软件 GNSS 信号模拟器架构与中频信号生成

赵 昀 寇艳红 黄智刚 张其善

(北京航空航天大学 电子信息工程学院，北京 100191)

摘 要：软件 GNSS(Global Navigation Satellite Systems)信号模拟器对于 GNSS 接收机的高效研发将做出重要贡献，因其结构灵活、开放性以及低成本. 以 GPS/Galileo 组合系统为例，讨论了软件 GNSS 中频信号模拟器的架构，主要功能模块包括卫星星座仿真、接收机轨迹生成、传播通道特性仿真(包括电离层模型、对流层模型、多径模型等)、数字中频信号生成. 在此基础上，着重阐述了数字中频信号生成模块的实现，功率谱图及分析结果验证了所生成的信号，包括 GPS L1 C/A，Galileo E1 CBOC(Composite Binary Offset Carrier)，Galileo E5a 和 E5b 信号.

关 键 词：GNSS；软件信号模拟器；数字中频信号；功率谱

中图分类号：TN 967.1

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2009)07-0789-05

Architecture of software-based GNSS signal simulator and implementation of its IF signals generation

Zhao Yun Kou Yanhong Huang Zhigang Zhang Qishan

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

Abstract: The software-based global navigation satellite systems(GNSS) signal simulator would be an enormous asset for the efficient development of GNSS receivers, due to its flexible structure, the possibility for easy updates and changes and low cost. A hybrid GPS/Galileo intermediate frequency(IF) software-based signal simulator was proposed. The architecture and implementation description for it are included. This hybrid IF signal simulator consists of the following main parts, i. e. GPS/Galileo satellite constellation simulation, receiver trajectory generation, propagation and disturbance channel (including the ionosphere model, the troposphere model, the multi-path model and etc.), and GPS/Galileo IF signals generation. Meanwhile, the hybrid GPS/Galileo IF signal generator was presented in detail, which provides the following signals: GPS L1 C/A, Galileo E1 CBOC (composite binary offset carrier), Galileo E5a and E5b signals. Finally, the power spectral density (PSD) curves for the IF signals obtained with the hybrid signal simulator were given. From the PSD point of view, the implementation of the hybrid signal simulator was validated.

Key words: GNSS; software-based signal simulators; digital IF signals; power spectral density

GNSS(Global Navigation Satellite Systems)信号模拟器对于研发和验证阶段的 GNSS 接收机是必需的. 相比直接利用真实卫星信号，信号模拟器能够提供精确可控、可复现的仿真环境以及非正常或不期望的测试条件，使接收机的研发效率得以保证.

正在建设中的 Galileo 系统具有带动卫星导航创新发展的许多潜质，由于仍处于研发阶段，其信号结构、电文格式等仍未被正式确定，目前有关 Galileo 信号的模拟器非常少见. 另一个挑战在于设计支持其与传统导航系统(如 GPS(Global Position System))的组合(又称兼容)GNSS 信号模

收稿日期：2008-06-16

作者简介：赵 昀(1971—)，女，北京人，讲师，yunzhao@buaa.edu.cn.

拟器,用以支持相应的组合接收机的研发.

支持 Galileo 信号的模拟器要求十分灵活,应具有易于更新与扩展的能力,以最大限度地适应系统设计的变化,软件定义(software-defined,简称软件)信号模拟器恰好满足这种需求.限于现有硬件技术水平,完全的软件实现只能达到数字中频级,软件信号模拟器生成的数字中频信号可直接馈入软件接收机,亦可通过 D/A 变换及上变频成为射频信号,从而完全达到硬件模拟器的效果.

本文首先以 GPS/Galileo 组合系统为例,探讨一个完整的兼具通用性与专用性的软件 GNSS 中频信号模拟器的架构.在此基础上,着重描述这一软件模拟器的中频信号生成模块的实现以及生成信号的验证.

1 软件 GNSS 信号模拟器架构

软件 GNSS 中频信号模拟器以 Visual C++6.0 为开发环境在 PC 平台上实现.模拟器提供图形用户界面(GUI,Graphical User Interface)的控制方式,便于用户实现参数配置、数据处理以及结果分析.

