

低轨卫星可重构通信系统设计

梁 广^{1,2}, 龚文斌¹, 刘会杰^{1,2}, 余金培^{1,2}

(1. 上海微小卫星工程中心, 上海 200050; 2. 中科院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050)

摘 要: 提出一种适合于在轨重构的低轨卫星通信系统软、硬件架构方案,从工程实施角度探讨包括天线、RF 前端和基带处理单元在内的可重构硬件平台、可重构策略与软件控制流的可行性,分析了可重构卫星通信系统实现的关键技术。利用软件无线电技术,分析了基带和射频前端分离,可裁减、复用式平台实现的基本路径,以及基带、射频天线单元重构的实现方法。通过各常规通信模式射频前端和数字部分的灵活组合,同时支持多频点、多模式的通信制式,达到节省硬件成本和提高系统灵活性的目的。最后研制了一个可重构卫星通信地面测试原理样机,模拟了卫星有效载荷和地面通信站在 IS-95 体制下两种 CDMA 加密码字间的动态重构,有效验证了本文提出的可重构策略的正确性与合理性。

关键词: 有效载荷; 在轨可重构; 卫星通信; 低轨; 可编程门阵列

中图分类号: TN927

文献标识码: A

文章编号: 1000-1328(2010)01-0185-07

DOI:10.3873/j.issn.1000-1328.2010.01.030

0 引言

现代通信技术正以日新月异的速度发展。为了在卫星通信系统中更快更好采用最新的通信研究成果,需要采用可重构的卫星软硬件通信平台,在卫星在轨运行过程中能够根据不同的工作环境由地面控制对系统的软硬件进行重构,实现性能升级,满足新业务需求。以当前正在预研的低轨星座卫星为例,其业务的多样性和复杂性对星上处理平台设计提出了可重构性设计的要求。随着卫星跨区越境用户的不同,希望卫星有效载荷能够支持不同通信体制下(如 FDMA, CDMA)的多种业务,实现分时复用,同时需要支持一些视频高速数据业务;当我方卫星受到敌方干扰或在地震洪涝救灾中关注受灾地区时,需要修改卫星通信的某些特定参数,如 CDMA 的加密码字或多波束相控阵天线的波束控制系数等。

以上这些要求可以在卫星中采用多个不同的通信载荷来满足,但这必将大大增加卫星的重量功耗。因此未来的低轨卫星通信有效载荷需要具备可重构功能,多种通信模式兼容性设计,使其实现多模式下业务分时切换和特定通信基本参数的实时更新。同时卫星可以根据最新技术发展,通过载荷重构技术

实现在轨技术更新。

在可重构性设计方面,国外研发起步相对较早。在地面移动通信领域,美国 Envia 公司于 1999 年研制出被称为 AN2/6 的产品系列,该系列支持美国 20 世纪 90 年代使用的所有蜂窝/PCS 模式和波段(具体两个波段,6 种模式)。2002 年,澳大利亚科学任务卫星 FedSat 利用了可重配置技术研制的“高性能技术(HPC-D)”有效载荷。

HPC-I 是对不同类型卫星应用的可重配置逻辑进行验证的试验平台。其利用可重配置控制电路和 FPGA 结合,既实现了星上压缩处理的低复杂度,又实现了高效灵活的在轨配置。2005 年 Astrium 公司(EADS)制造的 Inmarsat-4 卫星利用波束成形技术可以在轨动态改变卫星的波束覆盖范围,这样可以应对突发业务需求,极大增加卫星的业务容量。

目前有文章介绍我国鑫诺卫星地面测控站曾采用过重构技术,但卫星有效载荷很少有相关技术应用的报道。低轨星座卫星业务需求也充分说明可重构卫星通信系统的研究对卫星通信技术发展和提高系统稳定性具有重要的现实意义。可重构性设计在节省通信系统硬件成本和提高系统灵活性方面也具有极大的优势。

收稿日期:2008-12-31; 修回日期:2009-02-22

基金项目:上海市科委重大科技项目攻关(03DZ15009)

