

星载海量遥感数据的低缓存高速传输

朱 红, 李 立, 黄普明

(西安空间无线电技术研究所空间微波技术国家级重点实验室, 陕西西安 710100)

摘 要: 随着卫星遥感技术的发展, 遥感数据的类型和数据量快速增加, 这对数传能力提出了更高要求. 针对数传 AOS 编码缓存容量受限的应用, 提出了两种降低缓存容量需求的解决方案: 第一种方案是提高数据传输码速率; 第二种方案是对压缩编码单元和 AOS 编码单元之间的数据接口进行综合设计, 在压缩编码单元输出压缩码流数据时采取时分分散化输出方式, 以降低 AOS 编码缓存输入的瞬时数据率. 采用动态仿真技术对方案的缓存容量需求进行了动态分析, 结果表明: 两种方案均能降低缓存容量需求, 而第二种方案对缓存容量需求的降低效果更为显著. 方案已应用到某卫星工程项目的数传系统产品中, 通过了在轨飞行验证. 文章提出的技术途径可为后续低成本、高码速率数传设计提供参考.

关键词: 遥感卫星; 高速数据传输; 缓存深度; 动态分析

中图分类号: TP302

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2013) 10-2016-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.10.023

Onboard High Rate Data Transmission of Massive Remote Sensing Data Using Small Size Buffer

ZHU Hong, LI Li, HUANG Pu-ming

(National Key Laboratory of Space Microwave Technology, Xi'an Institute of Space Radio Technology, Xi'an 710100, China)

Abstract: With the development of satellite remote sensing technology, types and amount of remote sensing datum are increasing rapidly, which put forward higher requirements to data transmission capability. Two schemes are proposed to reduce cache capacity requirements in the buffer capacity restricted condition while designing Advanced Orbit System (AOS) encoding for data transmission. In the first one, the data transmission rate is increased. And in the second, the data interface between compression unit and the AOS encoding unit is designed synthetically and the timing of compressed data output is decentralized so as to reduce the instantaneous data rate of the AOS encoding cache entry. The buffer capacity demands in both schemes are analyzed dynamically using simulation techniques. The results show that each scheme can reduce cache capacity requirements, while the second scheme requires less buffer capacity significantly. The schemes have been applied to the data transmission system products of certain satellite engineering project and have passed flying verifications. The approaches proposed in this paper have a reference value for the follow-up low cost, high rate transmission system applications.

Key words: remote sensing satellite; high rate data transmission; buffer depth; dynamic analysis

1 引言

近年来, 卫星遥感数据的获取方式出现多样化, 遥感数据源也呈现出高时间分辨率、高空间分辨率和高光谱分辨率的发展趋势, 遥感数据的类型越来越多、数据量越来越大, 产生了海量遥感数据, 这对数据处理与传输系统(简称数传)的能力提出了更高要求^[1-2]. 数传是遥感卫星上的重要有效载荷, 原理上是实现星地间的数据通信, 其工作流程主要是从星上遥感器获取到观测数

据开始, 经过压缩编码、高级在轨系统(Advanced Orbiting Systems, AOS)编码^[3]、信道编码、调制、功率放大、空间辐射、射频接收、解调、译码等一系列处理, 到最后恢复出原始遥感数据.

压缩编码和 AOS 编码是数传领域中的核心技术. 其中, 压缩编码将原始数据率压缩到数传能力允许的范围内, 同时确保恢复质量满足任务需求. AOS 编码采用虚拟信道(Virtual Channel, VC)机制, 对多路遥感数据进行标准化打包和标识, 形成适合于空间物理信道传输的

组帧数据流.组帧数据流可采用实时或延时模式传回地面.在实时模式下,组帧数据流直接送物理信道下传;在延时模式下,先将组帧数据流记录在大容量固态存储器^[4]中,当卫星过顶时回放固态存储器数据并送物理信道下传.由于各路虚拟信道数据的特性不尽相同,在 AOS 编码的入口端需要设置独立的数据缓存,以适应与虚拟信道调度过程的不同步.AOS 编码在实现其任务时,还受到一些条件的制约,如设备的体积、质量、功耗受限,还要考虑降低成本,尤其是面向小卫星、微小卫星^[5]的应用.为此,AOS 编码所需缓存容量大小的选择就成了一个比较突出的问题.容量选择太小,不能满足数据缓存需求,会造成数据溢出错误;容量选择太大,又会浪费存储资源,增加功耗和成本.

