

Research on the Protocol Architecture of Global Navigation Satellite System based on Inter-Satellite Links

YI Xian-Qing¹, LIU Si-Hui², ZHANG Yao-Hong¹, ZHONG Tao¹, HOU Zhen-Wei¹

1. Science and Technology on Information Systems Engineering Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha, P. R. of China, 410073

2. China Satellite Navigation Engineering Center, Beijing, P. R. of China, 100094

1. xqyi@nudt.edu.cn

Abstract: With the sustainable growth of requirement of information share among many kinds of Global Navigation Satellite Systems (GNSS), even others space information systems, it is time to design from top idea the protocol architecture with unification frame for GNSS based on inter-satellite links. In this paper, the models of link and network of satellite network in GNSS based on inter-satellite links are created on the ground of the Beidou II. By analyzing link character and network rule and information transmission requirement in GNSS, the protocol architecture and interface mode of GNSS based on inter-satellite links is provided and designed based on CCSDS protocol frame from application layer, transport layer, network layer to data link layer. The protocol architecture developed by us has characters of agility, reliability, compatibility and expansibility.

Keywords: Global satellite navigation; Satellite network; Inter-Satellite Links; Protocol architecture.

基于星间链路的全球卫星导航系统协议体系研究

易先清¹, 刘思慧², 张耀鸿¹, 钟涛¹, 侯振伟¹

1. 国防科技大学信息系统工程重点实验室, 长沙, 中国, 410073

2. 中国卫星导航工程中心, 北京, 中国, 100094

1. xqyi@nudt.edu.cn

【摘要】随着多种全球卫星导航系统、甚至不同类型空间信息系统内/间信息共享需求的不断增长,从顶层为基于星间链路的全球卫星导航系统设计具有统一架构的协议体系就显得刻不容缓。本文以我国北斗二代全球卫星导航系统建设为研究背景,通过构建基于星间链路的全球卫星导航系统卫星网络建链与组网模型,分析其建链特征与组网规律,并依据全球卫星导航综合信息传输需求,以CCSDS协议框架为指导,提出并设计了基于星间链路的全球卫星导航系统协议框架,重点从应用层、传输层、网络层和数据链路层分别设计基于星间链路的全球卫星导航系统协议体系和接入模式,该协议体系具有较强的灵活性、可靠性、兼容性和可扩展性等特点。

【关键词】全球卫星导航, 卫星网络, 星间链路, 协议体系

1 引言

由于目前卫星网络的应用特定性和结构简约性,其协议规范大都采用各自专用的通信协议,数据传输时一般不涉及复杂的多节点间路径选择问题(大多数空间系统的数据传输是基于点对点的“弯管式”转发),因此该类网络协议也相对简单^[1]。

但随着针对空间信息系统应用任务需求的日益增加,其卫星网络呈现出由多层星座内/间卫星节点互连的复杂网络结构,如我国目前正准备实施建设的北斗二代全球卫星导航系统,显然过去简单的空间通信协议与规范已不能适应此类基于星间链路的卫星网络。再考虑空间信息系统设计建设与运行维护的高成本性、高风险,迫切需要各系统间的交流协同与信息共

享。至此,承担上述系统建设与运行的各机构展开国际间合作已势在必行,但这种合作需要遵从一定的协定标准,其中空间数据通信协议就是此类标准的主要组成部分。另一方面,随着地面网络的发展,互联网协议IP成为网络互连的事实标准。目前,IP技术正在向移动无线领域扩展,并使IP在空间通信的应用成为可能。

受IP协议影响,CCSDS组织对基于地面有线网络的TCP/IP协议进行重构与扩充,逐步开发了一系列标准化的空间通信技术基础协议,形成了开放的CCSDS空间网络通信协议簇,并开始应用于世界范围的空间通信中。CCSDS建立这些通信协议簇,旨在通过技术协商方式建立一套空间数据系统的标准,以实现广泛的国际合作和相互支持。