1 可重构卫星通信系统构成与实现技术难点

可重构卫星通信系统的核心目标就是在传统卫星业务的基础上,实现卫星以及地面通信站的配置实时更新和通信模式切换控制。为了实现这一目标,我们将可重构性卫星通信系统按照功能定义,划分为三个部分:可重构卫星有效载荷、可重构地面通信站、地面控制站。

考虑到卫星在轨运行特点,为了保障卫星通信有效载荷在可重构性设计中,不同模式、频段通信体制兼容和切换运行的可靠性,我们采取以下设计思路来实现在轨卫星重构控制,同时实现卫星通信网内星地各基本通信单元模式、频点的同步切换^[1]。该设计思路主体框图如图 1 所示。

由地面控制站通过专用上行配置信道给出控制指令,星载计算机控制星上可重构载荷完成重构准备动作。载荷完成准备后返回应答指令通知地面控制站准备完毕,可以接收。然后地面控制站通过专用上行配置信道发送配置信息流,星上专用配置信道接收机解调接收。由星载计算机分离配置信息(一部分供卫星有效载荷配置用,一部分供地面通信站使用),并指导星上通信有效载荷将卫星配置信息存储在合适的存储空间,随后通信载荷自主引导配置信息流完成数字基带部分重构,再由数字基带部分指导射频、天线单元完成重构和切换。

当低轨卫星星座系统用户数目较少时,或者各地面通信站默认的(已知的)通信模式、参数更换,可以考虑卫星有效载荷配置完成后,通过配置信道广播发送一个“配置状态”信号,提示各地面通信站,各地面通信站可以采用手工切换配置。但是针对境外、公海等通信联络不便的特殊用户,特别是某些突发、先前未定的通信参数需要实时更新的应用场景,有效载荷配置完毕后通知星载计算机通过下行配置信道(广播信道性质)传输给地面通信站重配命令和重配信息流,通知地面通信站切换到一致的模式和频段。星地上、下行配置信号握手通信协议相似。相比于前种情况,这样增大了传输难度,但也提高了卫星通信全网切换的同步性,实现了智能化处理。最后卫星和地面通信站均切换到相同模式和频点,开始采用新的通信制式工作。

考虑到轨道太空辐射环境,允许星上可重构通

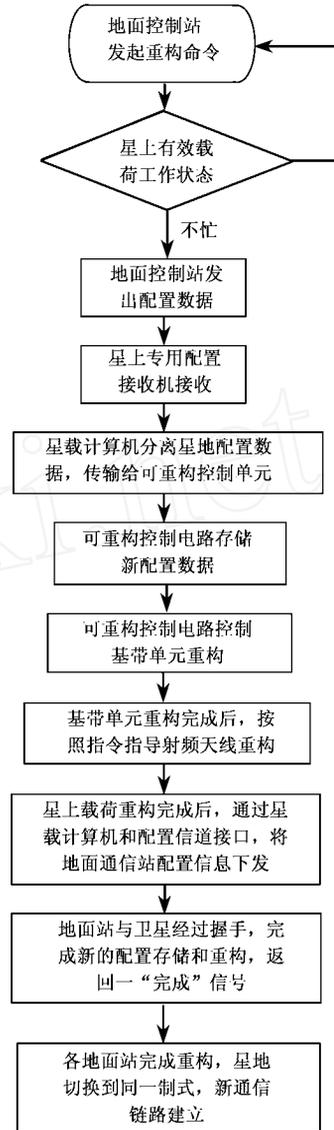


图 1 控制流程图

Fig. 1 Flow chart

信有效载荷有一定的自主判断力,以应对空间随机的单粒子效应(SEE),具体由载荷中可重构状态检测单元检测 SEE 翻转情况,通知星载计算机后载荷主动发起重构,不须通过地面控制站。这一部分在后面有详细论述。

可重构卫星通信系统的实现难点主要在这两个方面:星地重构环路控制流可靠性设计,通信有效载荷可重构软硬件设计。

(1) 可重构星地环路控制流可靠性设计,特别是针对中低轨卫星在轨运行特点和配置软件上载功能要求,研究星地环路间合理的控制握手协议及硬件接口,特别是解决在大多普勒频偏,卫星过顶时间

