

doi: 10.7690/bgzd.2014.07.012

# 卫星 IP 网络协议体系

张景斌<sup>1,2</sup>, 孙鹏椿<sup>1</sup>, 刘炯<sup>1</sup>, 耶亚林<sup>1</sup>

(1. 西安通信学院研究生管理大队, 西安 710106; 2. 中国人民解放军 73132 部队, 福建 漳州 363111)

**摘要:** 针对新型卫星 IP 网络, 为深入研究国内外卫星网络协议体系及相关技术, 按照分层设计的思想, 重点从链路层、网络层、传输层阐述卫星 IP 网络协议体系研究进展情况, 准确把握卫星 IP 网络协议体系发展方向, 为下一步深入研究天地一体化 IP 网络奠定基础。

**关键词:** 卫星 IP 网络; 协议体系; 综述

**中图分类号:** TJ85 **文献标志码:** A

## Protocol Architecture of Satellite IP Networks

Zhang Jingbin<sup>1,2</sup>, Sun Pengchun<sup>1</sup>, Liu Jiong<sup>1</sup>, Ye Yalin<sup>1</sup>

(1. Administrant Brigade of Postgraduate, Xi'an Communication Institute, Xi'an 710106, China;  
2. No. 73132 Unit of PLA, Zhangzhou 363111, China)

**Abstract:** Aiming at the new satellite IP networks, for further studying of satellite networks protocol system and related technology at home and abroad, according to layered design, discusses satellite IP networks protocol system research progress from link layer, network layer and transmission layer. Accurately grasp the development direction of the satellite IP network protocol architecture, and make a foundation for the further study of the heaven and earth integration IP internet.

**Keywords:** satellite IP networks; protocol architecture; overview

### 0 引言

随着地面互联网应用的不断普及和影响范围的不断扩大, 各种通信方式都开始采用 IP 技术, 采用 TCP/IP 协议体系已经成为通信网络发展的必然趋势。卫星网络作为地面网络的延伸部分和重要补充, 未来的发展也将会采用 IP 协议作为通信平台与地面网络连成一体, 构成天地一体的 IP 网络<sup>[1]</sup>。

针对新型卫星 IP 网络, 世界各国纷纷展开了协议体系和相关技术的研究探索。目前, 大多数的研究主要是依照地面网络的设计思想, 按照分层设计的方法, 结合卫星网络的自身特点, 开展各协议层的设计研究。笔者重点分析链路层、网络层和传输层的协议研究进展情况, 为把握卫星 IP 网络协议体

系的研究发展, 开展深入研究奠定基础。

### 1 卫星链路层协议研究

#### 1.1 卫星链路层的主要协议

目前卫星链路层的应用协议较少, 主要有 CCSDS 协议和 HDLC 协议 2 种。有些方案也提出将 IEEE802.3 协议直接应用于卫星网络中<sup>[2]</sup>。

##### 1.1.1 CCSDS 协议

20 世纪 90 年代, CCSDS 组织针对空间任务的特定需求, 提出了 SCPS 协议族。该协议族包括: SCPS-TP、SCPS-NP 和 CCSDS 等协议, 分别应用于传输层、网络层和数据链路层<sup>[3-4]</sup>。CCSDS 数据帧属于定长帧, 其数据帧基本格式如图 1 所示。

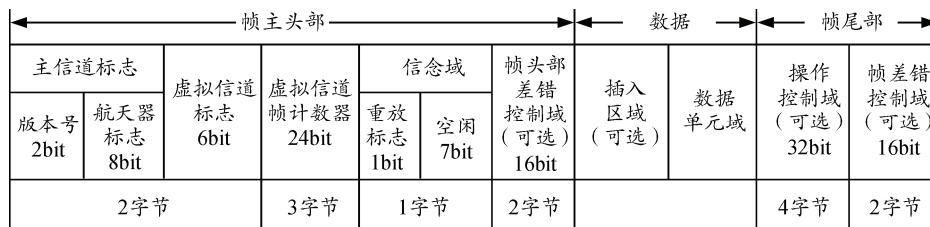


图 1 CCSDS 数据帧基本格式

收稿日期: 2014-01-18; 修回日期: 2014-02-24

基金项目: 陕西省科学技术研究发展计划立项资助(2013JM8007); 全军军事学研究生课题(2011JY002-253)

作者简介: 张景斌(1985—), 男, 山东人, 在读硕士, 从事卫星通信、IPv6 协议研究。

数据帧各字段功能如下：

- 1) 主信道标志：由传输帧的版本号和航天器标志 2 部分组成，其中航天器的标志由 CCSDS 指定。
- 2) 虚拟信道标志：用来标志传输数据的虚拟信道。
- 3) 虚拟信道帧计数器：3 字节，为每个虚拟信道提供单独的计数，保证各虚拟信道所传输的帧的连续性。
- 4) 信令域：1 字节，由重放标志和空闲区域 2 部分组成。
- 5) 帧头部差错控制：保护头部中的关键信息。
- 6) 数据单元域：是上层协议封装的数据。

