



信息通信领域产学研合作特色期刊

第三届国家期刊奖百种重点期刊 | 中国科技核心期刊

ISSN 1009-6868

CN 34-1228/TN

# 中兴通讯技术

## ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

[www.zte.com.cn/magazine](http://www.zte.com.cn/magazine)

2016年8月 • 第4期

**专题：天地一体化信息网络**

中兴通讯技术

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

二〇一六年八月

第二十二卷第四期

总第二一九期



# 《中兴通讯技术》第7届编辑委员会委员名单

**主 任** 钟义信（北京邮电大学教授）

**副主任** 赵先明（中兴通讯股份有限公司董事长兼总裁） 糜正琨（南京邮电大学教授）

**副主任** 马建国（天津大学电子信息工程学院院长） 陈前斌（重庆邮电大学副校长）

## 编委（按姓氏拼音排序）

- |     |                            |     |                     |
|-----|----------------------------|-----|---------------------|
| 曹淑敏 | 中国信息通信研究院院长                | 孙枕戈 | 中兴高能技术有限责任公司总经理     |
| 陈建平 | 上海交通大学教授                   | 孙知信 | 南京邮电大学物联网学院院长       |
| 陈 杰 | 中兴通讯股份有限公司高级副总裁            | 谈振辉 | 北京交通大学教授            |
| 陈前斌 | 重庆邮电大学副校长                  | 唐雄燕 | 中国联通网络技术研究院首席专家     |
| 葛建华 | 西安电子科技大学通信工程学院副院长          | 田文果 | 中兴新能源汽车有限责任公司董事长    |
| 管海兵 | 上海交通大学电子信息与电气工程学院副院长       | 童晓渝 | 中电科软件信息服务有限公司副总经理   |
| 侯为贵 | 中兴通讯股份有限公司前任董事长            | 王 京 | 清华大学教授              |
| 洪 波 | 中兴发展股份有限公司总裁               | 王文东 | 北京邮电大学软件学院副院长       |
| 洪 伟 | 东南大学信息科学与工程学院院长            | 王 翔 | 中兴通讯股份有限公司副总裁       |
| 纪越峰 | 北京邮电大学信息光子学与光通信研究院<br>执行院长 | 卫 国 | 中国科学技术大学教授          |
| 江 华 | 中兴通讯股份有限公司副总裁              | 吴春明 | 浙江大学教授              |
| 蒋林涛 | 中国信息通信研究院科技委主任             | 邬贺铨 | 中国工程院院士             |
| 李尔平 | 浙江大学信息学部副主任                | 徐安士 | 北京大学教授              |
| 李红滨 | 北京大学教授                     | 续合元 | 中国信息通信研究院技术与标准研究所总工 |
| 李建东 | 西安电子科技大学副校长                | 徐慧俊 | 中兴通讯股份有限公司执行副总裁     |
| 李 军 | 清华大学信息技术研究院院长              | 薛一波 | 清华大学教授              |
| 李乐民 | 中国工程院院士,电子科技大学教授           | 杨义先 | 北京邮电大学教授            |
| 李融林 | 华南理工大学教授                   | 杨 震 | 南京邮电大学校长            |
| 李少谦 | 电子科技大学通信与信息工程学院院长          | 尤肖虎 | 东南大学教授              |
| 李 涛 | 南京邮电大学计算机学院院长              | 张宏科 | 北京交通大学教授            |
| 李 星 | 清华大学教授                     | 张 平 | 北京邮电大学网络技术研究院执行院长   |
| 刘建伟 | 北京航空航天大学教授                 | 张云勇 | 中国联通研究院副院长          |
| 陆建华 | 中国科学院院士,清华大学教授             | 赵慧玲 | 中国电信股份有限公司北京研究院总工程师 |
| 马建国 | 天津大学电子信息工程学院院长             | 赵先明 | 中兴通讯股份有限公司董事长兼总裁    |
| 孟洛明 | 北京邮电大学教授                   | 郑纬民 | 清华大学教授              |
| 糜正琨 | 南京邮电大学教授                   | 钟义信 | 北京邮电大学教授            |
| 庞胜清 | 中兴通讯股份有限公司高级副总裁            | 钟章队 | 北京交通大学教授            |
| 史立荣 | 中兴通讯股份有限公司董事               | 周 亮 | 南京邮电大学通信与信息工程学院副院长  |
|     |                            | 朱近康 | 中国科学技术大学教授          |





信息通信领域产学研合作特色期刊  
第三届国家期刊奖百种重点期刊  
中国科技核心期刊  
工信部优秀科技期刊  
中国五大文献数据库收录期刊  
ISSN 1009-6868  
CN 34-1228/TN  
1995年创刊

## 办刊宗旨

以人为本,荟萃通信技术领域精英;  
迎接挑战,把握世界通信技术动态;  
立即行动,求解通信发展疑难课题;  
励精图治,促进民族信息产业崛起。

# 目次

中兴通讯技术 总第129期 第22卷 第4期 2016年8月

## 专题:天地一体化信息网络

- 02 对中国建设天、空、地一体化信息网络的几点认识 ..... 顾学迈,赵康健,贾敏,张乃通  
09 基于分布式星群的空间信息网络体系架构与关键技术 ..... 王敬超,于全  
14 天基宽带互联网发展现状与展望 ..... 梁宗闯,陶滢,高梓贺  
19 空间信息网络中的星座设计方法研究 ..... 张威,张更新,苟亮  
24 天地一体化信息网络天基宽带骨干互联系统初步考虑 ..... 张平,秦智超,陆洲  
29 天地一体化生态电磁环境的构建 ..... 姚富强  
34 天基网络动态接入技术现状与趋势 ..... 贾敏,高天娇,郑黎明,郭庆  
39 天地一体化信息网络协议体系与传输性能简析 ..... 杨冠男,李文峰,张兴敢  
46 空间互联网协议技术及应用 ..... 杨志华,袁鹏,张钦宇  
49 天地一体化网络空间信息抗干扰技术 ..... 陈新龙,陈大可

## 专家论坛

- 53 关于天基传输网络体系结构的讨论 ..... 刘华峰,孙智立,杨昕,赵康健,程子敬  
58 新一代低轨卫星网络和地面无线自组织网络融合技术的探讨  
..... 杨昕,孙智立,刘华峰,赵康健,程子敬,苗晔,Haitham Cruickshank

## 企业视界

- 64 后摩尔时代的3D封装技术——高端通信网络芯片对3D封装技术的应用驱动 ..... 王晓明

## 综合信息

全球移动视频市场规模将在2021年达250亿美元(33) 国际电联发布2015年度报告 定调全球电信业2020年发展目标(38) 物联网五大新兴“战场”显现工业互联网规模庞大(52) 无人驾驶首个技术标准近期即将公布(57) 产业再造将推动VSAT市场规模增长近两倍(63)

期刊基本参数:CN 34-1228/TN\*1995\*b\*16\*64\*zh\*P\*¥ 20.00\*15000\*13\*2016-08

# Contents

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL Vol. 22 No. 4 Aug. 2016

## Special Topic: Space and Terrestrial Integrated Information Network

- 02 Construction of Space/Sky/Terrestrial Integrated Information Network in China  
.....GU Xuemai, ZHAO Kanglian, JIA Min, ZHANG Naitong
- 09 System Architecture and Key Technology of Space Information Network Based  
on Distributed Satellite Clusters ..... WANG Jingchao, YU Quan
- 14 Status and Development Trend of Space Broadband Internet  
..... LIANG Zongchuang, TAO Ying, GAO Zihe
- 19 Satellite Constellation Design in Space Information Network  
..... ZHANG Wei, ZHANG Gengxin, GOU Liang
- 24 The Space Wideband Backbone Interconnected System in the Integrated Space  
and Terrestrial Information Network ..... ZHANG Ping, QIN Zhichao, LU Zhou
- 29 Construction of Ecological Electromagnetic Environment in Integrated Space  
and Terrestrial ..... YAO Fuqiang
- 34 Dynamic Access Technology for Space-Based Network: Situation  
and Development Trend ..... JIA Min, GAO Tianjiao, ZHENG Liming, GUO Qing
- 39 Network Protocol System and Transmission Performance of Integrated Space  
and Terrestrial Information Network ..... YANG Guannan, LI Wenfeng, ZHANG Xinggan
- 46 Technologies and Applications of Space Network  
..... YANG Zhihua, YUAN Peng, ZHANG Qinyu
- 49 Space Information Anti-Interference Technologies in Integrated  
Space-Terrestrial Information Network ..... CHEN Xinlong, CHEN Dake

## Expert Forum

- 53 The Space-Based Transmission Network Architecture  
..... LIU Huafeng, SUN Zhili, YANG Xin, ZHAO Kanglian, CHENG Zijiang
- 58 Technology of New Generation LEO Satellite Network and Terrestrial MANET Integration  
.....YANG Xin, SUN Zhili, LIU Huafeng, ZHAO Kanglian, CHENG Zijiang, MIAO Ye,  
Haitham Cruickshank

## Enterprise View

- 64 3D-IC Packaging Technology Driven by High-End Communication Network Chips  
in Post-Moore Law Period ..... WANG Xiaoming

## 敬告读者

本刊享有所发表文章的版权,包括英文版、电子版、网络版和优先数字出版版权,所支付的稿酬已经包含上述各版本的费用。

未经本刊许可,不得以任何形式全文转载本刊内容;如部分引用本刊内容,须注明该内容出自本刊。

## 2016年第1—6期专题

- 1 网络空间安全**  
杨义先 北京邮电大学 教授  
杨庚 南京邮电大学 教授
- 2 大数据分析处理与应用**  
郑纬民 清华大学 教授
- 3 5G技术与业务创新**  
王京 清华大学 教授  
向际鹰 中兴通讯股份有限公司 首席科学家
- 4 天地一体化信息网络**  
张乃通 中国工程院 院士  
顾学迈 哈尔滨工业大学 教授
- 5 工业互联网与智慧工厂技术**  
邬贺铨 中国工程院 院士  
王耀南 湖南大学 教授
- 6 SDN/NFV的实践与规模应用**  
蒋林涛 中国信息通信研究院 教授



## 专题栏目策划人



张乃通

中国工程院院士,哈尔滨工业大学教授,通信技术专家;主要研究领域为集群移动通信、空间通信;先后主持研制成功 MPT1327 模拟集群移动通信系统并得到实用,打破了其他国家垄断中国专用通信系统市场的局面,获得 14 项科研成果奖;已发表论文 200 余篇。



顾学迈

哈尔滨工业大学教授;主要研究领域为无线通信、先进卫星通信技术及个人通信系统;先后主持和参加基金项目 20 余项,获得 7 项科研成果奖;已发表论文 100 余篇。

## 专家论坛栏目策划人



孙智立

英国萨里大学通信系统研究所教授、研究生院主任;主要研究领域为卫星通信网络和未来互联网技术;作为项目负责人承担过 15 项欧盟科研框架项目、2 项政府科研项目和 1 项欧洲空间局科研项目;发表论文 200 余篇,出版、编辑专著 3 部。

## 专题:天地一体化信息网络

### 导读

当前,由于陆地信息系统已经无法充分满足信息化社会及国防信息化广域覆盖与多类信息融合共享的需求,在离地一定高度的空间建立信息基础设施是未来信息网络发展的需求。空间信息基础设施必须由空间卫星(亦称航天器)系统来完成对天基信息的感知、传输等一系列任务。因此,近年来国际航天活动频次居历史高位,新型发射方式促使航天器的数量激增。2015 年全球共进行 86 次(81 次成功)运载火箭发射,发射各类卫星 259 颗(入轨 236 颗);在“十二五”期间各国在轨卫星数量较多:美国 445 颗、俄罗斯 146 颗、欧洲 131 颗、中国 129 颗、日本 47 颗等,并呈“一超多强”态势。上述这些都是建设天基信息基础设施的物质保障,但由于历史条件的限制,往往是“量身定制”,互不相关,不能满足信息与空间资源共享的需求,它们必须依赖地面专网来扩大覆盖范围。而未来信息网络需要的是不依赖地面站组网的广域覆盖,因此根据对信息的需求以及已初步具备的空间条件,我们认为建设天、空、地一体化信息网络已刻不容缓。

建设天、空、地一体化信息网络的关键问题为:

(1)为什么要建设“天、空、地一体化网络”?它由哪些部分组成?卫星通信系统是否就是天基信息网络?

(2)地面信息网络的建设已有一定规模与成熟的技术,能否直接搬上空间使用?它们的差别是什么?

(3)空间信息网络与陆地信息网络从技术层面讲,最大难点是什么?如何去解决?

(4)如何通过地面半实物仿真、测试平台及搭载试验,在地面进行体系架构、关键技术的演示验证?

我们必须自力更生地研究、解决这些问题,因为世界上还没有全套的成果可供参考。

在本期专题栏目中,我们将就这些关键问题进行探讨、研究,提出既具有一定创新又能解决难题、可供参考的具体措施。

在本期专家论坛栏目中,我们提出了“骨干+区域增强”的双层天基传输网络架构;更进一步地,还展示并验证了一种由新一代低轨卫星网络和地面无线自组织网络组成的星地一体化网络,为今后进一步研究卫星网络的体系结构和自组互联网技术起到抛砖引玉的作用。

这期专题和论坛的文章并非成熟技术的经验,而是具有探索性的思考,主要是为了形成较为统一的认识,希望能给读者有益的启示和参考。在此,对各位作者的积极支持和辛勤工作表示衷心的感谢!

张乃通 顾学迈 孙智立

2016 年 6 月 16 日

# 对中国建设天、空、地一体化信息网络的几点认识

## Construction of Space/Sky/Terrestrial Integrated Information Network in China

顾学迈/GU Xuemai<sup>1</sup>  
赵康健/ZHAO Kanglian<sup>2</sup>  
贾敏/JIA Min<sup>1</sup>  
张乃通/ZHANG Naitong<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150080;  
2. 南京大学, 江苏 南京 210093)  
(1. Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China;  
2. Nanjing University, Nanjing 210093, China)

中国分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2016) 04-0002-07

**摘要:** 认为陆地信息系统已无法满足信息化社会及国防信息化广域覆盖与多类信息融合共享的需求, 建立空间信息基础设施是未来信息网络的发展需求。针对中国建设天、空、地一体化信息网络的原因、网络架构、技术难点、演示验证等, 提出了中国建立天、空、地一体化信息网络探索性的认识, 以及对其实施过程中于陆地信息设施不同的技术难点的看法。

**关键词:** 天、空、地一体化; 信息网络; 天基宽带互联网

**Abstract:** The terrestrial information system is unable to fully meet the requirement for wide coverage and multi-class information fusion of information-based society and national defense, and the establishment of space information infrastructure is the development needs of the future information network. In this paper, aiming at the reasons, network architecture, technical difficulties and demonstration of the construction of space/sky/terrestrial integrated information network in China, we propose some considerations about the construction of network and some views about technical difficulties which are different from land information facilities.

**Keywords:** space/sky/terrestrial integration; information network; space-based broadband internet

**第**三次工业革命使人类进入信息时代, 信息已成为当前社会经济发展的核心驱动力。传统的陆地信息设施与传输体制已满足不了纷繁复杂的信息需求, 必须利用空间高度传输处理信息的优势。空间信息传输相比于陆地信息传输, 在覆盖面积、接入速度、效率、实时性、精度等方面都具有明显的优势, 我们必须充分利用空间信息传输的这些优势, 建设天、空、地一体化的信息网络, 满足日益纷杂的信息需求<sup>[1-5]</sup>。

### 1 空间信息传输的基本概念

#### 1.1 空间的定义

空间按离地球高度可分为两类:

- 离地球表面  $3.6 \times 10^4$  km 的静止轨道(GEO)卫星, 又称卫星、太空、外层空间、天基, 我们简称为“天基”。

- 离与月球以远的太阳系行星空间, 即离地球大于约  $3.84 \times 10^5$  km, 最远到海王星(曾定为到冥王星)的空间, 称为深空。

#### 1.2 空间信息传输条件

##### (1) 传输性能

由于空间通信系统具有传输距离长、多普勒频移大、信道衰落大等特点, 空间信息传输的传输损耗、时延、误码率、传输速率等性能与传输

距离密切相关<sup>[6]</sup>。空间信息传输的链路性能与误码率性能分别如表1和表2所示。

由表1和表2可知, 随着通信端与地球距离的增大, 其传输损耗与传输时延显著增大, 下行链路速率与误码率也显著增大。由此可见, 空间通信的技术难度是发展空间信息传输的主要挑战。

##### (2) 传输环境

空间信息传输的传输环境, 大体可分为以下几个部分:

- 火星以近, 经大气层一站到达;
- 火星以远, 经大气层→被测星

收稿时间: 2016-05-12

网络出版时间: 2016-06-30

基金项目: 中国工程院重大咨询研究项目(2016-ZD-07)

▼表1 空间信息传输的链路特性

|           | 距离/ $10^6$ km   | 传输损耗/dB         | 时延              |
|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| GEO       | 0.036           | 183.5(GEO轨道→地球) | 256 ms          |
| 月球→地球     | 0.36~0.41       | 20.7~21.03      | 1.21~3.5 s      |
| 火星→地球     | 59.6~401.3      | 64.4~80.9       | 3.3~22.3 min    |
| 海王星→地球    | 4 304.9~4 694.1 | 101.6~102.3     | 239.2~260.8 min |
| GEO: 静止轨道 |                 |                 |                 |

▼表2 空间信息传输的上下行链路速率比与误码率

|           | 天基通信                  | 深空通信      | 陆地互连网         |
|-----------|-----------------------|-----------|---------------|
| 上下行链路速率比  | 1:100                 | 1:1 000   | 1:1           |
| 误码率       | $10^{-4}$ ~ $10^{-6}$ | $10^{-4}$ | 不大于 $10^{-4}$ |
| GEO: 静止轨道 |                       |           |               |

行程空间→被测星、复杂时空环境、复杂空间环境(空间粒子、温度场、电磁场、重力场、真空等)。

由此可见,天基、深空都属于空间范畴,但它们的性能差别还是很大的;月球、火星是属于深空范畴,但不能代表整个深空。因此,我们认为当前天基、深空应先分别研究,而月球、火星作为天基系统的延伸研究,探索合为一体研究的可行性<sup>[7]</sup>。

### 1.3 业务(任务)种类

对于天、空、地一体化的信息网络的业务种类,多种行业提出了多类业务需求,可大概概括为两类:

(1)以整个地球为视点,对陆地、海洋、大气层与生物间的相互作用进行系统综合观察,观测、认识地球,与地球和谐共处;对远程、空中、海洋等目标监测、探测、测绘、监视。这些信息的获取是要通过应用卫星系统的感知(我们统称为对地观测应用卫星系统)。

(2)应急增强,快速响应。这些信息的获取可用入网灵活,可多次使用的飞机、飞艇等组成的高空平台及由微小卫星组网完成。

### 1.4 对空间信息设施的技术要求

为解决陆地信息传输的瓶颈,建立空间信息传输系统势在必行,其设施的技术要求主要有3点:广域覆

盖,信息共享,适应多种行业、多类业务的需求。

## 2 在轨应用卫星(航天器)简况

### 2.1 在轨卫星数及其分布

截至2015年,全球在轨应用卫星数及其分布情况如下:

(1)当前在轨卫星1 311颗,通信、导航与对地观测合计占87%。

(2)军、民、商卫星的比例分配为29%、26%、45%;通信卫星中商业卫星占74%,占在轨卫星的40%。

(3)呈现“一超多强”格局,美、

俄、欧、中居前列(“十二五”期间在轨卫星数为:美国445颗,俄罗斯146颗,欧洲131颗,中国129颗,日本47颗,印度23颗,其他国家或地区123颗)。

### 2.2 在轨应用卫星系统存在的问题

虽然近几十年来卫星通信技术得到了长足的发展,在轨卫星数呈逐年增多的趋势,但对于建设天、空、地一体化的信息网络仍然存在很多亟待解决的问题,主要表现为以下几个方面:

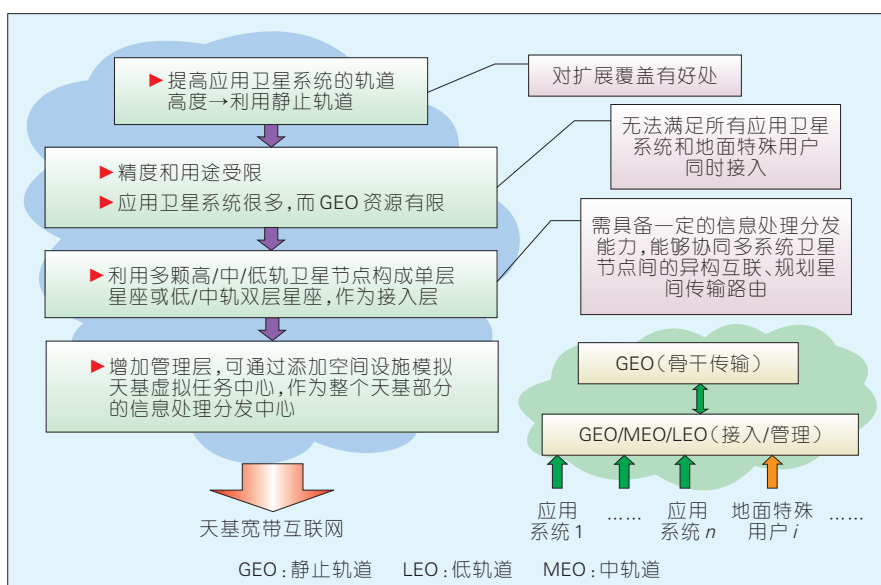
(1)为了满足获取信息的准确度,基本采用低轨制来“量身定制”开发,能够实现独立使用,标准化程度低,彼此相互独立,并呈现出“烟囱林立”的景象。

(2)不具备中继传输链路,只能在过顶时才能获取信息,不能满足广域覆盖需求。

(3)信息遵循先落地后共享的模式,获取的共享信息有时延,很难实行在全球建立地面站,获取共享信息受限。

## 3 天基信息网络

天基宽带互联网的发展思路,如图1所示。为满足广阔的覆盖范围,



▲图1 天基宽带互联网发展思路



提高应用卫星系统的轨道高度,我们需要在骨干传输层主要利用 GEO。由于 GEO 卫星资源受限,无法满足所有应用卫星系统和地面特殊用户的同时接入,使对地探测、侦察、监视精度大大下降,我们就需要在骨干传输层下方,利用多颗高/中/低轨卫星节点构成单层星座或低/中轨双层星座,作为接入层。另外,我们还需要增加管理层,通过添加空间设施模拟天基虚拟任务中心,作为整个天基部分的信息处理分发中心。

### 3.1 解决问题的途径

应用卫星系统由于基本上采用低轨(特别是遥感卫星与侦查卫星)及量身定制而使空间信息不能满足技术要求,我们若采用 GEO/同步轨道(GSO)卫星为应用卫星系统星座,仍不能满足探测、测试精度要求;同时 GEO 轨道资源有限,满足不了多种用户、多类业务的需求。为此,既考虑利用空间静止轨道资源,又保有应用卫星系统的现有功能,我们可以采用:以中继卫星在 GEO/ GSO 组网形成骨干层;骨干层辅以非同步轨道的中轨道(MEO)/低轨道(LEO)星座共同组成接入层、管理层,这两层联合构成天基互联网,如图 2 所示。

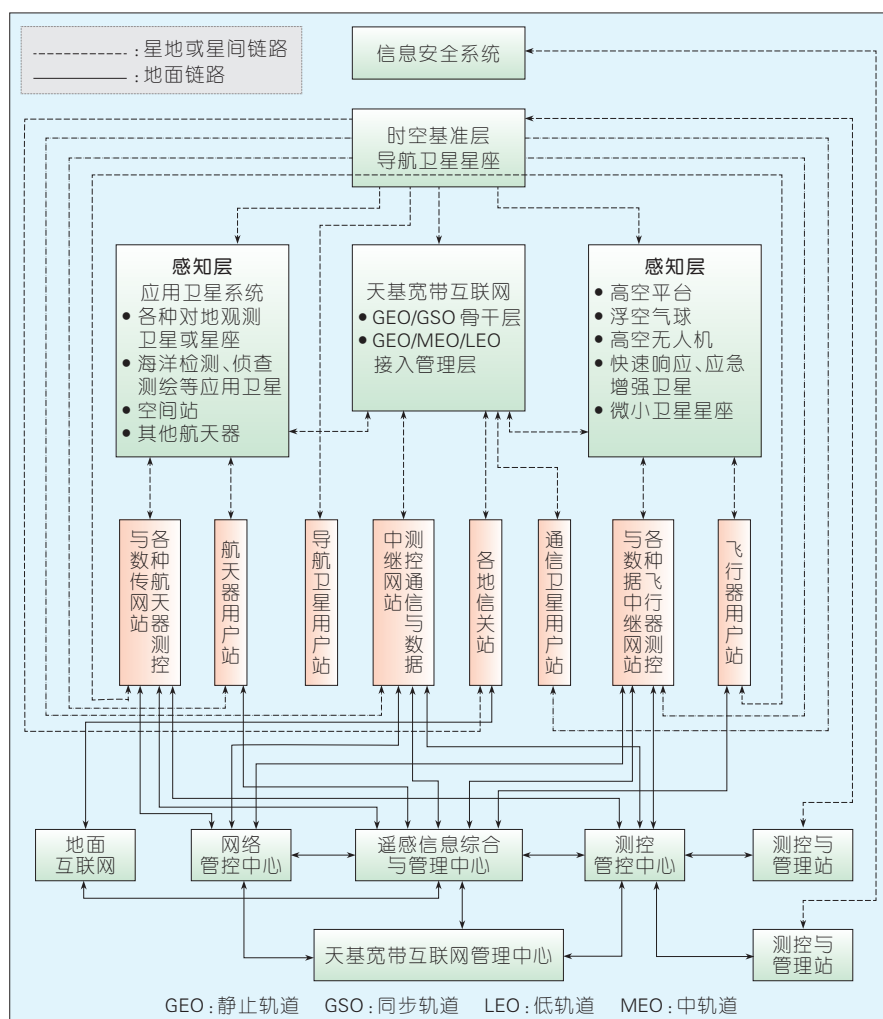
#### (1) 骨干层的功能

- 空间信息网的核心,需具备全球覆盖、结构稳定、宽带承载、接入便捷,以及支持多类型业务和异构网互联等能力。

- 骨干层中继卫星通过星间链路与星地链路、通过网关和地面互联网互联,形成天地一体的传输网。

#### (2) 接入、管理层的功能

- 接入层的功能为:GEO/GSO 及非 GEO 的 MEO/LEO 均可独立或联合地构成接入管理层星座,可将其看成是一个数传网。其任务是管理部分确定的网络拓扑结构,建立用于业务数据传输的网络物理链路,完成高实时业务数据端到端的快速运输,以及非实时业务数据的处理、产品生成,



▲ 图2 天基宽带互联网架构

并提供产品信息的共享服务、分布式运行。

- 管理的功能为:解决网络(拓扑)管理、网络物理链路建立和网络数据传输的问题。

骨干层与接入、管理层共同组成天基宽带互联网。

可见,天基感知层获取的信息有两条传输通道:对于满足广域覆盖与信息共享要求的信息,可以经过一条从感知层经过天基互联网到地面的通道;另一条是应用卫星感知到的,专用信息直接到地的通道(即保留了原应用卫星系统的功能)。

### 3.2 天、空、地一体化信息网络架构

一体化的天、空、地信息网络,基

本组成如下:

(1) 以天基宽带互联网为核心,应用卫星系统(天基感知系统)为源端,组成天基信息网络。为满足未来空间应用体系的相关要求,应用卫星系统应梳理成若干性质的“应用子网”,实现可以用网、全面用网、高效用网的目标。

(2) 应急增强、快速响应由微小卫星分布组网及高空平台实现,与应用卫星系统共同组成天基感知网。

(3) 从空间地理角度看,海上平台是地基部分,但从信息传输角度看,需借助天基互联网才能有效实现其功能。

(4) 卫星导航、定位系统提供天基、地基的时空基准及服务范围,涵

盖各类卫星、高空平台、地面站、机载、舰、手持终端等。

(5) 天基信息安全体系。由于天基信息是开放的、难于保密的,因此必须研究天基信息安全体系。

(6) 陆地(基)基础网络。陆地是卫星遥感的对象,同时也是天基信息网络的最终用户,必须构建具有多系统空间信息收发和数据融合能力的新型卫星控制中心(直接接收过顶卫星的数据)及信息管理中心,建设具有中继下行、上行数据接收和发送功能的关口站。

天、空、地一体化信息网络的基本网络架构如图3所示。总体的网络结构主要由天基和陆基两部分组成:在天基部分,以天基宽带互联网为核心,以应用卫星系统(天基感知系统)为其源端,组成天基信息网络;在陆基部分,以地面互联网为核心,以各类地面站、机载、舰、手持终端、地面移动用户为其源端,组成陆基信

息网络。

#### 4 天基信息传输的技术难点

天基信息传输系统是空间信息链的纽带,其独特的空间环境使其具有显著优势。同时,天基信息传输系统也不可避免地存在技术难点,这是由天基系统所处的空间环境所决定的,这些技术难点也会相应地带来传输性能的下降,主要表现为以下3个方面。

(1) 信息传输距离远,星上处理能力受限

该技术难点带来以下两个问题:

- 端到端传输时延大,传输损耗大(见表1),链路质量差。这是传统卫星通信研究中就一直关注的问题,但是随着网络节点数量的增长,解决这一传统问题的方案可能不再局限于点对点的方式,而可以通过多节点协同加以解决。

- 时延、误码(见表2)、中断等区

别于地面链路的问题对组网也带来了全新的挑战。

(2) 节点高度动态变化

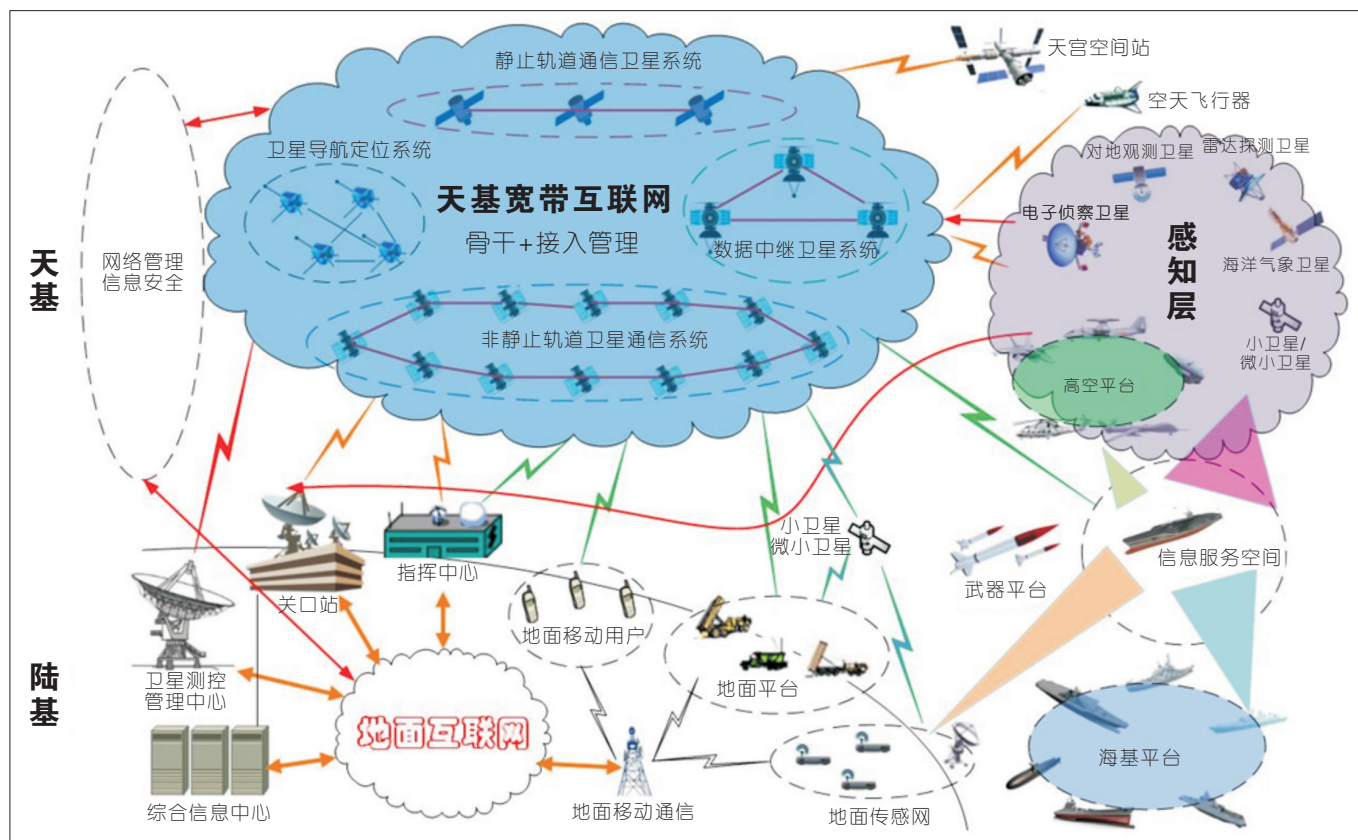
- 构成天基网络的各节点由卫星组成,并有一定的时间规律。如果考虑快响、应急加强的高空平台及微小卫星等节点,由于其运动特征通常不具备规律性,则会使天基互联网动态异构。

- 高度动态的特性在物理层则表现为高中断率和高误码率,卫星链路可以成功传输时的误码率达 $10^{-6}$ ,而地面互联网中误码率仅为 $10^{-8}$ 。

- 在链路层则要求节点能够动态接入、快速切换等。

- 由于节点的高度动态变化,整个网络的拓扑结构也会随之快速变化,形成动态网络拓扑,这将对网络层的路由形成极大的挑战。

- 在传输层,较高的误码率通常造成数据丢失,采用传统传输控制协议(TCP)将明显降低数据吞吐量。



▲ 图3 天基网络架构

### (3) 天基传输中的非对称性

在天基系统中,通常下行链路的速率远大于上行链路的速率(见表2)。因此,TCP/IP协议必须加以不断改进,才能引入到天地一体化信息网络中。

与陆地信息传输系统一样,天、空、地一体化信息网络要满足一定的传输规则,即必须确定其适用的传输协议。

(1) 一体化网络协议体系必须对于天基信息传输特殊性进行适配和支持,并能够与地面互联网协议无缝融合。

(2) 空间数据系统咨询委员会(CCSDS)网络层、传输层等协议在具体实现上与地面TCP/IP协议是不同的,如何实现互联互通,需要通过关口站实现协议转换。

(3) 需要开展各类适应天基网络特殊性的新协议体系(容迟容断网络(DTN)等<sup>[9]</sup>)及一体化网络协议互联互通机制的研究与试验工作。

星际链路、星地链路如何选择传输手段,是采用微波还是激光<sup>[9]</sup>?还是两者混合?它们又如何适应卫星对载荷的要求?以上这些是我们必须解决的关键技术问题,否则从技术上来讲就无法构成天基信息网络。

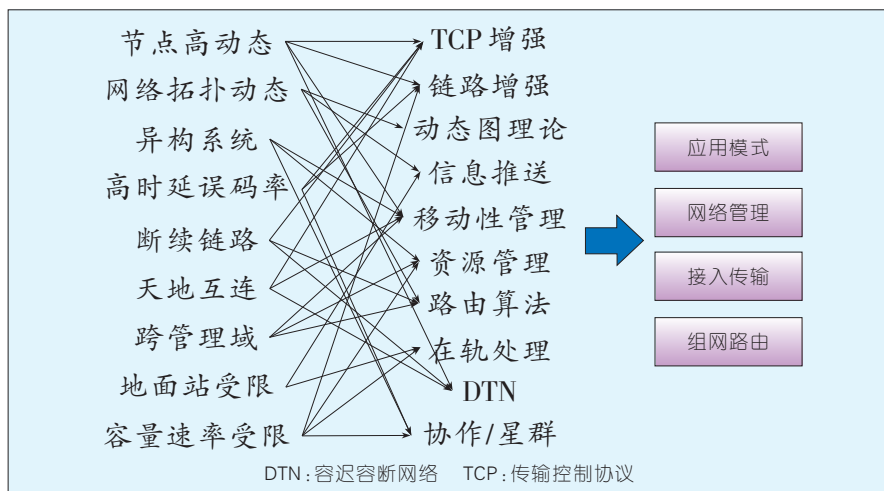
图4给出了天、空、地一体化信息网络的难点。

## 5 天地一体化信息网络仿真设想

天、空、地一体化信息网络具有规模庞大,结构复杂,网络高动态,异构,不规则,链接不稳定,分布式,自组织等特点,建设天、空、地一体化信息网络需克服大量技术难题,耗时较长,投资巨大。因此在实施建设前,需在半实物仿真平台的基础上通过实验测试网络架构、性能、技术难点、兼容性等。

### 5.1 仿真系统架构

仿真测试平台天基信息网(含天



▲图4 天、空、地一体化信息网络难点

基互联网、天基感知网及地基信息网),如图5所示<sup>[1]</sup>,在半实物仿真平台中部署虚拟任务中心、控制平台和各类虚拟空间节点,运行文中设定的天空地一体化协同通信任务,验证多卫星系统和多网络协同的概念。

### 5.2 仿真要素

仿真平台应实现的各类仿真要素,主要包括:

#### (1) 传输环境要素

- 传输环境,包括传输衰减、干扰、相应的误码率等;
- 物理层非理想特性,包括传播时延、方位角、掩星等。

#### (2) 网络设置要素

- 网络节点设置,包括节点数量、轨道、拓扑变化;
- 节点设备设置,包括指向、处理功率和存储空间大小、发射功率和设置的速率、其他空间节点约束。

#### (3) 管理设置要素

- 带宽、存储资源限制;
- 密钥分发管理、链路安全设置。

### 5.3 仿真实验平台

(1) 仿真平台总体方案如图5所示,分为3个层面:实验逻辑平面、控制平面和数据平面。

- 实验逻辑平面:设计需要开展相关实验的天地一体化信息网络功

能应用方面的特定场景(场景可变换);

- 控制平面:依据实验逻辑平面需求配置仿真平台软硬件各项参数,负责实验过程的监控和数据的记录;

- 数据平面:结合软硬件半实物设备(条件许可情况下可利用小卫星或空间站等)实现全系统网络仿真。

(2) 对天基特殊性的仿真,也分为3个层面。

- 软件模拟:利用计算机软件模拟天基网络物理层面、网络层面和管理层面的特性;

- 半实物仿真:由软件模拟产生相关数据,实物设备(收发机等)结合信道硬件模拟器实现物理层特性的仿真;

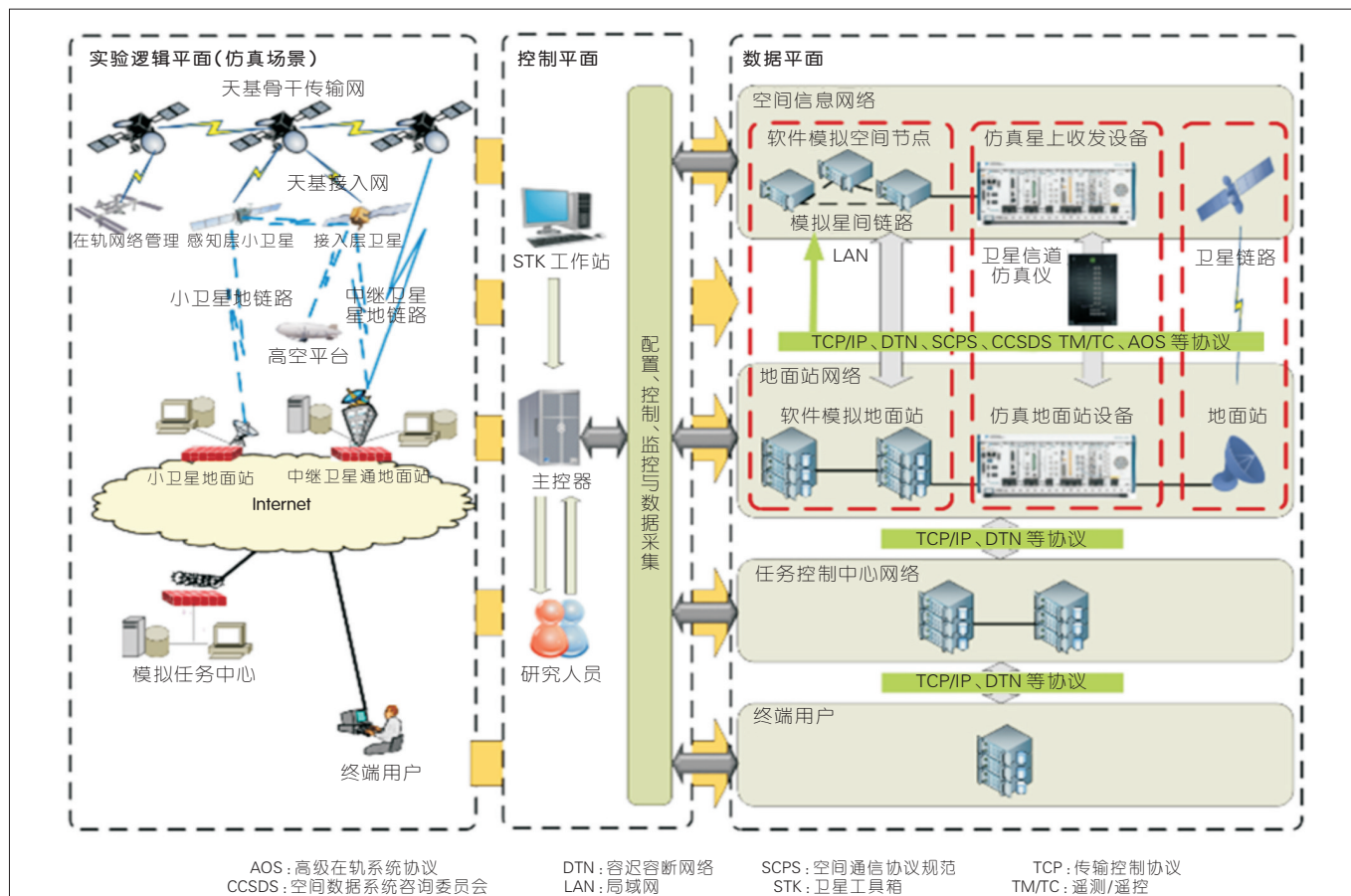
- 在轨系统载荷仿真:在仿真系统中结合小卫星、天链中继星或空间站等实现部分在轨系统载荷实验,其中天链中继星可提供真实中继链路特性,小卫星或空间站可实现真实通信载荷,对动态接入特性、网络协议等可以开展实际测试,通过空间站还可以研究在轨网络管理,实现天基网络自主运行。

#### (3) 拟开展的研究工作

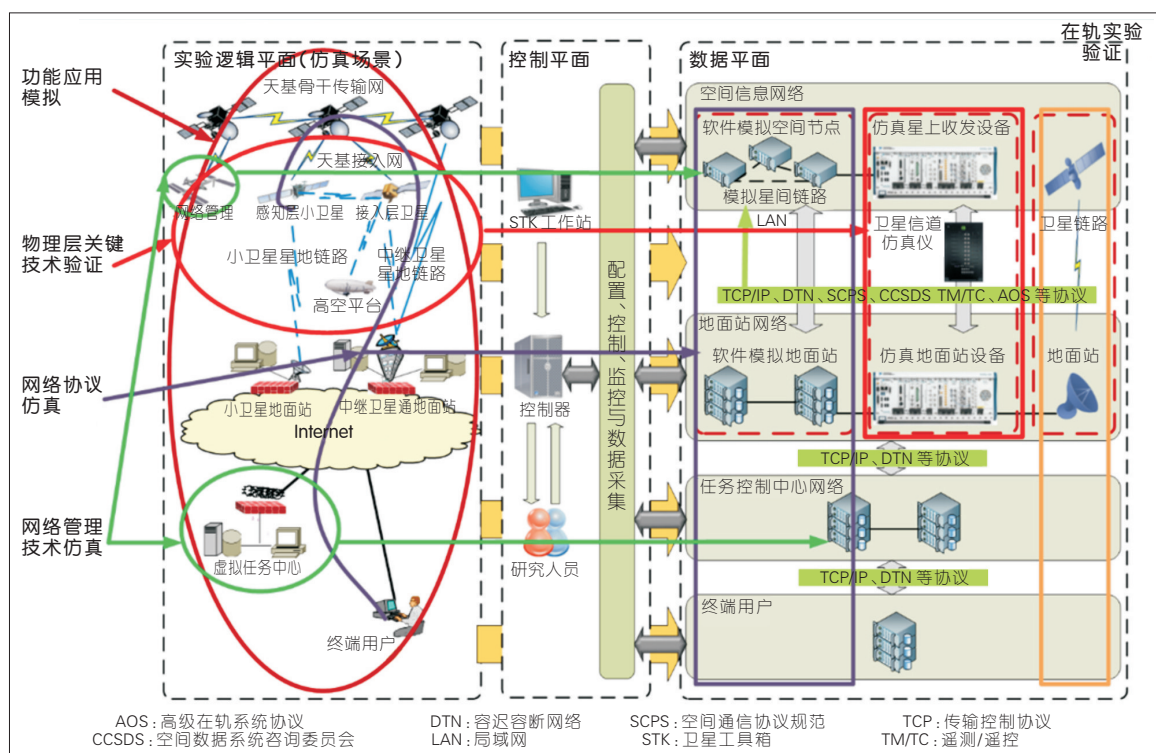
平台各部分可支持开展针对不同研究内容的仿真实验,实验方案如图6所示,主要包括五大方向。

- 功能应用模拟:主要集中在实





▲ 图5 仿真系统架构



▲ 图6 仿真平台试验方案

验逻辑平面,针对未来天地一体化信息网络能够支撑的网络业务与服务模型,提出各种基于通信基础架构的网络功能与应用场景,重点开展基于虚拟任务中心的任务控制执行技术的研究,在网络管理技术、网络协议技术、物理层关键技术等支撑下验证天地一体化信息网络的整体功能。

• 物理层关键技术验证:拟着重破解卫星、飞机、高空平台等网络动态接入,物理资源高效调度等物理层难题,同时为相关上层实验提供参数、要素的支撑,并将相关技术突破(实物或半实物)纳入仿真平台系统,开展集成演示验证。

• 网络协议仿真:针对天、空、地一体化信息网络,特别是天基网络的特殊性,研究能够适应天基网络环境并保证与地面互联互通的可靠高效的网络协议体系,综合研究基于IP over CCSDS协议、TCP/IP协议实现全IP协议体系以及基于DTN网络的覆盖层协议体系等若干方案,在物理层关键技术及网络环境仿真要素的支撑下开展各种仿真实验。

• 网络管理技术仿真:网络管理是未来天空地一体化信息网络高效运行的重要支撑技术,主要研究网络资源的高效配置管理与协调共享,同时研究利用具有资源、人员优势的空间站作为空间网络天基管理节点,探索空间网络的自主运行机制,在物理层和网络层协议相关技术支持下开展仿真实验。

• 小卫星/空间站在轨实验验证:充分利用未来小卫星发射/搭载天宫二号空间站载荷等模式实现前述研究成果的在轨演示验证,特别是将会综合各单位力量争取实现物理层动态接入技术、网络传输协议技术、网络安全与管理技术以及全功能演示等多个层面的在轨验证工作。

## 6 结束语

天基信息网络与地面信息网络(简称陆基信息网络)共同组成天、

空、地一体化网络。由于地基信息网络经过长期开发经营,目前已能够大规模建设、发展、应用,并且若干大规模信息中心已形成,而天基信息网络虽已有一定的卫星资源,但未形成网,无法实现对空间信息的技术要求。因此,当前天空地一体化信息网络的重点在天基部分。

(1)天基信息网络是由卫星通信系统、卫星导航定位系统、卫星感知系统组成(含对地遥感、海洋观测、测绘、快响/应急加强等卫星系列)。

(2)天基信息网络的建设目标为:建立一套区别于由任何单一任务驱动的、适应于特定要求的垂直基础设施,以网络化、一体化统缆全系统。

• 在不用全球建立专用地面站网络的条件下,实现不间断的天基广域数据获取、处理、传输功能,达到广域覆盖的需求。

• 网络化、一体化统缆全系统,将烟囱式分散或独立的各类感知系统以网络化综合起来,实现互联互通和必要资源共享,原定制系统功能仍保持。

(3)以建立天基互联网及网络化、一体化天基感知系统,实现该系统可以用网、全面用网、高效用网为重点。

### 参考文献

- [1] 张乃通, 赵康健, 刘功亮. 对建设我国天地一体化信息网络的思考[J]. 中国电子科学研究院学报, 2015, 10(3): 223-230
- [2] BURLEIGH S, VINTON C, CROWCROFT J, et al. Space for Internet and Internet for Space [J]. Ad Hoc Networks, 2014, 23(12):80-86
- [3] 沈荣骏. 我国天地一体化航天互联网构想[J]. 中国工程科学, 2006, 8(10): 19-30
- [4] 李德仁, 沈欣, 龚健雅, 等. 论我国空间信息网络的构建[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(6): 711-715
- [5] 闵士权. 我国天基综合信息网构想[J]. 航天器工程, 2013, 22(5): 1-14
- [6] SUN Z. Satellite Networking: Principles and Protocols [M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2005
- [7] Interagency Operations Advisory Group (IOAG) Space Internetworking Strategy Group (SISG). Recommendations on a Strategy for Space Internetworking [R/OL].

