

ZHANG Xinyu, YANG Jiasen, ZHANG Xuefeng, XU Cong, CHEN Zhimin, ZHI Jia, CHEN Tuo. High Performance Real-time Odd-even Channels Combination Algorithm for Transmission Baseband Data Using Dual-polarized Technology (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2022, 42(6): 1222–1229. DOI:10.11728/cjss2022.06.211125125

极化复用方式下高性能数传基带奇偶 合路实时处理方法^{*}

张鑫宇^{1,2} 杨甲森¹ 张雪丰^{1,2} 徐 聪^{1,2}
陈志敏¹ 智 佳¹ 陈 托¹

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 100049)

摘 要 数传基带奇偶合路实时处理,是极化复用方式下卫星过境弧段即时判读星载设备状态及获取空间科学探测成果的前提和基础。面向空间科学卫星高速数传实时处理需求,针对传统合路处理方法受限于内存拷贝与排序操作导致处理性能较低的问题,提出一种使用环形队列对数据进行内存管理并基于各虚拟信道奇偶单路传输帧计数自然有序特征进行合路处理的新方法,有效规避频繁的内存移动与复杂耗时的排序操作,显著提升奇偶合路实时处理性能。空间科学卫星任务的工程实践结果表明,所提方法的实时合路性能满足 ASO-S 卫星 1 Gbit·s⁻¹ 和 CASEarth 卫星 1.6 Gbit·s⁻¹ 的高速数传实时处理需求。

关键词 极化复用, 奇偶合路实时处理, 环形队列, ASO-S, CASEarth

中图分类号 TP391

High Performance Real-time Odd-even Channels Combination Algorithm for Transmission Baseband Data Using Dual-polarized Technology

ZHANG Xinyu^{1,2} YANG Jiasen¹ ZHANG Xuefeng^{1,2} XU Cong^{1,2}
CHEN Zhimin¹ ZHI Jia¹ CHEN Tuo¹

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

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract Odd-even frames real-time combination for transmission baseband data which used dual-polarized technology is the prerequisite and basis for timely monitoring of satellite equipment status when

^{*} 空间科学先导专项科学卫星任务运控技术项目资助(XDA15040100)

2021-11-25 收到原稿, 2022-04-15 收到修定稿

E-mail: jsy@nssc.ac.cn

the satellite is in transit arc and early access to scientific exploration data by satellite ground application system. A high performance real-time odd-even channels combination algorithm for transmission baseband data which uses dual-polarized technology is proposed to meet the need of scientific satellite real-time high-speed data processing. This method makes full use of the naturally ordered frame counting feature of each virtual channel and applies the circular memory management design of circular queue. Therefore, this method effectively avoids the time-consuming sort and frequent memory moving operations compared to traditional algorithms. The space science satellites' engineering practice shows that the speed of combination meets ASO-S's 1 Gbit s^{-1} and CASEarth's 1.6 Gbit s^{-1} real-time processing requirements.

Key words Dual-polarized technology, Real-time odd-even channels combination, Circular queue, ASO-S, CASEarth

0 引言

低轨遥感数传主要采用 X 频段^[1]。国际电信联盟 (ITU) 规定 X 频段星地数传任务在 8025~8400 MHz 内开展^[2], 共 375 MHz 带宽。如何在有限带宽约束下提高数据传输的码速率是卫星数传分系统面临的主要问题之一^[3]。实践表明, 极化分割频率复用技术 (简称极化复用) 是解决上述问题的有效途径^[4]。

极化复用技术通过同一频带将满足一定极化隔离要求的两路调制载波信号向地面站发射, 地面站利用极化的正交特性将两路数据在同一频域和时域内分隔开, 从而拓展频率资源^[5]。以中国科学院战略性先导专项先进天基太阳天文台 (Advanced Space-based Solar Observatory, ASO-S)^[6] 和 CASEarth 卫星^[7] 为例, 其数据传输均采用 X 频段, 通过极化复用技术分别实现了最高 $2 \times 500 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $2 \times 810 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$ 的传输速率。

数传基带奇偶传输帧合路处理是极化复用方式下, 地面应用系统判读星载设备状态以及获取空间探测成果的前提和基础, 其主要问题在于奇偶两路数据到达时间存在不确定的时间差。传统的奇偶传输帧合路处理方法先将帧数据缓存, 然后按照“虚拟信道帧计数”对缓存数据进行排序, 再将虚拟信道帧计数连续的传输帧逐一推出进行后续解源包等处理。这种处理方法效率较低, 主要有两方面原因: 一是涉及复杂耗时的排序操作; 二是以非循环使用方式进行内存管理, 每次数据处理后, 需通过内存移动方式对缓存进行整理。特别是在奇偶路数据到达时间差较长

