

# 小卫星通信系统协议研究

余 超\* 段登平

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

**摘 要** 本文根据小卫星发展趋势, 参考 CCSDS 的相关建议并结合实际情况, 提出了一种新的通信协议思路, 使之具有较好的通用性、扩展性和可继承性。

**关键词** 小卫星 通信协议 CCSDS 分包遥测遥控 虚拟信道 分层

## Study on Communication System Protocol for Micro-Satellite

YU Chao DUAN Dengping

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai, 200083)

**Abstract:** Based on the development trend of micro-satellite and recommendations of CCSDS, a new communication protocol idea is proposed in this paper. The aim is to make it have universal, extendable and inherited attributes.

**Key words:** Micro-satellite, Communication Protocol, CCSDS, Packet TC & TM, Virtual Channel, layers

### 1 绪论

#### 1.1 小卫星通信系统现状

小卫星通信系统是小卫星的重要组成部分。担负着数据通信、图象传输以及遥测遥控指令、数据的传送工作。如何合理有效地规划利用小卫星通信资源是通信协议的任务。

国内目前研制的小卫星星上通信系统, 主要基于模块化的设计思想。存在的不足有:

- 数据传输结构不够灵活。当不同分系统数据源发送数据的优先级需要改变或数据采集任务发生变化时, 现有的方案很难实现动态调度;
- 帧形式比较多, 帧结构采用固定格式, 不便于接收端按特征提取数据, 自动化处理和可靠性程度不高。

### 2 基于分包的遥测协议设计

#### 2.1 基于分包机制的遥测方法

“分包遥测”是把从空间获得的源数据以标准化和高度自动化的方式传输到用户的一种遥测数据传输结构。本文对遥测系统提出的总的设计思想是, 在沿用现有地面遥测设备的基础上, 采用一种兼容的分包遥测技术: 把常规的 PCM 遥测格式与现代分包遥测格式结合起来, 在传输遥测源包的同时传输 PCM 格式遥测数据, 以实现多数据源多用户共享的传送协议。

##### 2.1.1 源包结构设计

源包 (或包) 包含一组观测数据和辅助数据。本文设计的源包结构见表 1。

源包主要有两个域 ( field ): 包头和包数据

\* 2002 级博士研究生

表 1 遥测源包结构

遥测源包头					包数据域		
包标识			包序列控制		包数据长度	包副导头	源数据
SUBID	APID	T/C = 1	分组标志	源序列记数			
4bit	11bit	1bit	2bit	14bit	2 字节		长度可变

表 2 遥测传送帧结构

帧头	主导头				数据域			差错控制	帧尾	
起始位	传送帧 ID				源包 #1...#2		专门	PCM	纠错码	FLAG
	FID	VID	RID	帧计数	包头	数据	定义	数据	(可选)	
1 字节	2bit	6bit	1B	1 字节	4 字节	可变	数据		2 字节	1 字节

域。包头域标识产生数据的应用过程；包数据域的长度可变，因而具有灵活性好的特点，体现了分包遥测的优势。

### 2.1.2 遥测传送帧的组成

将源数据打包后，需对源包进行差错控制。因而在源包之后定义了一种新的数据结构——传送帧。传送帧格式设计见表 2。

传送帧数据域采取兼容常用 PCM 帧格式和源包格式的方法。这样既可以发送 PCM 帧数据，又可以传输分包遥测数据，使得数据传输的灵活性和兼容性增加，提高了信道利用率。

## 2.2 基于服务的分包遥测系统

前面的方法没有提供星地间传送数据单元的实体和数据源间的接口。本文提出一种简化的分层遥测协议设计方案。主要思想是基于 OSI 模型，利用虚拟信道概念，将遥测协议分层，每层负责一部分工作，低层向上层提供相应的服务。

### 2.2.1 遥测分层服务模型

遥测服务没有象 OSI 模型一样分为七层。由于分包遥测设计的主要目的是有效利用有限的空间链路资源，因而分包遥测的协议数据单元 (PDU) 的组织不同于 OSI 协议，按功能设计成三层，从上到下依次为：C 层，空间传输层；B 层，虚拟信道访问层；A 层，物理层。

