

星载测量通信系统模拟器设计与实现

王智^{1,2}

(1. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094; 2. 中国人民解放军 92678 部队, 天津 300042)

摘要: 为了在地面对星载测量通信系统之间互联互通性能进行测试评估, 设计了一种可替代星载测量通信系统的地面模拟器, 该模拟器由收发信机, 时频单元, 信道仿真器以及管理控制计算机构成, 收发信机采用双 FPGA 架构设计, 支持星间信号的收发处理, 在功能性能指标方面与星载设备具有良好的一致性, 信道仿真器能够实现信号传输延时、多普勒以及衰落特性的实时仿真, 可显著增强试验场景的真实性以及评估结论的可信性; 互联互通试验过程表明, 该模拟器功能齐全、性能可靠、操控简单并且易于搬运, 试验结果有效验证了星间互联互通方案的可行性。

关键词: 测量通信系统; 模拟器; 收发信机; 信道仿真

Design and Implementation of Simulator of Spaceborne Measurement and Communication System

Wang Zhi^{1,2}

(1. Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China;
2. No. 92678 Troops of PLA Navy, Tianjin 300042, China)

Abstract: A ground simulator of spaceborne measurement and communication system (SMCS) was designed to test and evaluate the interconnection of SMCS on the ground. The simulator consists of transceiver, time frequency unit, channel emulator and management control computer. The transceiver includes two FPGAs, which supports signal transmitting and receiving processing between satellites. Furthermore, it has good consistency in function and performance with spaceborne devices. The channel emulator can real-time simulate signal transmission delay, doppler and the fading characteristics, which significantly enhanced the authenticity of the test and the credibility of evaluation conclusion. The process of interconnection test had showed the simulator had many advantages, such as complete function, reliable performance, simple manipulation and easy handling. The test results effectively verified the feasibility of the interconnection scheme for inter satellite.

Keywords: measurement and communication system; simulator; transceiver; channel emulator.

0 引言

通过星间测距与通信, 实现了诸如重力场及卫星坐标的高精度测量以及通信数据的广域播发, 卫星之间互联互通并组成网络, 在卫星系统建设中已被广泛应用, 并成为了发展趋势。GRACE 卫星是美国和德国合作建造的重力场测量卫星, 通过星间精密测距和非保守力测量实现了反演高精度的全球重力场。一些移动通信卫星星座系统(如铱星系统)中也使用了 Ka 频段的 LEO 卫星星间链路, 显著提高了通信覆盖范围。

星载测量通信系统主要完成星间信号的合成发射以及接收处理, 具备星间测量通信功能, 是实现卫星互联互通以及卫星组网的核心关键设备, 其技术方案的可行性需要在卫星在轨飞行前得到充分的地面测试验证^[1]。然而, 卫星平台的复杂性及唯一性使得利用真实平台实现互联互通变得不切实际, 而设计一套能够模拟卫星测量通信系统功能的模拟器是必不可少的。

本文提出了具有空间信道仿真功能的测量通信系统模拟器设计方法, 实现了以下功能:

1) 能够设置不同的卫星编号, 接收处理不同卫星的星间信息和信号;

- 2) 能够生成和播发不同卫星的星间信息和信号;
- 3) 能够接收外部授时信息;
- 4) 具有星载测量通信系统指标检核功能。

1 总体设计

测量通信系统模拟器的总体框图如图 1 所示, 主要包括: 管理控制计算机、时频单元、收发信机(包括基带模块与变频通道)以及信道仿真器^[2]。基带模块、变频通道以及信道仿真器共同完成星间信号的传输与处理, 相互之间紧密耦合且严格同步, 因此, 在基带模块对变频通道及信道仿真器的控制接口部分采用实时性较强的 RS422 协议。管理控制计算机与基带模块之间交互的数据包括测量通信信息、控制指令、状态参数以及工况信息, 时频单元则向管理控制计算机以及基带模块传递时间信息, 上述信息具有数据量大但实时性不高的特点, 因此, 在管理控制计算机、基带模块以及时频单元之间通过网络交换机实现信息交互。

测量通信系统模拟器在管理控制计算机的统一控制管理下执行星间信号的收发处理, 进而实现星间测量通信功能:

- 1) 管理控制计算机生成星间数传信息, 通过网络传输给收发信机基带模块, 基带模块按照星间信号体制合成中等载波频率的扩频信号, 再由变频通道上变频为射频信号, 最后经过信道仿真环节模拟星间信号传输时延、多普勒以及衰落特性;
- 2) 模拟器接收来自星间测量通信系统的射频信号, 首先