CCSDS标准是一个全新的开放互连国际空间数据网络概念，具有以下技术特点：

- 面向多信源、多用户，能满足同时对多航天器进行测控管理的要求；
- 采取新一代数据传输格式和体系结构，对各类空间信息进行标准化封装，从而达到测控过程透明并面向最终用户的目的；
- 具有广泛、先进的国际标准基础，除了能适应IRIG、ESA的有关标准外，尽量沿用了国际标准化组织(ISO)及国际电话电报咨询委员会(CCITT)的有关标准。

尽管CCSDS标准是一个全新的开放互连国际空间数据网络概念，但它只是一类通用性的指导性框架，针对不同的空间信息系统，其协议框架时都必须进行其针对性的设计与实施，如本文就是基于CCSDS协议框架，面向全球卫星导航系统，基于星间链路建链特征和组网结构，根据全球卫星导航综合信息传输需求提出的一种协议体系^[2]。

2 全球卫星导航系统卫星网络建链与组网

2.1 全球卫星导航系统组成

本文研究的全球卫星导航系统以基于星间链路的我国北斗二代全球卫星导航系统^[11]为背景，其组成包括空间段、地面控制段和用户段，其中空间段包括MEO、IGSO、GEO星座；地面控制段包括主控站MCS、监测站MOS、注入站ULS；用户段NUT主要指导航用户终端。

在全球卫星导航系统空间段的三个星座中，MEO星座包含三个轨道面，每个轨道面上布局9颗卫星（8颗工作星+1颗备份星），共计27颗MEO卫星，IGSO星座由3颗IGSO卫星组成，GEO星座包括5颗GEO卫星。地面控制段包括主控站MCS（Master Control Station）、监测站MOS（Monitor Stations）、注入站ULS（Upload Stations），用户段NUT导航用户终端。

MEO星座内同轨道面内MEO卫星间和异轨道面间MEO卫星间设置同轨星间链路 ISL_{tra} （intra-plane Inter-Satellite Links）和异轨星间链路 ISL_{ter} （inter-plane Inter-Satellite Links）。MEO卫星与IGSO和GEO卫星间设置不同星座间星间链路 IOL （Inter-Orbital Links）。各卫星根据波束覆盖约束与地面站之间设置星地链路 SGL （Satellite Ground Links）。全球卫星导航系统组网链路设置如下表1所示。

表 1 全球卫星导航系统组网链路
Table 2. Links in GNSS satellite network

		地面控制段部分			空间段部分		
		主控站 MCS	注入站 ULS	监测站 MOS	MEO卫星	GEO卫星	IGSO卫星
地面控制段部分	主控站 MCS	C波段卫通链路 / WGL			SGL_{MCS-m}	SGL_{MCS-g}	SGL_{MCS-i}
	注入站 ULS				SGL_{ULS-m}	SGL_{ULS-g}	SGL_{ULS-i}
	监测站 MOS				SGL_{MOS-m}	SGL_{MOS-g}	SGL_{MOS-i}
空间段部分	MEO卫星	SGL_{m-MCS}	SGL_{m-ULS}	SGL_{m-MOS}	ISL_{tra} ISL_{ter}	IOL_{m-g}	IOL_{m-i}
	GEO卫星	SGL_{g-MCS}	SGL_{g-ULS}	SGL_{g-MOS}	IOL_{g-m}	X	X
	IGSO卫星	SGL_{i-MCS}	SGL_{i-ULS}	SGL_{i-MOS}	IOL_{i-m}	X	X

全球卫星导航系统卫星网络由上述各类卫星节点和卫星节点间的星间/星地链路共同组成，网内信息传输通过一系列的物理层“多跳”节点和链路进行，使用户或终端相互连接。而对于终端至终端、终端至用户、以及用户至用户之间的信息交换流，逻辑上从源到目的地与底层的网络结构是无关的，这样数据流既可以完全在地球上各站（包括各主控站、各注入站、各监测站）之间及内部传递，也可以在地球上各地面站与空间段各卫星之间传递，也可以全部在空间段各卫星之间传递。

