

空天地一体化网络技术展望

Prospects for the Air-Space-Ground Integrated Network Technology



田开波 /TIAN Kaibo^{1,2}, 杨振 /YANG Zhen^{1,2}, 张楠 /ZHANG Nan^{1,2}

(1. 移动网络和移动多媒体技术国家重点实验室, 中国 深圳 518057;

2. 中兴通讯股份有限公司, 中国 深圳 518057)

(1.State Key Laboratory of Mobile Network and Mobile Multimedia Technology, Shenzhen 518057, China;

2. ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

摘要: 作为实现全球网络无缝覆盖的重要手段,空天地一体化是未来移动通信的重要愿景之一。简要回顾了地面无线移动通信和卫星通信的发展历史,论证了空天地一体化网络技术研究的必要性,并首次定义了网络融合发展的不同层次。随后针对空天地一体化网络中的网络架构、关键技术、融合终端 3 个方面,展望了未来网络融合的演进。

关键词: 融合通信网络;非地面网络;地面网络;未来无线通信系统

Abstract: As an important means to achieve seamless global coverage, the integration of Air-Space-Ground-based wireless network is one of the important visions of future mobile communication. The development history of ground wireless mobile and satellite communication is briefly reviewed, the necessity of network technology integrating space and ground is demonstrated, and the different levels of network integration development are defined for the first time. Finally, the prospect of the development of a future integrated network is proposed on three aspects including network architecture, key technology, and terminal.

Keywords: integrated communication system; non terrestrial network (NTN); terrestrial network (TN); future wireless communication system

DOI: 10.12142/ZTETJ.202105002

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20210923.1530.002.html>

网络出版日期: 2021-09-24

收稿日期: 2021-08-20

1 空天地一体化网络发展背景

19 世纪 30 年代以来,随着法拉第电磁感应、电磁场理论等物理基础理论研究的出现,科学先驱们发明了电报、电话等通信方式,这使得人与人之间之间的沟通方式发生了根本性的变革。此后,随着陆地无线移动通信系统和卫星通信系统的蓬勃发展,无线通信也逐步应用于人类生产、生活的各个方面。多年来,两类系统各自发展,虽然取得了巨大的成功,但面对愈加复杂多样的通信场景和需求,也遇到

了发展瓶颈。因此,空天地一体化融合通信成为了未来网络发展和应用的重要趋势之一。

1.1 无线移动通信

陆地无线移动通信主要以蜂窝移动通信系统为代表。从 20 世纪 80 年代开始,该技术至今已经发展到第 5 代,也就是 5G。如图 1 所示,1G 采用模拟语音调制技术和频分多址技术,能够提供语言通信,但由于无法漫游,只能作为区域性的通信系统。从 2G 开始,通信系统中不断采用更加先

进的数字通信技术,在为个人提供语音通信的同时,提升了服务数据传输业务的能力。其中,4G 系统随着正交频分复用 (OFDM) 和多输入多输出 (MIMO) 技术的引入,网络提供数据、视频等高速率的移动宽带业务的能力得到大幅提升。与此同时,前 4 代移动通信系统主要是面向以人为中心的场景,解决人与人之间的通信;而 5G 系统的发展,则是将网络应用从面向人扩展到面向人和物,从而实现了万物互联,成为促进经济社会数字化的重要引擎。



▲图1 无线移动系统的发展过程

1.2 卫星通信

从概念上来看，卫星通信指地球上（包括地面和低层大气中）的无线电通信设备利用卫星作为中继而进行的通信。卫星通信的起源可以追溯至 1945 年英国科学家提出的利用同步卫星进行全球无线通信的设想。直到 1958 年，人们才将第一颗通信试验卫星“斯科尔”号送入太空。卫星通信虽然具有通信覆盖范围大、部署机动灵活、不受地形地貌灾害的影响等优点，但其技术门槛很高，因此全球仅有少数国家开展该类系统的研究，且各自保持技术独立。传统卫星通信由于其较高的成本和受限的能力，导致商用市场规模相对较小，网络的发展更迭相对缓慢。在此过程中，传统卫星通信也借鉴了地面移动通信的经验和技术，通过欧洲电信标准化协会（ETSI）制定了 3 种卫星通信标准（如表 1 所示），但仍未能改变其以私有的技术体制为主的特点，现有的卫星系统仍然无法通用。