软件 GNSS 中频信号模拟器主要包括如下功能模块:

1) GNSS(GPS/Galileo)卫星星座仿真及导航电文生成.对于 Galileo 系统,设计考虑了目前可获得的 Galileo 轨道参数,由于没有有关轨道摄动的信息,目前的轨道模型相对简单,但系统已为此预留进一步扩展的接口,而 Galileo 与 GPS 轨道平面的初始偏移量也是可配置的.至于时间基准问题,Galileo 空间段/用户接口控制文件中定义了 Galileo 系统时与 GPS 系统时的转换模型,相应的模型参数通过 Galileo 导航电文播发.对于 GPS 系统,利用 GPS 星历与历书文件仿真 GPS 星座.

2) 接收机动态轨迹生成.可由用户自定义参数化的运动轨迹,亦可采用来自用户的动态轨迹数据文件.

3) 传播通道特性仿真.包括电离层延迟、对流层延迟、多径效应,以及干扰信号.由于卫星所产生的误差,如星钟误差、星历误差,同样经过信道引入接收机,将此类误差模型包含在此模块.

4) GNSS(GPS/Galileo)数字中频信号生成.这个模块目前提供以下数字中频信号:GPS L1 C/A,Galileo E1 CBOC(Composite Binary Offect Carrier),Galileo E5a 和 E5b,支持更多的信号易于在目前的平台上扩展.

软件 GNSS 中频信号模拟器的架构,如图 1.

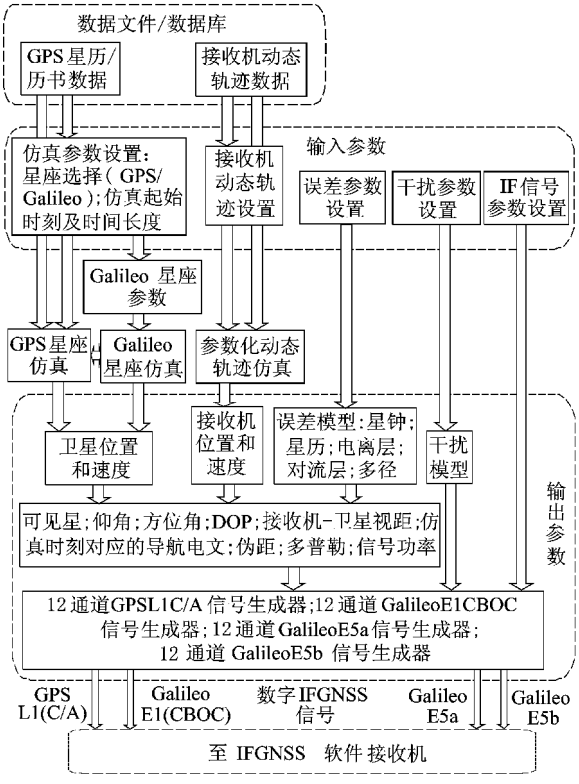


图 1 软件 GNSS 中频信号模拟器的架构

1.1 GNSS 卫星星座仿真

1.1.1 GPS 卫星星座仿真

GPS 星座仿真实现基于 GPS 星历与历书文件,即 Rinex 文件.从文件中获取星钟、星历、历书等参数,对这些参数按照 GPS 空间段/用户接口规范[1]进行转换及格式编排,生成下行导航电文.

1.1.2 Galileo 卫星星座仿真

由于 Galileo 系统仍处于研发阶段,基于目前已知的 Galileo 星座的轨道参数[2-3],如轨道半长轴、轨道倾角、升交点经度、平近点角等,构造出星历与历书文件.对轨道参数按照现有的 Galileo 试验星(GIOVE-A)空间段/用户接口控制文件[2]进行转换及格式编排,生成下行导航电文.