收稿日期:2014-05-10; 修回日期:2014-06-25。

作者简介:王智(1982-)男,江苏人,硕士,工程师,主要从事卫星导航技术方向的研究。

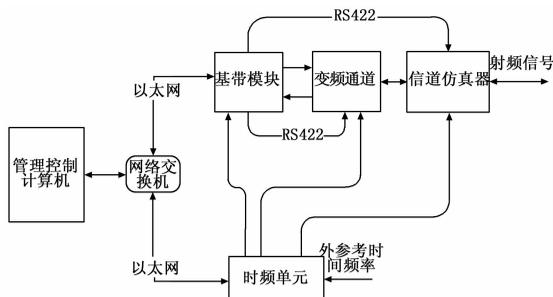


图1 星载测量通信系统模拟器总体设计框图

经过信道仿真器实时仿真出星间信号传输时延、多普勒以及衰落特性，由变频通道下变频为中频信号，经过基带模块处理后得到测量伪距及通信信息，最后通过网络上传给管理控制计算机进行记录与性能分析评估；

3) 时频单元为管理控制计算机以及基带模块提供了统一的时间信息，又为收发信机及信道仿真器提供了不同频率的工作时钟，同时具有与星载测量通信系统进行时间同步的功能。

模拟器设计完成后，针对其功能性能指标进行了全面测试，测试结果表明，在功能方面，完全覆盖了星载测量通信系统，在性能方面，测距性能优于 0.1 m，通信误码率低于 10^{-8} ，主要性能指标同星载测量通信系统相当。在地面试验中，可用于替代星载测量通信系统。

2 主要功能单元工作原理与设计方法

模拟器中时频单元、变频通道以及信道模拟器接口明确、功能单一，已形成规模化的产品市场，可根据实际需求进行选择。管理控制计算机以及基带模块属于核心功能模块，需要进行针对性设计。

2.1 管理控制计算机软件设计

管理控制计算机是模拟器的控制核心并且提供了人机交互的界面，要求可靠性高，易于操作并且便于升级维护。工作平台选用研华 610L 系列工控机，具有较高的可靠性及环境适应性，管理控制软件则采用 VC6.0 和 Matlab 共同开发，为便于升级维护，进行了模块化设计。管理控制计算机完成的主要功能包括：模拟器试验任务的配置管理，星间数传信息的下发，测量通信数据的采集、存储、分析以及显示。为满足上述功能需求，将管理控制软件划分为以下功能单元，包括：配置管理单元，综合可视化单元，信息接入分发单元，试验结果分析评估单元，数据管理单元以及时间管理单元。

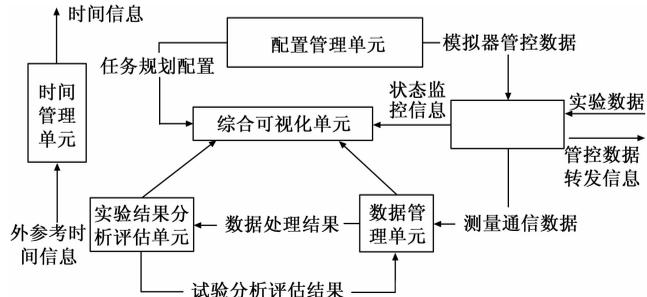


图2 管理控制计算机软件设计框图

1) 配置管理单元产生试验任务规划配置文件，并且生成模拟器内各功能设备的管控数据。

2) 信息接入分发单元，负责接收由基带模块 FPGA2 产

生并通过网络路由器上传的网络数据帧，解析出状态监控信息及测量通信数据后进行分发，另外，将管控数据打包后通过网络路由器下发给基带模块的 FPGA2。其中，网络数据帧基于 TCP 协议实现。

3) 数据管理单元，实现了数据存储及查询，基于 SQL Server2008 开发了测量通信及试验分析评估结果数据库。

4) 试验结果分析评估单元，基于 Matlab 开发了测量通信数据的分析功能，包括测距精度统计，误码率计算等。

5) 综合可视化单元，完成了规划配置信息、状态监测信息以及试验数据分析处理结果的显示。

2.2 基带模块设计

基带模块的设计难点在于接口复杂，并且涉及对星间扩频信号及信息层的处理。为此，采用“双 FPGA”架构设计，包括 FPGA1 与 FPGA2，两片 FPGA 之间通过 IO 连接，采用自定义协议进行同步数据传输。与采用单片 FPGA 实现方案相比，其优点在于扩展了基带模块对外接口，并且实现了信号处理的分层设计。其中，FPGA1 侧重于信号层的处理，包括信号采集、扩频信号捕获跟踪、数据编解码以及发送信号合成等功能，FPGA2 则主要完成信息层的处理，包括数据的编帧、解帧以及外围设备接口控制等功能。