时, 由于缓存的数据量大, 导致数据排序和内存移动的时间更长, 效率更低。因此, 目前对极化复用方式下数传基带数据的处理, 主要采用卫星过境时存储奇偶路原始数据文件, 过境后进行文件回放的事后处理模式。在实时采集与处理模式下, 现有方法通常只支持低码速率数传基带数据的处理任务, 无法满足实时采集、处理及判读的航天器快速响应需求。

本文面向空间科学卫星高速数传实时处理需求, 提出一种极化复用方式下高性能数传基带奇偶合路实时处理方法。一方面充分利用各虚拟信道单路数据内部数据结构特征, 有效规避现有处理方法包含的复杂耗时排序操作, 另一方面采用环形队列代替非循环内存管理设计, 减少频繁的内存移动操作, 实现极化复用方式下卫星数传基带数据的高速处理。

1 问题分析

1.1 数传数据处理流程

极化复用方式下空间段和地面段的数传数据处理流程如图 1 所示。在空间段, 遵照空间数据系统咨询委员会 (CCSDS) 制定的高级在轨系统 (AOS) 空间数据链路协议^[8], 数传分系统将各载荷源包复接为不同虚拟信道的传输帧^[9], 根据虚拟信道帧计数将传输帧分为奇偶两路进行编码调制, 并分别进入相控阵天线的左右旋通道向地面站发射; 在地面段, 地面接收分系统完成奇偶两路数据的解调、解扰、译码后, 将两路数据通过网络发送给任务运行分系统, 进行奇偶帧合路、解复接、解源包等处理。

由图 1 可见, 奇偶帧合路处理是地面段解源包等

后续处理的前提,也是地面支撑系统监视卫星有效载荷在轨工作状态的基础。合路处理的问题主要来自奇偶两路数据到达存在不确定的时间差,这个时间差来源包括两部分:一是两路解调器锁定时间差;二是两路数据解调后从地面接收分系统通过专线网络传输至任务运控分系统的网络传输时间差。

1.2 奇偶传输帧结构

AOS 协议通过固定长度的传输帧实现多种类型的数据传输,传输帧格式如图 2 所示^[8]。其中虚拟信道标识符(VCID)是同一物理信道下实现信道复用的

关键^[10],也是地面段进行解复接处理的依据。极化复用方式下的奇/偶帧指图 2 中虚拟信道帧计数为奇/偶数的传输帧,每个虚拟信道独立计数,互不交叉。

AOS 协议规定传输帧的虚拟信道帧计数占 24 bit,取值为 0 至 $2^{24}-1$,最高可计数 16 777 216 帧,帧计数达到 $2^{24}-1$ 后归零,从 0 开始重新计数,帧计数周期加 1。AOS 传输帧的帧计数周期占 4 bit,取值为 0 至 2^4-1 ,最高可计数 16 个周期。针对虚拟信道帧计数归零折返现象和奇偶帧分路的特点,引入逻辑虚拟信道帧计数 C_L 的概念,其定义为