3 基于星间链路的全球卫星导航系统协议体系设计

基于星间链路的全球卫星导航系统卫星网络协议体系设计须依据全球卫星导航综合信息传输需求和全球卫星导航系统卫星网络及组网链路支撑，参照CCSDS协议框架^[5-10]，分别从其卫星网络应用层、传输层、网络层、数据链路层等方面展开设计。

全球卫星导航系统卫星网络协议体系按如下思路进行设计：全球卫星导航系统中某通信节点形成的导航综合信息在传输之前先通过CCSDS无损数据压缩协议LDC压缩之后形成包含对应各类导航综合信息的压缩文件，再通过CCSDS文件传输协议CFDP进行应用层传输处理，处理过程中根据不同类型导航综合信息传输需求，分别采用以空间分包协议SPP为主的简单协议路线传输G站间C波段卫通数据信息和RDSS信息（只经过GEO卫星），和采用以SCPS-TP传输协议和SCPS-NP网络协议为主的复杂协议路线传输需经过以MEO卫星节点为核心全球性卫星网络的大部分导航综合信息。最后调用数据链路层中的AOS协议和TC协议进行组帧共享传输。

全球卫星导航系统卫星网络协议体系总体设计如下图1示。

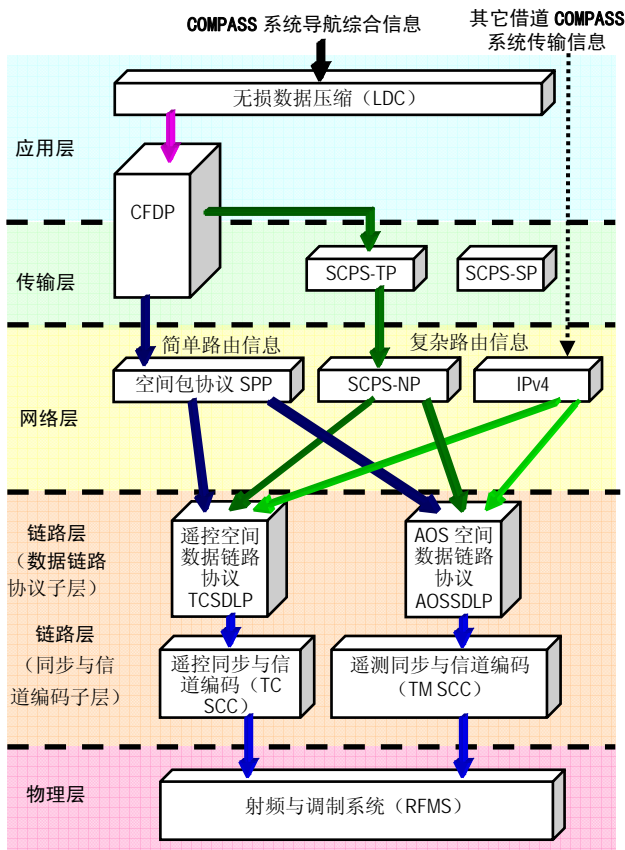


Figure 1. Protocol architecture of GNSS satellite network

图1 全球卫星导航系统卫星网络协议体系示意图

以发送过程为例，全球卫星导航系统卫星网络协议体系设计步骤如下：

- 形成全球卫星导航综合信息；
- 经过CCSDS规定的针对应用层的无损数据压缩协议形成结构紧凑的全球卫星导航综合信息文件；
- 依据承载的全球卫星导航综合信息不同类别，经过CCSDS协议簇中的文件传输协议CFDP分别进行应用层或传输层处理，形成不同类型数据包；
- 依据来自CFDP处理后的不同类型数据包，分别选择空间分包协议SPP的简约路线或SCPS-TP和SCPS-NP的多功能路线，选择简约路线的接e)处理，选择多功能路线的接f)处理；
- 经过CCSDS协议簇中空间分包协议SPP进行网络层路由与拥塞控制，而后接h)处理；
- 经过CCSDS协议簇中SCPS-TP传输协议进行高可靠传输处理，经SCPS-TP传输协议处理后形成可靠传输的压缩TCP数据报；
- 压缩TCP数据报再经CCSDS协议簇中的网