1.3 星地融合

陆地无线通信经过近 30 年的发

展，已在全球大多数地区形成了较为完善的网络覆盖，为全球 80% 的人口提供移动通信服务；但受制于经济成本、技术、自然条件等因素，在人口密度低的偏远地区以及沙漠、森林、海洋等区域，地面无线和有线网络目前无法进行有效覆盖。而这些问题恰

恰是卫星通信的优势所在，因此，星地融合发展可以有效解决陆地无线移动通信所面临的瓶颈。与此同时，卫星通信又可以解决传统卫星通信中由技术体制不同和系统封闭性所带来的研发和使用成本居高不下、市场推广难等问题。尤其是随着卫星通信技术的发展，卫星的单星服务能力和数量得以有效提高，服务的业务场景和部分技术指标也与地面移动通信越来越接近。这些均使星地深度融合的紧迫性进一步加强。

现阶段，传统的卫星通信已经可以为地面网络提供干线传输和回程业务，如图 2 所示。随着技术的发展，未来星地融合将会分为不同的融合层次（具体如图 3 所示），并最终实现体制和系统的融合。近年来，为了推动这一目标，第 3 代合作伙伴计划（3GPP）等国际组织基于 5G，从应用场景、网络以及空口技术等维度展开了相关工作^[1]。例如，以 Thales 为代表的卫星制造商积极参与 3GPP 的标

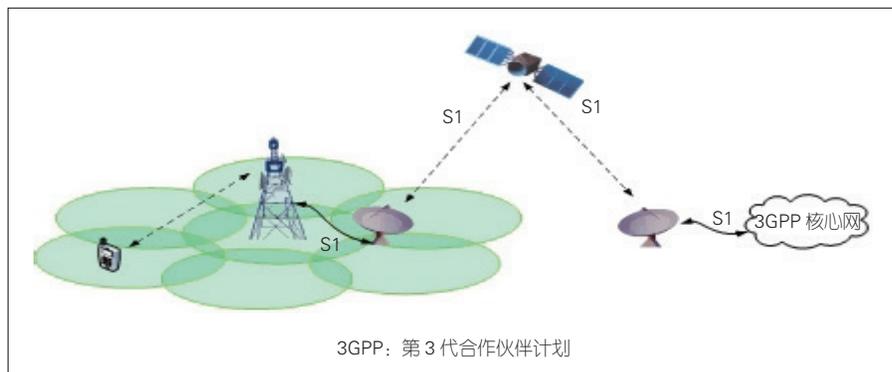
▼表1 ETSI 的卫星通信标准

标准名	特点
DVB-S/S2/S2X	卫星数字视频广播标准，使用单载波通信系统，主要用于电视转播、视频广播等数据服务以及语音通信
GMR-1	以地面 2G 标准 GSM/GPRS/EDGE 为基础制定 3 个版本的卫星移动通信标准，支持接入地面核心网
S-UMTS	以地面 3G 标准 WCDMA 为基础制定的卫星 - 通用移动通信标准，支持接入地面核心网

DVB-S: 数字卫星电视系统
EDGE: 增强型数据速率 GSM 演进
ETSI: 欧洲电信标准化协会

GMR: GEO 移动无线接口
GPRS: 通用分组无线服务
GSM: 全球移动通信系统

S-UMTS: 卫星 - 通用移动通信系统
WCDMA: 宽带码分多址



▲图2 浅层次的融合模式

准工作^[2]，在 Rel-15 阶段，成功推动了非地面网络（NTN）的研究立项^[3]，并在 Rel-16/17 阶段持续进行研究。与此同时，2019 年芯片厂商 MediaTek 也推动 Rel-17 中窄带物联网 NTN（IoT-NTN）相关技术标准的研究^[4]。按照计划，3GPP 将于 2022 年发布第 1 版的 NTN 通信标准。

总体来看，当前关于星地融合标准化研究主要是以地面通信标准为基础，并结合卫星通信传播的技术特点做出适应性改进。但随着未来网络的演进，为了能够更好地实现深度融合，进一步的增强设计是不可或缺的。