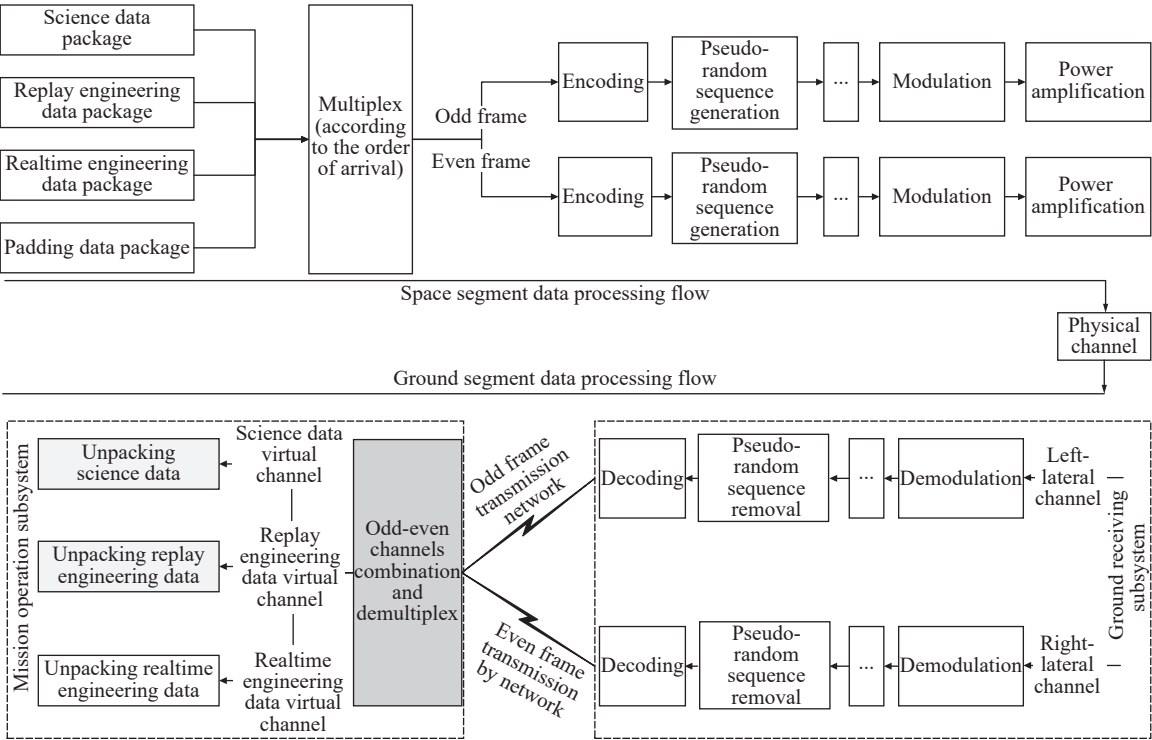


图 1 极化复用方式下空间段与地面段数传处理流程

Fig. 1 Processing flow of space segment and ground segment data using dual-polarized technology

传输帧主导头									传输帧插入域 (可选)	传输帧 数据域	帧尾(可选)	
主信道标识符 (MCID)		虚拟 信道 标识符 (VCID)	虚拟 信道 帧计数	信号域				帧头差错 控制 (可选)	特定任务数据 (可选)		操作控 制域	帧差错 控制域
版本号 (TFVN)	航天器 标识符 (SCID)			回放 标志	帧计数 周期使 用标志	保留域	帧计数 周期				可选	可选
2 bit	8 bit	6 bit	24 bit	1 bit	1 bit	2 bit	4 bit	16 bit	变长	变长	32 bit	16 bit

图 2 CCSDS AOS 传输帧格式

Fig. 2 CCSDS AOS transmission frame format

$$C_L = 2^{24} C_c + C_f.$$

其中, C_c 为传输帧中的帧计数周期值, C_f 为传输帧中的虚拟信道帧计数值。在卫星过境时间较短时, 逻辑帧计数不会出现归零折返现象。即使通过中继等手段延长了数传时间, 致使逻辑帧计数归零折返, 仍可对当前逻辑帧计数概念进行延伸, 引入“归零折返”计数变量作为当前逻辑帧计数的进位, 确保逻辑帧计数始终为递增状态。

1.3 问题形式化定义

设共有 N 个虚拟信道, 奇路基带原始数据 D_o 是由 N 个虚拟信道奇帧数据包 $O_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 组成的集合, 即

$$D_o = \{O_1, O_2, \dots, O_N\}.$$

偶路基带原始数据 D_e 是由 N 个虚拟信道偶帧数据包 $E_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 组成的集合, 即

$$D_e = \{E_1, E_2, \dots, E_N\}.$$

将某虚拟信道 i 的奇帧数据包 O_i 和偶帧数据包 E_i 分别表示为如下有序组:

$$O_i = [o_{i1}^{t_{o1}}, o_{i3}^{t_{o3}}, o_{i5}^{t_{o5}}, \dots],$$

$$E_i = [e_{i2}^{t_{e2}}, e_{i4}^{t_{e4}}, e_{i6}^{t_{e6}}, \dots].$$

其中, $o_{ij}^{t_{oj}}$ 是 t_{oj} 时刻到达的虚拟信道 i 在逻辑虚拟信道帧计数为 j 时的奇帧数据, j 为奇数; $e_{ik}^{t_{ek}}$ 是 t_{ek} 时刻到达的虚拟信道 i 在逻辑虚拟信道帧计数为 k 时的偶帧数据, k 为偶数。帧计数 j, k 递增。奇偶帧数据到达时刻分别满足

$$t_{o1} < t_{o2} < t_{o3} < \dots,$$

$$t_{e1} < t_{e2} < t_{e3} < \dots.$$

这里奇帧数据到达时刻 $t_{o[j/2]}$ 与偶帧数据达到时刻 $t_{e(k/2)}$ 无关。

奇偶帧合路处理, 要求分别将各虚拟信道的奇偶帧数据包按照逻辑虚拟信道帧计数组织成完整的数据包 $P_i = [o_{i1}^{t_{o1}}, e_{i2}^{t_{e2}}, o_{i3}^{t_{o3}}, e_{i4}^{t_{e4}}, \dots], i = 1, 2, \dots, N$ 。

