

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2016.01.020

引用格式: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.[YANG Hongjun. Latest development progress and trends of foreign data relay satellite systems[J]. Telecommunication Engineering, 2016, 56(1):109-116.]

国外数据中继卫星系统最新发展及未来趋势*

杨红俊**

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

摘要:作为天基测控系统,数据中继卫星大大提高了对用户星的覆盖率,减少了地面布站的数量,节约了成本,是各主要航天国家重点建设的航天系统之一。目前,美国、俄罗斯、欧洲和日本均发展了自己的数据中继卫星系统,在对空间和地面系统进行升级改造的同时,以小卫星星座、搭载载荷等灵活的形式,采用激光通信、软件无线电、组网等先进技术积极研发和部署下一带卫星系统,并谋划与行星中继卫星一起构建跨太阳系的中继卫星体系。总结了国外中继卫星系统的发展现状和未来,综合分析了关键技术和发展趋势,并对中国中继卫星的发展提出了建议。

关键词:数据中继卫星系统;关键技术;发展趋势;激光通信;软件无线电;DTN 组网

中图分类号:V556.8 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2016)01-0109-08

Latest Development Progress and Trends of Foreign Data Relay Satellite Systems

YANG Hongjun

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract: As a space-based TT&C system, data relay satellite system can improve user coverage with reduced ground station number and operation cost, so it has being developed greatly in many major space powers, including U. S. , Russia, Europe, and Japan. In recent years, these satellites' space and ground segments are upgraded and replaced, and the next generation satellite solution has being proposed and implemented using advanced technologies such as laser communication, software defined radio, and networking, and flexible architecture such as small satellite constellation or hosted payload. A data relay satellite system across solar system incorporated relay satellites on planets is planned. For these data relay satellite systems, the current situation and development are discussed, and the key technologies and future trends are analyzed. Some advices on China's data relay satellite system development are provided.

Key words: data relay satellite system; key technologies; future trends; laser communication; software defined radio; DTN networking

1 引言

自 20 世纪 80 年代美国建立全球首个数据中继卫星系统——“跟踪与数据中继卫星系统”(Tracking and Data Relay Satellite System, TDRSS)以来,俄罗斯、欧洲、日本以及我国纷纷投资建设了自己的数

据中继卫星系统,为各种低轨航天器(尤其是遥感卫星和侦察卫星)、航空器等军/民用用户中继数据,提供跟踪服务,以较低的成本和较少的地面站解决了原来全球布站的地面测控网也无法提供的高用户覆盖率,在军/民应用中发挥了重要作用。

* 收稿日期:2015-10-14;修回日期:2016-01-11 Received date:2015-10-14;Revised date:2016-01-11

** 通信作者:yanghj@swiet.com.cn Corresponding author:yanghj@swiet.com.cn

随着航空航天技术和信息技术的发展,数据中继卫星的用户数量不断增多,用户摄取的信息量急剧增加,例如未来对地观测卫星每日需要传输的数据量对卫星的数据传输能力提出了越来越高的要求。各国原有的数据中继卫星系统日益不能满足需求,必须更新卫星,升级设备,并采用先进的技术和创新的结构,结合未来深空探测的需求,构建新一代数据中继卫星系统。

本文根据国外文献总结了世界上主要航天强国的数据中继卫星系统发展现状,讨论了涉及的关键技术,分析了未来发展趋势,以供同行参考。

2 国外数据中继卫星系统发展现状

2.1 美国

美国的 TDRSS 系统也称为天基网,是美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)三大测控网之一,主要为美国低轨军民用户卫星、国际空间站、科研飞机与气球、运载火箭等用户提供 S、Ku、Ka 频段测控信息和业务数据中继。到 2014 年底,美国已发射 3 代共 11 颗 TDRS 卫星,在轨服役的有 9 颗,在两个站址建设了 3 个地面终端站,组成了完备的卫星体系。

根据 NASA“空间通信与导航”(Space Communications and Navigation, SCaN)计划^[1],天基网近期面临的主要任务需求是月球无人探测需要的高速数传和载人探测任务需要的可靠通信、高速率骨干链路、近连续覆盖以及对用户任务的无缝支持。因此,TDRSS 近几年的建设重点是:发射第三代卫星;对使用 30 多年的地面系统进行更新和升级;新建布洛索姆(Blossom Point)地面站,以满足未来航天保障的需要。

2.1.1 第三代中继卫星

发射第三代数据中继卫星是 TDRSS 星座进行更新换代的主要内容。第三代卫星在第二代卫星的基础上进行了改进升级,具备以下特点:

- (1)沿用第一代卫星的技术体系,S 频段多址返向波束在地面进行波束形成;
- (2)升级了星上遥控遥测链路的通信安全系统;
- (3)采用新的 S 频段多址天线技术;
- (4)更换 Ku/Ka 频段和 S 频段用户业务支持设