虽然国内外文献针对缓存容量的选择进行了讨论^[6-7],但是还没有可用于工程的确切计算方法,有些还是凭经验选取的.实际上,缓存容量的选择和它所处的接口进行数据传输的过程、动态调度策略^[8]以及信道传输速率等因素都有关系.本文针对 AOS 编码缓存容量受限的问题,提出了降低缓存容量需求的方案.一是提高数传码速率设计余量;二是对数传进行综合性设计,通过调整压缩编码单元输出压缩数据信号的时序,由时序集中输出方式更改为时序分散输出方式,降低 AOS 编码缓存入口端的瞬时数据率.采用动态仿真技术对方案进行了动态分析,结果表明每种方案都可以降低缓存容量需求,而数据时序分散化方案对缓存容量需求的降低效果更为显著,更适合低缓存高速数据传输应用.

2 数传总体设计

2.1 数传与遥感系统数据接口

数传与遥感器之间数据接口定义如图 1 所示.遥感数据可分成两类:一类需要数据压缩,定义为 a 类(遥感器用 a_i 表示, $i \in [1, I]$);另一类需要直接传输原始数据,定义为 b 类(遥感器用 b_j 表示, $j \in [1, J]$).其中, I, J 表示 a, b 类遥感器的数量.目前的光学遥感器大多采用推扫方式成像,输出图像格式是按行送出的.为此,图像压缩编码单元采用条带压缩方式和 JPEG2000^[9]压缩算法降低数据率,同时减小误码扩散影响,并确保重建图像质量满足任务需求.对每路 a 类遥感数据进行独立的压缩编码后形成 I 路压缩数据,并和 J 路 b 类原始遥感数据一起形成空间链路层中的 $(I + J)$ 路位流数据.在 AOS 编码单元中,各路位流数据通过独立的虚拟信道传输,通过多路虚拟信道复接处理,形成适合于空间物理信道传输的两路并行组帧数据,在实时或延时传输模式下,送四相相移键控(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)调制器进行调制后经空间物理

信道下传.其中,两路并行组帧数据分别作为 QPSK 调制器的同相分量(In-phase)和正交分量(Quadrature)输入信号.

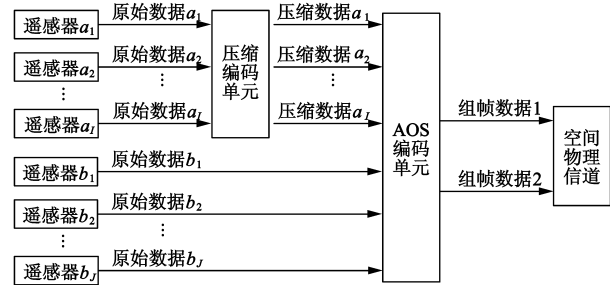


图1 数传与遥感器之间的接口

2.2 传输帧格式设计

AOS 编码的基本处理流程如下:①将输入的 a, b 类位流数据放入位流协议数据单元(Bitstream Protocol Data Unit, B-PDU)数据域形成 B-PDU 数据单元;②对各路 B-PDU 数据单元分配虚拟信道形成虚拟信道数据单元(Virtual Channel Data Unit, VCDU);③通过虚拟信道动态调度管理完成多路 VCDU 数据单元的复接和组帧;④对 VCDU 数据采用循环冗余校验(Cyclic Redundancy Check, CRC)编码后将 CRC 校验信息填入 VCDU 差错控制域;⑤采用交错深度为 4 的 RS(255, 239)分组码进行纠错编码,将 RS 校验信息填入 RS 校验符号域形成编码虚拟信道单元(Coded Virtual Channel Data Unit, CVC-U);⑥对 CVC-U 数据进行伪随机化(加扰)处理,并在 CVC-U 头部打上帧同步头标志,形成同步化的信道访问数据单元(Channel Access Data Unit, CADU)下行传输帧.于是,遥感信息的流向可概括为,遥感数据→数据压缩(或不压)→位流数据→B-PDU→VCDU→CVC-U→CADU→物理信道.通过上述处理后,形成的 CADU 帧格式如图 2 所示.在诸多帧格式参数中, CADU 帧长度和 B-PDU 位流数据区长度是确定遥感数据传输所需码速率的两个重要参数.