2 方法设计

2.1 方法框架

奇偶合路实时处理方法的工作原理如图 3 所示, 其包括环形队列存储器、奇/偶路解复接处理器、奇偶合路处理器、奇偶合路处理平台 5 个模块。

环形队列存储器用于存储各处理器的输入输出

数据, 设计具有内存访问互斥保护的顺序读取、写入操作, 保持先进先出的特性。根据管理的数据对象不同, 环形队列存储器包括存储奇/偶路基带的奇/偶路数传基带环形队列存储器、存储各虚拟信道奇/偶帧数据的虚拟信道奇/偶帧数据环形队列存储器等, 其数量与卫星数传虚拟信道的数量相适应。

奇/偶路解复接处理器对奇/偶路数传基带数据 $D_o (D_e)$ 进行帧同步格式处理, 验证航天器标识符等字段的正确性, 进而根据虚拟信道标识符对奇/偶传输帧 $\{O_1, O_2, \dots, O_N\} (\{E_1, E_2, \dots, E_N\})$ 进行解复接处理, 计算虚拟信道逻辑帧计数, 将奇/偶帧单路数据分为多个虚拟信道奇/偶帧数据 $O_i (E_i) i = 1, 2, \dots, N$, 并将其分别写入相应虚拟信道奇/偶帧环形队列存储器中。

奇偶合路处理器依据奇偶合路处理算法, 对各虚拟信道奇/偶帧数据 $O_i (E_i)$ 完成奇偶帧合路处理, 生成各虚拟信道的合路传输帧

$$P_i = [o_{i1}^{t_{o1}}, e_{i2}^{t_{e2}}, o_{i3}^{t_{o3}}, e_{i4}^{t_{e4}}, \dots], i = 1, 2, \dots, N.$$

奇偶合路处理平台负责各环形队列存储器的缓存申请与释放, 并按图 4 中的数据处理流程, 控制各处理器从各环形队列存储器中顺序读取数据, 并且进行解复接及合路处理, 实现合路处理过程中的数据流转控制。

2.2 环形队列缓冲设计

环形队列缓冲设计如图 5 所示, 物理上是通过一组地址连续内存实现的。设计变量包括缓冲申请容量 $L_{\max}$ 、当前存储的有效数据量 L_{val} 、写指针 P_w 、读指针 P_r , 同时设计有内存互斥访问的写入和读出操作。

缓冲申请容量 $L_{\max}$ 的设计是内存管理的关键。若 $L_{\max}$ 过小, 缓冲区数据迅速充满, 后续数据将写入失败; 若 $L_{\max}$ 过大, 将浪费大量内存空间。由于奇偶路解复接处理不涉及复杂运算, 处理速率高, 奇/偶路数传基带环形队列存储器作为两个接收缓存, 申请空间无需太大, 其 $L_{\max}$ 设计为 128 MByte; 各虚拟信道奇/偶帧数据环形队列存储器 $L_{\max}$ 的设计原则为: 在奇偶路数传速率为 v (单位 $\text{bit} \cdot \text{s}^{-1}$)、可容忍最大传输时延为 t (单位 s) 的情况下, 缓冲申请容量满足 $L_{\max} \geq v t L_{\text{frm}}$ 。其中 L_{frm} 为传输帧帧长。