备,Ka 频段数据率可达 800 Mb/s,采用了低密度奇偶校验码、Turbo 乘积码、8PSK 调制等新的调制形式。

NASA 分别于 2013 年 1 月 31 日和 2014 年 1 月 23 日发射了两颗第三代跟踪与数据中继卫星(TDRS-K,L),以补充由超期服役的第一代卫星和第二代卫星组成的 TDRSS 星座。最后一颗卫星 TDRS-M 正在加紧研制,将于 2017 年发射。

2.1.2 升级和改造地面系统

为配合第三代 TDRS 卫星的发射并解决地面系统陈旧的问题,NASA 制定了“用户业务分系统组件更换计划”(User Services Subsystem Component Replacement, USS CR)^[2]和“天基网地面段增强计划”(Space Network Ground Segment Sustainment, SGSS)^[3],对地面系统进行升级和改造。

“USS CR 计划”在 2013 年 7 月前更换了白沙地面站两套星-地链路终端(SGLT 4 和 5)中的 USS 设备子网,替换下来的设备用作备份,使天基网至少在 2017 财年前能满足可用性要求。主要内容是根据需要,用高度成熟的数字信号处理能力和 IP 网络能力以及商业上广泛使用的商用货架产品(Commercial-off-the-shelf, COTS)设备更换和升级白沙站内两套星地链路终端(Space Ground Link Terminal, SGLT)中已难以维护的 S 频段和 K 频段(Ku 和 Ka 频段)单址业务调制器和其他相关 USS 设备,包括安装新的遥控与遥测系统、新的地面波束形成器(它是 TDRS 需分多址业务(Demand Access System, DAS)的关键)和两副新的 Ka 频段端-端测试天线系统,以及对 SGLT 进行升级。

“天基网地面段增强计划”(SGSS)是 NASA SCaN 计划的一部分,于 2014~2016 年底实施,主要目标是更换升级天基网所有的硬件和软件,提供一个灵活、可扩展、可升级、可支持的地面系统,保持天基网至少再工作 25 年。采用 SGSS 系统后,设备性能得到提高,重量和体积成倍减小。

SGSS 计划还包括在马里兰州的布洛索姆角建立一个新的终端站,向东扩展天基网的覆盖,为一次性运载火箭提供发射支持,称为天基网扩展终端站,站内将建两副主任务天线并配置全新的地面通信电子设备。

SGSS 系统的创新之处是采用“池”式结构来管

理设备。目前的天基网地面终端站采用“烟囱”式结构,信号通过串接的设备传送到某一特定 TDRS 卫星。虽然设备有冗余,但无法切换到其他 TDRS 卫星支持用户。这种结构限制了灵活性,增加了每个地面终端的设备数量,因为每颗 TDRS 卫星自身都需要一套主/备用地面设备。而 SGSS 系统采用“池”式结构,每颗 TDRS 卫星专用的设备极少,用户保障设备可从池中空闲的资源中挑选,执行完任务后返回池中供下次使用,各个地面终端站可采用相同的池。“池”式结构降低了设备量,提高了结构灵活性和硬件利用效率。

SGSS 计划已于 2014 年 7 月开始实施,原计划 2017 年 6 月进行验收评审,但目前该计划已滞后预定时间 2 年(预计验收评审时间推迟至 2019 年 5 月)。由于成本超过预算 30%,NASA 不得不取消一些研究内容,包括某些备份能力和仿真能力,因此 SGSS 系统能力有所降低。

2.1.3 增加“TDRS 卫星增强业务”^[4]

“TDRS 卫星增强业务(TDRSS Augmentation Service for Satellites,TASS)”是通过 TDRSS 卫星用 S 频段广播全球差分 GPS 修正信息,实现卫星自主精确定轨和定位。它提供一个与 GPS 同步的测距信号,定位精度优于 1 m。2013 年 NASA 用 SCaN 试验台进行了 TASS 测试,从第三代卫星开始提供这项服务。

2.1.4 研究下一代(第四代)卫星方案

随着第一代卫星逐步退役,TDRSS 星座中的在轨卫星数会不断减少。2015 年底退役卫星会达到 5 颗,加上新发射的 TDRS-M 卫星,在轨卫星数为 7 颗;2016 年 TDRS-5 将退役,地面波束形成出现缺口;到 2020 年,TDRSS 星座中第一代卫星全部退役,第二代卫星超出使用寿命,TDRS-9 退役,在轨服役的卫星只有 5 颗(包括一颗备份星 TDRS-10),届时 TDRSS 的性能将不足以满足任务需求。因此,NASA 及早开展了下一代卫星的方案研究。

