

基于 CCSDS 标准的卫星数据实时处理 FPGA 设计

刘秀秀^{1,2}, 董振兴², 朱 岩²

(1 中国科学院 国家空间科学中心, 北京 100190; 2 中国科学院大学, 北京 100190)

摘 要: 根据空间数据系统咨询委员会(CCSDS)分包遥测标准, 在现场可编程门阵列(Field-Programmable Gate Array, FPGA)平台上实现了一套基于 CCSDS 数据帧格式的实时数据解帧和解包的方案, 包含了帧同步、去扰、解帧、解数据源包等模块. 方案充分利用 FPGA 并行处理的优势, 解决了地面软件先接收后处理方式实时性差的问题, 并实现了现 IP(Intellectual property)的模块化复用. 实验结果表明, 在占用资源较少的情况下, 有效完成了 CCSDS 数据的实时处理功能, 为文件的可靠性传输奠定基础.

关键词: 空间数据系统咨询委员会(CCSDS); 帧同步; 数据解扰; 数据解帧; 解包; 实时处理

中图分类号: TN919

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2017)08-0052-05

A Design of Satellite Data Real-time Processing According to CCSDS Specification and FPGA Implementation

LIU Xiu-xiu^{1,2}, DONG Zhen-xing², ZHU Yan²

(1 National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: According to packet telemetry standard by Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS), this paper implements the design of data processing system for decoding frame and unpacking based on CCSDS data frame format on Field-Programmable Gate Array (FPGA) platform. The syetem includes three modules: decoding Transfer frame, decoding CFDP frame and unpacking module. The design takes advantage of the parallel processing characteristic of FPGA, which makes up the defects of data processing software in teal-time processing and IP (Intellectual Property) module reuse. The experimental result shows that the system can complete real-time decoding frame and unpacking of CCSDS data reliably and effectively and lays foundation for the realiability of the file transmission.

Key words: Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS); frame synchronization ; de-scrambling; decoding frame; decoding packet; real-time processing

1 引言

空间科学不断发展, 卫星有效载荷逐步丰富, 高速多路的载荷数据特点要求空间数据通信速率越来越高, 通信的数据量也愈来愈大, 同时, 对数据的处理和传输要求也相应提高. 地面接收系统需要能够实时、准确地接收处理多种载荷卫星数据, 成为问题的关键^[1].

CCSDS(空间数据系统咨询委员会)主要为空

间数据系统指定标准化的通信体系结构、通信协议与业务. 根据其制定的《空间数据系统标准建议书·分包遥测》标准^[2], 采用了分包遥测数据格式, 不同的虚拟信道分时复用有限的波道资源, 合理地将不同的航天载荷数据信息传输到地面系统, 提高了信道带宽的利用率^[3].

基于 CCSDS 制定的分包遥测数据格式, 软件实现方式的解帧解包具有一定的延时性, 并需要人员实时处理, 耗费大量资源成本. 针对此不足, 本文

提出了基于卫星数传系统的地面遥测源包硬件 FPGA 实时处理实现方案.

2 卫星数据实时处理系统概述

在卫星通信系统中,根据 CCSDS 遥测源包数据标准,在发送端,原始数据经过封装构成特定形式的帧结构进行数据传输.首先,发送端将各个分系统的遥测数据块加上规定的包头和包尾信息,封装成不同长度的数据源包.其次,多个包再进行分割分成段,多个包和段数据组合截成固定的长度,加上帧头和帧尾信息构成 CFDP(CCSDS File Delivery Protocol)帧^[4-5].最后,多个 CFDP 帧构成的数据流分割成规定的数据段后,加上固定的传输帧^[2,6]帧头

和帧尾信息,构成传输帧(Transfer Frame)进行空间数据的传输.不同虚拟信道的传输帧时分复用同一个物理传输信道.传输帧经过编码、加扰、加同步码后构成物理信道访问单元(Channel Access Data Unit,CADU),经过物理层处理成符合物理信道传输的信号最后送到物理层进行传输.

在接收端,地面接收系统^[6]将接收到的信号经过相应的处理得到二进制码流数据,对该码流数据经过一系列帧同步、去扰、解码处理之后,提取出可解的数据传输帧.将收到数据后按照分包遥测的逆顺序进行数据的解帧解包工作,恢复出原始数据块,发送给各个用户.卫星通信系统数据处理流程如图 1 所示.

