

DOI:10.13875/j.issn.1674-0637.2019-01-0068-09

基于 FPGA 的扩频 OFDM 信号半物理仿真技术研究*

乔永明^{1,2,3}, 邹德财^{1,2,4}, 卢晓春^{1,2,4}

(1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;

2. 中国科学院 精密导航定位与定时技术重点实验室, 西安 710600;

3. 中国科学院大学, 北京 100049;

4. 中国科学院大学 天文与空间科学学院, 北京 101048)

摘要:GNSS(Global Navigation Satellite System)信号体制技术已经取得了较大发展,但仍存在一些固有的技术问题并制约着 GNSS 信号测距精度的提升,为此,各主要 GNSS 服务供应商均开展了下一代新型 GNSS 导航信号体制技术的相关研究。基于 GNSS 扩频调制的思想,将扩频调制技术与 OFDM(orthogonal frequency division multiplexing)调制技术相结合,设计和半物理仿真了一种新型扩频 OFDM 调制的导航信号。研究了扩频 OFDM 信号生成机理;利用 FPGA(field-programmable gate array)技术对扩频 OFDM 信号进行了模块化设计;基于 Xilinx 公司 Virtex-7 芯片对所设计的扩频 OFDM 信号进行了半物理仿真实现。仿真结果表明,设计的扩频 OFDM 信号具备一定的工程可实现性,为后续扩频 OFDM 信号的工程化实现积累了经验并奠定了技术基础,可应用于扩频 OFDM 基带信号开发和研制。

关键词:正交频分复用;扩频;现场可编程门阵列;半物理仿真

Semi-physical simulation research of spread OFDM signal based on FPGA

QIAO Yong-ming^{1,2,3}, ZOU De-cai^{1,2,4}, LU Xiao-chun^{1,2,4}

(1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;

2. Key Laboratory of Precise Positioning and Timing Technology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101048, China)

Abstract: The GNSS(Global Navigation Satellite System) signal system technology has made great progress, but there are still some inherent technical problems which restrict the improvement of the GNSS signal ranging accuracy. For this purpose, all major GNSS service providers have carried out related research on new GNSS navigation signal system technologies of next generation. Based on the idea of GNSS spread modulation, combines spread modulation with OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) modulation, designs and semi-physically simulates a new type of spread OFDM modulated navigation signal. It studies the generating mechanism of spread OFDM signal, the spread OFDM signal is modularly designed with FPGA technology and is implemented semi-physically simulation based on the Xilinx Virtex

* 收稿日期:2018-08-21;接受日期:2018-09-22

基金项目:载人航天创新性预研资助项目(17680601)

作者简介:乔永明,男,硕士,主要从事导航信号设计与实现研究。

-7 chip. The simulation results show that the spread OFDM signal designed has certain engineering feasibility and has accumulated experience and laid a technical foundation for the subsequent realization of the engineering of the spread OFDM signal, which can be applied to the development and research of spread OFDM baseband signal.

Key words: orthogonal frequency division multiplexing; spread; field-programmable gate array(FPGA); semi physical simulation

0 引言

目前,以美国 GPS(Global Positioning System)为代表的全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite Systems,GNSS)已经成为信息时代一个国家或地区重要的基础设施之一,在军用、民用各行业领域得到了广泛应用。GNSS 服务领域的不断拓展也带动了 GNSS 技术的不断进步和持续发展。

信号体制是 GNSS 最重要的技术要素之一,也是联系 GNSS 三大组成部分(空间段、地面段和用户段)的桥梁和纽带,对 GNSS 导航、定位、测速、授时等服务功能的实现和服务性能的提升具有重要意义。

因此,无论在 Galileo 信号体制设计还是在 GPS, GLONASS 现代化过程中,信号体制一直都是被关注的重点和研究的热点。纵观 Galileo 信号体制设计和 GPS, GLONASS 信号体制现代化的过程^[1-4],一些新的思想不断呈现。在信号波形设计方面,从最初的 BPSK(binary phase shift key)调制到 BOC(binary offset carrier)调制,再发展到后来的 MBOC(multiplexed BOC)、Alt BOC(alternate BOC)、TD-AltBOC(time division AltBOC)等调制,在频谱资源有效利用、改善兼容性等方面发挥了重要作用;在扩频码生成方面,从早期的 m 序列、Gold 序列到后来的 Weil 码,扩频码的自相关和互相关性能逐步提高;在信道编码方面,卷积编码、LDPC(low density parity check)码等前向纠错编码以及导频通道的引入都大幅地提高了信号的健壮性。

