

文章编号 1004-924X(2009)10-2594-06

# 卫星数传通信仿真系统设计与实现

郭旭静<sup>1</sup>, 王祖林<sup>1</sup>, 涂敬滢<sup>2</sup>, 许建忠<sup>1</sup>, 赵毅寰<sup>1</sup>

(1. 北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100083;

2. 中国空间技术研究院, 北京 100094)

**摘要:**提出了一种卫星数传通信系统运行仿真平台的设计方法。利用带通采样定理,对仿真系统进行了采样率设计,推导了最低等效载波频率的计算公式,应用该公式设计与实际系统等效的仿真系统的时间和频率。根据系统功能结构,设计了系统软件架构和运行进程。最后,建立了相应的功能模型。该卫星数传通信仿真系统包括独立运行和网络调度运行两种工作模式,能够仿真包括射频调制在内的发射和接收所要求的功能模型,并提供分析评估模型。通过分析评估模型,给出了整体仿真系统的频谱、眼图、误码率与信噪比的情况。本仿真系统在信噪比为 $-2.5$  dB的情况下,误码率可达到 $10^{-5}$ ,仿真结果与理论吻合得很好。

**关键词:**卫星通信;采样;仿真等效;级联编码;调制解调

**中图分类号:** TN929.13; TN911.72 **文献标识码:** A

## Design and implementation of satellite data traffic communication simulation system

GUO Xu-jing<sup>1</sup>, WANG Zu-lin<sup>1</sup>, TU Xin-yin<sup>2</sup>, XU Jian-zhong<sup>1</sup>, ZHAO Yi-huan<sup>1</sup>

(1. *School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China;*

*2. China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)*

**Abstract:** A design method for a satellite data traffic system was developed by using a band-pass sampling theorem, the simulation system sampling rate was designed, from which the lowest equivalent carrier wave formula was deduced. The deduced formula could be applied to other simulation systems. At the same time, equivalent design methods for time and frequency of the practical system were presented. According to the system function structure, the system software frame and running threads were studied. Finally, corresponding function models were realized. Two work modes including an independent running and a network controlling were provided to simulate integrally functional models required by the transmitter and receiver of the satellite data-traffic system including radio modulation. Based on the evaluation model, the frequency spectrum, eye pattern and relation of Bit Error Ratio (BER) and Signal to Noise Ratio (SNR) were presented. Experimental results show that when the SNR is equal to  $-2.52$  dB, the BER of this simulation system is  $10^{-5}$ . The simulation results are basically in agreement with theoretical values.

收稿日期:2008-07-06;修订日期:2008-11-11.

基金项目:中国空间技术研究院项目;北京航空航天大学青年创新基金项目

**Key words:** satellite communication; sampling; simulation equivalence; concatenated coding; modulation demodulation

## 1 引言

随着航天事业的大力发展,地面控制站与卫星之间的高速数据通信变得越来越重要。由于发射卫星的代价可观,因此如果能够有效地利用仿真研究,对卫星通信系统在不同情况下的性能进行事先测量和研究,提供可靠的支撑数据,对卫星通信系统的研究和性能升级有着重要的意义<sup>[1]</sup>。如美国在发射第一代中继卫星之前,NASA 针对影响高速数传质量的各种因素做了大量的仿真和实验。除美国之外,俄罗斯,日本,欧洲也在进行着相应的研究;但目前对卫星系统的研究多数是从调制体制,编解码等相对分离的角度进行的<sup>[2-3]</sup>,因此建立相对完整的数传卫星通信仿真系统来提供支撑是有必要的。

随着现代通信技术的复杂性升高,国内外已经涌现出若干种用来对通信系统进行建模、仿真和分析的软件系统,如 MATLAB/Simulink, Systemview 等。这些软件基本属于商业软件,在理论研究和工程设计方面取得了很大的成功,但是在针对卫星通信的特殊领域,却不能实时仿真或模拟系统不同的工作模式和运行状态。因此,有必要设计出能够仿真实际运行情况的卫星数传通信系统的软件。

完成整体仿真系统需要包含射频调制部分,因此本文根据带通采样定理设计了仿真系统采样率,并推导了计算等效载波频率的公式;同时给出了仿真系统时间和频谱等效的设计方法。在主要设计理念的基础上,根据系统功能模型,对整体软件进行总体架构和运行进程的设计,最后给出了该仿真系统的实验和性能结果。该软件不仅能够独立地或调度地仿真卫星数传的数据通信情况,而且能够模拟卫星数传在轨道运行时的各种工作状态。

