

文章编号: 1672-2892(2010)02-0134-05

可配置的多系统兼容导航跟踪通道设计

俞磊, 常青

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘要: 为了提高接收机的兼容性, 降低设计复杂度和成本, 基于 FPGA+GPS 的硬件平台, 研究设计可配置的多系统兼容导航跟踪通道。首先介绍了多系统兼容跟踪通道的框架结构和功能模块, 分析了可配置载波数字控制振荡器(NCO)、伪码 NCO 和码产生器等实现通道灵活可配的关键技术, 最后, 通过 ModelSim 仿真和实测 GPS/COMPASS 信号验证了通道的兼容可配性, 资源分析结果也表明兼容通道相比独立系统减少一半左右的逻辑资源。

关键词: 跟踪通道; 可配置; 数字控制振荡器; 多系统

中图分类号: TN927

文献标识码: A

Tracking channel design of configurable multi-system receiver

YU Lei, CHANG Qing

(School of Electronics and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: To improve the compatibility of the receiver, reduce design complexity and costs, this study researched the tracking channel design of configurable multi-system receiver based on FPGA and GPS hardware platform. The frame construction and function module of the tracking channel were explained firstly. Then the key technologies to implement the configurable channel, such as configurable carrier NCO(Numerically Controlled Oscillator), code NCO and code generator were analyzed. By simulating under the environment of ModelSim software and measuring with the GPS/COMPASS signals, it was verified that the channel was flexible and configurable. Resource analysis also showed that the logic resource was reduced by about a half compared to the independent system.

Key words: tracking channel; configuration; Numerically Controlled Oscillator(NCO); multi-system

GPS 是全球使用最广泛的导航定位系统, 随着俄罗斯的 GLONASS、中国的 COMPASS 和欧盟的 Galileo 导航定位系统的发展和完善, 不远的将来就会出现四大系统并存的格局。单系统存在定位精度不高、完好性较差的缺点, 因此实现多系统组合导航定位是一种必然趋势。目前多系统兼容技术虽然取得了一定的进展, 但研究最多的是 GPS 和 GLONASS 间的组合导航, 在更多系统兼容方面还有很大的研究空间^[1]。

可配置的导航跟踪通道是研制多系统兼容接收机的关键技术之一。目前一般接收机的跟踪通道各系统独立, 有灵活性和兼容性差的缺陷。随着新系统的加入必然导致通道数的增加, 所需硬件资源也随之加大, 同时增加接收机的复杂度和成本^[2]。基于此, 本文研究设计可配置的多系统兼容导航跟踪通道, 每个通道都能根据 GPS/COMPASS 信号特征进行灵活配置, 实现多系统兼容。

1 跟踪通道整体框架设计及功能模块划分

1.1 整体框架设计

可配置的通用导航跟踪通道设计采用软件无线电技术, 基于 FPGA+GPS 的硬件平台来实现, 在控制方式、提高系统运算速度、精度和稳定度等方面有更大的灵活性, 便于系统的整体开发与集成。

基带信号处理实现对卫星信号的捕获、跟踪, 解调数据, 提取原始观测量和卫星导航电文, 送至信息处理模块。本文设计的 12 路跟踪通道完成 GPS L1 C 码和 COMPASS C/P 码除捕获外的基带信号处理。

对于 GPS/COMPASS 系统,其定位原理相似,基带信号处理方法相同,主要区别在于 GPS 系统中不包含 P 码的跟踪。而且双系统 12 通道的功能模块是一致的,各通道在系统总体协议的控制下同步工作。故每个通道原理框图设计如图 1 所示^[3]。