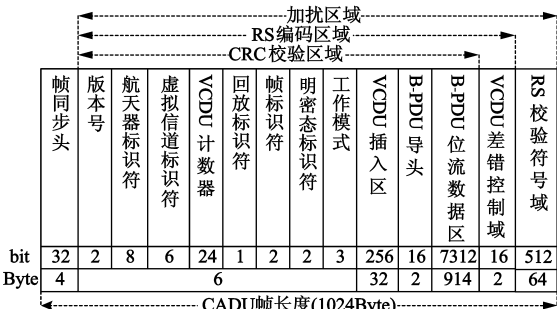


图2 数传帧格式定义

2.3 数传码速率设计

确定数传帧格式后需要进一步确定遥感数据传输

需要的总码速率 r (Mbit/s), 并以此为依据设计一个固定的数传码速率 R (Mbit/s). 采用式(1)可算出 a_i 路遥感数据传输需要的码速率 ar_i (Mbit/s)

$$ar_i = \frac{z_1}{125 \cdot ay1_i \cdot ax1_i} \times C \left(\frac{ay4_i + aX_i + ay1_i \cdot ax2_i}{8 \cdot z_2} \right) \quad (1)$$

式中: i 表示 a 类遥感器的序号, $ax1_i$ 、 $ax2_i$ 表示 a_i 遥感器输出图像行周期(ms)、每行包含的辅助数据量(bit), $ay1_i$ 、 $ay4_i$ 表示图像压缩条带包含的行数、条带压缩包格式开销(bit), z_1 、 z_2 表示 CADU 帧长度(Byte)、B-PDU 位流数据区长度(Byte). 中间变量 aX_i 表示对单个条带图像压缩后所得数据量(bit), 函数 $C(x)$ 表示将变量 x 向上舍入为最接近的整数. 采用式(2), 可算出 aX_i

$$aX_i = C \left(\frac{(1 + ay3_i) \cdot ay1_i \cdot ax3_i \cdot ax4_i}{ay2_i} \right) \quad (2)$$

式中: $ax3_i$ 、 $ax4_i$ 表示每行图像包含的像元数量、像元量化位数(bit), $ay2_i$ 、 $ay3_i$ 表示数据压缩比、压缩数据量浮动率. 采用式(3)可算出 b_j 路遥感数据传输需要的码速率 br_j (Mbit/s)

$$br_j = \frac{z_1 \cdot C \left(\frac{bx2_j}{8 \cdot z_2} \right)}{125 \cdot bx1_j} \quad (3)$$

式中: j 表示 b 类遥感器的序号, $bx1_j$ 、 $bx2_j$ 表示 b_j 遥感器输出数据信号周期(ms)、每周期包含的有效数据量(bit). 采用式(4)可算出 r

$$r = \sum_i ar_i + \sum_j br_j \quad (4)$$

计算出 r 值后即可进一步设计 R 值($R > r$), 于是 $R_p = R - r$, $\rho = \frac{(R-r)}{R}$, R_p 、 ρ 表示数传码速率的设计余量(Mbit/s)、设计裕度(数值等于数传帧的填充帧率).

2.4 虚拟信道缓存容量需求的动态分析

以某遥感卫星的数传通道 1 为例, 需要下传的遥感数据包括前视相机、正视相机、后视相机、多光谱相机产生的 4 路高速图像数据(a 类), 以及星务数据和小面阵数据 2 路低速摄影辅助数据(b 类), AOS 编码设计星务、小面阵、前视、正视、后视、多光谱数据分别通过虚拟信道 $VC_1 \sim VC_6$ 传输. 采用式(1)~(4)可以算出: $ar_1 = ar_2 = ar_3 = 104.97$ Mbit/s, $ar_4 = 105.72$ Mbit/s, $br_1 = 4.61$ Mbit/s, $br_2 = 5.99$ Mbit/s, $r = 431.23$ Mbit/s. 如果 R 设计为 450 Mbit/s, 则 $R_p = 18.77$ Mbit/s, $\rho = 4.17\%$.

