

## 面向物联网业务的空天地一体网络多层架构研究

张少伟

(中国电信股份有限公司研究院, 北京 102209)

**摘要:** 为了满足全球全面的三维覆盖和在将来随时随地访问的长期需求,作为理想网络架构的空天地一体化网络(SAGIN)已成为当今世界的重要研究方向。基于未来通信中的典型业务场景,首先分析了 SAGIN 的网络架构和组成,并介绍了实现 SAGIN 的关键技术。最后,对 SAGIN 的后续研究方向进行了展望。

**关键词:** 6G; 空天地一体网络; 物联网

**中图分类号:** TN929.5

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16157/j.issn.0258-7998.211764

**中文引用格式:** 张少伟. 面向物联网业务的空天地一体网络多层架构研究[J]. 电子技术应用, 2021, 47(6): 6-9.

**英文引用格式:** Zhang Shaowei. A multi-layer architecture study of the space-air-ground integrated network for the IoT services[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(6): 6-9.

## A multi-layer architecture study of the space-air-ground integrated network for the IoT services

Zhang Shaowei

(China Telecom Research Institute, Beijing 102209, China)

**Abstract:** In order to meet the long-term requirements of global comprehensive three-dimensional coverage and access anytime, anywhere in the future, the space-air-ground integrated network(SAGIN) as an ideal network architecture has become an important research direction in recent years. The paper describes some typical business scenarios in future communications, analyzes the network architecture and composition of SAGIN, and studies the key technologies to realize SAGIN. Finally, it points out some of the research directions of SAGIN.

**Key words:** 6G; space-air-ground integrated network(SAGIN); Internet of Things(IoT)

## 0 引言

空天地一体化网络(Space-Air-Ground Integrated Network, SAGIN)利用现代信息网络技术将空间、天空和地面网络部件相互连接起来,引起了学术界和工业界的广泛关注。SAGIN 具有覆盖范围大、弹性强、吞吐量高等优势,能够用于智能交通系统(Intelligent Transportation Systems, ITS)<sup>[1]</sup>、军事任务、救灾<sup>[2]</sup>、地球观测测绘等实践领域。特别是卫星可以提供与农村、海洋和山区的无缝连接,空域网络可以增强服务需求高的地区的覆盖能力,密集部署的区域系统可以支持高数据速率访问。这些网段的整合将为未来的 5G 乃至 6G 通信和业务开展带来诸多好处。

SAGIN 作为一个多维 6G 网络,集成了多个不同的网段,或者将不同的通信协议用在不同的网段上,以达到高可靠性、高吞吐量的数据传输效果。与传统的卫星或地面网络不同,SAGIN 同时受到移动性管理、功率控制、流量分配、负载均衡、频谱分配、路由调度和端到端 QoS 要求这 3 个限制的影响。因此,考虑到各个网段的

各种实际网络资源约束,网络设计者需要实现端到端数据传输的最佳性能。然而,在由各种通信系统组成的特定异构网络(Heterogeneous Network, HetNet)中,利用有限的网络资源很难获得最佳的信息交换性能,尤其是不同网段之间的互操作性。因此,SAGIN 的网络设计和系统集成具有重要意义。

## 1 业务场景

## 1.1 普遍业务

长期以来,中国政府高度重视农村地区扶贫开发和可持续发展,把电信普遍服务作为打赢脱贫攻坚战、实施乡村振兴战略、建设网络强国的重要举措之一全力推进。自 2015 年底电信普及服务试点实施以来,通过地面网络实现电信普遍服务显示出了成本高、收入低的问题,非地面网络成为提高普遍服务价值、降低建设成本的重要手段。

## 1.2 应急救援

应急救援是通信网络中最常用的场景,国内运营商目前都配备大量的卫星应急通信车辆,以用来进行应急

救援行动。近些年,随着无人机的快速发展,在无人机上搭载基站可轻松部署在灾区上空,提供应急通信。未来,低轨卫星网络和高空平台基站拥有更大的覆盖范围,能够在灾后区域快速恢复通信。

