

一种 AOS 遥测源包多路调度算法

王向晖 王同桓 李宁宁 田贺祥

(北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

摘要 高级在轨系统(AOS)体制的核心是调度策略,文章针对我国航天器遥测数据及信道特点,提出了一种高效的 AOS 遥测源包调度算法,该算法基于优先级调度,对各种数据可以设计不同的优先级,在调度时满足了低速数据的传送要求以及突发数据等高实时性的要求,尤其是信道空闲时算法在优先调度高优先级源包的同时,也兼顾了低优先级源包的下传需求。能够满足大多数航天器的应用需求,并已经成功在一些型号中应用。

关键词 空间数据系统咨询委员会;高级在轨系统;源包;调度算法;遥测;多路业务

中图分类号:V557 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1673-8748.2011.05.012

文章编号:1673-8748(2011)05-0083-05

An Efficient Scheduling Algorithm of Multiplexing TM Service Based on the AOS

WANG Xianghui WANG Tonghuan LI Ningning TIAN Hexiang

(Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: Scheduling strategy is the key of CCSDS AOS telemetry scheme. Based on the CCSDS AOS packet telemetry standard and the characteristics of the spacecraft telemetry data, an efficient priority scheduling algorithm is designed in this paper. By providing different priorities for different AOS packets, the priority scheduling algorithm is a mechanism which can be used to meet the requirements of both the low-speed data transfer and the unpredictable emerging real-time data transfer. More importantly, low priority packets could also be transferred when the data-link bandwidth has not been fully used. Basically, the currently used priority scheduling algorithm can meet the requirements of the majority space missions, and has been successfully applied in several projects.

Key words: CCSDS; Advanced Orbiting System; source packet; scheduling method; telemetry; multiplexing service

1 引言

航天器遥测是把航天器上各种被测信息,经过感受、采集、组帧、调制,由天线传输媒介送到地面接收站,再经过解调、记录和处理的测量过程,是地面

获取航天器在轨运行情况的主要途径,有着不可替代的作用^[1]。

航天器的遥测数据一般包括各分系统和设备的健康数据、工况数据、遥控响应数据和性能数据等。由于遥测数据量较大,而遥测下行信道速率有限,因此如何合理有效地将遥测数据下行到地面是一个十

收稿日期:2011-04-06;修回日期:2011-06-01

作者简介:王向晖(1978—),男,工程师,从事星载软件研制工作。

分重要的问题。

航天器遥测主要有两类体制:一类是采用时分轮巡采集和脉冲编码调制(PCM)体制,常称为PCM遥测系统;另一类是采用包装、调度合路的分包遥测体制。

我国在过去的几十年中均采用PCM体制,它是一种基于链路通信的封闭的和静态调度体制。在PCM遥测系统中,遥测格式是预先设计的,格式种类很有限,不可能为适应在轨运行的动态情况而随时改变,这是传统遥测固有的不足。另外,不同卫星平台或卫星系列设计的遥测固定格式不完全相同,影响到了星载设备的产品通用化^[2]。

随着我国航天技术应用的不断深入,航天器各分系统和设备需要对不同的应用过程(事件)产生不同格式、不同发生率和不同内容的数据包,从而要求遥测系统具有动态组织传送这些数据包的能力,即分包遥测体制。分包遥测引入最主要的新概念是“虚拟信道”,它是一种多信源分时共享同一物理信道的机制。与传统多路时分制不同的是,传统多路机制是静态时分或者说是事先固定安排的,而虚拟信道是动态时分机制,分包遥测体制不但可以大大提高遥测能力和信道利用率,更可以很好地适应不同任务的需求,实现高柔性和低成本。

在分包遥测体制中,又可以有分包遥测和高级在轨系统(AOS)两种主要的链路协议^[3],分包遥测适应于数据量不太大、数据速率不太高的应用场合,AOS是在分包遥测的基础上进行了业务扩充,能在宽的数据率范围和多样的传输要求上对多路业务有更好的适应性。因此,从性能上讲,分包体制优于PCM体制,AOS体制又优于分包遥测。目前国际上AOS系统正在逐渐成为主流体制,而我国已经有卫星开始采用AOS体制^[4]。

空间数据系统咨询委员会(CCSDS)AOS体制的核心是调度策略,根据CCSDS AOS体制标准^[5-10],传送遥测数据主要是应用源包多路业务,占用1个或几个虚拟信道。因此,遥测包含了两种调度机制,即虚拟信道调度和源包调度。CCSDS建议书针对虚拟信道调度所推荐的同步与异步相结合的策略是普遍适用的,而标准对源包级的调度较少阐述,本文根据我国航天器遥测数据特点(星上信源多,信源工作时间不定,信源产生的数据具有随机性、突发性等),提出了一种高效的AOS源包调度