虚拟信道缓存的输入端、输出端分别使用异步时钟、同步时钟控制模式. 输入端存在有效数据时就写入缓存, 输出端则在同步时钟的控制下, 利用帧格式同步计数器作为状态机, 以计数值为同步控制信号, 完成对缓存存取状态的判断、虚拟信道的动态调度、缓存数据的读取和传输组帧等处理. 为了降低虚拟信道对缓存容量的需求, 首先需要有定量确定缓存容量的技术途

径. 缓存容量等于数据位宽和存储深度的乘积(数据位宽、存储深度分别指一次写入或读出的比特位数、最多可存储多少个数据位宽的数据量, 在数据位宽固定的条件下确定了缓存深度需求值等同于确定了缓存容量需求值). 本文面向工程应用, 直接对数传信息流进行动态仿真分析, 可以快速、准确地获取到虚拟信道缓存深度需求数据.

为便于简洁地描述和分析缓存数据存取深度的动态变化情况, 引入变量 $D_k(t)$ 、 $M_k(t)$ 、 D_k 、 T_k . 其中, $D_k(t)$ 表示第 k 路虚拟信道缓存在 t 时刻的剩余数据量(或动态存取深度), $M_k(t)$ 表示 $D_k(t)$ 在 $\leq t$ 历史中的最大值, D_k 表示 $M_k(t)$ 的全局最大值(也即第 k 路虚拟信道对缓存深度的需求值), T_k 表示 $M_k(t)$ 到达 D_k 的时刻. $D_k(t)$ 的动态更新过程为, 如果在 t 时刻写入(读出) 1 个位宽数据, $D_k(t)$ 值就增加(减少) 1. 随着时间的推移, $D_k(t) \sim t$ 关系呈近似周期性涨落特性, 因为对于第 k 路虚拟信道缓存来说, 输入数据是按一定时序不间断地写入缓存的, 而在每帧的起始时刻 $t = n \cdot t_F$ (n 为正整数, t_F 表示 CADU 传输帧的一帧持续时间)进行检测和判断, 只有当 $D_k(t)$ 值满足预设条件时才会启动对该路缓存的突发读操作过程(突发读出速率大于平均写入速率), 否则不对该缓存进行读操作. $M_k(t)$ 的动态更新过程为, 当 $t = n \cdot t_F$ 时, 如果 $D_k(t) > M_k(t)$, 则 $M_k(t) = D_k(t)$, 否则 $M_k(t)$ 值保持不变. 于是, 随着时间的推移, $M_k(t) \sim t$ 关系呈阶梯递增特性.

在 r 值计算结果已知的前提下, 如果 R 值的设计保证了足够大的 ρ 值, 则必定存在一个时刻 T_k , 使得 $M_k(t)$ 收敛于 D_k , 即: ①当 $t = T_k$ 时, $M_k(t)$ 进行了最后一次更新, 更新后的值为 D_k ; ②当 $t > T_k$ 时 $M_k(t)$ 保持 D_k 值不变. 因此, 缓存的数据读、写过程在 T_k 时刻达到动态平衡, 而 D_k 值正是第 k 路虚拟信道对缓存深度的需求值.

为降低虚拟信道缓存容量需求, 采用剩余量优先的虚拟信道调度策略. 该策略是指预设虚拟信道的处理优先级为 $VC_1 = VC_2 = VC_3 = VC_4 = VC_5 = VC_6$, 在帧起始时刻 $t = n \cdot \Delta t_F$ 检测 $VC_1 \sim VC_6$ 的 $D_1(t) \sim D_6(t)$ 值, 选择满足 $D_k(t) = \max_l \{D_l(t)\}$ ($l \in [1, 6]$) 的第 k 路虚拟信道缓存, 进一步判断是否还满足 $D_k(t) \geq 2 \cdot z_2$ 的条件, 如果满足该条件, 当前帧就传输 VC_k 数据, 否则当前帧就插入填充数据以保证数据传输的连续性.