随着 GPS 和 GLONASS 现代化、北斗和 Galileo 系统建设工程化实施的不断推进和加快,尽早开展下一代新型 GNSS 信号体制的设计、论证和试验研究,有利于增强 GNSS 系统的服务性能和自身优势,提高国际竞争力。

近几年,正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing,OFDM)调制技术在数字电视、移动通信等领域得到了较为广泛的应用和发展。OFDM 调制技术的核心思想是将信道分成若干正交子信道,将高速数据信号转换成并行的低速子数据流,调制到每个子信道上进行传输。正交信号可以通过在接收端采用相关技术来分开,这样可以减少子信道之间的相互干扰(ICI)。每个子信道上的信号带宽小于信道的相关带宽,因此每个子信道可以看成平坦性衰落信道^[5]。

作者正是基于 GNSS 扩频思想,将 OFDM 调制技术用于新型 GNSS 导航信号体制,设计了一种具有抗多径性能的新型扩频 OFDM 调制的导航信号。文中给出了新型导航信号的生成机理以及关键模块的 FPGA(field-programmable gate array)实现。同时,利用 Xilinx 公司的 Virtex-7 芯片进行了软件仿真,最后给出了仿真结果,证明设计的新型扩频 OFDM 调制的导航信号具备一定的工程实现性。

1 扩频 OFDM 信号生成机理

扩频 OFDM 信号主要实现扩频码与 OFDM 信号的结合,本节通过结合 OFDM 信号的优势与扩频码的优势,设计出了一种保留了 OFDM 信号子载波正交性与扩频码良好自相关性、互相关性的扩频 OFDM 信号。扩频 OFDM 信号的生成包括映射、OFDM 调制、循环前缀、扩频码的生成和扩频 OFDM 调制模块。对输入的信息流进行映射、OFDM 调制与添加循环前缀,生成 OFDM 信号;再将 OFDM 信号与已生成的扩频码进行扩频调制,生成扩频 OFDM 信号。

①映射

对于输入的导航电文信息,采用 BPSK 的调制方式。BPSK 是一种矢量调制,它将输入的比特映射到一

个复数平面上,形成复数调制符号。因此在 BPSK 映射平面上,有两个点,共表示两种矢量状态^[6]。

BPSK 调制可表示为

$$e_{\text{BPSK}} = \begin{cases} A\cos(\omega_c t) & \text{发送码元为 } 0 \\ -A\cos(\omega_c t) & \text{发送码元为 } 1 \end{cases} \quad (1)$$

导航电文经过映射调制可以满足信息速率的要求,且具有抗噪声能力等优点。

② OFDM 调制

对输入的映射调制符号进行串并转换,将并行的符号数据流再调制到不同的子载波上。一个 OFDM 符号包括 N 个子载波,其输出 OFDM 信号可以表示为:

$$s(t) = \sum_{i=0}^{N-1} d_i \text{rect}\left[t - t_s - \frac{T}{2}\right] \exp\left[j2\pi \frac{i}{T}(t - t_s)\right], \quad -\infty \leq t \leq +\infty, \quad (2)$$

式(2)中, T 表示一个 OFDM 符号的持续时间, $d_i (i = 0, 1, \dots, N-1)$ 表示分配给每个子信道的数据符号矩形窗函数 $\text{rect}(t) = 1, |t| \leq T/2$ 。令式中 $t_s = 0$,忽略矩形函数,并对信号 $s(t)$ 以 T/N 的速率进行采样,即令 $t = kT/N (k = 0, 1, \dots, N-1)$,可得

$$s_k = s(kT/N) = \sum_{i=0}^{N-1} d_i \exp\left[j \frac{2\pi ik}{N}\right], \quad (3)$$

式(3)中,与离散傅里叶逆变换(inverse discrete Fourier transform, OFDM)运算的表达式一致,说明 s_k 可通过 d_i 的 IDFT 得到^[7]。那么接收端解调可通过离散傅里叶变换(DFT)恢复出发送的数据。