1.2 接收机轨迹生成

支持用户通过文件配置生成参数化的复杂轨迹,即认为任意轨迹可由 N 段匀加速直线运动和匀速圆周运动拟合而成,用户可设置与修改轨迹的参数.此外,用户可使用预定义的轨迹,即实测的多种载体(如汽车、飞机、舰船等)的运动轨迹,以数据文件或数据库形式接入.

1.3 传播通道特性仿真

1.3.1 电离层延迟模型

电离层是 GNSS 用户的重要误差源之一.电

离层与对流层所引起的误差量级相当,但电离层误差更难建模,而且变化也更剧烈.

电离层对 GNSS 信号的影响有以下几方面:绝对测距误差,相对测距误差,距离变化率误差,折射,失真,幅度衰落和闪烁,相位闪烁.

本模拟器采用了 Klobuchar 电离层模型[1],同时为其它模型预留了接口.

1.3.2　对流层延迟模型

对流层对 GNSS 信号的影响有以下几方面:衰落,闪烁,延迟.

本模拟器采用了 Hopfield 对流层模型[4],同时为其它模型预留了接口.

1.3.3　星钟误差模型

模拟卫星钟误差,基于如下事实:无论星载时钟具有多么高的精度,时钟也会发生漂移.尽管卫星钟由地面站监控,但某些残差依然存在.卫星钟差模型可采用如下星钟修正多项式[1]:

$$\Delta t^i = a_0 + a_1(t - t_{oc}) + a_2(t - t_{oc})^2 + \Delta t_r - t_{GD} \quad (1)$$

其中,Δt^i 为第 i 颗卫星的钟差修正量;t 为卫星信号发射时刻的系统时间;a_0,a_1 和 a_2 为钟差修正参数,可从星历与历书文件中得到;t_{oc} 为钟差修正参数的基准时刻;Δt_r 为相对论效应修正量;t_{GD} 为估计差分群延迟,可从星历与历书文件中得到.

1.3.4　星历误差模型

与星钟误差类似,星历尽管可以被修正,但依然含有残差.这种残差是一种矢量,所形成的伪距误差是其在卫星至用户视线方向上的投影.

本模拟器采用一阶高斯-马尔科夫序列作为星历误差模型,同时为其它模型预留了接口.

1.3.5　接收信号功率模型

接收机天线接收到的 GNSS 信号功率电平是相应卫星仰角的函数.对于 GPS,最大接收信号功率出现在 45°仰角.

由于缺乏 Galileo 相关信息,本模拟器中假设 Galileo 与 GPS 的接收信号功率模型相同.此外,提供了用户对接收信号功率的配置功能.

1.3.6　多径模型

认为多径是相对视距信号具有较低功率和较大延迟的信号.对于扩频技术,信号传输通道中的多径可分为近程回波和远程回波.通常,近程回波具有较低功率,其功率随延迟的增加呈指数衰减;远程回波则具有较大的延迟,其功率是反射面的函数.相比近程回波,认为远程回波的数量要少得多,由更大和更光滑的表面产生,具有较强的功率[5].

本模拟器只考虑远程回波的建模实现,所实现的多径信号可以叠加到任意 GNSS 信号上.目前对 2 种镜面反射源进行建模,分别是地面、垂直障碍物.对于地面反射源,假设地面无限水平而光滑,则可应用菲涅尔定律:即入射角等于反射角.根据任意时刻的接收机位置和卫星位置,很容易确知反射信号引起的额外路径延迟.对于垂直障碍物,需要用户预定义障碍物的位置与尺寸,以及表面反射系数.根据任意仿真时刻的接收机位置和卫星位置,可以确定直达信号是否被遮挡、是否发生反射,如果发生反射,则同样应用菲涅尔定律,确定多径延迟.

尽管不能仿真十分复杂的环境,但上述模型仍可用于多径环境的粗略仿真.

1.3.7　干扰模型

本模拟器中考虑了部分典型的干扰类型,如单频干扰、扫频干扰、窄带干扰、宽带匹配谱干扰.用户可以针对每一路干扰信号自定义干扰-信号(功率)比,相应的频率参数(如,中心频率、带宽),干扰有效周期,等等.