3 降低缓存深度需求的方案

在数传顶层设计中, 在计算出 r 值的条件下, R 值的设计并非随意. R 值设计太低, 设计余量不够, $M_k(t)$ 不能收敛于某个 D_k 值, 缓存容易溢出造成数据丢失; R

值设计太高,设计余量过大,组帧数据流中需要插入更多填充帧,又降低了数传信道的利用率.因此需要对 AOS 编码过程进行动态仿真分析,在获取缓存深度需求值后再进行综合评估,才能确定出合适的 R 值,显然该值应符合如下条件:确保 $M_k(t)$ 收敛于某个 D_k 值,且该 D_k 值不能超出所用硬件存储器的最大深度.在确保 $M_k(t)$ 能收敛于 D_k 值的前提下,适当提高 R 值(等同于提高 ρ 值)可以减小 D_k 值,这是因为 AOS 编码建立在虚拟信道缓存数据的低速率写入、高速率突发读出的基础之上,在输入数据信号时序不变的情况下,提高 R 值相当于提高了缓存数据的突发读出速率,也就可以快速消减缓存的数据累积效应,从而可以降低对缓存深度的需求.因此,采用提高数传码速率设计余量的技术途径可以降低对缓存深度的需求.

另一方面,在 r 、 R 值均确定的条件下,通过调整缓存入口端数据信号的时序,使之尽量分散化是降低缓存深度需求的另一种技术途径.在 r 值的计算过程中使用了平均数据率,未考虑数据传输的瞬时特性,而缓存入口端数据信号在时序上可能有不同的瞬时特性,相应所需的缓存深度也不尽相同.如果时序比较集中,数据写入缓存的瞬时速率也较高,所需缓存深度就较大;相反,如果时序比较分散,数据写入缓存的瞬时速率也较低,所需缓存深度就较小.这是因为,对缓存相邻两次突发读操作之间的时间间隔是一帧持续时间的整数倍,在高速数据处理时该时间间隔处于微秒量级,时间局域性较强,在此时间间隔内,数据信号时序越集中,瞬时数据率就越高,写入缓存的数据量也就越多,缓存中数据的积压程度越大,对缓存深度需求值越高;相反,在此时间间隔内,数据信号时序越分散,瞬时数据率就越低,写入缓存的数据量也就越少,缓存中数据的积压程度越小,对缓存深度需求值越低.这种方法需要对压缩编码单元和 AOS 编码单元之间的数据接口进行综合设计,在压缩编码单元方案设计时采用时序分散化方式输出压缩数据.

压缩数据的时序集中、时序分散输出方式分别如图 3、图 4 所示.在图 3 中,参数 L 、 $L1_c$ 、 $L2_c$ 分别表示门控信号的周期、正程长度、逆程长度(单位均为同步时钟信号的周期),正程传输有效数据,逆程为空闲期,参数取值如下:对于 $VC_3 \sim VC_5$, $L = 1735680$, $L1_c = 1013168$, $L2_c = 722512$;对于 VC_6 , $L = 3471360$, $L1_c = 2036576$, $L2_c = 1434784$.