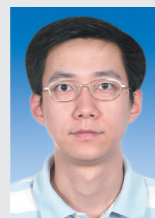
<http://cwe.ccsds.org/foag/Final%20Products/SISG%20Report%20v1.4%20FINAL.pdf>

- [8] CAINI C, CORNICE P, RIRRINCIELI R, et al. A DTN Approach to Satellite Communications [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(5): 820-827
- [9] SODNIK Z, FURCH B, LUTZ H. Optical Intersatellite communication [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2010, 16(5): 1051-1057

### 作者简介



顾学迈, 哈尔滨工业大学教授; 主要研究领域为无线通信、先进卫星通信技术及个人通信系统; 先后主持和参加基金项目20余项, 获得7项科研成果奖; 已发表论文100余篇。



赵康健, 南京大学电子科学与工程学院讲师; 目前主要从事卫星通信与空间信息网络协议技术研究; 主持和参与国家自然科学基金、江苏省自然科学基金等科研项目多项; 已发表论文20余篇。



贾敏, 哈尔滨工业大学副研究员、博士生导师; 主要研究领域为无线移动通信、卫星通信新技术、认知无线电技术、信号处理与检测及估计技术; 主持和参与国家自然科学基金项目(青年及重大计划)、国防基础预研项目、“973”子课题及省部级等科研项目多项, 获得2项科研成果奖; 已发表论文60余篇。



张乃通, 中国工程院院士, 哈尔滨工业大学教授, 通信技术专家; 主要研究领域为集群移动通信、空间通信; 先后主持研制成功MPT1327模拟集群移动通信系统并得到实用, 打破了其他国家垄断中国专用通信系统市场的局面, 获得14项科研成果奖; 已发表论文200余篇。

# 基于分布式星群的空间信息网络体系架构与关键技术

## System Architecture and Key Technology of Space Information Network Based on Distributed Satellite Clusters

王敬超 / WANG Jingchao  
于全 / YU Quan

(中国电子设备系统工程公司研究所,  
北京 100141)  
(Institute of China Electronic System  
Engineering Company, Beijing 100141,  
China)

**空**间信息网络是以空间平台(如地球同步轨道(GEO)、地球非同步轨道(NGEO)、低轨道卫星、高空平台(HAPS, 临近空间无人机或飞艇等))为载体,通过一体化组网互联,支持实时采集、传输和处理海量数据,实现体系化信息服务应用的网络基础设施。由于其独特的空间位置优势,与地面网络相比,空间信息网络在对地观测、应急通信、航天测控、航空运输和国家战略利益拓展等方面都有着不可替代的作用,已逐渐成为国家战略利益的高边疆<sup>[1]</sup>。

近年来,全球相关机构和组织已投入大量的人力和物力开展空间信息网络相关技术研究及实验验证,包括美国国家航空航天局(NASA)的空间传感网、欧洲的哥白尼计划、美国国家卫生基金会(NSF)的国家生态观测网络以及中国自然科学基金空

收稿时间: 2016-05-12

网络出版时间: 2016-06-24

基金项目: 国家自然科学基金(61231011)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2016) 04-0009-005

**摘要:** 提出分布式星群网络的概念,即利用共轨控制、组网协同技术,整合空间邻近且独立分布的卫星资源,在同步轨道上将多颗小卫星整合等效为一颗大卫星,实现服务能力的增强。并提出基于分布式星群的空间信息网络体系架构,通过多星共轨、星间高速互联、分布式自主协同、资源虚拟化等关键技术,可以实现空间系统服务能力增强,多星合成覆盖,在轨智能自愈,为构建未来稳定可靠的空间信息网络提供借鉴。

**关键词:** 分布式星群; 空间信息网络; 体系架构

**Abstract:** In this paper, the concept of distributed satellite cluster is proposed, which combines the “small” geostationary orbit (GEO) satellites into a “big” satellite to enhance the capability of service by utilizing in-orbit control and networking cooperation. And the system architecture of space information network based on distributed satellite clusters is proposed. Through the technologies of putting multiple satellites at the same orbit, high speed interconnect between satellites, distributed independent coordination and resource virtualization, the capacity of space system services is also enhanced, combined service through multi-satellites, on-orbit intelligent self-restoring can be achieved. An option of building a reliable space information network in the future is provided.

**Keywords:** distributed satellite clusters; space information network; system architecture

间信息网络重大研究计划和“十三五”规划中的天地一体化信息网络<sup>[1-4]</sup>等。从空间信息网络基础设施、全球建站受限等不同角度,对于中国空间信息网络已经基本形成“骨干网+接入网”的体系架构共识<sup>[1], [5-8]</sup>,其中骨干网由实现全球保障的高轨卫星组成,接入网则包含了各类低轨卫星及各类空基平台。

针对骨干节点频率轨位匮乏,卫星平台承载能力弱等问题,我们提出了分布式星群网络的概念,即利用共

轨控制、组网协同技术,整合空间邻近且独立分布的卫星资源,在同步轨道上将多颗小卫星整合等效为一颗大卫星,实现服务能力的增强。文章在深入分析分布式星群的应用需求、全球研究现状的基础上,给出基于分布式星群的空间信息网络体系架构,并对其中的关键技术进行梳理,为后续有关技术发展提供借鉴。

### 1 分布式星群网络应用需求

(1) 构建分布式星群是缓解空间



资源约束的重要手段

地球同步轨道以其独特的空间位置,可以在地面站和卫星之间建立稳定长期的链路,可对同一地区进行连续通信或观测,是通信、气象等卫星的首选轨道位置。自1963年第一颗地球同步轨道卫星发射以来,地球同步轨道卫星的数量不断增加。截至2015年12月,在国际电信联盟登记在案<sup>[9]</sup>的同步轨道卫星有490余颗,同步轨道卫星的轨位资源越来越紧张,中国所能使用的轨道位置与美、俄等国家相去甚远。此外,C、Ku等频率资源使用殆尽,在中国上空东经70~130°范围内,使用C频段的卫星就有60余颗,Ku频段70余颗。卫星通信频段向Ka、Q/V、W等高频段逐步扩展,卫星全球频率协调难度日益增加。

同时,随着平台技术和测控技术的进步,卫星测定轨和轨位保持精度逐步提升,多星共轨技术从20世纪90年代开始得到广泛应用。以精确共轨技术为基础的分布式星群网络为缓解中国匮乏的空间频率轨位资源提供了新思路。

(2)构建分布式星群是实现空间信息骨干节点的重要基础

目前,中国同步轨道卫星以东方红四号平台为主,其有效载荷承载能力在700 kg左右,提供约8 000 W的功率,而在民用空间基础设施规划中,未来10~20年将发射大量的对地观测等各类卫星。随着信息获取技术的提升,这些卫星所要求的传输带宽也越来越大,单颗东四平台同步轨道卫星已经难以满足空间信息网络骨干节点的吞吐量、处理能力等需求,必须采用有效手段解决骨干节点能力需求与卫星平台承载能力之间的矛盾。分布式星群通过采用多颗卫星等效为一颗大卫星提升服务能力为解决该问题提供了有效的技术途径。

另一方面,空间信息网络骨干节点承载了大量业务的汇聚、处理、交

换任务,其可靠性直接影响整个空间信息网络服务的可用性。采用分布式星群网络构建其核心节点,在单个卫星出现故障时通过重组调度不会影响骨干节点的全部功能,从而可以实现系统在空间复杂环境下的高可靠性。

(3)构建分布式星群是提升空间资源效益的有效途径

随着航天技术的发展,中国卫星种类和功能日臻完善,在通信、导航、广播、气象、地理信息、国防等领域得到了广泛的使用,发挥了巨大作用。与此同时,卫星系统之间自成体系、条块分割的局面也日渐形成,不同用户部门分别建设独立的卫星地面站,卫星系统之间的信息无法及时共享和综合利用,严重制约了空间信息的时效性及空间系统综合效益的提升,空间信息一体融合与在轨高效处理成为未来的发展趋势。

构建基于多星协同的分布式星群网络,实现各类卫星系统之间资源和信息的统一管理、互联互通和综合利用,为天基信息的获取、处理、存储、传输与分发提供统一的基础平台,可极大提高空间信息系统的建设效益,降低建设成本。

## 2 相关空间系统研究现状

日新月异的电子和信息技术对传统大型航天器提出了更多挑战,长研制周期和长寿命要求使得大型航

天器研制成本高昂、技术固化,处理能力和快速响应能力远落后于地面系统。为降低大型航天器研制和部署风险,美、欧等国家或地区的组织陆续开展了分布式空间信息系统的研究,最为典型的有美国F6计划和天基群组(星簇)等计划。

### 2.1 F6计划

F6全称为通过信息交换连接的“未来、快速、灵活、分离模块、自由飞行航天器”,是2007年美国国防高级研究计划局(DARPA)启动的演示验证项目<sup>[10-11]</sup>。

如图1所示,F6计划的项目构想是围绕任务需求,把一个航天器的任务载荷、能源、通信、导航、计算处理等功能单元优化分解为多个模块,每个分离模块从本质上说仍然是一颗卫星,携带与航天任务相关的不同功能或资源,采用物理分离、星群自由飞行、无线信息交换和无线能量交换方式,功能协同,资源共享,构成一颗虚拟大卫星来完成特定的任务。F6中提出的构想与分布式星群的区别在于分布式星群中的组成卫星是独立全功能的,可以协作实现某一功能也可独立担负某项任务。

### 2.2 天基群组计划

美国2007年公布的天基群组计划重点用于提升同步轨道卫星的及时响应能力。天基群组中的每个卫



图1▶  
F6项目理念示意

星具有自己特定的任务,各卫星的功能不同,大型单个卫星的功能在多个卫星中进行分解,在天基群组内部具有专门提供服务的卫星以及完成某种特定任务的卫星。图2所示为部署在地球同步轨道上的天基群组,主要包括路由卫星、服务卫星和任务卫星3部分。其中路由卫星为群组提供天地链路等核心服务,在轨服务卫星为任务卫星和系统重构提供支持保障,路由卫星和服务卫星共同组成天基群组的基础设施,保障任务卫星执行指定任务。

与F6计划面向低轨的无中心分离式结构有所区别,天基群组重点面向同步轨道,且群组以路由卫星为核心,实现空间资源的整合。天基群组的体系结构设计具有以下特点:每颗卫星仅完成一项任务;部署多个路由卫星形成全球网络;轨道机动,星簇重构,从而可以降低单颗卫星系统的复杂程度、发射和研制成本;新技术能够快速在系统中应用;对故障具有较高的冗余度,能够根据任务快速响应,重构系统功能。

### 2.3 其他相关空间计划

在单个卫星系统中,美军转型卫星通信系统(TSAT)以其先进的技术理念、高昂的研制成本备受关注<sup>[12]</sup>。

TSAT计划最大特点是扩展天基交换和传输带宽,希望达到与地面光缆相当的传输能力;借鉴地面IP技术,由直接支持海、陆、空用户向支持天基用户扩展,使得天基传输与分发网络扩展为空间信息系统;利用5颗独立组网、全球覆盖的卫星,TSAT可提供强大的、抗干扰的全球保密通信,作为太空路由器独立运行,对实现空间信息网络起着关键作用。TSAT使用无线激光星间链路在太空建立起高速骨干通信网,星间传输速率达到20 Gbit/s,星地传输速率达到10 Gbit/s,并且支持卫星之间全连通的无线激光拓扑。

2007年3月,波音公司及其合作伙伴首次成功演示了TSAT无线激光通信系统的性能,分别以2.5、10和40 Gbit/s的数据速率完成了通信和捕获、跟踪和瞄准(ATP)性能试验。由于经费等原因,TSAT计划已被暂时搁置,但是其全球化组网、构建空间信息网络的理念并没有消失。

## 3 基于分布式星群的空间信息网络体系架构构想

### 3.1 定义组成

基于分布式星群的空间信息网络采用多星共轨组合、超高速空间组

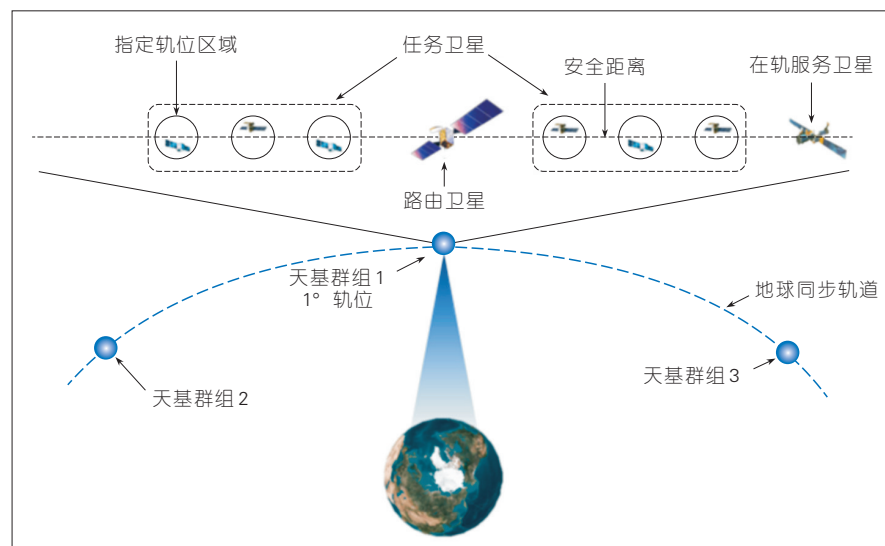
网、分布式协同处理等机制,构建具有多种功能和用途的一体化综合信息网络,可实现空间网络一体化的信息传输、管理与共享,具备自适应、自组织、柔性可重构及抗毁能力。星群节点由各类不同功能的卫星组成,可作为天基骨干网节点与其它平台进行数据交互,实现信息的中继与高速回传。在部分卫星故障时,通过在轨快速自愈和与新入轨卫星快速重构的办法,使得信息处理和网络功能得以快速恢复。以下简称为分布式星群网络。

空间段包括各种类型的航天器,主要有多星共轨的分布式星群,具备星间和星地链路的骨干通信卫星,嫦娥、萤火等深空探测飞行器,对地观测飞行器,以及空间站等。临近空间段包括各类具备卫星链路的飞行器,主要有编队飞行的无人机群、平流层飞艇等升空平台、干线民航客机、大型运输机等。地面段包括各类终端、接入站点和各类与航天活动相关的地面设施,主要有车载、机载、船载、手持等卫星通信或数据采集分发终端,各类卫星固定接收站,卫星测控系统、运控系统,以及其他与航天活动相关的网络或设施。基于分布式星群的空间信息网络组成示意如图3所示。

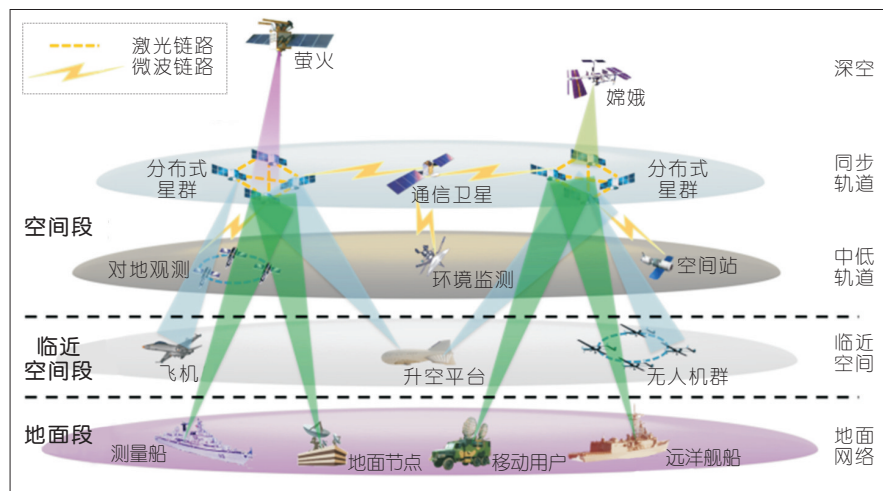
### 3.2 体系结构

随着地面以数据为核心的新型业务以及分组交换网络的迅猛发展,分层化、可扩展的网络框架得到了广泛应用和成功验证。结合卫星应用特点并借鉴地面网络经验,基于分布式星群的空间信息网络可分为骨干网、接入网与运维网3部分。

分布式星群网络骨干网节点定位于同步轨道,由星群内部路由、交换、信息处理、信息存储、边缘等节点以及独立的单个交换、路由、边缘节点型航天器组成。边缘节点可为接入网中节点或终端提供骨干网接入服务。星群内部骨干节点卫星通过



▲ 图2 天基群组计划配置示意



▲ 图3 基于分布式星群的空间信息网络组成示意

激光链路互联互通,星群间骨干节点可直接通过激光或微波星间链路通信,实现网状互联,有效载荷采用分布式、可重构设计思想,采用多颗卫星协同工作,共同完成骨干节点卫星的功能,星群内部各个节点功能可以按需重构,全面提升空间信息网的系统能力。

分布式星群网络接入网由接入用户终端和接入信息系统节点组成,接入用户终端指深空探测航天器、对地观测航天器等各类天基平台,大型运输和无人机群等空基平台以及地面宽带用户等接入骨干网的终端;接入信息系统节点指承担相应信息系统接入骨干网的节点,如承担骨干网与地面互联网连接的地面关口站、骨干网与航空个人通信网互联的大型民航客机等。

运维网指包含运控管理系统和地面测控系统等,承担分布式星群网络天基节点正常运行,网络资源管理调度等功能。整个分布式星群网络支持分级式的运控管理,可以由运控管理中心统一管控,也可以由各运控管理子站分别负责个别卫星资源的管控。

分布式星群网络的骨干网、接入网以及运维网通过各种有线和无线链路构成一个有机的整体,为空间信息的融合、共享等方面提供传输网络

基础。

### 3.3 协议体系

分布式星群网络结构复杂,需要适应深空、临近空间、近地、海面、陆地等多种接入环境,其拓扑、规模、容量、通联关系等均动态可变。稳定高效、扩展性强的网络协议体系是确保分布式星群网络服务质量的关键。

针对接入环境的特点,分布式星群网络物理层和数据链路层协议可基本上划分为星间和星地两大类。可具体根据接入信道,细分为无线类和激光类协议。

目前,航天系统高层协议中常用

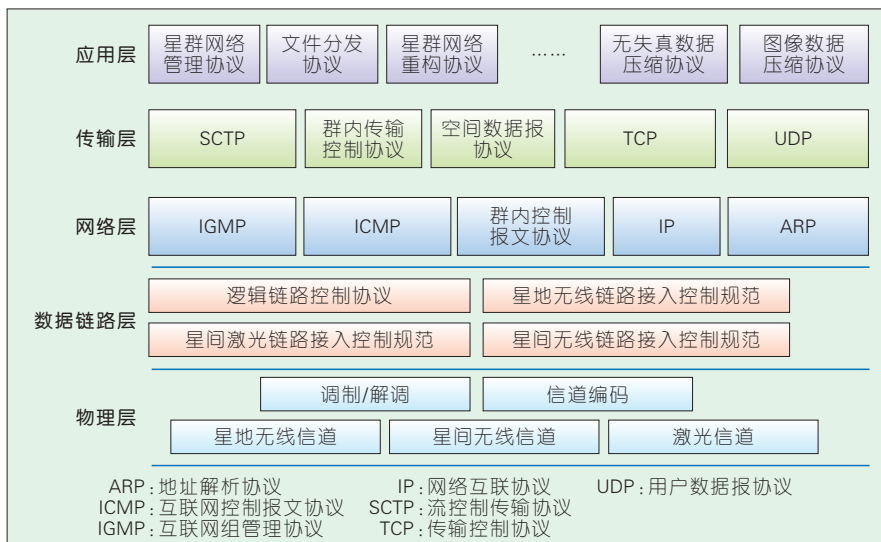
的有基于空间数据系统咨询委员会(CCSDS)和基于IP两类空间通信协议体系。CCSDS类协议专为空间通信设计,充分考虑了空间资源约束和空间环境特性,应用较为成熟,协议效率较高,协议体系较为完善。然而CCSDS类协议开发、测试与维护成本相对IP类协议较高,且无法直接与地面基于IP协议的网络进行互操作,对动态路由支持能力较弱。IP over CCSDS可在CCSDS协议框架下提供IP数据报文传递服务,然而无法克服CCSDS协议自身不足。基于IP类的协议组网灵活性高,与地面现有系统的兼容性好,可以扩展性强,但与CCSDS类协议相比,对星上处理能力要求较高,我们协议效率相对较低。

充分考虑开发成本、协议效率、互操作性及未来网络发展趋势,构建以IP为基础、兼容面向链路应用的分布式星群网络协议模型在满足组网灵活性的基础上可以提供更高的扩展能力,我们建议的协议模型如图4所示。

## 4 关键技术

### 4.1 体系结构设计及优化

分布式星群网络是涉及多轨道、多功能、多种应用方向、多类服务对



▲ 图4 分布式星群网络协议模型



象和异构网络互联的复杂系统,存在激光、毫米波、微波等多种传输链路以及全光电路、射频(RF)电路、IP分组等多种交换体制,其拓扑、规模、容量、通联关系等均动态可变,需要适应深空、临近空间、近地、海面、陆地等多种接入环境。如何实现网络结构自组织,网络状态自调节,网络传输自适应,提升星群网络服务能力,需要结合技术发展现状,开展体系结构专题研究和攻关。

## 4.2 网络协议设计与优化

分布式星群网络由提供不同业务功能的应用服务节点和网络节点构成,星群网络传输链路速率高,时延变化范围大,通断频繁及通联关系动态可变,星群用户接入集中,突发业务量大,需要在综合空间实现、成本与风险等约束条件下,开展与分布式星群网络构型相适应的高速传输、可靠路由、接入控制等协议研究,提升星群网络资源利用率及业务支持能力;充分考虑地面网络发展趋势以及在地面通信网络互联互通性,开展面向不同业务的空网网络协议设计,通过仿真和样机验证等手段,设计出适合中国空间信息网络发展的网络协议体系,满足各类用户体验需求。

## 4.3 可信网络管理技术

分布式星群面临多尺度、多资源、异构性的复杂服务需求,如何获取有效而充分的星群资源,需要解决网络管理体系架构设计,网络资源优化利用和服务资源协调管理的问题,实现网络效能最大化和应用满意度最大化。针对分布式星群网络管理体系架构和服务资源优化问题,可基于面向服务的框架体系(SOA),采用基于企业服务总线(ESB)的服务资源发现、挖掘、注册和管理方法,通过信息传输、格式转换、服务资源接口标准化、资源协同调度等技术方法,实现异构服务的重复高效运用,并采

用复杂事件处理技术(CEP),采用模式匹配、事件序列分解、复杂语义检测、关键序列标定等方法,实现实时事件流分析和资源匹配优化。针对星群网络多维资源优化问题,可面向分布式资源管理,采用凸优化、鲁棒性优化和多目标优化理论,从多尺度下优化网络资源,包括带宽、功率、波束、路由和转发器等资源,最大化网络容量,提高网络的服务效能。

## 4.4 高速激光组网技术

针对分布式星群内高速激光传输的特点,需要探索全光交换机制在分布式星群高速激光组网中的应用,构建基于波长路由的分布式全光突发交换机制,并研究分布式路由算法,开展弱光信号条件下全光3R再生和格式透明、偏振不敏感、多链路同步切换全光波长变换相关理论问题的研究,开展数学仿真和原理性验证实验,攻关分布式动态可重构光交换的物理实现关键技术。另外,还需开展传统光学天线理论、微波多波束天线和智能天线理论的交叉学科研究,从理论上研究并解决激光光波单向性与分布式星群网络准全向传输要求间矛盾的问题,运用多种光通信新技术进行综合创新,推动单链路、点对点卫星激光信息传输技术,向动态多链路集群通信体制发展。

## 4.5 宽带高速接入技术

针对星群网络具有时空跨度、高动态拓扑和开发空间复杂干扰的特征,其高速接入和宽带传输面临链路传输速率与时变信道,动态资源与突发业务需求,网络编码容量与时变拓扑结构之间的动态适配等巨大技术挑战。通过研究空间高动态宽带接入传输中的时变信道大范围速率自适应传输,时变资源接入系统的时滞反馈控制,时变传输矩阵的自适应网络纠错编码等问题,提高空间信息传输的效率和可靠性,空间数据和信息从源到用户的网络通信传输服务的

能力。

## 4.6 资源虚拟化及虚拟总线技术

为了将多颗小卫星等效为一颗大卫星,实现资源的灵活调度以及任务的高度匹配,满足分布式星群快速重构应用需求,可围绕空间信息网络节点类型多样,能力差异大,技术体制不一,在轨硬件升级难度大等问题,通过开展各类空间信息网络节点资源(如天线、功率、频率、计算、存储等)虚拟化研究,在网络层与应用层之间增加虚拟管理层,构建屏蔽底层硬件差异全网统一的资源控制管理模型,做到根据不同任务构建虚拟网络,实现资源共享和协同,提高物理网络资源的利用率,实现业务应用灵活、功能可重构,提升网络的服务能力,实现网络可编程,相互隔离,增强网络扩展性和安全性。通过资源虚拟化技术,可将分布式星群骨干节点与任务星群的概念统一。

## 4.7 仿真验证及评估技术

分布式星群网络组成单元及相互通联关系动态复杂,涉及的关键技术和对象众多,需要依托OPNET、NS2及STK平台,构建完善的仿真系统,建立不同卫星通信体制模型、不同网系的网络模型库,开展链路层、网络层、系统层等不同层面的仿真,对关键算法和系统的整体性能指标、互联互通能力、资源利用率、运行状态等进行能力和运行情况仿真,对网络的互通率、组网形式、网络管理方式等进行验证,为不同任务类型的通信体制的选取、性能指标的设计提供支撑。并针对不同任务类型,合理选取效能评估方法和评价指标,构建面向多任务的系统总体效能评价体系,与网络体系结构设计形成反馈迭代优化。

## 4.8 其他关键技术

分布式星群网络是一个开放的

➡下转第18页

# 天基宽带互联网发展现状与展望

## Status and Development Trend of Space Broadband Internet

梁宗闯/LIANG Zongchuang  
陶滢/TAO Ying  
高梓贺/GAO Zhihe

(中国空间技术研究院, 北京 100094)  
(China Academy of Space Technology,  
Beijing 100094, China)

随着信息通信技术和产品的逐渐成熟,人们“无处不在”的通信理想正在变成现实。以多媒体通信为代表的网络新技术和新业务的出现及爆炸式增长,对互联网接入传输能力提出了更高的要求,宽带互联网已成为人类文明进步和社会发展的最有力平台<sup>[1]</sup>。在此背景下,中国有必要建设天基宽带互联网,与地面宽带网络、第5代移动通信(5G)系统等互联融合,从而形成空天地一体化信息网络,进一步满足用户对全球无缝覆盖的宽带服务和移动保障的相关需求。

建立天基信息网络的概念由来已久,美国早在19世纪90年代就提出了天基综合信息网的基本概念。不过,由于美国具有全球布站能力并拥有强大的地面网络和天基资源,因此该概念并没有在现实中广泛应用,这从美国转型卫星计划(TSAT)下马可见一斑<sup>[2]</sup>。欧洲也提出了构建“面向全球通信的综合空间基础设施(ISICOM)”的设想,不过也没有进一

收稿时间: 2016-05-15

网络出版时间: 2016-06-29

基金项目: 国家自然科学基金  
(61271281); 国家自然科学基金  
(91438205)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2016) 04-0014-005

**摘要:** 从天基宽带互联网的概念出发,在详细研究了全球天基宽带互联网发展现状与研究进展的基础上,提出中国天基宽带互联网应依据国家现实需求,遵循近期、中远期渐进的路线演进。同时认为在天基宽带互联网发展过程中,必须解决网络体系架构、卫星星座、空间与星地一体化组网、传输、网络管理与安全等关键技术问题。

**关键词:** 天基宽带互联网; 现状; 发展趋势

**Abstract:** In this paper, we firstly describe the concept of space broadband internet. Then after studying the status and development trend of space broadband internet both in abroad and domestic, we propose that the space broadband internet of our country should be developed according to the road map of the near future to medium/long-term in order to meet the country's actual demands. Finally, we consider that key technologies such as network architecture, satellite constellation, integrated networking of space and terrestrial, transmission, network management and safety should be solved during the construction of space broadband internet.

**Keywords:** space broadband internet; status; development trend

步设计实施<sup>[3]</sup>。

而对中国而言,由于不具备全球建站的能力,因此只能在空间卫星节点间具备宽带互联能力的基础上,构建空间信息传输高速公路,通过天基网络来实现空间信息系统的网络化,促进空间信息系统的能力升级,实现体系化、融合化发展。因此,在19世纪90年代,中国也提出了研究和建设中国天基综合信息网的设想,并在此后进行了一系列相关的专项研究,并且取得了一些显著成果,为建立中国天基综合信息网提供了一定的理论基础<sup>[4]</sup>。

与天基综合信息网类似,天基宽带互联网将不同轨道、多种类型卫星以及地面应用终端等进行宽带的互联互通,有机构成系统优化、功能完备的互联网络,并与新一代互联网、

地面移动通信网等互联互通,为陆、海、空、天各类用户提供广域覆盖、高速传输、异构互联、综合应用以及移动和固定接入等信息服务。不过,从网络构建的角度,通信中继类卫星将是天基宽带互联网的核心与基础,其他各类卫星(如导航、遥感等)可独立组网,并作为数据与业务提供方按需接入天基宽带互联网,因此从某种意义上讲,天基宽带互联网是一个创新的概念。

文章中,我们首先分析国际上与天基宽带互联网建设直接相关的卫星通信网络的发展现状,然后详细介绍中国当前卫星通信中继系统发展现状以及与天基宽带互联网相关项目的规划与研究进展。在此基础上,提出天基宽带互联网的发展路线与发展构想以及网络建设中有待发展

的核心技术问题。

## 1 全球天基宽带互联网发展现状

根据业务划分,与天基宽带互联网直接相关的卫星通信系统总体上包括卫星固定通信系统、卫星移动通信系统和数据中继系统三大类。

卫星固定通信系统包括宽带系统、固定/直播卫星系统等,一般采用C、Ku、Ka等频段,提供宽带通信、固定通信、电视直播等服务。当前,卫星宽带通信的需求最为旺盛,在轨、在研数量快速增长。美国卫讯公司计划于2016年搭载SpaceX公司重型猎鹰火箭发射的下一代大容量宽带卫星ViaSat-2,整星的容量大概为350 Gbit/s,可为250万用户提供最高可达25 Mbit/s的宽带服务。同时,Viasat-3的“三星”计划也已经公布,单星容量将达1 Tbit/s。此外,中轨卫星宽带通信星座发展平稳,作为世界第一个中圆轨道通信星座,目前由12星构成的O3b系统到2018年星座卫星数量将达到20颗,其单星容量也达到12 Gbit/s<sup>[5]</sup>。

卫星移动通信系统包括移动通信系统和移动多媒体广播系统,一般采用L、S等频段,提供移动通信、移动多媒体广播和移动数据采集等服务。目前,高轨移动通信宽带化发展趋势明显:2015年8月发射的Inmarsat-5 F3卫星可面向陆地、海洋和航空的小口径的一些终端提供下行50 Mbit/s的传输速率;未来,Inmarsat公司基于Ka波段的第5代宽带移动通信卫星系统,将实现移动通信向大容量、高带宽方向发展;低轨通信卫星星座更是百花齐放:一网公司的Onweb系统计划发展由648颗卫星组成的低轨卫星星座,工作频段为Ku频段,单星吞吐量大于8 Gbit/s,系统总吞吐量5~10 Tbit/s,系统建成后,可向偏远地区用户提供50 Mbit/s的互联网宽带接入服务,时延仅为20~30 ms;下一代铱星系统也在快

速推进<sup>[6~8]</sup>。

数据中继系统卫星主要为航天器等空间用户、飞机等特殊空基用户提供测控、大容量数据中继传输等服务。目前,各国的数据中继通信系统开始更新换代。美国跟踪与数据中继卫星(TDRS)数据中继系统已经发展至第3代,通过Ka频段提供更高的数据传输速率和更好的系统灵活性。欧洲也在发展独立的数据中继卫星系统,采用激光通信新技术提供更高的传输能力<sup>[9]</sup>。

根据上述分析,虽然更多是采用星地网络构建的方式,全球的卫星通信系统总体上都在朝着宽带互联的方向发展。而具有星间链路的下一代铱星系统、可为遥感类卫星提供数据传输服务的数据中继系统以及Cisco公司路由器搭载等系统与试验则对中国天基宽带互联网建设提供了有益的借鉴<sup>[10~12]</sup>。

### 1.1 下一代铱星系统

下一代铱星系统由泰雷兹-阿莱尼亚航天公司研制,计划采购72颗卫星和9颗备份星,预计首飞时间为2016年。系统将采用星上IP交换技术,构建更高传输速率和灵活分配带宽的宽带网络,L频段下行速率可达1.5 Mbit/s,而Ka频段下行速率可达8 Mbit/s,同时星座卫星将搭载COM DEV和Harris公司的自动识别系统(AIS)有效载荷,以及一系列来自美国国家科学基金会(NSF)的科学有效载荷(GEOScan)。

### 1.2 数据中继系统

美国TDRS-K、L两颗星分别于2013年和2014年发射,另外两颗TDRS-M、N星计划于2017年开始部署,新一代卫星增强了卫星通信能力和灵活性,并允许更高的数据速率,可同时提供S频段、C频段、Ku频段和Ka频段服务能力,最高数据传输速率为300 Mbit/s。此外,美航宇局还利用“月球大气与尘埃环境探测

器”探月卫星开展的激光通信试验,为包括激光通信在内的下一代数据中继系统开发提供技术储备。

2016年,欧洲数据中继卫星系统(EDRSS)计划的首颗激光通信卫星EDRS-A由俄罗斯“质子”火箭发射升空,采用激光通信技术,通过两颗地球静止轨道(GEO)卫星为近地轨道航天器与地面控制中心进行实时数据中继,通信速率达1.8 Gbit/s,第二颗卫星EDRS-C计划于2017年中期发射。

### 1.3 NASA的IRIS计划

美国于2009年发射卫星的Intelsat-14上搭载了Cisco公司的18400路由器,用于开展太空互联网路由器(IRIS)计划,测试空间IP路由技术,验证Web、网络电话(VoIP)和其他基于IP应用的用户是否可直接通过空间路由器进行通信。该路由器连接了星上一个C波段和两个Ku波段波束,组成IP空间路由系统,真正实现了星上的“全IP”化。

Cisco 18400空间路由器包括了路由处理器(RPE)和调制解调器接口(MIC)两个部分,其中,MIC采用软件无线电(SDR)结构,支持多个射频(RF)接口,使得地面终端可以配置更小的天线;RPE支持完全的Cisco IOS软件服务,采用与地面因特网相同的IPv4/v6互联协议及开放式最短路径优先(OSPF)(改进)/边界网关协议(BGP)路由协议,实现与地面Internet路由器完全对等的功能,并可以通过更新星上软件来增加网络的灵活性,支持VoIP、IP安全(IPsec)等业务。此外,2011年5月,美国空军的GEO-1卫星也搭载了IRIS路由器。

## 2 中国天基宽带互联网研究进展

在卫星通信方面,目前中国在轨10颗通信卫星频率多集中于C、Ku频段,覆盖集中于中国国土及亚太地区,主要满足民商用通信、广播电视、



数据传输等业务需求。研制的中星16、中星18将搭载Ka频段通信载荷,满足“一带一路”沿线国家和地区覆盖;S频段移动通信卫星将满足更广泛的需求。在数据中继卫星方面,中国已经建成一代数据中继卫星系统,实现了对地球表面覆盖率为78%,对300 km以上高度的空间飞行器覆盖率100%;第二代数据中继卫星会有更上乘的表现。

为了推动中国天基宽带互联网的发展,中国《民用空间基础设施中长期发展规划》明确提出:2020年通信卫星将在轨20余颗,2025年通信卫星将实现有轨25颗左右,满足全球覆盖需求。而在2016年国务院提出推进的《中国制造2025》中,在航天装备方面也明确提出了“发展新型卫星等空间平台与有效载荷、空天地宽带互联网系统,形成长期持续稳定的卫星遥感、通信、导航等空间信息服务能力”<sup>[13-14]</sup>。

在上述大背景下,国家自然科学基金委、科技部、中国工程院等也均开展了与天基宽带互联网相关的研究工作。

### 2.1 国家自然科学基金委

面向中国服务远洋航行、应急救援、导航定位、航空运输、航天测控等重大应用,基金委于2012年启动《空间信息网络基础理论与关键技术》重大研究计划,开展空间信息网络基础理论与关键技术研究,通过新理论、新方法探索,从根本上解决现有信息网络全域覆盖能力有限、网络扩展和协同应用能力弱的问题,向下支持对地观测的高动态、宽带实时传输,向上支持深空探测的超远程、大时延可靠传输。

### 2.2 天地一体化信息网络工程

国家“十三五”规划中启动“天地一体化信息网络工程”科技创新重大工程,整合各方建议,涵盖了天基系统、5G、芯片等电子与信息类内容,

并以空间装备为主体,弥补重要不足和短板。航天科技集团公司提出了天基骨干网加天基接入网的空间段总体发展构想,其中天基骨干网作为国家空间基础设施,构建空间信息高速公路;天基接入网中高轨移动通信聚焦中国国民经济国家安全重点区域,通过多用途融合范例实现移动接入;低轨移动通过采用商业运营,满足符合国家利益的全球覆盖,并通过柔性构架支持商业利益拓展。

### 2.3 空间信息技术领域发展战略研究

2016年,中国工程院启动了空间信息技术发展总体战略研究,着眼于构建中国新一代空间信息网络,以网络化、一体化为指导,以天基互联网为核心,以各类资源共享应用为目的,在不用在全球建专用地面站网条件的支持下,实现不间断的广域天基信息获取、处理、融合和传输。通过谋划、明确空间信息技术发展路线图,分析关键技术及重大应用,为推动战略新兴技术的系统创新和重大实践,促进中国工程科技更好地服务于经济社会发展,加快转变经济增长方式、服务国家宏观决策、推动创新型国家建设做出贡献。

## 3 天基宽带互联网发展展望

### 3.1 天基宽带互联网演进路线

随着技术推动和需求牵引的双重作用,作为未来天基系统信息流转的核心,天基宽带互联网将得到迅猛发展。而为了支持多系统融合,面向用户提供综合性服务,天基宽带互联网将在多个独立建设的天基系统基础上逐渐发展起来,并将经历从分立系统到体系综合的复杂过程,因此必须依据中国实际情况按步骤循序渐进发展。

预计天基信息网络发展路线将按照近期、中远期渐进的路线演进:

(1)近期(2025年)。立足现状,面向网络化发展趋势,针对国家发展

战略中明确的建设需求,通过构建必要的星间链路,推进卫星通信、中继系统的网络化建设,补齐短板,建设初级天基宽带互联网;

(2)中远期(2025年- )。随着天基通信、获取、导航等功能系统逐步完善,利用星间与星地网络,实现天基信息网络的空间贯通。在大多数卫星具备星上智能化处理和自主化能力的基础上,建设与地面网络完全融合的天基宽带互联网,提供全球化、标准化、智能灵活和安全可靠的服务。实现全球覆盖、随遇服务、机动灵活、差异化、安全可靠、管理协调,并实现网络化、综合化、一体化。

### 3.2 天基宽带互联网发展构想

与地面网络类似,目前业界普遍认为天基宽带互联网将由天基骨干网络和天基接入网络共同构成。其中,前者作为天基宽带互联网的骨干,主要负责包括宽带数据通信、遥感信息传输等在内的高速宽带的信息交换和转发,具备数据分发和一定数据处理能力,具有宽带高速、自主运行、全球覆盖、高可靠性等特点;后者负责各类地基、空基等移动用户的接入与组网传输。因此在各发展阶段,需要密切围绕“骨干接入结合”的方式推进。

(1)构建星间链路,推进卫星通信、中继系统网络化建设

由于未来的天基骨干网络将主要由当前的数据中继卫星、宽带通信卫星等发展而成,因此近期需要推动面向全球覆盖、具备星间组网能力的宽带卫星网络建设以及具备星间高速传输链路的数据中继卫星网络建设;对于天基接入网络,需要以高轨、中/低轨卫星通信星座网络为基础构建,满足用户覆盖和移动性接入需求。此外,为保障天基宽带互联网的有效应用、管理与安全,需要同时研发卫星网络智能融合应用终端,实现功能完备的网络管理和网络安全。

对于近期阶段建设的天基宽带

互联网,需要开展空间节点互联、信息实时回传、信息广域分发等通用服务示范以及陆、海、空、天各类用户随域接入、无感切换、按需服务等功能示范,全面验证网络的体系架构、技术体制、服务能力。

(2)天基信息网络空间贯通,建成天基宽带互联网

在中远期,随着天基通信、获取、导航等功能系统逐步完善以及关键技术问题的攻克与应用,一方面,需要在推进与丰富网络体系与标准规范的基础上完善天基骨干网络与接入网络建设,即在立足宽带卫星系统与中继卫星系统融合的前提下建设功能完备的天基骨干节点网络与面向全球无缝覆盖的高/中/低轨星座网络;另一方面,在为获取类卫星预留充足组网资源的基础上实现获取卫星数据的按需实时网络接入,在拥有导航接收能力的同时为导航定位精度提升等提供支持。此外,为支持更广泛的商业、民用、专业等各类应用,需要优化地面基础设施部署,将天基信息获取节点、地面数据中心、地面专业处理与服务节点、综合应用节点以及用户终端节点虚拟整合,实现基础数据、信息产品及软件、存储、计算等资源有序共享,实现天基宽带互联网与新一代互联网、地面移动通信网络无缝连接,开发型谱化的智能融合应用终端,保证异构网络的有效管理与安全。

在实现天基信息网络的空间贯通与地面有效服务的前提下,对于中远期阶段的天基宽带互联网,需要进一步开展全球移动宽带通信、遥感信息快速获取等多种按需服务,全面推广应用服务,达到为各类用户提供全时、全域的天基信息服务能力。

## 4 天基宽带互联网发展关键技术

为推动天基宽带互联网发展,根据天基宽带互联网演进路线与发展设想分析,需要考虑攻克网络体系架

构、星座轨道设计、组网技术、传输技术、网络管理与安全技术等5个主要方向的关键技术,形成系列化的标准协议。

### 4.1 网络体系架构

天基宽带互联网体系架构指对天基宽带互联网的总体设计,包括物理和信息两个层次。对于物理层面,主要设计组成三维动态拓扑的卫星节点数量、分布、位置、功能规划及其相互关系,以及网络拓扑结构的扩展能力和拓扑重构的可能范围等内容。考虑到天基宽带互联网络的空间分布所带来的多尺度特性,网络结构取决于网络规模、网络对地/对空覆盖、工作频段等多方面的指标要求。对于信息层面,需要在明确天基宽带互联网的服务模式与服务支持能力的基础上,确定信息传输类型与需求以及各类信息流程。天基宽带互联网体系设计既要继承已有空间功能系统,又要面向未来有所创新,以此来满足全球覆盖、宽带高速、灵活接入、自主运行、天地一体等能力需求。

### 4.2 星座轨道设计

星座轨道设计是对天基宽带互联网星座构型、卫星节点频率/轨道、星间/星地互联链路等的总体设计。在设计中,既要面向功能系统的服务范围和服务对象做“设计”,又需要结合频率、轨位等实际的一些情况做“安置”优化。

从网络节点所处轨道位置来看,由于GEO卫星对地静止,卫星间的网络拓扑相对固定,往往成为构建天基宽带互联网骨干网络的首要选择;而在天基接入网方面,由于不同轨道的接入网提供不同覆盖范围、传输速率、业务支持等功能,因此其星座轨道需要按需设计。