### 1.1.2 HDLC 协议

HDLC 协议是 ISO 组织为 OSI 协议体系制定的面向比特型的数据链路层协议<sup>[5]</sup>。HDLC 数据帧属于变长帧，其基本格式如图 2 所示。

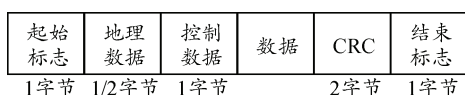


图 2 HDLC 数据帧基本格式

数据帧各字段功能如下：

- 1) 标志字段：起始标志和结束标志，作为数据帧的开头和结尾标志。
- 2) 地址数据：标志接收站的地址，长度为 1~2 字节。
- 3) 控制数据：1 字节，根据定义将数据帧分为信息帧、监督帧和无编码帧。
- 4) 数据：是上层协议封装的数据。
- 5) CRC：2 字节，对传输数据检错和纠错。

### 1.1.3 IEEE802.3 协议

IEEE802.3 协议是地面 IP 网络中数据链路层常用的协议，数据帧采用变长帧结构<sup>[2]</sup>。其基本格式如图 3 所示。

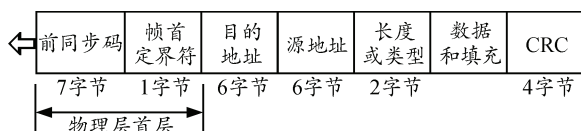


图 3 IEEE802.3 数据帧基本格式

数据帧各字段功能如下：

- 1) 前同步码：7 字节交替出现的 0 和 1，提醒系统有帧到来。
- 2) 帧首定界符 (starting frame delimiter, SFD)：

1 字节，帧开始的信号。前同步码与 SFD 合称物理层首部，由物理层添加。

- 3) 目的地址：6 字节，目的站或者将要接受该分组的节点的物理地址。
- 4) 源地址：6 字节，发送设备的物理地址。
- 5) 长度/类型：2 字节，数据字段中所包含的字节数目和类型。
- 6) 数据：是上层协议封装的数据。
- 7) CRC：差错检测信息。

## 1.2 研究分析

根据数据帧长度是否固定，可将链路层数据帧分为定长帧和变长帧 2 类，其中 CCSDS 数据帧属于定长帧，HDLC、IEEE802.3 数据帧属于变长帧。2 种帧格式具体技术比较如表 1 所示。

表 1 定长帧、变长帧技术比较

比较	定长帧	变长帧
现有协议	CCSDS	HDLC、IEEE802.3
数据帧长度	定长	不定长
封装 IP 分组	分段、多个	不分段、单个
与 IP 协议耦合	较差	较好
有效信息传输率	较高	较高
IP 分组丢失率	较高	较低
交换/路由速率	很快	较快

由表 1 可知：1) 定长帧格式、长度固定，交换和路由速率很快，数据帧封装多个 IP 分组，有效信息传输速率较高，但需要对 IP 分组分段，与 IP 协议耦合性较差，易发生差错扩散现象，IP 分组丢失率较高；2) 变长帧封装单个 IP 分组，提取方便，与 IP 协议耦合性较好，不会发生差错扩散现象，IP 分组丢失率相对较低，但由于数据帧长度可变，交换和路由速率受到影响。

通过分析比较可知，定长帧和变长帧各有优劣，在未来卫星 IP 网络中采用何种数据帧格式还无明确定论。目前，各国都在积极开展相关研究和探索。

## 2 卫星网络层协议研究

目前在网络层中应用的星上分组处理技术主要有 2 种：基于 ATM 的星上路由交换技术和基于 IP 的星上路由交换技术<sup>[6]</sup>。欧洲和日本等国家主要研究基于 ATM 的星上路由交换技术；美国等国家主要研究基于 IP 的星上路由交换技术。

### 2.1 星上分组处理技术

#### 2.1.1 星上 ATM 路由交换技术

星上 ATM 路由交换采用地面 ATM 技术，是一

种基于信元的、能够提供 QoS 控制和带宽保证的交换技术，是基于面向连接的，通过虚电路传输数据<sup>[7]</sup>。星上 ATM 交换技术在卫星 IP 网络中处理 IP 分组数据的主要流程如图 4 所示。