将长度为 L_{wd} 的数据写入缓存时, 步骤如下。

步骤 1 若 $L_{\text{val}} + L_{\text{wd}} > L_{\max}$, 说明存储空间不

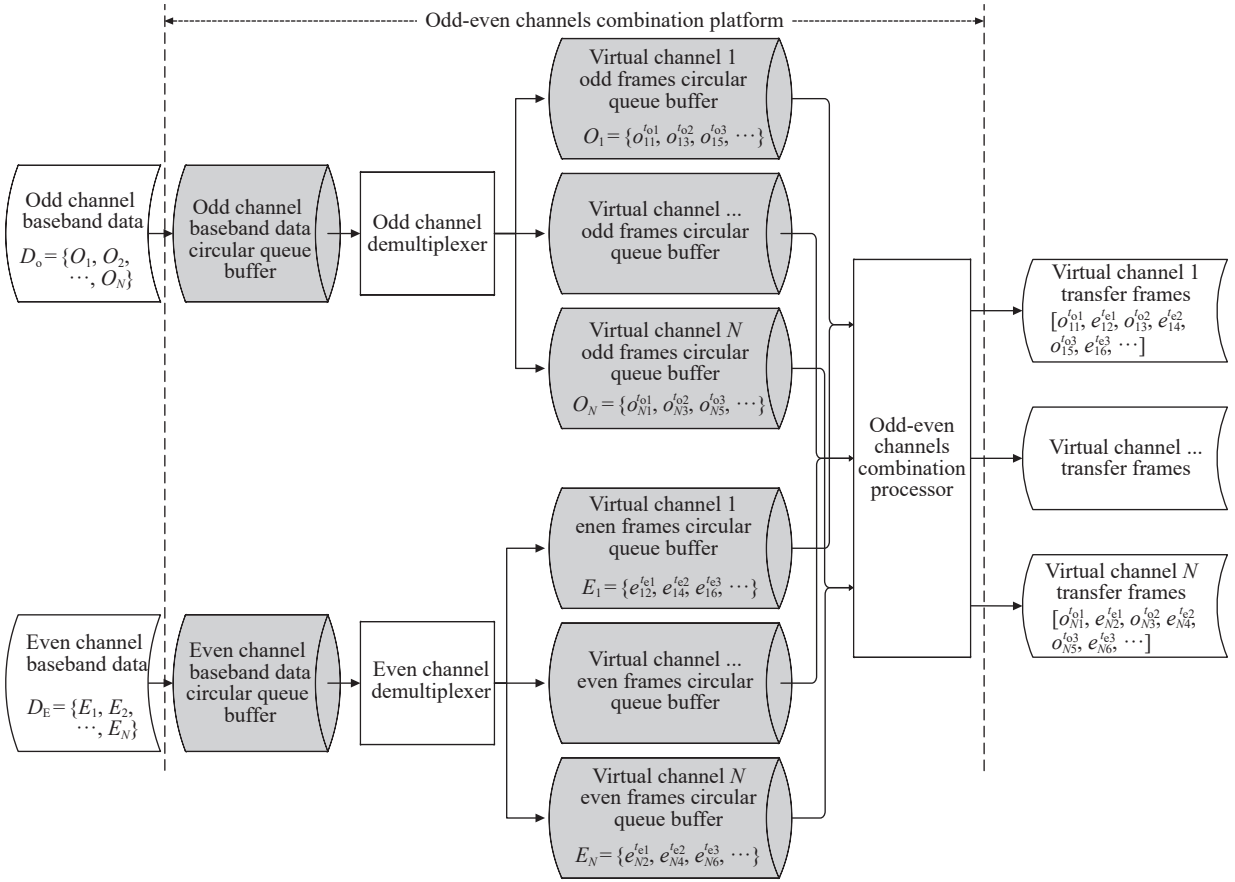


图3 奇偶合路实时处理方法工作原理

Fig. 3 Odd-even frames real-time combination method framework

足, 返回失败, 否则进入下一步。

步骤2 若 $P_w + L_{wd} \leq L_{max}$, 可将长度为 L_{wd} 的数据在 P_w 位置顺序写入, 并执行写指针移动 $P_w += L_{wd}$, $L_{val} += L_{wd}$, 返回成功, 否则进入下一步。

步骤3 先将长度为 $L_{max} - P_w$ 的数据在 P_w 位置写入, 再将剩余长度为 $L_{wd} - (L_{max} - P_w)$ 的数据从缓存头部写入, 并执行写指针移动 $P_w = L_{wd} - (L_{max} - P_w)$, $L_{val} += L_{wd}$, 返回成功。

将长度为 L_{rd} 的数据读出时, 步骤如下。

步骤1 若 $L_{rd} > L_{val}$, 说明有效数据不足, 返回失败, 否则进入下一步。

步骤2 若 $P_r + L_{rd} < L_{max}$, 可从 P_r 处顺序读出长度为 L_{rd} 的数据并执行读指针移动 $P_r += L_{rd}$, $L_{val} -= L_{rd}$, 返回成功, 否则进入下一步。

步骤3 先将长度为 $L_{max} - P_r$ 的数据从 P_r 处顺序读出, 再将剩余长度为 $L_{rd} - (L_{max} - P_r)$ 的数据从缓存头部读出, 并执行读指针移动 $P_r = L_{rd} - (L_{max} - P_r)$,