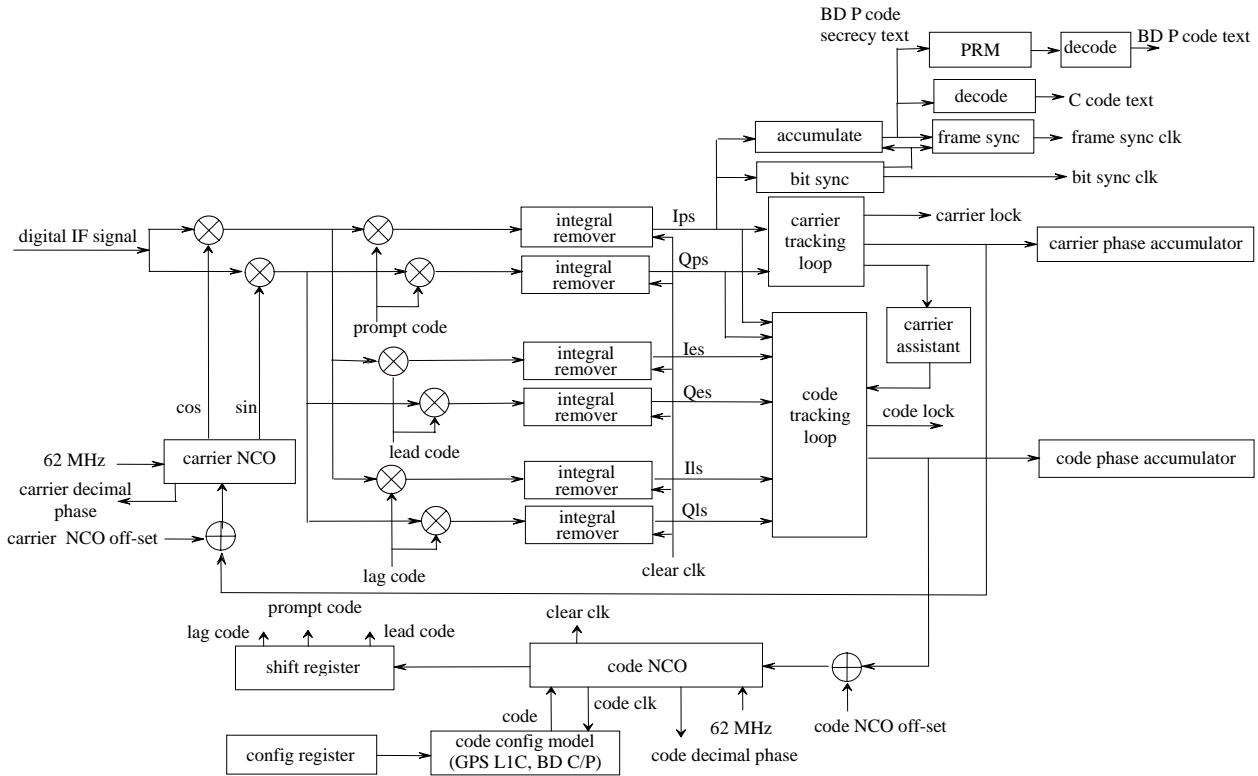


Fig.1 Principle of tracking channel

图 1 跟踪通道原理框图

1.2 功能模块划分

从整机逻辑结构考虑,采用 FPGA 的硬件设计来完成数字下变频、载波剥离、伪码剥离和观测量的提取;多频多星座卫星通道的选配,则采用后端 DSP 软件处理结合硬件电路设置标志控制位的形式来实现。

兼容通道 FPGA 专用数字信号处理器的主要任务:产生系统所需的各种同步时钟;在载波 NCO 和伪码 NCO 控制下,对来自 A/D 采样的 GPS/COMPASS 数字中频信号进行载波和伪码剥离,产生同相正交即时、同相正交超前滞后 1/2 的 6 路积分清除结果;待跟踪锁定后,进行位同步、帧同步,解调出信息数据,并从伪码相位累加器和载波相位累加器中提取伪距观测量。

兼容通道 DSP 专用数字信号处理器的主要任务:控制 FPGA 复位;预置捕获得到的初始载波频率和伪码相位;响应各通道的同步时钟中断,读取 1 ms 积分清除结果;输出载波和伪码频率字至 FPGA,控制完成载波锁频、锁相环和码环的跟踪锁定;读取信息观测量,COMPASS 解调数据的 BCH 译码和解交织,完成电文组帧和传送。通过通道开关、卫星选择标志及通道状态设计实现多通道多星座间的同步和流水控制,通过中断和握手协议实现 FPGA 和 DSP 的通信。

2 可配置的通用导航跟踪通道关键技术

为减少接收机跟踪通道数,降低兼容接收机的复杂度,需要研究和实现参数可配的通用导航跟踪通道,使得每个通道都能根据不同卫星信号特征进行灵活配置,实现多系统兼容。图 2 是可配置的通用导航跟踪通道基本结构,与一般接收机跟踪通道不同的是:该通道在控制寄存器的基础上加了一组配置寄存器,用于载波 NCO、扩频码产生器、扩频码 NCO 的配置。通过对配置寄存器的设置,载波 NCO 和扩频码 NCO 都可具有不同的工作频率,扩频码产生器则可输出不同类型的扩频码,如 GPS 信号的 C/A 码、COMPASS 信号的 C/A 码等^[4-5]。