### 1.3 多样化通信服务

随着移动通信系统应用的全面普及,手机已经深入人们生活中。由于航班客机和海上游轮离地面基站覆盖范围较远,无法进行通信,目前大多数使用卫星来实现舱内通信。然而,由于目前高轨卫星通信的延迟和速率远远不能满足用户的需求,用户无法获得良好的使用体验。基于边缘计算的空地一体网络与小型基站相结合,将可为机舱和船舱中旅客提供多样化的通信服务,如视频点播、游戏等。

## 2 SAGIN 网络体系结构

如图 1 所示,SAGIN 主要由空间、天空和地面三部分组成。这 3 个网段可以独立工作,也可以相互操作,通过集成 3 个网段之间的异构网络,可以很容易地构建分层的宽带无线网络。

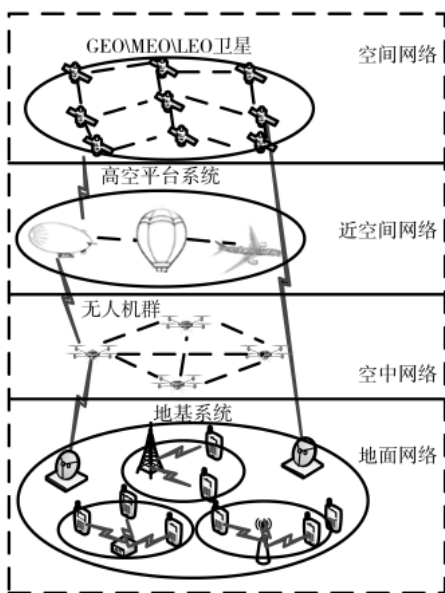


图 1 天地一体化网络体系结构

### 2.1 空间网络:卫星

空间网络由卫星、卫星系统及其相应的地面基础设施(如地面站、网络操作控制中心)组成。这些卫星运行在不同的轨道上,具有不同的特点。根据高度不同,卫星可分为三种:高轨卫星、中轨卫星和低轨卫星<sup>[2]</sup>。根据卫星网络的信道带宽,将其分为窄带和宽带。

窄带卫星网络是指向全球用户提供语音和低速率数据服务的 MEO/LEO 卫星系统,如 irises、Global Star 等。

宽带卫星网络可以以宽带频率携带大量数据。它可以提供高达 10 Gb/s 的高速数据传输速率<sup>[3]</sup>,预计到 2020 年的容量将达到 1 000 Gb/s<sup>[4]</sup>。

多层卫星网络是由多个卫星网络集成而成,具有分层结构,MLSNs 是下一代卫星网络的实用架构<sup>[5]</sup>。包含多种类型的链路,如卫星间链路和层间链路(Inter-Layer Links, ILL)。

一个典型的卫星通信系统主要包括 3 部分:地面、空间段和空间对地面链路<sup>[6]</sup>,如图 2 所示。地面部分一般包括各种信息站、卫星测控中心,以及相应的卫星测控网、测控网、测控中心。

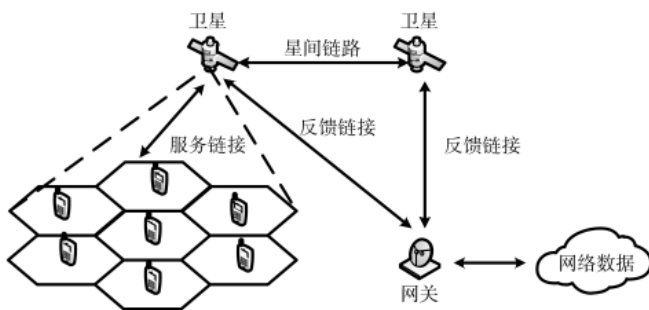


图 2 卫星通信网络图

目前,卫星主要有高轨道卫星、中轨道卫星、低轨道卫星 3 种类型。高轨道卫星单星覆盖,覆盖范围相对于地面固定,一颗单星可以覆盖多达 42% 的地球面积,一般来说,3~4 颗卫星就可以完成对极地地区的全球覆盖。高轨道卫星正在向高通量发展,利用 Ka 频段丰富的频谱资源和多波束倍频技术,提高卫星频率利用的数据吞吐量。