2013 年 3 月 7 日,NASA 在官方网站向外界发布下一代(第四代)天基中继体系结构意见征询书和白皮书^[5],希望企业和院校集思广益,共同研究下一代天基中继通信与导航体系结构。作为 SCaN 计划的一部分,2013~2014 年 NASA 哥达德飞行中心探索与空间通信部进行了长达一年的“天基中继

研究”(Space Based Relay Study,SBRS),确定能支持 NASA 2020 年以后航天任务需求的天基中继通信与导航体系结构。为新一代中继卫星系统设定的初步部署时间为 2025 年。

SBRS 从以下三个方面对未来体系结构进行了研究。

(1) 用户需求和业务性能

根据 2020~2040 年计划进行的航天任务(尤其是载人航天)的需求,确定卫星的轨道覆盖范围、调度水平与按需服务的关系、等待时间、数据率/数据量、业务周期、安全性要求等。

(2) 技术/物理结构

评估的技术包括光通信、微波通信、毫米波星间链路、相控阵天线、容断组网、空间组网、认知和自适应协议、软件无线电技术。卫星系统的物理结构可采用多种形式,包括专用卫星(类似现有的 TDRS 卫星)、作为寄宿载荷搭载在商业卫星或其他政府卫星上、具有分布式能力的小卫星群以及上述形式的组合。结构方案将考虑天地网络一体化。

(3) 采购及管理方式

包括公私合营、业务纯商业化、与其他政府机构共享所有权、NASA 专用/专属系统等。

2014 年,NASA 格伦研究中心提出一个基于小卫星的同步轨道数据中继卫星方案“小型天基卫星”(Small Space Based Satellite,SSBS)^[6]。SSBS 不仅要解决对地观测任务的需求,还要解决 2030 年小行星及火星载人航天任务的需求,因此设计的 SSBS 卫星具有支持同步轨道(Geosynchronous Earth Orbit,GEO)以上任务的链路和能力。卫星将于 2022 年投入使用,可由“猎鹰 9”火箭以一箭三星方式发射,以降低发射成本。卫星采用双频段天线,可与 GEO 以上和以下的用户星通信,将保留和增强 S 和 Ka 单址业务,星地链路与现在的 TDRS 相同(Ku 频段),增加了光通信选项,与现有 TDRS 一样提供通信中继和跟踪定位业务。SSBS 是美国向载人探测中继体系迈出的第一步,未来月球中继卫星、火星中继卫星均会参考 SBSS 的设计,它们功能基本相同,只是要根据任务需求和预计的燃料损耗,在冗余设计和所用频率上有所不同。

SSBS 卫星的设计考虑了两种方案,一种是只采用射频通信设备的方案(如图 1 所示),一种是增加

了激光通信设备的方案(如图 2 所示)。

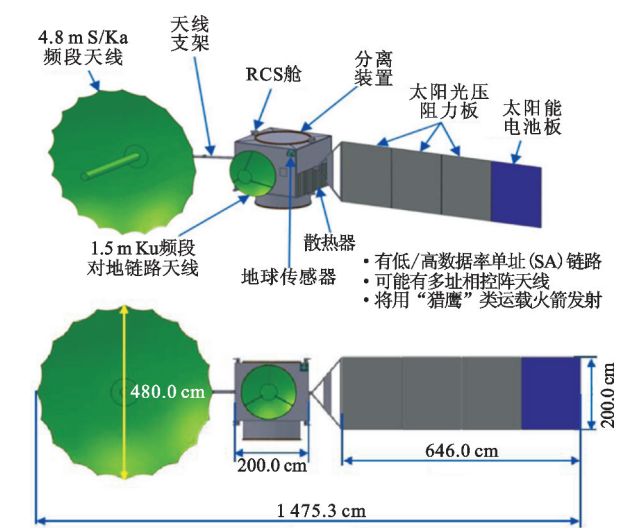


图 1 仅采用射频通信设备的 SSBS 卫星
Fig. 1 SSBS only with RF communication package

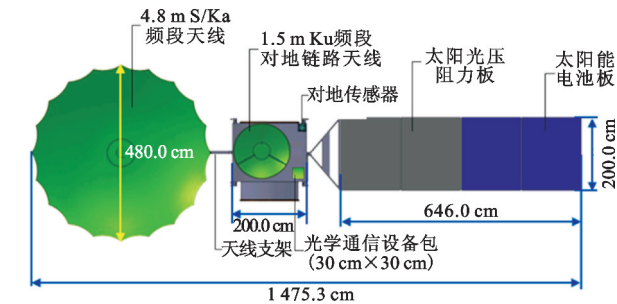


图 2 增加了激光通信设备的 SSBS 卫星
Fig. 2 SSBS with optical payloads

地面段使用 SCaN 综合地面网,可使用34 m或18 m天线支持 SBSS 卫星,但需要多建几个站,地面站间可以切换以支持“多用途乘员飞船”(Multi-Purpose Crew Vehicle,MPCV)。