③ 循环前缀

循环前缀(CP)在 OFDM 系统有着很重要的作用,它可以有效地对抗多径时延扩展^[8]。一般情况下,为了消除由于多径造成的子信道间干扰(ICI),可以在 OFDM 符号之间插入循环前缀信号,即将每个 OFDM 符号的后 T_g 时间内的样值复制到 OFDM 符号的最前面,其中 T_g 为循环前缀的长度。这样的话,如果时延扩展小于循环前缀的长度,符号间干扰(ISI)只会对接收信号循环前缀内的前 T_g 时间内的取样值形成干扰,只要将其去掉,就可以完全消除 ISI 的影响,那么多径就不会对下一个 OFDM 符号造成干扰。

④ 扩频码的生成

在 GNSS 导航系统中,扩频码为平衡 Gold 码,利用 Gold 码具有良好的自相关和互相关特性以提高检测能力并防止多址干扰。平衡 Gold 码是由两个 m 序列复合而成,每改变两个 m 序列相对应的位置可产生一个新的 Gold 序列^[9]。使用的扩频码是基于 Gold 码而来的,设计使用一种周期为 $1\ 023$ (即 $2^{10}-1$)码片的 Gold 码,是由两个 10 级最长线性反馈移位寄存器序列产生,Gold 码发生器如图 1 所示。

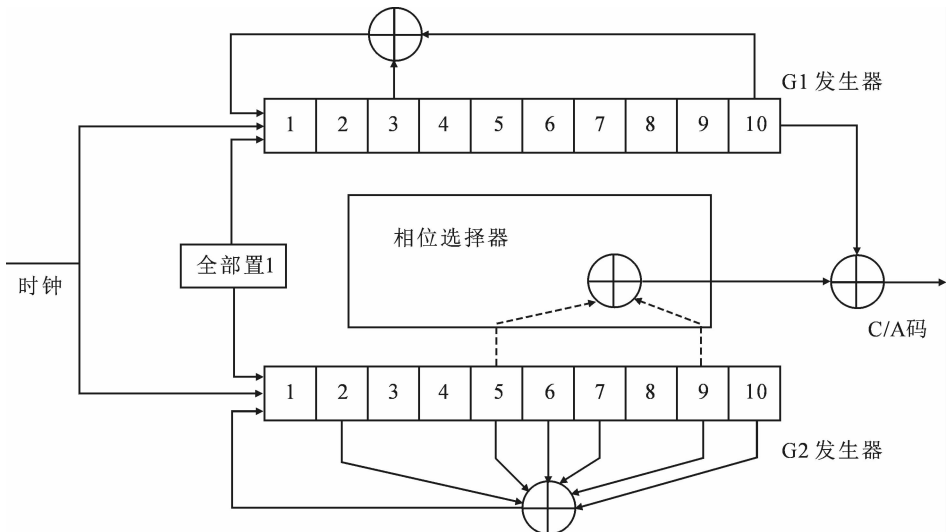


图 1 Gold 码发生器

两个 m 序列的特征多项式分别为:

$$G_1(x) = 1 + x^3 + x^{10}, \tag{4}$$

$$G_2(x) = 1 + x^2 + x^5 + x^6 + x^7 + x^9 + x^{10}, \tag{5}$$

式(4)和(5)中, G_1 和 G_2 为 10 级优选对, G_1 和 G_2 的初始相位固定值为 0X3FF,文中所用的扩频码与 Gold 码产生方式一样,在生成的 Gold 码基础上截取了前 1 000 个码片,扩频码的码速率为 0.1 MHz,由于码长为 1 000,故码周期为 10 ms。

⑤ 扩频 OFDM 调制

目前,OFDM 与扩频码的结合方式主要有 3 种方案:多载波码分多址(MC-CDMA),多载波直接序列码分多址(MC-DS-CDMA)和多音频码分多址(MT-CDMA)。

3 种系统的调制方式有所区别,在 MC-CDMA 系统中,不同的子载波上发送同一个符号,OFDM 中不同的子载波携带不同的信息符号。在 MC-DS-CDMA 系统中,输入的信息符号先进行串并转换,对并行的数据用相同的扩频码进行扩频,再调制到不同的子载波上。在 MT-CDMA 系统中,对输入的信息符号进行 OFDM 调制,然后再经过较长的扩频码进行扩频^[10]。