### 4.3 组网技术

组网技术是实现天基宽带互联

网异构互联的基础,为使信息在天基宽带互联网的异构网络间多跳传输,组网技术必须具备高效、灵活、可扩展、智能化等特点。

组网技术具体又包括了接入管理、空间路由、高速交换、组网协议、天地互联、资源管理调度等技术。以接入管理为例,由于天基宽带互联网为不同用户提供服务,不同终端、不同业务,以及不同服务等级对基宽带互联网的接入能力要求不同,因此,应根据实际应用场景,研究按需宽带接入、随遇移动接入等技术。

### 4.4 传输技术

传输链路是实现天基宽带互联网信息交互的桥梁,更高速率、高带宽、更高效是永恒追求。星间、星地的高速数据传输链路目前可通过微波、激光等多频段实现。其中,在高速微波传输技术方面,为实现数Gbit/s的高速传输,核心技术主要包括超高速高频谱效率传输体制、多载波超高速调制解调算法、空间信息网络协作传输技术等;在高速激光传输及多址技术方面,核心技术主要包括相干激光调制、多制式数字解调、兼容有/无信标光的快速捕获与高精度跟踪、基于光学相控阵的光多址接入技术等。另外,随着传输理论、材料、工艺等不断进步,新型传输技术亦将为传输技术带来重大变革。

### 4.5 网络管理与安全技术

针对天基宽带互联网节点动态变化,服务对象复杂,用户需求多样,服务质量分级等特点,实现安全、可靠、稳定、高效的网络管理与安全保障即是网络高效运行的基础,也是基本要求。因此,必须面向空天地网络融合,在地面管控系统实施全网集中管控的背景下,按照卫星组网模式,实现星载网络星上自主管控以补充地面区域地面站不足。同时,考虑到天基宽带互联网面临的开放性的卫星链路、不稳定的信号传输、移动的



网络节点等带来的更多的安全威胁,需要深入研究和解决网络中所传输信息的机密性、完整性,提升网络本身的抗攻击能力。

## 5 结束语

文章从天基宽带互联网的概念出发,在详细分析全球天基宽带互联网发展现状与研究进展的基础上,提出中国天基宽带互联网演进路线与发展构想,并明确提出网络建设过程中必须解决的五大技术问题。

天基宽带互联网的建设是一个长期的过程。在推进过程中,需要结合用户需求、现有能力以及已有重大工程论证成果,在分析中国天基宽带互联网发展基本条件的基础上,在技术攻关成果的推动下,统筹军队、部委、行业等应用需求,循序推进实施。

### 参考文献

- [1] 李克强. 政府工作报告[R]. 北京: 第十二届全国人民代表大会第三次会议, 2015
- [2] PARIKH B, FRITZ D. Network Centric

- Operations Over Transponded SATCOM [C]// 2004 Military Communications Conference MILCOM 2005. USA: IEEE, 2004:517-520
- [3] ISICOM Overview Document (draft version 1) [EB/OL]. [2009-04-10]. <http://www.isi-initiative.org/>
- [4] 闵士权. 我国天基综合信息网构想[J]. 航天器工程, 2013, 22(5):1-14
- [5] 陈文胜, 王丽君, 徐平, 等. Ka宽带多媒体系统运营模式浅析[J]. 卫星应用, 2014(2):44-47
- [6] 朱贵伟. Inmarsat-5 卫星[J]. 卫星应用, 2015(5):1
- [7] 迟惑. 格里格·维勒与他的全球互联梦想[J]. 太空探索, 2015(7):30-33
- [8] 刘洁, 潘坚, 曹世博. 低轨互联网星座业务发展趋势分析[J]. 中国航天, 2015(7):17-21
- [9] 杨飞, 周亚萍, 李晴飞. 国内外中继星的现状及发展趋势[J]. 数字通信世界, 2015(7):343-345
- [10] 郭丽红, 张靓, 杜中伟, 等. NASA月球激光通信演示验证试验[J]. 飞行器测控学报, 2015, 34(1):1-4
- [11] ENRIQUE G. CUEVAS, ANDREW P, et al. Internet Routing in Space: Prospects and Challenges of the IRIS JCTD[C]//2007 Military Communications Conference, MILCOM 2007. USA: IEEE, 2007:1-6
- [12] HSU J, PHEIFFER B, HAO P, et al. Analyzing Routing Protocol Convergence in Routed Satellite Networks[C]//Military Communications Conference, MILCOM 2005. USA: IEEE, 2007:1-7
- [13] 国家发展改革委, 财政部, 国防科工局. 国家民用空间基础设施中长期发展规划(2015—2025年)[R]. 2015
- [14] 国务院. 中国制造 2025 [R]. 2015

### 上接第 13 页

复杂系统,系统中的核心节点在空间上暴露在外,容易受到非法用户的恶意攻击,因此必须开展安全机制和安全协议研究,提高系统和网络的抗扰、抗毁能力。此外,随着数据传输速率的提高和波束成型等技术的使用,对天基网络节点的测距精度和同步精度提出了更高的要求,有必要进行高精度的毫米波或激光测距算法和全网定时同步算法研究;为提高核心节点的信号处理、传输和交换能力,还需要同步开展低复杂度信号处理技术和星载高速信号处理元器件研制等。

## 5 结束语

针对中国发展空间信息网络空间频率轨位资源匮乏、卫星平台能力较弱、空间系统高可靠性要求等现状与需求,深入分析了分布式星群的应用需求,提出了基于分布式星群的空间信息网络体系架构,通过多星共

轨、星间协同、资源虚拟化等技术,实现空间系统服务能力的增强以及与服务的高度匹配,可为中国未来空间信息网络研制建设提供借鉴。

### 参考文献

- [1] 于全, 王敬超. 空间信息网络体系结构与关键技术[J]. 中国计算机学会通信, 2016, 12(3): 21-25
- [2] 史西斌, 高坚, 寇保华. 欧洲数据中继卫星系统的未来发展[J]. 中国航天, 2009(10): 29-33
- [3] NASA Tracking and Data Relay Satellite System [EB/OL]. [2010.8.26]. <http://www.spacecomm.nasa.gov/spacecomm/tdrss/>
- [4] 盘点:“十三五”期间中国要上的 100 个大项目 [EB/OL]. [2016.3.6] <http://news.china.com/2016lh/news/11176754/20160306/21713059.html>
- [5] 沈荣骏. 我国天地一体化航天互联网构想[J]. 中国工程科学, 2006, 8(10): 19-30
- [6] 张乃通, 赵康德, 刘功亮. 对建设我国“天地一体化信息网络”的思考[J]. 中国电子科学研究院学报, 2015(10): 223-230
- [7] 闵士权. 我国天基综合信息网构想[J]. 航天器工程, 2013, 22(5):1-14
- [8] 黄惠明, 常呈武. 天地一体化天基骨干网络体系架构研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2015, 10(5):460-491
- [9] UCS Satellite Database [EB/OL]. [2016.1.1]. <http://www.ucsusa.org>
- [10] 刘豪, 梁巍. 美国国防高级研究计划局 F6 项目发展研究[J]. 航天器工程, 2010, 19(2):92-98
- [11] BROWN O, EREMENKO P. Value-Centric

### 作者简介



表论文 40 余篇。

梁宗闯, 中国空间技术研究院通信卫星事业部研究员、硕士生导师, 中国通信学会卫星通信委员会委员, 航天科技集团公司科技委通信系统组和卫星应用组委员, 中国空间技术研究院科技委有效载荷专业组委员; 先后主持和参加各类国家级科研项目 20 多项; 已发



陶澐, 中国空间技术研究院通信卫星事业部研究员、硕士生导师; 主要从事宽带/移动卫星通信、天基网络等方面的研究; 先后主持和参加国家科技部“863”计划、自然科学基金项目 20 余项; 已发表论文 30 余篇。



高梓梓, 中国空间技术研究院通信卫星事业部工程师; 主要从事宽带卫星通信、天基网络、卫星星座等方面的研究; 参与多项国防“863”计划、自然科学基金项目研究; 已发表论文 10 余篇。

Design Methodologies for Fractionated Spacecraft: Progress Summary from Phase 1 of the DARPA System F6 Program[C]// AAIA Reinventing Space Conference, 2009 (6540):1-15

- [12] 潘清, 胡欣杰, 张晓清. 网络中心战装备体系 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010

### 作者简介



国防发明专利授权 4 项, 发表论文 30 余篇。

王敬超, 中国电子设备系统工程公司研究所高级工程师; 主要研究领域为空间信息网络、卫星通信系统顶层设计及关键技术研究; 先后主持和参加国家自然科学基金、国家高技术研究发展计划等项目 10 余项; 获省部级科技进步一等奖 2 项; 获国家发明专利授权 2 项、



科技进步一等奖 4 项、二等奖 2 项; 申请发明专利 14 项, 出版学术专著 7 部, 发表论文 50 余篇。

于全, 中国工程院院士, 中国电子设备系统工程公司研究所研究员; 主要研究领域包括软件定义无线电、移动 Ad hoc 网络、认知无线网络、下一代无线通信网络、空间信息网络、网络跨层设计、网络效能分析与仿真等; 获国家科技进步一等奖 1 项、二等奖 1 项, 军队



# 空间信息网络中的星座设计方法研究

## Satellite Constellation Design in Space Information Network

张威/ZHANG Wei  
张更新/ZHANG Gengxin  
苟亮/GOU Liang

(解放军理工大学, 江苏 南京 210007)  
(PLA University of Science and  
Technology, Nanjing 210007, China)

纵观世界范围, 各类卫星通信系统的建设仍然表现出各自为政、独立建设的局面。各系统针对不同的任务需求和服务对象构建, 系统缺乏一般性、通用性和相互协作的能力, 形成重复建设、“烟囱式”发展的不利局面。例如, 仅  $40^{\circ}\text{E} \sim 180^{\circ}\text{E}$  的亚太地区就有 120 多个静止轨道 (GEO) 位置用于卫星移动通信<sup>[1-2]</sup>, 而各类宽带通信、数据中继、气象、导航卫星更占用了大量轨道资源。并且单个系统针对既定任务设计, 系统完成任务后会出现较多空闲状态, 无法对空间资源进行整体配置。此外, 由于频谱和轨道等资源的限制, 各系统的全域覆盖能力有限, 不同的技术体制更导致网络扩展能力差。空间信息网络的提出为解决上述问题提供了有效途径, 已成为全球范围的研究热点<sup>[3-6]</sup>。

空间信息网络是以多种空间平台 (如同步卫星或中、低轨道卫星, 平流层气球和有人或无人驾驶飞机等) 为载体, 实时获取、传输和处理各类

收稿时间: 2016-05-23  
网络出版时间: 2016-07-05  
基金项目: 国家自然科学基金  
(91338201、91438109、61571464、61401507)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2016) 04-0019-005

**摘要:** 提出了一种“骨干网+增强网”的混合星座设计方法, 即以 GEO 卫星节点构成骨干网, 以 IGSO、HEO、MEO 或 LEO 卫星等其他轨道卫星节点作为增强网, 实现全球覆盖。并设计了一种“4GEO+5IGSO”混合星座, 对其覆盖性能进行了详细分析。仿真结果表明, 所提出的方法采用较少数量的卫星即可满足全球无缝覆盖并可仅依靠中国信关站落地。

**关键词:** 空间信息网络; 星座设计; 混合星座; GEO 卫星; IGSO 卫星

**Abstract:** In this paper, “backbone network + enhanced network” hybrid constellation design approach is proposed. In this approach, backbone network is composed of geostationary orbit (GEO) satellites, while the enhanced network can be composed of inclined geosynchronous satellite orbit (IGSO), highly elliptical orbit (HEO), medium earth orbit (MEO) or low earth orbit (LEO) satellites. The hybrid constellation can cover the earth seamlessly. Then, the hybrid “4GEO+5IGSO” constellation is designed, and the coverage performance of this constellation is analyzed in detail. Simulation results show that the proposed approach can realize global seamless coverage using a small number of satellite nodes, which can only rely on China gateways.

**Keywords:** space information network; constellation design; hybrid constellation; GEO satellite; IGSO satellite

信息的网络系统。作为国家重要基础设施, 空间信息网络在服务远洋航行、应急救援、导航定位、航空运输、航天测控等重大应用的同时, 向下可支持对地观测的高动态、宽带实时传输, 向上可支持深空探测的超远程、大时延可靠传输, 从而将人类科学、文化、生产活动拓展至空间、远洋、乃至深空<sup>[7]</sup>。

相比传统卫星网络, 空间信息网络结构复杂, 包含了多种类型节点。但由卫星节点组成的网络仍是整个空间信息网络承载业务的核心, 其工作方式、覆盖特点直接影响整个空间信息网络的效能, 是空间信息网络建设过程中需要重点考虑的内容。然

而, 卫星节点一般处于高速轨道运行状态, 卫星节点间需要相互协同, 构成星座, 才能实现良好的空时覆盖性能。此外, 中国静止卫星轨道位置、频率资源稀缺, 也没有条件建设类似美国全球电信港的海外基地, 仅能在国土内建设信关站, 这对空间信息网络的星座设计增加了额外约束条件。

根据调研, 现有大部分空间系统均采用单轨道类型星座, 譬如采用 GEO 卫星组成星座的 Thuraya<sup>[8]</sup>、Inmarsat<sup>[9]</sup> 等系统, 采用中轨道 (MEO) 卫星组成星座的 O3b<sup>[10]</sup>、全球定位系统 (GPS)<sup>[11]</sup>、GLONASS<sup>[12]</sup>, 采用低轨道 (LEO) 卫星组成星座的 Iridium<sup>[13]</sup>、Globalstar<sup>[14]</sup>、Orbcomm<sup>[15]</sup> 等。单一轨

道类型星座具有较为成熟的设计方法,一般采用 Walker 星座<sup>[16]</sup>的形式来进行星座设计。但单一轨道类型星座具有明显的不足:GEO 星座对中、高纬度地区平均覆盖仰角较低,衰落余量大,存在“南山效应”,两极附近有通信盲区;MEO、LEO 需要大量卫星组成星座才能实现区域或全球无缝覆盖,运行费用高。针对该问题,有大量文献对新的星座形式进行了探讨,其中以多层卫星网络<sup>[17]</sup>(MLSN)最具代表性。多层卫星网络在不同的轨道高度上同时布星,利用星间链路(ISL)建立立体交叉卫星网络,从而将各种轨道高度卫星的优势进行互补。但现有文献对多层卫星网络的研究主要集中在其组网和路由方面<sup>[18-21]</sup>,并没有回答好多层卫星星座如何设计这个问题。

针对上述问题,我们从混合星座设计的角度考虑空间信息网络中提供信息服务的卫星节点布设方法。混合星座采用不同轨道类型(GEO、倾斜地球同步轨道(IGSO)、高椭圆轨道(HEO)等)的卫星组成星座,相互之间优势互补,具有比单轨道类型星座更好的性能。在文章中,我们首先提出了一种“骨干网+增强网”的混合星座设计方法,以 GEO 卫星节点构成骨干网,以 IGSO、HEO、MEO 或 LEO 卫星等其他轨道卫星节点作为增强网,实现全球覆盖。与多层卫星网不同的是:该方法分清了星座组成中的“主”和“次”,并且星座中卫星轨道高度可以相同。然后利用该方法针对中国仅限国内建设信关站的国情,设计了一种“GEO+IGSO”混合星座,对其覆盖性能进行了详细分析。仿真结果表明:所提方法采用较少的卫星即能满足全球无缝覆盖并可仅依靠中国信关站落地。

## 1 “骨干网+增强网”混合星座设计方法

文章中,我们从业界普遍认同的“空间骨干节点”出发,提出一种骨干

网+增强网的混合星座设计方法:采用 GEO 卫星作为骨干网,采用其他类型卫星作为增强手段。该星座设计方法将整个星座的构建过程分为两个阶段,具体描述如下。

(1)阶段 1。GEO 卫星工作于距离地面高度为 35 786 km 的赤道轨道上,相对地面保持静止,覆盖范围大,且技术相对成熟,运行维护方便。因此,在节点布设的第 1 个阶段,采用 3~5 个分布在不同轨道位置上 GEO 星群组成空间骨干网。这里,考虑到轨道位置受限,每个轨道位置上布设多颗 GEO 卫星节点,物理上可能包括通信、中继、遥感、导航等多种卫星,逻辑上可以看作一个信息服务节点,星群内卫星协作完成包括信息获取、处理、传输、交换、存储、分发等功能。GEO 星群之间和星群内各卫星之间可通过高速的微波或激光星间链路实现信息交换。境外 GEO 卫星通过星间链路迂回,仅依靠中国信关站落地。当骨干网节点布设完毕后,空间信息网络的基本功能就已初步具备。

(2)阶段 2。由于 GEO 卫星节点的轨道特性,骨干网对中、高纬度地区平均覆盖仰角较低,衰落余量大,存在南山效应,无法覆盖南北两极。需要借助其他轨道类型的卫星来增强其覆盖能力,弥补其不足。为了便于设计和建设,一般应采用同一轨道类型的卫星(譬如采用 IGSO 卫星、HEO 卫星、MEO 卫星或 LEO 卫星等)对骨干网的覆盖进行增强。在该阶段需要对中高纬度地区、两极地区进行覆盖增强,提高热点区域的系统可用度,解决中、高纬度地区、城市、峡谷、山区、丛林等 GEO 卫星节点视线受限区域的信息需求。

## 2 混合星座设计方案

### 2.1 GEO 卫星骨干网节点位置选取

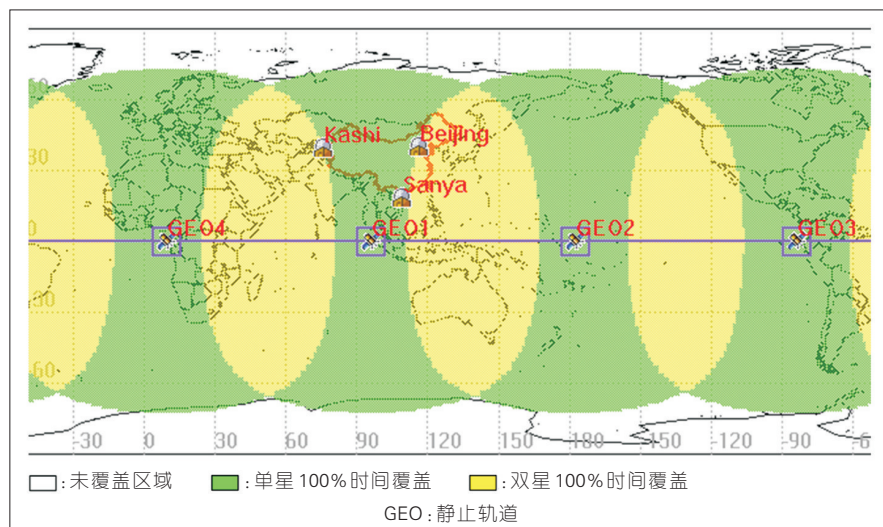
考虑到中国没有条件建设类似美国全球电信港的海外信关站,因

此,GEO 卫星骨干网节点布设过程中需重点考虑中国信关站地点这一约束条件。我们经过调研选取北京(39.9°N, 116.4°E)、喀什(39.5°N, 76.0°E)以及三亚(18.2°N, 109.5°E)3 个典型地点的信关站作为空间节点布设的约束条件。在实际应用中,卫星的波束边缘仰角需要留有余量,在文中的覆盖分析中,波束边缘仰角取 10°。考虑到中国信关站地址的限制,骨干网中的 GEO 卫星节点应尽可能多地对中国信关可见。这里考虑采用 4 颗 GEO 卫星的策略。

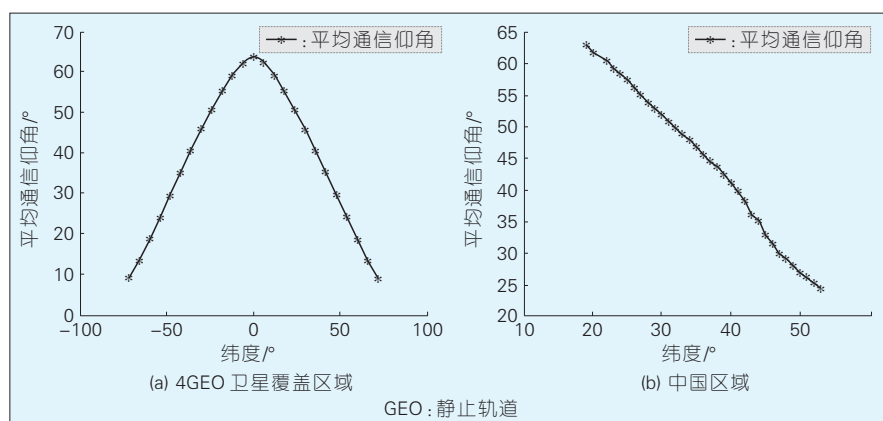
为使更多卫星节点对中国信关站直接可见,且兼顾中低纬度地区的覆盖。首先,根据位于最东的北京信关站(39.9°N, 116.4°E)以及波束边缘仰角 10°来确定中国领土东部 GEO2 节点的定点位置,为 177.5°W;然后,根据位于最西的喀什信关站(39.5°N, 76.0°E)确定中国领土西部 GEO4 节点的定点位置,为 9.8°E。GEO1 和 GEO3 节点分别位于 GEO2 和 GEO4 节点间空隙的中点位置,定点位置分别为 96.1°E 和 83.9°W。4 颗 GEO 卫星通过固定星间链路组成环路。如图 1 所示,GEO1、GEO2 和 GEO4 节点均能被中国信关站可见,唯一不可见的 GEO3 节点信息可以通过 GEO2 或 GEO4 一跳中继落地中国信关站。该方案能够覆盖南北纬 63.7°以内的区域。该方案在其覆盖区和中国区域的平均通信仰角如图 2 所示。可以看出:该方案在中国区域的平均通信仰角明显高于 3GEO 方案。

### 2.2 GEO+IGSO 混合星座

IGSO 卫星与 GEO 卫星具有相同的轨道高度,因此具有与地球自转周期相同的轨道周期,能够充分继承 GEO 卫星的优点,便于与 GEO 卫星组网融合。IGSO 卫星可以采用两种方式构成星座:地面同轨迹 IGSO 星座,星座中所有 IGSO 卫星具有相同的地面轨迹(地面轨迹成 8 字形,卫星倾角越大,8 字越大),但卫星位于不同



▲图1 4GEO卫星对地覆盖情况(波束边缘仰角为 $10^\circ$ )



▲图2 4GEO卫星的平均通信仰角

的轨道面,卫星之间的相对位置时刻变化;同轨道面IGSO卫星,星座中IGSO卫星位于同一轨道面内,相互之间相对静止,便于建立星间链路。

地面同轨道的IGSO卫星能够对固定区域(譬如中国区域)进行接力覆盖,增强中国及周边区域的覆盖性能。但是,由于中国信关站局限在领土范围内,当IGSO卫星轨道倾角较高时,IGSO卫星星下点位于南极附近时对信关站不可见。表1给出了不同轨道倾角的IGSO卫星在一天中对信关站的不可见时间长度,其中IGSO卫星升交点经度为 $109.5^\circ\text{E}$ (与三亚信关站经度相同),信关站为三亚( $18.2^\circ\text{N}$ ,  $109.5^\circ\text{E}$ )。

信息服务节点之间的链路一般

是高速宽带链路,星间链路波束宽度非常小。由于同地面轨迹的IGSO卫星位于不同的轨道,相互之间的俯仰和方位角实时变化,如果相互之间建立高速星间链路将对天线跟踪和对准提出极高的要求,并且天线时刻调整对准方位也严重影响了使用寿命。因此,星座设计中,相对运动的卫星节点间尽可能不建立星间链路,以保证信息服务节点的高效、可靠的运行。

然而,若地面同轨道IGSO卫星间

不建立星间链路,从表1可知,卫星的轨道倾角不能超过 $53.4^\circ$ 。此时,4GEO骨干网+3地面同轨道IGSO增强网的多星对地覆盖情况如图3所示。其中,4颗GEO卫星分别定点于 $96.1^\circ\text{E}$ 、 $177.5^\circ\text{W}$ 、 $83.9^\circ\text{W}$ 、 $9.8^\circ\text{E}$ ,相互之间通过星间链路组成环路;3颗IGSO卫星地面同轨道,轨道倾角为 $53.4^\circ$ ,升交点经度为 $109.5^\circ\text{E}$ ,相互之间真近点角相差为 $120^\circ$ ,不建立星间链路。

从图3中可以看出:此时仍有部分区域无法达到100%时间覆盖,但中国安全利益重要区域得到了很好的多星覆盖。为了弥补4GEO+3IGSO的覆盖空隙,我们进一步提出将地面同轨道IGSO卫星和同轨道面IGSO卫星相结合,结合的方法如下:

(1)至少包含3颗地面同轨道IGSO卫星,以保证IGSO卫星对地面的连续接力覆盖。

(2)至少包含3颗同轨道面的IGSO卫星,以建立IGSO卫星间链路,使对中国信关站不可见IGSO卫星的信息通过中继落回中国信关站。

(3)存在1颗IGSO卫星既属于地面同轨道IGSO星座又属于同轨道面IGSO星座,将两种不同类型的IGSO星座密切结合。

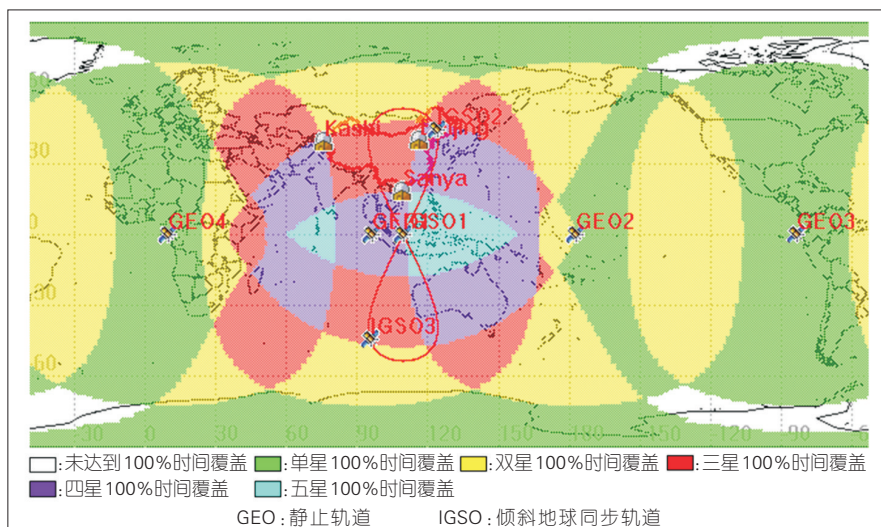
也就是说,最少也需要5颗IGSO卫星即可将两类IGSO星座密切地结合,如图4所示。其中,IGSO1既属于地面同轨道同时又属于同轨道面IGSO星座。

采用图4中的5颗IGSO卫星作为增强网与GEO卫星骨干网组成混合星座,得到的多星覆盖情况如图5所示。其中4颗GEO卫星分别定点于 $96.1^\circ\text{E}$ 、 $177.5^\circ\text{W}$ 、 $83.9^\circ\text{W}$ 、 $9.8^\circ\text{E}$ ,相互之间通过星间链路组成环路;地面同轨道3颗IGSO卫星轨道倾角为

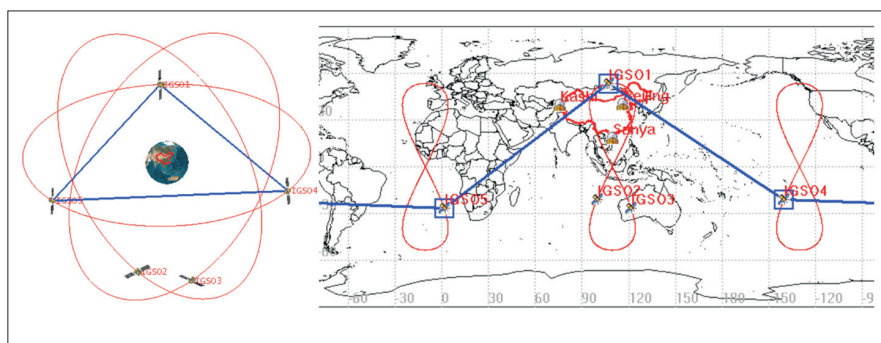
▼表1 IGSO卫星对三亚信关站的不可见时间(波束边缘仰角为 $10^\circ$ )

| 轨道倾角/ $^\circ$ | 53.4 | 53.5 | 60.0  | 70.0  | 80.0  | 90.0  |
|----------------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| 不可见时间/h        | 0    | 0.35 | 3.33  | 4.90  | 5.79  | 6.38  |
| 占一天百分比/%       | 0    | 1.46 | 13.88 | 20.43 | 24.14 | 26.58 |

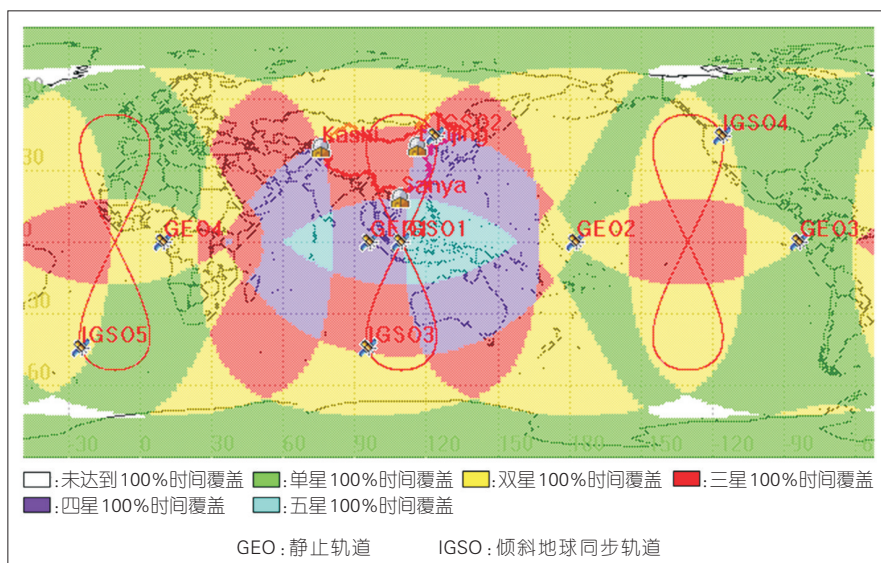




▲图3 4GEO+3IGSO星座多星覆盖情况(波束边缘仰角为 $10^\circ$ )



▲图4 将地面同轨迹和同轨道面IGSO星座相结合(5IGSO)



▲图5 4GEO+5IGSO星座多星覆盖情况(波束边缘仰角为 $10^\circ$ )

$53.4^\circ$ , 升交点经度为 $109.5^\circ\text{E}$ , 相互之间真近点角相差 $120^\circ$ , 不建立星间链

路; 同轨道面的3颗IGSO卫星轨道倾角为 $53.4^\circ$ , 其中1颗IGSO卫星与地

面同轨迹IGSO星座共用, 相互之间真近点角相差 $120^\circ$ , 通过星间链路组成环路。

从图5可以看出, 覆盖中仍存在缝隙, 但此时同轨道面的IGSO卫星IGSO4、IGSO5仅考虑通过IGSO1中继落入中国信关站。事实上, IGSO4有部分时间对北京信关站可见; 而IGSO5卫星有部分时间对喀什信关站可见。因此, 可以对5IGSO星座进行进一步调整:

(1) 保留IGSO2和IGSO3卫星的轨道参数不变, 因此IGSO2和IGSO3仍始终对中国信关站可见。

(2) 扩大IGSO1、IGSO4和IGSO5卫星的轨道倾角, 如果其中任何一颗卫星对中国信关站可见, 其他两颗卫星均能利用该卫星一跳中继将信息传回中国信关站。

表2通过仿真统计给出了当3颗同轨道面IGSO卫星轨道倾角调整过程中, 3颗IGSO卫星同时对信关站不可见的时间。

显然, 3颗同轨道面的IGSO卫星IGSO1、IGSO4和IGSO5无论取何种轨道倾角, 总有一颗IGSO卫星对中国信关站可见。因此, 调整图5混合星座中3颗同轨道面IGSO卫星的轨道倾角为 $60^\circ$ , 可得到改进后的4GEO+5IGSO混合星座的多星覆盖, 如图6所示。

此时, 4GEO+5IGSO混合星座在全球和中国区域的平均通信仰角(重叠覆盖时取较大的仰角)如图7所示。显然, 无论是全球还是在中国区域, 平均通信仰角均有较大程度的提升。

从图6和图7中可以看出, 改进后的4GEO+5IGSO混合星座具有以下特点:

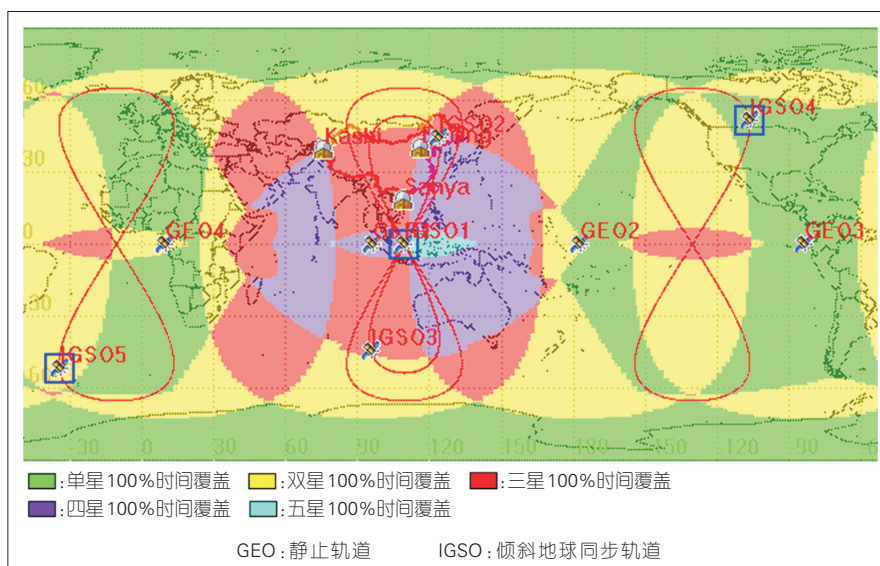
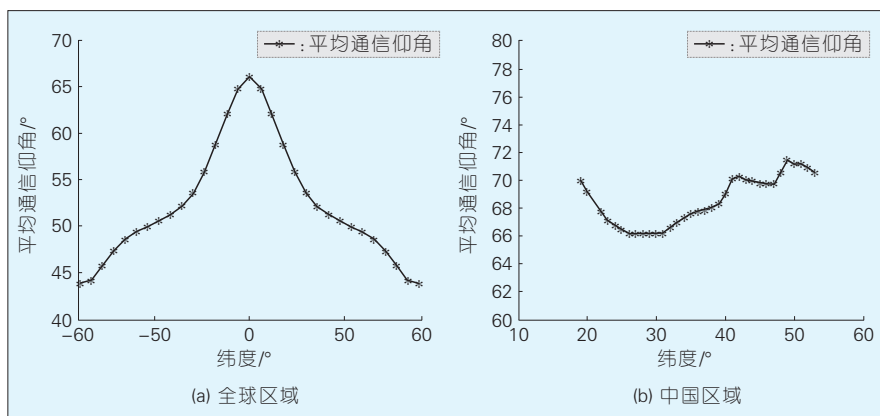
(1) 仅采用9颗卫星即能够对全球实现无缝覆盖, 这对中国安全和利益重点区域能够达到非常好的多星覆盖(3~4星100%时间覆盖), 将系统资源集中在重点区域。

(2) 仅在同轨道面GEO、IGSO之

▼表2 同轨道面3IGSO卫星对中国信关站同时不可见时间(波束边缘仰角为 $10^{\circ}$ )

| 3IGSO 轨道倾角/ $^{\circ}$ | 50 | 60 | 70 | 70 | 80 | 90 |
|------------------------|----|----|----|----|----|----|
| 不可见时间/h                | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 占一天百分比/%               | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |

IGSO: 倾斜地球同步轨道

▲图6 改进后4GEO+5IGSO星座多星覆盖情况(波束边缘仰角为 $10^{\circ}$ )

▲图7 改进后4GEO+5IGSO星座的平均通信仰角

间建立星间链路,由于同轨道面卫星之间相对静止,星间链路可采用成熟的固定指向、窄波束宽带天线。

(3)在中高纬度地区也具有高通信仰角,解决了解决中高纬度地区、城市、峡谷、山区、丛林等 GEO 卫星节点视线受限区域的信息服务需求。

(4)GEO、IGSO 卫星轨道高度高,相对导航、遥感卫星俯仰方位角变化较慢,适合为导航卫星、低轨遥感卫

星等用户节点提供接入服务。

(5)整个星座中至少同时有6颗卫星(3颗 GEO 卫星、3颗 IGSO 卫星)对于中国信关站可见,其他不直接可见的卫星仅需一跳中继即可与中国信关站互连,很好地解决了我国仅能在国内布设信关站的关键问题。

### 3 结束语

我们首先提出了一种骨干网+增

强网混合星座设计方法,以 GEO 卫星节点构成骨干网,以 IGSO、HEO 卫星等其他轨道卫星节点作为增强网,实现全球覆盖。然后,重点针对中国仅在国内布设信关站这个强约束条件,设计了一种“4GEO+5IGSO”混合星座,对其覆盖性能进行了仿真分析。结果表明:所设计星座达到全球无缝覆盖所需卫星数量不超过9颗,并且能够很好满足“仅依靠中国信关站落地”这个强约束条件。

### 参考文献

- [1] 数字通信世界. 亚太地区卫星资源指南 2014 [EB/OL]. [2016-05-05]. <http://www.dcw.org.cn/images/cover/1-1.jpg>
- [2] Union of Concerned Scientists. UCS Satellite Database [EB/OL]. [2016-05-05]. [http://www.ucsusa.org/nuclear\\_weapons\\_and\\_global\\_security/solutions/space-weapons/ucs-satellite-database.html](http://www.ucsusa.org/nuclear_weapons_and_global_security/solutions/space-weapons/ucs-satellite-database.html)
- [3] MUKHERJEE J, RAMAMURTHY B. Communication Technologies and Architectures for Space Network and Interplanetary Internet [J]. IEEE Communication Surveys & Tutorials, 2012, 15 (2): 881-897. DOI: 10.1109/SURV.2012.062612.00134
- [4] BHASIN K B, HAYDEN J K. Architecting Communication Network of Networks for Space System of Systems [C]//IEEE System of Systems Engineering Conference. USA: IEEE, 2008: 1-7. DOI: 10.1109/SYSOSE.2008.4724153
- [5] HU H F, LIU Y A. A Feasible Mesh-Based Architecture and Protocol Model of Space Information Network [C]//IEEE Geoscience and Remote Sensing Conference. USA: IEEE, 2010: 529-531
- [6] REN F, Fan J L. An Adaptive Distributed Certificate Management Scheme for Space Information Network [J]. IET Information Security, 2013, 7(4): 318-326. DOI: 10.1049/iet-ifs.2012.0253
- [7] ZHANG G X, ZHANG W, ZHANG H, et al. A Novel Proposal of Architecture and Network Model for Space Communication Networks [C]//IAF 65th International Astronautical Congress. France: IAF, 2014: 1-7
- [8] LIPATOV A, SKORIK E, FYODOROVA T. New Generation of Geostationary Mobile Communication Satellite—Thuraya Complex Usage [C]//Microwave and Telecommunication Technology. USA: IEEE, 2001: 247-249. DOI: 10.1109/CRMICO.2001.961542. DOI: 10.1109/CRMICO.2001.961542
- [9] WANG J, LIU C. Development and Application of INMARSAT Satellite

►下转第45页



# 天地一体化信息网络天基宽带骨干互联系统初步考虑

## The Space Wideband Backbone Interconnected System in the Integrated Space and Terrestrial Information Network

张平/ZHANG Ping  
秦智超/QIN Zhichao  
陆洲/LU Zhou

(中国电子科技集团公司, 北京 100041)  
(China Academy of Electronics and  
Information Technology, Beijing 100041,  
China)

天地一体化信息网络作为国家信息化重要基础设施, 对拓展国家利益, 维护国家安全, 保障国计民生, 促进经济发展具有重大意义, 是中国信息网络实现信息全球覆盖、宽带传输、军民融合、自由互联的必由之路。

近年来, 中国信息网络建设日新月异, 取得了可喜的成绩, 互联网和移动通信用户数量处于世界领先地位<sup>[1]</sup>。相比地面网络, 天基网络具有服务覆盖范围广, 受地面因素影响小, 布设机动灵活等优势, 在空间信息传输、应急救援、航空运输、远洋航行、空间探索等领域发挥不可或缺的作用。但是, 中国天基信息网、互联网、移动通信网发展很不平衡, 呈现“天弱地强”的特征。

中国航天技术发展取得了巨大成就<sup>[2-3]</sup>, 根据美国忧思科学家联盟

收稿时间: 2016-05-16

网络出版时间: 2016-06-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(91338201); 国家高技术研究发展(“863”)计划(2015AA015701)

中图分类号: TP393 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2016) 04-0024-005

**摘要:** 认为天基宽带骨干互联系统是天地一体化信息网络(ISTIN)的核心。在分析全球典型系统架构的基础上, 结合中国国情提出了一种新的天基宽带骨干互联系统网络架构——天地双骨干。同时, 综合考虑天地链路信道特征和星上处理能力约束, 提出了激光/微波混合传输、电路和分组混合交换等技术体制, 为系统建设提供参考。

**关键词:** ISTIN; 骨干互联系统; 天地双骨干

**Abstract:** The space wideband backbone interconnected system is the core of the integrated space and terrestrial information network (ISTIN). In this paper, we compare the major network architectures in the world, and propose a novel space and terrestrial dual backbone architecture for the space wideband backbone interconnected system based on the condition of our country. Furthermore, considering of the space-terrestrial link character and on board processing ability, we propose the scheme of laser/radio frequency (RF) hybrid transmission and circuit/packet hybrid switching for the system construction.