### 2.2.2 空间传输层

本层协议的任务是如何将不同应用过程的源数据包或其他特殊数据包加载到虚拟信道帧

数据域的相应位置，即虚拟信道帧的组帧过程。接口的主要功能是实现源包的复用，并将复用后的源包按不同优先级高低排队进入队列等候 B、A 层的处理。

### 优先级策略

通常的优先级确定有静态和动态两种策略。静态优先级策略比较方便，适合于任务较少、调度不复杂的情况。当星上应用过程数量较少且优先程度明确时，采用静态优先策略。表 3 根据对各分系统可靠性的要求，列出了一种可行的优先级分配方案。

表 3 遥测分系统优先级划分

分系统名称	对应的优先级
姿态控制分系统	较高 (2 级)
星务管理分系统	高 (1 级)
通信分系统	一般 (3 级)
电源分系统	较低 (4 级)
结构及热控分系统	低 (5 级)

设计的调度原则如下：

- C 层对不同分系统源包的调度所依据的就是上述的优先级，每个分系统的任务（即应用过程）都有自己的优先级。优先级数值越小，越优先获得执行。

- 同一系统不同应用过程的源包是以 FIFO 的方式，即源包到达的先后次序进行处理的。

### 2.2.3 虚拟信道层

空间传输层对源包进行组帧后，将 VC 帧交由下一层——虚拟信道层处理。虚拟信道层主

要完成 VC 帧计数,然后将不同虚拟信道(一般为八个虚拟信道)的 VC 帧按轮循方式复用,再经过差错控制和加扰处理后交给低层。

### 3 遥控协议的分层设计

#### 3.1 分包遥控的概念和机理

随着技术的发展,一方面星上分系统具有较强的自主能力,各用户设备不再需要大量遥控指令的物理接口;另一方面,随着因特网的发展,遥控用户希望能借助因特网进行远程透明操作控制,不必集中到测控中心统一遥控流程,这就得由单任务、单用户体制转换为多任务、多用户体制。分包遥控方法为上述要求的实现提供了可能。

分包遥控的目的是把遥控信源的命令数据打包之后送至卫星,实现对星上应用过程和设备的控制。在设计分包遥控协议时将它按功能划分为五层信息处理结构,提供三种服务:信道服务、数据路由服务和数据管理服务。这种分层的思想同样来自 OSI 模型,但有些差异。五层结构包括:分包层、分段层(可选)、传送层、编码层和物理层。

#### 3.2 数据管理服务

数据管理服务实现应用接口设计和对数据的打包服务。

##### 3.2.1 分包层的作用

为便于遥控指令和数据的端到端传输,需对地面测控中心发出的指令和数据进行格式化处理。分包层的作用是将遥控指令和数据组织成标准格式的数据结构——遥控包。在接收端则解包、恢复并输出原来的遥控应用数据。

#### 3.3 数据路由服务

数据路由服务是整个分包遥控系统的核心,包括分段层和传送层两个层次的数据操作。提供遥控用户高层标准数据单元与遥控系统低层通信信道之间的接口。由该服务的星地操作策略实现多路径的可靠传输。

##### 3.3.1 分段层

提供给数据路由服务的数据是高层的遥控(TC)用户数据单元。当 TC 数据单元长度大于一幅遥控传送帧的长度时,就得采用分段层,将 TC 数据单元分割成固定长度的“遥控段”,便于直接装入传送层组成一帧。分段层完成以下两种数据处理:

- 输入的遥控用户数据单元组成遥控段,包括把长遥控用户数据单元分为几个较短的遥控段,或者把几个短遥控用户数据单元集合为一个长遥控段;
- 复用不同信源的 TC 数据单元,以共享同一虚拟信道。