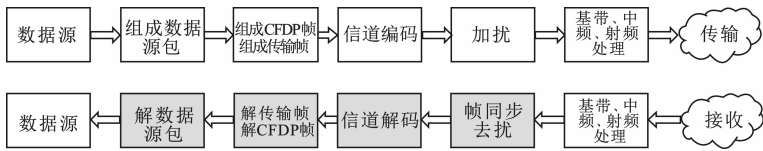


图 1 卫星通信系统数据处理流程

3 系统功能模块实现

3.1 帧同步

帧同步用于确定数据流中有效数据帧的起始位置.在本项目中 CCSDS 协议标准规定传输层帧同步码(Attached Sync Marker, ASM)为 1ACFFC1D.由于数据流是串行接收的,所以需要通

过移位,依次按位寻找 32 位,确定同步码^[7].在解传输帧之前,帧同步是基于三种状态转移实现的,即在同步态下开始解帧;在解 CFDP 帧和解数据源包时,在找到同步码后,即认为一帧的起始位置,然后开始解析数据.

3.2 去扰

为了保证信道的转变密度,避免长时间出现连‘0’或连‘1’码,传输端使用生成多项式 $h(x)=x^8+x^7+x^5+x^3+1$ 产生 255 bit 重复出现的伪随机序列,与除同步码之后的数据进行异或操作,称之为加扰.由于 $A \oplus 0=A, A \oplus A=0$,设原序列为 P ,伪随机序列为 M ,加扰后的序列为 Q ,则 $M \oplus Q=M \oplus (M \oplus P)=(M \oplus M) \oplus P=0 \oplus P=P$,因此,接收端在解帧时用同样的伪随机序列与收到的除同步码之外的每一位二进制数据进行异或,即可恢复出数据^[8].

3.3 LDPC 译码

为了降低信息传输的误码率,增强抗干扰能力和纠错能力,信道编码采用 LDPC(Low Density

Parity Check Code)编码方式.所以,解帧时需要 LDPC 译码.该模块调用 LDPC 译码模块.

3.4 解析帧格式

经过去扰、LDPC 译码后,开始进行解传输帧.根据传输帧格式,判断航天器标识符、虚拟信道标识符等是否正确,判断虚拟信道帧计数是否连续,并将各虚拟信道的数据输出到不同的接口并缓存;并记录错误帧.

解析 CFDP 帧,该过程与解传输帧类似,但没有去扰和 LDPC 译码过程;经过上一步的解帧,数据有一定的时间同步性,在找到帧同步码后,认为一帧的起始,进行解帧操作,得到数据源包^[9-10].

解数据源包与解 CFDP 帧原理类似,最终恢复出原数据.

4 系统 FPGA 设计

4.1 帧同步模块设计

帧同步完成有效数据的同步,由搜索态 st0、校验态 st1、同步态 st2 组成,状态转移图如图 2 所示.

复位 rst=‘1’有效时进入 st0 状态,在 st0 态检测标志位 flag1=‘1’即检测到同步码,进入 st1 态,在 st1 态检测到两个同步码进入 st2 态,在此状态解码,若连续三次未找到同步码,进入 st0 态重新检索. $N=2$ 帧时间为后方保护时间,防止进入假同步, $M=3$ 帧时间为前方保护时间,避免因误码而进入失步状态的可能性.

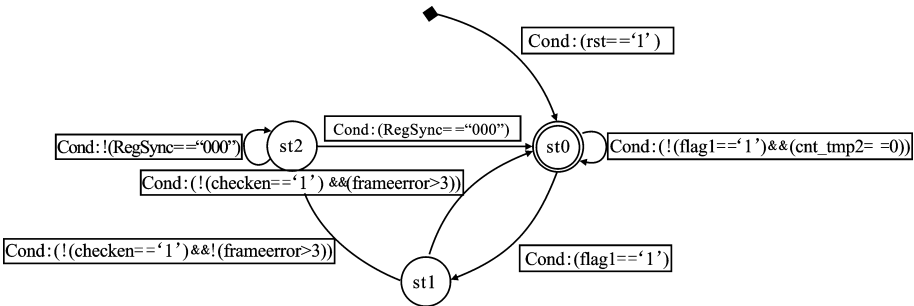


图 2 同步状态转移图

4.2 去扰模块设计

去扰是解扰的逆过程. 生成多项式 $h(x)=x^8+x^7+x^5+x^3+1$ 产生周期为 255 bit 的伪随机序列, 与帧长度 1 020 B 的数据帧(去掉同步码)异或, 经

过 32 个周期刚好将一帧数据解扰. 其原理如图 3 中的线性移位寄存器(Linear Feedback Shifting Register, LFSR)所示.