$L_{val} -= L_{rd}$, 返回成功。

2.3 奇偶合路处理算法设计

利用各虚拟信道奇偶路数据内部虚拟信道帧计数均保持有序的特征, 奇偶合路处理算法避免大量冗余比较。如图6所示, 对于某虚拟信道, 若奇偶某路数据尚未到达, 则另一路数据等待; 若奇偶数据均已到达, 且奇偶两路最先到达的传输帧计数差值为1, 则将计数较小者推出进行后续处理; 若差值不为1, 说明存在丢帧情况, 直接将计数较小者抛出, 避免错误数据影响后续处理, 导致整个系统处理性能下降。

3 实验与应用

搭建 CPU 主频 4.5 GHz、内存 64 GByte 的硬件测试环境, 以 CASEarth 卫星 2021 年 11 月 9 日喀什站第 47 轨数传数据为处理对象(数据情况列于表1, 根据填充信道帧第一帧计数之差可知, 奇偶两路锁定时差为 0.67 s), 通过两个 TCP 模拟发送软件仿

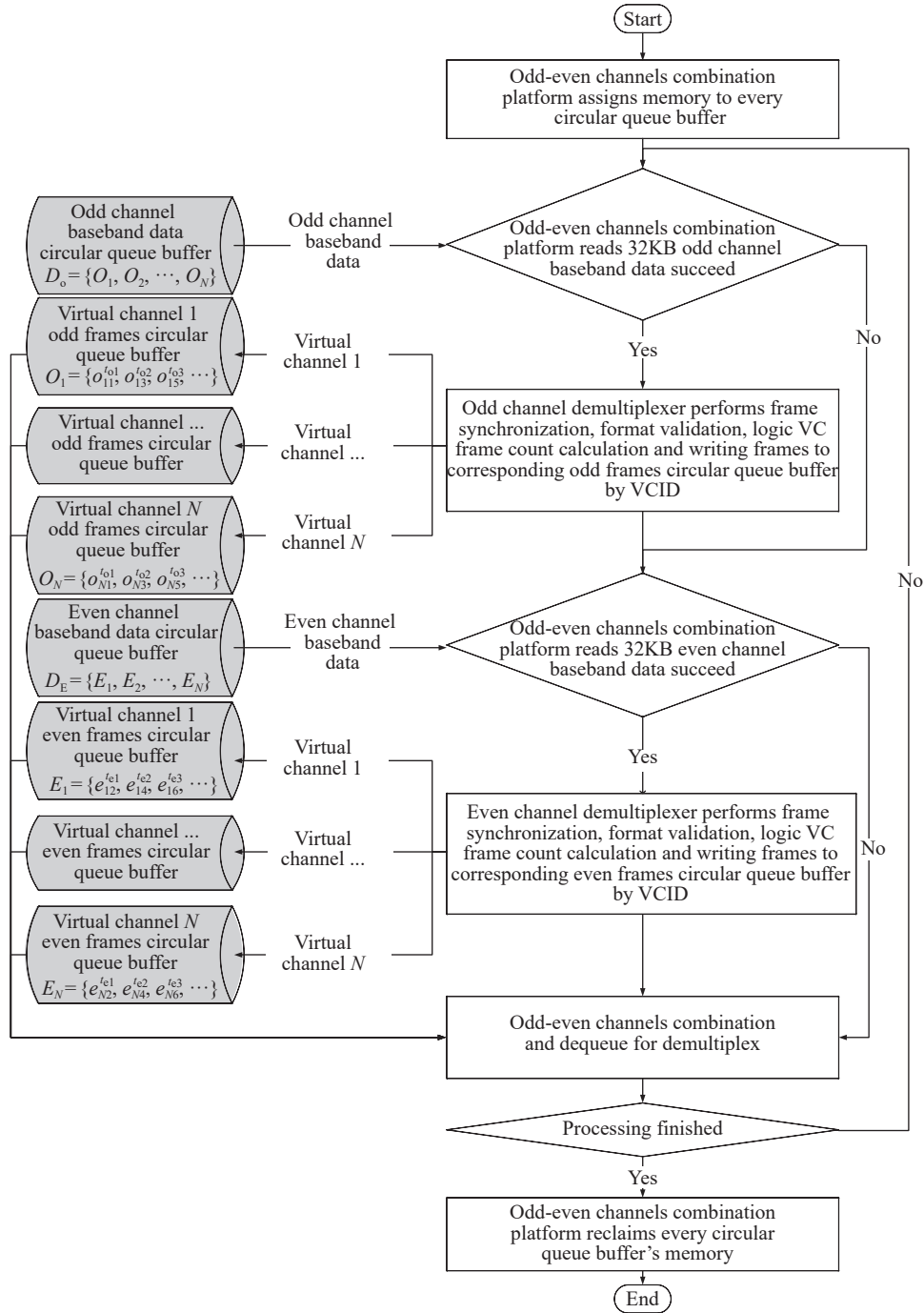


图 4 奇偶合路处理流程设计

Fig. 4 Processing flow of odd-even frames combination

真地面站奇偶两路解调器。

这里策划了两类实验: 一是方法设计验证, 包括缓存申请容量与可容忍最大时延的关系测试, 环形队列应用前后的对比测试, 验证方法设计的正确性和有效性; 二是处理性能极值测试, 验证方法对卫星任务的支持能力。

3.1 方法设计验证

该实验中 TCP 模拟发送软件速率设为 $800 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$, 与 CASEarth 卫星任务一致, 时延通过偶路数据延时发送模拟。实验结果如图 7 所示, 图中理论上限计算方法为缓冲申请容量除以发送速率。