短等不利因素下,星地上下行配置信道的传输能力和可靠性增强技术。低轨卫星过境时间只有几分钟,而 FPGA 的配置数据常见的就有几兆(具体取决于芯片选择类型和编译结果具体数据格式),加上地面通信站的部分则更可观,如何在有效通信时间内,高速无误码的传输配置信息,对信号传输技术提出了较大的挑战。

(2) 可重构卫星通信软硬件平台方案,根据卫星通信业务要求,研究载荷可兼容的工作模式和频段,各传输模式的信号流和软件流。分析载荷各单元可重构硬件和软件控制方案,包括射频前端各模式间特殊元件复用技术以及各通道时分复用、供电切换控制技术,SAW 等射频宽频带器件应用。研究多模式兼容的天线重构、切换的关键技术,如采用 MEMS 开关改变波束指向、频点等技术。运用“软件

无线电”技术设计合理统一的基带、射频前端接口,特别是对基带单元的状态监控接口、重构重载导引接口的设计。

2 可重构卫星通信星上处理平台基本组成和实现

星上通信有效载荷主要由地面控制站控制重构。地面控制站发现特定模式多次注入失效,或者是由于提供特殊业务、通信 QOS 提高的需要,控制模式间切换和特定通信参数配置动态更新。

星上可重构有效载荷包括常规卫星通信系统中的星上天线和 RF 单元、基带处理单元,当然这些部分都增加对应的重构能力。为了实现可重构功能,增加可重构控制逻辑电路单元,以及其与上下行配置信道接收机、星载计算机的接口电路^[2]。如图 2 所示。

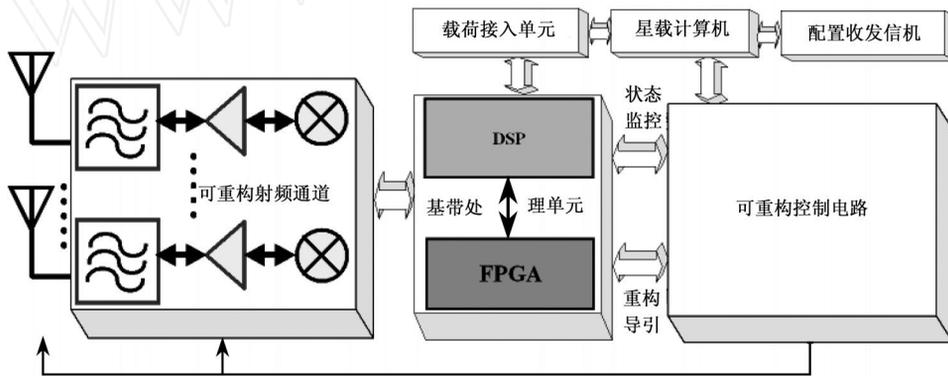


图 2 通信有效载荷组成框图

Fig. 2 Frame of payload

其中天线单元和射频单元可以利用当前比较热门的 SAW、MEMS 等技术来实现射频天线单元重构^[3],也可以利用不同频段模式的硬件设备间切换来实现。切换具体可以根据地面控制指令,通过可重构控制电路控制射频前端和天线单元电路的切换,来实现频段选择、模式切换的目的。切换方式具有流程简单、稳定可靠的优势。

载荷通信单元按照“软件无线电”技术设计思路,主要信号处理单元将由数字基带部分完成。具体采用模拟数字混合式设计,基带部分与各模式 RF 前端电路间采用统一接口。基带部分进行近零中频数字信号处理,同时也负责射频、天线单元的重构控制。

针对数字基带部分可重构要求,我们采用业界重构性能优越的 FPGA 作主体,DSP 辅助处理的架

构^[4]。FPGA 通过扩展存储器接口与 DSP 连接作为其下位机使用。FPGA 可负责解扩解码和调制解调处理,DSP 芯片可负责高层次 MAC 层、网络层的调度(如链路信道分配和控制,通信编解码信号控制等)。该基带系统拓展升级方便,适合卫星通信多用户接入处理。图 3 是基带处理单元的基本框图。