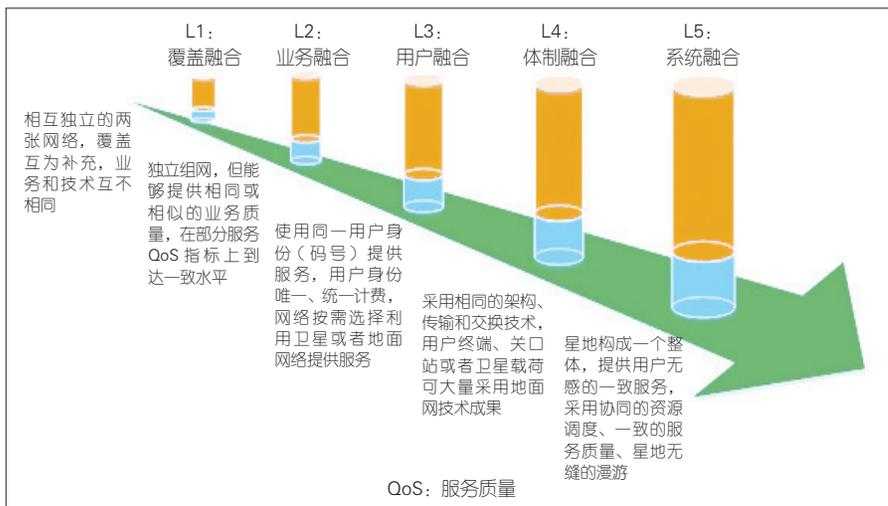
2 空天地一体化系统侧演进

空天地一体化是未来网络实现全球无缝覆盖的必由之路，也将是由多种异构网络混合而成的复杂网络。本章中，我们将主要从系统侧来介绍空天地一体化在网络架构和关键技术两方面的演进方向。

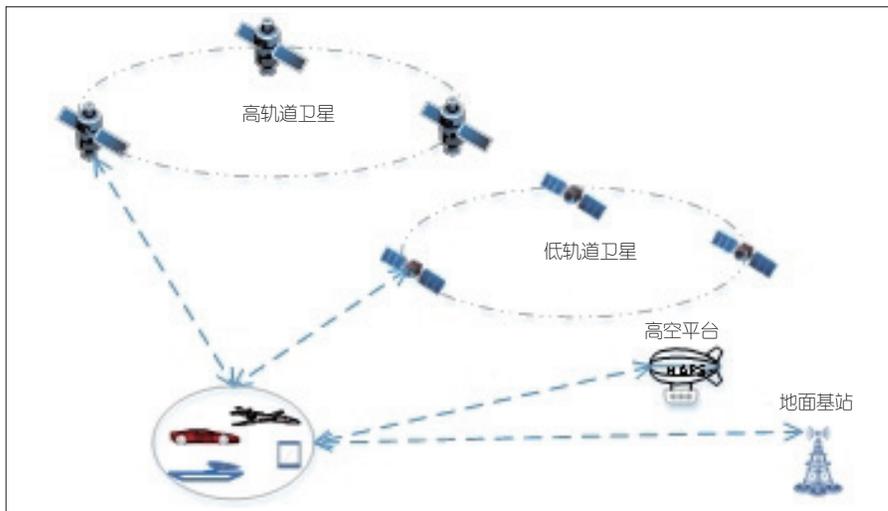
2.1 网络架构演进

在现阶段的卫星通信网络中，星侧的通信功能相对比较简单，比如缺乏基带信号处理能力或不具备星间链路。因此，在未来的网络建设中，如果卫星仍然只采用透明转发模式，将导致系统严重依赖地面信关站的建设，无法有效构成支撑广域高效通信的多层网络。

未来空天地一体化网络架构演进的前提是卫星平台能力的增强。例如，当卫星具有基带信号处理能力和星间链路时，数据可以在卫星间传递转发，网络架构也将由单层次网络向多层次网络演进，如图 4 所示。随着各类平台的发展，网络的系统侧节点可能会包括不同轨道高度的卫星、位于平流层的高空平台以及地面上的基站。其中，位于不同层次的网络节点可以通