##### 3.3.1.1 多路访问点(MAP) ID

遥控段的 MAP 机制有允许多达 64 个不同类型的用户遥控数据共享同一虚拟信道的通信能力。每个 MAP 独自进行 TC 数据的集合或者分段。不同 TC 数据单元进入分段层时就得到一个 MAP 值。MAP 机制决定了某个段访问信道的时机。而 MAP 的分配是通过判断优先级大小实现的。不同访问点(MAP)享有不同的优先级。为了不让某个 MAP 上的长信源长期垄断一个虚拟信道,应避免把长信源与短信源合用一个虚拟信道。因此,根据遥控指令和注入数据长度的差异,将主信道划分为两个基本虚拟信道,指令信道  $VC_c$  和数据信道  $VC_d$ 。两个虚拟信道各自管理,每个虚拟信道各有八个 MAP( $MAP_0 \sim MAP_7$ )。

##### 3.3.1.2 分段层的调度方法

遥控业务的指令和应答信号是最短的应用请求,且遥控指令的实时性最强。分段层实现的调度方法是给不同应用过程预先设定一个优先级,并按照优先级排队,优先级高的包(如遥控指令)先进入分段层处理。 $VC_c$  和  $VC_d$  的  $MAP_0 \sim MAP_7$  的优先级依次从高到低, $MAP_0$  的优先级最高。

##### 3.3.2 传送层

表 4 CLCW 结构

操作类型	VCID	标志位					帧预报	保留位	反馈帧 序列号
		射频状态	比特同步	差错等待	阻塞等待	丢失重发			
2	6	1	1	1	1	1	8	3	8

传送层是分包遥控的核心层，提供可靠传输遥控指令及数据所需的星地闭环操作。在传送层需要生成两种数据结构：传送帧和指令链路控制字 (CLCW)。这两种数据结构支持星地遥控闭环操作协议 (COP)。

### 3.3.2.1 遥控传送帧

遥控系统同遥测系统的传送帧格式很相似，差别主要在数据域。遥控传送帧的数据域通常由上层提供的一个段所组成。再加上帧头形成一幅完整帧。

$$\text{最大优先数} = (\text{任务等待时间} + \text{任务请求服务时间}) / (\text{任务请求服务时间} + \text{系数} \times \text{优先级})$$

按最大优先数进行动态管理的算法对短应用请求较有利，拥有最大优先数的过程能够优先获得运行。根据优先数的计算公式可知，这种算法对短任务有利，可优先运行。但随着数据帧等待时间的增加，其最大优先数也随之增加，所以也能较快地获得处理。这种算法考虑了用户要求和当前实际的数据传输状况，满足了紧急指令的处理请求，较易于实现，公式中的系数需根据不同的任务要求具体确定。

## 3.4 信道服务

### 3.4.1 编码层分组码

为了降低噪声对遥控数据传输的影响，遥控帧输入编码层后进行分组编码。分组码结构如图 1 所示。

TC 分组码的码块长度为 64bit。对应于某个具体的小卫星，其信息位长度设为固定值。

### 3.3.2.2 指令链路控制字 (CLCW) 结构

CLCW 用来向地面反馈遥控帧的接收状态信息。表 4 列出了 CLCW 的结构。

#### 传送层的调度方法

在传送层中，指令帧和数据帧的实时性是不同的，因而指令帧和数据帧的调度不用轮序方法，而是根据用户的需求、缓存占用情况、信道的拥挤程度以及差错控制的情况统筹进行动态调度。一种比较可行的方法是可抢占式最大优先数算法。公式如下：

## 3.5 遥控星地操作步骤 —— COP

为了确保传送遥控指令的正确性、完整性和连续性，需在分包遥控系统发送端和接收端之间建立完整的星地应答操作。从分包遥控系统的结构可知，地面系统可以通过在传送层以帧为单元的重发机制，来判断所发送的遥控指令或数据的接收情况，以决定是否需要重发。这需要利用上节的指令链路控制字来实现这一操作。其特点是响应快，效率较高。