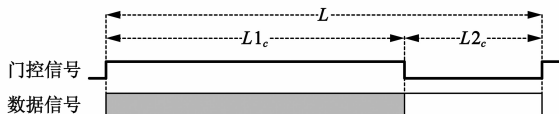


图3 输出数据的时序集中方式

在图 4 中,参数 $L1_d$ 、 $L2_d$ 分别表示门控信号的正程长度、逆程长度,正程传输有效数据,逆程为空闲期,而参数 x_d 和 z_d 均表示局部的有效数据传输长度,参数 y_d 表示间歇期长度,参数 n_d 表示 y_d 和 z_d 的重复次数,相关参数之间满足 $L1_c = x_d + n_d \times z_d$ 和 $L1_d = x_d + n_d \times (y_d + z_d)$ 关系式,参数取值如下:对于 $VC_3 \sim VC_5$, $L1_d = 1735552$, $L2_d = 128$, $x_d = 0$, $y_d = 3473$, $z_d = 4871$, $n_d = 208$;对于 VC_6 , $L1_d = 3471008$, $L2_d = 352$, $x_d = 0$, $y_d = 1446$, $z_d = 2053$, $n_d = 992$. 压缩数据采用时序分散输出方式时,在一个门控信号的周期内传输的有效数据总量同时序集中方式相同,不同之处是数据在门控周期内的分布比较分散.对于 $VC_3 \sim VC_5$,门控正程所占门控周期的比例由原时序集中方式的 58.37% 扩展到了 99.99%;对于 VC_6 ,门控正程所占门控周期的比例由原时序集中方式的 58.67% 扩展到了 99.99%. 传输的有效数据量不变,但延长了传输时间,于是降低了数据的瞬时速率.

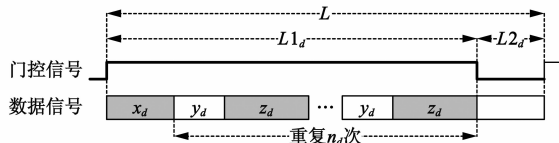


图4 输出数据的时序分散方式

4 实验结果及分析

在 $r = 431.23 \text{ Mbit/s}$ 的条件下,选取不同的 R 值(440、445、450、455、460 Mbit/s), $VC_1 \sim VC_6$ 缓存采用时序集中方式写入数据,不同 R 值时 D_k ($k \in [1, 6]$) 实验结果如图 5 所示,从中可以看出 D_k 值随 R 的增大而减小. $D_1 \sim D_6$ 随 R 的变化情况类似,以 D_6 为例, D_6 随 R 的变化情况如图 6 所示,从中可以看出 D_6 与 R 呈线性反比关系.数值分析结果表明, R 每增加 5 Mbit/s, D_k 随

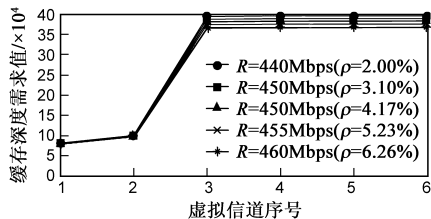
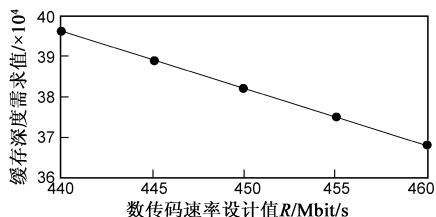


图5 缓存深度需求随数传码速率的变化

图6 VC_6 缓存深度需求随数传码速率的变化

之减小 0.99% ~ 1.95%, 可见提高数传码速率在一定程度上可以降低缓存深度需求。

在 $r = 431.23 \text{ Mbit/s}$ 、 $R = 450 \text{ Mbit/s}$ 的条件下, $VC_3 \sim VC_6$ 缓存改用时分序分散方式写入数据, $D_k (k \in [1, 6])$ 实验结果如图 7 所示。输入数据采用时分序集中方式时, $D_1 \sim D_6$ 分别为 79844、98287、380948、381677、381904、382166, 当改用时分序分散方式时, $D_1 \sim D_6$ 分别降低到了 2439、2517、3930、4540、5044、4964, 降幅分别达到 96.95%、97.44%、98.97%、98.81%、98.68%、98.70%, 表明采用时分序分散方式降低缓存深度需求的效果非常显著!