▲图 3 星地融合层次



▲图 4 多层次网络架构

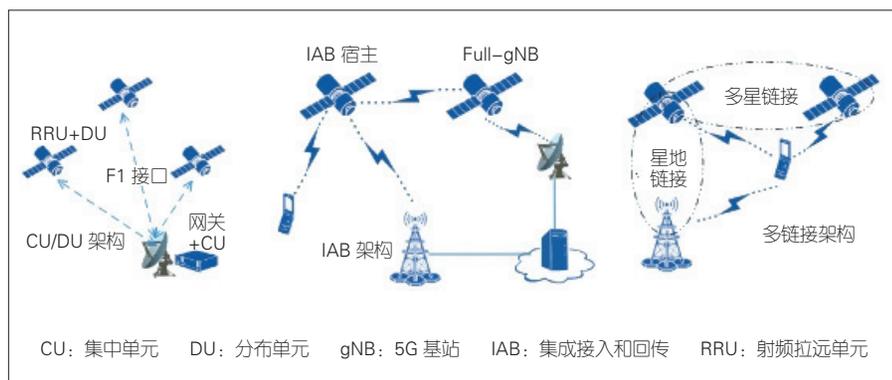
过标准化的无线空口技术进行互联互通，以承担不同的网络功能。例如，低轨道的卫星和地面基站分别作为天基和地基的接入网，高轨道的卫星作为天基骨干网，两者共同构建一个多层次的融合网络。根据网络中各系统节点能力及网络功能的不同，可以构成多种不同的接入网络架构，如图 5 所示。

未来融合网络核心网的结构和部署也是灵活多样的^[5]，如图 6 所示。其中，NTN 回传结构是指，NTN 网络作为地面无线接入网到地面核心网的无线回传网络；核心网共享结构是指，地面网络（TN）和 NTN 各自拥有独

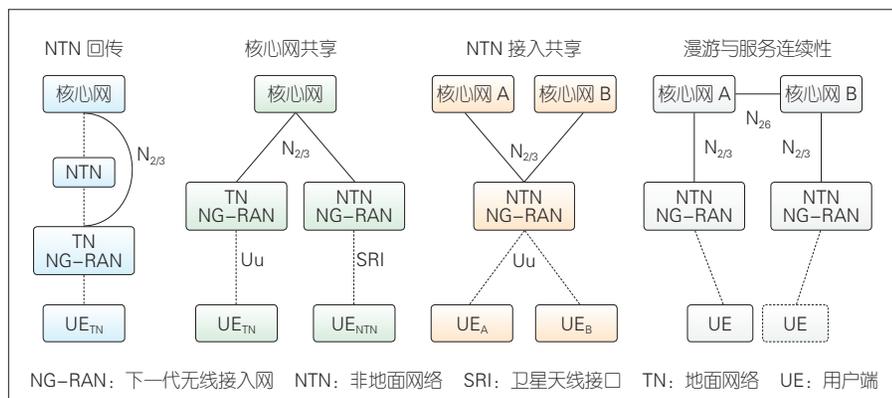
立的接入网，但共享同一个核心网；NTN 接入共享结构是指，拥有不同核心网的运营商可以共享 NTN 无线接入网；漫游与服务连续性部署结构是指，同一多模终端从 TN 网络漫游到 NTN 网络或从 NTN 网络漫游到 TN 网络，可以通过各自核心网之间的 N26 接口，支持漫游终端的服务连续性。

2.2 关键技术演进

地面无线移动通信系统和卫星通信系统发展了数十年，其应用环境和技术体制各不相同。为了实现统一的技术体制下的融合系统，我们需要在一些关键技术方面做深入研究。



▲图5 灵活的接入网络架构



▲图6 灵活的核心网网络架构

(1) 极简接入

接入网络是用户享受网络服务的第1步。然而，地面通信场景和卫星场景差异大。在卫星场景下，星地超远传输链路的长延时、卫星高速移动导致的大多普勒频移等因素，对接入和同步设计带来了很大挑战。面向天地一体化网络，为有效降低处理时延，提高用户体验，需要进一步优化随机接入过程，设计新的可以抵抗大频偏的接入序列^[6]，并在上行传输定时提前机制、时频偏估计与补偿方案等方面进行改进。