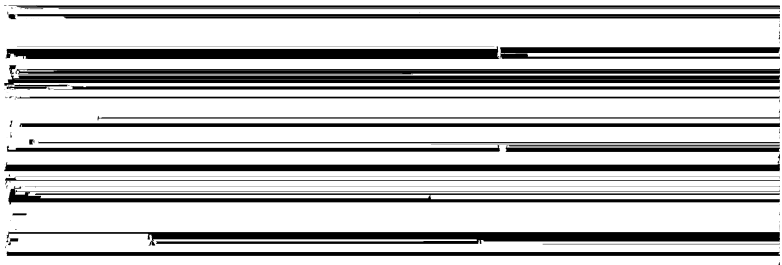


图 3 伪随机序列发生原理图

由于伪随机序列经过 255 bit 之后重复出现, 帧长度(去掉同步码之后)为 1 020 B, 因此, 将伪随机序列 $1\,020 \times 8$ bit 的数据存储于 ROM 中, 此 ROM 宽度为 8 bit, 深度为 1 020 bit, 根据地址线循环读取 ROM 中的数据与之异或, 节省资源.

4.3 传输帧解析模块设计

本项目中传输帧采用固定帧格式, 同步码占 4 B, 帧主导头占 6 字节, B_PDU 导头占 2 字节, 数据域占 884 字节, LDPC 校验位占 128 B. 将帧格式分为四种状态, st1: 判断, 分类; st2: 判断连续性; st3: 信令域 00'H; st4: 数据域. 转移条件是计数器当前值和数据帧内容是否正确, 转移图如图 4 所示.

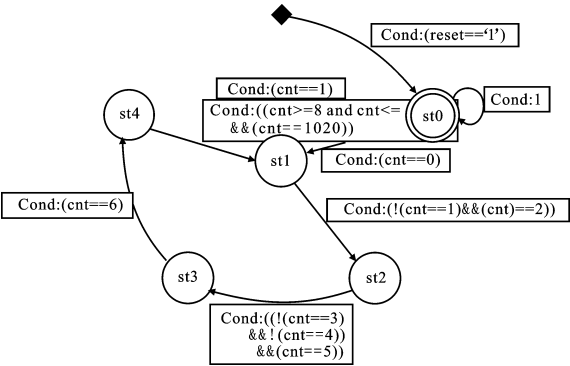


图 4 解传输帧状态转移图

文件数据 PDU(File-PDU). 指令 PDU 分两种: M-PDU(Meta PDU, 元 PDU) 和 EOF-PDU(End of PDU, 结束 PDU). M-PDU 指示文件开始, “文件指令”码(Mcode)为 07'H, EOF-PDU 的“文件指令”码(Encode)为 04'H, File-PDU 的“PDU 类型”为 16'H. 解析过程分两步.

(1) 先找到帧同步码之后, 由“PDU 类型”判断是 Instruct-PDU 或 File-PDU, 若其他关键字正确, 分类输出数据 InstructPDU_dout(7:0), FilePDU_dout(7:0)和使能信号 InstructPDU_flag, FilePDU_flag;

帧同步(syn_oneframe)模块输出数据 dataout(7:0)连接到解扰(xor_jierao)模块, 使能 flag_en_out 连接到 xor_jierao 的 load 端; xor_jierao 模块的数据输出 c(7:0)连接到解帧(decode_frame)模块的 datain(7:0)端, 数据使能来自 huo 模块的输出 c: std_logic 端. 具体实现结构图如图 5 所示.

