奠定了基础,对于北斗三号接收机研制具有重要意义。

参考文献

[1] 科技导报编辑部. 北斗三号组网卫星首发成功[J]. 科技导报,2017,35(22):5.
[2] 数字通信世界编辑部. 北斗三号全球定位系统启动建设[J]. 数字通信世界,2017(B10):59.
[3] 杨元喜. 北斗卫星导航系统的进展、贡献与挑战[J]. 测绘学报,2010,39(1):1-6.
[4] Information Office of the State Council. China's Beidou Navigation Satellite System[J]. Beijing Review, 2016, 59(28):8-16.
[5] Liu Bi, Teng Yunlong, Huang Qi. GDOP minimum in multi-

GNSS positioning[J]. Advances in Space Research,2017, 7:1400-1403.
[6] 庄新彦,郭莉莉. Compass B2a 与 GPS L5 信号间干扰仿真分析[J]. 全球定位系统,2009,34(3):17-20.
[7] 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 B2a(1.0 版)[S]. 2017.
[8] 王迪,郝士琦,朱斌,等.“北斗”2 代 B1I 信号导航电文分析[J]. 航天电子对抗,2013,29(6):30-32.
[9] Lu Hui. Niu Ruiyao. Generation method of GPS L1C codes based on quadratic reciprocity law[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics,2013,24(2):189-195.
[10] HOFER R, WINTERHOF A. On the arithmetic autocorrelation of the Legendre sequence[J]. Advances in Mathematics of Communications,2017,11(1):237-244.
(收稿日期:2020-01-15)

作者简介:

臧志斌(1974-),男,硕士,高级工程师,主要研究方向:电力芯片研发制造、电力行业信息化、电力工程设计。
夏传福(1983-),男,博士,高级工程师,主要研究方向:地理信息研究。
吴小鸥(1990-),男,本科,工程师,主要研究方向:电力工程、动力电气技术。

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《信息技术与网络安全》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《信息技术与网络安全》编辑部
中国电子信息产业集团有限公司第六研究所