中轨道卫星的单星覆盖面积比高轨道卫星小得多,轨道高度为 2 000 公里~20 000 公里的中轨道卫星约占地球表面积的 12%~38%。需要十几颗到几十颗卫星组成星座,才能完成全球覆盖。中轨卫星的设计旨在提供高带宽、低成本、低延迟的卫星互联网接入,费用为 12 亿美元,传输延迟约为 150 ms,系统容量高达 15 Gb/s。

低轨道卫星成本低、覆盖范围小,需要多颗卫星组成大型卫星星座,才能完成全球覆盖。星座设计的总容量为几十 Tb/s。低轨道卫星的轨道高度低于 2 000 公里,由于轨道高度较低,传输延迟较小,通常约为 30 ms。

### 2.2 近地空间网络:HAPS

航空网络是以飞机为载体进行信息获取、传输和处理的航空移动系统。船舶和气球是高空平台系统(High-Altitude Platform Systems, HAPS)的主要基础设施,提供宽带无线通信以补充地面网络。与地面网络基站(BSs)相比,航空网络成本低、易于部署、覆盖范围广,提供区域性的无线接入。

近年来,许多研究成果证明在未来的无线通信网络中,HAPS 技术具有可行性。尽管能量供给被认为是 HAPS 研究中的一个关键问题,太阳能与储能相结合方式被认为是为 HAPS 系统提供能量的主要手段,因为它们具有适于固定太阳能电池板膜的大表面特点。此外,

与新兴的卫星网络相比,HAPS 具有低延迟的特点,可以直接向地面网络用户提供无线服务。

HAPS 系统因其潜在的优势而越来越受到人们的青睐。便携式数据中心、智能信号增强器、机载宏基站和机器学习平台的时代已经到来,这些平台可以为大量货运无人机和飞行汽车做出智能决策。在郊区以及人口密集的城市,这些设备具备一定的通用性。相应的框架总结如下:

(1)作为一个大型的智能实体,HAPS 层可以实现卫星之间快速、可靠、高效的长距离通信,而无需安装数百万个地面和海上中继站。它还可以作为分布式数据中心,记录卫星的轨道路径,监测联合预警,计算卫星之间的碰撞可能性。及时向不同的卫星公司提供这些信息,对于维持卫星星座的功能至关重要。同时,卫星还有助于 HAPS 层提升切换性能。

(2)HAPS 层通过提供边缘智能、卸载繁重计算、处理大规模传感和监视来管理无人机(Unmanned Aerial Vehicles, UAV)群体的机动性,以利于货物交付和监视系统等应用场景。该通信平台有望顺利处理各种通信需求,如超可靠低延迟通信(Ultra-Reliable Low-Latency Communication, URLLC)和增强的移动宽带通信。

HAPS 层为城市、郊区和偏远地区提供快速互联网接入和无线通信服务,如物联网和分布式机器学习,从而减少对地面和卫星网络的依赖。

### 2.3 空中网络:中低空无人机

单无人机网络已经广泛应用于军事、民用和公共领域<sup>[7]</sup>。一个单一的卫星通信跳(或双跳)提供在前向链路上的命令和控制,同时监视产品和无人机参数(例如,使用寿命、剩余燃料供应、位置和高度)在返回链路上同时交付。单无人机网络拓扑结构简单,仅由一个无人机和一个/多个地面节点组成。此外,单无人机网络由于其通信拓扑结构简单而得到了广泛的应用。