## 2 仿真系统与实际系统的等效设计

对通信系统进行仿真的一个重要的方面就是如何与实际系统等效的问题。本方案设计时主要

考虑了:采样率设计、时间等效和频谱等效。

### 2.1 仿真系统采样率设计

通信系统仿真中在如果省略射频调制解调器时,通常采用复低通等效的方法来表示仿真,仅对频率进行搬移即可。本仿真系统为了加入射频调制解调,利用了带通采样定理,将较高的载频搬移到低频处进行处理,高载频变成了等效的低载频,射频调制和解调部分可以与实际系统等效。通常获得等效低载频的方法是按照采样率对高载频进行搬移,没有统一的计算公式,本系统在设计时给出了一个计算等效最低载频的公式,依据该公式可以直接推导出等效最低载频。

设实际系统载波频率为  $f_c$ ,带宽为  $B$ ,则系统的最高频率  $f_H$  和最低频率  $f_L$  为:

$$\begin{cases} f_H = f_c + B/2 \\ f_L = f_c - B/2 \end{cases} \quad (1)$$

根据带通采样定理,采样率可以设计的范围为:

$$\frac{2f_H}{m+1} \leq f_s \leq \frac{2f_L}{m} \quad 1 \leq m \leq I_g\left(\frac{f_L}{B}\right), \quad (2)$$

$m \in \mathbf{Z}$ ,  $I_g$  代表不大于括号内的整数,当  $m$  取上述区间中最大整数时,得到  $f_s$  的最小值。

设等效的低载波频率为  $f_{cl}$ ,达到  $f_{cl}$  需要将实际载频按照采样率向下搬移  $n_{cl}$  个,调制带通信号频谱具有对称性,载频在向下搬移的同时,负载频也向上搬移,这样最低的等效正载频可能的计算公式有:

$$f_{cl,1} = f_c - n_{cl,1} f_s, \quad (3)$$

其中,  $\frac{f_c}{f_s} - 1 \leq n_{cl,1} \leq \frac{f_c}{f_s}$ ,  $f_{cl,1}$  代表正载频向下搬移的最低等效正载频,  $n_{cl,1}$  代表此时搬移的个数。

$$f_{cl,2} = -f_c + n_{cl,2} f_s, \quad (4)$$

其中,  $\frac{f_c}{f_s} \leq n_{cl,2} \leq \frac{f_c}{f_s} + 1$ .  $f_{cl,2}$  代表负载频向上搬移的最低等效正载频,  $n_{cl,2}$  代表此时搬移的个数。

$$f_{cl} = \min(f_{cl,1}, f_{cl,2}). \quad (5)$$

根据公式(3),(4),(5)可计算出等效的低载频。

由公式(2)可计算出带通信号的采样率,采样率除尽量低外,还要兼顾到信号质量;确定采样率

后,由公式(3),(4),(5)可以确定出等效的最低载频。

## 2.2 仿真系统时间和频谱等效

确定了采样率和等效低载频后,下一步需要确定仿真系统运行一次所代表的实际系统运行时间,以及实际系统中的带通滤波器如何与采用了上述采样率和等效载频的仿真系统中的滤波器相对应。

根据实际系统带宽  $B$  和调制方式确定系统的信息速率,如系统为 QPSK 调制时,系统的信息速率  $R_b = 2B$ 。假设系统采样率为  $f_s$ 。如果以采样前的数据量计算,设仿真系统一次运行处理的数据量为  $DataLength$ ,则运行一次代表的实际系统时长为:

$$\Delta t = DataLength / R_b, \quad (6)$$

如果以采样后的数据量计算,设仿真系统一次运行处理的数据量为  $DataLength_s$ ,则运行一次代表的实际系统时长为:

$$\Delta t = DataLength_s / f_s. \quad (7)$$

各个仿真模块根据是否是采样过的数据流分别采用公式(6)和公式(7)来决定调用一次代表的实际时长。

在系统中如解调时要经过带通滤波器,实际的信号的频谱是以中心频率为  $f_c$ ,带宽为  $[f_c - B/2, f_c + B/2]$ ,由于本系统中采用了等效的低载频,因此等效后的信号频谱是以  $f_{cl}$  为中心频率,带宽为  $[f_{cl} - B/2, f_{cl} + B/2]$ ;再根据采样率为  $f_s$ ,则信号等效的角频率频谱为中心频率为  $\frac{2\pi f_{cl}}{f_s}$ ,带宽为  $[\frac{2\pi f_{cl}}{f_s} - \pi B/f_s, \frac{2\pi f_{cl}}{f_s} + \pi B/f_s]$ ,频率分辨率为  $2\pi/f_s$ 。数字滤波器可参考上述等效情况设计即可。