2.2 欧洲发展第二代卫星——EDRS 系统

欧空局(European Space Agency,ESA)虽然于2001 年发射了第一代数据中继卫星 Artemis,并于2003 年投入使用,但该卫星只是颗技术试验卫星,并于2010 年达到寿命期。随着欧盟/欧空局联合进行的“全球环境与安全监视”(Global Monitoring for Environment and Security,GMES)计划的实施,预计每天从空间向地面传输的数据量将达到6 TB,欧洲目前的航天通信系统无法满足需要。为了实现欧洲独立战略,欧空局从2008 年开始提出兴建“欧洲数据中继卫星”(European Data Relay Satellite,EDRS)系统。

EDRS 方案经过几年的发展演变,最终确定为

由两个同步轨道节点及其地面系统组成的系统^[7]。两个空间节点其中一个为搭载在欧洲商业通信卫星 Eutelsat 9B 上的激光通信有效载荷(EDRS-A),另一个是一颗专用数据中继卫星(EDRS-C),两个节点只覆盖欧洲地区。EDRS-A 提供激光和 Ka 频段两种星间通信链路,激光返向数据率最高达1.8 Gb/s;Ka 频段返向最高为300 Mb/s;ERS-C 只有激光链路,指标与 EDRS-A 相同。根据欧空局的计划安排,EDRS-A 定于2016 年1 月发射,EDRS-C 卫星将于2017 年初发射。两颗卫星寿命均为15 年。

EDRS 系统采用公私合营的方式建设,项目总成本约6.25 亿美元。ESA 为该项目提供近75% 的资金,德国空客公司(以前的 Astrium 公司)投资1.63 亿美元,伦敦阿万蒂(Avanti)通信公司为 EDRS-C 卫星投资1.19 亿美元。

EDRS 第一个激光通信用户是“哨兵”系列卫星。2014 年4 月3 日,第一颗卫星“哨兵1A”发射,2015 年夏正式开始使用,每圈轨道通信20 min。第一个 Ka 频段用户是国际空间站“哥伦布”舱段,用于实时向地面传输星上试验数据,2016 年启用。EDRS 未来的一个关键市场是美国国防部及其无人机机队。无人机机队会产生大量流视频数据,与无线电频率(当前使用 Ku 频段,未来使用 Ka 频段)相比,激光链路可更快速地传送这些数据。根据设计,一颗卫星可以与4 架无人机通信,速率达1.8 Gb/s,每架每小时数据量达1.6 Tb,4 架共6.4 Tb^[8]。

ESA 及空客公司计划为 EDRS 系统扩展第三个地球同步轨道节点,该节点将位于西太平洋上空,极有可能采用搭载载荷的形式,以实现全球覆盖。计划名为“全球网”(GlobeNet),最终方案将于2015~2016 年确定,根据目前的计划,将采用两个激光通信终端(Laser Communication Terminal,LCT)终端,包括验证 GEO-GEO 星间链路,卫星定于2020 年发射。通信业务考虑了不断提高的保密通信要求,如对有效载荷的直接保密指挥控制以及更多的冗余要求和用于无人机敏感数据中继的需求。LCT 接口的互操作能力有利于国际合作,目前已纳入国际空间数据系统咨询委员会(Consultative Committee for Space Data Systems,CCSDS)标准化程序作为输入。

2.3 俄罗斯发展第二代“射线”卫星

俄罗斯“射线”(Luch)数据中继卫星系统于20 世纪80 年代开始建设,到1999 年第一代5 颗卫星

(包括“Luch”和“Luch-2”)全部退役,俄罗斯有很长一段时间无中继卫星可用,与国际空间站的通信需要租用美国的 TDRS 卫星,每天通信时间不足 2.5 h。为了拥有独立的通信链路,俄罗斯开始研制第二代 Luch 卫星,并于 2011~2014 年间相继发射了“Luch-5A”、“Luch-5B”和“Luch-5V”3 颗卫星(东经 167°、西经 16°、东经 95°),组成星座提供全球覆盖,在国际空间站与地面飞行控制中心之间提供电视和数据通信。

Luch-5A 星上两副 4.2 m 天线,分别工作在 S 和 Ku 频段;6 条 S/Ku 信道:S 频率为 2.3/2.1 GHz、0.4/1.7 GHz,容量为 5 Mb/s;Ku 频率为 15/11 GHz,容量为 150 Mb/s;遥控遥测采用 S 频段,采用“多站接入”方式;传输 COSPAS/SARSAT 国际救援系统自动声纳浮标信号,P 频段发射,L 频段接收;以 P/L 频段收发 Planeta-C 系统的水文气象数据;发送 GLONASS 系统“差分修正与监测系统”信号。