因此,可配置的通用导航跟踪通道的关键技术就在于载波 NCO、扩频码 NCO 和扩频码产生器的可配置。解

决了这3点的可配置问题就解决了可配置的多系统兼容导航跟踪通道设计的难点,而其它次要问题的解决则相对比较容易。故本文主要对这3个关键点进行深入研究,并对部分需要注意的问题作简要介绍。

2.1 可配置载波 NCO 设计

载波 NCO 是载波跟踪环的核心,它的主要功能是产生本地复制载波信号,同时要测量出接收信号的多普勒频移和载波相位。载波 NCO 设置有频率控制字输入接口,载波环路通过不断调整载波 NCO 的频率字来保持对接收信号载波频率和相位的跟踪。

射频采样后, GPS 和 COMPASS 信号得到不同数字中频,经同一时钟混频,中心频率也不同,转换得到不同的载波频率字。通过接收来自 DSP 环路跟踪模块的载波频率字就可控制载波 NCO 产生对应卫星信号的载波。

GPS 和 COMPASS 使用相同的载波量化比特数和查找表深度。本系统设计的系统时钟为 62 MHz, NCO 的相位累加器字长为 32 bit, 则频率分辨力为 $\delta f = f_s / 2^{32} = 0.014 \text{ Hz}$, 可以非常精确地跟踪载波频率的变化^[6]。

2.2 可配置扩频码 NCO 设计

码 NCO 是码跟踪环的核心,它的主要功能是为再生伪码发生器提供精确的时钟信号,实现对接收信号的码捕获和跟踪。码 NCO 设置有频率控制字,频率控制字负责码率的调整和码相位(延时)的调整。

可配置扩频码 NCO 工作原理与可配置载波 NCO 相同,也是接收 DSP 环路跟踪模块的码频率字,进行码相位累加。当码相位累加器溢出时,产生一个伪码驱动时钟,控制扩频码产生器模块送出一个伪码,同时整周码片计数器加 1。故这里设置码相位累加器为 33 bit,最高位用于伪码的驱动时钟,低 32 bit 为伪码的小数码片相位。

GPS/COMPASS 伪码周期虽然都是 1 ms,但整周码片数不同,需根据 DSP 提供的卫星类型进行设置。一个周期结束时即产生一个 1 ms 时钟,通过移位延时,产生 1 ms 积分清除时钟。同时还需设置相应的码片移位寄存器宽度,产生彼此相差 1/2 码片的超前即时滞后码。

2.3 可配置扩频码产生器设计

最常用的码产生器设计有基于 m 序列发生器和基于 ROM 的两种方案。第一种,基于 m 序列发生器的方案,可配置主要体现在组合方式上;第二种方案,可配置主要体现在通过配置寄存器选择不同的码表上。

第一种方案所需硬件资源很少,但因为不同卫星信号扩频码的结构都不相同,特别是 Galileo 的扩频码结构尚未公布,这就增加用该方案进行可配置扩频码产生器设计的难度,这种方案完全由硬件逻辑实现。

第二种方案把所有卫星的伪码全都存在 ROM 里面,故实现相对简单。缺点是所需的存储资源比较大。本文采用了此方案。为验证 FPGA 的存储资源是否够用,在硬件设计前,需要对所选 FPGA 的资源进行评估。

伪码配置模块的工作流程如下:在捕获成功后,根据 DSP 送的当前通道处理的卫星类型和卫星号,使能相应的码表;然后利用每个通道码 NCO 模块发送的伪码时钟,去查找当前地址对应的伪码,并送至对应的跟踪通道,同时码表地址加一,指向下一个伪码。

由于每次接收机工作时,各个通道跟踪的卫星类型、卫星号不固定,故每个通道都应与所有的码表进行映射,采用合理算法,使得每次工作时,各个通道都能找到相应码表,同时保证所有通道并行处理。

上述 3 个关键技术主要反映在跟踪通道的相关器模块中,待跟踪锁定后,跟踪通道将进行位同步、帧同步和伪距信息提取。GPS/COMPASS 信号位同步和帧同步的原理算法类似,区别主要在于电文速率和帧头不同。