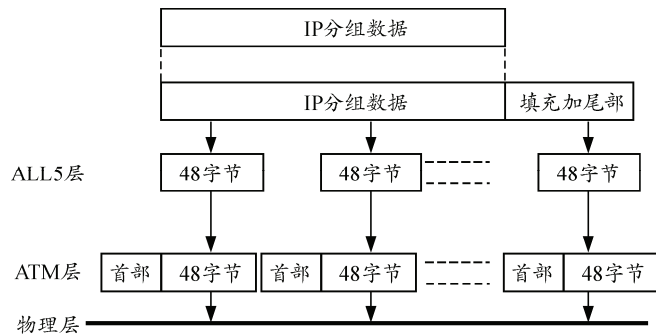


图 4 星上 ATM 交换技术数据处理

其具体工作流程如下：

1) ALL5 层收到 IP 分组之后，为其附加一个 8 字节的尾部以及填充。填充及尾部准备好后，就以 48 字节的分组段将 IP 分组数据交付给 ATM 层。

2) ATM 层从 ALL5 层收到 48 字节的分组数据段之后，加上 5 字节的首部后，将其转换为 53 字节的信元，然后交付给物理层发送。

### 2.1.2 星上 IP 路由交换技术

为实现与地面 IP 网络的无缝连接，在卫星网络中采用 IP 路由技术是一种较好的解决方案。美国在这方面研究较早、进展较快。自 1996 年开始，先后开展了“OMNI”、“CLEO”、“IRIS”等一系列研究计划，完成了星载 IP 路由器、卫星网络 IP 承载平台等验证实验<sup>[8-10]</sup>。

星上 IP 路由技术具体工作流程：在卫星链路上直接将 IP 分组封装到数据帧中，然后根据分组中目的 IP 地址，查找转发表，确定分组输出端口，最后通过交换开关将分组交换到相应的输出端口。

## 2.2 研究分析

为了比较星上 ATM 交换技术星上 IP 路由技术的性能，从信息传输效率、IP 分组丢失率、交换路由速率、业务 QoS 保证、星载设备要求等方面进行分析。为了便于分析，星上 IP 路由技术在分组数据封装时均采用 HDLC 协议。

### 1) 信息传输效率。

由于在网络传输过程中，IP 分组长度大多限定在 576 字节以下，选取 128 字节、576 字节和 1 500 字节 3 种情况进行计算信息传输效率<sup>[11]</sup>，结果如表 2 所示。

表 2 信息传输效率

类型	128 字节	576 字节	1 500 字节
ATM 封装	55.3	77.8	86.1
IP 封装	65.7	92.1	96.9

基于 ATM 交换技术，信元较短，首部所占比例较大，并且在分组数据分段时需附加 8 字节的尾部以及填充数据；而基于 IP 路由技术，数据帧较长，帧头以及 IP 报头所占比例较小，且在封装数据帧时不需附加尾部以及填充数据。因此，在传输同等长度数据帧时，基于 IP 路由技术中的有效信息要高于基于 ATM 交换技术。由表 2 可知，在传输同等长度分组数据时，基于 IP 路由技术信息传输效率要比基于 ATM 交换技术高出 10% 以上。

### 2) IP 分组丢失率。

在计算 IP 分组丢失率时，设定信息传输误码率在  $10^{-7} \sim 10^{-4}$  之间，IP 分组长度分别为 128 字节、576 字节、1 500 字节。经计算 IP 分组数据丢失率如表 3 所示。

表 3 IP 分组数据丢失率

误码率	128 字节		576 字节		1 500 字节	
	ATM	IP	ATM	IP	ATM	IP
$10^{-7}$	0.01	0.01	0.06	0.05	0.14	0.12
$10^{-6}$	0.13	0.10	0.55	0.46	1.35	1.19
$10^{-5}$	1.26	1.02	5.36	4.50	12.69	11.31
$10^{-4}$	11.94	9.73	42.38	36.92	74.25	69.88

由表 3 可知，在传输同等长度 IP 分组数据时，ATM 交换技术的 IP 分组数据丢失率要高于 IP 路由技术。信息传输误码率越高、传输的 IP 分组长度越长，ATM 交换技术的 IP 分组丢失率越明显。

### 3) 交换路由速率。

ATM 技术为定长包交换，IP 技术为不定长包交换，在交换和路由速率上，ATM 技术要优于 IP 技术，但是随着星上处理能力的提高、查表算法的优化，IP 路由速率将会得到改善。

### 4) 业务 QoS 保证。

ATM 交换技术是面向连接的，在业务传输之前需要信令建立传输路径，业务 QoS 能够得到保证；而 IP 路由技术是面向无连接的，在业务传输时无需建立传输路径，业务 QoS 保证比较困难。

### 5) 星载设备要求。

ATM 交换技术需要信令建立传输路径，拥塞管理和流量控制功能完备，提供业务 QoS 保证，对星上处理能力要求较高；IP 路由技术是面向无连接、不可靠的数据传输，拥塞管理和流量控制较低，业务 QoS 尽量保证，对星上处理能力要求较低。