多无人机网络的分布式处理能力是利用多无人机网络的主要原因之一。具体来说,它们将分别搜索一些可疑目标,并通过协作通信共享信息。此外,配备收发器的无人机可以作为一个空中基站,以扩大通信覆盖和提高网络容量。除了作为移动中继或飞行基站,无人机可以作为移动云和雾计算系统,无人机安装的云/雾为移动终端提供低延迟应用卸载机会<sup>[8]</sup>。无人机还可以使雾计算提供高质量的流媒体,通过附近的无线代理和接入点移动用户。同时,多无人机网络在生存性和可靠性方面都具有优势。尽管多无人机网络在许多方面具有优势,但它增加了无人机通信网络的复杂性。

### 2.4 地面网络:蜂窝网络

地面网络主要由地面通信系统组成,如蜂窝网络、移动自组织网络(Mobile Ad Hoc Networks, MANET)<sup>[9]</sup>、全

球互操作性微波接入(Worldwide Interoperability for Microwave Access, WiMAX)<sup>[10]</sup>、无线局域网(Wireless Local Area Networks, WLAN)等。特别是蜂窝网络已经从第一代(1G)发展到第二代(2G)和第三代(3G),在第四代(4G)或高级长期演进(Advanced Long-Term Evolution, LTE-A)<sup>[11]</sup>之后,现在正发展到 5G 无线网络,以支持各种业务。在标准化方面,第三代合作伙伴项目(the Third Generation Partnership Project, 3GPP)已经制定了一套蜂窝/移动网络的规范。

## 3 关键技术难题

一体化网络的核心是对原有多系统网络的融合。其中一个想法是将地面移动技术应用于非地面网络中,届时空口将面临以下关键技术挑战。

### 3.1 频谱管理

天地一体化网络频谱工程方面有:为 MSS 寻找新的频谱、在 FSS 频段为 NGSO/ESIM 新增划分、为 HAPS 进行频率扩展(从 2.7 GHz 以下扩展到 7 GHz)、为 WRC-27 寻找 ATG 议题等研究。

(1)频率共享和干扰消除。与现有的独立通信网络相比,未来通信网络空中链路会更加复杂多样化,同时每条链路对数据速率拥有较大的需求,对频谱资源的需求也随之增加。面对有限的频谱资源,需要考虑智能高效的频率共享和干扰消除方法。

(2)高延迟和高多普勒频移。空间地面通信链路距离长达数千至数万公里量级,远超地面蜂窝移动通信基站的间距,导致不可避免的高时延<sup>[12]</sup>。此外,如低轨卫星和飞机等接入节点的快速移动,会导致更严重的多普勒频移。因此,要解决上述问题,必须克服许多短线技术问题,如双工问题、功率控制、参考信号设计、定时提前调整、相位跟踪参考信号、下行初始同步、周期前缀、峰值平均功率比、HARQ、MAC/RLC 层处理等问题。

### 3.2 网络接入与交换

与地面通信网相比,卫星通信网络单星容量小,总体容量有限。由于低轨卫星运动速度快,每颗卫星的服务时间只有几十秒,在一次操作中可能还包括多颗卫星的切换。卫星系统的切换分为同一卫星内波束之间的切换和不同卫星波束之间的切换以及地面站之间的切换。此外,还涉及空中、天空和地面等不同通信系统之间的切换。为了保证用户通信体验,需要设计合适的用户接入和切换策略,包括为用户选择合适的卫星波束和合适的卫星信道。

### 3.3 无线信道传输

地面移动通信技术应用于非地面网络需要满足高海拔和空间对地面的覆盖需求。与传统卫星相比,大容量卫星和低轨卫星的覆盖范围也发生了变化,采用点波束多路覆盖,非地面网络接入站点的天线波束分配和射频技术需要重新设计。此外,还需要考虑多普勒频移补