实验结果表明: 所提出方法可容忍时延与缓冲申

表 1 测试数据统计
Table 1 Statistics of test data

通道	文件大小 /GByte	同步码 计数	填充信道帧 第一帧计数	实时工程 参数帧计数	回放工程 参数帧计数	载荷科学 数据帧计数
奇路	29	29 959 953	813	1502	71 225	10 983 970
偶路	29	29 925 282	69 682	1502	71 225	10 983 970

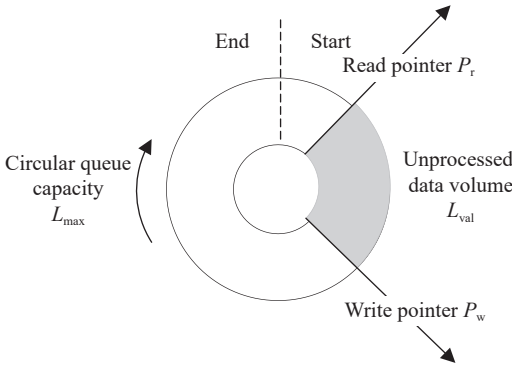


图 5 环形队列结构设计
Fig. 5 Structure of circular queue

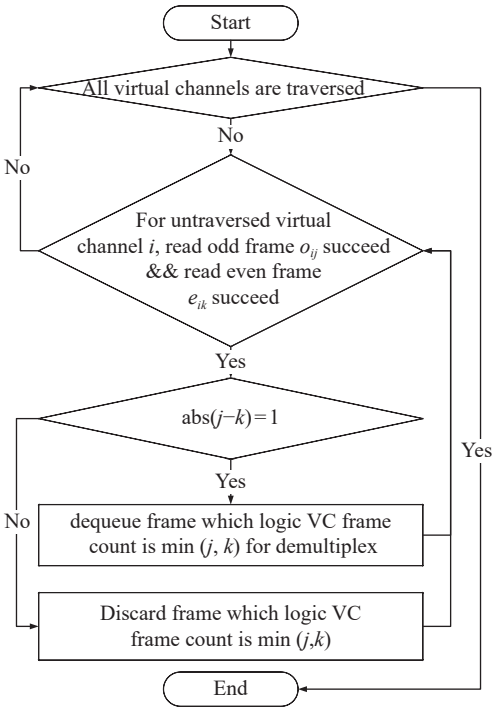


图 6 奇偶合路处理算法设计
Fig. 6 Odd-even channels combination algorithm

请容量成正比, 验证了缓冲容量申请原则的正确性; 采用非循环内存使用方式, 由于每次数据处理后, 需要通过耗时的内存移动整理缓存, 影响系统处理速

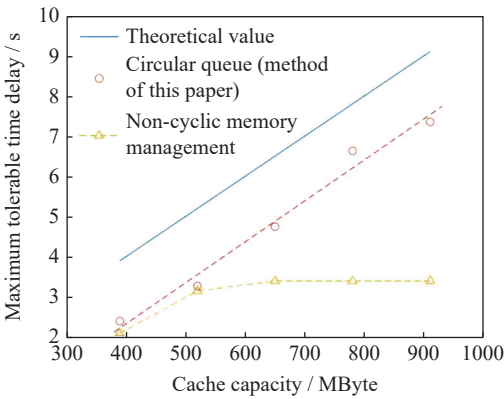


图 7 不同缓冲申请容量可容忍的最大时延
Fig. 7 Maximum tolerable delay of different buffer capacity

度, 导致在缓存申请容量达到一定值后, 即使再增加缓存也不能有效增加可容忍的时延; 实测值小于理论上限, 分析其原因为, 理论值的计算没有考虑线程调度、解复接处理、软件界面打印操作等因素。