算法,它兼顾了健康数据的周期传送要求,以及报警数据等高实时性要求,对各种数据可以设计不同的优先级加以调度,能够满足大多数航天器的应用。该调度方法下传机制灵活,在满足航天器任务的同时,有效地提高了遥测信道的传输效率。

2 调度策略设计思想

根据CCSDS AOS体制标准,对遥测数据来说要经过两种调度机制,即虚拟信道调度和源包调度,本文重点在源包调度设计。虚拟信道调度是指从若干虚拟信道中切换合适虚拟信道的过程,而源包调度是指在选定虚拟信道后,如何从隶属于本虚拟信道的源包中组织需要传输的遥测源包的过程。

AOS遥测组织调度流程如图1所示。

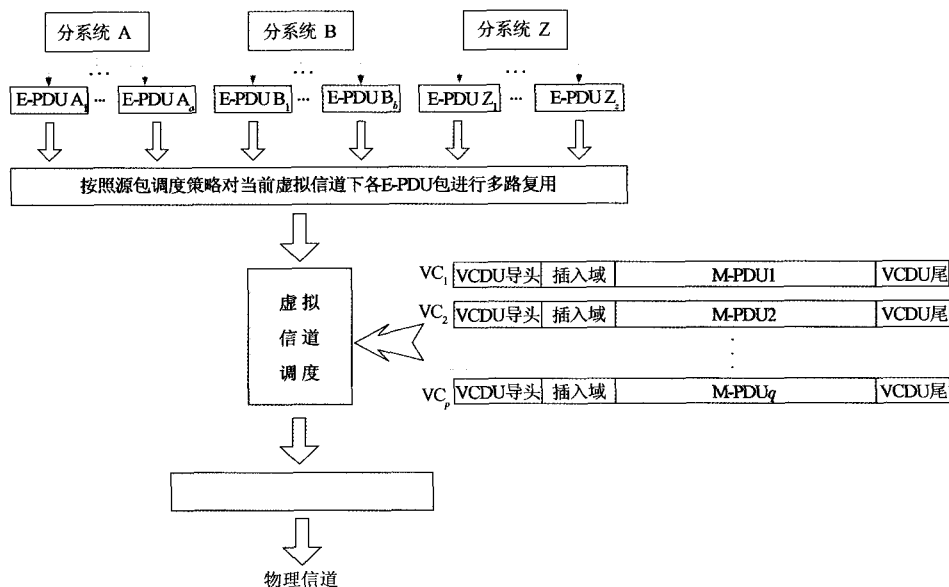
1) 虚拟信道调度设计

CCSDS中规定虚拟信道最多为64个,它不仅包含遥测的虚拟信道,还可能包含非遥测业务的虚拟信道,但是本文仅限于讨论遥测业务虚拟信道的调度。

由于一个物理信道在某一时刻只能为一个虚拟信道服务,因此就存在当前应该传输哪个虚拟信道的问题了,这就是虚拟信道的调度。合理的虚拟信道调度应该能够满足不同传输要求的数据对信道的占用需求。CCSDS建议书中,针对分包遥测体制的虚拟信道推荐了两种调度方式:一种是静态调度,即按预定的时间规律轮巡,这也就是传统PCM体制所用的时分多路方法,在虚拟信道与物理信道之间保持着固定的同步关系;另一种是动态调度,物理信道与虚拟信道之间没有固定的同步关系,而是根据优先级和现场实时情况决定哪个虚拟信道的数据占据物理信道发送,这种方式有利于优化信道资源的利用和满足信源不同的需求。

2) 源包调度设计

CCSDS AOS通过各种业务将航天器上的各类数据流统一管理。一般来讲,航天器上的各分系统及设备产生的遥测数据包的格式、长度、刷新率及下传周期要求是不一样的,因此,首先要将这些数据包包装为协议数据单元(E-PDU),再按照一定的调度策略挑选需要下传的E-PDU进行复用链接,生成多路复用协议数据单元(M-PDU)。



注: E-PDU 是包装协议数据单元(遥测源包); M-PDU 是多路复用协议数据单元; VC 是虚拟信道; VCDU 是虚拟信道数据单元。

图 1 AOS 遥测组织调度流程图

Fig. 1 Flow chart of organizing TM of AOS

源包调度通常按优先级进行选择,而优先级一般由源包的要求传送的频率决定,要求传送的频率越高,优先级越高;反之,要求传送的频率越低,源包优先级越低。但是在具体应用时,往往还需要考虑其他因素,譬如,在信道空闲时适当增大低优先级源包的下传频率,防止出现低优先级源包被高优先级源包堵塞的情况。