Luch-5B 有 4 条 S 和 Ku 频段信道,无 MSA 中继设备或 COSPAS/SARSAT 设备,增加了一条激光与无线电通信信道。

Luch-5V 与 Luch-5A 相同。

2.4 日本

日本于 2002 年发射了 ka 频段数据中继卫星试验星(Data Relay Test Satellite, DRTS),目前仍在运行,通信速率为 240 Mb/s。随着日本对地观测卫星高精度化的发展,数据传输需求激增。2008 年,日本启动了下一代中继卫星激光通信终端的研制,设计目标是使下一代中继星与用户星之间的通信速率达到 2.5 Gb/s。2011 年,日本宇航局(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)提出两个下一代数据中继卫星系统方案,一个采用光通信技术,前/返向数据率达 2.5/1.2 Gb/s^[9];另一个没有采用光通信技术,只在 DRTS 基础上进行了提高,名为“DRTS-2”,整个方案与 DRTS 类似,只是提高了 Ka 频段返向链路的数据率^[10]。

2014 年,日本宣布计划于 2019 年发射“光数据中继卫星”,采用光通信与射频通信相结合的方案,使用激光和 S/Ka 频段与“先进光学卫星”等低轨侦察卫星进行中继通信,将数据传送给筑波站和鸠山站,光通信的通信速率达 1.8 Gb/s,使用寿命暂定 10~15 年。JAXA 计划同一年完成“先进光学卫星”和“光数据中继卫星”的发射,以应用于灾害的实时

高分辨率观测和高频率的陆域和海域观测。

3 关键技术发展

在数据中继卫星系统的发展过程中,各国对有关中继卫星的先进技术和应用开展了深入研究,以提高现有卫星系统的性能,发展下一代系统。

3.1 激光通信技术

激光通信技术被 NASA 视为能改变游戏规划的技术,可以成倍提高数据传输速率,缓解射频频谱的局限。由于通信光束很细,干扰和拦截困难,具有较好的对抗性,但缺点是易受大气和天气的影响,因此激光通信技术在深空通信中应用前景良好。目前,由于技术发展水平和成熟度的限制,激光通信技术距离实际应用还有差距,但是各个国家和地区都非常重视激光技术的研究和发展。

美国 NASA 于 2013 年和 2014 年分别进行了两次激光通信试验,即“月球光通信演示验证”(Lunar Laser Communications Demonstration, LLCD)和“激光通信光载荷”(Optical Payload for Lasercomm Science, OPLAS),分别验证了 622 Mb/s 的月地激光通信和 50 Mb/s 近地轨道星地激光通信。以此为基础,NASA 计划于 2017 年 12 月利用 Loral 商业通信卫星进行“激光通信中继演示验证”(LCRD),为下一代中继卫星研发星地和星间激光通信技术(1.25 Gb/s),与此同时还会验证星上数据处理和延迟容忍网络(Delay Tolerant Network, DTN)技术^[10-13]。

欧洲的激光通信技术目前处于世界领先地位,它们利用 Artemis 中继试验星进行了多年激光通信技术试验^[14-18]。新一代卫星 EDRS 中的关键设备——激光通信终端(Laser communication Terminal, LCT)已研制两代,2008 年第一代 LCT 在德国 TerraSAR-X 卫星和美国 NFIRE 卫星之间进行了激光星间链路通信试验,在 5 000 km 距离成功实现了 5.6 Gb/s 数据传输。根据在轨试验结果研制了第二代 LCT,可在 45 000 km 距离上实现 1.8 Gb/s 数据传输。EDRS 及其用户星“哨兵”1A、2A、1B、2B 卫星上的 LCT 就是基于第二代 LCT 研制,数传速率 1.8 Gb/s,未来可扩展至 7.2 Gb/s。2014 年 11 月 27 日在 AlphaSat 卫星与“哨兵”1A 之间进行了第二代 LCT 激光通信验证,测试速率达 600 Mb/s,至 2015 年 8 月已成功进行了 100 次高速激光通信试验,技术已臻成熟。

日本在 2005 年用 DRTS、光通信实验卫星 (Optical Inter-orbit Communications Engineering Test Satellite, OICETS) 和欧洲 Artemis 卫星进行了光通信技术验证, OICETS 与 Artemis 之间进行了 100 多次成功星间激光通信验证, 重点是验证激光捕获、跟踪与指向技术。OICETS 还与日本国家信息与通信技术研究所 (Nippon Export and Investment Insurance, NICT) 以及德国航天局、ESA、NASA 的光学地面站进行了星地激光通信验证, 证明未来大容量航天通信的可行性^[9]。日本宇航局还将在国际空间站日本实验舱“希望号”的舱外实验平台上设置一台卫星光通信验证机。