4.4 解 CFDP 帧和解数据源包模块设计

4.4.1 解 CFDP 帧模块设计

CFDP 帧分为指令数据 PDU(Instruct-PDU)和

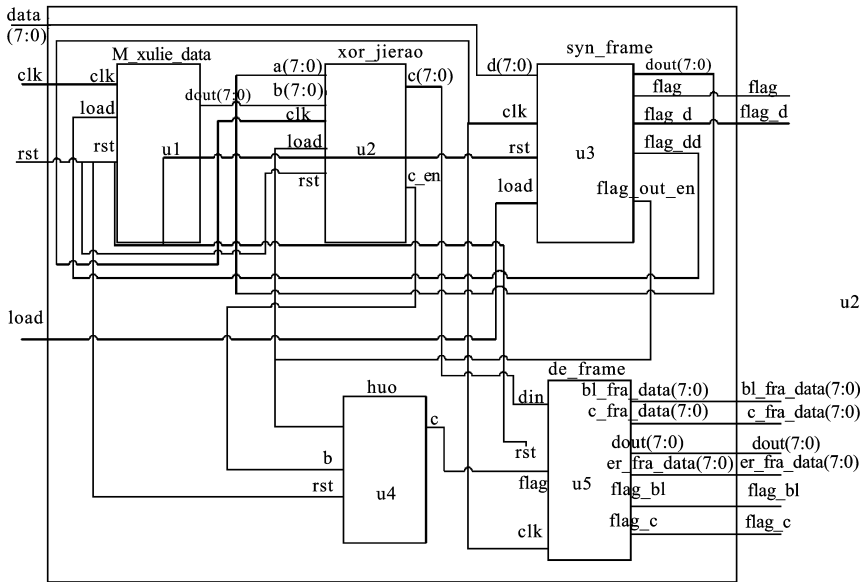


图 5 解传输帧结构图

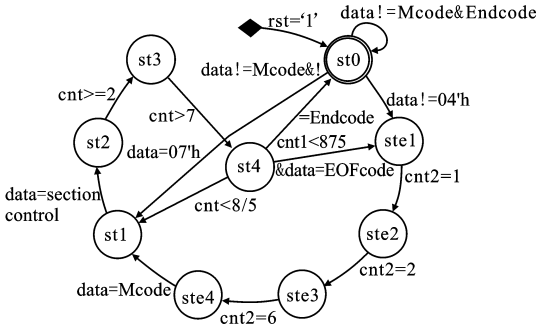


图 6 解 Instruct-PDU 状态图

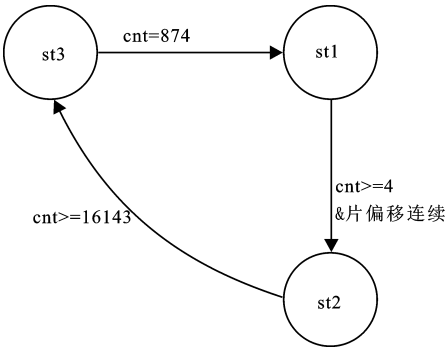


图 7 解 File-PDU 状态转移图

(2)解 Instruct-PDU 和解 File-PDU 模块设计. 该模块与解传输帧类似. 解 Instruct-PDU 模块有九种状态. st0 搜索态,当条件满足时跳转,在状态 st4 解析 M-PDU,在状态 ste4 解析出 EOF-PDU 数据. 解 File-PDU 模块有三种状态:st1 片偏移状态,占 4 字节时间;st2 文件数据状态,16 128 字节数据时间;st3 是 CRC 校验值状态,占 2 字节数据. 解 Instruct PDU 状态图与解 File-PDU 状态转移图分别如图 6、7 所示.

4. 4. 2 解数据源包模块设计

解遥测源包过程与解 CFDP 帧类似,其长度不固定,将关键字“包数据长度”存储 pack_len,供解包状态使用. 遥测源包格式如表 1 所示. 帧同步模块找到一帧的开始,输出有效数据 dataa_16(15:0),和使能 flag_d. 解包模块在使能信号 load 有效时,开始解包,并存储到不同的 FIFO 中,解出原始数据.