可重构控制电路是载荷可重构功能实现的重要环节^[5],其负责基带部分 FPGA、DSP 的工作状态监控以及可重构配置控制等。该单元预留与星载计算机通信接口,通过该接口实现配置控制命令的握手交互以及配置数据的更新。具体就是通过该接口接收星载计算机传输的新配置数据,去除配置数据帧的协议格式(如以太网,CAN),按照定义的格式从信号帧中抽取合适的配置数据。重构控制单元采用多镜像存储器的不同存储空间存储各模式的配置信

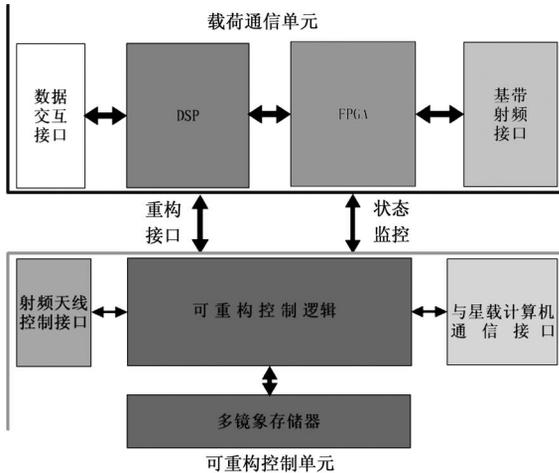


图 3 基带处理单元框图

Fig. 3 Baseband processing unit frame

息,根据地面控制命令实现指定通信模式的切换。同时也设计天线射频前端电路切换、控制的接口电路。为了应对器件空间单粒子翻转(SEU)事件,设计状态检测电路提供基带工作状态信息^[6]。

3 可重构性方案设计

3.1 数字基带处理单元

3.1.1 FPGA 重构设计

星载计算机接收到重配指令后传给可重构控制电路,其状态空闲(不在重构状态)时,可以反馈“可接收”信号。通过专用配置信道上发的配置信息(注意这里有两份:一份是星上有效载荷配置;一份是地面通信站配置)由配置信道接收机解调解扩后转给星载计算机和重构控制电路。可重构控制电路通过接口处理去网络协议帧,再由其转写至合适位置的配置存储器中。接收完成后,导引重配。同时发送接收完毕信号给地面控制站。当前主流的FPGA芯片均有支持上述的动态更新的硬件接口,而且提供了支持动态更新的IP,如altera公司的动态并行flash装载IP。

无论何种缘由,星上有效载荷在重构阶段都会造成通信中止。为了尽量维护通信链路的完整性,可以采用部分重构^[7](partial configuration)和“擦写”(scrub)技术,减少配置时间损耗。

3.1.2 DSP 重构设计

关于DSP部分的重构,可采用这样的设计。重构控制单元通过硬件复位,使DSP进入复位状态等

待新的配置信号载入,然后控制单元通过特殊接口(如HPI主机口)接手对DSP的控制,通过该接口将各模式的配置信息,灵活存放到DSP的程序存储空间中的任意位置,然后触发DSP重新启动,执行新通信制式的代码,实现通信模式切换和更新的目的。

对于特定通信参数,可以设置专用数据空间,重构控制单元接收后存储各参数,同时通过中断等方式通知DSP来读取更新。

但是注意DSP重构没有FPGA灵活,DSP更改配置文件不能通过部分配置方式,实现某段配置程序的更改。因为某段程序更改会加入中间变量会导致数据段变换,实际上更改了整个的编译结果,所以必须进行全部擦写。

3.2 射频天线单元可重构技术探讨

如前所述,天线和RF前端电路主体采用切换方式实现多模式兼容工作要求,当然从卫星电能资源有限角度,切换不仅在信号流层面实施,也应包括射频供电通路切换,这样可以充分节省电力。关于射频切换,主控方是数字基带部分,具体可用SPST开关树或者继电器、晶闸管等器件来实现。

考虑利用当前业界热门的SAW技术加工的射频滤波器,设计合理的宽带滤波器通路。以及采用宽频带射频芯片,设计合理的射频通路在相同频点的通信模式间射频前端部分电路器件复用,以满足小型化、低功耗的指标要求。