位同步时根据信号类型选择对应的电文速率,对即时支路积分清除结果进行二次积分(积分时间由电文速率决定),利用其结果进行符号判决,获取被调制的数据信号。根据位同步模块送出的电文数据进行帧头匹配,待子帧同步后,把电文信息送至 DSP。

伪距信息从相关器模块的伪码相位累加器提取,故两个系统可完全复用伪距处理模块。

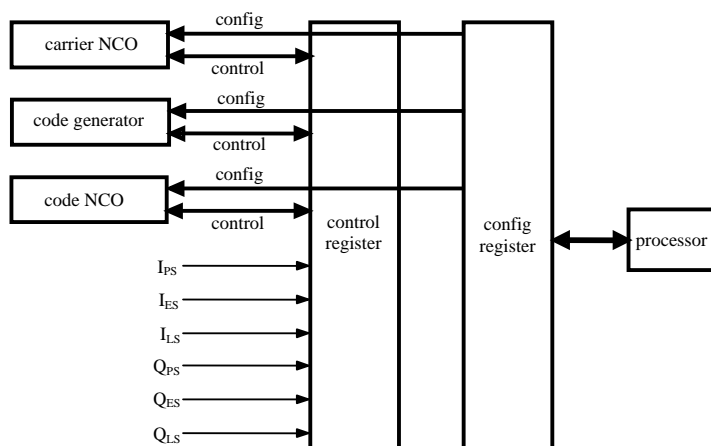


Fig.2 Configurable tracking channel structure

图 2 可配置的跟踪通道基本结构

2.4 资源评估

由于跟踪模块主要消耗逻辑资源,且考虑到将来系统扩展需求,故 FPGA 选用了 Xilinx 公司的 4v1x100,它具有 110 592 个逻辑单元,但只有 4 320 kb 的存储资源,分成 240 个存储块,每个 18 kb。乘法器资源较少,仅有 96 个^[7]。在设计基于 ROM 的码产生器时需要存储资源进行评估。

资源评估时,设计单通道的相关器、DSP 接口模块和伪码发生器模块。在伪码配置模块中存放 GPS L1 频点 32 颗星的 C 码码表,综合得到的资源消耗如图 3(a)所示。

经分析,存放 COMPASS C/A 码码表后,存储资源也有冗余。实际添加 12 路的相关器子模块和 GPS/COMPASS 的 C 码码表后,综合得到的资源消耗如图 3(b)所示。同步和伪距处理模块主要占用逻辑资源,故也能满足要求。通过资源评估可知,在所选 FPGA 设计 12 路兼容跟踪通道,其资源完全能满足需求。

selected device: 4v1x00ff1513-10				selected device: 4v1x00ff1513-10					
number of slices:	237	out of	49 152	0	number of slices:	11 733	out of	49 152	23%
number of slice flip flops:	317	out of	98 304	0	number of slice flip flops:	10 863	out of	98 304	11%
number of 4 input LUTs:	237	out of	98 304	0	number of 4 input LUTs:	20 243	out of	98 304	20%
number of bounded IOBs:	41	out of	964	4%	number of bounded IOBs:	46	out of	964	4%
number of FIFO16/RAMB16s:	4	out of	240	1%	number of FIFO16/RAMB16s:	68	out of	240	28%
number used as RAMB16s:	4				number used as RAMB16s:	68			
number of GCLKs:	1	out of	32	3%	number of GCLKs:	1	out of	32	3%
number of DCM_ADVs:	1	out of	12	8%	number of DCM_ADVs:	1	out of	12	8%
number of DSP48s:	4	out of	96	4%	number of DSP48s:	72	out of	96	75%

Fig.3 Stock assessment of combined channels
图 3 兼容通道的资源评估

相比独立通道,兼容通道最大优点是节省资源。如果每个系统设置 12 路通道,则双系统独立通道需要分配 24 路,且系统间的同一功能模块彼此独立。而兼容通道中双系统复用同一功能模块,故只需分配 12 路,资源消耗肯定会大大减少。作为对比,本文对双系统独立 24 通道的资源进行了评估,如图 4 所示。同样设计了相关器、DSP 接口和伪码发生器模块,比较图 3(b)可发现除存储资源相对减少外,其他资源均大于兼容通道,尤其触发器增加了一半,乘法器资源溢出。