2　数字中频信号生成实现与验证

2.1　信号状态参数计算

基于接收机轨迹和卫星星座仿真,确定当前仿真时刻的接收机(天线)位置、相应卫星信号发射时刻的卫星位置(通过迭代算法求解卫星至接收机的视距而确定),由接收机与(可见)卫星的相对位置关系,确定传播通道特性(前述的各项误差影响),以此修正卫星信号发射时刻,进而计算出当前仿真时刻到达接收机的卫星信号的状态参数,包括伪距、多普勒频率、载波相位、信号功率等.根据上述信号状态参数,产生数字中频信号.

2.2　GPS L1 C/A 信号生成器

GPS 卫星发播 L1(1575.42 MHz)和 L2(1227.60 MHz)信号.经过下变频的中频 L1 信号,可表示为

$$S_{IF}^{L1,i}(t) = \sqrt{2P_c^i}\,C^i(t)D^i(t)\cos(2\pi f_{IF}t) + \sqrt{2P_p^i}\,P^i(t)D^i(t)\sin(2\pi f_{IF}t) \quad (2)$$

其中,$S_{IF}^{L1,i}(t)$ 为 i 通道(对应第 i 颗卫星)中频 L1 信号;P_c^i,P_p^i 分别为 i 通道 C/A 码和 P 码信号的功率;$C^i(t)$,$P^i(t)$ 分别为 i 通道的 C/A 码和 P(Y)码序列;$D^i(t)$ 为 i 通道导航数据位序列;f_{IF} 为中频载波频率.

本模拟器只实现了 GPS L1 C/A 码信号(由于 P 码的结构是保密的),C/A 码的生成方法参

考GPS空间段/用户接口规范[1].

2.3 Galileo E1 CBOC信号生成器

Galileo E1信号包含3个信号分量,即E1-A,E1-B和E1-C. E1-A采用BOC(15,2.5)调制方式,其导航电文是保密的. E1-B和E1-C目前采用CBOC(6,1,1/11)调制方式[6],其中,E1-C为导频通道,即只调制扩频码. BOC表示二进制偏置(副)载波调制,CBOC表示复合BOC调制. Galileo E1 CBOC是BOC(6,1)和BOC(1,1)信号以1/11功率分配的复合调制.

中频Galileo E1 CBOC信号可由下式表示:

$$S_{\mathrm{IF}}^{\mathrm{E1_CBOC},i}(t)=\frac{\sqrt{P_{\mathrm{E1}}^{i}}}{\sqrt{2}}\{C_B^i(t)D_B^i(t)\cdot(\alpha c_{\mathrm{BOC}(1,1)}^i(t)+\beta c_{\mathrm{BOC}(6,1)}^i(t))-C_C^i(t)\cdot(\alpha c_{\mathrm{BOC}(1,1)}^i(t)-\beta c_{\mathrm{BOC}(6,1)}^i(t))\}\cos(2\pi f_{\mathrm{IF}}t) \quad (3)$$

$$\alpha=\sqrt{\frac{10}{11}}\qquad \beta=\sqrt{\frac{1}{11}}$$

其中,$S_{\mathrm{IF}}^{\mathrm{E1-CBOC},i}$为$i$通道(对应第$i$颗卫星)中频E1CBOC信号;$P_{\mathrm{E1}}^i$为$i$通道E1信号功率;$C_X^i(t)$为$i$通道$X$信号分量的扩频码序列;$D_X^i(t)$为$i$通道$X$信号分量的导航数据位序列;$c_{\mathrm{BOC}(1,1)}^i(t)$,$c_{\mathrm{BOC}(6,1)}^i(t)$分别为$i$通道BOC(1,1)和BOC(6,1)调制的副载波;α和β为功率分配因子;f_{IF}为中频载波频率.

本模拟器实现了CBOC(6,1,1/11)信号,其中,扩频码的生成方法参考现有的Galileo试验星(GIOVE-A)空间段/用户接口控制文件[2].