也可以考虑采用MEMS技术加工的射频天线阵列开关切换技术实现更改天线波束指向甚至频点。特别是波束成形相控阵天线,若是采用数字波束成形(DBF)方式^[8],可以使用波束参数上载,改变波束参数配置来实现波束指向更改。若是采用模拟方式在射频端控制波束指向,可以用数字端重构控制单元控制射频端衰减器、移相器,从而更改射频通道幅度、相位参数^[9],使天线波束指向任何指定位置。ESA重点研发的项目ASYRIO^[9](Antenna System Reconfiguration in Orbit),将应用于西班牙电信卫星,通过改变波束成型网络参数,实现静止轨道卫星相控阵天线的波束覆盖区域在轨灵活配置的目的。

4 可重构卫星通信测试系统设计

上海微小卫星工程中心现已初步完成了一个可重构卫星通信系统的地面测试原理样机,对星上有

效载荷可重构技术进行了大量的测试,特别是星上可重构控制逻辑电路。该测试系统有效验证了可重构逻辑设计的正确与合理性。

我们用 PC 模拟星载计算机,用两套可重构通信平台分别模拟卫星载荷和地面通信站。该演示系

统模拟了 IS - 95 通信体制下两种不同的 CDMA 加密码字间的切换,观察分析载荷和地面站在关键通信参数改变情况下,通信链路切换和重新建立整个流程。以下是该测试系统互连示意图。

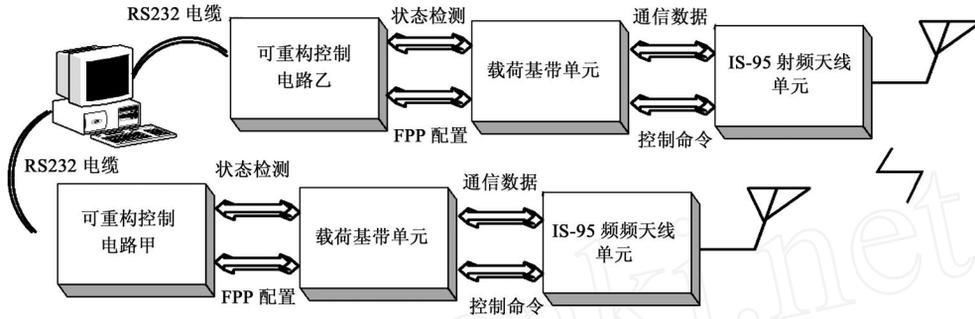


图 4 测试系统互连框图

Fig. 4 Architecture frame of test system

其中可重构通信平台包括由数字基带通信部分和可重构控制电路组成的数字基带电路以及 IS - 95 体制下射频、天线 (VHF 波段) 单元。数字基带电路的实物照片如图 5。重构控制单元电路又由配置控制命令与数据接口电路,工作状态监控电路,重构导引与控制电路部分组成。

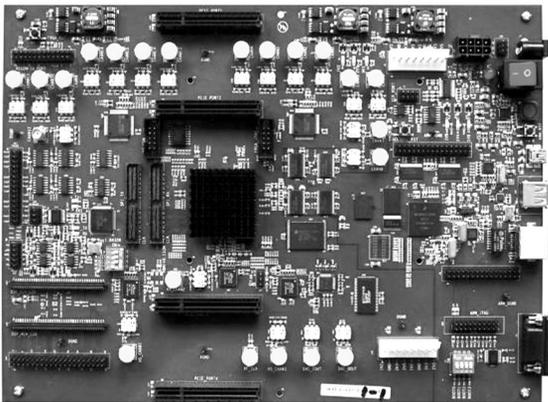


图 5 数字基带电路照片

Fig. 5 Photo of digital baseband subsystem

我们采用 Actel 公司的 ProASIC + 系列航天军品级 FPGA 作为重构控制的主芯片,该芯片基于 flash 工艺,具有配置信息掉电不损失,可靠性高,抗浪涌大电流等优点。通过灵活配置该芯片,实现重构导引、控制与状态监控等功能。另外由 ATMEL 公司单片机负责配置控制命令与数据接口的通信协议处理。该单片机采用 SOI 工艺,抗辐照性能较好,适合于未来航天运用。图 6 是重构控制电路的原理框图。