偿、同步、调制、编码、多址、射频性能和多天线/多波束天线等问题。

### 3.4 网络相关技术

网络方面,需要考虑天基网络协议、星对地融合(随机接入管理、星对地交换)、移动性管理(星内波束交换、星间交换、星间交换)等相关技术。

### 4 结论

SAGIN 是一种能够很好地满足未来通信需求的网络结构,它集空间卫星网络、近空间网络、空中网络、地面网络于一体,未来还将与海洋网络集成。本文详细介绍了 SAGIN 的网络结构,并对每一层网络组件进行了分析。然后,研究了 SAGIN 网络实现的一些关键技术。这些关键技术包括无线频谱管理、网络接入和交换、无线信道传输和网络相关技术。SAGIN 网络具有明显的覆盖优势和远程通信优势,可以扩大通信网络的业务范围和运营商的通信业务领域。

### 参考文献

- [1] XIONG G, ZHU F, DONG X, et al. A kind of novel ITS based on space-air-ground big-data[J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2016, 8(1): 10-22.
- [2] CASONI M, GRAZIA C, KLAPEZ M, et al. Integration of satellite and LTE for disaster recovery[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(3): 47-53.
- [3] FARSEROTU J, PRASAD R. A survey of future broadband multimedia satellite systems, issues and trends[J]. IEEE Communications Magazine, 2000, 38(6): 128-133.
- [4] GHARANJIK A, SHANKAR B, ARAPOGLOU P D, et al. Multiple gateway transmit diversity in Q/V band feeder links[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(3): 916-926.
- [5] NISHIYAMA H, TADA Y, KATO N, et al. Toward optimized

traffic distribution for efficient network capacity utilization in two-layered satellite networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(3): 1303-1313.

- [6] CHANDRASEKHARAN S, GOMEZ K, AI-HOURANI A, et al. Designing and implementing future aerial communication networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(5): 26-34.
- [7] SI P, YU F R, YANG R, et al. Dynamic spectrum management for heterogeneous UAV networks with navigation data assistance[C]. Wireless Communications & Networking Conference. IEEE, 2015.
- [8] 杜耀. 基于无人机的移动边缘计算资源分配算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [9] CONTI M, GIORDANO S. Mobile ad hoc networking: milestones, challenges, and new research directions[J]. Communications Magazine IEEE, 2014, 52(1): 85-96.
- [10] AALAMIFAR F, LAMPE L, BAVARIAN S, et al. WiMAX technology in smart distribution networks: architecture, modeling, and applications[C]. 2014 IEEE PES T&D Conference and Exposition. IEEE, 2014.
- [11] DEMESTICHAS P, GEORGAKOPOULOS A, KARVOUNAS D, et al. 5G on the Horizon: key challenges for the radio-access network[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2013, 8(3): 47-53.
- [12] 彭耿, 黄知涛, 李强, 等. 中低轨卫星信号的多普勒频移估计与补偿[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(2): 256-260.

(收稿日期: 2021-05-17)

### 作者简介:

张少伟(1992-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 6G 天地一体化、频谱兼容性分析等。



扫码下载电子文档

(上接第 5 页)

- [32] GUAN X, WU Q, ZHANG R. Intelligent reflecting surface assisted secrecy communication: is artificial noise helpful or not?[J]. arXiv: 1907.12839, 2019.
- [33] XU D, YU X, SUN Y, et al. Resource allocation for secure IRS-assisted multiuser MISO systems[J]. arXiv: 1907.03085, 2019.

(收稿日期: 2021-01-18)

### 作者简介:

李刚(1978-), 男, 硕士, 副高级工程师, 主要研究方向: 无线通信技术。

王瑜新(1980-), 通信作者, 男, 博士研究生, 副高级工程师, 主要研究方向: 5G/6G 通信标准, E-mail: scutwyx@126.com。

章秀银(1978-), 男, 博士, 正教授, 主要研究方向: 无线通信技术。



扫码下载电子文档

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所