3 调度算法描述

根据第 2 节阐述的调度算法设计思想,结合我国当前航天器遥测数据的特点(星上信源多,信源工作时间不定,信源产生的数据具有随机性、突发性等),本文提出一种适用于大多数航天型号的高效的 AOS 遥测调度算法。

本算法分为两级进行调度:第一级是虚拟信道(VC)调度,第二级是源包(PK)调度。为方便描述,作如下假设。

(1)遥测下行只有一个低速率数据的物理信道。

(2)多路复用协议数据单元(M-PDU)数据区长度为 L_0 。

(3)设置 N 个虚拟信道($VC_1 \sim VC_N$),分时占据物理信道。

例: $N=7$ (根据航天器任务及数据特点,虚拟信道数可灵活设置), VC_1 为平台及载荷实时遥测数据, VC_2 为平台及载荷延时遥测数据, VC_3 为载荷

试验数据, VC_4 为内存下卸数据, VC_5 为事件报告, VC_6 为其他遥测数据, VC_7 为空闲数据(在本调度策略中空闲的虚拟信道是不需要的)。

说明: $VC_1 \sim VC_3$ 是常有,优先级高低依次为 $VC_1 > VC_2 > VC_3$; $VC_4 \sim VC_6$ 是突发,优先级高低依次为 $VC_5 > VC_4 > VC_6 > VC_1$; VC_7 是空闲数据帧填充信道用,以保持信道上帧传送的连续性,优先级最低,在本调度策略中 VC_7 不会被调度。

(4)不同虚拟信道由不同的遥测源包组成,以 VC_1 为例,假设该虚拟信道共有 m 个源包组成,分别为 $PK_1 \sim PK_m$;

(5)特定虚拟信道下的源包有各自的包长和多路周期,以 VC_1 为例, $PK_1 \sim PK_m$ 的数据包长度为 $L_1 \sim L_m (\leq L_0)$,多路周期为 $T_1 \sim T_m (T_1 < T_2 < T_3 < \dots < T_m)$;

(6)特定虚拟信道下的各源包的等效 M-PDU 占用空间之和应小于等于 M-PDU 数据区长度 L_0 。

定义:遥测源包 PK_k 的等效 M-PDU 占用空间为

$$S_k = L_k / T_k \quad (1)$$

式中: S 为某个遥测源包的等效 M-PDU 占用空间; k 为源包序号,取值 $1 \sim m$ 。

说明:本条保证在满负荷状态下,所有源包均能按照不大于指定多路周期的频率进行下传。

1) 虚拟信道调度

本算法中采用静态和动态两种调度组合的方式

进行虚拟信道调度,如图 2 所示。

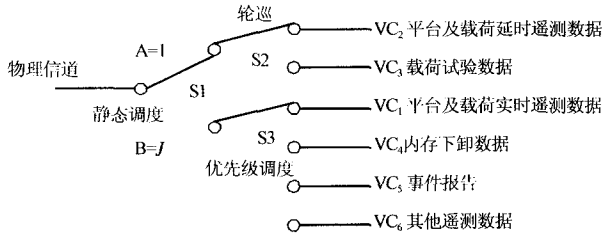


图 2 虚拟信道组合调度

Fig. 2 Scheduling method of VC

S1 是第一级多路合路, A、B 路采用分配比例周期进行调度, 比例周期为 $1:J$, 即 S1 切 A 路 1 次, 切 B 路 J 次, 再切 A 路 1 次, 再切 B 路 J 次, 依次按分配比例周期进行第一级的多路调度; S2 和 S3 是第二级多路合路, S2 采用在两个虚拟信道之间周期交替(也可采用分配比例周期), S3 则采用周期内的按优先级调度, 常态下, VC_4 、 VC_5 、 VC_6 是没有数据的, 因此不进行调度, 由 VC_1 占用信道。这种组合方式可以较好的兼顾不同虚拟信道的数据性质, 优化信道利用率。

地面测控站可通过上行注入指令控制更改虚拟信道的调度参数以提高期望 VC 的下传频率, 包括: 第一级多路合路 A/B 的分配比例, 第二级多路合路 S2 中 VC_2 和 VC_3 的传输比例, 使能/禁止指定虚拟信道的调度权等, 以此扩展了虚拟信道的动态调度能力。