MC-CDMA 系统方案有频率分集的效果,可提高频谱效率以及在抗频率选择性衰落方面有较好的性能。MC-DS-CDMA 系统每个子载波上传输不同扩频码的同一个信息符号。MT-CDMA 系统有较大的扩频增益,系统也可以容纳更大的用户容量。但因为在 OFDM 调制后扩频,破坏了 OFDM 子载波的正交性,因此系统的抗干扰能力较低^[11]。

现有扩频系统使用的扩频码具有非常优秀的自相关与互相关特性。同时 OFDM 由于子载波的存在和循环前缀的添加具有优秀的抗多径能力。目前普遍使用的结合方式是在 OFDM 调制之前,对数据使用扩频码进行扩频。这种情况下需要考虑到:与 OFDM 数据进行扩频之后,再经过 OFDM 调制,扩频码的自相关特性和互相关特性会受到一定程度的影响,对最终系统的时延估计精度造成影响;同时,经过扩频之后,对原有的 OFDM 系统性能也会造成影响。而上面这 3 种结合方式虽然有所不同,但都是扩频码和 OFDM 符号扩频之后再进一步进行 OFDM 调制。这样的结合方式会使扩频码的自相关性和互相关性受到破坏以及破坏了 OFDM 子载波的正交性,同时会对 OFDM 系统抗多径造成影响。

考虑以上不足,我们提出一种新的结合方式,扩频码与 OFDM 符号相结合的扩频 OFDM 信号发射框图如图 2 所示。

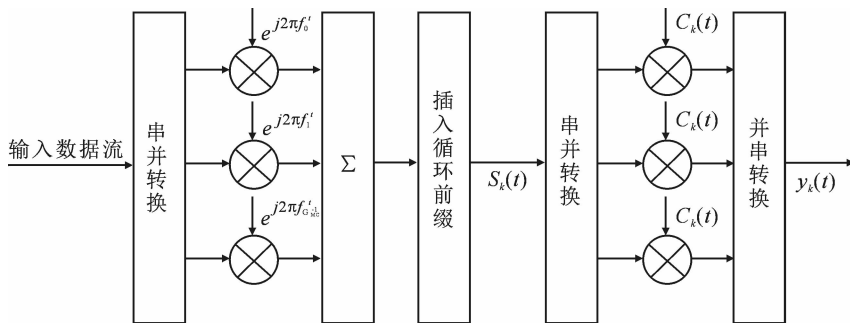


图 2 扩频 OFDM 信号发射框图

扩频调制原理:输入的信息数据流先串并转换后,进行 OFDM 技术的多载波调制,对生成的 OFDM 符号添加循环前缀,再经过串并转换,并行符号数据流用相同的扩频码进行扩频,最后进行并串转换生成新的扩频 OFDM 符号。

该组合方式的优点是:扩频码不经过 OFDM 调制,而且和 OFDM 数据分开,使扩频码的自相关特性和互相关特性最大限度地得到保留,又不破坏 OFDM 子载波的正交性。同时使用 OFDM 可以提高电文数据传输速率以及利用 OFDM 的抗多径特性来减小时延对系统的影响。而且这样设计的调制方式相比于 MC-CDMA,MC-DS-CDMA 和 MT-CDMA 更加易于实现,系统复杂度更低。

2 基于 FPGA 的扩频 OFDM 信号模块化设计

本节通过时钟高精度模块、BPSK 映射、OFDM 调制设计、循环前缀模块与扩频 OFDM 产生模块的设计,在硬件层次上实现了扩频 OFDM 信号的模块化设计,完成了基于 FPGA 的扩频 OFDM 信号模块化的设计。

2.1 时钟信号产生与高精度同步模块

由于导航信号的设计采用扩频调制,好质量的信号对接收机的载波、伪码跟踪有着非常关键的作用,伪码测距是通过比较本地码与接收码之间的相位差来测得,因此伪距测量精度与时钟同步精度之间有着密切的关系。