模拟星载计算机 (PC),与模拟卫星有效载荷多次握手后,通过串口电缆将 RBF (raw bit file) 格式配置数据^[10]传给载荷可重构控制电路。配置控制命令与数据接口接收,并去除串口协议帧,从 RBF 配置数据流中提取有效的核心配置数据,然后重构控制电路将其存储至指定的配置存储空间。为了保证配置数据在以后的航天环境中不会因为单粒子翻转事件导致配置信息改变,存储内容都进行冗余备份。重构导引与控制电路通过快速被动并行配置接口 (FPP) 将指定配置数据下载注入星上通信单元,完成重构。当然按照 FPGA 芯片制造商接口时序要求需要编写重构状态机电路,才能正确完成配置流程。配置状态机流程图如图 6。配置可重构控制电路通过串口反馈给模拟星载计算机一个“完成”信号,通知其重构完成。

状态监控电路在算法和电路等不同层次对载荷基带通信有效部分工作状态进行监控,一旦有异常状况导引重构^[11],特别是实时重构的 FPGA 芯片。因为 FPGA 芯片大多是基于 SRAM 工艺的,各逻辑门连接开关信息由配置层 RAM 来控制,在太空环境中容易遭遇单粒子效应 (SEE),导致配置信息、电路逻辑翻转。具体采用如下手段完成监控目标:

- (1) 采用“回读”技术,将配置数据、所有寄存器内容、分布式块 RAM 资源进行回读,与已存好的数据进行比较核对。
- (2) FPGA 内部逻辑进行三倍冗余备份^[12],采用

竞选 (vote) 电路,给出错误状态。

(3) 内部设置软件陷阱和中断。

(4) 采用 CRC 或 Glay 码等校验编码,不仅在配置时,也可在进入用户模式后,检测状态。

(5) 采用软件和硬件看门狗电路,若“喂狗”失

败,中断溢出告知错误状态。

模拟卫星有效载荷配置完成后,模拟星载计算机采用上述相同的机制将新的配置信息下发,并指导模拟地面站完成重构操作。最后模拟卫星有效载荷和模拟地面站均采用新的 CDMA 加密码字工作。

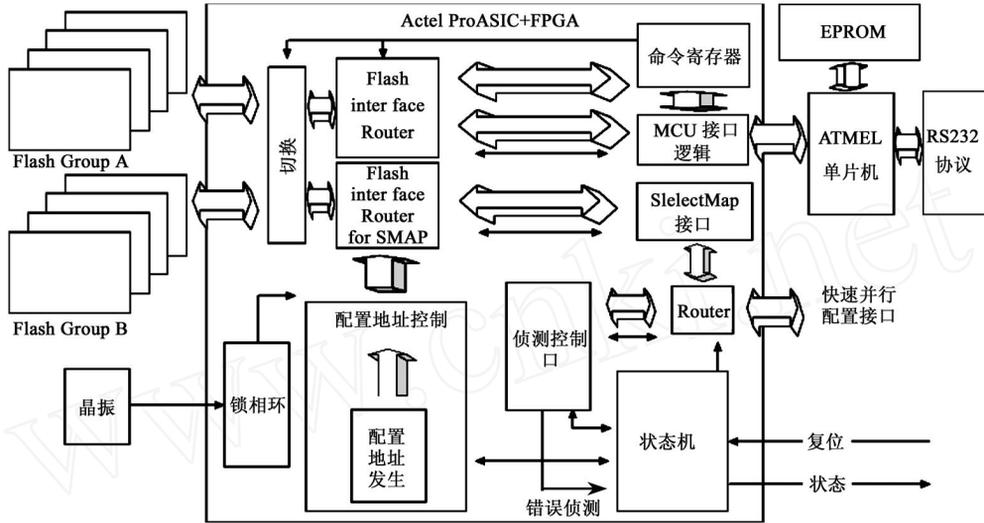


图 6 重构控制电路的原理框图

Fig. 6 Schematic of reconfiguration control circuit

该试验平台测试结果较好,不同码字间通信切换正确自然,通信中断几分钟后就能重新建立通信连接。通过该演示系统,可以充分验证通信有效载荷特别是基带单元的可重构设计思路,为以后研制上天的卫星有效载荷打下坚实的基础。