2) 源包调度

当虚拟信道确定以后, 如何选择合适的源包进行多路复用, 是需要着重考虑的。通常按优先级进行选择, 但是在具体应用时, 往往还需要考虑其他因素, 譬如, 在信道空闲时适当增大低优先级源包的下传频率, 防止出现低优先级源包被高优先级源包堵塞的情况。

以 VC_1 为例, 按如下步骤从 $PK_1 \sim PK_m$ 中选择需要下传的遥测源包进行多路复用, 装载到多路协议数据单元(M-PDU)中。为了保证高效的信道利用率, 既要保证高优先级的源包优先下传, 同时又兼顾到低优先级源包在信道空闲时不被高优先级源包堵塞, 在组织 M-PDU 时, 采用多次源包选择的策略进行多路复用, 如图 3 所示。

(1) 将所有遥测源包按照多路周期($T_k, k=1 \sim m$)由小到大, 排列优先级(多路周期越小, 优先级越高), 例: $PK_1 > PK_2 > PK_3 > \dots > PK_m$ 。

(2) 一次选择策略目的是保证满足多路周期的源包按照优先级高低优先传输。每个 VC_1 调度时刻,

对已排列优先级的源包序列中源包进行逐一判断(从 PK_1 开始), 看其是否到传输时刻。有两种情况: ①当前源包到下传时刻, 则将其合路到 M-PDU 的数据域中, 重复(2)步骤, 直到 M-PDU 数据区填满, 跳到(5); ②当前源包未到下传时刻, 则对下一个遥测源包进行判断, 直至所有源包均已判断完毕, 跳到(3)。

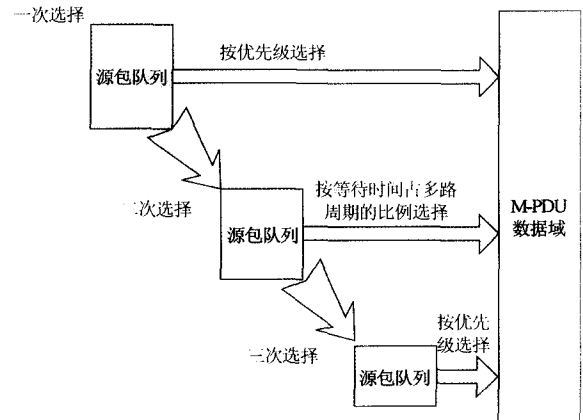


图 3 源包多路复用调度

Fig. 3 Scheduling method of PK

(3) 二次选择策略目的是为了保证在信道空闲时既能够优先考虑高优先级源包, 又能在一定程度上兼顾低优先级源包, 从而防止信道空闲时低优先级源包被高优先级源包堵塞的情况发生。此时说明所有到时的遥测源包均已多路到 M-PDU 中, 但是 M-PDU 数据区未满载, 按照下列原则二次挑选遥测源包。①对(2)中剩余的遥测源包按优先级重新进行排列; ②按优先级逐一统计队列中各遥测源包当前时刻与上次下传的时间间隔 ΔT_k , 若时间间隔大于该遥测源包的下传周期 T_k 的 $1/2$, 则将其合路到 M-PDU 的数据域中, 重复本步骤, 直到 M-PDU 数据区填满, 跳到(5); 否则选择下一个遥测源包重新执行本步骤, 直至所有源包均已判断完毕, 跳到(4)。

(4) 三次选择策略目的是为了保证信道不会空闲, 从而最大程度上提高了信道的利用率。此时说明经过源包的二次选择后, M-PDU 数据区依旧未满载, 按照下列原则第三次挑选遥测源包: ①对(3)中剩余的遥测源包按优先级重新进行排列; ②选择优先级最高的源包进行下传; ③若 M-PDU 包还未填满, 则重复(4)中①、②步骤, 直至 M-PDU 包填满。