硬件研发平台提供的外部时钟为 200 MHz,它作为时钟信号产生模块的初始时钟,生成系统所需要的各种工作频率。按照系统设计,扩频码的周期为 10 ms,码长为 1 000,码速率为 0.1 MHz,OFDM 调制为 64 个子载波,循环前缀为 OFDM 符号的 1/4。一个 OFDM 码片包含 2 个周期的扩频码,因此扩频前的数据速率为 50 Hz。由于扩频之后需要串并转换,因此输出的扩频 OFDM 符号速率为 $0.1 \times 80 = 8$ MHz。这里对 OFDM 符号扩频采用了单比特扩频方式,即把 8 位的 OFDM 符号转变为 1 位的数据流进行扩频,因此 OFDM 符号串并转换后的速率为 $50/8 = 6.25$ Hz,OFDM 符号速率为 $50/8 \times 80 = 500$ Hz。另外还有一个 1 PPS 信号,1 PPS 信号作为时钟模块的输入信号,同步工作时钟。

FPGA 所提供的 PLL(phase locked loop)模块,可以用来进行时钟延时消除、频率倍频分频、时钟相位调整等功能。它由鉴相器、环路滤波器和压控振荡器 3 部分组成,PLL 利用外部输入的参考信号控制环路内部振荡信号的频率和相位,可以实现输出信号频率对输入信号频率的自动跟踪。由片外晶振提供的 200 MHz 时钟通过 PLL 与分频、倍频得到系统所需的所有时钟信号。首先通过 PLL,产生一个 32 MHz 的中频时钟信号和 8 MHz 扩频 OFDM 符号时钟信号,0.1 MHz,500 Hz,50 Hz,6.25 Hz 时钟信号用 8 MHz 的时钟信号分别通过计数器进行 80,16 000,160 000,1 280 000 分频产生。由于 32 MHz 的中频时钟信号与 8 MHz 的扩频 OFDM 符号时钟信号通过 PLL 产生,因此这两个时钟之间具有比较高的同步性。对于 0.1 MHz,500 Hz,50 Hz,6.25 Hz 时钟信号,用 1 PPS 秒脉冲信号进行同步,每当检测 1 PPS 秒脉冲信号上升沿到来的时候,对计数器重新置 0 以及对产生的时钟信号重新置 1,以此保证产生的时钟信号不会因时间的问题而出现较大的延迟,达到高精度同步的要求。

2.2 BPSK 映射

Matlab 产生的导航电文存储在 .coe 文件,在 FPGA 中导入 .coe 文件,即可把导航电文存储在 FPGA 的 ROM 中,用查找表的方式,寻址将导航电文以 500 Hz 的时钟读出。根据 BPSK 调制原理,在 FPGA 设计中,采用直接映射的方式,即输入数据如果为 1,则映射后的数据实部为 0X40;输入数据如果为 0,则映射后的数据实部为 0X60,映射后的数据虚部均为 0X00。映射后的数据格式为 8 位:1 位符号位,1 位整数位,6 位小数位,负数用补码表示。

2.3 OFDM 调制快速傅里叶逆变换(IFFT)设计

根据使用要求,对快速傅里叶逆变换(FFT)核的参数进行相应的设置。IFFT(inverse fast Fourier transform)的运算模块设计选用 Xilinx 公司的 ISE 平台 v7.1 的 IP 核,因需要对输入数据进行连续性处理,采用流水线结构(Pipelined Streaming I/O)对数据进行连续性处理,比突发式(Radix-4 Burst I/O)模式节省更多的资源,Block RAMs 减少了 6 个,Slice 减少了 2 个。IFFT 变换长度配置为 64,处理数据采用定点类型的数据,可以提高运算的精度。输入输出数据位宽设置为 16 bits,输出顺序为自然顺序(nature order)。

2.4 循环前缀模块

循环前缀模块的实现主要使用两个地址空间为 64 的 RAM 存储 IFFT 模块输出的数据,地址信号由上一级 IFFT 模块输出数据的下标 INDEX 信号提供,循环前缀添加就是上一级的 OFDM 符号的后 16 个数据复制到前 16 个数据当中,最终每个 OFDM 符号形成 80 个数据。硬件实现框图如图 3 所示。