(2) 高效联合传输机制

在未来天地一体化网络中，卫星可能是数千颗甚至数万颗，这将会在地面形成多重覆盖的场景，不同卫星之间会相互干扰对方的数据传输，进而影响系统的能量效率和频谱效率。这就需要多星协作或星地协作下的高

效联合传输机制，以减少多重覆盖下的干扰问题，提升系统的资源效率。此外，未来的卫星将承载地面基站的部分或全部功能，数据的处理都在卫星侧。这样可以减少对地面的依赖，缩短调度的时延，为联合传输的实现提供了更加有力的条件。

(3) 新波形与多址接入

针对未来星地融合更广泛的部署场景需求及更高的频谱效率需求，人们需要研究抗大时延与频偏的高鲁棒性波形设计，并根据目标场景和业务的不同，灵活选择子带带宽、子载波间隔、滤波器长度和循环前缀等系统参数，实现统一兼容的波形框架设计。此外，卫星物联网也是未来空天地一体化的重要应用场景。需要引入基于非正交的传输技术，同时实现免调度技术。也就是说，终端一旦有数据传输需求，就可以直接将数据发给卫星，

不需要卫星的授权或调度，免去了交互流程所致的开销，从而可以取得非常高的时效和谱效。

(4) 移动性管理

低轨道卫星是天地一体化网络的重要节点。卫星移动速度高达7 km/s以上，每个星波束服务用户的时长可能只有几十秒，这将会导致频繁的波束切换。整网用户的频繁切换将会给系统带来无法承受的信令开销，对用户服务的连续性带来极大影响。因此人们需要研究星地融合统一的移动性管理方案及切换策略，简化切换流程，降低信令开销，提高切换可靠性。切换的场景可能包括相同卫星的星内波束切换、不同卫星的星间波束切换或多连接情况下不同星地通信系统之间的切换等。

(5) 频谱管理

频谱资源是无线通信系统的命脉，而新一代移动通信技术的产生必然带来新的频谱需求。在无线通信系统的演进的过程中，为了维护网络服务的连续性和经济性，新旧系统网络会长期并存，且旧系统的频谱短时间内不会释放，这就增加了新一代通信网络频谱选择的困难性。为了满足未来6G通信传输速率需求，除了增加新的频谱（如太赫兹和可见光），还需要在频谱管理方面进行研究，具体包括：频谱重耕，为新一代的通信系统提供更多的低频段可用频谱资源；动态频谱共享技术^[7]，以感知无线电技术为基础，使异系统间或同系统异设备间可以共享同一段授权或非授权频谱，以解决固定频谱分配策略带来的频谱闲置和利用率不高的问题；提升频谱效率的物理层技术，如能够减少带外泄露的新波形调制技术、非正交多址技术、超大规模智能天线技术等。

(6) 人工智能（AI）

天地一体化网络是一个多层次的

异构网络，网络节点多，网络结构复杂。引入 AI 可以灵活地规划和改变网络的拓扑结构，实现网络拓扑结构的按需部署和优化，从而使网络能够自我管理、自我演进；更加合理地调度网络的软硬件资源，实现网络算力高效的利用；提升接入网侧的性能，能够自主感知学习传输环境的特性和变化，智能地决策不同终端的接入方式；在底层，还可以应用于联合参数优化、信道质量的预测、智能编解码方案的选择、波束间的干扰管理以及波束间的切换策略等。

3 空天地一体化终端侧发展

终端是无线通信系统中必不可少的一部分。在未来天地一体化通信网络中，终端的演进主要体现在形态和平台能力两个方面。

传统的无线移动通信终端主要是手持式的，最常见的就是手机；而传统卫星网络的终端形态通常分为手持式和甚小口径终端（VSAT）式，且其形态和终端的能力与业务类型有着密切的关系。手持式的卫星终端受尺寸、天线增益以及功率的影响，通常工作在 1~2 GHz 的频段上，仅提供语音通信和低速率数据传输等移动卫星业务；VSAT 式的卫星终端在尺寸功耗等方面受限制较小，能够使用 3 GHz 以上的频率，且提供中高速数据传输和广播业务等移动卫星业务和固定卫星业务。