如图 3 所示，基带模块主要由数模转换器 (AD)、模数转换器 (DA)、两片 SRAM 型 FPGA、接口电路以及若干 DC \ DC 等器件组成。其中，AD 采用 AD10200，支持位宽 12 bit 最大采样频率 105 MSPS，DA 采用双通道的 DA9783，FPGA 采用 Xilinx 公司的 XC2V3000。

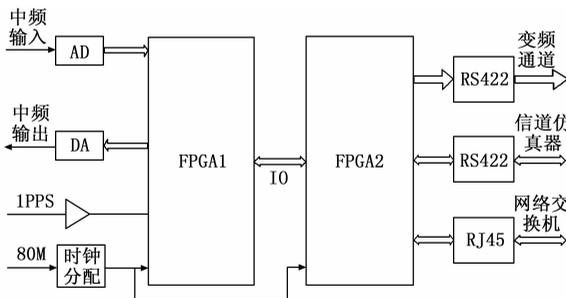


图3 基带模块硬件设计框图

1) FPGA1 对 AD 采样数据进行接收处理，包括数字下变频 (DDC)，扩频信号捕获，伪码相位及载波相位跟踪，软判决译码以及相位测量信息采集。测量信息以及译码后的通信数据通过 IO 传递至 FPGA2。另外，FPGA1 接收来自 FPGA2 的测量通信数据，完成数据编码、扩频及载波调制后，合成数字中频信号由 DA 输出。

AD 采样时钟、DA 驱动时钟以及 FPGA 工作时钟同源，频率为 80 MHz，对中频信号的采样满足带通采样定律，不会引起信号失真。

2) FPGA2 内完成数据解帧处理，解析的星间通信信息连同测量信息打包上传至管理控制计算机。另外，FPGA2 接收来自管理控制计算机的星间通信信息，与本地时间信息组成通信帧。工作过程中，FPGA2 通过 RS422 接口对变频通道和信道仿真器的工作模式进行同步控制，并转发管理控制计算机下发的参数配置信息，包括通道增益、传输时延、多普勒频移以及衰落特性等。

复用技术构建车牌识别多核处理器。这种片上系统设计方法具有硬件设计灵活, 可扩展性强等优点, 能有效地降低系统软硬件设计的难度, 缩短开发周期, 并提高设计的可靠性。另外, 在本文设计的多核处理器中, 利用 CQ 路由器构建了 NOC 作为片上通信机制, 具有更好的可扩展性和更强的并行计算能力。数据驱动作为区别于传统冯诺依曼控制驱动的另一计算机体系能更加快速的进行数据传输, 提高处理效率。通过本文构建的数据驱动多核处理器, 可以有效地实现车牌的文字识别。

参考文献:

- [1] 刘勇, 吴勇, 周芳. 对我国智能交通系统 (ITS) 发展的探讨 [J]. 交通与安全, 2006, 49 (1): 48-50.
- [2] 胡越黎, 朱卫, 丁倩: 基于多处理器系统的超级指令任务调用实现 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17 (12): 2541-2543.
- [3] 向慧芳, 胡越黎. 基于 SDZX-MV-02 MCU 核的多处理器架构设计 [J]. 计算机测量与控制, 2006, 14 (7): 942-945.
- [4] 胡越黎, 周谔: 基于 IP 复用的片上系统的构建与验证 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (3): 629-631.
- [5] 黄俊凉, 胡越黎, 王昆: MV10 微处理器与 APB 总线的接口设计 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (12): 3089-3091.
- [6] Sanka M, Hlavac V, Boyle R. Image processing, Analysis, and Machine Vision [M]. PWS Pub. 1999: 52-78.
- [7] Zhao Y Q, Gui W H, Chen Z C. Edge detection based on multi-structure elements morphology [A]. IEEE Proceedings of 6th World Congress of Intelligent Control and Automation [C]. Dalian; 2006: 9795-9798.