3.2 处理性能极值测试

实时工程参数信道、回放工程参数信道、载荷科学数据信息奇/偶帧环形队列存储器 $L_{\max}$ 取值分别为 256 KByte, 256 MByte, 512 MByte, 处理时间为 182.533 s, 平均处理速度为 2603.01 Mbit·s⁻¹, 远优于 ASO-S 卫星 1 Gbit·s⁻¹ 和 CASEarth 卫星 1.6 Gbit·s⁻¹ 的指标要求。使用文件回放的方式模拟解调器, 处理时间为 57.078 s, 平均处理速度为 8324.328 Mbit·s⁻¹, 分析其主要原因为, 文件回放方式消除了网络发送的时间差, 使奇帧数据到达时刻 $t_{o[j/2]}$ 与偶帧数据达到时刻 $t_{e(k/2)}$ 相关, 处理性能更高。

4 结语

极化复用技术是在有限带宽约束下提高数传速率的有效方法。利用极化复用方式下各虚拟信道奇偶单路数据内部 虚拟信道帧计数无需排序即具有顺

序性的特征,设计奇偶合路处理算法,规避了传统方法包含的复杂耗时排序操作;采用环形队列设计,循环使用内存,规避了频繁内存移动操作,显著提升奇偶合路处理性能,解决了极化复用方式下卫星数传基带处理低效的问题,在实际卫星数据处理任务中可取得较好的应用效果。

奇偶合路算法依赖于虚拟信道帧计数,后续将开展针对因误码造成帧计数错误条件下的合路处理方法研究,从而更完整可靠地处理卫星数传基带数据。

参考文献

- [1] WANG Zhongguo, WANG Dabao, HU Yue, *et al.* Analysis on application efficiency of adaptive coding and modulation for LEO remote sensing satellite at Ka-band[J]. *Spacecraft Engineering*, 2021, **30**(4): 69-76 (王中果, 汪大宝, 胡月, 等. 低轨遥感卫星Ka频段自适应编码调制应用效能分析[J]. *航天器工程*, 2021, **30**(4): 69-76)
- [2] GENEVA, ITU. ITU Radio communication (ITU-R). Radio regulations articles edition of 2020[S]. 2020
- [3] GUO Daoxing, ZHANG Xiaokai, ZHANG Bangning, *et al.* Study of polarization feature in satellite communication[J]. *Radio Communications Technology*, 2018, **44**(3): 211-216 (郭道省, 张晓凯, 张邦宁, 等. 极化特性在卫星通信系统中的应用研究[J]. *无线电通信技术*, 2018, **44**(3): 211-216)
- [4] XU Chongyan, ZHANG Yanfeng, YAN Donglei. The engineering application of dual-polarized technology in remote sensing satellite receiving system[J]. *Radio Engineering*, 2017, **47**(3): 75-78 (徐崇彦, 张言锋, 闫东磊. 极化复用技术在遥感卫星接收系统中的工程化应用[J]. *无线电工程*, 2017, **47**(3): 75-78)
- [5] ZHAO Ning. Application of dual-polarized technology in remote sensing satellite data transmission[J]. *Spacecraft Engineering*, 2010, **19**(4): 55-62 (赵宁. 极化复用技术在遥感卫星数据传输中的应用[J]. *航天器工程*, 2010, **19**(4): 55-62)
- [6] GAN W Q, ZHU C, DENG Y Y, *et al.* Advanced space-based solar observatory (ASO-S): an overview[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2019, **19**(11): 156
- [7] GUO H D, CHEN H Y, CHEN L F, *et al.* Progress on CASEarth satellite development[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2020, **40**(5): 707-717
- [8] CCSDS. CCSDS 732.0-P-3.1 AOS space data link protocol[S]. Washington: National Aeronautics and Space Administration, 2021
- [9] MA Miao, ZHU Yan. Design of satellite data processing software based on CCSDS[J]. *Electronic Design Engineering*, 2015, **23**(1): 16-20 (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)
- [10] ZHENG Juan, ZHU Bin, LU Jing, *et al.* AOS protocol tracking research[J]. *Aerospace Standardization*, 2016(4): 33-38,45 (郑娟, 祝彬, 陆静, 等. AOS(高级在轨系统)协议跟踪研究[J]. *航天标准化*, 2016(4): 33-38,45)