**Keywords:** ISTIN; space wideband backbone interconnected system; space and terrestrial dual backbone

(UCS) 网站上的统计数据<sup>[4]</sup>, 截至2015年12月底, 中国在轨卫星数量已达177颗, 预计到2020年在轨卫星数量将超过200颗。天基方面, 中国已经初步建成了通信中继、导航定位、对地观测等系统, 但各卫星系统独自建设, 条块分割十分明显, 卫星数量严重不足, 卫星类型比较单一, 更为突出的是, 卫星没有实现空间组网, 无法发挥天基信息系统的网络化综合效能。

天基宽带骨干互联系统作为天地一体化信息网络的核心, 一方面起到了互联各类天基信息系统的作用,

通过天地双骨干架构实现不同系统在天地两个层面的互联互通和一体化融合; 另一方面作为一张全球覆盖的宽带信息网络, 为陆、海、空、天等各类重点用户提供宽带接入和数据中继服务。

### 1 天地一体化信息网络的相关工作

#### 1.1 天地一体化信息网络概述

近年来, 随着空间网络技术的快速发展, 特别是星间链路的出现, 空间信息系统开始向网络化方向发展,



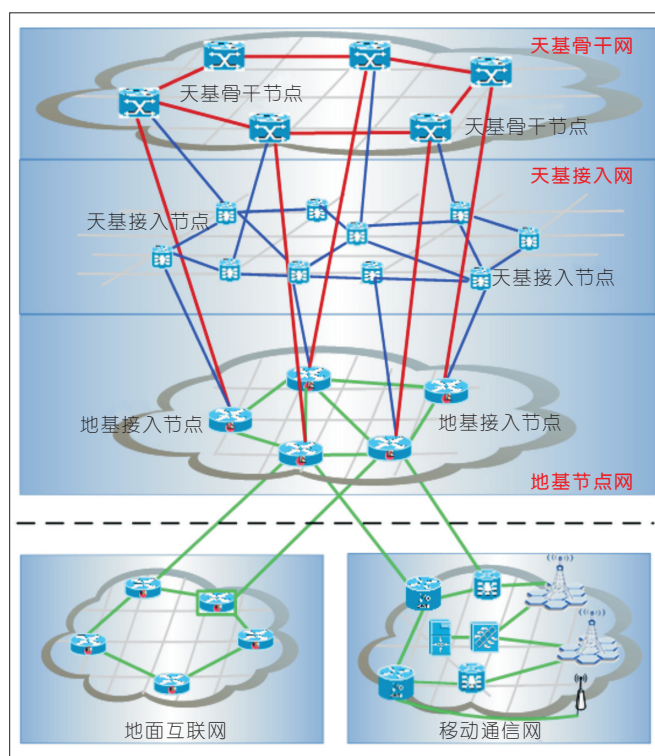
并朝着与地面网络融合成天地一体化信息网络的趋势发展。为此,世界各国都在积极开展总体架构方面的研究,包括组网架构、协议体系和标准规范等。

全球的其他一些国家在天地一体化信息网络研究和系统建设方面具有领先地位,既建成了铱星、先进极高频(AEHF)等空间组网的卫星通信系统,提出了行星际网络(IPN)、转型通信卫星系统(TSAT)等天地一体化网络的设想,又开展了一系列的空间技术试验,包括太空路由器(IRIS)等<sup>[5-8]</sup>。

中国天地一体化信息网络相关的研究和讨论已经持续了十多年,目前已经取得了一系列成果。2006年,沈荣骏院士首先提出了中国天地一体化航天互联网的概念<sup>[9]</sup>及总体构想;2007年和2012年,中国宇航学会飞行器测控专业委员会先后两次召开学术年会,对航天互联网相关技术进行了专题研讨;2013—2014年,工业和信息化部电子科学技术委员会组织了“天地一体化信息网络体系架构研究”重点课题,从发展战略、总体方案和关键技术等3个方面对天地一体化信息网络开展研究<sup>[10]</sup>;2013年和2015年,中国先后两次召开了天地一体化信息网络的高峰论坛,对凝聚中国天地一体化信息网络相关研究力量并形成统一的认识发挥了重要作用;2015年,张乃通院士发表了《对建设我国“天地一体化信息网络”的思考》一文<sup>[11]</sup>,对天地一体化信息网络的定位、边界做了清晰的说明,并提出了网络基本架构的设想和对建设工作的建议。

在综合相关研究工作的基础上,我们提出了对天地一体化信息网络的理解:天地一体化信息网络是以地面网络为依托、天基网络为拓展,采用统一的技术架构、统一的技术体制、统一的标准规范,由天基信息网、互联网和移动通信网互联互通而成。如图1所示,天基信息网包括天

图1  
天地一体化信息网络  
系统组成



基骨干网、天基接入网、地基节点网3部分。

天基骨干网由布设在地球同步轨道的若干骨干节点联网而成,骨干节点具备宽带接入、数据中继、路由交换、信息存储、处理融合等功能,受卫星平台能力的限制,单颗卫星无法完成上述全部功能,拟采用多颗卫星组成星簇的方式实现多功能综合。一个天基骨干节点由数颗搭载不同功能模块化载荷的卫星组成,包括中继、骨干、宽带、存储、计算等功能模块化卫星,不同卫星之间通过近距离无线通信技术实现组网和信息交互,协同工作完成天基骨干节点的功能。

天基接入网由布设在高轨或低轨的若干接入节点所组成,满足陆、海、空、天多层次海量用户的各种网络接入服务需求,包括语音、数据、宽带多媒体等业务。

地基节点网由多个地面互连的地基骨干节点组成,地基骨干节点由信关站、网络运维管理、信息处理、信息存储及应用服务等功能部分组成,主要完成网络控制、资源管理、协议

转换、信息处理、融合共享等功能,通过地面高速骨干网络完成组网,并实现与其他地面系统的互联互通。

## 1.2 典型系统分析

经过多年的发展,全球的其他一些国家已经建成了多个天地一体的信息网络系统,包括同步轨道、中低轨道的各类卫星系统,平流层的气球和无人机、地面信关站等组成部分,如图2所示。

通过调研分析,可以将各类不同的信息系统按照网络架构大致归为三大类:天星地网、天基网络、天网地网,如表1所示。

### (1) 天星地网

天星地网是目前普遍采用的一种网络结构,包括 Inmarsat、全球宽带卫星系统(WGS),其特点是天上卫星之间不组网,而是通过全球分布的地面站实现整个系统的全球服务能力。在这种网络结构中卫星只是透明转发通道,大部分的处理在地面完成,所以星上设备比较简单,系统建设的复杂度低,升级维护也比较



▲图2 典型天地一体化信息网络系统

▼表1 不同网络结构比较

| 网络结构   | 天星地网                                    | 天基网络                             | 天网地网             |
|--------|---|----------------------------------|------------------|
| 典型系统   | 民: Inmarsat、轨道通信系统、全球星系统<br>军: WGS、MUOS | 民: 铱星系统<br>军: AEHF               | 军: TSAT          |
| 地面网络   | 全球分布地面站网络                               | 系统可不依赖地面网络独立运行                   | 天地配合,地面网络不需要全球布站 |
| 星间组网   | 否                                       | 是                                | 是                |
| 星上设备   | 简单                                      | 复杂                               | 中等               |
| 系统可维护性 | 好                                       | 差                                | 中                |
| 技术复杂度  | 低                                       | 高                                | 中                |
| 建设成本   | 低                                       | 高                                | 中                |
|        | AEHF: 先进极高频<br>Inmarsat: 国际移动卫星组织       | MUOS: 移动用户目标系统<br>TSAT: 转型通信卫星系统 | WGS: 全球宽带卫星系统    |

方便。

(2)天基网络

天基网络是另一种网络结构,典型的系统有铱星、AEHF等,其特点是采用星间组网的方式构成独立的天基网络,整个系统可以不依赖地面网络独立运行。这种网络结构弱化了对地面网络的要求,把处理、交换、网络控制等功能都放在星上完成,提高了系统的抗毁能力,但由此也造成了星上设备的复杂化,导致整个系统建设和维护的成本较高。通过调研分析,我们发现这种单纯的天基网络结构从商业上来说并不算成功,主要是基于军事上对网络极端抗毁性的相

关需求。

(3)天网地网

天网地网介于上述两种网络结构之间,以TSAT计划为典型,其特点是天基和地面两张网络相互配合共同构成天地一体化信息网络。在这种网络结构下,天基网络利用其高、远、广的优势实现全球覆盖,地面网络可以不用全球布站,但可以把大部分的网络管理和控制功能在地面完成,简化整个系统的技术复杂度。

3种网络架构总结如下:天星地网架构技术比较成熟,是目前全球一些国家系统建设的主流选择,获得应用广泛,但受中国国情限制,在全球

布站有现实的困难,所以难以采用这种架构;天基网络架构在安全性、抗毁性和独立性等方面有优势,但因为要考虑脱离地面独立运行,加重了对星上处理和星间信息传输能力的要求,导致技术复杂,系统的建设和维护成本高,商业上难以成功;天网地网架构通过天地两张网络的配合,充分利用天基网络的广域覆盖能力和地面丰富的传输和处理能力,大大降低了整个系统的技术复杂度和成本。

综合考虑之后,我们认为天网地网是比较适合中国国情的天地一体化信息网络的网络结构。在该天网地网架构中,空间网络既可作为独立系统存在,直接面向用户提供服务保障,又可以作为地面网络的补充和增强,以弥补地面网络在覆盖范围、抗毁应急保障以及机动保障能力上的不足。

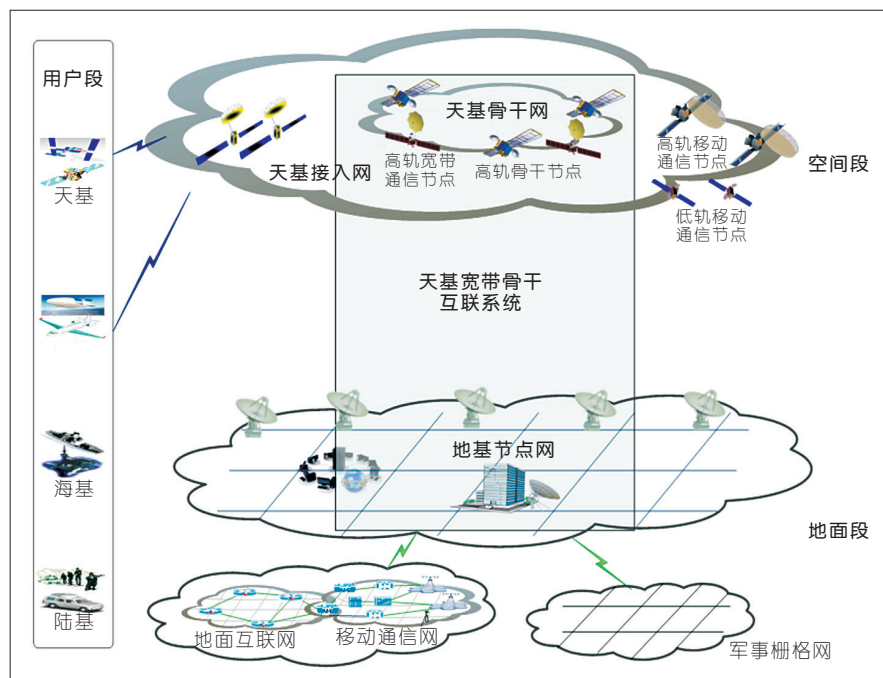
2 天基宽带骨干互联系统设想

2.1 系统架构

在天地一体化信息网络中,天基宽带骨干互联系统起到了核心的作用,具备宽带接入、骨干互连和中继传输等功能,分为空间段、地面段和用户端3部分,如图3所示。

天基宽带骨干互联系统需要保持稳定可靠,所以其空间段一般由比较稳定的同步轨道卫星组成,通过星间和星地高速链路提供高速骨干传输通道<sup>[2]</sup>。同步轨道(GEO)卫星距离地面约36 000 km,轨道周期与地球自转周期恰好相同,所以与地面保持相对静止,并且覆盖范围广,是实现空间骨干网络的理想选择。如图3所示,其空间段部分涵盖了天基骨干网和部分天基接入网的设施。

地面段是为了支撑系统运行所必要的一些基础设施,主要包括网络运行中心(NCC)、卫星运行中心(SCC)、地面信关站(GW)等。同时,为了提高整个系统的可靠性,通过地



▲图3 天基宽带骨干互联系统体系架构

面光纤网络将各类地面设施连接起来构成地基节点网,与空间段的天基骨干网构成天地双骨干架构。

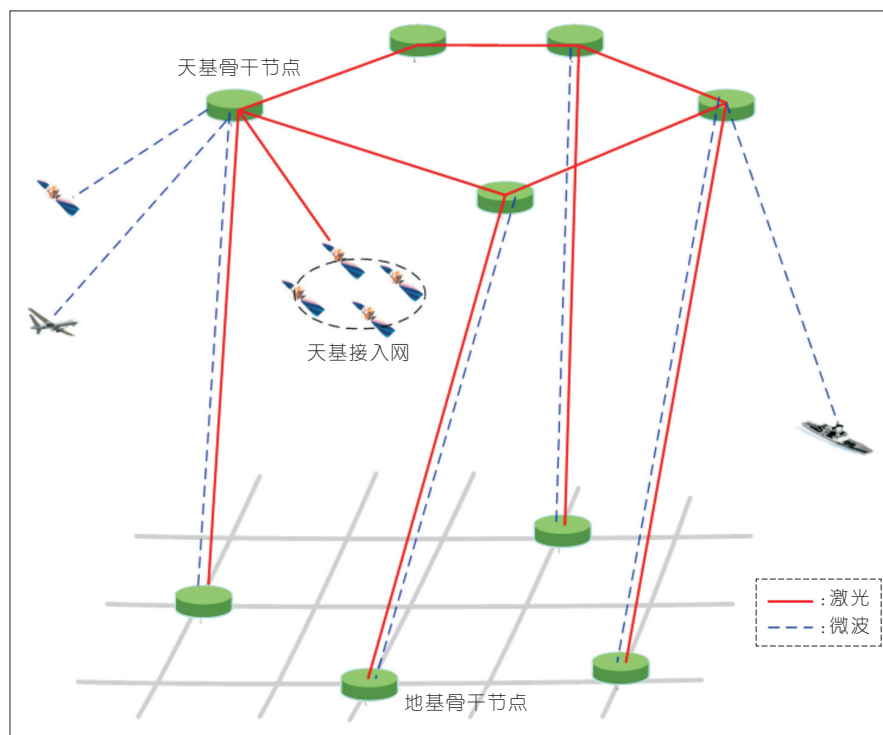
用户段是天基宽带骨干互联系统服务的对象,按照所处位置可以分为天基、空基、海基、路基等,按照服务类型又可分为骨干互连、中继传输、宽带接入等。骨干互连的主要功能是为大型网络节点间提供干线传输服务,服务对象包括地面关口站和大型的网络汇聚节点等;中继传输的主要功能是提供数据中继服务,服务对象是动态性比较强的航天器或航空器;宽带接入的主要功能是为广域范围内的重点用户提供宽带信息服务,服务对象主要包括飞机、高铁、船舶等。

## 2.2 传输体制

天基宽带骨干互联系统涉及到多种传输链路,包括天基骨干节点之间的骨干链路、天基骨干节点与地基骨干节点之间的骨干链路、天基骨干节点与用户间的星地宽带通信链路、天基骨干节点与低轨星座的星间互联链路等,各种链路传输体制需要针

对其空间距离、信道特征、传输容量等链路特性及平台能力等因素综合考虑设计。天基宽带骨干互联系统传输体制如图4所示。

### (1) 天基骨干互联链路



▲图4 天基宽带骨干互联系统传输体制

天基骨干节点间距离在29 000 ~ 68 000 km内变化,链路空间距离跨度大,带来的空间链路损耗也较大,因此可以考虑采用激光链路,最高传输速率不低于5 Gbit/s。

### (2) 天地骨干互联链路

天基骨干节点与地基骨干节点间的距离在36 000 ~ 42 000 km内变化,传输距离大,并且受大气影响,因此可以考虑采用激光/微波混合传输的体制:在大气环境良好时采用激光传输,当大气环境不适于激光传输时改用微波传输,激光传输的速率不低于5 Gbit/s,微波传输的速率不低于622 Mbit/s。

### (3) 星地宽带通信链路

星地链路空间的距离一般在40 000 km左右,自由空间损耗大;另外大气层对激光链路影响较大,星地宽带通信链路主要采用Ka、Ku微波链路,根据天线及卫星平台承载能力,星地链路考虑配置多点波束和相控阵跳变点波束。

### (4) 天基骨干节点与低轨星座的星间互联链路



天基骨干节点与低轨星座的链路主要实现高速的网络互连,传输容量要求高,考虑以激光链路为主,星间最高传输速率不低于5 Gbit/s。

### 2.3 交换体制

从目前中国的外星上交换方式技术发展来看,目前天基宽带骨干互联系统可以参考借鉴的技术实现方式主要有以下两种:分组交换和电路交换。

#### (1) 分组交换

分组交换主要是指基于IP的数据包存储转发方式,需要星上具备较强的处理能力。分组交换具有较好的业务接入能力,对网络拓扑结构变化的适应能力强、带宽资源动态复用/利用率高等优点。对于多波束多端口的复杂交换要求而言,因采用数字技术而复杂度大大降低。与电路交换方式相比,其系统资源利用率更高,信息交换的灵活性提高系统上下行链路可以采用不同的技术体制,有助于对系统进行优化设计,改善系统整体性能。另外星上再生处理避免了上行链路的干扰和噪声累积,可以改善系统误码性能。

#### (2) 电路交换

电路交换主要是指星上透明转发方式,包括微波的信道和子带交换、激光的波长交换等。相比分组交换,电路交换具有交换容量大、格式透明、处理简单、功耗低等优势。随着未来空间激光通信技术的逐渐成熟<sup>[13-15]</sup>,天基骨干网的传输速率将达到10 Gbit/s,交换容量将可以达到100 Gbit/s量级,光交换技术将是实现大容量交换的理想选择。

从不同交换体制特点来看,单一交换方式难以满足多样化应用的需求,因此可以考虑采用一种折中的方案,在星上同时可以支持两种交换方式共存。

• 光交换主要支持骨干节点之间的互连以及大容量节点(比如高分卫星)的接入,实现高速骨干互联和

中继传输功能;

• 分组交换方式主要支持对星间有通信需求的宽带用户,采用与地面网络兼容的路由协议,实现天地一体的路由组网。

### 3 结束语

天地一体化信息网络目前正处于技术研究向工程建设的关键时期,天基宽带骨干互联系统作为其核心,承担着构建中国空间信息基础设施的重任。文章中,我们在总结其他一些国家天地一体化网络系统发展经验的基础上,基于中国国情提出了天地一体化信息网络天基宽带骨干互联系统的初步设想,并从体系架构、传输体制、交换体制等方面展开了重点论述,为后续实际系统的建设提供技术支撑和参考。

#### 参考文献

- [1] 中国互联网信息中心. 第37次中国互联网络发展状况统计报告[R]. 北京: CNNIC, 2016
- [2] 张庆伟. 发展中的中国航天[J]. 中国航天, 2007(8): 3-10
- [3] 国务院新闻办公室. 白皮书: 2011年中国的航天[J]. 中国航天, 2012(1): 6-13
- [4] Union of Concerned Scientists. UCS Satellite Database [EB/OL]. [2016-01-01]. [http://www.ucsusa.org/nuclear\\_weapons\\_and\\_global\\_security/solutions/space-weapons/ucs-satellite-database.html](http://www.ucsusa.org/nuclear_weapons_and_global_security/solutions/space-weapons/ucs-satellite-database.html)
- [5] FLORIO M A, FISHER S J, MITTAL S, et al. Internet Routing in Space: Prospects and Challenges of the IRIS JCTD [C]// in Proceeding of IEEE Military Communications Conference, USA: IEEE, 2007: 1-6. DOI: 10.1109/MILCOM.2007.4455284
- [6] PULLIAM J, ZAMBRE Y, KARMARKAR A, et al. TSAT Network Architecture[C]// in Proceeding of IEEE Military Communications Conference (MILCOM 2008), USA: IEEE, 2008: 1-7. DOI: 10.1109/MILCOM.2008.4753508
- [7] JOHNSON J D, CONNARY J A, THOMPSON J, et al. Internet Routing in Space NMS Architecture[C]// in Proceeding of IEEE Aerospace Conference, USA: IEEE, 2009: 1-11
- [8] ENRIQUE G, CUEVAS H A, ESIEY B H, et al. Assessment of the Internet Protocol Routing in Space—Joint Capability Technology Demonstration [J]. Johns Hopkins APL Technical Digest, 2011, 30(2): 89-102
- [9] 沈荣骏. 我国天地一体化航天互联网构想 [J]. 中国工程科学, 2006(10): 19-30
- [10] 中国计算机协会. CCF 2014—2015中国计算机科学技术发展报告[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015
- [11] 张乃通, 赵康德, 刘功亮. 对建设我国“天地一体化信息网络”的思考 [J]. 中国电子科学研究院学报, 2015, 10(3): 223-230
- [12] 张平, 秦智超, 陆洲. 面向空间信息传输的骨干网络容量模型 [J]. 中国电子科学研究院学报, 2016, 11(1): 67-72
- [13] VINCENT W S. Free-Space Optical Communications [J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(12): 4750-4762
- [14] HOPMAN P, BOETTCHER P W, CANDELL L M, et al. An End-to-End Demonstration of a Receiver Array Based Free-Space Photon Counting Communications Link[C]// in Proceeding of SPIE 6304, Free-Space Laser Communications VI, IEEE: USA, 2006: 1-13. doi:10.1117/12.682845
- [15] SEEL S, KAMPFNER H, HEINE F, et al. Space-to-Ground Bidirectional Optical Communications Link at 5.6 Gbps and EDRS Connectivity Outlook[C]// in Proceeding of IEEE Aerospace Conference, USA: IEEE, 2011: 5-12

#### 作者简介



张平, 中国电子科技集团公司电子科学研究院博士; 主要研究领域为空间信息网络和天地一体化信息网络体系架构; 先后参与国家自然科学基金、“863”项目、“973”项目、工信部战略咨询课题、工程院院士咨询课题等多个项目; 已发表论文10余篇。



秦智超, 中国电子科技集团公司电子科学研究院博士; 主要研究领域为无线传感网和天地一体化信息网络; 先后参与国家自然科学基金、“863”项目、“973”项目、工信部战略咨询课题等多个项目; 已发表论文10余篇。



陆洲, 中国电子科技集团公司电子科学研究院研究员级高级工程师; 主要研究领域为卫星通信系统和天地一体化信息网络; 先后主持和参加基金项目10余项; 已发表论文10余篇。

# 天地一体化生态电磁环境的构建

## Construction of Ecological Electromagnetic Environment in Integrated Space and Terrestrial

姚富强/YAO Fuqiang

(军委装备发展部第六十三研究所, 江苏南京 210007)  
(The 63rd Research Institute of the Equipment Development Department of the Central Military Commission, Nanjing 210007, China)

**类**比自然环境, 电磁环境是指影响各类无线电业务系统运行效果的各种自然要素和人为要素及其相互作用关系的总和。自然环境具有地域及环境资源的不可分割性, 电磁环境同样具有地域和频谱资源的不可分割性, 尤其是远程传输系统所处的电磁环境更是如此。所有无线电业务系统都工作于电磁环境中, 电磁环境的好坏成为一个国家电磁制衡能力的重要组成部分。

不幸的是, 与自然环境产生雾霾现象类似, 当今电磁环境也持续恶化, 出现了“电磁雾霾”现象<sup>[1-2]</sup>。例如: 几十年前, 几瓦、十几瓦的短波电台可通几百、几千千米, 而在通信技术、频率预报技术和器件技术等高度发达的今天, 由于相同频段、不同系统间非合作频率竞争伴随功率竞争形成无意干扰, 造成短波电磁环境人为背景噪声逐年上升<sup>[1-2]</sup>, 短波业务系统与电磁环境之间形成恶性循环, 使得几百瓦甚至数千瓦的短波电台反而通不好, 教训极为深刻。其他频段和场合可能也有类似问题, 但远程传

输系统的影响范围更大, 问题更突出, 比如: 有些卫星通信系统与地面宽带移动通信系统<sup>[3]</sup>处于相同或相邻频段, 其用频必然造成冲突和人为背景噪声上升, 如果不提前规划和采取有效措施, 地面和近空的电磁环境污染会向空间扩展, 犹如自然环境中的“人到哪污染到哪”, 将严重影响天地一体化信息网络的正常运行和效能发挥。同时, 随着“网络电子战”态势的形成, “网络电磁行动”<sup>[4-5]</sup>由军队行动向国家行为扩展, 中国电磁环境还存在严峻的人为恶意破坏等的安全威胁。

全球已建设电磁环境无线电噪

声监测网络, 也颁布了相应的测试标准, 但对于电磁环境恶化的原因和如何改善电磁环境等问题一直未见研究报道。

### 1 电磁环境恶化的原因

在拥有所需频谱资源前提下, 影响无线电业务系统性能的主要要素有无线电技术和电磁环境。电磁环境主要由自然因素和人为要素构成。自然要素是难以改变或抗拒的, 但人为要素是人类自己产生的, 也是可以改变和控制的。人为要素主要与频谱管理模式和人类用频的方法有关。

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2016) 04-0029-005

**摘要:** 提出了生态电磁环境新概念, 即和谐、高效、绿色、安全电磁环境的总和, 同时提出了构建天地一体生态电磁环境的基本机理、模型与方法以及需突破的关键技术。认为构建和谐、高效、绿色和安全的天地一体化生态电磁环境研究是一项关系到中国未来信息网络健康发展的重大课题, 对于国家利益拓展、国防建设等具有战略意义。需要拓展研究思路, 树立生态电磁环境科学发展的理念。

**关键词:** 天地一体化信息网络; 电磁环境; 抗干扰; 电磁频谱安全; 电磁频谱管理

**Abstract:** In this paper, the new ecological electromagnetic environment, including harmonious, efficient, green and safe electromagnetic environment is proposed. Then the basic mechanism, model and method, and key technologies needed to break through of ecological electromagnetic environment of integrated space and terrestrial have also been proposed. Building ecological electromagnetic environment of integrated space and terrestrial is an important issue in China, for it has strategic significance in the development of national interests, national defense construction and so on. We need to expand our research ideas, and establish the concept of the scientific development of ecological electromagnetic environment.

**Keywords:** information network of integrated space and terrestrial; electromagnetic environment; anti-jamming; electromagnetic spectrum security; electromagnetic spectrum management

收稿时间: 2016-05-15  
网络出版时间: 2016-07-08

(1) 现行频谱管理模式与电磁环境的关系

频谱管理经历了“先占先得”的登记式管理到国际《无线电规则》框架下协调式管理的发展历程<sup>[6]</sup>。传统或现有频谱管理模式主要内容有:在充分协商的前提下,通过平衡各方利益,制定和修订《无线电规则》,工作重点是按业务进行固定频率划分,以此维护无线电频率使用秩序。所谓固定频谱划分<sup>[6]</sup>,就是将大部分频段作为授权频段,让授权用户在给定区域内对该频段具有长期的绝对排他使用权;同时,保留一些非授权频段允许非授权竞争使用。

固定频谱划分存在的主要问题是:难以适应各种军民无线电设备对频谱爆炸式增长的需求。例如,对某种业务进行固定频谱划分后,由于频谱资源有限,在某些区域甚至全球又难免与其他业务系统的频谱存在重叠。又由于不同系统的用户数量在不断增加且缺乏系统间的频谱协调机制,势必造成工作频率非合作竞争冲突。所以,固定频谱划分限制了频谱机动自由,使得有些远程业务系统实际上被迫采用非合作竞争用频方式,可能成为电磁环境主要互扰噪声来源。

同时,国际《无线电规则》中对无线电设备带外域和杂散域无用发射的规定<sup>[8-9]</sup>,也直接影响到电磁环境。例如,《无线电规则》对于无线电设备的无用发射主要规定了相对或固定衰减限值,没有针对远程中、大功率无线电传输特性,做出无用发射功率限值的专门规定,使得无用发射随着用频发射的增大而增大,可能成为电磁环境重要互扰来源,从而干扰其他短波用户的工作频率。

(2) 当前主要用频方式与电磁环境的关系

在国际《无线电规则》框架下,当前无线电业务系统主要用频方法有:频率自适应、认知无线电、分集和增大发射功率等。存在的主要问题有:

频率自适应技术只考虑系统自身选频,不顾及其他同频段用户;认知无线电技术仍存在不同系统间的同频竞争和二次频率竞争<sup>[7]</sup>;分集技术在同时采用多个天线分集发射时,会增加额外频谱污染;增大发射功率的使用方法除了在竞争频率上直接形成干扰外,发射机带外域、杂散域无用发射随之增大<sup>[8-9]</sup>,在提高自身主频信噪比的同时,背景噪声升高,使更多用户遭受影响,即业务系统与电磁环境之间形成恶性循环。

分析表明:现行频谱管理模式和人类用频方法均对电磁环境产生不同程度的负面影响,主要表现在非合作频率竞争伴随功率竞争和无用发射均增加人为噪声干扰。以上主要分析结论已在短波电磁环境实际测试中得到验证<sup>[1-2][8-9]</sup>。

## 2 电磁环境面临的挑战

根据以上分析和验证,在新的历史时期,尤其在构建天地一体化和地面远程信息网络背景下,中国电磁环境面临如下严重挑战:

(1) 电磁环境不和谐。在固定频率划分框架下,频谱需求与频谱资源矛盾愈加突出,造成越来越多的同频段合法用户用频冲突不断发生和性能下降。

(2) 电磁频谱不高效。频率冲突引起频谱资源低效利用,且固定频率划分又造成部分可用频率闲置,同时业务与频率固定难以做到电磁环境自适应。

(3) 电磁环境不绿色。为提高自身信噪比,大量业务系统增大发射功率,无用发射随之增大,电磁环境背景噪声和系统功耗升高、环境信噪比下降。

(4) 电磁环境不安全。在网络电子战威胁下,智能干扰、灵巧干扰、诱骗干扰和网络入侵等人为恶意攻击以及侦察、监视等手段技术水平不断提高。

当前的固定频谱管理模式和“只

顾自己不顾别人”的用频方式,不能从根本上解决以上问题。面对挑战,需要跳出传统发展思路的框框,树立大环境、大管理、大服务的理念,构建和谐、高效、绿色和安全的生态电磁环境的新理论、新思路和新方法,逐步明确发展之路。

## 3 生态电磁环境的基本概念

如同人类需要生态自然环境一样,无线电业务系统同样需要生态电磁环境。以前的无线电业务系统设计与使用主要考虑自身的业务种类和抗干扰等需求以及基于业务的固定频谱管理模式等,很少考虑频谱使用和单系统性能、功能设置等要素与所处电磁环境相互作用的关系。

### (1) 和谐电磁环境

和谐电磁环境是指各无线电业务系统的频率、功率等要素之间相互合作的电磁环境,个体与环境之间形成良性的循环,而非只顾自己、不顾别人。

### (2) 高效电磁环境

高效电磁环境是指频谱利用率高的电磁环境<sup>[10]</sup>,实现“频谱无处不在”、“泛在频谱”和电磁环境自适应,不仅仅是追求用户个体频谱利用率高。

### (3) 绿色电磁环境

绿色电磁环境是指信噪比高、背景噪声低的电磁环境,这要求各种无线电业务系统无用发射功率低,且能耗低。和谐、高效均有利于形成绿色电磁环境。

### (4) 安全电磁环境

安全电磁环境是指各类电磁活动能够正常拥有和使用电磁频谱,而且其秘密电磁频谱信息不被窃取和利用的电磁环境<sup>[11-12]</sup>。安全电磁环境属于对抗范畴。

### (5) 几个基本概念之间的关系

和谐、高效、绿色电磁环境之间不是独立的,是相互联系的,侧重点各有不同,和谐、高效、绿色电磁环境的构建有利于安全电磁环境的形



成。基于此,文章将和谐、高效、绿色、安全电磁环境的总和称为生态电磁环境,其目的是用户个体与电磁环境形成良性循环,具有自调节、自恢复等能力。

#### 4 电磁环境“外部不经济”现象建模

自然环境是指与人类密切相关的,影响人类生活和生产的各种自然要素和人为要素及其相互作用的总和。影响自然环境的自然要素主要有天象(宇宙、太阳、月球等)、气象(雨、雪、雾、风、雷电、云层、水汽等)、地理(地质、地形、地貌、植被、河流、建筑物等);影响自然环境的人为要素主要有工业污染和生活污染等。某一区域自然环境的评价指标主要包括生物丰度、植被覆盖、水网密度、土地胁迫、污染负荷等,其整体状况可由各评价指标加权后的综合指数描述。

类比自然环境,影响电磁环境的自然要素主要有天象(太阳、天电、电离层等)、气象(雨、雪、雾、风、雷电、云层、水汽等)、地理(地质、地形、地貌、植被、地物、建筑物等);影响电磁环境的人为要素主要有工业噪声干扰、集合无意辐射、用频活动(如天地一体和短波等远程传输系统间同频竞争、中大功率台(站)无用发射形成的无意干扰)等。电磁环境的评价指标主要包括污染负荷类指标(噪声电平或噪声系数、频率-时间占用度等)和环境利用类指标(频谱利用率、误码率、可通率、目标检测概率等),电磁环境整体状况可由各评价指标加权后的综合指数描述。

在经济学中,“外部不经济”主要指某些经济主体因其他经济主体的行为而受到不利影响且又不能从造成不利影响的主体获得应有补偿的经济现象<sup>[7][13]</sup>,其根源在于地域及环境资源的不可分割性。某些国家和地区的经济、行业发展与自然环境恶化之间的矛盾属于典型的

“外部不经济”问题。显然,经济活动中的外部不经济行为破坏了自然环境。与此类似,在相同或相邻频段时,远程传输电磁环境具有典型的地域和频谱资源不可分割性,在频谱资源有限和业务用户不断增加的情况下,加上人为要素的负面影响,也同样受到外部不经济现象的困扰,使得所处电磁环境持续恶化。

运用外部不经济原理,远程传输电磁环境的外部不经济现象可以建模为<sup>[7][13]</sup>:

$$F_j = F_j(X_{ij}, \dots, X_{nj}, X_{ik}, \dots, X_{mk}) \quad (j \neq k) \quad (1)$$

公式(1)中,  $F_j$  表示某单一远程传输系统 A 利用频率  $f$  运行的效用函数,它受制于一系列的自然要素  $(X_{ij}, \dots, X_{nj})$ ,以及可能对其造成影响的一系列人为要素  $(X_{ik}, \dots, X_{mk})$ ,这些人为要素也称为用频活动中的外部不经济行为,它们对所处电磁环境产生了负面影响,降低了远程传输系统 A 的效用函数,系统 A 是“外部不经济”结果的接受者,即

$$\partial F_j / \partial X_{ik} < 0 \quad (1 \leq i \leq m) \quad (2)$$

类比自然环境外部不经济现象,结合以上模型,远程传输电磁环境的外部不经济现象具有非市场调节性、非故意破坏性、强迫性、累积性、相互性等特征。

与外部不经济相反,“外部经济”是指某些经济主体因其他经济主体的良好行为而受到有利影响且又无需付出额外成本的经济现象。因此,将外部经济的自然环境称为生态自然环境,即有利于人类和各种生物及其种群之间和谐相处的各种人为要素及其相互作用关系的总和,可由自然环境综合指数判定是否满足生态自然环境要求。与生态自然环境概念类比,可进一步将生态电磁环境理解为外部经济的电磁环境,即有利于各种无线电业务系统运行的各种人为要素及其相互作用关系的总和,可由电磁环境综合指数判定是否满足

生态电磁环境要求。

### 5 构建生态电磁环境基本机理与方法

#### 5.1 数学模型

科学界在研究生态环境的过程中,为从不同角度刻画生态系统及其变化规律,建立了数学生态学,产生了诸多数学模型<sup>[14]</sup>,如 Lotka-Volterra 模型和生态平衡方程、竞争系统模型、互利系统模型、随机动力学模型等,其中的随机动力学模型可以用于研究刻画生物种群(群落)生灭、平衡的变化规律、制约关系、改良和控制等。生态系统及生态环境研究的数学成果<sup>[14-15]</sup>已在其他领域得到广泛应用,如金融生态环境、生态经济学等。也可以通过移植和映射等方法,研究电磁环境中的类生态特性,刻画无线电业务系统用频与电磁环境之间的相互作用关系。

设  $\psi^0 = \psi^0(v^0, x^0, \Sigma^0, f^0)$  为原模型,其中,  $v^0$  为系统初始外部环境,  $x^0$  为原系统内部组成,  $\Sigma^0$  为原系统内部结构,  $f^0$  为原系统功能。 $\psi(t) = \psi(v(t), x(t), \Sigma(t), f)$  为一新模型,其中  $v(t)$  为系统外部环境,  $x(t)$  为系统内部组成,  $\Sigma(t)$  为系统内部结构;  $f$  表示系统功能。原模型通过映射  $\eta(t)$  变换成新模型  $\psi(t)$ , 表示为:

$$\eta(t): \psi^0 \rightarrow \psi(t) \quad (3)$$

上述模型映射  $\eta(t)$  可以分解为近似映射  $g(t)$ 、同态映射  $h(t)$  乘积。

生态数学模型作为一种重要的生态学研究方法,在解释生态现象,描述生态系统物质、能量、信息、价值流向等生态变化过程,揭示生态系统内在规律,预测生态变化趋势,定向调控和优化管理生态系统等诸多问题中,都发挥了巨大作用。研究生物发展变化的常用数学生物学模型是生物群落动力学模型方程<sup>[14]</sup>:

$$dx/dt = b(x, t) + \sigma(x, t)\xi \quad (4)$$

公式(4)中  $x=(x_1, \cdots, x_n)$  表示群落中相互作用各种群大小构成的向量, 其中  $n$  为种群数量;  $b(x, t)$  是偏差函数向量, 对应于各种群大小的确定性成分;  $\sigma(x, t)$  是随机波动强度向量;  $\xi$  是白噪声向量, 是简单扩散 Wiener 过程的导数。

研究物种退化问题时, 公式(4)可以变化为 Volterra 群落退化问题<sup>[14]</sup>:

$$dx/dt = x^*Ax + \xi \quad (5)$$

公式(5)中,  $x^* = \text{diag}[x_1^*, \cdots, x_n^*]$  是正平衡状态的对角矩阵,  $A = (a_{ij})$  为群落矩阵,  $\xi = \sigma(x, t)\xi$  为噪声项。

在研究生态平衡时, 有生态平衡方程。通常, 生物群落有 3 种基本变量<sup>[14]</sup>:

- 生产者, 其生物量为  $x_i$   
( $i = 1, 2, \cdots, m$ ;  $m$  为生产者总数);
- 消费者, 其密度为  $y_j$   
( $j = 1, 2, \cdots, n$ ;  $n$  为消费者总数);
- 分解者, 其浓度为  $c_k$   
( $k = 1, 2, \cdots, p$ ;  $p$  为分解者总数)。

反映质量守恒定律的生态平衡方程可以写为<sup>[14]</sup>:

$$\begin{cases} \frac{dx_i}{dt} = (F_i^j - D_i^j)x_i - \sum_{j=1}^n V_{ij}y_j + R_{ix}, & i = 1, 2, \cdots, m \\ \frac{dy_j}{dt} = (F_j^i - D_j^i)y_j - \sum_{i=1}^m V_{ji}x_i + R_{jy}, & j = 1, 2, \cdots, n \\ \frac{dc_k}{dt} = \sum_{j=1}^n U_{kj}y_j - \sum_{i=1}^m W_{ki}x_i + R_{ck}, & k = 1, 2, \cdots, p \end{cases} \quad (6)$$

公式(6)中,  $F_i^j$  和  $D_i^j$  分别是生产者和消费者的出生率和死亡率;  $V_{ij}$  为第  $j$  类生物消费第  $i$  类生物的消费函数;  $W_{ki}$  为第  $i$  类生产者吸收  $k$  类养分的消费函数;  $U_{kj}$  为第  $j$  类消费者被分解为  $k$  类养分的生产强度,  $R_{ix}$ 、 $R_{jy}$ 、 $R_{ck}$  分别是与 3 种组分相对应的出入流量的总和。

以上这些数学生态学模型, 已经从生态学抽象成数学, 可以应用于各种类生态模型中。由于电磁环境恶化主要是由人为造成的, 是可逆的, 电磁环境也是一种类生态环境, 因此可利用上述模型, 通过公式(3)的映射关系, 映射到生态电磁环境中, 用于研究不同无线电业务系统的发展变

化, 包括电磁环境控制与还原措施。

## 5.2 生态电磁环境的稳定性

生态系统中稳定性的定义有多种, 普遍采用的定义是以俄国数学家 A. M. Lyapunov 的名字命名的 Lyapunov 稳定性<sup>[15]</sup>。假设微分系统为:

$$\frac{du_i}{dt} = f_i(u_1, u_2, \cdots, u_n) \quad (7)$$

$u^* = (u_1^*, u_2^*, \cdots, u_n^*)$  是它的平衡点或稳定状态, 即满足方程  $f_i(u_1^*, u_2^*, \cdots, u_n^*) = 0$ 。

$$\|u(t, u_0) - u^*\| < \varepsilon \quad (8)$$

对一切  $t \geq t_0$  成立, 则称  $u^*$  是局部 Lyapunov 稳定的, 这里  $u(t, u_0)$  是相应于初值  $u_0$  的解。进一步, 如果当  $t \rightarrow +\infty$  时, 有  $u(t) \rightarrow u^*$  成立, 则  $u^*$  是渐进稳定的; 如果对于任何初值函数都成立, 则  $u^*$  是全局渐近稳定的。反之, 如果  $u^*$  不是局部稳定的, 则称  $u^*$  是不稳定的。通过上述定义和公式(3)的映射关系, 公式(8)也可以用于研究远程传输电磁环境的稳定性及其判断。

## 6 需突破的关键技术

要实现文中提出的构建天地一体化生态电磁环境的思路和模型, 在利用有关已有技术基础上, 需突破一些具有原始创新的关键技术。

### (1) 天地频率共享技术

天地频率共享是构建和谐、高效电磁环境的基本要求。由于天地一体化信息网络具有地域不可分割性, 在天地频段相同或相邻条件下, 还具有频谱资源不可分割性。因此, 不仅单个用户的发射可能对大范围内的其他用户接收机形成干扰, 而且随着用户数量的不断增加, 处于相同频率、不同地理位置的用户相互作用, 共同影响电磁环境。因此, 要实现天地频率共享, 需要将非合作竞争转化为合作竞争, 建立相应的数学模型, 分析不同用户之间频率、功率、节点

和范围等多元要素的关联性, 并研究其实现技术。

### (2) 降低无用发射技术

降低无用发射功率是构建绿色电磁环境的内在要求和必由之路。在当时无线电技术水平和器件工艺制约条件下, 现行国际《无线电规则》有关条款<sup>[18,19]</sup>对无线电设备无用发射主要做出了相对衰减或固定衰减的限值规定。根据新的发展需求, 首先要根据必要带宽、带外域和杂散域的定义和计算方法, 建立无用发射功率分布模型, 解决无用发射是否合理的评判问题; 其次, 利用全数字发信机的最新成果<sup>[16]</sup>, 发挥数字射频功放在高效率和高线性等方面的优势, 进一步降低无用发射功率限值。

### (3) 天地频谱服务技术

频谱服务技术作为构建和谐、高效、绿色电磁环境的纽带, 需要在天地一体化系统中开发和应用。所谓频谱服务, 是一种基于 Web 的分布式决策的、新的频谱管理模式<sup>[7]</sup>, 也是一种频谱接入模式。用频决策权在用户, 用户能实时获取所需频率和接入等服务, 用户数量几乎不受限制, 响应速度也几乎不受用户数量的影响。预示着频谱资源从预先划分、冲突协调的静态管理模式, 走向政策推动、按需接入、自主决策的动态资源共享与服务模式, 频谱使用从单网独占模式, 走向多网共用开放式模式。

### (4) 频谱安全控制技术

电磁频谱安全与控制是构建安全电磁环境的核心, 主要在对抗条件下使用。电磁频谱安全是指应对频谱资源争夺与占用威胁的电磁频谱战略性安全, 应对电磁干扰与限制威胁的电磁频谱可用性安全和应对侦察监视与利用威胁的电磁频谱保密性安全等<sup>[11-12]</sup>。电磁频谱安全控制是指规避或降低电磁频谱安全风险所需的预测、监测、评估、协调和处置等控制活动<sup>[11-12]</sup>。面对网络电子战的新威胁, 该项内容对于建设大型远程信息系统尤为重要, 以确保天地一体化

信息网络在对抗条件下的电磁环境安全。

## 7 发展建议

(1) 构建军民融合天地一体化信息网络体系

未来天地一体化信息网络是一个复杂系统工程,为使其正常运行和发挥更大的使用效益,从需求论证、总体设计到技术开发、系统运行,都需要贯彻军民融合、军民共用和资源整合的指导思想,避免军民各自建设。美国的全球定位系统(GPS)和“铱”系统等就是很好的例证。

(2) 加强天地一体化信息网络的完整性设计

理论和实践表明,一种巨型信息系统的设计,除了业务类型和服务范围等基本要素外,需提前考虑所需的频谱和轨道资源?如何做到频谱可用?如何降低频谱信息被窃取的风险?即电磁频谱战略性安全、可用性安全和保密性安全<sup>[11-12]</sup>,从而构建生态电磁环境。

(3) 推动天地一体化生态电磁环境专项研究

构建天地一体化生态电磁环境是一项探索性、理论性和先导性很强的研究工作,涉及范围广,需求迫切,难度很大,要做好长期打攻坚战准备。建议相关主管部门引起高度重

视,尽快开展立项论证和研究工作,以破解电磁环境恶化的难题,争取战略主动权。

## 8 结束语

构建和谐、高效、绿色和安全的天地一体化生态电磁环境研究是一项关系到中国未来信息网络健康发展的重大课题,对于国家利益拓展和国防建设具有战略意义,涉及的关键技术可能具有颠覆性、前沿性和广域性。我们要拓展研究思路,树立生态电磁环境科学发展的理念。

### 致谢

本文得到赵杭生、张建照、刘忠英、柳永祥、张余等专家和杨健、曹龙等博士生的大力支持,在此一并表示感谢!

### 参考文献

- [1] International Telecommunication Union. Technical and Operational Principles for HF Sky-wave Communication Stations to Improve the Man-made Noise HF Environment (ITU-R 258/5)[S]. Switzerland: ITU, 2015
- [2] 姚富强, 刘忠英, 赵杭生. 短波电磁环境问题研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 10(2):156-161
- [3] 工业和信息化部无线电管理局. 2012年世界无线电通信大会工作总结汇编[R]. 北京: 工业和信息化部无线电管理局, 2012
- [4] Headquarters Department of the Army. USA. FM 3-38 Cyber Electromagnetic Activities [S]. 2014
- [5] DARPA. Behavioral Learning for Adaptive Electronic Warfare: DARPA-BAA-10-79[S/

- OL]. <http://www.fbo.gov>. 2010.7
- [6] International Telecommunication Union. Radio Regulations [S]. Switzerland: ITU, 2015
- [7] 姚富强, 赵杭生. 宽频带生态电磁环境技术研究可行性论证 [R]. 2015
- [8] International Telecommunication Union. Unwanted Emissions in Spurious Domain: Rec. ITU-R SM.329-12 [S]. Switzerland: ITU, 2012
- [9] International Telecommunication Union. Unwanted Emissions in out-of-band Domain : Rec. ITU-R SM.1541-5 [S]. Switzerland: ITU, 2013
- [10] 姚富强, 张建照, 柳永祥, 等. 动态频谱管理的发展现状与应对策略分析[J]. 电波科学学报, 2013, 28(4):794-803
- [11] 姚富强, 张余, 柳永祥. 电磁频谱安全与控制 [J]. 指挥与控制学报, 2015, 1(3): 278-283
- [12] 姚富强, 柳永祥, 张余, 等. 电磁频谱安全与控制技术-2014-2015指挥与控制科技发展报告[MI]. 北京: 科学技术出版社, 2016
- [13] SMITH R L. Elements of Ecology [M]. New York: Harper and Row Publishers, 1986
- [14] 林支桂. 数学生态学导引[M]. 北京: 科学出版社, 2015
- [15] MAY R, MCLEAN A. 理论生态学—原理与应用(第三版)[M]. 陶毅, 王百桦译. 北京: 高等教育出版社, 2010
- [16] 姚富强. 新一代无线电台数字射频核心技术研究与工程实践[J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 44(8): 965-979

### 作者简介



姚富强, 军委装备发展部第六十三研究所研究员、博士生导师, 中国指挥与控制学会电磁频谱安全与控制专业委员会主任委员; 主要从事通信系统与关键技术等科研工作, 研究方向为通信抗干扰、电磁频谱安全; 已获国家科技进步二等奖和部委级科技进步奖多项; 拥有中国发明专利 20 余项, 出版专著 4 部, 发表论文 130 余篇。

## 综合信息

### 全球移动视频市场规模将在 2021 年达 250 亿美元

Strategy Analytics 最新研究报告《2010—2021 年全球移动视频预测》指出, 全球移动视频市场规模将在 2021 年达到 250 亿美元, 届时广告投入将驱动三分之二的移动视频总市值。

报告评估了 2010—2021 年间全球主要区域的移动视频用户数和移动视频收益规模。移动视频收益按商业模式划分, 包括销售、租赁、订阅和广告费赞助。

Strategy Analytics 无线媒体战略分析师石伟表示: “移动视频收益最大的增长将来自广告赞助, 这是由于

用户与日俱增的视频消费为广告商提供了机遇。未来 5 年移动视频广告收益的年复合增长率将达到 28%。”

无线媒体战略研究总监 Nitesh Patel 补充道: “尽管用户的移动视频消耗正在增加, 但广告商在移动视频上的投入尚未赶上用户收看移动视频的增长。此外, 移动视频服务的新模式, 如一些视频直播平台在盈利前正着手吸引更多的用户。当前, 社交媒体利用在线视频直播形式提高用户参与度, 同时延长用户在社交媒体上的消耗时间, 我们预计收益将会随之而来。”

(转载自《中国信息产业网》)



# 天基网络动态接入技术现状与趋势

## Dynamic Access Technology for Space-Based Network: Situation and Development Trend

贾敏/JIA Min

高天娇/GAO Tianjiao

郑黎明/ZHENG Liming

郭庆/GUO Qing

(哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150080)  
(Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2016) 04-0034-005

**摘要:** 认为天基网络将由单一向多层结构发展; 通过业务驱动空间资源分配和调用, 可实现天基骨干网动态接入, 满足高速率、高带宽、高可靠性等业务需求; 运用激光技术能辅助解决远距离、高速率传输的问题。此外, 还比较了现有的多种无线通信多址接入方式, 指出了天基网络动态接入技术发展面临的挑战。

**关键词:** 天基网络; 接入; 动态; 趋势

**Abstract:** Multi-level network will be the main structure of space-based network. Allocation and call of space resources, which is driven by business, can realize dynamic backbone network access and meet the business requirements, such as high rate, high bandwidth, high reliability, etc. Laser technology helps to solve the problem of long distance and high rate transmission. Moreover, we compare the existing wireless multiple access methods and point out the major challenges to realize space-based network access.