2.4 Galileo E5a和E5b信号生成器

Galileo系统在E5频段上播发2种不同频率的信号,即E5a(1 176.45 MHz)和E5b(1 207.14 MHz). E5a和E5b信号分别具有2个正交的信号通道I和Q,即导航信息通道和导频通道.

E5调制的实现,可采用如下机制中的一种:8-PSK AltBOC(15,10)或2-QPSK(10). 对于2-QPSK(10),调制在E5a和E5b上独立进行,每对(I,Q)通过2个独立的QPSK调制器调制到适合的中心频率上.

本模拟器采用了2-QPSK(10)方法,中频Galileo E5信号可由下式表示:

$$S_{\mathrm{IF}}^{\mathrm{E5},i}(t)=\frac{\sqrt{P_{\mathrm{E5}}^i}}{2}\{[C_{\mathrm{E5a_I}}^i(t)D_{\mathrm{E5a_I}}^i(t)+C_{\mathrm{E5b_I}}^i(t)D_{\mathrm{E5b_I}}^i(t)]c_{\mathrm{E5_C}}(t)-[C_{\mathrm{E5a_Q}}^i(t)-C_{\mathrm{E5b_Q}}^i(t)]c_{\mathrm{E5_S}}(t)\}\cdot\cos(2\pi f_{\mathrm{IF}}t)-\frac{\sqrt{P_{\mathrm{E5}}^i}}{2}\{[C_{\mathrm{E5a_Q}}^i(t)+C_{\mathrm{E5b_Q}}^i(t)]c_{\mathrm{E5_C}}(t)+[C_{\mathrm{E5a_I}}^i(t)D_{\mathrm{E5a_I}}^i(t)-C_{\mathrm{E5b_I}}^i(t)D_{\mathrm{E5b_I}}^i(t)]c_{\mathrm{E5_S}}(t)\}\cdot\sin(2\pi f_{\mathrm{IF}}t) \quad (4)$$

其中,$S_{\mathrm{IF}}^{\mathrm{E5},i}$为$i$通道(对应第$i$颗卫星)中频E5信号;$P_{\mathrm{E5}}^i$为$i$通道E5信号功率;$C_X^i(t)$为$i$通道$X$信号分量的扩频码序列;$D_X^i(t)$为$i$通道$X$信号分量的导航数据位序列;$c_X^i(t)$为$i$通道$X$信号分量的副载波,在本文只区分为余弦和正弦波(以下标c和s表示);f_{IF}为中频载波频率.

2.5 数字中频信号验证

2.5.1 GPS L1 C/A信号

本模拟器产生的中频GPS L1 C/A信号的功率谱,如图2,采样频率为10 MHz.

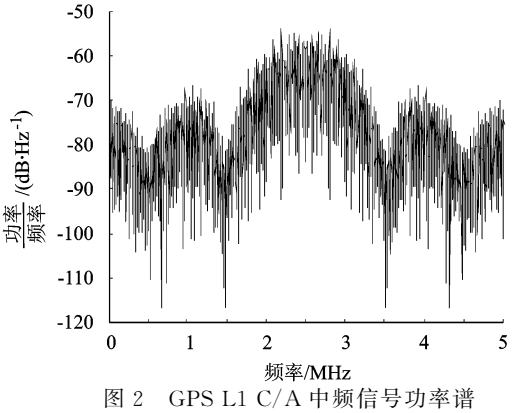


图2 GPS L1 C/A中频信号功率谱

以功率谱的角度,GPS L1 C/A信号的实现得到验证(其功率谱已众所周知). 此外,通过将所有PRN(Pseudo-Random Noise)号对应的C/A码的前10位与理论值进行了比较,结果表明两者一致.

2.5.2 Galileo E1 CBOC信号

本模拟器产生的Galileo E1 CBOC(6,1,1/11)中频信号功率谱,如图3,采样频率为80 MHz. Galileo E1信号功率谱理论曲线,如图4a,从图中可以看出两者一致.