5 小结

本文提出构建在轨可重构的卫星通信有效载荷软硬件平台,同时结合卫星通信系统要求,对星地通信系统体系结构、通信卫星/地面站重构关键技术进行研究。可重构卫星有效载荷支持多速率、多模式、多频段的通信模式,可缩短卫星通信系统的研发周期,也提高卫星通信系统的可靠性与灵活性,降低了系统升级的成本。可重构性卫星通信性技术正逐步成为新一代低轨卫星通信技术的一个发展方向。

参考文献:

[1] Kalte H, Langen D, Vonnahme E. Dynamically reconfigurable system-on-programmable-chip [C]. IEEE Proceeding of 10th EuroMicro Workshop on Parallel, Distributed and Network based Processing, 2002.

[2] Ewerson Carvalho, Ney Calazans, Eduardo Briio. PaDReFA frame-

work for design and implementation of dynamically and partially reconfigurable systems [C]. IEEE Symposium on Integrated Circuits and Systems Design, 2004.

[3] Busquere J P, Ducarouge B, Grenier K. Above IC MEMS capacitors for integrated reconfigurable circuits [C]. IEEE Microwave Conference Proceedings, 2005.

[4] XilinxInc. Remote FPGA Reconfiguration Using MicroBlaze or PowerPC Processors [R]. Xilinx Application Note: XAPP441 (v1. 1) 2006:1 - 32.

[5] Benso A, Gilardo A, Mazzocca N. Reconfigurable systems self-healing using mobile hardware agents [C]. IEEE International Test Conference, 2005.

[6] Xilinx, Inc. Correcting Single-Event Upsets Through Virtex Partial Configuration [R]. Xilinx Application Note : XAPP714 (v1. 4) 2006:1 - 56.

[7] Xilinx, Inc. Two Flows for Partial Reconfiguration: Module Based or Difference Based [R]. Xilinx Application Note: XAPP290 (v1. 1) 2003:1 - 43.

[8] David D, Curtis, Capt Ryan W. Thomas 32-channel X-band digital beamforming plug-and-play receive array [C]. IEEE Symposium: Phased Array Systems and Technology, 2003.

[9] Montesano MJ, Crone C. ASYRIO: Antenna system reconfiguration in orbit [J]. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, 1995, 37(3) :7 - 14.

[10] Xuejie Zhang, Kamwing Ng. An effective high-level synthesis ap-

- proach for dynamically reconfigurable systems[J]. IEEE Transaction on Antenna and Propagation, 2000:343 - 348.
- [11] Katarina Paulsson, Michael Hubner. Markov chain methods for run-time failure recognition and recovery in dynamic and partial reconfigurable systems based on xilinx virtex-II pro FPGAs[C]. IEEE Symposium on Emerging VLSI Technologies and Architectures, 2006.
- [12] XilinxInc. Triple Module Redundancy Design Techniques for Virtex FP-

GAs[R]. Xilinx Application Note :XAPP197 (v1.0.1), 2006:1 - 62.

作者简介:梁广(1983 -),男,博士研究生,主要研究方向为可重构通信系统与相控阵天线技术。

通信地址:上海市长宁区长宁路 865 号 2 号楼通信室(200050)

电话:(021)62511070 - 2419

E-mail:hnlq219@163.com

The Design of Reconfigurable LEO Satellite Communication System

LIANG Guang^{1,2}, GONG Wen-bin¹, LIU Hui-jie^{1,2}, YU Jin-pei^{1,2}

(1. Shanghai Engineering Center for Microsatellites, Shanghai 200050, China;

2. Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Science, Shanghai 200050, China)

Abstract: A type of in-orbit reconfigurable software/hardware architecture scheme was proposed for LEO satellite communication system. Reconfiguration strategy, hardware platform and control method were discussed. The key technology of implementation feasibility was analyzed in the paper. Software design radio method was fixed on the implementation of reconfigurable and reusable communication system, by which the cost could be reduced and capability could be much more flexible. Ultimately, reconfigurable communication test system is designed, on which the experiment of dynamical switch between two groups of CDMA (IS-95 system) code can be accomplished. The results validate the rationality and feasibility of reconfiguration strategy.

Key words: Payload; In-orbit configuration; Satellite communication; LEO; FPGA