**Keywords:** space-based network; access; dynamic; trend

随着信息共享无缝覆盖需求的日益增长和多种业务需求的急剧增加, 现有地面无线通信系统已然无法满足要求。在商业需求和军事需求的双重影响下, 天地一体化信息网络概念模型应运而生, 因此天基网络相关概念及技术的研究就变得尤为重要。

### 1 天基网络概述

由于业务需求日益增大, 业务种类逐渐丰富, 未来的天基信息网络将由不同轨道高度的卫星组成, 如地球同步轨道(GEO)卫星、低轨道(LEO)卫星、中轨道(MEO)卫星、高轨道(HEO)卫星等。同时针对不同的业务类型, 天基网络的主要业务承载体将由中继、遥感、通信、导航定位等卫星系统及高空平台和飞行器组成。根据空间信息资源的最大有效综合利用原则, 构成有机的、功能完备的智能化网络体系, 即天基综合信息

网, 如图1和图2所示。

### 2 天基网络动态接入技术现状

#### 2.1 天基网络研究现状

美国的发展水平处于世界领先地位, 在进入空间和利用空间领域里具有绝对技术优势, 拥有完整的天基侦察、预警、通信系统, 并在继续发展新技术以满足未来的探测、覆盖、通信、目标特性及定位精度的需求<sup>[1]</sup>。几种具有代表性的美国军事卫星系统为: 窄带通信能力—移动用户目标系统(MOUS), 保密通信能力—先进极高频卫星系统(AEHF), 宽带通信能力—“宽带全球卫星通信”系统(WGS), 数据中继能力—跟踪与数据中继卫星系统(TDRSS), 星际组网能

力—转型卫星通信系统(TSAT)。

经过几十年尤其近年来的发展, 中国在天基信息系统建设方面取得了巨大的进步, 已初步建立了卫星群路通信网, 甚小口径天线地球站(VSAT)卫星通信网, C频段卫星测控网, S频段航天测控网, 战术移动通信系统等多个空间通信网系, 在轨和在研的卫星种类不断增加, 载荷类型和功能也日臻完善。“东方红”系列卫星, 以“北斗”为首的定位导航卫星系统, 以“天链”为首的中继卫星系统, 甚至哈尔滨工业大学近几年发射的小卫星—紫丁香卫星, 无不象征着中国卫星通信的飞速发展。但由于空间技术发展的历史问题和战术应用卫星的特殊性, 总的来说, 当前中国的天基信息系统在发展理念和规模、理论和技术水平以及应用层度和深

收稿时间: 2016-05-02

网络出版时间: 2016-06-16

基金项目: 中国工程院重大咨询研究项目(2016-ZD-07);

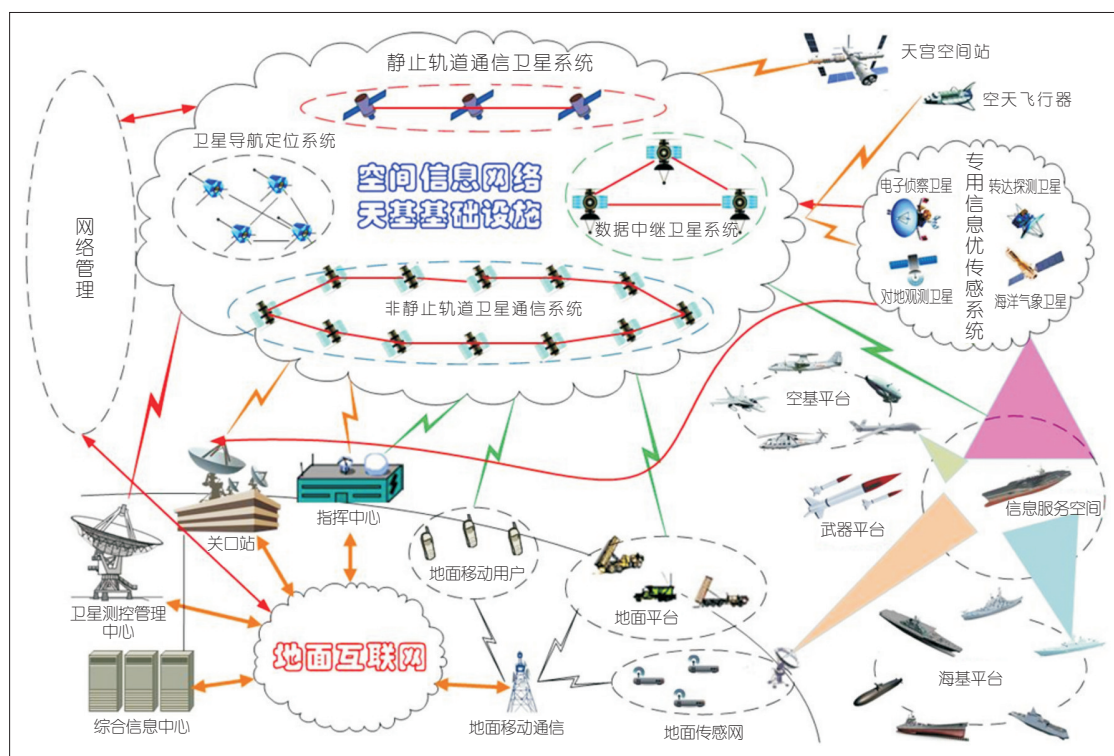


图1  
天基网络示意

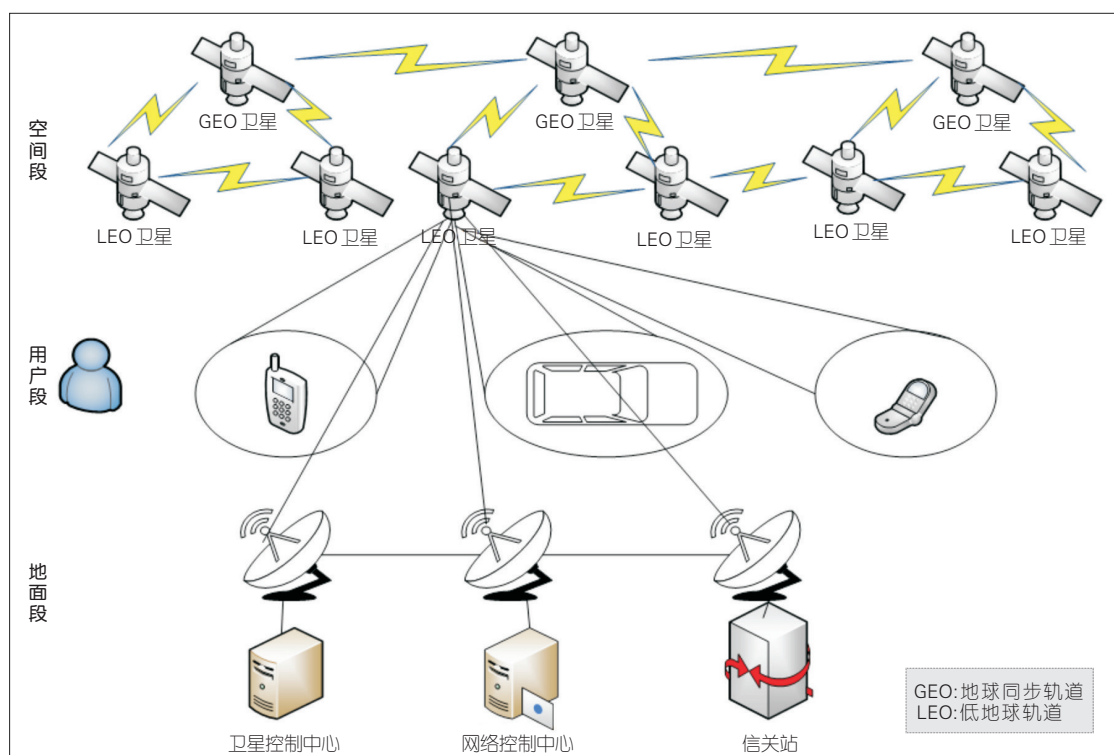


图2  
空间和地面的整体组成

度仍然面临很多问题。

## 2.2 接入技术研究现状

接入控制属于无线资源管理

(RRM)的范畴。RRM技术直接关系到移动用户的服务质量和通信系统的性能,其功能是为需要通信的用户选择一个合适的卫星波束,以及在波

束中分配信道,确定用户以及卫星的发射功率等<sup>[2]</sup>。

美国在20世纪末成功部署了TDRSS,其中,多址接入技术是TDRSS

的重中之重,发展演变历程共有3个阶段:

(1)第一代TDRSS系统的多址体制为空分多址(SDMA)结合码分多址(CDMA)方式,星上采用一个S频段多址相控天线,具有30个阵元,全部用作接收阵列,发射阵列由其中的12个具有收发双工性能的阵元承担,在通信过程中,只需24个接收阵元、8个发射阵元即可达到TDRSS通信要求<sup>[9]</sup>。其中,每个波束的用户采用基于伪噪声(PN)的码分多址技术,最大速率可达到50 kbit/s。其空分多址的波束形成是在地面完成的,各个天线单元接收到反向链路的信号,经过低噪放等处理过程送给星上处理器,并将信号频分复用(频点间隔设置为7.5 MHz)后形成中频信号,再通过上变频处理将信号从K频段传输下去送给地面基站,在地面接收到多个阵元的信号进行波束形成。

(2)第二代TDRSS系统星上采用的多址天线为S频段六角形相控阵模式,且因为星上形成波束,天线增益提高约6 dB,反向链路为32条,前向链路为15条,系统增强了多址业务反向能力,占用2.0~2.3 GHz波段进行多址访问,前向链路数据传输率为300 kbit/s,并能以传输速率3 Mbit/s同时接收5个用户星的信息<sup>[4]</sup>。

(3)空天信息网络第三代TDRSS完成了空间对接、高覆盖率和返回着陆等方面的卫星测控任务,并能够做到对于图像信号的实时传输,关于其多址链路技术,最近美国提出了按需接入的第三代中继卫星地面合成方案,第三代多波束合成方案采用地面接收数字波束合成(DBF)技术,可满足更多用户按需接址的通信要求<sup>[5]</sup>。

Hiroki Nishiyama和Daigo Kudoh等人总结了不同的路由协议,并对其进行了分析<sup>[6]</sup>。在多层卫星路由中,卫星链路状态信息发送到GEO并更新卫星的路由表并发送给LEO卫星和MEO卫星传输到GEO卫星。通过采用集中控制机制,不仅可以最小化生

成路由表的时延,而且减少了信令传输和路由计算的开销。MEO和LEO卫星星座双层网络的一种路由协议为卫星组路由协议(SGRP)中,MEO和LEO卫星星座的作用是分开的,通信流量只通过LEO卫星发送,MEO卫星负责路由控制、卫星组网等网络管理工作。

为了提高性能,降低切换请求到达率,同时考虑到低轨卫星通信的特点,文献[7]首先提出了多星覆盖下接入的三种策略,即距离优先、覆盖时间优先和仰角加权覆盖时间优先。

由于全球业务分布不均匀,为了避免部分卫星负荷过载,文献[8-9]提出融合最短距离策略、最长服务时间方案和最多空闲信道方案,并得到对新呼叫使用最多空闲信道方案及对切换呼叫使用最长服务时间方案能取得更好的系统性能的结论。文献[10]针对具有均匀分布特性的Walker星座系统的卫星选择策略进行研究,进而提出了五种准则:即可视时间准则、卫星信道负荷准则、仰角准则、满足信道负荷要求的可视时间准则和早期信道释放可视时间准则,并对其几种组合进行了仿真分析。文献[11]利用多普勒频移效应及卫星几何关系求出卫星发生切换的时间和位置,通过计算终端位置,提供通信服务的卫星就可以导出目的卫星并进行信道资源的预留,这样就能为切换呼叫提供一定的服务质量(QoS)保证。文献[12]基于采用可变量目的保护信道,提出一种自适应信道预留策略。文献[13]基于用户地理位置来估计切换可能发生的次数,提出自适应信道分配策略。

### 3 天基网络动态接入技术发展趋势

传统接入方式在很多情况下都有自身的缺点,容易造成信道资源的浪费或者端到端时延的增大,特别是用户处于高速移动的过程中,业务收发需要通过卫星进行传送。实际应

用中的上下行链路带宽、误码率、发射速率也会造成一定的条件限制<sup>[14]</sup>。

#### 3.1 单层网络到多层网络

不同轨道高度卫星网络中的卫星节点的动态性将造成卫星网络的拓扑结构产生变化,因此,卫星网络是一种动态网络。不同轨道高度的卫星可提供的服务差异很大。

单层卫星动态网络主要是由单一轨道的不同高度的卫星所构成。单层卫星网络暴露出很多缺点,比如时延指标过高、网络阻塞概率大、网络抗毁性差。多层结构的卫星动态网络是由不同轨道的卫星所组成。在时延、网络阻塞、网络抗毁性等方面,多层结构的卫星动态网络比单层卫星动态网络<sup>[15]</sup>具有更优越的性能。为实现全球范围内的信息共享,天基网络将由不同高度轨道的卫星组成,以满足天基信息网的要求。

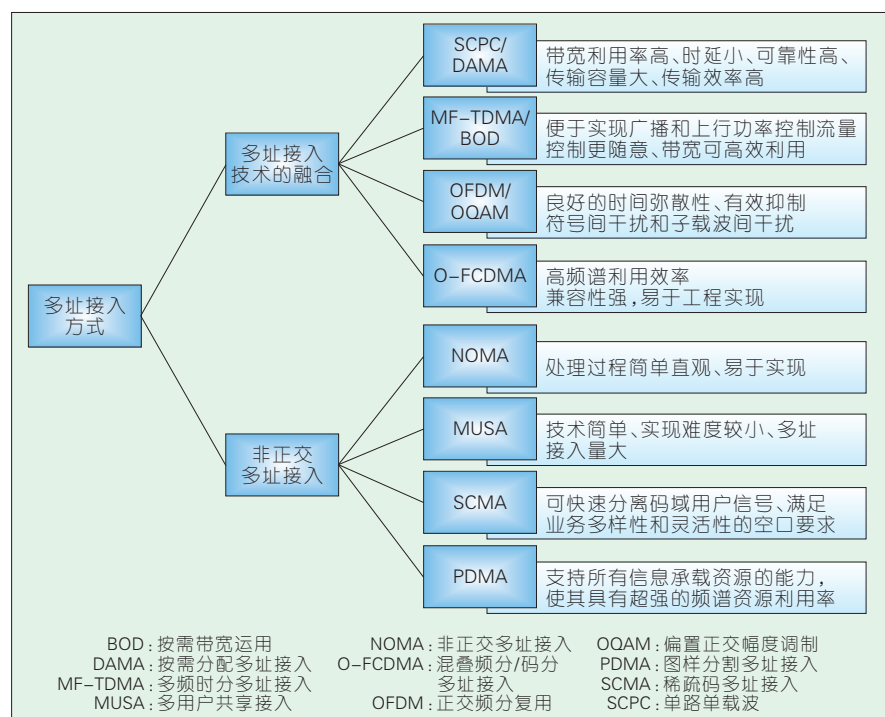
#### 3.2 骨干网接入

目前,通常采用具备星地、星间通信能力的空间移动通信系统作为高数据率传输的主干网,各类卫星(星座)、地面固定、车载、机载、舰载等应用子网接入的方式来构成应用信息系统<sup>[16]</sup>。但是,基于覆盖的需求及网络拓扑结构分析,天基骨干网应具有高数据率传输能力的GEO或GEO/LEO组成。因此,未来骨干网的发展趋势是由业务驱动空间资源的分配并合理调用卫星资源,以适应未来面向地面第五代移动通信系统及高速、高带宽、高可靠性的业务需求,从而对接入技术及空中接口提出了更高的要求。

#### 3.3 微波为主激光为辅

目前,天基骨干网的主要通信方式为微波通信,目前微波频带已接近其理论可利用的极限。光波频率较微波基频高,可达到数百THz量级的通信带宽,且具有抗干扰、抗截获能力强,保密性好以及轻小型等优势,





▲图3 现有的多址接入方法

将成为天基信息网络中支持远距离、高速率传输的重要手段。但激光技术也存在着一些尚未解决的问题,大力发展微波为主,激光为辅的星间/星地通信。

## 4 多址技术

现有的无线通信的多址接入方法及其特点如图3所示。我们将其分成了两类,一类是多址接入技术的融合,分为单路单载波(SCPC)/按需分配多址接入技术(DAMA)、多频时分多址接入(MF-TDMA)/按需带宽运用(BOD)、正交频分复用(OFDM)/偏置正交幅度调制(OQAM)、混叠频分/码分多址(O-FCDMA)<sup>[17]</sup>;另外一类是非正交多址技术,主要有非正交多址接入技术(NOMA)、多用户共享接入(MUSA)、稀疏码多址接入(SCMA)及基于非正交特征图样的图样分割多址接入技术(PDMA)。

### 4.1 按需接入

对稀疏路由通信环境,用户站比较分散,若采用业务控制点(SCP)、

传统频分多址接入(FDMA)那样的固定分配方式将会浪费空间卫星资源,为此,采用DAMA方式来提高效率。这种方式可以在依次呼叫的基础上建立卫星链路,大量的用户站按需使用卫星容量,使空间资源得到很好的利用。DAMA用于FDMA称为DA/FDMA;用于时分多址接入(TDMA)称为DA/TDMA或SCPC/DAMA。

DAMA是一种稀路由公共交换网服务的方案,其采用了“池”技术来实现卫星信道资源的共享,在网络管理控制中心(NMCC)采用集中控制方式下分配可用信道,建立链路的连接。使用完毕的信道则重新进行分配,这样则实现了卫星信道和地面站信道之间是一种随机的分配方法,能够提高信道的利用率。从技术上分析,它是以频分方式分离控制和业务信道的。网络管理控制中心的计算机系统被称为NCS,其发向远程地面站(业务站)的连续数据是发在OCC上。

### 4.2 组合自由/按需分配多址接入

组合自由/按需分配多址接入

(CFDAMA)的基本思想是将带宽预分配给请求终端。有3种分配方式:预先分时段、随机接入时段或在分组尾部携带请求信息。同时,对于剩余容量采用轮询方式进行合理分配,节省突发业务预约时间。在CFDAMA协议的基础上,产生了一种演进协议即PRR-CFDAMA<sup>[18]</sup>。

### 4.3 非正交多址接入

2014年,日本著名通信运营研发商NTT DOCOMO正式提出非正交多址接入(NOMA)技术。其目的就是为了在满足用户体验需求的前提下,更加高效的利用频谱资源,并为以后部署覆盖范围更小的小区提供理论基础。NOMA在发送端主动引入干扰信息,并通过串行干扰删除或迭代检测,重构出干扰信号,然后消除干扰,提高接收机性能。其基本思想是利用提高接收机的复杂度来换取频谱效率的提升,那么如何设计低复杂度的接收机算法则成为该技术的难点问题。

### 4.4 稀疏码多址接入

在发送端通过多维调制和稀疏扩频将编码比特映射成SCMA码字,接收端通过多用户检测完成译码。在多用户场景下,SCMA与OFDMA技术相比可以实现在同等资源数量条件下,系统整体容量的提升。SCMA采用的是低密扩频码,因为低密扩频码中有部分零元素,码字结构具有明显的稀疏性,这也是SCMA技术命名的由来。这种稀疏特性的优点是可以使接收端采用复杂度较低的消息传递算法和多用户联合迭代法,从而实现近似多用户最大似然解码。

以上的接入方法各具优势,然而,天基网络具有的高动态、时延及移动性问题,将给天基网络的接入技术实现提出较大挑战。

## 5 结束语

我们对天基网络及相关接入技

术的研究现状及发展趋势进行了归纳总结,并分析了目前几种先进多址接入技术的应用特点。因为天基网络具有的动态拓扑、时延及移动性等问题,天基网络的相关接入技术将是卫星通信方向研究的一大热点,中国在该领域和发达国家相比仍有较大差距,因此开展天基网络相关接入技术及方法的研究,应当首先在天基网络战略及多种业务需求下展开相关关键技术的研究。

## 参考文献

- [1] 何俊, 易先清. 基于 GEO/LEO 两层星座的卫星组网结构分析[J]. 火力与指挥控制, 2009, 34(3): 47-54
- [2] PEYRAVI H. Medium Access Control Protocols Performance in Satellite Communications[J]. IEEE Communications Magazine, 1999, 36(5):62-71. DOI:10.1109/35.751497
- [3] 赵静, 赵尚弘, 李勇军. 星间激光链路数据中继技术研究进展[J]. 红外与激光, 2013, 42(11): 3103-3110
- [4] 吉雯龙, 于小红. 国外中继卫星系统发展与应用分析[J]. 四川兵工学报, 2014, 35(10): 118-120
- [5] 张玲玲. 简述空天信息传输网络的特点、现状及发展趋势[J]. 山东工业技术, 2016, 35(4): 140
- [6] NISHIYAMA H, KUDOH D, KATO N. Load Balancing and QoS Provisioning Based on Congestion Prediction for GEO/LEO Hybrid Satellite Networks[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(11):1998-2007. DOI:10.1109/JPROC.2011.2157885
- [7] 凌翔, 胡剑浩, 吴诗其. 低轨卫星移动通信系统接入方案[J]. 电子学报, 2000, 28(7):55-58
- [8] PAPAPETROU E, KARAPANTAZIS S, DIMITRIADIS G. Satellite Handover Techniques for LEO Networks[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2004, 22(2): 231-245
- [9] KWON Y, YOUNG Y J, SUNG D. Satellite Selection Scheme for Reducing Handover Attempts in LEO Satellite Communication Systems[J]. International Journal of Satellite Communications, 1998, 16(4): 197-208
- [10] BOEDHIHARTONO P, MARAL G. Evaluation of the Guaranteed Handover Algorithm in Satellite Constellations Requiring Mutual Visibility[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2003, 21(2):163-182
- [11] PAPAPETROU E, PAVLIDOU F. QoS Handover Management in LEO/MEO Satellite Systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2003, 46(3):309-313. DOI:10.1023/A:1022569901936
- [12] BEYLOT A, BOUMERDASSI S. Adaptive Channel Reservation Schemes in Multitrafic LEO Satellite Systems[C]// IEEE Global Telecommunications Conference, USA:IEEE, 2001(4):2740-2743. DOI: 10.1109/GLOCOM.2001.966272
- [13] CHO S. Adaptive Dynamic Channel Allocation Scheme for Spotbeam Handover in LEO Satellite Networks[C]// IEEE Vehicular Technology Conference, USA: IEEE, 2000(4):1925-1929. DOI:10.1109/VETECF.2000.886150
- [14] 曾孝平, 刘心迪, 罗阳, 等. 同步卫星多用户接入控制及切换的优化算法[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(4):840-846
- [15] 刘振浩, 张明智, 王燕, 等. 基于分层结构的卫星动态接入网络建模研究[J]. 指挥控制与仿真, 2010, 6(32):1-4
- [16] 胡源, 姜会林, 丁莹, 等. 天地一体化信息网络国外发展现状与趋势[C]// 第二十八届全国通信与信息技术学术年会论文集, 2013:49-53
- [17] 顾娜, 匡麟玲, 吴胜, 等. 混合频分/码分多址(O-FCDMA)系统框架[J]. 清华大学学报, 2015, 55(5): 485-490

## 作者简介



贾敏, 哈尔滨工业大学副研究员、博士生导师; 主要研究领域为无线移动通信、卫星通信新技术、认知无线电技术、信号处理与检测及估计技术; 主持和参与国家自然科学基金项目(青年及重大计划)、国防基础预研项目、“973”子课题及省部级等科研项目多项, 获得 2 项

科研成果奖; 已发表论文 60 余篇, 其中被 SCI/EI 检索 50 余篇。



高天娇, 哈尔滨工业大学硕士研究生; 研究方向为卫星移动通信系统。



郑黎明, 哈尔滨工业大学副教授; 主要研究方向为第五代移动通信、天基信息网络及移动通信网络数据工程; 曾获得 2012 IEICE Best Paper Award 及 Chinacom2015 Best Paper Award 等奖项。



郭庆, 哈尔滨工业大学教授, 电子与信息工程学院院长、博士生导师; 主要研究领域为无线通信、卫星通信技术及空间信息网络; 先后主持和参加基金项目 20 余项, 获得 3 项科研成果奖; 已发表论文 100 余篇, 其中被 SCI/EI 检索 70 余篇。

## 综合信息

## 国际电联发布 2015 年度报告 定调全球电信业 2020 年发展目标

国际电联发布 2015 年度报告, 明确了全球电信业到 2020 年的发展目标, 总体上可分为 4 点。

(1) 增长: 促成并推进电信/信息通信技术(ICT)的获取与普及。2020 年的具体目标为: 全球 55% 的家庭将享有互联网接入; 全球 60% 的人口将用上互联网; 全球电信/ICT 价格可承受性将提高 40%。

(2) 包容性: 弥合数字鸿沟, 让人人用上宽带。2020 年的具体目标为: 发展中国家 50%、最不发达国家 15% 的家庭接入互联网; 发展中国家 50%、最不发达国家 20% 的人口使用互联网; 在价格可承受性上, 发达国

家和发达国家之间差距下降 40%; 发展中国家的宽带服务成本应不超过月平均收入的 5%; 宽带业务将覆盖全球 90% 的农村人口; 实现互联网用户的性别平等, 并在各国形成确保残疾人获取电信/ICT 的有利环境。

(3) 可持续性: 管理电信/ICT 发展带来的挑战。2020 年的具体目标为: 网络安全就绪水平提高 40%; 过剩电子废弃物总量减少 50%; 电信/ICT 部门每台设备的温室气体排放减少 30%。

(4) 创新与伙伴关系: 引领、完善和适应不断变化的电信/ICT 环境。2020 年的具体目标为: 建设有利于创新的电信/ICT 环境, 形成电信/ICT 环境中有效的利益攸关方伙伴关系。

(转载自《中国信息产业网》)

# 天地一体化信息网络协议体系与传输性能简析

## Network Protocol System and Transmission Performance of Integrated Space and Terrestrial Information Network

杨冠男/YANG Guannan  
李文峰/LI Wenfeng  
张兴敢/ZHANG Xinggan

(南京大学, 江苏 南京 210093)  
(Nanjing University, Nanjing 210093, China)

天地一体化信息网络是中国国防信息化和信息化社会建设的重要基础设施。天地一体化信息网络中的“天”是指由卫星等航天器作为主要节点组成的天基网络,而“地”主要指由地面站网络、卫星应用专网、互联网以及各类地面用户等共同组成的地球表面网络。通过网络架构与协议体系层面的设计,屏蔽天、地各类系统和技术体制层面的差异,为用户提供跨系统的、无需区分天地的各种服务与应用,实现一体化信息获取、共享与利用是未来天地一体化信息网络发展的主要目标<sup>[1]</sup>。

根据是否采用星间链路,我们可以将天地一体化信息网络分为:

(1)天星地网。典型系统如国际海事卫星(Inmarsat)的宽带全球网络

收稿时间: 2016-05-20

网络出版时间: 2016-06-29

基金项目: 中国工程院重大咨询研究项目(2016-ZD-05); 国家自然科学基金(61401194); 江苏省卫星通信与导航协同中心自立项目(SatCN-201407、SatCN-201410)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2016) 04-0039-007

**摘要:** 对于中国天地一体化信息网络(ISTIN)的构建,针对可能采用的两种网络协议体系,即传输控制协议(TCP)/IP和容迟容断网络(DTN),以3颗地球静止轨道(GEO)卫星组成天基骨干网络为例,分析了3种基本传输场景下的主要挑战,通过计算机半实物仿真开展了协议传输性能的测试。试验结果表明:尽管DTN协议与TCP-HybLa改进协议能够获得较好的传输性能,由于时延与误码率(BER)等参数存在较大的动态范围,没有一种协议能够在所有传输场景下保持传输性能始终最优。天地一体化信息网络协议体系的性能仍有待进一步提高。

**关键词:** ISTIN; 协议; 传输性能

**Abstract:** Two different network architectures are discussed in this paper: transmission control protocol (TCP)/IP and delay-and disruption-tolerant networking (DTN) for future integrated space and terrestrial information network (ISTIN) in China. A simple space backhaul network consisted of 3 geostationary orbit (GEO) satellites is analyzed and categorized as 3 basic transmission scenarios, in which the challenges for network architecture are stated. Computer emulations are conducted to study the transmission performance of different protocols. The results show that although TCP-HybLa and DTN both have better performance compared to the classical terrestrial TCP, with high dynamic delays and bit error rate (BER), no protocol is always optimal in transmission performance throughout different scenarios. The performance of network architectures of ISTIN should be improved further.

**Key words:** ISTIN; network protocol; transmission performance

(BGAN)系统,由3颗Inmarsat IV卫星与地面站网络组成,民用数据业务采用星状拓扑,经过卫星中继落地后通过地面站实现区内数据交换,互联网接入或通过地面站网络实现跨区的数据交换。BGAN从2012年开始提供航空宽带卫星业务(SB-Sat),通过原航空宽带网络面向低轨道(LEO)卫星提供近实时的IP业务,速率最高可达475 kbit/s<sup>[2]</sup>,由此实现了以地面

网络为骨干的天空地一体化的网络。

(2)天基网络。典型系统如铱星通信系统,数据的交换完全通过星间链路完成。

(3)天网地网。它是前两种形式的整合,典型系统如美国军方规划的全球信息栅格(GIG)拟构建的通信基础设施,原计划天基部分转型卫星通信系统(TSAT)通过TSAT卫星间的星间链路实现空间宽带网络,并与



GIG的地面网络,以及无线网络实现一体化。

由于政治、经济等原因,中国天地一体化信息网络的构建面临的主要制约因素之一在于地面站设站受限,地面站基本位于中国境内。与其他一些国家类似系统相比,难以实现全球分布的地面站网络。因此,为保障信息的及时获取与分发,必须重点发展天基网络基础设施,并依托天基网络,与可利用的地面网络资源构建中国天地一体化信息网络。

## 1 天地一体化信息网络协议体系

由于包含天基网络和地面网络两个组成部分,天地一体化信息网络将是一个复杂异构的网络系统<sup>[3]</sup>,涉及各种网络协议,如图1所示。网络一体化的发展目标必须通过网络协

议体系的统一来实现<sup>[4]</sup>。

### 1.1 地面网络协议体系

从19世纪60年代计算机网络发展开始,网络协议技术已经经历了半个多世纪的发展,地面互联网已经形成了以传输控制协议(TCP)/IP协议体系为主的网络架构。TCP/IP协议体系发源于计算机网络,是一种以主机为中心的网络协议体系,IP地址直接对应到主机,主机与主机之间的数据可靠传输采用“端到端原则”。随着移动通信技术的发展,移动互联网的兴起使得IP地址动态变化问题日益显著,通过移动IP技术可以保证节点漫游过程中的网络连接。从2000年左右,主要针对当前以点对点通信为基础的TCP/IP网络体系架构中的关键先天缺陷,主要包括可扩展性问题、动态性问题和安全可控性问题<sup>[5]</sup>

等,未来网络的研究试图从根本上解决这些制约网络未来发展的问題。在这些研究工作中,研究人员已经提出了信息中心网络(ICN)<sup>[6]</sup>等多种区别于传统TCP/IP的新型协议体系。

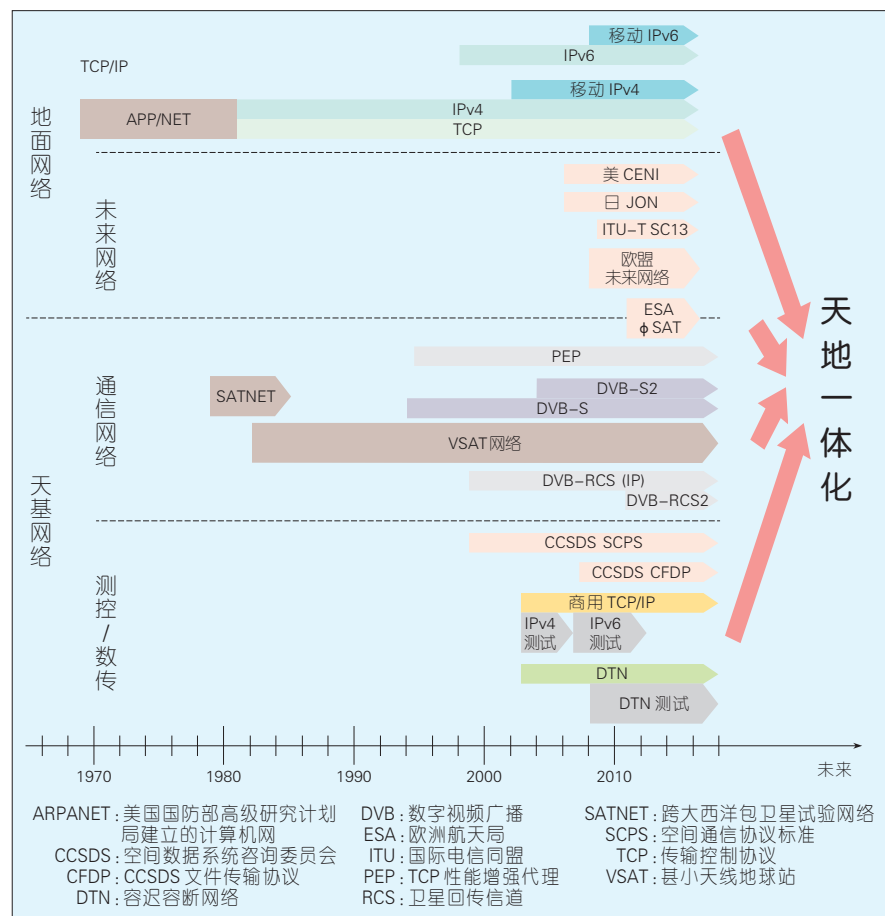
### 1.2 天基网络协议体系

#### 1.2.1 卫星通信网络协议体系

在还没有光纤的年代,最早的跨洋网络线路是通过卫星中继实现的。卫星通信网络起源于卫星广播系统,物理层、数据链路层协议多采用数字视频广播(DVB)系列协议。随着第4代(4G)、第5代(5G)移动通信技术的发展,卫星通信也已成为4G、5G标准中的重要组成部分。由于互联网应用以地面为主,作为地面互联网在空间的延伸,卫星通信网络主要采用TCP/IP协议体系<sup>[7]</sup>。然而,起源于计算机网络的传统TCP协议在面临具有较大带宽、较长时延、较高误码率的卫星信道时,其传输效率大打折扣。解决这一问题的办法并不复杂,主要采用TCP性能增强代理(PEP)的方式<sup>[8]</sup>,将空间段与地面段分割开来,空间段使用优化后的TCP协议,可以大大提高传输性能。然而,由于关口站采用PEP方式打破了端到端传输原则,因此无法应用原有网络安全机制,可能给卫星网络带来潜在的安全风险<sup>[9]</sup>。随着未来网络的研究,卫星网络在未来网络中的地位与作用也正受到日益关注。

#### 1.2.2 航天测控通信网络协议体系

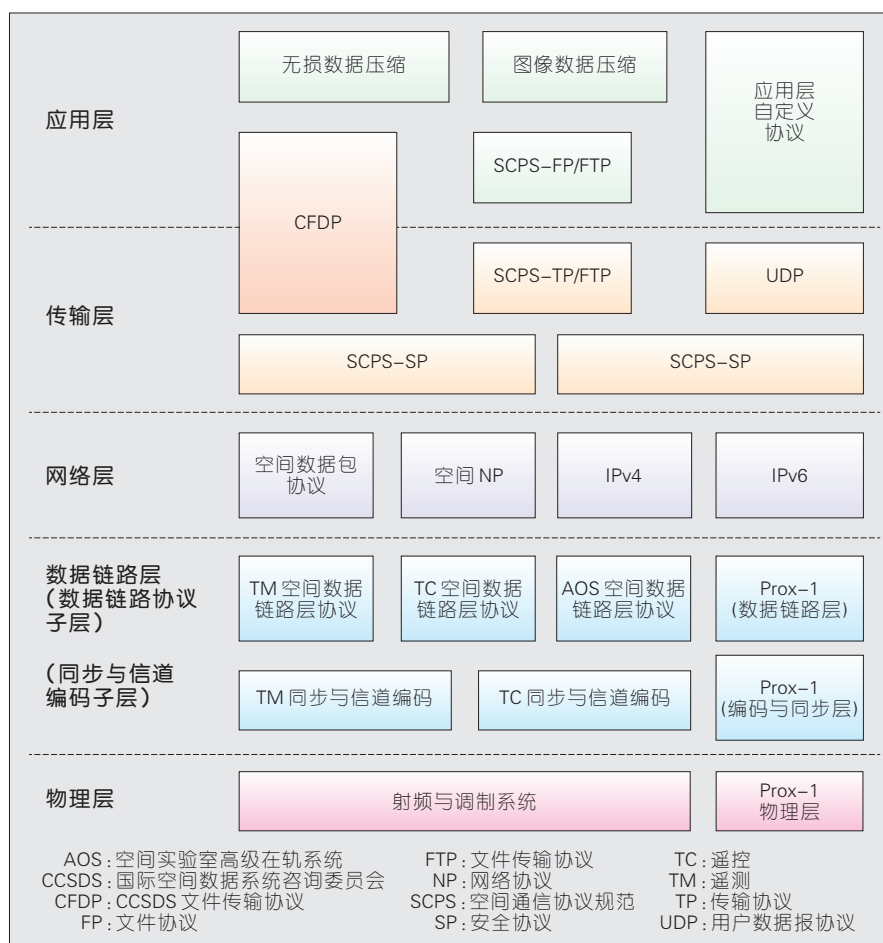
航天测控通信相关的网络协议国际标准主要由国际空间数据系统咨询委员会(CCSDS)制定,由于航天任务自身的特殊业务需求,CCSDS有针对性地制定了大量物理层、数据链路层协议的国际标准,为不同国家航天任务之间开展协作与资源共享提供了统一的通信接口。CCSDS还曾经根据空间特性制定了空间通信协议规范(SCPS),包含重新定义的其



▲ 图1 天地一体化信息网络相关网络协议技术发展

文件协议(SCPS-FP)、传输协议(SCPS-TP)、网络协议(SCPS-NP)和安全协议(SCPS-SP)等完整的网络协议体系,用以实现空间信息系统的组网,如图2所示。但是,由于开发维护成本高昂等问题,目前SCPS协议族中除了支持PEP方式的SCPS-TP协议仍然在一些商用设备中使用而得到继续维护外,其他协议在CCSDS已全部停止维护更新了,并建议采用容迟容断网络(DTN)协议体系<sup>[10]</sup>或IP over CCSDS方式统一到TCP/IP协议体系。

DTN协议起源于美国国家航空航天局(NASA)星际互联网的研究,主要克服星际通信中可能出现的长时间中断、延迟、恶劣的信道质量等挑战<sup>[11]</sup>,其协议体系如图3所示。与传统TCP/IP 5层结构相比,DTN协议体系在应用层和传输层之间引入了一个束协议层(BP),并通过其中的汇聚层(CLA)实现不同传输协议的转换。BP可以通过使用持久存储+转发的方式来克服网络的间歇性连接问题。DTN中定义另外一个重要的新协议是Licklider传输协议(LTP)<sup>[12]</sup>。LTP既可以实现类似TCP的可靠传输,又可以设置成类似用户数据报协议(UDP)的不可靠传输。LTP可以不需要网络层协议而直接工作在数据链路层之上,可以应对具有较大带宽延迟积的通信环境,使数据在长延迟、可变长中断的通信环境中无丢失的传输,不需要依靠稳定的通信往返延迟。由此可见,DTN与TCP/IP相比是两种完全不同的协议体系。需要特别指出的是:DTN由于采用覆盖网络的形式,通过CLA兼容各种网络协议,并且提供了一种网络协议演进的可能。目前,DTN中的两个最主要的协议BP和LTP协议已经在CCSDS完成了空间网络协议的标准化,并已在国际互联网工程任务组(IETF)开展作为互联网协议的标准化工作。在实际应用中,国际空间站上的实验载荷数据传输业务正全面

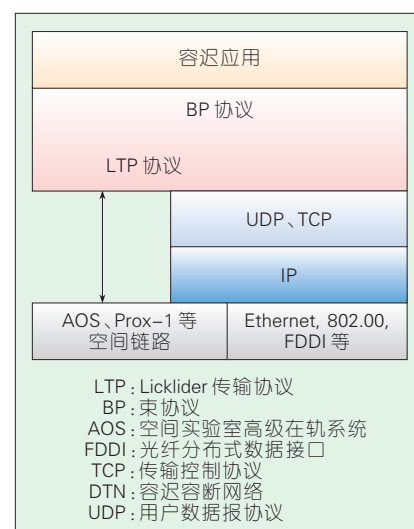


▲图2 原CCSDS SCPS协议体系

采用DTN协议。

### 1.3 网络协议的天地一体化

从上面的分析可以看出:天地一体化信息网络涉及各类网络体系庞杂,尽管地面互联网经过不断的发展和完善已经形成了以TCP/IP为主的协议体系,但是随着网络规模、应用的不断突破,这一相对成熟的体系也面临着新的挑战,未来网络的研究中正在不断探索各类新型网络协议体系。相比而言,受到传输环境、星上载荷能力、网络物理架构等多种因素的制约,天基网络协议的研究与应用面临不同的挑战,并且远远落后于地面网络的发展。目前较为成熟的协议体系仍然以TCP/IP为主,在NASA的推动下DTN协议也正在快速发展并逐步投入实用。两种网络协



▲图3 DTN网络协议体系

议体系特性的比较如表1所示。简单来说,TCP/IP协议体系起源于地面计算机网络,通过TCP/IP实现天地一

▼表1 一体化网络协议比较

|                                       | TCP/IP 协议                       | DTN 协议                              |
|---------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|
| 起源                                    | 地面网络                            | 深空通信                                |
| 一体化形式                                 | IP 协议                           | BP 协议                               |
| 优点                                    | 协议较为成熟、开发成本低                    | 采用覆盖网络形式,协议兼容性、可扩展性较好;容迟容断、适应恶劣通信环境 |
| 缺点                                    | 延迟容忍、中断恢复差,对移动性支持较差,改进协议引起安全性问题 | 技术仍未完全成熟,未经过大规模网络应用                 |
| 目前应用                                  | 地面网络、移动通信网络、卫星通信网络、LEO 飞行器测控通信等 | 深空通信网络、空间信息网络、地面断续通信网络等             |
| TCP:传输控制协议 DTN:容迟容断网络 LEO:低轨道 BP:束协议层 |                                 |                                     |

一体化的发展思路是地面网络协议体系向上延伸,而 DTN 协议体系起源于深空通信,应用于天地一体化是星际互联网协议体系向下拓展,两者都要考虑天地一体化信息网络的特殊性。

## 2 天地一体化信息网络条件下的传输场景与协议性能

在分析了目前较为成熟的网络协议体系后,我们通过实验比较了 TCP/IP、DTN 两种协议体系在天地一体化信息网络环境下的传输性能。传输性能的改善是传统卫星网络研究中研究最为深入的领域,然而由于中国天地一体化信息网络星地架构的特殊性,过往文献对传输性能的分析可能并不与之符合,相关性能测试的结果和分析将对未来实际系统的建设提供重要的参考。

### 2.1 天地一体化信息网络传输场景

中国天地一体化信息网络必须

以天基网络为主体,网络协议性能与天基网络物理架构紧密相关。目前中国已经提出了多种网络架构<sup>[13-15]</sup>方案,包括地球静止轨道(GEO)覆盖方案、LEO 覆盖方案及其他多层覆盖方案等。网络架构方案与工程建设周期、成本、技术难度等多种因素有关,我们不做深入探讨。在这篇文章中,我们采用了最简单的3颗 GEO 卫星实现准全球覆盖的天基骨干网络方案作为试验场景。

考虑空间信息传输的过程,事实上经过简化后,我们可以得到如图4所示的3种基本传输场景:图4中(a)表示的是 LEO 或中高轨道(MEO)过顶时,数据直接通过星地链路发送的场景;图4(b)表示的是 LEO 或 MEO 卫星离开地面站通信窗口后,通过骨干网络 GEO A 卫星一跳传输的场景;图4(c)表示超出 GEO A 卫星覆盖范围后,通过 GEO A 和 GEO C 两跳传输的场景。

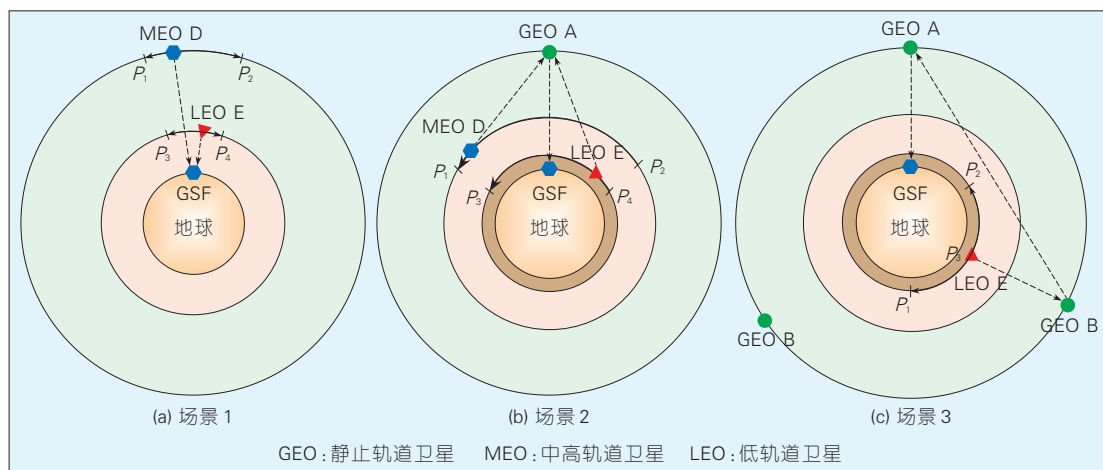
传输场景的变化主要带来两方面链路特性的变化:传输时延的显著变化,误码率的显著变化。显然,由于通信距离最短,没有中继,在相同的卫星地面通信设备参数条件下,场景1信道质量最好,误码率最小,传输时延最短;与之相反,由于传输距离最长,且经过两次中继,如果 GEO 卫星没有星上处理,仅作透明转发,场景3的误码率和传输时延都将显著提高。我们注意的是:由于中低轨卫星的移动,传输时延是时变的,场景1相应的传输时延大约在 3~60 ms;场景2相应的传输时延大约在 200~250 ms;场景3相应的传输时延大约在 480~500 ms。