## 3 仿真系统结构及软件架构设计

### 3.1 数传系统的功能结构<sup>[4-8]</sup>

从功能上整个数传系统可分为发射,接收两个主要部分,本系统还增加了分析评估功能模型。通信的功能包括信道编解码(采用 CCSDS 标准的 RS 编码同卷码级联的方式)和调制解调(采用 QPSK 和 OQPSK 两种方式,解调采用正交相干解调),信道上主要仿真热噪声加入的情况,分析评估功能包括信噪比估计,误码率,信号功率谱

及眼图等。系统简化的功能结构图如图 1 所示。

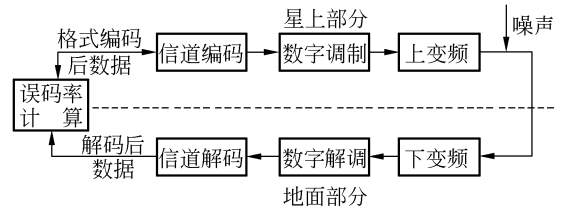


图 1 简化卫星数传功能结构

Fig. 1 Simplified satellite data traffic function structure

### 3.2 总体架构及运行进程

根据数传卫星通信系统的实际特点,构建出如图 2 所示的总体软件架构模型图。

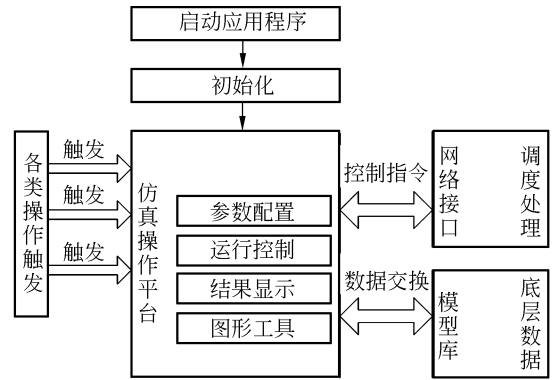


图 2 卫星数传通信系统总体架构

Fig. 2 Software frame of satellite data traffic communication system

总体架构包括仿真操作平台,模型库,网络调度管理三个部分。仿真操作平台又包括如下几个部分。

#### 3.2.1 参数配置

参数配置部分为仿真系统运行进行各种参数的配置和选择,将配置好的参数存入配置文件,运行时读取该配置文件。需要配置的参数包括通信模式配置(如编码方式,调制方式,采样率配置,模型的开关等),系统调度配置包括独立运行和网络调度运行。

#### 3.2.2 运行控制

运行控制部分控制仿真系统的运行,停止,暂停,关闭等功能。

#### 3.2.3 结果显示

结果显示包括对数传卫星通信分系统仿真结果的数字及图形表示等。

### 3.2.4 图形工具

图形工具提供对产生的仿真数据和性能评估进行绘制的功能,如功率谱和眼图。

系统的模型库包含各种通信模块和分析评估模块,信号编解码、调制解调、信噪比评估,误码率评估等具体功能都在该部分实现。

网络接口主要负责系统由总体调度管理软件调度时数据的传输功能,该部分需要具有实时监测功能。

由于该系统具有交互的操作平台,实时操作功能,网络监测功能,因此设计时采用多进程的方式,运行进程包括主控 GUI 界面,仿真运行进程,实时监测进程。进程结构如图 3 所示。

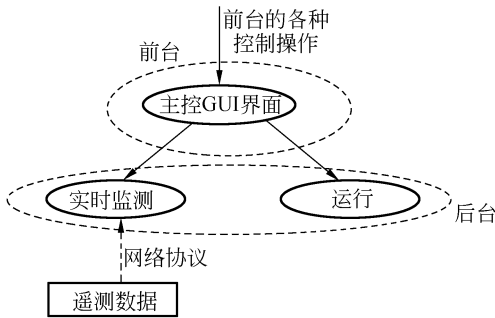


图 3 系统运行进程关系

Fig. 3 Relationship of system running threads

其中主控 GUI 界面进程完成实现 GUI 接口,响应用户界面操作,显示运行结果的功能;实时监测进程实现实时监测和接收遥测数据的功能;运行进程系统运行和调用,数据传递,暂停和停止的功能。