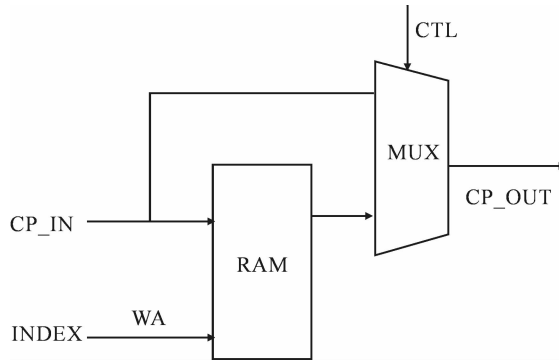


图 3 循环前缀硬件原理图

循环前缀添加具体实现:将输入数据 CP_IN 的前 48 个数据存入到 RAM 中,从第 49 个数据开始输出数据 CP_OUT,地址信号 INDEX 为输入数据 CP_IN 的下标,同时将输入数据 CP_IN 继续存入到 RAM 中,到第 64 个数据输出后,再将 RAM 中的 64 个数据按顺序读出。

2.5 扩频码产生模块

在 Xilinx 公司的 ISE 平台上,根据原理图的输入方式产生扩频码。在该模块中,输入端口 clk,rsta,ena 分别为扩频码时钟,给移位寄存器初始值数据重置信号,产生扩频码的使能信号。移位寄存器 G1 与 G2 的反馈系数分别取 0X409 和 0X6E5,由于第 0 位不参加反馈,所以 G1 中把反馈系数为“1”的第 3 和 10 位进行模 2 相加,得到的结果反馈到移位寄存器 1 中^[12];G2 中把反馈系数为“1”的第 2,5,6,7,9 和 10 位进行模 2 相加,得到的结果反馈到移位寄存器 1 中。移位寄存器 G2 的第 5 和 9 位进行模 2 相加的值与移位寄存器 G1 的第 10 位再模二相加,生成的值即为 Gold 序列值。

通过 rsta 信号可重置移位寄存器的初始值。在 ena 信号使能时,通过移位寄存器 G1 与 G2 的反馈,产生扩频码。设计的扩频码前 10 位 0X3E7。

2.6 扩频 OFDM 产生模块

扩频调制对 OFDM 调制后进行扩频,即对 OFDM 符号进行扩频。本设计实现的是对 OFDM 调制的每个子载波进行扩频,设计实现思路如图 4 所示。

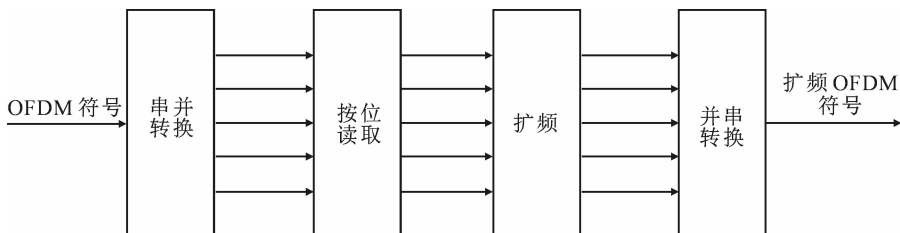


图 4 扩频 OFDM 原理图

设计中 OFDM 符号包含 80 个子载波,符号速率为 500 Hz,扩频码码率为 0.1 MHz,扩频 OFDM 符号速率为 8 MHz。由于 OFDM 符号为 8 bit 的数据,而扩频码为 1 bit,要实现对 OFDM 符号的扩频,本文提出了按位扩频,即对 OFDM 符号进行按位读取,将 8 位的 OFDM 符号的数据流转变为 1 位的数据流,再与扩频码异或或相加完成对数据的扩频。

①串并转换的硬件实现,其中 DATA 为输入数据,DATA_Enable 为输入数据有效信号,DATA_OUT 为 80 路输出数据。DATA_Enable 使能时,将高速率的输入数据 DATA 存到先进先出(FIFO)存储器中,如果输出的低速率并行时钟到来,一个模 80 的计数器开始计数,开始缓存输出 80 路并行数据,当计数器为 79