后续同步和伪距处理模块主要消耗逻辑资源。在独立 24 路通道中对应 24 个该模块,而兼容通道中只需设计 12 个,会节省一半左右资源。如果考虑系统扩展,独立通道下,增加卫星频点必然需要增加相应的通道数,而通道数的增加将会增大资源的消耗。但在兼容通道中,增加的系统仍然可以与别的系统复用同一通道,所增加资源会相对减少。

selected device: 4v1x00ff1513-10				
number of slices:	13 350	out of	49 152	27%
number of slice flip flops:	15 452	out of	98 304	15%
number of 4 input LUTs:	23 314	out of	98 304	23%
number of bounded IOBs:	78	out of	964	8%
number of FIFO16/RAMB16s:	48	out of	240	20%
number used as RAMB16s:	48			
number of GCLKs:	1	out of	32	3%
number of DCM_ADVs:	1	out of	12	8%
number of DSP48s:	144	out of	96	150% (*)

Fig.4 Stock assessment of independent channel
图 4 独立通道的资源评估

3 仿真和实测结果

利用仿真工具 ModelSim SE 6.0,得到的仿真结果如图 5、图 6 所示。设各通道卫星号、卫星类型如下:

“Satellite_num={6'd0,6'd1,6'd23,6'd11,6'd10,6'd0,6'd15,6'd2,6'd5,6'd0,6'd1,6'd8},Signal_Type={2'd0,2'd2,2'd1,2'd1,2'd2,2'd0,2'd1,2'd1,2'd2,2'd0,2'd1,2'd2}(0 表示通道空闲,1 表示 GPS 信号,2 表示 COMPASS 信号)”。根据上述设置,GPS 卫星有:1,2,11,15,23;COMPASS 卫星有:1,5,8,10;第 3,7,12 通道是空闲的。仿真结果与设计要求吻合,各个通道输出对应信号的伪码时钟,产生相应的伪码。从仿真图也能直观得出码速率关系。

利用实验室研制的 GPS 信号源中频板发射包含 GPS 1 号和 2 号星的模拟中频信号,进行测试得到如图 7、图 8 所示结果,各类寄存器,标志位只包含 1、2 通道的 1 号星和 2 号星信息。通过示波器观测接 COMPASS 模拟器,由于不能引出伪码,根据帧同步标志来判断是否跟踪上信号,测试结果如表 1 所示,帧同步标志“SYN”均为“1”,说明已经完成对信号的跟踪同步。

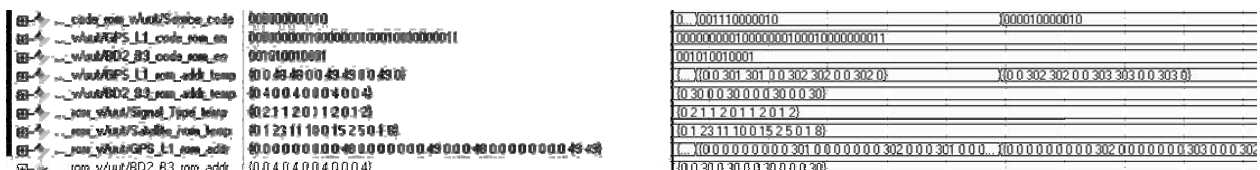


Fig.5 Setup of each channel and operating mode of each code table
图 5 各通道设置和对应码表工作状态