## 4 仿真结果及性能

本仿真系统编程语言采用 VC++, 运行在 Windows 操作系统下,图 4 是本仿真系统的平台界面。本平台实现独立运行和调度控制两种运行控制模式,提供信号参数配置功能,包括调制方式选择,编码模式选择,上下行频率选择,数据率选择,噪声开关、噪声功率等等,提供各种评估结果的显示,包括卫星运行状态及性能评估。

在仿真软件界面上左下图显示的是调制功率谱的情况,可以看到主瓣与外侧旁瓣的高度差为 15 dB,理论值为 13.3 dB,这可通过增加采样获得。右下图为四个符号周期的眼图,图上显示的

是没有加入噪声的情况。图 5 为加入噪声时的功率谱和眼图显示情况。

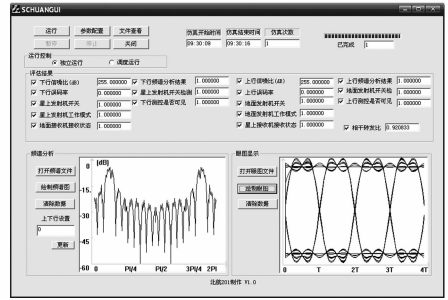


图 4 卫星通信软件平台交互界面

Fig. 4 Satellite communication software platform GUI

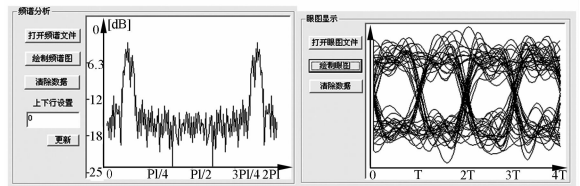


图 5 加入噪声后的频谱和眼图

Fig. 5 Frequency spectrum and eye pattern added by noise

本文在该软件平台上对信噪比和误码率情况进行了实测,目前参考资料主要给出的是单独级联编码的信噪比误码率情况<sup>[9]</sup>,对级联编码和调制解调整体通信系统的信噪比误码率性能测试结果鲜有涉及,本文给出测试的级联编码同 QPSK 调制及上变频的整体信噪比误码率性能,为达到测试误码率,采用了高于所测误码率级别的 100 倍数据量进行测试,如测  $10^{-4}$  的误码率采用了 1 M 的数据量测试。如图 6 和表 1 所示,本系统在  $-2.52$  dB 下,误码率可达到  $3.4 \times 10^{-5}$ ,理论上单独 QPSK 调制在  $7 \sim 9$  dB 时误码率约为  $10^{-5}$ ,这与级联编码能提高  $8 \sim 9$  dB 左右的性能理论上基本符合。

表 1 仿真系统测试的信噪比误码率结果

Tab.1 SNR and BER results of simulation system

SNR/dB	BER
-3.19	$4.43 \times 10^{-2}$
-3.58	$1.445 \times 10^{-2}$
-3.192	$6.95 \times 10^{-4}$
-2.98	$4.65 \times 10^{-4}$
-2.52	$3.4 \times 10^{-5}$