### 2.2 网络协议设置

我们主要考虑 TCP/IP 协议体系和 DTN 协议体系下的协议传输性能这一技术指标。对于 TCP/IP 的协议体系,我们主要测试了两种不同的 TCP 协议,分别是 TCP-Cubic 和 TCP-Hybla。TCP-Cubic 采用 Cubic 拥塞控制算法,适应于高时延带宽积的网络(长肥网络(LFN)),Linux 系统内核默认的 TCP 协议通常采用 Cubic 算法。TCP-Hybla 主要针对具有较长时延,较高误码率的卫星或地面无无线链路,改进了拥塞控制算法。TCP-Hybla 可以应用于 PEP 方式卫星段的传输以改善卫星网络的传输效率。

对于 DTN 的协议体系,主要测试

图4  
天地一体化信息网络  
传输场景





BP 协议通过 CLA 结合 TCP、UDP、LTP 等各种不同的传输方法。考虑到 BP 适配 TCP 协议时,由于存在额外的 BP 层的协议开销,DTN (BP+TCP) 的传输性能必然逊于单纯的 TCP 协议;而 BP 适配 UDP 时,由于 UDP 的非可靠传输,在挑战性的网络环境中其传输性能会急剧下降。因此,对于 DTN 协议体系,我们主要测试了 BP+LTP 的协议组合,其中 BP 协议未开启托管传输,LTP 协议采用红色模式。

因此,文中我们主要测试比较以下 3 种传输方式:TCP-Cubic、TCP-Hybla、BP+LTP 在不同的信道特性下的传输性能。

### 3 仿真环境与实验结果

#### 3.1 仿真环境与参数设置

为了获得尽可能接近实际的试验结果,我们采用计算机半实物模拟的仿真方式,利用两台安装 Ubuntu14.04 操作系统的计算机分别模拟不同场景中的源节点和目的节点,即卫星与地面站。两台计算机上分别安装了 ION-DTN (v3.4) 协议栈以及 Linux 内核自带的 TCP 协议,通过命令可以设置实际使用的拥塞算法。利用广泛应用的软件信道模拟器 Netem 模拟两个节点间的卫星链路的特性,具体包括链路时延、信道丢包率、信道带宽等参数。需要注意的是:在实验过程中,对于所采用的各种协议我们没有做任何优化,全部采用了默认的参数。仿真相关参数配置如表 2 所示。

#### 3.2 试验结果与传输性能分析

在上述仿真环境下,我们测试了 2.1 节中讨论的(图 4)3 种典型场景下不同网络协议的传输性能。

##### 3.2.1 链路时延对传输性能的影响

考虑较低的误码率( $10^{-7}$ )、较小的信道非对称(1:10)条件下,传输时延对有效吞吐量的影响。根据表 2

仿真相关参数配置参数,试验中单向传输时延从 3 ms 一直增加到 1 s,图 5 给出了仿真结果。从图中可以注意到当传输时延非常小时,TCP-Cubic 和 TCP-Hybla 一样,传输性能都好于 DTN;但随着时延的增长,TCP-Cubic 的性能出现了显著的恶化,当时延较长时,例如经过一跳或两跳传输时,TCP-Cubic 的传输速率不足信道带宽的 30%;TCP-Hybla 和 BP+LTP 协议性能都好于 TCP-Cubic,但是也都出现了显著的性能下降,无法实现信道容量的充分利用。TCP-Hybla 取得了最好的性能,这给我们的直觉可能存在差异,通常我们会认为在时延较长的情况下,DTN 显然应该有更好的性

能,但并非如此。因 DTN 中容忍迟滞所指的长延迟是指在星际通信中分钟级、小时级,甚至更大的时延,天地一体化信息网络条件下的传输时延并不是 TCP 完全无法工作的。

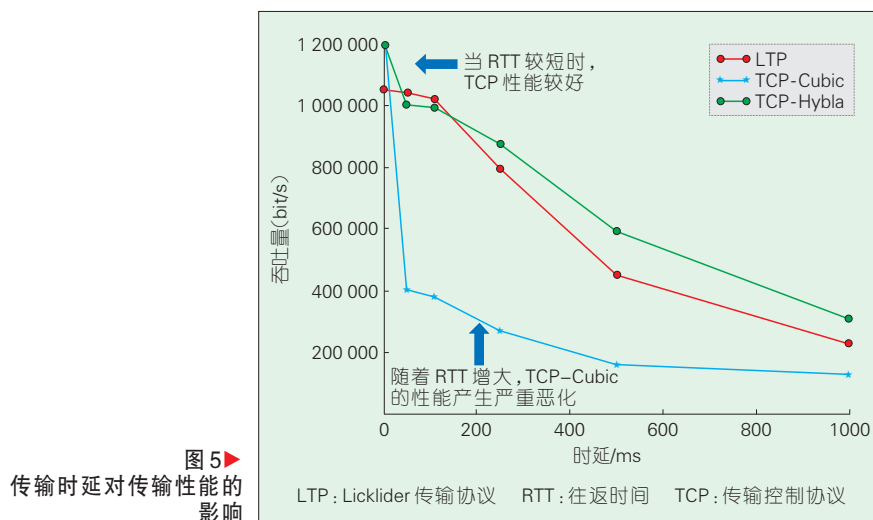
##### 3.2.2 误码对传输性能的影响

考虑误码率对不同协议传输性能的影响,假设 1:10 信道非对称,图 6 给出了在图 4 中 3 种传输场景下的有效吞吐量。首先,在 3 个场景中,即 3 种不同时延条件下,误码率的增加都引起了有效吞吐量的显著恶化,TCP-Cubic 性能在 3 种协议中是最差的。我们可以注意到:在高误码率( $10^{-5}$ )条件下,不同的协议都只能获

▼表 2 仿真相关参数配置参数

| 试验参数              | 设置/值                                     |
|-------------------|--|
| BP 托管传输           | 否  |
| LTP 红/绿设置         | 红色                                       |
| 帧大小/ bytes        | 1 000                                    |
| ACK(RS)包大小/ bytes | 70                                       |
| LTP 块大小/bytes     | 240                                      |
| LTP 分段大小/ bytes   | 1 400                                    |
| MTU 大小/bytes      | 1 500 (所有协议栈)                            |
| BER               | $10^{-7} \sim 10^{-5}$                   |
| 单向链路时延            | 3 ms, 50 ms, 110 ms, 250 ms, 500 ms, 1 s |
| 传输文件大小/ bytes     | 10 000 000                               |
| 样本数量              | 每种协议配置独立测试 16 次                          |

BER: 信道误码率 BP: 束协议层 LTP: Licklider 传输协议 MTU: 最大传输单元



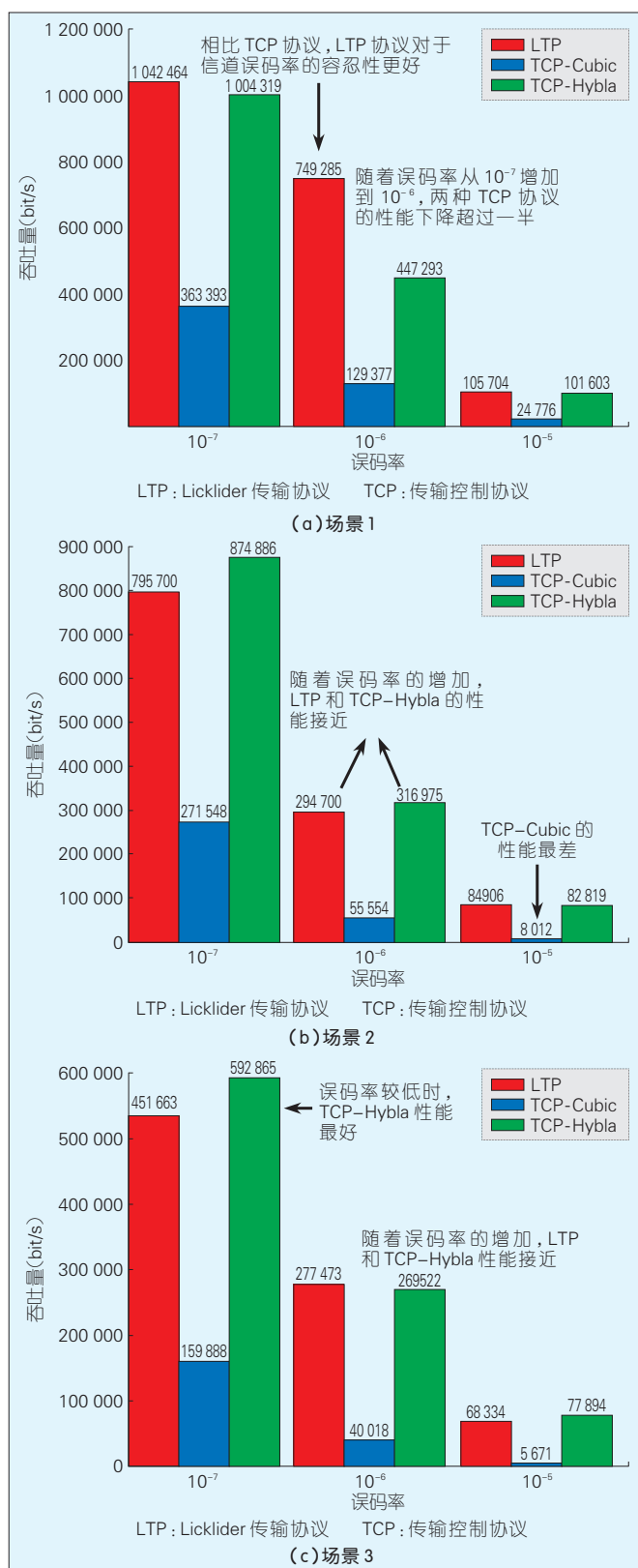


图6 不同传输场景中,信道非对称率为 1:10 条件下,误码率对有效吞吐量的影响

得非常差的传输性能, TCP-Cubic 几乎不可用, 而 TCP-Hybla 和 BP+LTP 略

好。其次, 不同于想象, 在时延较长 (场景 3) 但误码率较低 ( $10^{-7}$ ) 情况

下, DTN 协议并没有获得最优的传输性能, 反而 TCP-Hybla 的有效吞吐量是最佳的。这一结果好像与容迟容断网络的名称不符, 但事实上, 同样在有限的时延下, DTN 容迟容断的特性并不能很好的体现出来, 反而较高的协议开销可能引起了传输性能的下降。另一方面, 在 3 种场景下, 我们可以注意到, 总的来说 DTN 与 TCP-Hybla 的传输性能基本相当, 但是当误码率从  $10^{-7}$  变化到  $10^{-6}$  甚至更高时, TCP-Hybla 的性能基本都下降了超过一半, 而 DTN (主要是 LTP 协议) 受误码率的影响相对较小。

#### 4 结束语

针对 TCP/IP 和 DTN 两种相对较为成熟的网络协议体系, 从传输性能的实验结果可以观察到:

(1) 在天地一体化信息网络通过 GEO 卫星作为骨干网络形成准全球覆盖的条件下, 时延和误码对不同协议体系的传输性能都有显著的影响, TCP 改进协议与 DTN 具有相对较好的传输性能。

(2) DTN 协议容时容断的特性在有限的时延和信道非对称率条件下并不能为传输性能带来显著的提升。需要注意的是: 测试中 TCP 协议是内核实现, 而星际覆盖网络 (ION)-DTN 协议则工作在用户空间, 因此本身可能存在一定的性能差异。

(3) 由于中国天地一体化信息网络主要依赖天基网络, 在不同的场景下, 传输时延、误码率存在较大的动态范围, 这对协议传输性能带来了巨大的挑战。

就实验结果看, 并没有一种协议能够在各种传输条件下始终保持传输性能最优。这也意味着尽管在卫星网络等领域对网络传输性能的改进与优化已经较为深入, 但是天地一体化信息网络具有完全不同的技术挑战, 即使是在传输性能方面仍有改进的空间, 在网络协议体系的各个层面还存在着很多问题有待于进一步

探索。

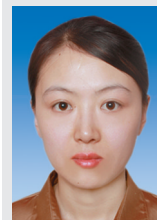
## 致谢

本研究得到美国 Lamar 大学王汝海教授, 南京大学范晨阳、张文瑞的帮助和支持, 谨致谢意!

## 参考文献

- [1] 张乃通, 赵康健, 刘功亮. 对建设我国天地一体化信息网络的思考[J]. 中国电子科学研究院学报, 2015, 10(3): 223-230
- [2] JOHNSTON B, HASLAM M, TRACHTMAN E, et al. SB-SAT-Persistent Data Communication LEO Spacecraft Via the Inmarsat-4 GEO Constellation[C]// Proceedings of 6th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference. USA: IEEE, 2012:2329-7093
- [3] 李德仁, 沈欣, 龚健雅, 等. 论我国空间信息网络的构建[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(6): 711-715
- [4] BURLEIGH S, VINTON C, CROWCROFT J, et al. Space for Internet and Internet for Space [J]. Ad Hoc Networks, 2014, 23(12):80-86
- [5] 谢高岗, 张玉军, 李振宇, 等. 未来互联网体系结构研究综述[J]. 计算机学报, 2012, 35(6): 1109-1119
- [6] AHLEGREN B, DANNEWITZ C, IMBRENDA C, et al. A Survey of Information-Centric Networking [J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(7): 26-36
- [7] SUN Z. Satellite Networking: Principles and Protocols [M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2005
- [8] LUGLIO M, SANADIDI M, GERLA M, et al. On-board Satellite "Split TCP" Proxy [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2004, 22(2): 362-370. DOI: 10.1109/JSAC.2003.819987
- [9] CAINI C, CRUICKSHANK H, FARRELL S, et al. Delay-and Disruption-Tolerant Networking (DTN): An Alternative Solution for Future Satellite Networking Applications [C]// Proceedings of the IEEE. USA: IEEE, 2011, 99(11): 1980-1997. DOI: 10.1109/JPROC.2011.2158378
- [10] CCSDS. On Current Status of the SCPS Protocol Suite in CCSDS[EB/OL]. <http://public.ccsds.org/publications/scps.html>
- [11] FARRELL S, CAHILL V, GERAGHTY D, et al. When TCP Breaks: Delay- and Disruption-Tolerant Networking [J]. IEEE Internet Computing, 2006, 10(4): 72-78. DOI: 10.1109/MIC.2006.91
- [12] YU Q, BURLEIGH S, WANG R, et al. Performance Modeling of Licklider Transmission Protocol (LTP) in Deep-space Communication[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2015, 51(3): 1609-1620. DOI: 10.1109/TAES.2014.130763
- [13] 黄惠明, 常呈武. 天地一体化天基骨干网络体系架构研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2015, 10(5): 460-467
- [14] 姜会林, 刘显著, 胡源, 等. 天地一体化信息网络的几个关键问题思考[J]. 兵工学报, 2014, 35: 96-100
- [15] 王闯, 张洪, 张威, 等. 基于无速率码实现全球信息分发的双层卫星网络设计[J]. 空间电子技术, 2015 (3): 74-80
- [16] MORTARI D, SANCTIS M, LUCENTE M. Design of Flower Constellations for Telecommunication Services [J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(11): 2008-2019
- [17] I. F. Akyildiz, E. Ekici, M. Bender. MLSP: A Novel Routing Algorithm for Multi-layered Satellite IP Networks [J]. IEICE Transactions on Networking, 2002, 10(3): 411-424
- [18] LI Y, ZHAO S, WU J, et al. Designing of a Novel Optical Two-Layered Satellite Network [C]//IEEE Computer Science and Software Engineering Conference. USA: IEEE, 2008: 976-979. DOI: 10.1109/CSSE.2008.1262
- [19] YIN Z, ZHANG L, ZHOU X, et al. Qos-Aware Multicast Routing Protocol for Triple-Layered LEO/HEO/GEO Satellite IP Network [C]//IEEE Global Mobile Congress. USA: IEEE, 2010: 1-6. DOI: 10.1109/GMC.2010.5634567
- [20] TABLE T, FADLULAH Z, TAKAHASHI T, et al. Tailoring ELB for Multi-Layered Satellite Network [C]//IEEE Communications Conference. USA: IEEE, 2009:1-5
- [21] WANG J, HU Y, ZHOU H, et al. Topological Dynamics Characterization for Layered Satellite Networks [C]//IEEE Performance Computing and Communication Conference. USA: IEEE, 2006: 349-356. DOI: 10.1109/2006.1629426
- [10] O3b Networks [EB/OL]. [2016-05-06]. <http://www.o3bnetworks.com>
- [11] CORRIE L, GREENHUT D, HAZLEHUIST R, et al. Simulating the GPS Constellation for High Fidelity Operator Training [C]//Position Location and Navigation Symposium. USA: IEEE, 1996: 222-229. DOI: 10.1109/PLANS.1996.509081
- [12] JIANG Z, PETIT G, HARMEGNIES A, et al. Comparison of the GLONASS Orbit Products for UTC Time Transfer [C]// Frequency Control and the European Frequency and Time Forum. USA: IEEE, 2011: 1-6. DOI: 10.1109/FCS.2011.5977739
- [13] GAO Z, GUO Q, NA Z. Novel Optimized Routing Algorithm for LEO Satellite IP Networks [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2011, 22(6): 917-925
- [14] SMITH D, HENDRICKSON R. Mission Control for the 48-Satellite Globalstar Constellation [C]//IEEE Military Communications Conference. USA: IEEE, 1995: 828-832. DOI: 10.1109/MILCOM.1995.483643
- [15] ILCEV S. Orbcomm Space Segment for Mobile Satellite System (MSS) [C]// Telecommunication in Modern Satellite

## 作者简介



**杨冠男**, 南京大学电子科学与工程学院博士生, 南京大学金陵学院讲师; 主要研究领域为空间信息网络、卫星通信、无线传感器自组网络; 参加基金项目 2 项; 已发表论文 6 篇。



**李文峰**, 南京大学电子科学与工程学院助理研究员; 目前主要研究领域为空间通信及空间信息网络; 先后主持和参加基金项目 10 余项; 已发表论文 10 余篇。



**张兴啟**, 南京大学电子科学与工程学院教授、博士生导师, 国务院政府特殊津贴专家; 目前主要从事雷达信号处理、通信信号处理研究; 先后主持和承担国家“863 计划”项目、国防科研项目及江苏省科技计划项目 30 余项; 荣获省部级科技进步二等奖 3 项、三等奖 2 项; 发表学术论文 100 余篇, 申请/授权国家发明专利 20 多项。

## ←上接第 23 页

- Communication System [C]//Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control. USA: IEEE, 2011: 619-621. DOI: 10.1109/IMCCC.2011.159
- [10] O3b Networks [EB/OL]. [2016-05-06]. <http://www.o3bnetworks.com>
  - [11] CORRIE L, GREENHUT D, HAZLEHUIST R, et al. Simulating the GPS Constellation for High Fidelity Operator Training [C]//Position Location and Navigation Symposium. USA: IEEE, 1996: 222-229. DOI: 10.1109/PLANS.1996.509081
  - [12] JIANG Z, PETIT G, HARMEGNIES A, et al. Comparison of the GLONASS Orbit Products for UTC Time Transfer [C]// Frequency Control and the European Frequency and Time Forum. USA: IEEE, 2011: 1-6. DOI: 10.1109/FCS.2011.5977739
  - [13] GAO Z, GUO Q, NA Z. Novel Optimized Routing Algorithm for LEO Satellite IP Networks [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2011, 22(6): 917-925
  - [14] SMITH D, HENDRICKSON R. Mission Control for the 48-Satellite Globalstar Constellation [C]//IEEE Military Communications Conference. USA: IEEE, 1995: 828-832. DOI: 10.1109/MILCOM.1995.483643
  - [15] ILCEV S. Orbcomm Space Segment for Mobile Satellite System (MSS) [C]// Telecommunication in Modern Satellite

Cable and Broadcasting Services. USA: IEEE, 2011:689-692. DOI: 10.1109/TELSKS.2011.6143205

- [16] MORTARI D, SANCTIS M, LUCENTE M. Design of Flower Constellations for Telecommunication Services [J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(11): 2008-2019
- [17] I. F. Akyildiz, E. Ekici, M. Bender. MLSP: A Novel Routing Algorithm for Multi-layered Satellite IP Networks [J]. IEICE Transactions on Networking, 2002, 10(3): 411-424
- [18] LI Y, ZHAO S, WU J, et al. Designing of a Novel Optical Two-Layered Satellite Network [C]//IEEE Computer Science and Software Engineering Conference. USA: IEEE, 2008: 976-979. DOI: 10.1109/CSSE.2008.1262
- [19] YIN Z, ZHANG L, ZHOU X, et al. Qos-Aware Multicast Routing Protocol for Triple-Layered LEO/HEO/GEO Satellite IP Network [C]//IEEE Global Mobile Congress. USA: IEEE, 2010: 1-6. DOI: 10.1109/GMC.2010.5634567
- [20] TABLE T, FADLULAH Z, TAKAHASHI T, et al. Tailoring ELB for Multi-Layered Satellite Network [C]//IEEE Communications Conference. USA: IEEE, 2009:1-5
- [21] WANG J, HU Y, ZHOU H, et al. Topological Dynamics Characterization for Layered Satellite Networks [C]//IEEE Performance Computing and Communication Conference. USA: IEEE, 2006: 349-356. DOI: 10.1109/2006.1629426

## 作者简介



**张威**, 解放军理工大学博士研究生; 主要从事空间信息网络体系架构、拓扑控制、星座设计方面的研究; 发表论文 19 篇。



**张更新**, 解放军理工大学教授、博士; 主要研究领域为空间信息网络、卫星通信、深空通信; 负责国家自然科学基金、国家“863”计划、国家科技重大专项等各类项目 20 余项; 发表论文 90 余篇, 出版专著教材 5 部。



**苟亮**, 解放军理工大学博士; 主要从事卫星通信、深空通信、网络编码等方面的研究; 发表论文 15 篇, 其中被 SCI 检索 4 篇。



# 空间互联网协议技术及应用

## Technologies and Applications of Space Network

杨志华/YANG Zhihua

袁鹏/YUAN Peng

张钦宇/ZHANG Qinyu

(哈尔滨工业大学深圳研究生院, 广东深圳 518000)  
(Harbin Institute of Technology Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518000, China)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2016) 04-0046-003

**摘要:** 认为空间互联网作为地面互联网向临近空间、地球轨道空间甚至深空空间的拓展, 在通信中继、对地观测和导航定位等多领域发挥了重要作用。介绍了典型空间互联网的体系结构, 针对链路差异、拓扑动态和网络异构的特点, 提出了空间互联网中协议体系、路由技术、网络安全和网络仿真等关键技术。

**关键词:** 空间互联网; 协议体系; 路由; 网络安全

**Abstract:** Space network, which plays an important role in communications relay, earth observation and navigation, is regarded as the extension of Internet to near space, earth's orbit space and even deep space. In this paper, the typical system architecture of space network is introduced. Moreover, according to the difference of links, dynamic topology and heterogeneous structure characteristics of space network, the key technologies such as protocol architecture, routing, network security and network simulator are pointed out.

**Keywords:** space network; protocol architecture; routing; network security

### 1 空间互联网

无线通信和控制技术的快速发展与未来信息全球化和宇宙探测的迫切需求, 促使传统地面互联网络向临近空间、地球轨道空间甚至深空空间拓展<sup>[1]</sup>。通过空间无线通信和地面有线通信技术, 将在轨卫星、空间飞行器和地面设施等构成互联互通的空间互联网, 在通信中继、对地观测和导航定位等领域发挥重要作用。

#### 1.1 网络结构

典型的空间互联网包含卫星通信系统、临近空间通信系统和地面通信系统<sup>[2]</sup>, 如图1所示。卫星通信系统由地球轨道卫星构成, 包括地球同步轨道卫星、中轨卫星和低轨卫星等, 节点间通过星间链路(ISLs)互联, 与临近空间和地面节点通过星地链路(SGLs)连接。卫星通信系统能够提供空间互联网中其他节点广泛稳定的通信接入中继服务, 并能更远深空探测器提供通信支持。临近空间通信系统包括亚轨道区间

飞行器, 如处于准静止状态的高空飞艇、气球和高速飞行的无人机等。地面通信系统包括地面接收站、车辆、船只和人员等, 通过有线网、无线移动和自组织网络等方式互联组网。

#### 1.2 网络特点

空间互联网由在轨卫星、临近空间飞行器和地面网络构成, 与传统地面通信网络相比, 具有3个特点<sup>[3]</sup>。

(1) 链路差异: 空间互联网中链路模型方面包含卫星和临近空间无

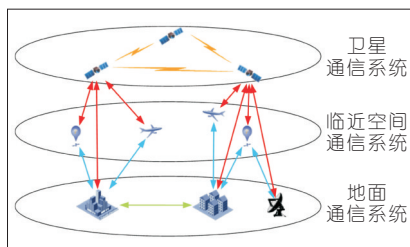
线连接, 地面无线和有线连接等。其中卫星和临近空间无线连接链路传输时延大、误码率高、上下行传输速率不对称, 与地面无线和有线连接环境存在显著差异。

(2) 拓扑动态: 空间互联网中拓扑结构包含周期运动的卫星, 固定的地面接收, 准静止的高空飞艇、气球和动态的无人机、地面车辆、船只和人员等。不同节点间连接中断频繁, 导致网络拓扑高度动态。

(3) 网络异构: 空间互联网中不同通信子网通信环境不同, 存在单播、组播和广播的传输模式, 面向连接和非连接的传输协议, 直接通信和中继通信方式, 网络高度异构。

### 2 空间互联网应用

空间互联网将临近空间、地球轨道空间甚至深空空间的飞行器、卫星



▲ 图1 空间互联网组成示意

收稿时间: 2016-05-02  
网络出版时间: 2016-06-16

和探测器组网,集成兼容了卫星通信系统、临近空间通信系统和地面通信系统,支撑全球范围通信覆盖需求,部署灵活多样,在通信中继、对地观测和导航定位等领域发挥重要作用。

## 2.1 通信中继

空间互联网覆盖范围广,在轨卫星、临近空间飞行器和地面通信设备互联,不仅能够与现有通信系统配合,为全球任意地区特别是远洋、山区等基础设施匮乏的区域提供通信中继支持,而且能够在地震和海啸等灾后或战争期间现有通信系统遭到破坏的场景下,提供应急通信服务。

## 2.2 对地观测

对地观测卫星搭载多种成像载荷飞行器和地面监测平台相互配合,能够实现对地球热点区域快速、全方位精确观测,并通过空间互联网将数据传输至地面监测中心处理。

## 2.3 导航定位

导航卫星通过发送导航信号,能够为陆地、海上和空中用户提供导航、定位和授时等服务,同时临近空间飞行器和地面设施能够提供辅助增强定位,并在卫星导航功能失效或收到干扰为用户提供替代服务。

# 3 空间互联网关键技术

空间互联网是地面互联网向空间方向的扩展。然而链路差异大、拓扑动态和集成异构等特点,对空间互联网应用提出了挑战,因此亟需在协议体系、路由技术、网络安全和网络仿真等关键技术领域开展研究。

## 3.1 协议体系

为完成通信任务,网络中各节点在收发数据时应遵守相应准则,即网络协议。网络协议体系是针对网络各层环境和需求而形成的网络协议集合,是网络节点互联互通的必要条件。目前空间互联网使用的协议体

系可分为3类:传输控制协议(TCP)/IP协议及改进,空间数据系统咨询委员会(CCSDS)协议及容迟/容断网络(DTN)协议<sup>[4]</sup>。

### 3.1.1 TCP/IP 协议及改进

传统TCP/IP协议针对地面网络设计,假定了网络中链路传播时延短、误码率低且存在端到端的连接。而空间互联网长传播时延、高误码率特性降低了TCP/IP协议效率,甚至无法完成数据传输。对此研究人员提出了改进协议,包括基于参数的改进协议,基于端到端的改进协议和基于分割的改进协议<sup>[5]</sup>。基于参数的改进协议优化了参数配置;基于端到端的改进协议修改了传统协议中拥塞控制和差错检测方案,如TP-Planet和TCP-Westwood协议;基于分割的改进协议根据具体网络环境,分割数据传输链路并分别对应处理,如空间通信协议标准-传输协议(SCPS-TP)和比例显式控制协议(P-XCP)。TCP/IP协议及改进技术成熟,和地面网络互联简便,然而空间互联网不同子网对其适应程度不同,因此效率较低。

### 3.1.2 CCSDS 协议

CCSDS协议是空间数据系统咨询委员会提出的针对空间通信的协议体系,包括数据链路层至传输应用层一系列协议,如CCSDS文件传输协议(CFDP),空间通信协议网络规范协议(SCPS-NP),高级在轨系统(AOS)协议等<sup>[6]</sup>。CCSDS协议虽然较为完善,但是不适于移动接入情况,不能直接与传统地面网络互联。

### 3.1.3 DTN 协议

DTN协议是由Fall等于2003年提出针对空间互联网提出的协议体系。为实现不同子网间异构互联,DTN协议体系在应用层与传输层之间引入覆盖层,使子网底层协议能够与子网环境相匹配,包含Bundle协议, Licklider 传输协议(LTP)和

Saratoga协议等<sup>[7]</sup>。DTN采用存储转发的方式,应对网络断续连接的特性。DTN协议将连接分为两类:永久连接和间断连接(包括安排、机会和预测连接),定义了3种数据传输优先级和8种传输选项,实现数据在异构动态网络中的传输,为空间互联网建设提供可行方案。

## 3.2 路由技术

数据在网络中传输路径规划需要路由技术的支持。高效、可靠的路由技术可以提高网络吞吐量,减少网络拥塞,减少端到端的时延。而链路差异、动态拓扑和网络异构特点使得传统地面路由技术不适用于空间互联网。空间互联网的路由技术亟需深入研究。

### 3.2.1 卫星通信系统路由技术

卫星网络拓扑周期性变化,经典的卫星通信系统路由设计都采用了离散化的方法,包括虚拟拓扑路由、区域划分路由和按需驱动路由。

虚拟拓扑路由采用时间离散,根据卫星运动周期性规律,将网络周期划分为时隙,在时隙内网络拓扑保持不变,将动态的网络映射为时间离散的网络快照<sup>[8]</sup>。该类路由借鉴了静态路由计算方案,但对于突发状况适用性不强,对节点存储需求较高。区域划分路由采用空间离散,将地球表面划分成不同的逻辑区域,卫星逻辑地址为星下点对应区域编号<sup>[9]</sup>,在路由计算时依据逻辑地址进行规划。该类路由屏蔽了卫星节点的移动,但只适用于规则拓扑结构网络,计算出的路径未必最优。按需驱动路由根据数据传输的需求更新网络拓扑,无数据发送时保持拓扑结构不变<sup>[10]</sup>。该类路由在网络节点数和传输数据量较小的场景中能减小网络离散数目,但是对复杂网络适应性不强。

### 3.2.2 临近空间通信系统路由技术

临近空间通信系统包含准静止

的高空飞艇、气球和高速飞行的无人机,主要通过节点移动和链路状态预测<sup>[11]</sup>,或针对卫星-临近空间飞行器-地面站多层次的网络结构,设计负载均衡或最小跳数的路由方案。

### 3.3 网络安全

空间互联网中开放式的通信环境和异构的网络结构,易受到不同层次不同程度的干扰和攻击,带来网络安全威胁<sup>[12]</sup>。网络安全与网络建设和应用息息相关,针对空间互联网的安全问题需要进一步研究。

#### 3.3.1 安全协议体系

空间互联网具有多层次的协议体系,针对不同层位置和功能设计相应的安全机制<sup>[13]</sup>。安全协议体系应遵守上层安全机制不能违反底层安全机制和各层安全机制相互关联等要求。具体而言,物理层安全服务指数据流机密完整性,数据链路层安全服务指连接机密性和认证,网络层和传输层安全指认证、访问控制,应用层安全指机密完整性、认证和访问控制等。同时针对空间互联网动态拓扑特性,跨层设计的安全协议引起广大学者关注。

#### 3.3.2 安全机制

空间互联网安全需要相应的安全服务机制,如加密、认证和访问控制等<sup>[14]</sup>。加密是指为保证机密性,通过对称或非对称的密码算法,对数据进行加密,防止非授权用户获取信息的技术。认证是指通过密码等方式获取接入或访问网络的权限,防止伪装用户攻击的技术,可细分为身份、数据源认证和密钥交换等。访问控制是指限制访问和使用网络资源的技术。主要有3种方式,即主动性、执行性和基于角色的访问控制。

### 3.4 网络仿真

空间互联网的建设具有高投入、高风险特点。因此,通过搭建仿真平

台,对拟建设的通信系统进行评估,确定其具体性能指标,并对数据的网络传输过程进行直观的显示显得尤为重要<sup>[15]</sup>。现有的仿真平台主要有NS2、OPNET、ION等。此外,中国的一些高校和科研院所也自主开发了相应的仿真平台。其中,西安电子科技大学在物理层仿真方面成果显著,哈尔滨工业大学提出并设计了基于高层体系结构的分布式仿真平台。

## 4 结束语

空间互联网是地面互联网络向临近空间、地球轨道空间甚至深空空间的拓展。在轨卫星、空间飞行器和地面设施互联互通,满足全球范围的通信覆盖,部署灵活多样,在通信中继、对地观测和导航定位等领域发挥重要作用。空间互联网具有链路差异、拓扑动态和网络异构的特点,对空间互联网的应用提出了挑战,因此亟需对协议体系、路由技术、网络安全和网络仿真等关键技术开展研究。

### 致谢

本研究得到中国工程院咨询研究项目“空间信息技术领域发展战略研究”资助,谨致谢意!

### 参考文献

- [1] 李纪舟,路璐,郭利民.空间互联网技术发展现状及趋势[J].通信技术,2015,48(1):1-7. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0802.2015.01.001
- [2] 吴伟强.面向天空信息网络的数据传输策略研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012
- [3] MUKHERJEE J, RAMAMURTHY B. Communication Technologies and Architectures for Space Network and Interplanetary Internet[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 15(2):881-897. DOI:10.1109/SURV.2012.062612.00134
- [4] WANG R H, TALEB T, JAMALIPOUR A, et al. Protocols for Reliable Data Transport in Space Internet[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2009, 11(2):21-32. DOI: 10.1109/SURV.2009.090203
- [5] 刘洋.空间通信网络中可靠传输协议研究[D].西安:西安电子科技大学,2011
- [6] JIAO J, ZHANG Q Y, LI H. An Optimal ARQ Timer Design of File Delivery Time in CFDP NAK Model[C]//2009 5th International Conference on Wireless Communications, NETWORKING and Mobile Computing. USA, IEEE:1-5, 2009. DOI:10.1109/WICOM.2009.5302912

- [7] CAINI C, CORNICE P, FIRRINCIELI R, et al. A DTN Approach to Satellite Communications [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(5):820-827. DOI: 10.1109/JSAC.2008.080608
- [8] GOUNDER V V, PRAKASH R, ABU-AMARA H. Routing in LEO-based Satellite Networks [C]//Proceedings of IEEE Emerging Technologies Symp: Wireless Communications and Systems. USA, IEEE: 221-226, 1999. DOI:10.1109/ETWCS.1999.897340
- [9] CHAN T H. A Localized Routing Scheme for LEO Satellite Networks[C]// ICSSC 2003. Yokohama, AIAA:2357-2364, 2003
- [10] PAPAPETROU E. Distributed on-demand Routing for LEO Satellite Systems [J]. Computer Networks, 2007, 51(15): 4356-4376. DOI:10.1016/j.comnet.2007.05.008
- [11] 徐世权.临近空间平台的路由技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010
- [12] 彭长艳.空间网络安全关键技术研究[D].长沙:国防科学技术大学,2010
- [13] 黄展.宽带卫星网络安全协议研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009
- [14] QI L, ZHI L. Authentication and Access Control in Satellite Network[C]// Electronic Commerce and Security (ISECS), 2010 Third International Symposium on. USA, IEEE: 17-20, 2010. DOI:10.1109/ISECS.2010.12
- [15] 张利强,郑昌文,胡晓惠,等.一种基于HLA的卫星仿真系统的设计与实现[J].系统仿真学报,2009,21(20):6487-6491

## 作者简介



**杨志华**,哈尔滨工业大学深圳研究生院副教授;现从事空间通信、LTE技术、车联网与DTN等领域的研究;曾承担包括国家自然科学基金、国家科技重大专项、中国工程院咨询项目、广东省自然科学基金、深圳市基础研究计划项目等在内的多项课题;发表SCI及EI检索文章27篇,申请专利38项,已授权10项,参与编著学术专著1部。



**袁鹏**,哈尔滨工业大学深圳研究生院工学在读博士;现从事于空间网络、DTN网络等领域研究;曾参与多项国家自然科学基金项目,发表论文3篇,申请专利5项。



**张钦宇**,哈尔滨工业大学深圳研究生院教授、博士生导师,电子与信息工程学院院长;现从事深空通信、认知无线电及其网络、空天网络一体化、脉冲超宽带、生物医学电子等领域的研究;主持和承担国家自然科学基金重点项目、面上项目、青年基金等项目;近5年来发表期刊及会议论文154篇,获得国家杰出青年科学基金。



# 天地一体化网络空间信息抗干扰技术

## Space Information Anti-Interference Technologies in Integrated Space and Terrestrial Information Network

陈新龙/CHEN Xinlong  
陈大可/CHEN Dake

(中国空间技术研究院, 北京 100094)  
(China Academy of Space Technology,  
Beijing 100094, China)

得益于低成本火箭发射技术、微小卫星平台技术和载荷技术的迅猛发展,实现全球信息,特别是天基信息共享的天地一体化信息网络正在全世界范围内引发广泛关注<sup>[1]</sup>。空间信息系统作为一类在太空中组网应用的特殊信息系统,因其应用环境的特殊性以及获取信息、传输信息的制约性,面临着较地面信息系统更为复杂、特殊的抗干扰问题。空间信息抗干扰问题已经成为影响这一网络正常获取信息、有效传输信息的关键问题之一,直接关系到空间信息在应急救援、智慧城市、国家安全等多个领域的应用。

### 1 空间信息抗干扰内涵

“空间信息抗干扰”与“空间信息对抗”密不可分。空间信息<sup>[2]</sup>对抗是指“空间攻防中,以信息获取、传输、存储、处理过程为中心构成的对抗。又称空间信息战。是一种信息化的作战形态,通过破坏敌方信息内容、基于信息过程、信息系统和信息网络,同时保护己方的信息、信息过程、信息系统和信息网络,取得制信息

收稿时间: 2016-05-10  
网络出版时间: 2016-06-23

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2016) 04-0049-005

**摘要:** 基于空间信息抗干扰概念和典型系统抗干扰技术应用分析,提出了天地一体化信息网络中空间信息系统在信息获取、传输、存储和处理过程中均面临干扰的特点。指出了国际上空间信息抗干扰的新趋势,如系统防护能力愈加全面、系统抗干扰能力不断增强、卫星组网日趋成熟、网络安全协议标准化等,同时还指出中国空间信息抗干扰面临的新问题,如多重干扰并存、“弹性”体系中的抗干扰能力生成、国际新环境下空间系统主动抗干扰等,并给出了天地一体化信息网络空间信息抗干扰未来的研究方向建议。

**关键词:** 天地一体化信息网络; 抗干扰; 空间安全

**Abstract:** In this paper, according to the definition of the space information anti-interference and the analysis of applications of the current schemes in foreign typical systems, we discuss the new characteristics during the procedure of the space information transmission, storage and processing. It points out the new trends, such as more comprehensive in system protection, stronger in resist interference, more mature in networking and standardization of network security protocols. In light of current developments in integrated space-terrestrial information network, some new information anti-interference issues must be considered, such as multi-type interference, ability achievement in resiliency satellite architecture and active behavior of space system in the new international environment. We propose some important and new directions for future work.