### 3.5.1 COP 的特点

COP 是一种闭环操作，涉及到星上和地面的交互，其基本机制是自动请求重发 (ARQ)。由一对同步呼应机制组成，一个是帧操作步骤 (FOP)；另一个是帧接收和报告机制 (FARM)。遥控系统利用 FARM 机制把指令链路控制字 (C-



图 1 分组码码块结构

LCW) 通过遥测传送帧返回到发送端, 两者形成一个完整的闭环过程, CLCW 里包含了帧的接收和信道状况, 供地面分析决策。

### 3.5.2 完成 COP 操作的基本要点

• 以虚拟信道为基础进行操作管理, 不同虚拟信道的状态是相互独立的, 无论是数据或控制指令的传送帧和指令链路控制字都标明所经由的虚拟信道;

• COP 操作基于编号管理, 以保证所传输的数据单元的完整、有序和不重复性。传送帧使用帧编号, FOP 按序号递增顺序发送, FARM 按帧序号递增顺序接收。当 FARM 检测到接收帧错误, 包括传送帧本身错误或者帧序号不符合递增顺序, 都将拒收, 并将拒收后续任何不包含预期帧序号的传送帧, 同时发出封锁或重发请求。FOP 收到重传请求后立即重发被拒收的帧。

## 4 结束语

本文主要针对小卫星遥测遥控系统讨论其协议框架。整体上基于层次化模型进行分析, 将整个卫星星地通信过程所需要完成的功能由底层到应用分层实施。在此基础上提出了以分包(或分组)为基本数据单元的数据路由和虚拟信道共享的新思路。这样做的好处是使协议具有开放性, 有利于功能的扩展。

### 参考文献

- [1] 刘蕴才, 遥测遥控系统, 国防工业出版社, 北京, 2000. 163-174.
- [2] 屠祁, 屠立德. 操作系统基础, (第二版), 清华大学出版社, 北京, 2000. 124-128.
- [3] CCSDS. 102. 0-B-4: Packet Telemetry, 分包遥测, CCSDS, 1995. 17-25.
- [4] 石书济, 飞行器测控系统, 国防工业出版社, 北京, 1999. 33-44.

~~~~~

# 微型光具产生微型卫星

微型卫星已得到航空航天界的承认, 它们有可能被用来替代通常的卫星。微型卫星可做得像一只可口可乐瓶那样小, 因此, 其部署成本大大低于普通卫星。然而, 这里所遇到的一个难题是研制用于变轨和姿态控制、能提供 0.1 至 10mN 推力的微型推进器。对精细的机动动作来说, 所需要的推力小于一个喷嚏, 约为 10 至 100 $\mu$ N。

微型光具可以帮助人们监测这些推进系统的性能。装在微型推进器喷嘴内的一块集成光具芯片, 可作为一个诊断传感器来确定推进器的一些潜在问题, 例如因燃烧不全而产生的油污。莱斯系统公司在这种技术方面名列前茅。据该公司的有关人员解释说, 微力推进诊断学的原理是从集成光具旋转传感器进化而来的, 那是由美国国防高级研究计划局出资研制的一种光学陀螺仪。

微型卫星的好处是它们可以按分布式结构部署以形成虚拟的卫星, 其成本只有普通卫星

的三分之一, 其功效却是普通卫星的三倍。微型卫星的应用之一便是空间合成孔径雷达方面的应用, 其作用犹如地面的射电望远镜列阵。然而, 由于成网的微型卫星列阵大部分可重新配置, 它们能够适应其他许多应用, 例如地球定位和环境监测等。

据莱斯公司的有关人员说, 同使用普通卫星技术相比, 使用微型卫星的最大优点是: 如果把微型卫星列阵中所有组元的数据融合起来, 就可以模拟体积要大得多、发射重量也要重得多的某种卫星的几何形状。微推力诊断传感器已经设计好并准备在实际环境中进行试验。由于推进器本身的进步, 莱斯公司将对这种诊断传感器进行改进以使其适应更高的性能要求。他们希望能在两年内把传感器装在微型卫星上进行飞行试验。

顾聚兴 供稿