络层协议SCPS-NP处理形成灵活配置数据包，实现基于复杂卫星网络结构的灵活路由与拥塞控制，而后接h)处理；

- 根据数据包中包含的不同类型的导航综合信息（依据APID）分别调用CCSDS数据链路层协议——遥控TC协议或高级在轨系统AOS协议进行数据帧传输处理；
- 形成的TC传输帧或AOS传输帧再经过遥控同步与信道编码或遥测同步与信道编码子层进行同步与信道编码；
- 最后传送至物理层的射频与调制系统RFMS进行发射前及发射处理。

下面分别从全球卫星导航系统卫星网络应用层、传输层、网络层、数据链路层等方面进行详细说明。

4 全球卫星导航系统应用层协议

全球卫星导航综合信息传输应用层协议设计主要针对CCSDS无损数据压缩协议LDC与文件传输协议CFDP和传输协议SCPS-TP展开设计，由于CCSDS无损数据压缩协议LDC属于一类通用的压缩技术，对全球卫星导航综合信息的压缩并无特殊要求，只要遵照CCSDS无损数据压缩协议LDC^[5]，实施压缩即可生成各类导航综合信息压缩文件。

全球卫星导航系统文件传输协议规范设计依据CCSDS文件传输协议CFDP承载协议数据单元PDU格式规范设计其PDU格式，包含全球卫星导航综合信息的协议数据单元PDU由一个格式固定的PDU头部后跟一个格式固定或变化的PDU数据域组成，PDU数据域部分来源导航综合信息无损压缩文件LDCF。

5 全球卫星导航系统传输层协议

在全球卫星导航系统卫星网络中，其传输层数据报协议设计以CCSDS传输协议SCPS-TP为框架展开。通过分析空间网络传输层协议与全球卫星导航综合信息传输需求，其传输层协议设计针对其导航综合信息传输适应性，重点兼顾减小误码率BER影响、时间窗口调节、降低错误突发、缓解链路非对称影响、缓解资源不足、适应数据包丢失、服务分级、灵活配置等因素，综合构造基于SCPS-TP协议的全球卫星导航系统传输层数据报。

在全球卫星导航系统中，影响数据传输的误码率BER主要由其卫星网络中的空-地物理链路、空-空物理链路决定，且受环境影响，本文并非针对减少这些物理链路误码率而采取措施，而是基于这些物理链路误码率现状，设计以保障导航综合信息的可靠传输的传输层应该采取的各种措施，以减小空间链路高误码

率BER对导航综合信息传输的影响。

6 全球卫星导航系统网络层协议

在全球卫星导航系统中,其导航综合信息包含多种类别,大部分导航综合信息可能需要经过全球卫星导航系统卫星网络全部节点和链路多跳转发,但某些类别的导航综合信息可能只需经过卫星节点的单跳转发。为了提高传输效率^[3-4],本文根据导航综合信息传输过程的复杂程度选择空间分包协议SPP、空间通信网络协议SCPS-NP和IP协议并存的复合协议体系。

6.1 基于空间分包协议SPP的网络层协议

对于全球卫星导航系统中传输路径相对简单(无需经过星间链路中继)的一类导航综合信息,以空间分包协议SPP为依据设计其网络层协议。此类导航综合信息主要指其中的站间C波段卫通数传信息,此类传输信息只在主控站、时间同步/注入站、监测站与GEO卫星间建立的C波段星地链路进行类似弯管式的信息传输。主备主控站和所有外场站构成星型网,各外场站只能与主站进行数据交换,外场站之间不进行数据交换。

上述网络结构相对于通过MEO卫星的全球通信子网而言,无论其静态组成结构还是动态运行结构都要简单得多,针对传输站间导航综合信息的此类子网,选择CCSDS协议簇中针对网络层的空间分包协议SPP。遵循CCSDS空间分包协议SPP协议框架,全球卫星导航系统卫星网络网络层协议设计的核心是其协议实体的实现,协议实体设计包括协议数据单元PDU生成与拆分、发送端协议过程、中间系统协议过程和接收端协议过程四个方面。