**Keywords:** integrated space-terrestrial information network; anti-interference; space security

权。”根据上述定义,我们认为:空间信息抗干扰是指以空间信息获取、传输、存储、处理过程为中心,为保护己方信息、信息过程、信息系统和信息网络,确保安全、有效地利用空间信息的技术手段。

天地一体化信息网络中,面临干扰威胁的组成要素有空间段的卫星系统,包括轨道段的卫星,信息传输、处理过程的跟踪控制链路(TT&C)和数据链路,以及地面段的地面站、用户设备等,不同的空间系统和网络设施需要对抗的潜在干扰类型和环节

也不同。文章针对空间信息传输、存储和处理过程中的抗干扰技术,研究了其他一些国家相关系统和技术的发展现状与趋势,分析了目前存在的主要问题,提出了未来的研究方向。

### 2 典型的空系统抗干扰技术

#### 2.1 美军通信卫星抗干扰技术

美军的受保护通信卫星系统经历了从“军事星”(Milstar)到“先进极高频”(AEHF)卫星的更新换代。在

系统建设初期,鉴于当时的冷战、核战形势,Milstar I 卫星突出强调核作战条件下的防护性能;随着冷战结束,Milstar II 卫星弱化了核防护能力,提升了抗干扰能力及通信性能;而 AEHF 是美国新一代高防护性能的地球静止轨道军事通信卫星系统,用于替代“军事星”卫星系统,代表了国际上抗干扰卫星通信的最高水平。针对实时视频、战场图像、目标数据等战术信息传输的新需求,AEHF 进一步提升了通信速率、系统容量,在包括核战争在内的各种规模战争中,为美军关键战略和战术部队提供防截获、抗干扰、高保密和高生存能力的全球卫星通信<sup>[3-4]</sup>。其在抗干扰方面的主要技术特点如下:

(1) 业务容量和数据速率获大幅提高

AEHF 卫星在 Milstar-II 卫星低数据率载荷(LDR)和中数据率载荷(MDR)能力的基础上,增加了扩展数据率载荷(XDR)能力,最大数据率提高到 8.192 Mbit/s。AEHF 卫星的单星数据容量从 Milstar-II 卫星的 40 Mbit/s 提高到 430 Mbit/s,超过了 Milstar 卫星通信系统的总和。星间链路数据率也由 10 Mbit/s 提到了 60 Mbit/s。

(2) 采取多重措施以增强抗干扰能力

采用波束成形网络提供调零天线,对于潜在干扰,波束成形网络将使天线自动调零,而在波束覆盖范围内的合法用户则可以正常使用卫星,不需要由地面控制和干涉。而且,采用的波形本身也具有很强的抗干扰能力。此外,除了采用扩频或跳频技术实现低检测概率和低截获概率,还应用了先进的加密技术,密钥由美国国家安全局提供。

(3) 星间链路能力提升互联互通能力

系统中卫星之间具有星间链路,与 Milstar 卫星之间也有星间链路。AEHF 星间链路通过 V 波段(60 GHz)星间链路天线实现,星间链路天线馈

源可以在 60 GHz 的频率上以 5% 的带宽实现单脉冲跟踪。

## 2.2 GPS 系统抗干扰技术

全球卫星定位系统(GPS)的重要作用和作用使其必然成为攻击的靶子。虽然目前 GPS 系统采用了扩频措施用于降低非授权用户定位精度的选择可用性(SA)措施(已取消),用于反电子欺骗和保密的反电子欺骗(AS)措施(P 码及 Y 码)等,具备了一定的防护能力;但随着攻击技术的研究和发展,只需要以足够高功率、具有适当时空特征的欺骗干扰信号,就可以在指定的威胁区域使 GPS 失效。为此美军方提出了全新的 GPS III 计划,重新设计天基导航和授时系统,包括卫星设计、补充要求、信号增强及抗干扰。有效载荷抗干扰措施主要包括:

(1) 提高空间信号的完善性,要求对星上故障或信号超差能在 60 s 内发出通知。

(2) 采用新的军用 M 码信号,结合新的 M 码信号以抗拒非授权者使用,且能抵抗干扰。

(3) 提高功率和点波束发射,采用高增益点波束天线,能对选定地区集中更高的功率。M 码信号至少增强 20 dB,以对付干扰的威胁。

此外,针对卫星导航在防欺骗方面的脆弱性,研究人员分别从信号体制、终端技术及外部辅助等 3 个方面提出了许多防欺骗技术<sup>[5-8]</sup>,开展了相关研究。

## 2.3 英国 Skynet 系列卫星通信系统抗干扰技术

英国的军用通信卫星天网(Skynet)迄今已发展到了第 5 代。Skynet-5 卫星体现了军事卫星通信的前沿,如星上载有特高频和超高频有效载荷,采用调零天线增强抗干扰能力,拥有多种可控点波束,并可通过铱星等提高其通信业务的覆盖面。其主要性能和特点有:

(1) 高性能的卫星平台

欧洲星-3000S 卫星平台是在欧洲星-3000 的基础上专门研制而成的,其综合性能世界领先,能够满足卫星的设计和尺寸要求,可携带 70 台以上的转发器。

(2) 高性能的星载设备

星载设备符合北约防核及防激光辐射设施安全标准。星载的超高频和 X 频段转发器数量是 Skynet-4 转发器数量的 3 倍多,且天线具有多点波束可旋转性;通信容量是 Skynet-4 卫星的 5 倍以上,通信速率也大幅提高,可提供安全可靠的实时加密语音和数据链路通信。

(3) 灵活的覆盖能力

具备覆盖大西洋和印度洋的通信能力,装备有先进的现代化通信设备,可为英军提供安全、高效、大容量的军事通信服务。卫星的 4 副可控天线及超高频和 X 频段转发器,可根据任务需要将波束指向某一地区,使通信效率和灵活性大大提高。此外,还与美国军用卫星相互兼容和联通,同时也与铱星、国际通信卫星和国际移动卫星等商业卫星联通,系统综合利用率既灵活又高效。

(4) 较强的抗干扰能力

采用调零天线增强了抗干扰能力,并且增加了硬度以防核辐射和激光侵蚀;同时采用如码分多址、星上处理和多波束调零天线覆盖等现代通信的高新技术,使得英军在未来 10 年的信息化作战能力和全球机动作战保障能力等方面得到了进一步的提升。

(5) 新型电子密钥管理

安装了新型密码装置,该系统中的 CLERISY 采用美国的电子密钥管理系统标准协议。为通信保密管理人员提供自动管理、生成、分发、存储、统计和访问控制等功能。

## 2.4 俄罗斯通信卫星抗干扰技术

俄罗斯卫星通信起步早,拥有多个卫星通信系统,陆海空三军都装备

有卫星通信终端,但是数字化水平低,功率小,数据传输速率低,其能力远低于美国等西方发达国家的卫星通信系统。其主要特点是依据较多种类的卫星以及卫星星座构成相应的卫星通信系统。

## 2.5 其他相关技术发展

随着空间技术的发展,一些新型的防御措施也可以起到信息抗干扰防护的作用<sup>[9-10]</sup>,例如,空间网络安全协议的标准化、在星间采用的具有高度保密性及抗干扰性的激光通信手段、卫星轨道机动技术以保障卫星正常工作以及“弹性”。

### 2.5.1 CCSDS 通信安全协议

民用空间链路采用国际空间数据系统咨询委员会(CCSDS)标准,美国 and 欧洲军用航天器也在推广CCSDS标准。CCSDS协议较为广泛的应用集中在链路协议。链路层安全协议只能hop-hop级,但是空间链路可以考虑采用链路层以上的安全协议实现端到端的安全性<sup>[11-13]</sup>。对于现有的链路层通信安全协议来说,主要考虑CCSDS标准中的空间通信协议规范-安全协议(SCPS-SP)和地面成熟的互联网安全(IPSec)协议。

### 2.5.2 空间激光通信技术

空间激光通信是以激光作为信号载体,在自由空间信道和大气信道中传输,实现信息交换。相较于微波通信,在传输速率和容量方面,激光通信具有频带宽、潜在传输速率高的优势;在通信安全性方面,激光通信具有保密性好以及抗干扰这一明显优势;此外,激光通信终端体积小、重量轻、功耗低,非常适合卫星搭载。美国把激光通信作为航天技术重点发展的18个领域之一。发展包括月球激光通信演示(LLCD)项目、火星激光项目等。其中,LLCD项目是世界上首次进行深空激光通信在轨演示验证的项目。该体制也为美国国家

航空航天局(NASA)今后发展深空激光通信的主要方式。

### 2.5.3 卫星轨道机动技术

美国在轨运行的高级光电成像侦察卫星“锁眼”具有极强的机动变轨能力,燃料用完后可由航天飞机对其进行在轨加注,因而可随时调整卫星轨道。利用卫星自身机动能力,既能够机动灵活地在轨道上运行,躲避反卫星武器的攻击进行被动防御,又可以在其上安装空间监视装置,攻击告警装置和针对威胁的对抗装置,部署在主卫星周围进行伴飞,当发现有针对卫星的攻击行为时,可以针对攻击进行诱骗、阻挡或拦截等主动防御。可以说,该系统是美军对空间防御问题进行长时间思考的结果<sup>[14]</sup>。

### 2.5.4 灵活的“小空间”系统

“小空间”系统因研制周期相对较短,具有快速响应、按需发射、灵活组网、成本可控的独特优势,可显著增强美国的空天系统弹性<sup>[15]</sup>。作为探索小卫星迈向作战应用的重要项目,美国的“作战响应空间”(ORS)项目已经取得显著进展。该类系统既可降低技术风险,节约研制费用,缩短研制周期,又可以增强空天系统的灵活性和强健性,空间单个节点失效将不会造成整个系统服务能力失效。

## 3 空间信息抗干扰发展趋势分析

(1)大力发展军事通信卫星的抗干扰能力

通过发展星载高分辨率多波束自适应调零天线技术、极高频(EHF)抗干扰技术、直扩(DS-SS)和跳频(FH)、跳时(TH)技术及其混合技术、星上再生处理技术等,消除对方的强干扰,保证卫星安全稳定运行。如美国的抗干扰系列卫星AEHF,英国的Skynet系列卫星等代表了当今世界卫星通信抗干扰技术的最高水平,并且保证了卫星具有很强的抗干

扰功能。

(2)系统防护能力愈加全面

根据可能面临的各种干扰威胁,美军对抗干扰卫星通信系统都进行了全面的防护设计,在系统平台、载荷、测控链路、通信链路等各方面都进行了精心考虑,采用了各种先进的电子防御手段,确保系统没有明显的短板,能够对抗各种形式的干扰威胁。英、法等空天系统也针对潜在的干扰采取了较为全面的防护设计。空间信息抗干扰技术正向抗核辐射、高可控、高防护能力方向发展。

(3)系统抗干扰能力不断增强

从Milstar-I系统的单用户最高速率为2.4 kbit/s,但是单星容量不到0.5 Mbit/s,发展到Milstar-II系统的单用户最高速率1.544 Mbit/s,单星容量40 Mbit/s,到AEHF系统单用户最高速率达8 Mbit/s、单星容量430 Mbit/s,其规划的下一代系统单用户最高速率为45 Mbit/s,单星容量近10 Gbit/s。空间信息抗干扰技术正朝着超大容量、超宽带、高速率保密通信的方向发展。

(4)卫星组网日趋成熟

无论是美国的军事星系列,还是英国的Skynet系列,或是借用商业卫星的军事通信,均为组网应用方式,既有高轨卫星组网,又有中、低轨卫星组网。卫星组网在很大程度上增加了卫星的自主性,提高了卫星系统的抗干扰和抗毁能力。

(5)网络安全协议标准化

无论是欧洲航天局(ESA)还是NASA,都对CCSDS中规定的标准大力推广。在民用航天方面,已经得到大量应用,在军用航天方面,也在推广。采取的安全方案往往简洁明了,易于执行。

## 4 空间信息抗干扰存在的问题

上面介绍了近年来典型空间信息抗干扰技术的主要研究成果,这些工作都取得了一定成效,但随着



新技术和干扰/攻击手段的不断发展,目前仍有几个方面的相关问题有待解决。

(1)多重干扰并存下的空间信息系统可用性问题

对空间信息系统的干扰手段是多样的,抗干扰的措施也层出不穷,但是现在还没有一种抗干扰技术可以抵御任何干扰。可以说,空间信息系统的抗干扰是一项系统工程,它要综合考虑到干扰方可能采用哪些干扰手段的最低通信需求,或者自然干扰的特征是什么,并根据其具体环境来选择相应的抗干扰手段。

(2)“弹性”体系中的抗干扰能力生成问题

未来空间信息网络不仅通过单一手段进行信息安全防护,网络中的路由技术可以是跨层设计,通信链路中的抗干扰手段可从信息层面到信号层面都进行防护,并采用多种新型的手段,防止信息被截获或者篡改。

(3)国际新环境下的空间系统主动抗干扰问题

从目前以美国为首等发达国家发布的空间战略中可以看到,其对于空间网络的安全观发生了重大转变,从以往的基于安全防护的基调转变为增加空间威慑力,但同时也表明开展航天国际合作的态度。

## 5 结束语

信息网络抗干扰问题不容忽视,

需要客观分析面临的潜在干扰威胁,特别是空间信息系统的抗干扰问题,寻找切实可行的技术方案。文中,我们讨论了空间信息抗干扰的概念内涵,研究了典型空间系统的抗干扰技术发展,总结了空间系统防护能力、抗干扰技术手段、应用模式、协议标准化等方面与空间信息抗干扰相关发展趋势,并探讨了这些技术存在的问题。

### 参考文献

- [1] 张乃通, 赵康健, 刘功亮. 对建设我国“天地一体化信息网络”的思考[J]. 中国电子科学研究院学报, 2015, 6(10): 223-230
- [2] 王兆耀, 张育林, 张珩, 等. 中国军事百科全书(第二版)军事航天技术(学科分册)[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 2008
- [3] 张春磊. 美军“移动用户目标系统”与“特高频后继”卫星性能对比分析[J]. 国际太空, 2015(4): 46-50
- [4] 朱贵伟. 美国先进极高频-2军事通信卫星[J]. 卫星应用, 2012(4): 封三
- [5] LEE G C, GUO L X, SUN J J, et al. Research on the GPS Signal Scattering and Propagation in the Tropospheric Ducts[C]// International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP). USA: IEEE, 2013: 1102-1105
- [6] JONATHAN A, LIU H. Modeling and Characterization of GPS Spoofing[C]// IEEE Conference on Technology for Homeland Security. USA: IEEE, 2013: 729-734. DOI: 10.1109/THS.2013.6699094
- [7] WANG E, ZHAO W, CAI M. Research on Improving Accuracy of GPS Positioning Based on Particle Filter[C]// In Processing of IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). USA: IEEE, 2013: 1167-1171. DOI: 10.1109/THS.2013.6699094
- [8] 黄龙, 吕志成, 王飞雪. 针对卫星导航接收机的欺骗干扰研究[J]. 宇航学报, 2012, 33(7): 885-890
- [9] DAVIS T M, ATWOOD T, SKARUPA V. Operationally Responsive Space: Assured Space Power Focused On Timely Satisfaction of Joint Force Commander Needs [R]. 2013
- [10] YASAR N, FATIH M, YUCEL T. Operational Advantages Of Using Cyber Electronic Warfare(CEW) In The Battlefield[C]// in Processing of SPIE 8408 Cyber Sensing. USA: SPIE, 2012(84080G): 1-9. DOI: 10.1117/12.919454
- [11] CCSBS. Authentication/Integrity Algorithm Issues Survey: CCSBS 350 3-p1[S]. USA: CCSDS Secretariat, 2008
- [12] DIERKS T, RESCORLA E. The Transport Layer Security (TLS) Protocol: RFC 5246 [S]. USA: ISOC, 2008
- [13] CCSDS. Security Threats against Space Missions[S]. CCSBS 350 1-G-1. USA: CCSDS Secretariat, 2006
- [14] 王景泉. 美国调整军事航天器的发展策略[J]. 航天器工程, 2014, 6(23): 98-104
- [15] 梁巍. 斯诺登泄密文件暴露美国天基侦察系统发展现状[J]. 国际太空, 2014(8): 4-13

### 作者简介



工作;发表学术论文10余篇,获得多项国防/国家发明专利。



篇,申请多项国防/国家发明专利。

**陈新龙**, 中国空间技术研究院(五院)钱学森空间技术实验室博士、高级工程师, 中国指挥与控制学会专业委员会委员, 五院科学技术委员会专业组专家;长期从事新概念航天器总体设计、卫星动力学与控制等工作;先后主持完成总装预研、“863”等多项课题研究

**陈大可**, 中国空间技术研究院(五院)钱学森空间技术实验室博士、工程师;长期从事新概念航天器总体设计、卫星供电系统设计等工作;作为课题技术负责人或主要成员承担总装预研、军口“863”、国防科工局项目10余项;发表学术论文及国防科技报告8

## 综合信息

### 物联网五大新兴“战场”显现工业互联网规模庞大

战略咨询公司贝恩近日发布《物联网的新兴战场》报告称,物联网正在快速发展。该报告介绍了物联网的5个新兴“战场”,旨在帮助企业正确界定物联网。

(1)消费者物联网:众多公司将业务延伸到可穿戴设备、智能家居等领域,引领消费者物联网的发展。

(2)工业互联网:工业互联网规模将比消费市场更大。由于能帮助企业降低成本、增加需求和扩大影响,越来越多的企业包括国际大企业都开始采用工业

互联网技术。

(3)网络:许多行业将要求能够实时分析其网络,实现方法就是拥有能够支持超高网速的高效网络。

(4)实时分析:物联网的普及将导致企业对网络、服务器等的实时分析产生更大的需求,企业和分析服务提供商之间的紧密合作将会带来多个领域的创新。

(5)自动化:无人驾驶汽车、无人机和机器人等自动化技术的出现和发展,将为消费者和企业提供许多好处。

(转载自《中国信息产业网》)

# 关于天基传输网络体系结构的讨论

## The Space-Based Transmission Network Architecture

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2016) 04-0053-005

**摘要:** 认为天基传输网络是天地一体化信息网络的基础设施,其体系结构对整个一体化体系有着重要影响。提出“骨干+区域增强”的双层天基传输网络架构,并对其在星上能力、空中接口、协议体系、路由交换、综合验证等方面需要关注的问题进行了讨论。

**关键词:** 天地一体化信息网络;天基传输网络;网络体系结构;网络协议

**Abstract:** The architecture of the space-based transmission network has a substantial impact on the integrated space and terrestrial information network. A two-layered architecture constructed by integrating geostationary orbit (GEO) and low earth orbit (LEO) satellite constellations is proposed for the space-based transmission network, and related issues such as the onboard processing ability, air interface, protocol stack, routing and switching, and systematic verification are discussed.

**Key words:** integrated space and terrestrial information network; space-based transmission network; network architecture; network protocol

刘华峰/LIU Huafeng<sup>1</sup>  
孙智立/SUN Zhili<sup>2</sup>  
杨昕/YANG Xin<sup>2</sup>  
赵康健/ZHAO Kanglian<sup>3</sup>  
程子敬/CHENG Zijiang<sup>4</sup>

(1. 中国科学院, 北京 100190;  
2. 萨里大学, 萨里 吉尔福德 GU2 7XH;  
3. 南京大学, 江苏 南京 210093;  
4. 航天恒星科技有限公司, 北京 100086)  
(1. Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;  
2. University of Surrey, Guildford, Surrey GU2 7XH, UK;  
3. Nanjing University, Nanjing 210093, China;  
4. Space Star Technology Co., Ltd., Beijing 100086, China)

- 依靠天基传输网络实现通信支援、数据快速回传和及时响应是突破全球信息支援困境的唯一途径
- 需要从由理论规划向工程实践过渡的角度出发,探讨双层天基传输网络架构的关键问题
- “骨干+区域增强”的双层天基传输网络架构即以静止轨道通信和中继卫星为骨干,低轨道卫星和临近空间平台对关键区域进行增强的双层天基传输网络架构

天地一体化信息网络是一种通过星间、星地以及地面链路,有机联合陆、海、空、天各种平台的综合性信息网络系统。由于其对维护国家信息安全、引领空间科技前沿、带动新兴技术产业、形成核心竞争力所具有的深远意义,天地一体化信息网络已成为了当今世界重要的国际科学前沿和战略制高点。

美欧等空间科技强国从20世纪中叶就开始了天地一体化信息网络的探索和研究。中国政府在“九五”末期提出天基综合信息网计划,并在“十一五”期间提出“空间信息网络”的概念。当前,天地一体化信息网络已经被纳入中国国家发展战略。在2016年3月发布的“十三五”规划中,

提出要“加快构建高速、移动、安全、泛在的新一代信息基础设施,推进信息网络技术广泛运用,形成万物互联、人机交互、天地一体的网络空间”,并明确将“天地一体化信息网络”作为重大工程列入“专栏3 科技创新2030——重大项目”<sup>[1]</sup>。

天地一体化信息网络是一个复杂的大型体系,包含传输、感知、处理、时空基准和应用等多个不同的系统。在整个体系中,天基传输系统发挥着连接各类陆、海、空、天基平台,并为其提供全球化信息支持的重要作用。

作为天地一体化信息网络的基础设施,天基传输网络结构是整个天地一体化信息网络架构的基础<sup>[2-4]</sup>,因此中外研究者对天基传输网络体系结构开展了诸多的研究。根据近年来的研究和思考,我们提出对当前天

基传输网络体系结构问题的一些认识,希望能够为目前的研究工作提供参考,并起到促进作用。

## 1 天基传输网络发展现状

### 1.1 国际现状

近年来,美国和欧洲等航天技术发达的国家或地区政府,以及Google、Facebook、SpaceX等国际互联网巨头和商业公司,分别从国防和经济目的出发,先后推出一系列天地一体化网络/天基传输系统体系结构。

收稿时间: 2016-05-17  
网络出版时间: 2016-07-01

早在2002年,美国军方就针对其全球化军事战略需求,提出转型通信计划(TCA)<sup>[5]</sup>,目的是改进其全球军事卫星通信体系结构;2006年美国航空航天局(NASA)根据其天基网络、近地网络和深空网络现状和未来发展,提出空间通信与导航计划(SCaN)<sup>[6-7]</sup>。2008年欧盟提出全球通信一体化空间架构(ISICOM)以支撑“欧洲空间政策”的实现<sup>[8]</sup>。在商业领域,2007年成立的O3b Networks公司针对大型企业和政府的蜂窝回程和IP干线传输业务,打造覆盖地球南北纬45°之间所有地区的Ka频段中轨卫星星座,2014年开始提供服务,2015年在轨卫星数量达到12颗。2014年底至2015年初,面向全球提供互联网接入服务,OneWeb、SpaceX、Leosat等多家公司都推出了各自的、由低轨小卫星组成的卫星互联网星座计划,其中OneWeb已经获得频率轨位。这些星座的主要参数如表1所示<sup>[10]</sup>。

综上所述,从国际趋势来看,经过数十年的积累,天地一体化信息网络已经开始逐步进入工程实施阶段。

## 1.2 中国现状

目前,中国对天地一体化信息网络的研究和规划进入加速发展阶段。工信部、科技部、国家自然科学基金委等科技部门、工业界和各大科研院所持续推进天地一体化信息网络的基础性研究和规划论证工作。2013年国家自然科学基金委启动“空间信息网络基础理论与关键技术重

大研究计划”;同年12月,工业和信息化部电子科学技术委员会启动“天地一体化信息网络发展思路研究”课题。2015年国家高技术研究发展计划(“863”计划)启动“未来一体化网络关键技术和示范”项目,同年11月,中国工程院设立“空间信息技术领域发展战略研究”重大咨询项目。天基传输网络结构始终是这些计划与项目研究的核心问题。

随着天地一体化信息网络受到日益广泛的关注,世界上越来越多的研究者加入这一领域,对天地一体化信息网络研究的发展起到了巨大的推动作用。天地一体化信息网络研究本身是一个巨大而复杂的系统工程问题。在涉及体系结构问题时,一体化概念下庞大的规模,不同的视角,常常导致研究问题的泛化和过度复杂化,进而在很多方面难以达成共识,这客观上给由系统结构研究向系统建设的转变带来了困扰。例如,仅就天基传输网络拓扑而言,目前在中国的研究中经常出现的就有高、中、低轨多层结构,高轨和低轨双层结构,中轨和低轨双层结构等多种假设方案。

## 1.3 发展情况对比

在国际发展进入工程阶段,中国大型工程准备启动的大背景下,良好界定系统边界,聚焦研究方向,才能有效推进体系结构研究规划向系统建设转变。在这一点上,值得吸取教训的典型例子是美国的转型通信计划。该计划历时数载,由于耗资巨

大,系统过于复杂,各方向技术发展水平难以均衡等因素,发展一直受到进度和预算问题的困扰,直至最终被迫取消。而作为成功的例子,卫星互联网星座O3b Networks仅用半年时间就达到了原计划1亿美元的收入水平,避免重蹈当年铱星系统的覆辙,关键在于其准确的定位——面向电信运营商,为地面通信覆盖不到的岛屿和海上大型船只提供服务),以及精简的系统规模——覆盖南北纬45°区域仅需12颗中轨卫星,比起铱星星座66颗卫星的规模,大大降低了成本和系统复杂性。

因此,我们认为从体系建设的角度出发,中国的天基传输网络体系结构,要契合国情,立足于航天系统现状,紧扣当前紧迫需求开展设计,保持有限规模,降低系统复杂性,同时要将初期建设成本和实现的时间跨度纳入设计要素。

## 2 “骨干+区域增强”的天基传输网络体系结构

### 2.1 关键需求

随着经济的发展,网络技术正向全球乃至太空拓展。对于日益增长的全球化信息支援需求,如果无法实现全球范围的地面站网,那么在航天测控的全球支持方面会受到限制,同时也难以实现全球范围内的及时信息获取、回传和通信支援,进而导致在应急突发、航天测控、航空运输、海洋权益等领域面临全球信息支援的困境。在这种条件下,依靠天基传输网络实现全球通信支援、数据快速回传和及时响应是突破这一困境的唯一途径。

### 2.2 网络体系架构

全球覆盖是天基传输网络实现全球信息支援的前提和首要条件。但需要指出的是:针对关键需求而言,这里天基传输网络的“全球覆盖”并不是指无差别的24 h全球地表覆

▼表1 卫星互联网星座的主要参数

|        | 卫星数量      | 轨道高度/km  | 频段    | 覆盖        | 星间链路 | 单星重量/kg | 星座容量         | 数据传输率/(Mbit/s) | 时延/ms | 目标用户                |
|--------|-----------|----------|-------|-----------|------|---------|--------------|----------------|-------|---------------------|
| O3b    | 目前在轨12颗   | 8 062    | Ka    | 南北纬45°度之间 | 无    | 700     | 84(每8颗星)     | 1 600          | <150  | 电信运营商等大型企业<br>和政府机构 |
| OneWeb | 规划650颗    | 1 200    | Ku    | 全球        | 未知   | 125     | 5~10 Tbit/s  | 50             | 20~30 | 消费者和小型商业客户          |
| Leosat | 规划80~140颗 | 1 400 km | Ka    | 全球        | 有    | 未知      | 0.5~1 Tbit/s | 1 228          | 50    | 大型企业和政府机构           |
| SpaceX | 规划4 000颗  | 1 100 km | Ku、Ka | 全球        | 有    | 未知      | 8~10 Tbit/s  | 未知             | 20~30 | 消费者和小型商业客户          |



盖,应该是对于航天器和临近空间平台的测控和数据传输是在一定地表高度上的全球覆盖;而对于地面移动通信和互联网接入需求,定向区域覆盖仍然是主体,在此基础上保障全球范围内重点地区的覆盖。

因此,我们提出以静止轨道(GEO)通信和中继卫星为骨干,低轨道(LEO)卫星和临近空间平台对关键区域进行增强的双层天基传输网络架构,如图1所示。

在这一架构中3到多颗GEO骨干卫星通过星间激光或高速微波链路互联,形成传输网络骨干。骨干卫星承担对中、低轨卫星,以及特定区域内地面站视距外其他高轨卫星的测控管理,同时发挥对天基、空基和地基的通信和数据中继功能。在天

基传输网络建设的初期,骨干卫星在全球通信和数据中继方面发挥主导作用。

LEO通信卫星和临近空间平台,形成局域增强网络,并通过星间链路与骨干卫星连接,增强对关键地区的通信覆盖和信息支持。必要时,可再增加高椭圆轨道(HEO)卫星以提高对两极区域的覆盖。

遥感、导航等其他专业卫星系统通过星间链路,根据标准的系统间接口接入天基传输网络。

地面骨干网络通过信关站与天基传输网络连接,形成一种天地双骨干的架构。

### 2.3 需要关注的问题

在“骨干+区域增强”的双层天

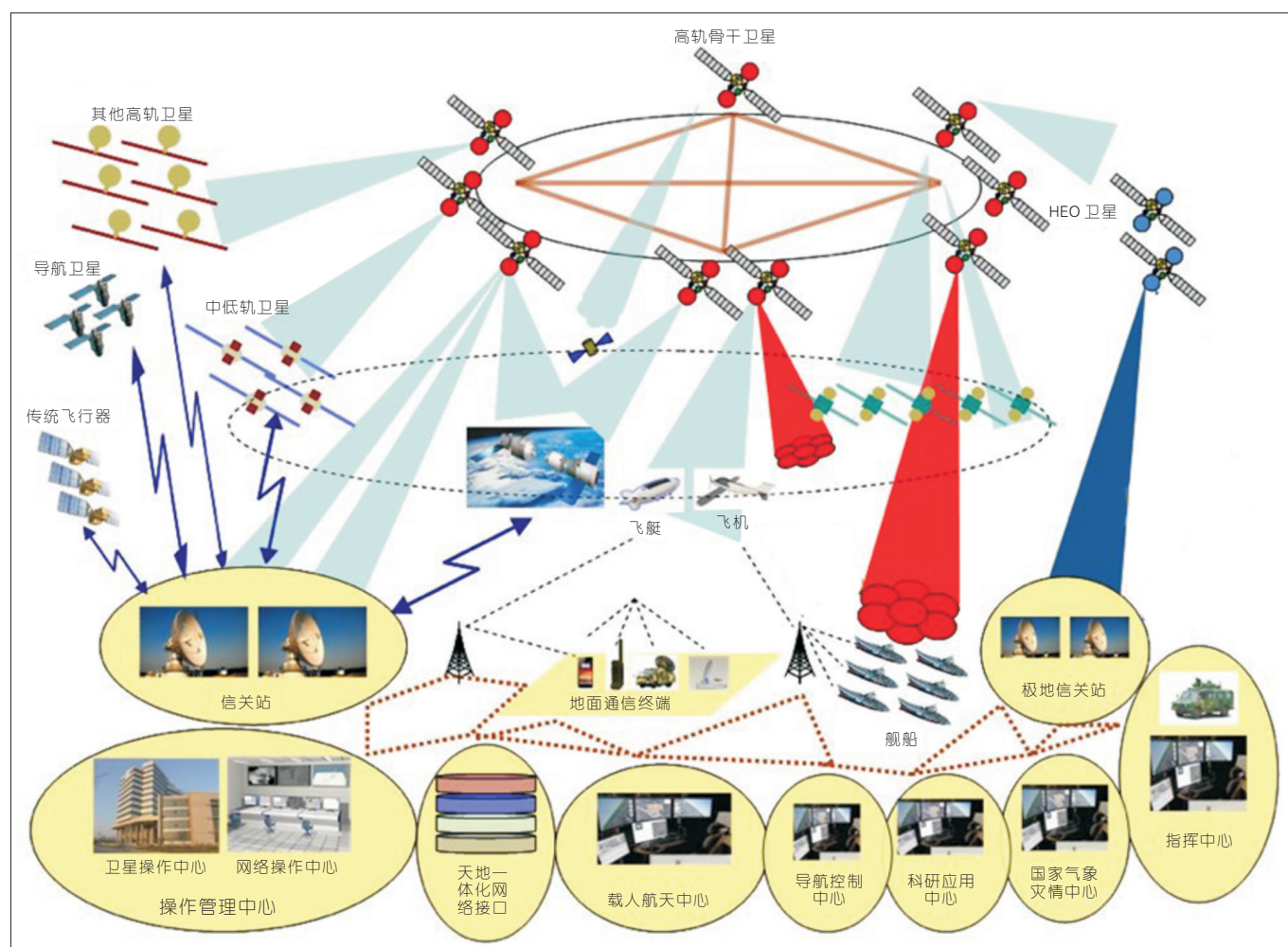
基传输网络架构中,需要重点考虑一些问题。

#### (1) 大容量和多功能的骨干层

在星上载荷方面,对处于核心位置的GEO骨干卫星有大容量和多点波束的要求。结合高通量卫星(HTS)的发展,目前的重点是激光链路、Ka频段相控阵和星上处理等技术<sup>[11-12]</sup>。

同时,在单颗静止轨道大平台上承载多种载荷有困难时,为了克服轨位限制,要发展多颗不同功能小型静止轨道卫星共轨的技术。NASA的小型天基卫星项目(SSBS)<sup>[13]</sup>和ESA的小型静止轨道卫星项目(SGEO)值得关注<sup>[14]</sup>。

#### (2) 有限规模可以扩展的区域增强层



▲ 图1“骨干+区域增强”的双层天基传输网络架构

一方面,根据对关键区域服务的需求,以及对目标用户分布的分析和预测,结合不同业务属性的数据传输要求,合理布局星间链路,开展有限规模但具有扩展性的低轨卫星星座设计。

另一方面,充分利用目前微小卫星和临近空间平台领域快速发展所产生的技术成果,发挥其低造价、低成本、系统灵活、可重构的优势<sup>[15]</sup>。同时增强应急发射/应急布设的能力,实现应急救援等情况下的区域内快速覆盖增强。

#### (3) 标准化的空中接口

具有高频谱效率和能量利用率的标准化空中接口是实现系统可扩展性的关键。这主要包括两个方面:一是保证低轨区域增强的通信卫星星座逐步扩展为全球覆盖星座;二是为遥感、导航等其他专业卫星系统与天基传输网络的互联提供基础。

#### (4) 以IP为核心的网络协议体系

天地一体化信息网络协议体系研究一般涉及到传输控制协议(TCP)/IP、国际空间数据系统咨询委员会(CCSDS)和容迟容断网络(DTN)三大体系。其中,CCSDS已基本停止了对空间通信协议标准(SCPS)协议体系的更新与维护,并建议采用DTN架构<sup>[16]</sup>。从目前国际上已经开展的作为互联网节点的航天操作任务(OMNI)、航天飞机上的通信与导航演示(CANDOS)、太空互联网路由器(IRIS)、DTN在轨试验项目<sup>[17-20]</sup>以及ISICOM、OneWeb等系统设计所采用的协议体系来看,网络层均基于IP。经过多年的研究,在近地空间范围内,IP对空间系统的适用性、TCP存在的问题及其改进方案和新型空间传输层协议、以及IP over CCSDS等都已大量的研究成果,就工程实践而言TCP/IP是目前可行的方案中最为成熟的协议体系;DTN网络以束协议(BP)为核心,通过覆盖网络的形式同样可以工作在TCP/IP之上,提供容迟容断等网络功能。进

一步,再考虑到与地面IP网络的互联,所以我们建议天基传输网络协议体系以IP为核心构建。

#### (5) 合理规划星上路由以及交换功能

从具体的天基传输网络结构出发才能得到优化的路由和交换体系设计。在双层天基传输网络中,首先应注重由不同业务特点所带来的不同星上处理能力需求。例如,对于遥感业务来说,大容量遥感数据的主要需求是尽快落地,以星上交换为主,而不是频繁星上路由和大规模星上处理,而且对数据链路的使用具有高度的不对称性,因此其重点是大容量的跨波束交换技术;而对于互联网接入业务,强调与地面IP网络的兼容性,重点是实现星地无缝的一体化路由传输。因此,关键是兼顾不同业务需求,规划星上载荷能力,同时利用相对简洁的拓扑结构,降低天地一体化网络中路由和交换问题的复杂性。

#### (6) 高度自动化的运行管理

在整个体系中,一个需要特别关注的问题是:网络化给天基传输系统运行管理模式带来的深刻影响。目前中国多数卫星系统仍采用以单星计划调度为主的运管模式,如何在天基组网条件下,形成高效的资源分配体系、高度自动化的任务准备,执行和评估过程,同时适应应急响应要求,是需要从体系层面重点研究的问题,并且具有迫切的现实意义。

#### (7) 其他问题

在双层天基传输网络中,由于GEO和LEO星座在覆盖范围、往返时延和平台能力方面存在的较大差异,以及由用户分布导致的整个系统业务分布的不均衡性,所以必须设计相应的服务质量保证(QoS)体系,才能发挥系统效率,满足端到端用户的服务需求<sup>[21]</sup>。

另一个要关注的重点问题是:天基传输网络面临的安全挑战。卫星通信天然的开放性决定了其更加容易受到窃听和主动入侵。此外,卫星

系统的长时延和高误码率还会导致安全同步机制的失效,因此需要对从链路和节点的主动防御到整个协议体系的安全开展系统的研究<sup>[23]</sup>。

### 3 综合演示验证平台的构建

综合演示验证平台对于天基传输网络体系结构研究具有特殊的重要性。在天基传输网络涉及技术范围广,认识存在差异的现状下,基于真实空间设施构建综合性技术试验平台,发挥实物系统等效的优势,能够真实地反映天基传输网络特征,提高试验验证可信度;能够加深不同领域研究者对系统整体的定量认识,同时对当前技术研究起到聚焦和引领作用。

数据中继卫星系统<sup>[24]</sup>在功能、结构和服务对象上与天基传输网络一致。从结构上来说,其本身就是天基传输骨干;从系统功能上看,数据中继卫星系统承担天基测控和数据传输任务,可在全球范围内同时为多个高动态用户提供百兆甚至吉比特量级的数据传输服务;从服务对象上看,既包括高动态、全球范围内高速运行的中低轨航天器,又包括全球范围内分布、运行速度较慢,但姿态和轨迹变化较频繁的各类航空器、浮空器、远洋船舶等。目前数据中继卫星系统广泛应用于载人航天、对地观测、空间快速响应等领域。因此,可以基于数据中继卫星系统,围绕其业务体系,体现一体化互联特征和体系化应用,构建天基传输系统综合演示验证平台。

### 4 结束语

天基传输网络体系结构是整个天地一体化信息网络的基础。我们针对当前紧迫需求和技术发展趋势,对“骨干+区域增强”的双层天基传输网络架构及其相关问题进行了讨论。立足于全球服务,强化需求针对性,把握空间系统现状,在目前理论研究所积累的成果的基础上,通过综



合演示验证平台聚焦和引领技术发展,可以加速天基传输网络由规划论证向工程实践过渡,从而进一步带动天地一体化信息网络的发展。可以断定:天地一体化信息网络的构建将对中国和世界在空间技术领域的发展和运用以及科学探索产生深远的影响。

#### 参考文献

- [1] 中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要 [EB/OL]. [2016-03-17]. [http://news.xinhuanet.com/politics/2016lh/2016-03/17/c\\_1118366322.htm](http://news.xinhuanet.com/politics/2016lh/2016-03/17/c_1118366322.htm)
- [2] 张乃通. 对建设我国天地一体化信息网络的思考[J]. 中国电子科学研究院学报, 2015, 10(3): 223-230
- [3] 李德仁, 沈欣, 龚健雅, 等. 论我国空间信息网络的构建[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(6): 711-715
- [4] 闵士权. 我国天地一体化综合信息网络构想[J]. 卫星应用, 2016(1): 27-37
- [5] PULLIAM J, ZAMBRE Y, KARMARKAR A, et al. TSAT Network Architecture[C] // Proceedings of the 2008 IEEE Military Communications Conference (MILCOM 2008). USA: IEEE, 2008: 1-7. DOI: 10.1109/MILCOM.2008.4753508
- [6] NASA. Space Communications and Navigation [EB/OL]. <https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/about/overview/index.html>
- [7] Space Communications and Navigation Office, NASA. Space Communications and Navigation (SCaN) Network Architecture Definition Document (ADD) Volume 1: Executive Summary Revision 2 [R]. Washington D. C: Space Communications and Navigation Office, 2011
- [8] VANALI C A, CORAZZA G E, LUGLIO M, et al. The ISICOM Architecture [C] // Proceedings of the 2009 International Workshop on Satellite and Space Communications (IWSSC 2009). USA: IEEE, 2009: 104-108. DOI: 10.1109/IWSSC.2009.5286409
- [9] BLUMENTHAL S H. Medium Earth Orbit Ka Band Satellite Communications System[C] // Proceedings of the 2013 IEEE Military Communications Conference (MILCOM 2013). USA: IEEE, 2013: 273-277. DOI: 10.1109/MILCOM.2013.54
- [10] 刘悦, 廖春发. 国外新兴卫星互联网星座的发展[J]. 科技导报, 2016, 34(7): 139-148. <http://doi.org/10.3981/j.issn.1000-7857>
- [11] 姜会林, 刘显著, 胡源, 等. 天地一体化信息网络的几个关键问题思考[J]. 兵工学报, 2014, 35(增刊): 96-100
- [12] 潘成胜. 空间信息网络的若干关键技术[J]. 中国计算机学会通讯, 2013, 9(4): 46-51
- [13] BHASIN K B, OLESON S R, WAMER J D, et al. Design Concepts for a Small Space-Based GEO Satellite for Missions between Low Earth and Near Earth Orbits[C] // Proceedings of the 13th International Conference on Space Operations 2014. Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics. DOI: 10.2514/6.2014-1688
- [14] ESA. Small Geostationary Satellite Overview [EB/OL]. <https://artes.esa.int/sgeo/overview>
- [15] 张敬一, 刘志佳, 宁金枝. 小卫星在空间信息网络中的发展方向研究[J]. 卫星应用, 2015 (10): 18-22
- [16] CCSDS. Space Communications Protocol Specification [EB/OL]. <http://public.ccsds.org/publications/scps.html>
- [17] HOGIE K, CRISCUOLO E, PARISE R. Using Standard Internet Protocols and Applications in Space [J]. Computer Networks, 2005, 47(5): 603-650. DOI: 10.1016/j.comnet.2004.08.005
- [18] DAVID I, JAMES R, KEITH H, et al. STS-107 Case Study: End-to-End IP Space Communication Architecture[C] // Proceedings of the 2003 Ground Systems Architectures Workshop (GSAW 2003). USA: GSAW, 2003
- [19] FLORIO M, HOTOP D, GROVES S, et al. Connecting the Force From Space: The IRIS Joint Capability Technology Demonstration [R/OL]. [www.dtic.mil/get-tr-doc/pdf?AD=ADA559469](http://www.dtic.mil/get-tr-doc/pdf?AD=ADA559469)
- [20] IVANCIC W, EDDY W M, STEWART D, et al. Experience with Delay-Tolerant Networking from Orbit [J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2010, 28(5-6): 335-351. DOI: 10.1109/ASMS.2008.37
- [21] NISHIYAMA H, KUDOH D, KATO N, et al. Load Balancing and QoS Provisioning Based on Congestion Prediction for GEO/LEO Hybrid Satellite Networks[C] // Proceedings of the IEEE. USA: IEEE, 2011: 1998-2007. DOI: 10.1109/JPROC.2011.2157885
- [22] KOTA S, MARCHESE M. Quality of Service for Satellite IP Networks: A Survey[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2003, 21 (4-5): 303-349. DOI: 10.1002/sat.765
- [23] BEJARANO J M R, YUN A, LA C, et al. Security in IP Satellite Networks: COMSEC and TRANSEC Integration Aspects[C] // Proceedings of the 6th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 12th Signal Processing for Space Communications Workshop (ASMS/SPSC). USA: IEEE, 2012: 281-288. DOI: 10.1109/ASMS-SPSC.2012.6333089
- [24] 杨红俊. 国外数据中继卫星系统最新发展及未来趋势[J]. 电讯技术, 2016, 56(1): 109-116

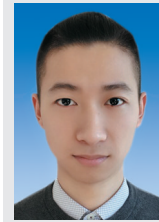
#### 作者简介



**刘华峰**, 中国科学院软件研究所副研究员; 主要研究方向为卫星网络和传感器网络; 先后主持和参加多项相关领域的“863”和国家自然科学基金重大研究计划重点项目; 获部委级科技进步奖二等奖1项, 三等奖2项; 发表论文20余篇, 出版著作1部。



**孙智立**, 英国萨里大学通信系统研究所教授、研究生分院主任; 主要研究方向为卫星通信网络和未来互联网技术; 作为项目负责人承担过15项欧盟科研框架项目、2项政府科研项目和1项欧洲空间局科研项目; 发表论文200余篇, 出版、编辑专著3部。



**杨昕**, 英国萨里大学通信系统研究所在读博士研究生; 主要研究方向为移动自组网、卫星通信、下一代通信网络等。



**赵康健**, 南京大学电子科学与工程学院博士、讲师; 主要研究方向为卫星通信与空间信息网络协议技术; 主持或作为骨干参与国家自然科学基金、中国工程院重大咨询项目、江苏省自然科学基金等多项; 发表论文20余篇。



**程子敬**, 航天恒星科技有限公司天地一体化信息技术国家重点实验室博士后、博士研究生导师、研究员; 主要研究方向为空间信息网络、卫星通信系统、软件定义网络等。

## 综合信息

### 无人驾驶首个技术标准近期即将公布

中国汽车工程学会理事长付于武表示, 无人驾驶技术路线图即将正式发布, 这将是无人驾驶领域的首个技术标准。美国IHS汽车信息咨询公司日前预测, 2035年中国将成为最大的无人驾驶汽车市场, 届时将拥有超过570万辆无人驾驶汽车。无人驾驶技术的发展突飞猛进, 消费者需要时间去消化, 其带来的法规、基础设施等一系列问题也亟待完善。付于武说, 无人驾驶的突破将是一个循序渐进地过程, 从主动安全技术升级为半智能, 最终实现完全无人驾驶。(转载自《通信世界网》)



# 新一代低轨卫星网络和地面无线自组织网络融合技术的探讨

## Technology of New Generation LEO Satellite Network and Terrestrial MANET Integration

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2016) 04-0058-006

**摘要:** 展示并验证了一种由新一代低轨卫星网络和地面无线自组织网络组成的星地一体化网络。此星地一体化网络中的低轨卫星网络可以提供大容量、低时延的网络覆盖,其“低轨”的特点又可减小地面终端的尺寸,增强地面网络的移动性。与经典的中轨和静止卫星网络相比,此种网络可以提供更高通量、更高移动性的通信支持,大大拓宽通信网络的应用范围。对不同的网络层结构采用相应的软件仿真工具环境,为今后进一步深入研究卫星网络的体系结构和自组互联网技术起到了抛砖引玉的作用。

**关键词:** 低轨卫星; 无线自组织网络; 一体化通信网络

**Abstract:** In this paper, we introduce and validate a satellite-terrestrial integrating network constructed by new generation low earth orbit (LEO) satellite network and terrestrial mobile ad hoc network. The new generation LEO satellite network within this integrated network could provide massive network coverage with high throughput and low latency, while the feature of low orbit could reduce the sizes of terrestrial terminals and furthermore could promote terrestrial network's mobility. In comparison with classic medium earth orbit (MEO) and geosynchronous (GEO) satellite networks, the introduced integration network could offer communication supports with higher throughput and higher mobility, which greatly broaden the application scenarios of communication networks. Different simulation software and techniques were used for studying different layers of satellite communications and networks, which could hopefully inspire future research on satellite networks and ad hoc networks.