通过分析，2 种技术各有特点，相互之间没有

明显优势。但是，从应用角度看，随着地面互联网应用的不断普及和影响范围的不断扩大，各种通信方式都开始采用 IP 技术，利用 IP 协议进行数据传输已经成为通信网络发展的必然趋势。卫星网络作为地面网络的延伸部分和重要补充，在未来卫星 IP 网络中发展 IP 路由技术更加适合天地一体化 IP 网络的发展方向。

### 3 卫星传输层协议研究

#### 3.1 传输层主要协议

在传输层协议研究上，美国开展较早，最早提出 SCPS-TP 协议，并经过应用测试。该协议主要进行以下改进：1) 使用 TCP 分段技术；2) 使用选择性负确认；3) 没有重传定时器，传输数据之前不再通过 3 次握手建立连接。

此后，世界各国在传输层协议上展开了深入研究，提出了多种改进协议和方案。这些改进协议及方案主要有：Fast Start、TCP-Peach、TCP-PBS、TCP Westwood、TCP-STAR、Faster Recovery TCP、XCP、P-XCP、STP、STPP、XSTP、TCP 分段和 TCP 欺骗等<sup>[12-16]</sup>。

#### 3.2 研究分析

卫星传输层改进协议及方案主要针对卫星通信链路传播延时长、延时带宽积大、误码率高、链路带宽不对称等特点进行研究。根据协议方案主要解决的问题及改进方法，可将其分为以下几类：

##### 1) 基本改进方案。

该方案主要是指 20 世纪 90 年代提出的改进方案，对协议改动较小，性能提高有限。这类方案主要有：扩大初始发送窗口、扩大最大 TCP 发送窗口、T/TCP、多 TCP 连接、明确拥塞指示和 TCP 头压缩等。

##### 2) 数据报优先级方案。

该方案通过设置数据报优先级，以解决连接开始阶段数据流量低的问题。这类协议主要有：Fast Start、TCP-Peach 和 TCP-PBS 等协议。

##### 3) 可用带宽估计方案。

该方案通过修改数据丢失后发送端拥塞窗口控制策略，以解决网络传输中数据差错及窗口减半导致的数据发送流量下降过快的问题。这类协议主要有：TCP Westwood、TCP-STAR 和 Faster Recovery TCP 等协议。

##### 4) 拥塞窗口指示方案。

针对 TCP 协议在大延时带宽积网络中性能表现差的问题，提出了基于 ECN 算法的 XCP 协议以及改进版本 P-XCP 协议。

##### 5) 信道不对称改进方案。

针对卫星通信链路带宽不对称，反向链路中的 ACK 易丢失或者延迟较大问题，提出了 SACK、NACK 和 ACK 拥塞控制等策略。

##### 6) 代理方案。

代理方案是针对星地协议差异、传输链路较长而提出的，一般分为 TCP 分段和 TCP 欺骗 2 种。结合代理方案提出的传输控制协议主要有 STP、STPP 和 XSTP 等；针对无拥塞卫星网络的典型传输控制协议、突发误码重传协议、单网关 TCP 协议和 AeroTCP 等。

通过分析可知，这些协议及方案一般都是针对某个单一问题提出改进，对星上设备处理技术、卫星 IP 网络拓扑、星地网络差异等因素综合考虑较少，性能改善有限，且设计过于理想化、对网络配置要求高，实现困难。目前，有学者开始结合卫星 IP 网络具体拓扑结构，综合考虑多方面因素，针对星上处理设备实际情况分析研究，提出了一些新的改进协议。这些协议主要有 TP-Satellite 和 NSTP 等协议<sup>[17]</sup>。

### 4 结束语

笔者分层概述了当前卫星 IP 网络协议研究进展情况，在链路层主要讲述了 2 种数据帧，即定长帧和变长帧；在网络层重点分析了 2 种星上分组路由交换技术，即星上 ATM 路由交换技术和星上 IP 路由交换技术；在传输层具体讲述了各类传输控制改进协议及方案。该研究准确把握了卫星 IP 网络协议体系的发展趋势，为下一步深入研究天地一体化卫星 IP 网络奠定了基础。

### 参考文献：

- [1] 刘炯. 卫星因特网传输控制技术研究[M]. 北京：国防大学出版社，2012：59-76, 205-261.
- [2] 龙飞，王勇前，曹志刚，等. 卫星因特网接入 TCP/IP 协议的改进与发展[J]. 清华大学学报：自然科学版，2001，41(7)：17-20.
- [3] 姚秀娟，李雪. CCSDS 空间链路层协议识别技术研究[J]. 航天电子对抗，2012，28(2)：26-28.
- [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.