表 1 遥测源包数据格式

同步码		主导头						E-PDU 数据域
		版本号	类型	副导头标志	应用过程标识符	分组标志	包序列计数	包数据长度
16b	3b	1b	1b	11b	2b	14b	16b	8 000 b

5 测试结果及分析

本设计使用 Xilinx 公司的 Virtex-5 sx95T 芯片实现,并在 ISE14. 6 环境下使用 VHDL 完成电路

设计、综合、布局布线及程序下载. 本系统的实现结构图如图 8 所示. 帧同步模块和去扰模块设计在解传输帧模块内部. 整个系统主要由 top_DeTrans-Frame、top_decode_CFDP、decode_YCYPacket 三

个模块构成. rst 为系统复位信号, 高电平有效; clk 为时钟信号; datain 为 8 位并行输入数据; load, 输入数据有效标识信号, 高电平有效; Gongcan_out 为输出数据; Gongcan_flag, 输出数据有效标识信号, 高电平有效; GPS_out 为输出数据; GPS_flag, 输出数据有效标识信号, 高电平有效.

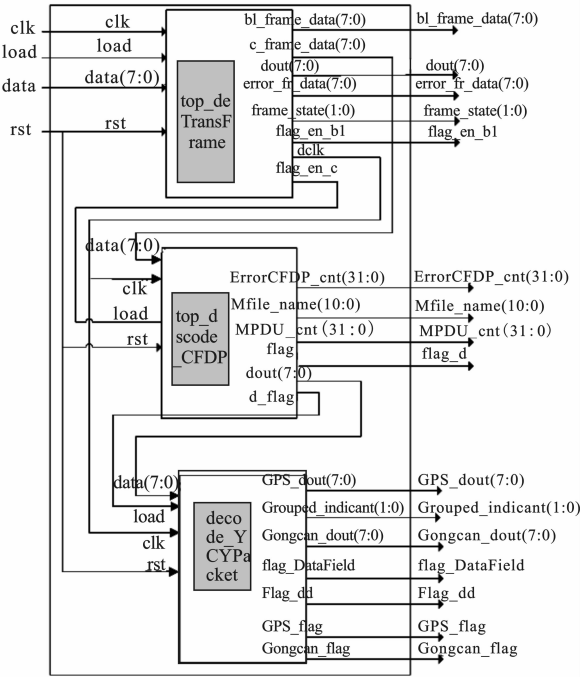


图 8 卫星数据实时解析系统结构

top_DeTransFrame 模块实现解析传输帧功能, top_decode_CFDP 模块实现解析 CFDP 帧功能, decode_YCYPacket 模块实现解析遥测源包功能, 上一模块的数据输出 dataout 暂存于 FIFO 缓存中, 作为下一模块的数据输入 datain, 并给出数据有效的使能信号 en. 三个模块可并行执行, 实现数据的实时处理, 有助于提高解析卫星数据的速率, 可实时性高.

卫星数据实时处理系统综合后 FPGA 资源使用情况如表 2 所示, 可以看出, 该芯片所包含的逻辑单元远远超出了本设计所使用, 该算法可以在该芯片上使用, 在实现解帧解包功能的同时, 占用较少的资源.

表 2 卫星数据实时处理系统资源占用

资源类型	占用数/可用数	比例/%
Slices	545/14 720	3
Slice Flip Flops	978/58 880	1
SliceLUTs	1 643/58 880	2
IOs	132	
bonded IOBs	131/640	20
GCLKs	4/24	16
Maximum frequency	217.74 MHz(最大值)	

静态时序仿真结果表明该系统的时钟周期可以达到 6.4 ns(时钟频率 156.25 MHz), 能够满足用户提出的不低于 100 MHz 的要求. 在板级系统实测中, 该卫星数据实时处理系统在设计工作时钟频率下工作良好.

系统在 Modelsim 10.1C 平台上仿真, 系统时序仿真结果如图 9 所示. 结果表明, 输出信号 Gongcan_out 在 Gongcan_flag 使能信号有效的情况下输出有效数据. 其他来源的数据信号类似.



图 9 系统时序仿真图

6 结束语

根据 CCSDS 建议标准, 在 FPGA 平台上可以实现对 CCSDS 格式数据完成帧同步、解传输帧、解 CFDP 帧、解包和参数提取的方案设计, 实现了在接收数据的同时完成解帧解包功能, 实时解析出相关参数和原始数据, 解决了软件处理方式先接收后处理实时性差的问题. 同时实现了 IP 复用性. 该系统在占用较少资源情况下, 具有实时处理的特点, 并提高了处理速度.