**Key words:** LEO satellite; mobile ad hoc network; integrated communication network

杨昕/YANG Xin<sup>1</sup>

孙智立/SUN Zhili<sup>1</sup>

刘华峰/LIU Huafeng<sup>2</sup>

赵康健/ZHAO Kanglian<sup>3</sup>

程子敬/CHENG Zijing<sup>4</sup>

苗晔/MIAO Ye<sup>3</sup>

Haitham Cruickshank<sup>1</sup>

(1. 萨里大学, 萨里 吉尔福德 GU2 7XH;

2. 中国科学院, 北京 100190;

3. 南京大学, 江苏 南京 210093)

4. 航天恒星科技有限公司, 北京 100029;

(1. University of Surrey, Guildford, Surrey

GU2 7XH, UK;

2. Chinese Academy of Sciences, Beijing

100190, China;

3. Nanjing University, Nanjing 210093, China)

4. Space Star Technology Co., LTD, Beijing

100029, China;

● 将 STK 与 NS 相结合使用可全方位地获得卫星网络的仿真数据

● OneWeb 能够满足不同用户的不同需求,极大地扩展了卫星网络的用户群和业务潜能

● 新一代的低轨卫星通信网络更适合与地面其他种类网络混合组网

在过去的几十年里,我们见证了通信和网络技术的飞速发展,同时也见证了航天技术的发展。从传统的电话语音到最新的高清实时流媒体播放等,越来越多的网络技术丰富了人们的沟通手段。然而,某种类型的通信网络在具有自身独特优势的同时,往往也存在一些不足。比如,固定宽带网络可以提供高带宽、

高稳定性的服务,但是网络的覆盖受地理因素的制约,且可移动性极为有限;Wi-Fi 网络可以保证通信终端的移动性,但是其通信质量受环境严重影响;卫星通信网络可以覆盖海洋、山区、沙漠等偏远地区,但网络不够灵活、系统管理也较为复杂。因此,近年来越来越多的研究者把注意力集中到了异种网络互联上,希望可以发挥不同种网络的优势、弥补各自的不足。

无线自组织网络(MANET)是一种不需要集中式管理的自治无线网络。在无线自组织网络中,每一个节点既是发射接收端,又是路由器。通过运行相应的路由协议,节点间可以自发地进行路由发现和路由信息交换;距离较近的节点之间可以直接进行无线通信,距离较远的节点间则通过其他节点的接力传输实现通信。定时或不定时的路由表更新可以保证在网络拓扑发生变化后,整个网络

收稿时间: 2016-05-17  
网络出版时间: 2016-07-01

仍保持通信能力,从而使得无线自组织网络拥有较强的移动性和鲁棒性。

卫星通信研究从19世纪60年代至今一直保持着活力<sup>[1]</sup>。得益于现如今“任意时间、任意地点”通信<sup>[2]</sup>的概念,卫星通信网络的地位在未来还将进一步的提升。通常来说,卫星的轨道越高其覆盖面积越大,但是通信的时延也越长。一般说来,卫星的运行轨道根据高度可以分为:

(1)低轨道(LEO):轨道高度为160~2 000 km;

(2)中轨道(MEO):轨道高度为2 000~35 786 km;

(3)静止轨道(GEO):轨道高度为35 786 km,运行在此轨道上的卫星与地球的相对位置不受地球自转的影响。

传统的卫星通信应用场景<sup>[3]</sup>如图1所示。

受各方面条件的限制,在进行卫星网络相关研究时很少可以用到真实的卫星作为实验平台,因此使用相关软件进行系统仿真是卫星网络研究的常用手段。常见的卫星通信网络仿真软件包括STK及网络仿真器(NS)等。其中STK主要用来对卫星的轨道、波束覆盖、环绕地球周期等物理参数进行模拟,NS主要用来对网络的通信性能进行仿真。将STK与NS相结合使用可全方位地获得卫

星网络的仿真数据。

文中,我们主要讨论基于新一代低轨卫星系统和地面无线自组织网络的IP网络融合技术。将首先介绍几种传统的低中轨卫星网络和新一代的低轨卫星网络,以及国际上对于卫星-地面融合网络的相关研究情况,然后基于软件仿真数据对相关技术进行讨论,并最终给出对未来相关研究方向的想法和建议。

## 1 低轨、中轨卫星通信网络

卫星通信网络(尤其是低轨和中轨卫星通信网络)技术近年来发展迅速。从1990年至今,数个低轨和中轨卫星通信网络已经正式提供商业服务,其中比较著名的包括低轨的铱星网络和中轨的O3b网络。

### 1.1 铱星网络

铱星网络最早由美国摩托罗拉公司建设并于1998年末正式开始提供商业服务<sup>[4]</sup>。该系统包含66颗运行在781 km高度的服务卫星和多颗运行在666 km高度的备用卫星。该网络可以提供覆盖全球的语音服务、短信服务和数据宽带业务。卫星间通过10 Mbit/s的Ka波段星间链路(ISL)进行数据交换。

铱星网络现在由铱星通讯公司运营。从2015年起,铱星通讯公司

开始建设专注于为宽带业务提供支持“下一代铱星”网络。下一代铱星网络包含66颗在轨服务卫星和多颗在轨备用卫星,其可在L波段和Ka波段分别提供1.5 Mbit/s和8 Mbit/s带宽<sup>[5]</sup>。

### 1.2 O3b网络

O3b网络由12颗运行在8 062 km高度的中轨卫星组成,与地面通过Ka波段进行高速数据传输;该网络为南北纬62°以内区域提供网络覆盖。O3b网络服务时延小于150 ms,并且每个波束可提供最大1.6 Gbit/s的带宽。

O3b网络提供针对宽带业务、移动网络、远洋能源企业、海事和政府的5种不同类型的服务,能够满足不同用户的不同需求,从而极大地扩展了卫星网络的用户群和业务潜能。

### 1.3 OneWeb

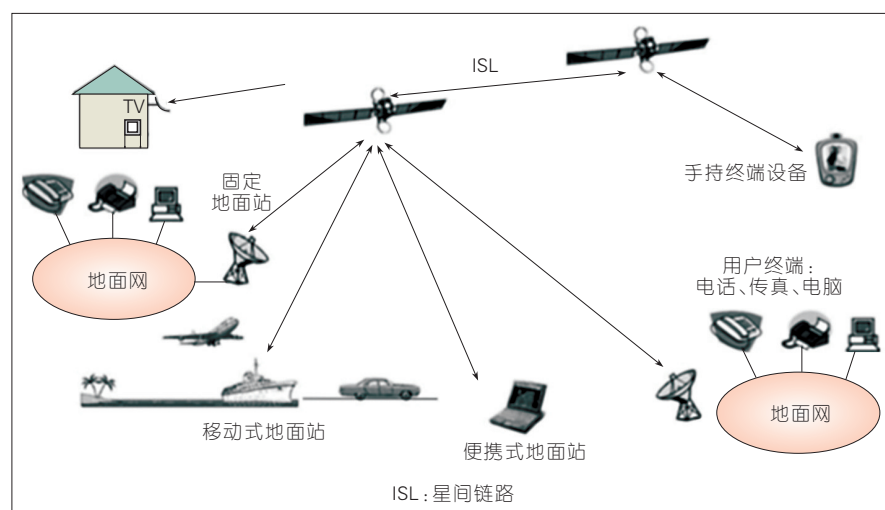
由于业务需求的不断扩张并得益于低成本小卫星、低成本火箭技术的迅猛发展,国际上越来越多的大型科技公司将目光转向新一代低轨卫星通信网络的设计与建设,力图尽快抢占市场。几种比较有代表性的新一代低轨星座如表1中所示。

与上面提到的另外两种低轨卫星网络相比,OneWeb的发展最早、最迅速,整个网络于2014年末提出,计划从2017年开始组建,并从2020年开始提供服务<sup>[6]</sup>。

整个OneWeb网络计划由多600颗低轨卫星组成,运行在1 200 km高度的轨道上。该网络可为每个地面用户提供50 Mbit/s的宽带网络连接,每颗星可处理6 Gbit/s的网络吞吐量;卫星与地面间将采用Ku频段。图2为使用AGI STK模拟出的OneWeb星座图。

## 2 卫星网络与地面网络的融合

卫星网络与地面网络融合组网



▲图1 传统的卫星通信应用场景

▼表1 几种新一代低轨通信卫星星座

| 星座名称    | 卫星数量/个  | 参与公司                                  |
|---------|---------|---------------------------------------|
| OneWeb  | 648     | OneWeb、Qualcomm、Virgin Group、Airbus 等 |
| SpaceX  | 约 4 000 | SpaceX                                |
| Samsung | 约 4 600 | Samsung                               |

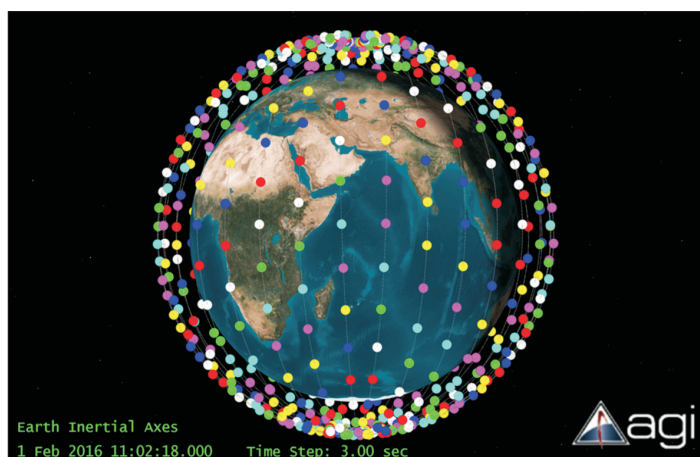


图2 OneWeb 星座

时会遇到以下问题。

(1)用户对网络容量的需求增长迅速,地面网络可以相对方便地及时更新网络设备以满足用户需求;通信卫星的设计寿命通常在10年左右或更长,在此期间通常不会对正常在轨运行的卫星进行更新,从而导致过去发射的卫星处理能力往往与地面网络的处理要求不匹配。

(2)地面通信网络和卫星通信网络往往执行着不同的网络协议,在进行互联互通的时候需要面临多次的协议转换,这就会影响网络整体的传输效果。

(3)地面通信网络与卫星通信网络的主要应用场景、设计考量不同:地面通信网络主要满足客户对容量、时延等网络特性的需求;而卫星通信网络更侧重于提供大范围的网络覆盖支持。不同的应用场景导致了网络特性的不同,这就造成了融合时的困难。

如果能将上述问题解决,那么卫星通信网络就可以和地面通信网络有机结合起来,从而实现高质量的全球网络覆盖。

将太空中的卫星通信网络与地

面的传统有线或无线网络相结合进行信息传输的想法始于20世纪80年代<sup>[7]</sup>。网络融合研究项目包括欧盟 COST 226 空间与地面网络融合<sup>[8]</sup>和欧盟 COST 227 空间与地面移动网络融合<sup>[9]</sup>。以 COST 227 项目为例,来自12个欧洲国家的23支研究团队与欧洲航天局(ESA)共同合作,任务目标是使融合网络提供尽可能多的通信服务功能。

由于当时技术水平限制,上述的早期网络融合研究存在着以下问题。

(1)20世纪90年代的卫星网络通常被用作传统语音服务和窄带信息服务(如文本网页浏览、邮件收发等)的中继手段,其无法满足当今普遍的宽带多媒体服务需求。

(2)早期的工作主要着力于卫星网络与地面2G移动网络的融合;现如今3G、4G网络已经商用化,5G网络也将推出,除了移动网络之外许多其他种类的无线网络也被广泛应用。卫星网络与不同种类网络融合可能会面临不同的问题。

从2000年至今世界上的卫星网络与其他网络融合的研究项目包括 SatNex<sup>[10]</sup>、SATSIX<sup>[11]</sup>、WHERE<sup>[12]</sup>、

MONE<sup>[13]</sup>和BATS<sup>[14]</sup>等。表2中展示了这几个项目的技术细节对比。

### 3 新一代低轨卫星网络与地面网络的融合

近些年的研究项目已经各自证明了卫星与地面融合网络的通信能力与潜力,极大地拓展了通信网络的应用范围,其尤其适用于本地通信设施缺乏或受损的场景。在当地通信设施没有受到很大损害的时候,传统的移动手机网络、宽带网络仍然可以提供与外界连接的通信通道;但是当基础通信设施受到大面积损坏甚至被摧毁时当地的传统通信网络将陷入瘫痪,此时将地面的移动自组网与太空中的卫星网络相结合提供通信服务将是理想的,有时甚至是唯一的选择。

我们以 OneWeb 作为低轨卫星通信网络来验证此种融合网络的通信性能。此部分的仿真实验基于 AGI STK 和 NS-3。

#### 3.1 网络设计

地面的 MANET 通过卫星网络与远处的通信中心进行通信交流的场景如图3所示。

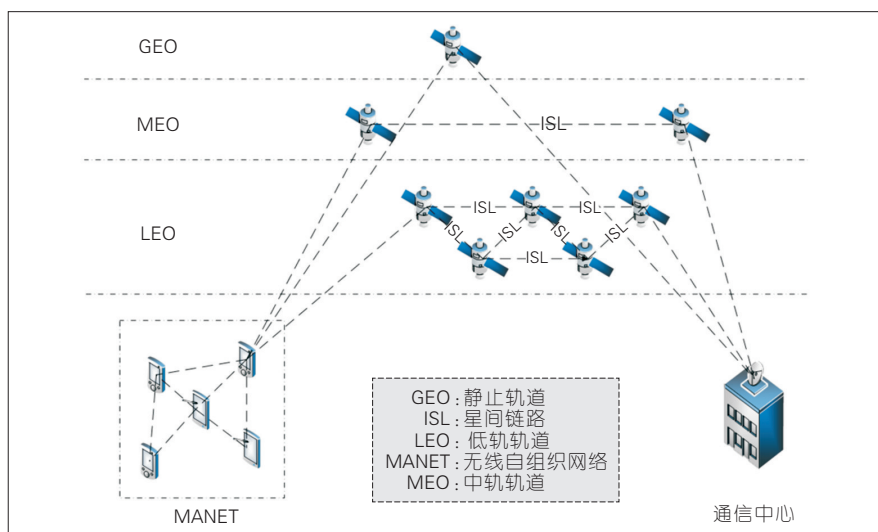
图3中数部手持终端相互连接组成地面 MANET,其中的一部分手持终端可与卫星网络相连。需要传输的数据从发送端发出后经过 MANET 内部路由传输至与卫星网络相连的终端并进而进入卫星通信网络,一些卫星通信网络应用了星间链路技术使得信息可在卫星间进行传输,数据最终经由卫星网络传输至远处的通信中心。如此构建出的地面-卫星融合网络可为森林救火、深山营救、海岸线边防等多种场景提供高移动性的动态网络服务支持<sup>[13]</sup>。

图3所示的融合网络的主要技术难点在于使用 MEO 和 LEO 卫星时卫星的移动、切换与重组,因此在网络设计过程中需要考虑到地面网关与卫星通信时的切换问题、卫星网络内



▼表2 几种网络融合项目技术的对比

| 项目                         | 项目目标                                       | 地面网络类型                        | 卫星通信频段                      | 上行/下行频率及(或)标准  |
|----------------------------|--|-------------------------------|-----------------------------|--|
| SatNex                     | 在物理层上探索天地一体化信号处理方法                         | IP网络                          | Ka频段                        | 上行: 20 GHz (DVB-S2)<br>下行: 30 GHz (DVB-RCS2)                             |
| SATSIX                     | 在卫星网络上实现IPv6                               | Wi-Fi、WiMax                   | Ku频段                        | 上行: DVB-S<br>下行: DVB-RCS   |
| WHERE                      | 同时使用GPS系统和地面无线网络来以供更准确的定位服务                | LTE、Wi-Fi、UWB、ZigBee等         | L频段                         | 使用GPS相关标准  |
| MONET                      | 为灾害地区提供高动态的天地一体化网络                         | MANET                         | L频段                         | 上行: 1 626.5 ~ 1 660.5 MHz<br>下行: 1 525 ~ 1 559 MHz                       |
| BATS                       | 使用“智能网关”在地面网络与卫星网络之间进行自动切换,为地面用户提供更高的服务质量。 | xDSL、无线宽带等                    | Ka频段、Q/V频段                  | 上行: 17.7 ~ 20.2 GHz、37.5 ~ 38.5 GHz<br>下行: 27.5 ~ 30 GHz、40.5 ~ 41.5 GHz |
| DSL: 数字用户线路<br>DVB: 数字视频广播 |  | LTE: 长期演进技术<br>MANET: 无线自组织网络 | UWB: 超宽带<br>WiMax: 全球微波互联接入 |  |



▲图3 融合网络示意图

部的拓扑及路由的变化问题。GEO卫星与地面的相对位置不变,地面网关与GEO卫星通信时通常不涉及此问题。

### 3.2 仿真参数及配置

仿真场景中,MANET部分由5个通信节点组成,其中一个节点同时作为卫星网关。我们通过仿真分别分析比较了LEO卫星网络与MEO、GEO卫星网络在这种融合网络中的表现,如表3所示。在仿真计算过程中,卫星通信网络相关参数取自OneWeb、O3b和Inmarsat的真实数据,不考虑

星上处理时间。

由STK软件生成的仿真场景示意如图4所示。图中不同的彩色圆点代表不同卫星的位置,其中距离地面最近的圆点代表OneWeb卫星,稍远的圆点代表O3b卫星;Inmarsat卫星由于轨道位置过高而未被包含在图4中。

### 3.3 仿真计算与结果

利用Wireshark对NS-3运行时生成的纪录文件进行分析,得到MANET的网络仿真情况,然后使用仿真软件SaVi<sup>[15]</sup>观察卫星在某时经过某地上空的情形。例如,用其观察某时刻北京上空OneWeb卫星位置的情况如图5所示。

与MEO、GEO卫星相比,LEO最大的特点为低轨道高度,低轨道高度通常意味着更短的通信距离和更低的通信时延,因此我们着重讨论不同卫星系统在通信时延方面的表现。

对于同轨道和相邻轨道上的两个相邻卫星,其间距分别为:

$$d_{\text{同轨}} = \sqrt{(1 - \cos \alpha) \times 2 \times R^2} \quad (1)$$

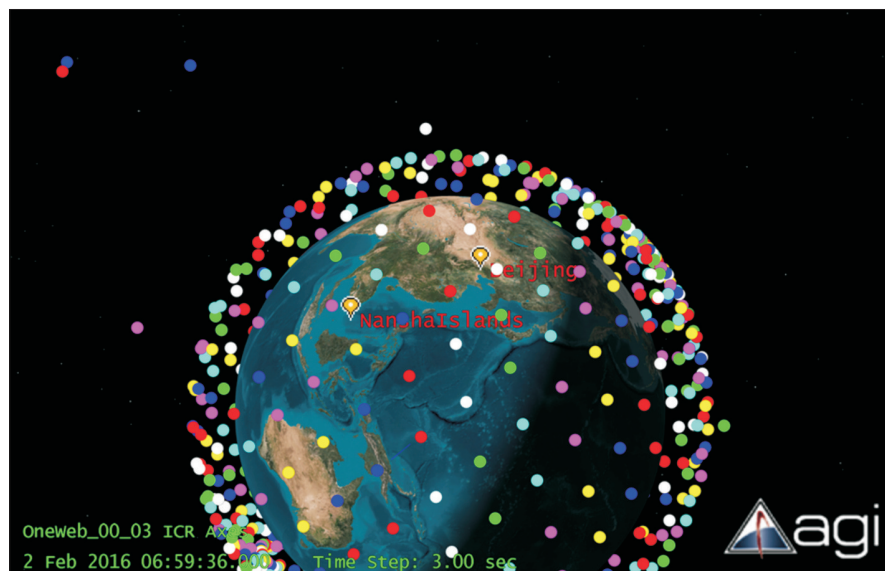
$$d_{\text{邻轨最小}} = \sqrt{(1 - \cos \frac{\alpha}{2}) \times 2 \times R^2} \quad (2)$$

$$d_{\text{邻轨最大}} = \sqrt{2R^2 - 2R\sqrt{R^2 - d_{\text{同轨}}^2/4} \times \cos \beta} \quad (3)$$

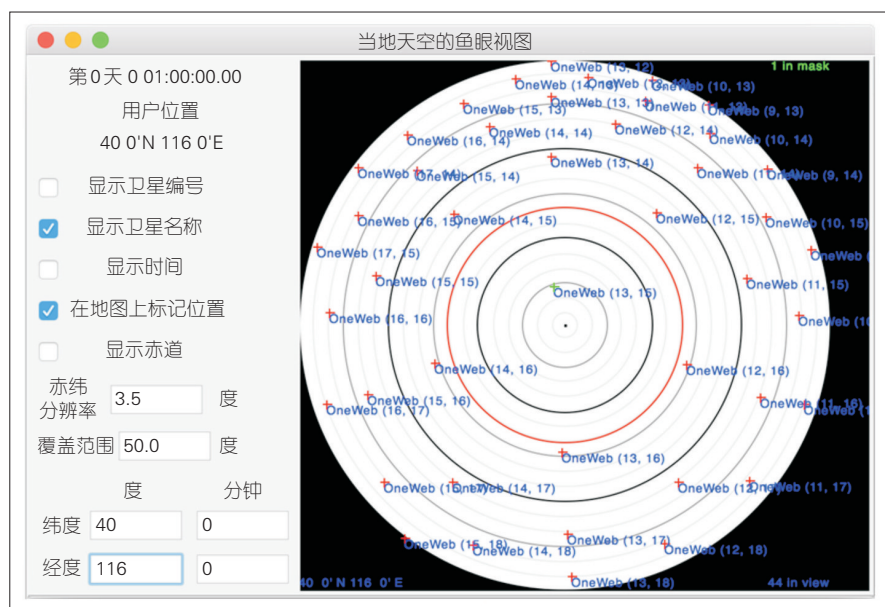
其中 $\alpha$ 为两相邻卫星间夹角, $\beta$

▼表3 仿真参数配置

| 参数                                   | 具体内容               | 值           |
|--------------------------------------|--------------------|-------------|
| MANET                                | 场景大小               | 50 m x 50 m |
|                                      | 节点数量               | 5           |
|                                      | 路由协议               | AODV        |
| 卫星网络设定                               | LEO                | OneWeb      |
|                                      | MEO                | O3b         |
|                                      | GEO                | Inmarsat    |
| MANET所在地                             | 南沙群岛(10° N,114° E) |             |
| 远处通信中心所在地                            | 北京(40° N,116° E)   |             |
| 仿真时间/h                               | 1                  |             |
| AODV:无线自组网按需平面距离向量路由协议<br>GEO:地球静止轨道 |                    |             |
| LEO:低轨道<br>MANET:无线自组织网络             |                    |             |
| MEO:中轨轨道                             |                    |             |



▲图4 仿真场景示意



▲图5 某时刻北京上空OneWeb卫星位置

为两相邻轨道夹角,  $R$  为卫星轨道高度与地球半径之和。

在获知不同节点间的位置关系后,信息在传输路径中经历的时延可使用如公式(4)来计算:

$$t = d/c \quad (4)$$

其中,  $t$  为时延,  $d$  为距离,  $c$  为光速。

最终的仿真结果如表4所示,其中地面部分时延为NS-3的仿真结

果,卫星部分时延为根据仿真软件给出的卫星与地面相对位置而得出的计算结果;时延为端到端时延。

从表4中我们不难看出相比于经

▼表4 仿真与计算结果

| MANET/ms       | 卫星部分时延/ ms     | 总时延/ms      |
|----------------|----------------|-------------|
| 8.7            | 23 ~ 28(LEO)   | 31.7~36.7   |
|                | 62 ~ 75(MEO)   | 70.7~83.7   |
|                | 258 ~ 260(GEO) | 266.7~268.7 |
| MANET: 无线自组织网络 |                |             |

典的MEO、GEO网络,LEO卫星网络可以显著降低网络整体的传输时延,而较低的网络延迟是提供实时语音、视频传输等对延迟敏感服务的关键,而这些服务在当今的通信服务中占有着重要的位置。国际电信联盟电信标准化部门(ITU-T)对于IP网络服务的质量等级定义如表5所示<sup>[16]</sup>,从中可见传输时延指标对通信网络服务质量的重要性。

除了低延迟外,LEO卫星网络的低轨道减少了信息在传输过程中的损耗,从而可以降低误码率,也可以减少地面通信终端的尺寸;Ka波段高带宽低轨卫星技术的发展也将显著提高LEO卫星的信息处理能力和服务质量。针对LEO卫星的其他优势可以进行更多细致化的研究,在此暂不做细节讨论。

## 4 结束语

过去的几十年间人类从未停止过探索新的网络技术的脚步。随着卫星制造成本和发射成本的降低,低轨小卫星组网的可行性大大增加,相关技术得到了前所未有的发展,并受到世界各地科研人员的瞩目。文中,我们比较了几种不同卫星通信网络在卫星-地面融合网络中表现,从仿真结果来看新一代的低轨卫星通信网络较传统的卫星通信网络而言,更适合与地面其他种类网路混合组网以提供高质量、低时延的通信支持。

除了星座设计、路由算法等研究内容以外,在未来的研究中科研人员还可以将研究重心放在融合网络的信息安全、服务质量以及针对不同场景的特点提供新的网络应用等方向上去。相信经过更加深入的研究,新

▼表5 IP 网络服务质量等级定义

|      | 第0级       | 第1级       | 第2级       | 第3级       | 第4级       | 第5级 |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----|
| 传输时延 | 100 ms    | 400 ms    | 100 ms    | 400 ms    | 1s        | 未定义 |
| 时延偏差 | 50 ms     | 50 ms     | 未定义       | 未定义       | 未定义       | 未定义 |
| 丢包率  | $10^{-3}$ | $10^{-3}$ | $10^{-3}$ | $10^{-3}$ | $10^{-3}$ | 未定义 |
| 误码率  | $10^{-4}$ | $10^{-4}$ | $10^{-4}$ | $10^{-4}$ | $10^{-4}$ | 未定义 |

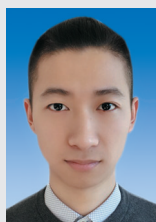
一代低轨卫星网络必将在更多领域发挥其特有的优势,实现在任意时间为任意地点提供可靠的网络覆盖。

## 参考文献

- [1] CHIEN E, MARINHO J, RUSSELL S J. Design Mobile Satellite System Architecture as An Integral Part of the Cellular Access Digital Network [C]//Jet Propulsion Lab., Proceedings of the Mobile Satellite Conference. Whippany: Bell Telephone Labs, 1988: 387-394
- [2] NetWorld2020 ETP. 5G: Challenges, Research Priorities, and Recommendations [R]. 2014
- [3] SUN Z. Satellite Networking: Principles and Protocols [M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2005
- [4] WOOD L. Big LEO Tables [R/OL].[1999-08-17]. <http://personal.ee.surrey.ac.uk/Personal/L.Wood/constellations/tables/tables.html>
- [5] Iridium Communications Inc. Iridium NEXT [R/OL]. <https://www.iridium.com/network/iridiumnext>
- [6] SELDING P B D. European Governments Boost Satcom Spending [N/OL]. SpaceNews, 2016. <http://spacenews.com/european-governments-boost-satcom-spending/>
- [7] DEL R E. A Satellite Mobile System Integrated with the Terrestrial Cellular Network[C]//Proceedings of the Communications, 1989 ICC'89, BOSTONICC/89, IEEE International Conference on. USA: IEEE, 1989: 223-227. DOI: 10.1109/ICC.1989.49697
- [8] European Commission. Integrated Space and Terrestrial Networks (COST-226) [R]. 2000
- [9] European Commission. Integrated Space and Terrestrial Mobile Networks (COST-227) [R]. 1994
- [10] SHRIFF R E, HU Y F, CHAN M, et al. SatNEx: A Network of Excellence Providing Training in Satellite Communications[C]//Proceedings of the Vehicular Technology Conference, 2005 VTC 2005-Spring 2005 IEEE 61<sup>st</sup>. USA: IEEE, 2005: 2668-2672. DOI: 10.1109/VETECS.2005.1543819
- [11] MARTINEZ R, DE D M C, EXPOSITO J. Satsix Project: A First Approach to IPv6 over Satellite Networks[C]//Proceedings of the Mobile and Wireless Communications Summit, 2007 16th IST. USA: IEEE, 2007: 1-4. DOI: 10.1109/ISTMWC.2007.4299257
- [12] PLASS S, RAULEFS R, FLEURY B, et al. Wireless Hybrid Enhanced Mobile Radio Estimators-WHERE[C]//Proceedings of the ICT Mobile and Wireless Communications Summit (ICT Summit 2008). Stockholm: Paul Cunningham and Miriam Cunningham

- (Eds), IIMC International Information Management Corporation, 2008
- [13] OLIVERIA A, SUN Z, MONIER M, et al. On Optimizing Hybrid ad-hoc and Satellite Networks—The MONET Approach[C]//Proceedings of the Future Network and Mobile Summit 2010. USA: IEEE, 2010: 1-8
  - [14] BATS. About BATS [R/OL]. [2016-02-17].

## 作者简介



杨昕,英国萨里大学通信系统研究所在读博士研究生;主要研究方向为移动自组网、卫星通信、下一代通信网络等。



孙智立,英国萨里大学通信系统研究所教授、研究生分院主任;主要研究方向为卫星通信网络和未来互联网技术;作为项目负责人承担过15项欧盟科研框架项目、2项政府科研项目;发表过200余篇论文,出版、编辑专著3部。



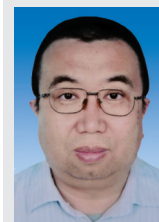
刘华峰,中国科学院软件研究所副研究员;主要研究方向为卫星网络和传感器网络;先后主持和参加多项相关领域的“863”和国家自然科学基金重大项目;获部委级科技进步奖二等奖1项,三等奖2项;发表过20余篇论文,出版著作1部。

[http://www.batsproject.eu/index.php?option=com\\_content&view=article&id=73&Itemid=280](http://www.batsproject.eu/index.php?option=com_content&view=article&id=73&Itemid=280)

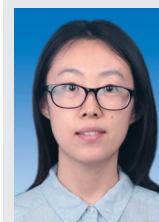
- [15] SaVi. Satellite Constellation Visualization [R/OL].[2016-04-09]. <http://savi.sf.net/>
- [16] Telecommunication Standardization Sector of ITU. Network Performance Objectives for IP-Based Services: ITU-T Y.1541 [S]. Geneva: 2011



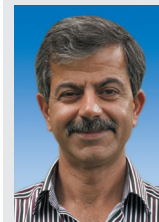
赵康健,南京大学电子科学与工程学院博士、讲师;主要研究方向为卫星通信与空间信息网络协议技术;主持或作为骨干参与国家自然科学基金、中国工程院重大咨询项目、江苏省自然科学基金等多项;发表论文20余篇。



程子敬,航天恒星科技有限公司天地一体化信息技术国家重点实验室博士后、博士生导师、研究员;主要研究方向为空间信息网络、卫星通信系统、软件定义网络等。



苗晔,南京大学博士;主要研究方向为无线通信系统和卫星网络的路由协议优化和组网应用技术等;参与过多个欧盟项目;在国际期刊和会议上发表多篇论文。



Hailtham Cruickshank,英国萨里大学通信系统研究所高级讲师;主要研究方向为网络用户信息安全、未来移动网络架构和卫星系统等;曾参与过多项英国、欧盟和欧洲空间局项目;发表过135余篇论文。

## 综合信息

## 产业再造将推动 VSAT 市场规模增长近两倍

Strategy Analytics 研究报告《2015—2022 年商业卫星通信网络的化合物半导体》指出,数据流量需求的不断增长将导致商业卫星通信网络所有相关要素在 2020 年数量增长近两倍。高级半导体应用服务总监 Eric Higham 表示,“小型卫星地面站(VSAT)产业正在向更高频率、更多星上处理和高通量卫星(HTS)不断迈进。氮化镓使这些新的能力成为可能,我们期待该技术的强劲增长”。

(转载自《C114 中国通信网》)



# 后摩尔时代的3D封装技术——高端通信网络芯片对3D封装技术的应用驱动

## 3D-IC Packaging Technology Driven by High-End Communication Network Chips in Post-Moore Law Period

王晓明/WANG Xiaoming

(中兴通讯股份有限公司, 广东 深圳 518055)  
(ZTE Corporation, Shenzhen 518055, China)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2016) 04-0064-003

**摘要:** 认为通过封装技术的发展创新延续摩尔定律, 满足未来通信芯片及消费性电子的需求已成为业界新的热点。介绍了3D封装技术发展现状与优势, 提出“高带宽、高性能、大容量、高密度”通信网络芯片对3D封装技术有迫切的应用需求, 并深入分析了堆叠封装技术如何解决400G网络处理器(NP)所面临的瓶颈问题。建议中国芯片产业链应协同合作, 从整体上推动IC产业的发展。

**关键词:** 后摩尔时代; 三维硅通孔; 堆叠封装; 通信网络芯片; 网络处理器; 存储墙

**Abstract:** Developing new package technology to extend Moore's law has become one of the hottest spots to meet the needs of both future communication chips and consumer electronics. In this paper, after analyzing and introduction the status and advantages of 3D packaging technology, it is clear that 3D packaging technology is a urgently need to boost up communication network chip to higher bandwidth, higher performance, larger capacity and higher density. Then, we analyze how to solve the bottleneck problem of 400G network processor through stacking packaging in detail. We suggest that the whole Chinese chip industry chain should promote the development of IC industry cooperatively.

**Keywords:** post-Moore law period; stack package; 3D TSV; communication network chip; network processor; memory wall

### 1 3D封装技术发展现状

基于芯片集成度、功能和性能的要求, 主流晶圆技术节点降低至28 nm, 甚至已跨入16 nm。然而随着晶圆技术节点不断逼近原子级别, 实现等比例缩减的代价变得非常高, 摩尔定律即将失效。如何通过封装技术的发展创新来延续摩尔定律, 满足未来通信芯片及消费性电子的需求已成为新的热点。目前业界的前沿封装技术包括以晶圆级封装(WLCSP)和载板级封装(PLP)为代表的2.1D封装, 以硅转接板和硅桥为代表的2.5D封装, 以及基于三维硅通孔(3D TSV)工艺在Z方向上堆叠芯片的3D封装<sup>[1]</sup>。其中3D封装在集成度、性能、功耗等方面更具优势, 同时设计自由度更高, 开发时间更短, 是各封装技术中最具发展前景的一种。

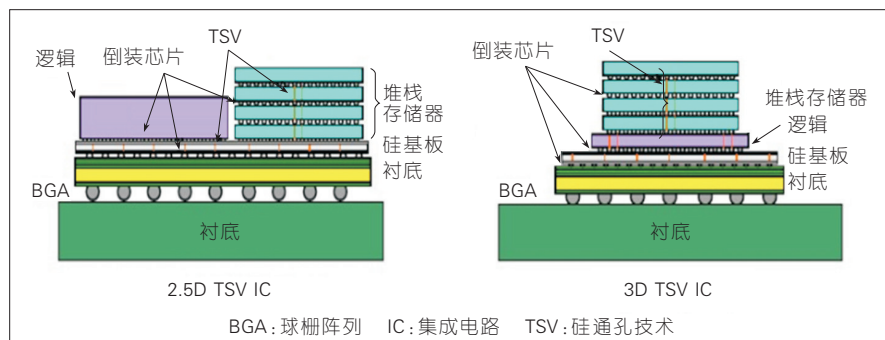
传统意义上3D封装包括2.5D和3D TSV封装技术。硅通孔技术(TSV)实现Die与Die间的垂直互连, 通过在Si上打通孔进行芯片间的互

连, 无需引线键合, 有效缩短互连线长度, 减少信号传输延迟和损失, 提高信号速度和带宽, 降低功耗和封装体积, 是实现多功能、高性能、高可靠性且更轻、更薄、更小的芯片系统级封装。3D TSV封装结构示意图如图1。

由于3D TSV封装工艺在设计、量产、测试及供应链等方面还不成熟, 且工艺成本较高, 目前业界采用介于2D和3D之前的2.5D连接层封装形式, 通过在Die和基板间添加一层连接层, 大幅度提高封装的输入输出(I/O)信号密度, 是3D TSV封装大规模商用之前既经济又实用的方案。

早期(2013年以前)2.5D TSV封装技术主要应用于逻辑模块间集成, FPGA芯片等产品的封装, 集成度较低。到2014年业界的3D TSV封装技术已有部分应用于内存的芯片封装, 用于大容量内存芯片堆叠, 同时应用于高性能芯片的高端消费产品中。2015年, 2.5D TSV技术开始应用于一些高端的图形处理器(GPU)/中央处理器(CPU)以及网络芯片中, 同时媒体处理器(AP)+内存的集成芯片也开始有部分采用2.5D TSV封装, 业界在连接层的成本控制和加工能力方面有一定提高。预计2016/2017年业

收稿时间: 2016-05-04  
网络出版时间: 2016-06-16



▲ 图1 3D TSV封装结构示意图

界在3D封装技术上将取得长足进展,高端手机芯片、大规模I/O的芯片以及高性能芯片中将实现3D TSV封装,同时目前3D封装成本较高的因素也会解决,有望逐步实现大规模量产。TSV发展里程如图2所示。

## 2 通信网络芯片对3D封装技术的应用驱动

通信网络芯片的特点是规模大,对性能和功耗的要求都很高,此外,知识产权(IP)核复杂、设计周期紧、良率等都是重要问题,3D封装从一定程度上可以给未来通信系统芯片的设计带来好处。IP的选择经常是限制系统芯片设计的一个瓶颈,IP的代工厂和工艺,都限制了整个系统芯片的工艺选择。如果一种工艺不能支持所有相关IP,芯片项目就难以开展。3D封装有效规避了这个问题,使得从系统层面来看,芯片方案具备更多的灵活性,同时产品启动时间和完成时间都可以提前。因此,以400G网络处理器(NP)芯片为代表的高端通信网络芯片对于3D封装技术有很强的应用驱动力。

“高带宽、高性能、大容量、高密度”是有线网络产品的基本特征,产品的每一次带宽升级和技术演进,都与集成电路(IC)产业的工艺、技术等发展息息相关,基本符合“摩尔定律”的发展轨迹。以高端路由器为例,高端路由器产品的竞争,实质是核心芯片设计能力的体现,特别是NP的设计能力,几乎与高端路由器的技术竞

争力划等号<sup>[1]</sup>。每次芯片新工艺的成熟,NP的性能均能得以成倍提升,同时也促成了路由器产品的平台升级。

目前采用主流28 nm先进工艺设计的NP,已可实现双向100G+线速业务处理能力,以此研发推出的400G平台(单板400G/接口最大100G处理能力)的路由器产品也已规模商用。而随着网络带宽的日益膨胀,高端路由器正逐渐向1T产品平台演进,对下一代NP的带宽处理能力提出了更高的要求。同时以太网400G接口标准日趋成熟,预示着下一代NP应能支持双向400G的业务处理能力,以支撑400G以太网接口的应用需求。

虽然芯片工艺当前正逐渐步入16/14 nm时代,但400G NP的规格指标,相比28 nm的100G NP提升巨大,单凭芯片制造工艺上的进步已不能

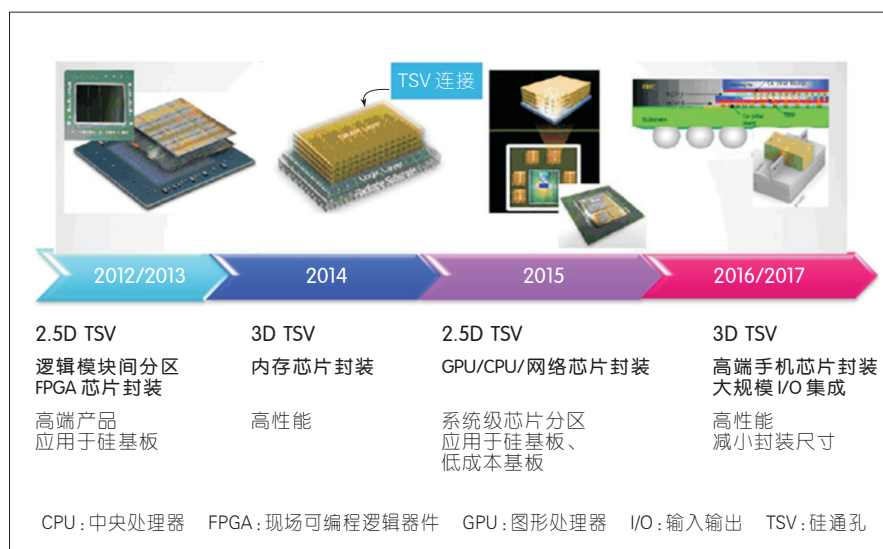
解决400G NP面临的高带宽问题。“存储墙”一直是NP性能落后于产品演进发展需求的关键原因,如400G NP继续采用常规外挂双倍速率同步动态随机存储器(DDR)的缓存解决方案,则需要外挂数十组高频率DDR颗粒,芯片引出的DDR PIN脚数量巨大,即使采用更先进的制造工艺,也无法实现芯片的设计和封装布局。

TSV技术的成功商用,使芯片的堆叠封装技术取得了实质性进展,相关产品正被加速推向市场,如存储芯片厂家海力士和三星已成功研发出3D堆叠封装的高带宽内存(HBM),Micron、Intel等也正在联合推动另一种堆叠封装混合存储立方体(HMC)的研发。在芯片后端设计领域,BROADCOM、GLOBALFOUNDRIES 等公司也成功引入了TSV技术,目前已能为通信网络芯片提供2.5D堆叠后端设计服务。

## 3 3D封装技术为通信网络芯片带来新的发展机遇

堆叠缓存和后端服务的逐渐成熟,有助于解决高带宽通信网络芯片所面临的瓶颈问题,提高产品的竞争力。主要表现在以下方面:

首先,堆叠封装解决了400G NP面临的缓存问题,3D堆叠缓存作为



▲ 图2 TSV发展里程

近年出现的黑科技,已被业界视为未来高速缓存的发展趋势。

(1)堆叠缓存采用多层动态随机存取存储器(DRAM)层堆叠来增加缓存带宽,如目前海力士的HBM单组堆叠缓存带宽最大已达到256 GB/s吞吐量,2组HBM已能满足400G NP的缓存需求。

(2)堆叠缓存采用了低电压技术,整体功耗大幅下降,相比外挂DDR的缓存方案,HBM的缓存功耗可下降60%左右。

其次,400G NP采用2.5D堆叠封装(如图3),在连接层直接互联主业务逻辑单元和HBM 3D堆叠缓存,实现了业务处理系统的整体设计布局,不但提升了芯片集成度,且在成本、面积、功耗上达到了最优化。

(1)传统NP需排布大量的DDR控制器和物理层组件,后端通常需要扩大Die尺寸来完成DDR的布局,因此Die面积也普遍较大且存在空间浪费。400G NP采用HBM缓存后,只需包含2组HBM,后端布局较为容易,主逻辑Die面积相比传统100G NP减少15%左右(同制造工艺),而裸Die成本相应也会有较大幅度的下降。

(2)传统NP需扇出大量的PIN脚,芯片的封装尺寸相当巨大,100G产品通常都在50 mm × 50 mm以上,而这些PIN脚中有50%为DDR相关的PIN脚。400G NP采用2.5D封装,在内置连接层上已完成了主逻辑与HBM间的I/O互联,最终封装只需扇出外部互联的串行/解串器引脚,即使在封装集成HBM的情况下,芯片

的封装面积也能缩小约35%。

(3)主逻辑Die面积减少,以及HBM缓存具有的低功耗特性,使400G NP的功耗得到较好控制,其整体功耗与传统100G NP的功耗(不含外置缓存)基本相当。且2.5D封装将主逻辑单元和HBM缓存在空间上分离布局,使主逻辑单元和HBM缓存均能获得最佳的散热效果。

(4)400G NP封装HBM,集成度大幅提升,产品单板印刷电路板(PCB)设计将大为简化,无需再关注复杂的DDR走线和信号干扰问题。同时由于省去了外挂的DDR颗粒,单板PCB可有更多的空间来布局更多的NP,将直接推动产品演进到2T级平台时代。

堆叠封装技术解决了众多高带宽有线网络芯片一直面临的“存储墙”带宽不足的瓶颈,且有效提升了有线网络芯片的集成度,3D堆叠缓存与2.5D封装的结合将成为未来有线网络芯片的主流设计方向。而因此形成的“system on module”系统芯片设计理念,将促使产品系统与芯片设计加速进行更深层次的行业垂直整合,有线网络芯片即将迎来新的发展机遇。

#### 4 对中国3D封装技术发展的思考

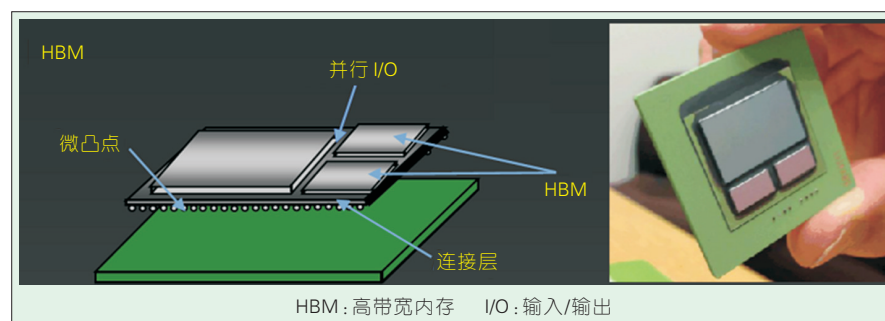
综前所述,随着芯片复杂度不断上升,将更高的集成需求转化成封装改进,可以很大程度控制芯片设计难度,保障芯片产品的竞争力。因此,通信系统芯片、移动智能终端及家庭

网络芯片等对3D封装技术的需求变得越来越明确且强烈。近年来,在国家科技政策的重视和引导下,中国封装技术水平取得了一些进步,如系统级封装(SiP)、铜柱凸块封装、倒装焊芯片封装等,都取得了不错的成绩,但3D封装技术仍亟待取得突破。

针对当前中国集成电路产业链的现状,建议产业链上下游厂商要协同发展,通过集成电路封测联盟的总体协调,在芯片设计企业和封测企业之间建立有效沟通机制。对于芯片设计企业,应通过通信系统芯片、移动智能终端及家庭网络芯片等产品对3D封装进行需求牵引。对于封测企业,要加大先导性封装技术的研究投入,加快3D-TSV、3D-SiP等新一代封装技术的产品导入。芯片设计企业和封测企业双方紧密合作,打通基于国产先进封装测试等集成电路关键技术环节,能够促进集成电路封装产业的技术发展,提升芯片设计企业产品的竞争优势,进而从整体上推动国内IC产业的格局性大发展。

#### 参考文献

- [1] 陆军. 3D封装[J]. 集成电路通讯, 2005, 24(4): 41-47
- [2] 范成法. 路由器技术发展趋势[J]. 中兴通讯技术(简讯), 2015, 19(8):12-14



▲图3 芯片2.5D封装

#### 作者简介



王晓明, 深圳市中兴微电子技术有限公司总经理; 在通讯产品和集成电路领域拥有丰富的研究和管理经验, 曾先后主导开发ZXJ10数字程控交换系统、高端路由器、核心网产品; 获多项国家级奖项, 负责的自主核心芯片在高速路由转发、大容量分组交换、复杂流量管理等多方面获得重要突破。



# 《中兴通讯技术》杂志(双月刊)投稿须知

## 一、杂志定位

《中兴通讯技术》杂志为通信技术类学术期刊。通过介绍、探讨通信热点技术,以展现通信技术最新发展动态,并促进产学研合作,发掘和培养优秀人才,为振兴民族通信产业做贡献。

## 二、稿件基本要求

### 1. 投稿约定

- (1)作者需登录《中兴通讯技术》投稿平台: [www.zte.com.cn/paper](http://www.zte.com.cn/paper),并上传稿件。第一次投稿需完成新用户注册。
- (2)编辑部将按照审稿流程聘请专家审稿,并根据审稿意见,公平、公正地录用稿件。审稿过程需要1个月左右。

### 2. 内容和格式要求

- (1)稿件须具有创新性、学术性、规范性和可读性。
- (2)稿件需采用WORD文档格式。
- (3)稿件篇幅一般不超过6000字(包括文、图),内容包括:中、英文题名,作者姓名及汉语拼音,作者中、英文单位,中文摘要、关键词(3~8个),英文摘要、关键词,正文,参考文献,作者简介。
- (4)中文题名一般不超过20个汉字,中、英文题名含义应一致。
- (5)摘要尽量写成报道性摘要,包括研究的目的、方法、结果/结论,150~200字为宜。摘要应具有独立性和自明性。中英文摘要应一致。
- (6)文稿中的量和单位应符合国家标准。外文字母的正斜体、大小写等须写清楚,上下角的字母、数据和符号的位置皆应明显区别。
- (7)图、表力求少而精(以8幅为上限),应随文出现,切忌与文字重复。图、表应保持自明性,图中缩略词和英文均要在图中加中文解释。表应采用三线表,表中缩略词和英文均要在表内加中文解释。
- (8)参考文献以20条左右为宜,不允许公开发表的资料不应列入。所有文献必须在正文中引用,文献序号按其在文中出现的先后次序编排。常用参考文献的书写格式为:
  - 期刊[序号]作者. 题名[J]. 刊名, 出版年, 卷号(期号): 引文页码. 数字对象唯一标识符
  - 书籍[序号]作者. 书名[M]. 出版地: 出版者, 出版年: 引文页码. 数字对象唯一标识符
  - 论文集中析出文献[序号]作者. 题名[C]/论文集编者. 论文集名(会议名). 出版地: 出版者, 出版年(开会年): 引文页码. 数字对象唯一标识符
  - 学位论文[序号]作者. 题名[D]. 保存地点: 保存单位, 授予年. 数字对象唯一标识符
  - 专利[序号]专利所有者. 专利题名: 专利号[P]. 出版日期. 数字对象唯一标识符
  - 国际、国家标准[序号] 标准名称: 标准编号[S]. 出版地: 出版者, 出版年. 数字对象唯一标识符
- (9)作者超过3人时,可以感谢形式在文中提及。作者简介包括:姓名、工作单位、职务或职称、学历、毕业于何校、现从事的工作、专业特长、科研成果、已发表的论文数量等。
- (10)提供正面、免冠、彩色标准照片一张,最好采用JPG格式(文件大小超过100kB)。
- (11)应标注出研究课题的资助基金或资助项目名称及编号。
- (12)提供联系方式,如:通信地址、电话(含手机)、Email等。

### 3. 其他事项

- (1)请勿一稿两投。凡在2个月(自来稿之日算起)以内未接到录用通知者,可致电编辑部询问。
- (2)为了促进信息传播,加强学术交流,在论文发表后,本刊享有文章的转摘权(包括英文版、电子版、网络版)。作者获得的稿费包括转摘酬金。如作者不同意转摘,请在投稿时说明。

编辑部地址:安徽省合肥市金寨路329号国轩凯旋大厦1201室,邮政编码:230061

联系电话:0551-65533356,联系邮箱: [magazine@zte.com.cn](mailto:magazine@zte.com.cn)

本刊只接受在线投稿,欢迎访问本刊投稿平台: [www.zte.com.cn/paper](http://www.zte.com.cn/paper)

# 中兴通讯技术

ZHONGXING TONGXUN JISHU

双月刊 1995 年创刊 总第 129 期  
2016 年 8 月 第 22 卷第 4 期

主管:安徽省科学技术厅  
主办:安徽省科学技术情报研究所  
中兴通讯股份有限公司  
编辑:《中兴通讯技术》编辑部

总编:陈杰  
常务副总编:黄新明  
责任编辑:徐烨  
编辑:卢丹,朱莉,赵陆  
排版制作:余刚  
发行:王萍萍  
编务:王坤

《中兴通讯技术》编辑部  
地址:合肥市金寨路 329 号凯旋大厦 12 楼  
邮编:230061  
网址: [www.zte.com.cn/magazine](http://www.zte.com.cn/magazine)  
投稿平台: [www.zte.com.cn/paper](http://www.zte.com.cn/paper)  
电子信箱: [magazine@zte.com.cn](mailto:magazine@zte.com.cn)  
电话: (0551)65533356  
传真: (0551)65850139

出版、发行:中兴通讯技术杂志社  
发行范围:全球发行  
印刷:合肥添彩包装有限公司  
出版日期:2016 年 8 月 10 日  
中国标准连续出版物号: ISSN 1009-6868  
CN 34-1228/ TN  
广告经营许可证:皖合工商广字 0058  
定价:每册 20.00 元,全年 120.00 元