(上接第 212 页)

3 试验系统及试验结果

试验系统由测量通信系统模拟器、星载测量通信系统以及地面测试系统构成。如图 4 所示, 模拟器与测量通信系统之间构成互联互通的双方, 而地面测试系统用于实现时间同步与试验任务规划。试验过程中, 模拟器时频单元以及星载测量通信系统通过地面测试系统实现时间同步, 而管理控制计算机根据地面测试系统统一下发的任务规划信息, 控制模拟器在规定时间内开展特定场景的互联互通试验。

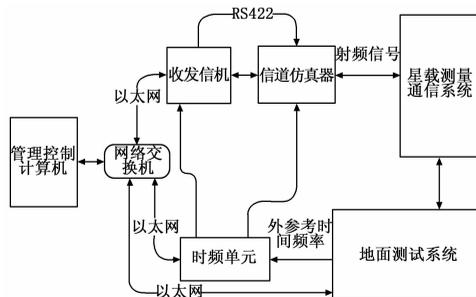


图 4 互联互通试验系统

2014 年 3 月, 利用该试验系统完成了模拟空间环境下共计 36 个场景的互联互通试验, 星间互联互通性能得到了充分测试。试验过程中模拟器状态良好、性能稳定并且易于操作, 试验结果验证了星间互联互通方案的有效性, 为评估星间在轨测量通信性能提供了有效支撑。

- [8] Pedrino E C, Saito J H, Senger H, et al. Color Mathematical Morphology In A FPGA [A]. 17th International Conference on Systems, Signals and Image Processing [C]. 2010.
- [9] Vincent O R, Folorunso O. A Descriptive Algorithm for Sobel Image Edge Detection [A]. Proceedings of Informing Science & IT Education Conference [C]. 2009: 97-107.
- [10] Meher P K, Valls J, Juang T B, et al. 50 Years of CORDIC: Algorithms, Architectures, and Applications [J]. Circuits and Systems I: Regular Papers, IEEE. VOL. 9 pp. 1893-1907. 2009.
- [11] Zhai X, Bensaali F, Ramalingam S. Real-Time License Plate Localisation on FPGA [A]. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops [C]. June 2011: 14-19.
- [12] Hurson A R, Kavi K M. Dataflow Computers: Their History and Future [J]. Wiley Encyclopedia of Computer Science and Engineering. 2008.
- [13] VoI H T, Osmari D K, Summa B, et al. Streaming-Enabled Parallel Dataflow Architecture for Multicore Systems [J]. Computer Graphics Forum. June, 2010, Volume 29, Issue 3, pp: 1073-1082.
- [14] Dally W J, Towles B, Packets R. Not Wires: On-Chip Interconnection Networks [A]. Design Automation Conference [C]. 2001: 684-689.
- [15] Kanizo Y, Hay D, Keslassy I. The Crosspoint-Queued Switch [A]. INFOCOM 2009 [C]. IEEE. 2009: 729-737.
- [16] Wang W F Li, J S, Lu C S. Design of a Crosspoint Queued Router for a Micro-network in SoCs [A]. International Conference on Advanced Computer Control [C]. 2011: 533-537.

4 结论

为了在地面阶段开展不同卫星之间星载测量通信系统的互联互通试验, 设计了一种具有空间传输信道仿真能力的星载测量通信系统模拟器。系统设计方面, 根据设备间信息交互数据量大小以及实时性的不同, 采用了以太网及 RS422 两种接口协议, 既提高了设备配置的灵活性又增强了运行管理的协调性。管控与数据处理软件的模块化设计以及基带模块的信号分层处理设计方案为模拟器实现性能优化以及功能扩展创造了有利条件, 使得模拟器便于维护以及升级改造。信道仿真器提高了测试的覆盖性以及试验结果的可信性。

除了支持有线测试外, 在加装天线后, 模拟器可实现同星载测量通信系统的无线对接。

参考文献:

- [1] 喻心, 王跃科, 陈建云, 等. 星载测距收发信机的测试系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2014 (2): 317-318.
- [2] 陈晓峰, 孟景涛. 卫星信道模拟器的设计 [J]. 无线电工程, 2011, 41: 51-54.
- [3] 侯博, 刘光斌. 基于 PXI 射频测试平台的多模卫星信号模拟器 [J]. 西安电子科技大学学报 (自然科学版), 2013, 40: 183-188.
- [4] 黄波, 胡修林. 北斗 2 导航卫星星间测距与时间同步技术 [J]. 宇航学报, 2011, 32: 1271-1275.
- [5] 石磊玉, 周益, 王东会, 等. 一种适用于卫星导航系统星间链路的可抢占时隙 TDMA 体制 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2012, 37: 714-718.