俄罗斯曾利用 GLONASS 导航卫星进行过星间、星地激光测距与通信试验, 其第二代中继星 Luch-5B 卫星中已增加了一条激光通信信道。

3.2 软件无线电及组网技术

2013 年 4 月, NASA 利用发射到空间站上的“通信、导航、组网可重构试验台” (Communication Navigation and Networking Reconfigurable Testbed, CoN-NeCT) 与 TDRS-K 卫星进行了软件无线电通信及 DTN 组网实验。在 LLCD 试验中也进行了激光 DTN 组网试验。

2013 年 JAXA 与 NASA 合作利用 DTRS 及其地面终端进行了雨衰情况下的 DTN 通信试验, 一方面研究日本在未来采用 DTN 的可行性, 一方面为 CCSDS 制定 DTN 标准提供帮助^[19]。

3.3 多址技术与组网技术

近几年来, 美国不断改进 TDRSS 的多址技术。TDRSS 需址系统 (DAS) 利用 TDRS 多址天线、地面波束形成和扩频调制, 按需为天基和地基用户提供反向通信链路, 无需通过业务调度就能每天 24 h 发送遥测和科学数据。现在的 DAS 系统是 2004 年安装的, 设备和技术都已过时。NASA 目前研究了一个采用数字技术、以太网/IP 组网技术、软件无线电等新技术以及低成本 COTS 组件而形成的增强型 DAS 方案^[20], 消除了对硬件资源的限制, 其性能仅受多址用户产生的自干扰的限制。它支持的用户数是现在的 3 倍, 新的波束形成器可同时支持 32 个波束, 每个站至少有 3 个波束形成器。

需址技术还支持 TDRS 卫星组网。TDRS 卫星组网就是将多颗 TDRS 卫星接收的多址信号进行组阵 (见图 3), 以提高信号增益, 两颗卫星组阵可以产

生 3 dB 增益, 3 颗卫星组阵将产生 4.8 dB 增益。这项技术对于跟踪低功率卫星的微弱信号很有用, 如立方体卫星, 因此可用于微小卫星的跟踪测控^[4,20]。

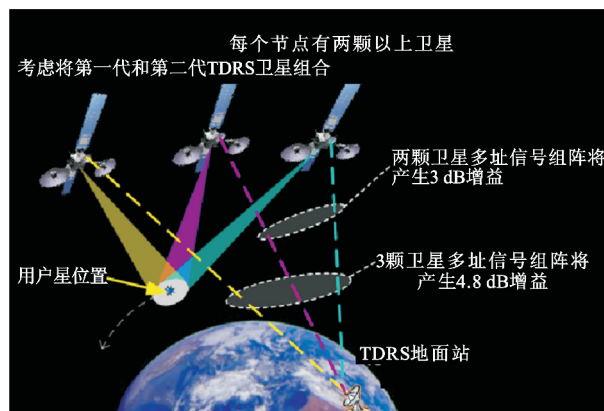


图 3 TDRS 卫星组阵将提高链路性能^[4]
Fig. 3 TDRS satellite arraying for improving link performance

2011 年 NASA 还提出一种基于 DTN 的多址快速前向 (Multi-address Fast Forward, MAFF) 业务, 能尽快为用户提供前向链路^[21]。虽然 TDRS 卫星的前向链路采用了相控阵天线, 但由于卫星对设备的限制, 每颗卫星只有两条前向链路, 无法再增加更多的链路和相应设备 (如功放), 因此用户无法实现按需使用前向链路, 最好的情况是尽快得到一条前向链路。MAFF 利用 DTN 协议, 在任务操作中心和地面站完成用户数据处理, 减少了多址前向链路的调度操作以及数据生成与传输之间的等待时间。

3.4 网络安全技术

随着空间对抗威胁日益加剧, 测控网的网络安全技术也提上日程。NASA 2015 年针对 TDRSS 系统可能受到的网络攻击提出建立一个安全恢复系统, 在受到攻击时能重建安全的网络通信^[22]。具体做法是在全国设立几十个指定站, 每个站内用一副接收天线和一部卫星接收机建立一个固定或移动的应急地面站; 在白沙综合站内的安全位置设立一个应急控制中心, 保存用户的密钥信息; 在应急地面站与应急控制中心之间建立一个专用、安全、加密的单向虚拟专用网 (Virtual Private Network, VPN), 只能通过 TDRS 卫星从应急地面站向应急控制中心单向传输应急地面站的状态信息和收到数据的确认信息。在 TDRSS 受到攻击出现通信中断时, 指定站立即建立应急地面站, 发送表明联机状态的加密信息。应急控制中心收到正确确认信息后, 生成一个多址前向信息队列, 向所有指定站发送基本恢复数据。