2.5.3 GalileoE5a和E5b信号

本模拟器产生的中频Galileo E5a/E5b信号

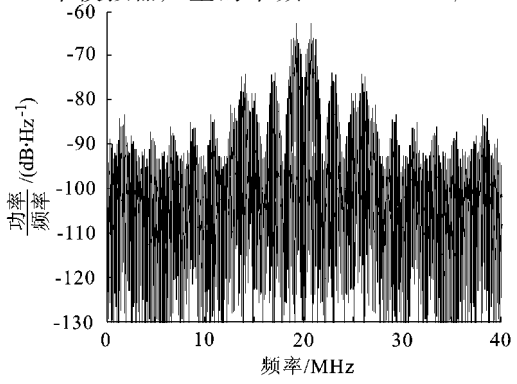
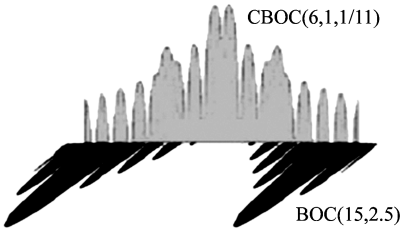
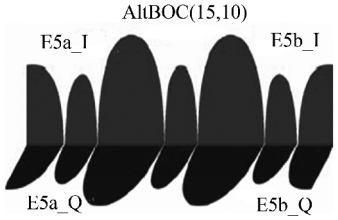


图3 Galileo E1CBOC中频信号功率谱

功率谱,如图 5,其中,采样频率为 200MHz. Galileo E5 信号功率谱理论曲线,如图 4b,从图中可以看出两者一致.



a　E1 信号



b　E5 信号

图 4　GalileoE1 和 E5 信号功率谱(理论曲线)

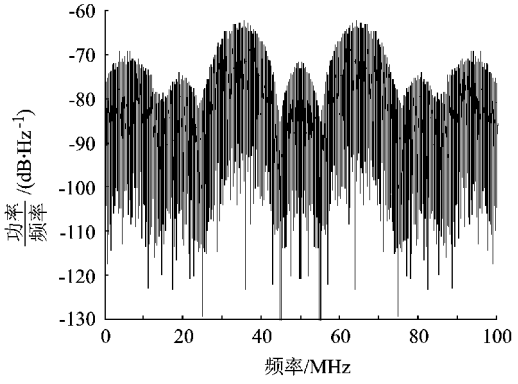


图 5　Galileo E5a/E5b 中频信号功率谱

3　结 束 语

本文描述了一种面向 GPS/Galileo 组合系统的软件定义中频信号模拟器,此模拟器由以下 4 个主要功能模块组成:GNSS 卫星星座仿真,接收机动态轨迹生成,传播通道特性仿真,数字中频信号生成. 本文的主要部分阐述了这一模拟器的功能、架构和建模机制,重点描述了数字中频信号生成模块的实现,涉及如下 GNSS 信号:GPS L1 C/A,Galileo E1 CBOC,Galileo E5a 和 E5b.

本文给出了模拟器所实现中频信号的功率谱,它们与理论曲线一致. 对于 GPS L1 C/A 信号,通过比较产生的扩频码与其理论值进一步得到验证.

参考文献(References)

[1] GPS Joint Program Office. NAVSTAR global positioning system: interface specification[R]. IS-GPS-200, 2004

[2] European Project Office. GIOVE-A navigation signal-in-space: interface control document[R]. ESA-DEUI-NG-ICD/02703, 2007

[3] Constantinescu A, Landry R Jr, Ilie I. Hybrid GPS/Galileo/GLONASS IF software signal generator [C]// ION GNSS 18th International Technical Meeting of the Satellite Division. California:[s. n.], 2005:1233－1244

[4] Kaplan E D, Hegarty C J. Understanding GPS: principles and applications[M]. 2nd ed. Boston: Artech House, 2007

[5] Julien O, Zheng B, Dong L, et al. A complete software-based IF GNSS signal generator for software receiver development[C]//Proceedings of the 17th International Technical Meeting of the Satellite Division of the ION GNSS 2004. California:[s. n.], 2004: 2146－2157

[6] European Space Agency. Galileo open service: signal in space interface control document[R]. OS SIS ICD, 2008

(责任编辑:刘晓静)