6.2 基于SCPS-NP网络协议的网络层协议

在全球卫星导航系统中,需要传输的大部分导航综合信息是为全球导航服务的,其传输过程须经过以MEO卫星节点为核心的全球性卫星网络,包括MEO卫星节点、IGSO卫星节点、GEO卫星节点、主控站MCS节点、注入站ULS节点和各类监测站节点及节点间的星间、星地链路,其组成结构是相对复杂的。加上MEO与IGSO卫星节点与地面站之间位置上的相对移动,造成其连接的星间、星地链路在连接性上、传输性能上动态时变,其动态的拓扑结构更加复杂。针对此类结构复杂的卫星网络,其传输的信息类型和传输途径远复杂于基于固定星地链路单跳转发的现行卫星导航系统,此时须恰当设计相适应的包括网络层的传输协议。

通过分析,我们选择基于CCSDS协议簇中空间通

信网络协议SCPS-NP框架作为在全球卫星导航系统卫星网络网络层协议的设计指南,以保证在复杂的全球卫星导航系统卫星网络中灵活路由由导航综合信息。遵循CCSDS网络协议SCPS-NP协议框架,设计的协议实体包括SCPS-NP数据报生成与拆分、SCPS-NP数据报发送协议过程、SCPS-NP数据报接收协议过程、SCPS-NP数据报中继转发协议过程、SCPS-NP数据报路由协议过程、SCPS-NP数据报处理协议过程六个方面。

6.3 基于IP协议的全球卫星导航系统卫星网络网络层协议

在全球卫星导航系统运行过程中,为了提高与其它卫星导航系统的兼容性和互操作性,需要引入其它卫星导航系统信息,甚至可能来自地面非导航系统的信息需要借助全球卫星导航系统进行传输(类似全球卫星导航系统中RDSS信息传输),而这些数据在地面互联网传输时基于TCP/IP协议,其数据报已是IP数据包,只要将这些IP数据包(包括IPv4或IPv6版本)进行基于CCSDS协议的转换(或封装)处理,即可按CCSDS网络层协议进行路由传输,因此选择CCSDS协议簇中针对网络层的IP协议。

7 全球卫星导航系统数据链路层协议

考虑全球卫星导航综合信息传输应用需求和全球卫星导航系统卫星网络组网特征,全球卫星导航系统数据链路层协议设计基于CCSDS协议簇的高级在轨系统AOS空间链路协议和遥控TC空间链路协议框架,以数据传输帧组帧设计为中心展开。

采用AOS空间数据链路协议框架,以固定长度传输帧构造全球卫星导航综合信息传输数据帧,可实现全球卫星导航系统卫星网络中的帧同步,但因采用AOS空间数据链路协议无法保证数据传输的完整性,故须在全球卫星导航系统卫星网络的传输层合理设计传输控制协议SCPS-TP,由高层协议SCPS-TP来进行重传控制,以确保全球卫星导航综合信息能够完整、可靠传输。

采用遥控TC空间数据链路协议框架,以可变长度传输帧构造全球卫星导航综合信息传输数据,可保证长度较短的全球卫星导航系统指令信息能够以较短的时延进行收发。但为保证全球卫星导航系统指令信息能够无间隔、无重复、按发送顺序到达接收端,在遥控TC空间数据链路协议中引入重传控制机制,该机制通过全球卫星导航系统中构造的遵循COP-1规范的通信操作服务实体提供。

8 总结

本文为基于星间链路的全球卫星导航系统提出的协议体系具有如下特点:

(1) 支持多种类型导航综合信息传输的灵活选择

全球导航综合信息业务的传输需求并无固定模式,许多情况下还是根据实际需求随机上传或下载,本文给出的全球卫星导航系统卫星网络协议体系各类导航综合信息的业务特性和传输特性,特别是考虑网络层协议中关于路径选择的约束设计,设计了传输导航综合信息的多种工作模式和功能模式,以方便多种不同类型导航综合信息传输的灵活选择。