(5) 将组织好的 M-PDU 填充入虚拟信道数据单元(VCDU)数据区中, 如系统中存在其他业务, 则需再做合路调度后, 经测控发射机下传。

在实际使用过程中, 用户可通过上行注入指令

控制来更改源包的调度参数,包括:源包的使能/禁止状态、源包的多路周期等等,以此扩展了源包的动态调度能力。上述过程的实现流程图如图4所示。

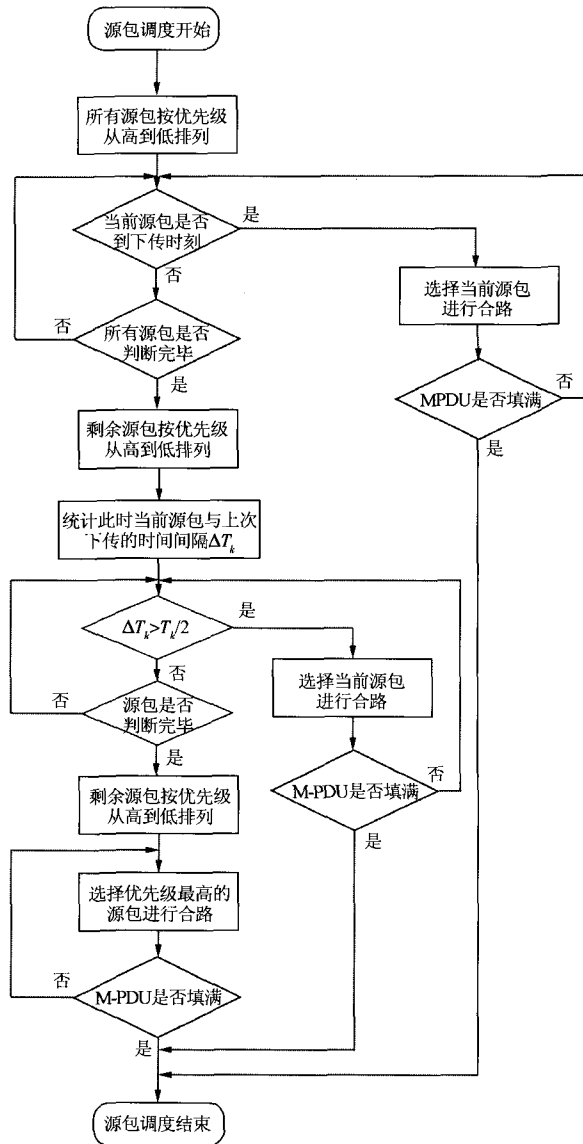


图4 源包调度流程图

Fig. 4 Flow chart of Scheduling of PK

4 结束语

在结合我国当前航天器遥测数据的特点的基础上,充分发挥了CCSDS AOS的优点,提出了一种高效的AOS调度算法,其特点是:基于优先级调度,兼顾了普通数据的周期传送要求以及突发数据等高实时性要求,对各种数据可以设计不同的优先级加以调度,尤其是在信道空闲的时候兼顾了低优先级

源包的下传需求。本算法能够满足大多数航天器的要求,目前已经得到广泛的应用。

参考文献 (References)

- [1] 谭维炽,胡金刚. 航天器系统工程[M]. 北京:中国科学技术出版社,2009
Tan Weichi, Hu Jingang. Spacecraft systems engineering[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2009 (in Chinese)
- [2] 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
Tan Weichi, Gu Yingqi. Space data system[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2004 (in Chinese)
- [3] 孙辉先,陈小敏,白云飞,等. CCSDS高级在轨系统及其在我国航天器中的应用[J]. 航天器工程,2003,12(1):12-28
Sun Huixian, Chen Xiaomin, Baiyunfei, et al. Applications of CCSDS AOS on spacecraft of China[J]. Spacecraft Engineering, 2003,12(1):12-28 (in Chinese)
- [4] 叶晓国,肖甫,孙力娟,等. SCPS/CCSDS协议研究与性能分析[J]. 计算机工程与应用,2009,45(4):34-37
Ye Xiaoguo, Xiao Fu, Sun Lijuan, et al. Research and performance analysis on SCPS/CCSDS protocol suite [J]. Computer Engineering and Applications, 2009,45(4):34-37 (in Chinese)
- [5] CCSDS. Advanced orbiting systems, networks and data links; architectural specification, CCSDS 701.0-B-3[S]. Reston, VA: CCSDS, Blue Book, 2001
- [6] CCSDS. TM space data link protocol, CCSDS 132.0-B-1[S]. Reston, VA: CCSDS, Blue Book, 2003
- [7] CCSDS. Space packet protocol, CCSDS 133.0-B-1[S]. Reston, VA: CCSDS, Blue Book, 2003
- [8] CCSDS. AOS space data link protocol, CCSDS 732.0-B-1[S]. Reston, VA: CCSDS, Blue Book, 2003
- [9] CCSDS. Overview of space communications protocols, report concerning space data system standards, CCSDS 130.0-G-2[S]. Washington: CCSDS, Green Book, Issue 2, 2007
- [10] CCSDS. AOS space data link protocol, recommendation for space data system standards, CCSDS 732.0-B-2[S]. Washington: CCSDS, Blue Book. Issue 2, 2006

(编辑:张小琳)