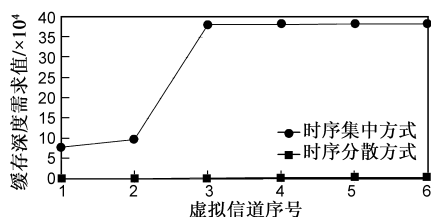


图7 缓存深度需求随输入数据时序的变化

5 结论

针对数传 AOS 编码缓存容量受限的问题, 提出了两种降低缓存容量需求的方案, 一是提高数传码速率设计余量, 二是对入口数据信号进行时分序分散化。动态仿真实验结果表明, 两种方案均能降低缓存容量需求, 而采用时分序分散化方案效果更为显著。本文所提技术途径已应用到某卫星工程项目的数传系统产品设计中, 通过了在轨飞行验证, 同时也可为后续低成本海量遥感数据的高速数传设计提供参考。

参考文献

- [1] 高卫斌, 冉承其. 遥感卫星数据传输技术发展分析[J]. 中国空间科学技术, 2005, 12(6): 30–36.
GAO Wei-bin, RAN Cheng-qi. The analysis on technology development of data transmission in remote sensing satellites[J]. Chinese Space Science and Technology, 2005, 12(6): 30–36. (in Chinese)
- [2] 李立, 郑小松, 黄普明. 卫星高速数据处理与传输技术的发展趋势[C]. 2011 年小卫星技术交流会, 北京, 2011.
LI Li, ZHENG Xiao-song, HUANG Pu-ming. Development trend of on-board high-rate data processing and transmission technology[C]. 2011 Small Satellite Technology Exchange Conference, Beijing, 2011. (in Chinese)
- [3] 谭维炽, 顾莹琦. 空间数据系统[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2004. 128–136.
Tan Weichi, Gu Yingqi. Space data system[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2004. 128–136. (in Chinese)

- [4] 张科, 郝智泉, 王贞松. 一种基于新体系结构的空固态记录器原型系统[J]. 电子学报, 2008, 36(2): 285–290.
ZHANG Ke, HAO Zhi-quan, WANG Zhen-song. A novel architecture prototype of space solid-state recorder[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(2): 285–290. (in Chinese)
- [5] 詹亚锋, 马正新, 曹志刚. 现代微小卫星技术及发展趋势[J]. 电子学报, 2000, 28(7): 102–106.
ZHAN Ya-feng, MA Zheng-xin, CAO Zhi-gang. Technology of modern micro satellite and its development direction[J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(7): 102–106. (in Chinese)
- [6] 宋宇鲲, 王锐, 胡永华, 高明伦. 使用排队论模型对 FIFO 深度的研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(6): 2485–2487.
SONG Yu-kun, WANG Rui, HU Yong-hua, GAO Ming-lun. Study FIFO's depth based on queue-theory model[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(6): 2485–2487. (in Chinese)
- [7] 周渊, 吴增印. 基于一种专用星载高速总线结构的 FIFO 容量计算[J]. 宇航学报, 2009, 30(5): 1998–2002.
Zhou Yuan, Wu Zengyin. The calculation of FIFO buffer size in a nonstandard spaceborne high speed data bus structure[J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(5): 1998–2002. (in Chinese)
- [8] 田庄, 张庆君. 载人航天器 AOS 虚拟信道调度策略研究[J]. 航天器工程, 2006, 15(2): 20–22.
Tian Zhuang, Zhang Qingjun. Research on advanced orbiting system virtual channel scheduling strategy of manned spacecraft[J]. Spacecraft Engineering, 2006, 15(2): 20–22. (in Chinese)
- [9] 别玉霞, 潘成胜, 蔡睿妍. AOS 虚拟信道复用技术与仿真[J]. 宇航学报, 2011, 32(1): 193–198.
Bie Yuxia, Pan Chengsheng, Cai Ruiyan. Research and simulation on AOS virtual channel multiplexing technique[J]. Journal of Astronautics, 2011, 32(1): 193–198. (in Chinese)
- [10] International Standard Organization. JPEG2000 Part I Final Committee Draft Version 1.0[S], ISO/IEC JTC1/SC29/WGI.

作者简介



朱红男, 1971 年 10 月生, 河北涿鹿人。2005 年获西安电子科技大学信号与信息处理专业博士学位。中国空间技术研究院西安分院某卫星型号数传分系统主任设计师, 高级工程师。主要从事卫星数传系统设计、AOS 编码和图像压缩编码等研究工作。获得 1 项国家发明专利, 荣获 1 项国防科技进步奖。

E-mail: zhuehong@163.com