TDRSS 利用前述新型“多址快速前向业务”(MAFF)调度一颗或多颗 TDRS 卫星向每个应急地面站发送恢复信息,直到多址前向信息队列为空。应急地面站利用 VPN 将收到恢复数据的确认信息返回应急控制中心。如果没有收到确认信息,TDRSS 会再次调度多址前向业务,最后将应急地面站下载的数据转移到需要恢复数据的计算机网络。

4 未来发展趋势分析

4.1 采用激光通信技术提高数据传输速率

如前所述,激光通信技术可以极大地提高数据传输速率,目前由于技术还不够成熟,距离实际应用还有差距。从各国和地区下一代数据中继卫星系统的方案看,俄罗斯、欧洲、美国和日本均考虑了激光通信技术。俄罗斯在现役卫星中已加入了激光通信信道。欧洲在激光通信领域具有绝对优势,其下一代系统方案无论怎样变化,采用激光通信技术的决心从未变过。近几年文献资料表明,欧洲在激光通信技术和设备研制方面成果卓著,随着发射日期的临近,激光通信技术投入实用指日可待。美国和日本都给出了只采用射频系统和增加激光通信系统两种方案,日本最终选择了采用激光通信的方案。美国虽然还未最终确定,但近几年也在积极开展演示验证,并将激光通信技术列入 NASA 技术发展路线图。采用激光通信技术是中继卫星未来必然发展趋势。

4.2 卫星平台多样化

美国于 2013 年先后发布《抗毁与分解式航天体系架构》白皮书和《军事卫星通信的未来》报告,针对日益对抗的空间环境,提出采用“分解式”思想,将大型卫星的功能分解给小卫星和寄宿有效载荷来完成,以提高航天系统的抗毁能力和经济可承受性。这个思想已体现在美国下一代航天系统体系的构建中。目前,美国提出的下一代侦察卫星、预警卫星、通信卫星、气象卫星均采用小卫星平台或搭载载荷的形式。这个思想也同样体现在中继卫星系统的设计中。美国的中继卫星方案采用小卫星星座形式,欧洲采用专用卫星与搭载载荷相结合的形式,使中继卫星系统的构建更加灵活多样,也提高了卫星系统的弹性。

4.3 利用组网技术构建卫星网络

如前所述,美国、日本均利用中继卫星进行了 DTN 技术试验和软件无线电技术验证,为未来构建

互联互通的卫星网络打下基础。欧洲提出增加第 3 颗 EDRS 卫星,利用激光通信链路构建中继卫星之间的星间链路,届时中继卫星星座将构成一个互联的网络。美国提出的中继卫星方案具备与 GEO 以上航天器通信的能力,未来美国将在月球、火星建设中继卫星系统,这些中继卫星与地球的中继卫星一起,将利用组网技术构成行星际网络的骨干网。

5 结束语

数据中继卫星系统作为天基测控系统的重要组成部分,受到了各国的重视。我国也建立了自己的数据中继卫星系统,并正在发展第二代系统。纵观其他国家和地区对下一代卫星系统的设计,无论是系统构建形式还是新技术的应用都发生了较大变化。我们应结合本国国情和未来的载人与不载人航天任务需求,利用激光通信、DTN 组网、软件无线电等先进技术,充分挖掘中继卫星系统的应用潜力,构建适合自己的中继卫星系统。在空间博弈日渐激烈的新形式下,如何建立抗干扰、抗摧毁、抗网络攻击的弹性卫星系统值得深思。

参考文献:

- [1] Space Communications and Navigation Office NASA Headquarters. Space communications and navigation (SCaN) network architecture definition document(ADD), Volume 1: executive summary, revision 2 [EB/OL]. (2011-10-31) [2015-09-18]. http://www.nasa.gov/pdf/675092main_SCaN_ADD_Executive_Summary.pdf.
- [2] SHAW H C, BOLDOSSER P E, WONG Y F, et al. TDRSS space ground link terminal forestalls obsolescence with component replacement and upgrades [EB/OL]. (2012-06-11) [2015-09-18]. <http://www.spaceops2012.org/proceedings/documents/id1250067-paper-003.pdf>.
- [3] GITLIN T, WALYUS K. NASA's space network ground segment sustainment project preparing for the future [EB/OL]. (2012-06-11) [2015-09-18]. http://www.vadatech.com/media/pdf_SCSS-NASA-Paper-001.pdf.
- [4] LIEBRECHT P. SBIR technology application to space communications and navigation (SCaN) [EB/OL]. (2010-08-26) [2015-09-18]. http://www.nasa.gov/pdf/694746main_SBIR_Technology_Applications_SCaN.pdf.
- [5] NASA. NASA's space-based relay study: overview and direction (SBRs white paper) [EB/OL]. (2013-03-07) [2015-09-18]. <http://www.nasa.gov/sites/default/files/files/SBRWhitePaper3-7-2013.pdf>.
- [6] BHASIN K, WARNER J, OLESON S, et al. Design con-