时,并行输出 DATA_OUT。串并转换的硬件原理图如图 5 所示。

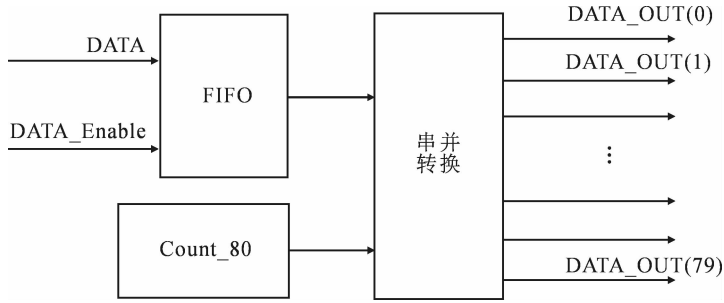


图 5 串并转换硬件实现框图

②按位读取:将并行的符号速率子载波数据,用比特速率时钟来输出,变为比特速率数据流,在读取时,先读低位,后读高位。由于符号数据为 8 位,因此在 FPGA 设计中,比特速率为符号速率的 8 倍,需要一个以比特速率为时钟的模 8 计数器来进行计数比特数据输出。

③扩频的实质就是对信息码与扩频码的异或相加,对于 80 个并行支路,采用相同的扩频码进行扩频。因此在 FPGA 设计时,当信息码到来时,直接对信息码与生成的扩频码进行相加输出。80 个支路的扩频方式与扩频码完全相同,因此在实现时可对扩频模块复用。

④并串转换的硬件实现原理与串并转换类似,只不过不用 FIFO,当并行数据有效时,以串行数据速率为时钟的模 80 计数器开始计数,同时,串行数据开始输出。

3 基于 FPGA 的扩频 OFDM 信号半物理实现与仿真

各个子模块构建完成后,对整个扩频 OFDM 信号进行了构建,在顶层模块对各个底层子模块进行了例化,并进行了联合仿真,整个信号系统构架如图 6 所示。

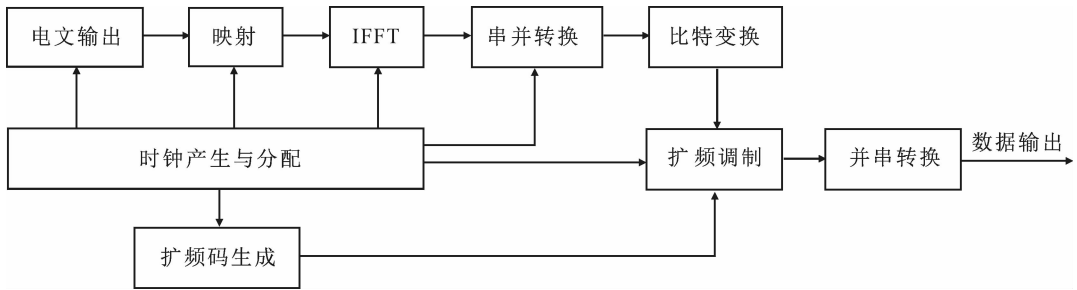


图 6 系统框图

采用 Xilinx 公司的 Virtex-7 系列的 VC7VX485T 芯片对扩频 OFDM 信号进行了半物理实现与仿真。经过 Xilinx XST 综合器综合后,芯片内部资源占用情况,如图 7 所示。

Logic Utilization	Used	Available	Utilization
Number of Slice Registers	9962	607200	1%
Number of Slice LUTs	7922	303600	2%
Number of fully used LUT-FF pairs	6352	11532	55%
Number of bonded IOBs	6	700	0%
Number of Block RAM/FIFO	8	1030	0%
Number of BUFG/BUFGCTRLs	9	32	28%

图 7 扩频 OFDM 信号资源占用情况

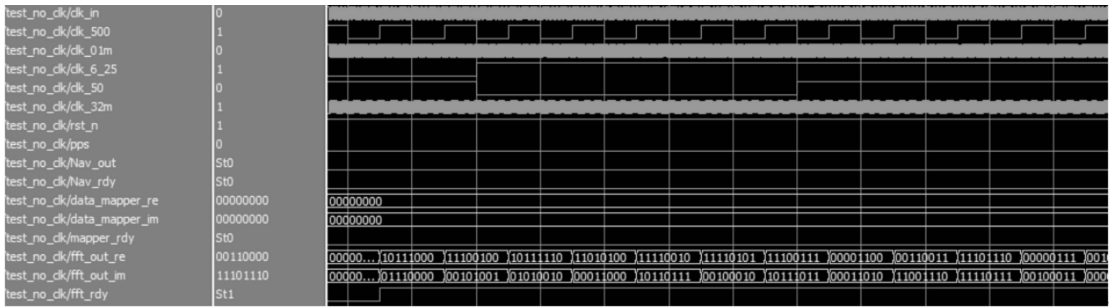


图 11 OFDM 信号仿真图

图 12 为扩频 OFDM 符号输出,从仿真结果可以看出,扩频 OFDM 符号实部与虚部的前 10 位分别为 1111100101,0100101001,仿真结果输出与预计值一致,扩频 OFDM 信号在 FPGA 上得到了正确的实现。