(2) 支持基于星间链路组网节点的灵活接入

本文设计的协议体系考虑了各种不同类型的卫星节点、地面站节点、星地链路、星间链路到全球卫星导航系统的接入,且基于全球卫星导航系统卫星网络拓扑结构动态演变过程及规律,协议体系中各层服务实体具有面向全球卫星导航系统节点与链路资源的具体特征,可以适应全球卫星导航系统阶段与链路资源变化,以便系统建设过程中逐个加入的卫星节点、地面站节点可以根据需要随时接入整网。

(3) 支持与其它导航系统信息传输的兼容扩展

包括支持与现有全球卫星导航系统卫星网络自身的兼容扩展,和与其它全球卫星导航系统甚至其它空间信息系统的兼容融合两个方面。复杂庞大的全球卫星导航系统卫星网络需要一个长期的建设过程,需要通过不断的自身扩展以满足不断变化的系统需求。本文在设计整个全球卫星导航系统卫星网络协议体系时通过考虑其需求变化,预留了全球卫星导航系统卫星网络扩展空间。再通过采用标准的CCSDS协议框架进行指导性设计,还可兼容其它全球卫星导航系统业务的扩展融合,甚至与其它空间信息系统的扩展融合。

References (参考文献)

- [1] Wang Zheng-yong, ARCHITECTURE DESIGN AND ANALYSIS OF MULTI-LAYER SATELLITE NETWORKS. Doctoral Degree of Harbin Institute of Technology. 2007.1 (Ch). 王振永. 多层卫星网络结构设计与分析[D]. 哈尔滨工业大学学位论文, 2007. 1.
- [2] Xianqing Yi, Zhili Sun, Fang Yao and Ye Miao. Satellite constellation of MEO and IGSO network routing with dynamic grouping [J]. International Journal of Satellite Communications and Networking. 2013; 31:277-302
- [3] Yi Xian-qing, Feng Ming-yue, Zhao Yang, Luo Xue-shan. A Destruction-Resistant Routing Algorithm of Satellite Network based on GEO/MEO Constellation [J]. Computer Science, 2007, 34(8): 74~82 (Ch). 易先清, 冯明月, 赵阳, 罗雪山. 一种基于GEO /MEO星层组网的抗毁路由研究[J]. 计算机科学, 2007, 34(8): 74~82.
- [4] Yi Xian-qing, Li Jian-jie, Tang Shu, Luo Xue-shan. The Method of Research on Survivable Routing Technical of Space-based Information Network Based on Mechanism of Organization Self-conditioning [J]. Systems Engineering and Electronics. 2010, 32(12): 25~29 (Ch). 易先清, 李建杰, 唐曙, 罗雪山. 基于组织自愈机制的空间信息网络抗毁路由技术研究方法[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(12): 25~29.
- [5] CCSDS 130.0-G-2. OVERVIEW OF SPACE COMMUNICATIONS PROTOCOLS. [December 2007]. <http://public.ccsds.org/publications/archive/130x0g2.pdf>.
- [6] CCSDS 133.0-B-1. SPACE PACKET PROTOCOL. [September 2003]. <http://public.ccsds.org/publications/archive/133x0b1c2.pdf>.
- [7] CCSDS 232.0-B-2. TC SPACE DATA LINK PROTOCOL. [September 2010]. <http://public.ccsds.org/publications/archive/232x0b2c1.pdf>.
- [8] CCSDS 732.0-B-1. AOS SPACE DATA LINK PROTOCOL. [September 2003]. <http://public.ccsds.org/publications/archive/732x0b1s.pdf>.
- [9] CCSDS 714.0-B-2. Space communications protocol specification (SCPS): transport protocol (SCPS-TP). [October 2006]. <http://public.ccsds.org/publications/archive/714x0b2.pdf>.
- [10] CCSDS 713.0-B-1. Space communications protocol specification (SCPS): network protocol (SCPS-NP). [May 1999]. <http://public.ccsds.org/publications/archive/713x0b1s.pdf>.
- [11] China Satellite Navigation Office, BeiDou (COMPASS) Navigation Satellite System Development [R]. March, 2010.