- cepts for a small space-based GEO relay satellite for missions between low earth and near earth orbits [C]// Proceedings of the 13th International Conference on Space Operations. Pasadena, CA: AIAA, 2014: 1-19.
- [7] BOBROVSKYI S, BARRIOS R. EFAL: EDRS feeder link from antarctic latitudes - system architecture and operations concept [C]// Proceedings of the 13th International Conference on Space Operations. Pasadena, CA: AIAA, 2014: 1-12.
- [8] GRIETHE W, HEINE F, BEGG L L, et al. LaserCom in UAS missions: benefits and operational aspects [J]. Proceeding of SPIE, 2013, 8713: 1-7.
- [9] YAMAKAWA S, HANADA T, KOHATA H. R&D status of the next generation optical communication terminals in JAXA [C]// Proceedings of 2011 International Conference on Space Optical System and Applications. Santa Monica, CA: IEEE, 2011: 389-393.
- [10] SUDO Y, KOHATA H, TOMITA E, et al. Ka-band high data rate transmission tests for DRTS follow-on mission [C]// Proceedings of 29th AIAA International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC-2011). Nara, Japan: AIAA, 2011: 1-7.
- [11] ISRAEL D J, EDWARDS B L, WILSON K E, et al. An optical communications pathfinder for the next generation tracking and data relay satellite [C]// Proceedings of the 13th International Conference on Space Operations. Pasadena, CA: AIAA, 2014: 1-8.
- [12] EDWARDS B L, ISRAEL D J. A geosynchronous orbit optical communications relay architecture [C]// Proceedings of 2014 International Aerospace Conference. Big Sky, MT: IEEE, 2014: 1-7.
- [13] ISRAEL D J, EDWARDS B L, WHITEMAN D E. Mission concepts utilizing a laser communications and DTN-based GEO relay architecture [C]// Proceedings of 2013 International Aerospace Conference. Big Sky, MT: IEEE, 2013: 1-6.
- [14] LANGE R, HEINE F, MOTZIGEMBA M, et al. Roadmap to wide band optical GEO relay networks [C]// Proceedings of 2012 Military Communications Conference. Orlando, FL: IEEE, 2012: 1-5.
- [15] HEINE F, MÜHLNIKEL G, ZECH H, et al. The European data relay system, high speed laser based data links [C]// Proceedings of 2014 7th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference (ASMS) and 12th Signal Processing for Space Communications Workshop (SPSC). Livorno: IEEE, 2014: 284-286.
- [16] HEINE F, KÄMPFNER H, CZICHY R, et al. Optical inter-satellite communication operational [C]// Proceedings of 2010 Military Communications Conference. San Jose, CA: IEEE, 2010: 1583-1587.
- [17] SEEL S, KÄMPFNER H, HEINE F, et al. Space to ground bidirectional optical communication link at 5.6 Gb/s and EDRS connectivity outlook [C]// Proceedings of 2011 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT: IEEE, 2011: 1-7.
- [18] SEEL S, TROENDLE D, HEINE F, et al. Alphasat laser terminal commissioning status aiming to demonstrate GEO-relay for sentinel SAR and optical sensor data [C]// Proceedings of 2014 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Quebec City, QC: IEEE, 2014: 100-101.
- [19] SUZUKI K, INAGAWA S. JAXA-NASA interoperability demonstration for application of DTN under simulated rain attenuation [C]// Proceedings of the 13th International Conference on Space Operations. Pasadena, CA: AIAA, 2014: 1-13.
- [20] HOGIE K, CRISCUOLO E, DISSANAYAKE A, et al. TDRSS demand access system augmentation [C]// Proceedings of 2015 International Aerospace Conference. Big Sky, MT: IEEE, 2015: 1-10.
- [21] ISRAEL D J, DAVIS F, MARQUART J. A DTN-based multiple access fast forward service for the NASA space network [C]// Proceedings of 2011 Fourth IEEE International Conference on Space Mission Challenges for Information Technology. Palo Alto, CA: IEEE, 2011: 61-65.
- [22] SHAW H C, MCLAUGHLIN B, STOCKLIN F, et al. Applying a space-based security recovery scheme for critical homeland security cyberinfrastructure utilizing the NASA tracking and data relay (TDRS) based space network [C]// Proceedings of 2015 IEEE International Symposium on Technologies for Homeland Security (HST). Waltham, MA: IEEE, 2015: 1-6.

作者简介:



杨红俊 (1970—), 女, 湖北荆门人, 高级工程师, 主要从事军事电子系统工程情报研究工作。

YANG Hongjun was born in Jingmen, Hubei Province, in 1970. She is now a senior engineer. She is engaged in defense scientific intelligence research.

Email: yanghj@swiet.com.cn