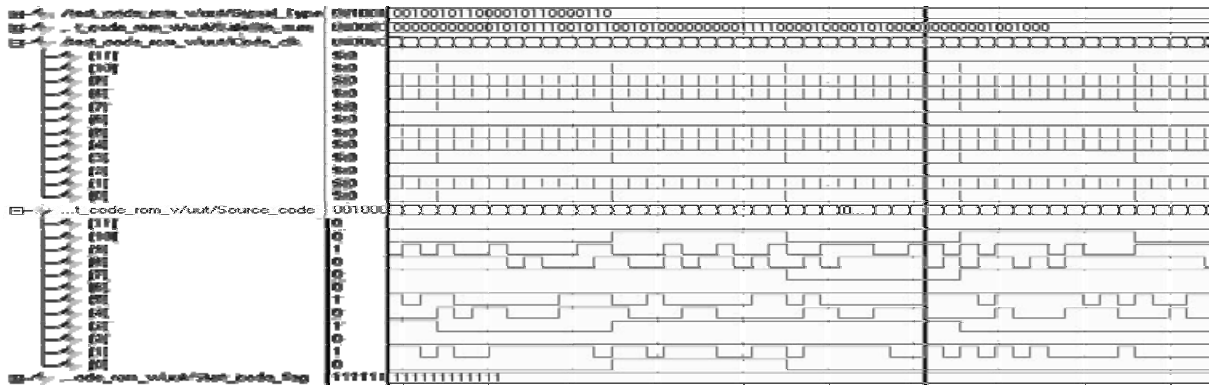


Fig.6 Code clock and code of each channel
图6 各通道伪码时钟输入和伪码输出

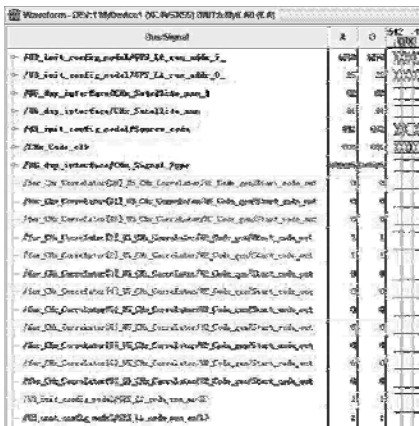


Fig.7 Status of flags and registers
图7 寄存器和标志位状态

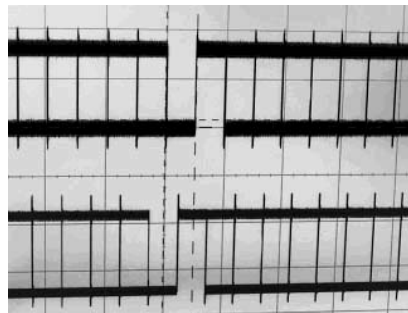


Fig.8 Transmitted and received code observation
图8 发射和接收伪码观测结果

表1 COMPASS 测试结果

Table1 Test results of COMPASS

ch	svid	fid	pseudorange	Doppler	SYN
1	1	2	37 893 644.200	-68.400	1
2	2	2	38 469 255.300	-68.500	1
3	3	2	37 440 240.400	-68.600	1
4	4	2	38 950 689.700	-68.200	1
5	5	2	39 901 478.000	-68.300	1
6	6	4	37 326 008.600	-1 228.500	1
7	7	4	36 087 728.600	-98.700	1
8	11	4	24 117 868.200	1 984.300	1

4 结论

相对于单一系统的导航与定位,多系统组合定位增加了系统兼容性,减少了硬件资源,降低了接收机复杂度及研发成本,并且可用性、可靠性、连续性和精度等更有优势。本文研究的可配置的多系统兼容导航跟踪通道能在GPS信号和COMPASS信号间进行灵活切换,根据卫星信号的特征灵活配置载波频率、伪码速率和伪码等参数,实现对多系统卫星信号的跟踪、电文解调和伪距测量,是研究和开发多系统兼容接收机的关键技术之一,对卫星导航技术和应用的发展有着重要的意义。

参考文献:

[1] 郭斐,张小红,王明华. GNSS多系统集成的兼容性问题[J]. 测绘信息与工程, 2008,33(4):13-15.
 [2] 隋建波,赵静,陈秀芳,等. GNSS软件接收机关键技术研究及实现[J]. 科学技术与工程, 2008,16(8):4467-4472.
 [3] Elliott D,Kaplan Christopher 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] 龚国辉. 可配置多模式卫星定位信号处理技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2005.
 [5] 王尔申,张淑芳,胡青,等. GPS接收机相关器技术研究及FPGA实现[J]. 系统仿真学报, 2008,7(13):3582-3585.
 [6] 史磊,李婧,张怀武. 基于CORDIC算法的数字下变频[J]. 信息与电子工程, 2009,7(3):227-230.
 [7] Xilinx. Virtex-4 Family Overview[DB/OL]. Xilinx Inc. 2006[2009-08-18]. <http://pccorot15.obspm.fr/COROT-ETC/Files/Virtex-4%20family.pdf>.

作者简介:



俞磊(1984-),男,浙江省舟山市人,在读硕士研究生,主要研究方向为卫星导航. email:yulei_1984@163.com.

常青(1962-),男,天津市人,教授,研究方向为信息传输与处理、卫星导航、数模混合集成电路设计.