参考文献:

[1] 张丽萍. CCSD 在我国航天领域的应用展望[J]. 飞行器测控学报, 2011, 30(增刊 1): 1-4.

[2] Packet Telemetry. CCSDS 102.0-B-5[S]. CCSDS, 2000.

[3] 王森. 卫星高速 CCSDS 数据的软件处理过程改进研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2010.

[4] CCSDS. CCSDS 720.2-G-3[S]. CCSDS, 2007.

[5] CFDP. CCSDS 727.0-B-4[S]. CCSDS, 2007.

[6] 张源. CCSDS 数据地面接收系统软件设计[J]. 遥测遥控, 2008, 29(3): 1-5.

[7] 龚志民, 杨金孝, 李少卫. 基于 CCSDS 标准的并行帧同步系统的 FPGA 实现[J]. 微电子学与计算机, 2015, 32(7): 81-85.

[8] 易茂祥, 张浩, 郭红卫, 等. m-序列数据扰码技术及其在 SATA 中的应用[J]. 微电子学, 2012, 42(4): 502-505.

[9] 马苗, 朱岩. 基于 CCSDS 标准的卫星数据处理软件设计[J]. 电子设计工程, 2015, 23(1): 16-20.

语言模型来扩充文本特征,使用多元特征克服单个词语存在的上下文歧义性. 针对 n-gram 语言模型其特征维度和冗余度都较大的问题,本文提出了一种基于卡方统计的方法进行 n-gram 特征提取与特征约简. 该方法,在传统卡方统计算法的基础上,利用特征的共现与不共现的区别性以及特征类别的相关性等,分步进行特征提取与冗余消减. 最后,经过多组实验分析,表明文本方法对 n-gram 特征的提取与约简是有效的.

目前研究的文本主要为二类,在特征冗余度约简部分,没有考虑到多分类类别相关的处理条件. 在后续的工作,将进一步研究多分类特征冗余的约简问题.

参考文献:

[1] Pang B, Lee L, Vaithyanathan S. Thumbs up; sentiment classification using machine learnin techniques [C]//Proceedings of the ACL-02 conference on Empirical methods in natural language processing-Volume 10. Association for Computational Linguistics, 2002: 79-86.

[2] Guerini M, Gatti L, Turchi M. Sentiment analysis: How to derive prior polarities from sentiwordnet[J]. Breast Cancer Immunodiagnosis &. Immunotherapy, 2013;3-11.

[3] Hogenboom A, Frasinca F, Jong F D, et al. Polarity

classification using structure-based vector representations of text [J]. Decision Support Systems, 2015, 74 (C):46-56.

[4] Tripathy A, Agrawal A, Rath S K. Classification of sentiment reviews using n-gram machine learning approach [J]. Expert Systems with Applications, 2016, 57:117-126.

[5] Zhang X, Wu B. Short text classification based on feature extension using The N-Gram model[C]// Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD), 2015 12th International Conference on. IEEE, 2015: 710-716.

[6] Yang Y, Pedersen J O. A comparative study on feature selection in text categorization[C]//ICML. Nashville,1997, 97: 412-420.

[7] Fürnkranz J. A study using N-Gram features for text categorization [J/OL]. [2016-07-03]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.49.133>.

作者简介:

周爱武 女,(1965-),硕士,副教授,硕士生导师. 研究方向为数据挖掘与 WEB 技术.

马那那(通讯作者) 女,(1988-),硕士研究生. 研究方向为数据挖掘. E-mail:1538238620@qq.com.

刘慧婷 女,(1978-),博士,副教授,硕士生导师. 研究方向为数据挖掘.

(上接第 56 页)

[10] 张德文,尹训锋,周曙光. 基于 FPGA 实现 GPS 卫星数据实时接收系统设计[J]. 信息技术,2014,27(19): 154-155.

作者简介:

刘秀秀 女,(1991-),硕士研究生. 研究方向为空间数据处

理与传输. E-mail:liuxiuxiu1027@163.com.

董振兴 男,(1991-),博士研究生. 研究方向为星载数据存储与处理.

朱 岩 男,(1973-),博士,研究员. 研究方向为星载信号与信息处理.