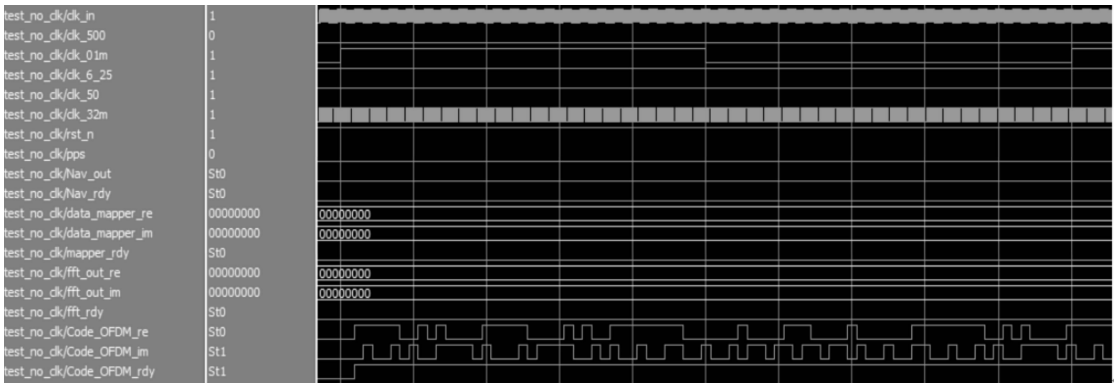


图 12 扩频 OFDM 信号仿真图

4 结语

基于 FPGA 对扩频 OFDM 信号的设计,为后续扩频 OFDM 信号的工程化提供了可靠的技术支持。本文详细叙述了扩频 OFDM 信号的生成机理,通过 FPGA 的模块化设计,最后在硬件上实现了半物理仿真。仿真结果表明,文中提出的 OFDM 与扩频码的结合方式,占用较少的资源,实现复杂度低,具有一定的工程可实现性,为扩频 OFDM 基带的开发与研制奠定了技术基础。

参考文献:

- [1] 陈建军,李峥嵘,王飞雪. GPS 现代化信号体制与系统裕量分析[J]. 全球定位系统,2006,31(6):20-24.
- [2] 朱建锋,安建平,王爱华. GLONASS 系统新一代 CDMA 导航信号体制与性能评估[J]. 数字通信世界,2012(12):69-72.
- [3] 刘卫. GNSS 兼容与互操作总体技术研究[D]. 上海:上海交通大学,2011.
- [4] 林鑫晖. 卫星导航新体制信号跟踪技术研究 with 实现[D]. 北京:北京理工大学,2015.
- [5] 刘鑫亚. 基于循环前缀的 OFDM 干扰抵消技术研究[D]. 北京:北京邮电大学,2015.
- [6] 崔丽珍,樊晓冬,刘乃君,等. 基于 FPGA 的 OFDM 基带发送系统设计与实现[J]. 电视技术,2012,36(21):120-123.
- [7] 陆许明,温伟杰,谭洪舟. 基于 FPGA 的 OFDM 基带软硬件联合验证平台的设计[J]. 电子技术应用,2013,39(3):30-33.
- [8] 史治国. 基于 Xilinx FPGA 的 OFDM 通信系统基带设计[M]. 杭州:浙江大学出版社,2009.
- [9] 刁彦华,姜雪,王晓君. 一种 BDS 卫星导航数字中频信号源的设计[J]. 导航定位学报,2017,5(1):46-50.
- [10] 张骏凌. OFDM-CDMA 系统下行信道性能研究[D]. 成都:电子科技大学,2002.
- [11] 张媛. OFDM 技术及其在 CDMA 中的应用[D]. 北京:北京邮电大学,2007.
- [12] 刘妍君. 一种 GPS 伪卫星基带设计与实现[J]. 现代导航,2014(3):179-182.