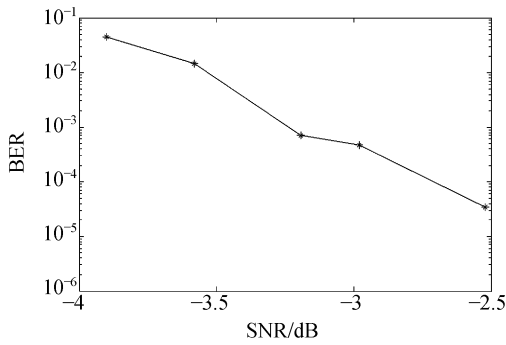


图 6 仿真系统信噪比和误码率关系

Fig. 6 Relation of SNR and BER in simulation system

## 参考文献:

- [1] 郝岩. 航天测控网[M]. 北京:国防工业出版社, 2004.  
HAO Y. *Spacecraft Telemetry-telecommand Network*[M]. Beijing: Defence Industry Press, 2004. (in Chinese)
- [2] RODDY D. *Satellite Communications* [M]. 3rd ed. New York: Mc2Graw-Hill Companies, Inc., 1996.
- [3] JEROCHIM M C, BALABAN P, SHANMDGAN K S. *Simulation of Communication Systems—Modeling, Methodology, and Techniques* [M]. New York: Plenum Publishers, 2003.
- [4] 王新梅, 肖国镇. 纠错码原理与方法(修订版)[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2001.  
WANG X M, XIAO G ZH. *Error Correcting Code Theory and Method (Revised edition)* [M]. Xian: XiDian University Press, 2001. (in Chinese)
- [5] KOETTER R, VARDY A. Algebraic soft-decision decoding of Reed-Solomon codes[J]. *IEEE Trans. Inform. Theory*, 2003, 49(11):2809-2825.
- [6] JACK G D. AHA soft decision thresholds and effects on viterbi performance [J]. *AHA Application Note*, 2004(4):156-159.
- [7] 周德锁. 星上多载波 QPSK 数字化解调关键技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2000.  
ZHOU D S. *Research on key techniques of onboard digitized multi-carrier QPSK demodulation* [D]. Xian: XiDian University, 2000. (in Chinese)
- [8] 王绍举, 金光, 徐升. 高精度激光通信小卫星星座仿真平台设计[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(8):4551-9551.  
WANG SH J, JIN G, XU K. Design of simulation platform for high precision laser[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(8):4551-9551. (in Chinese)
- [9] 王政, 范光荣, 王华, 等. 基于 FPGA 的级联编码系统的设计与实现[J]. 无线电通信技术, 2007, 33(5):56-58.  
WANG ZH, FAN G R, WANG H, et al.. Design and implementation of concatenated coding system based on FPGA[J]. *Radio Communication Technology*, 2007, 33(5):56-58. (In Chinese)

## 5 结 论

本文给出仿真系统采样率, 时间和频谱的等效设计方法, 推导了等效低载波频率的计算公式, 建立了一套可用于卫星数传通信的仿真系统软件, 完整地仿真了卫星数传通信系统的发射和接收所要求的功能模型, 最后给出了仿真系统的性能评估结果。

## 作者简介:



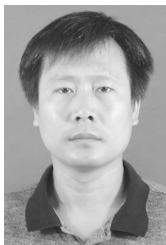
**郭旭静** (1975—),女,山西长治人,博士,讲师,硕士生导师,2000年于南开大学获硕士学位,2006年于天津大学获博士学位,2008年4月于北京航空航天大学博士后出站,主要研究方向为卫星通信、小波分析、图像处理。E-mail: guoxujing@126.com



**赵毅寰** (1984—),男,河南南阳人,博士研究生,2005年于北京航空航天大学获学士学位,主要研究方向为卫星通信系统仿真。E-mail: zhaoyihuan@ee.buaa.edu.cn



**王祖林** (1965—),男,湖北潜江人,博士,教授,博士生导师,1989年,2000年分别于北京航空航天大学获硕士、博士学位,主要研究方向为卫星通信、图像通信、小波理论。E-mail: wzulin@vip.sina.com.cn



**许建忠** (1968—),男,河北保定人,博士研究生,2003年于河北大学获硕士学位,主要研究方向为卫星通信系统仿真。E-mail: bdxjz@sina.com



**涂歆滢** (1972—),女,湖北武汉人,硕士,高级工程师,1996年于中国空间技术研究院获硕士学位,主要研究方向为卫星通信系统仿真。E-mail: tuxinyin123@163.com

## ● 下期预告

## FPGA 的磁悬浮飞轮用自修复磁轴承控制器的设计

刘 刚,潘明健

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院新型惯性仪表与导航系统技术国防重点学科实验室,北京 100191)

磁悬浮飞轮是对卫星等航天器进行高精度姿态控制的执行机构,为了提高空间用磁悬浮飞轮控制系统的可靠性和灵活性,对基于 FPGA 的磁轴承数字控制器进行研究。首先,对磁轴承系统进行建模,并选择合适的控制策略。接着,利用片上软硬件协同设计的思想,提出了一种基于 FPGA 和 LEON<sub>3</sub> 处理器软核的磁轴承数字控制器。然后,搭建了实验系统测试系统的实际性能。最后,提出了一种基于 FPGA 的自修复磁轴承控制器。实验结果表明:基于 FPGA 的磁轴承控制器相对基于 DSP+FPGA 的控制器失效率降低了 10%,控制板面积减小 30%。在基于 FPGA 的磁轴承控制器控制下,在磁悬浮飞轮工作转速范围内,飞轮转子跳动量 $<20\ \mu\text{m}$ ,力矩输出误差 $<4\times 10^{-3}\ \text{Nm}$ ,正反转不一致性 $<10\%$ ,达到了较高的控制精度。