在未来天地一体化通信网络中，终端的形态可能有 3 种，移动通信手持终端（即传统移动通信终端和卫星手持终端的融合）使用相同的空口技术及标准化频段；VSAT 式终端以车载、船载和机载模式存在，拥有一体化的设计，可以集成不同的频段、不同的天线，甚至可以支持多种技术的协议栈，因此可以进行灵活的扩展；物联网终端的关键

在于体积和功耗。

终端平台的能力有 4 个特点：（1）通信处理能力的增强。一体化终端的通信技术是与系统的技术相匹配的，系统新技术的引入会带来处理的复杂度，这需要融合终端能够处理更复杂的通信协议栈，以适应不同的应用场景接入不同的网络。（2）感知能力的增强。未来融合终端不仅仅是用于通话、上网和视频等消费需求，还会集成各种传感器来采集外部的环境信息并提供给网络，从而进行大数据分析应用；也可以采集个人的生理信息，实时监测身体状况等。（3）算力能力增强。终端感知能力的引入使得终端可以获取大量的数据，这需要终端在数据处理能力有所加强，以便能够及时有效地进行数据分析，减轻网络传输、处理海量数据的压力，并能及时将数据转变为有用的信息服务于用户。

（4）AI 能力的增强。终端获取的数据很多是语音、图像、视频等，而近年来 AI 被广泛用于语音、图像、视频识别等方面，因而未来的融合终端也需要具备较强的 AI 能力。

4 结束语

当前，B5G/6G 的研究工作正在如火如荼地进行。空天地一体化网络作为未来网络发展的重要特征，已是业内共识。通过地面网络和卫星网络的融合发展，可以解决各自发展所面临的瓶颈问题，并完成立体化通信网络的构建，进而真正实现在任何时间、任何地点与任意一方通信的美好愿景。空天地一体化网络的研究处于初始阶段，尚存在许多关键性问题需要解决。本文中，针对网络架构、系统关键技术以及终端 3 个方面，我们提出了技术演进的方向，希望能与学术界、产业界一起共同推动相关的技术研究。

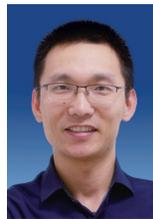
致谢

本研究得到了中兴通讯股份有限公司算法部部长胡留军、架构总经理段向阳、技术总监朱清华和方敏博士的技术指导和帮助，在此谨致谢意！

参考文献

- [1] 3GPP. Service requirements for the 5G system; stage 1 (Release 15) [R]. 2019
- [2] Thales. Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN) [R]. 2019
- [3] 3GPP. Study on New Radio (NR) to support non-terrestrial networks (Release 16) [R]. 2019
- [4] MediaTek Inc. New study WID on NB-IoT/eTMC support for NTN [R]. 2019
- [5] 田开波, 方敏. 从 5G 向 6G 演进的三维连接 [J]. 移动通信, 2020, (6), 96-103
- [6] ZHANG C, CAO W, YANG Z, et al. Random access preamble design for large frequency shift in satellite communication [C]//IEEE 5G World Forum (5GWF). Dresden, Germany: IEEE, 2019: 659-664
- [7] 李妍, 范筱, 黄晓明, 等. 面向未来的陆海空天融合通信网络架构 [J]. 移动通信, 44(6): 104-115

作者简介



田开波, 中兴通讯股份有限公司技术预研资深专家; 主要从事无线通信系统技术预研及标准化研究工作, 目前负责空天地海一体化技术预研工作; 先后参与 4G/5G 移动蜂窝网以及 IEEE 802.11ac/ah/aj/ax 等 WLAN 系列标准的制定; 发表论文 5 篇, 申请专利 40 余项。



杨振, 中兴通讯股份有限公司算法部技术预研高级工程师; 长期从事无线通信系统关键技术研发、标准化与专利保护工作, 目前负责 NTN 相关的技术研究工作; 申请专利 10 余项。



张楠, 中兴通讯股份有限公司技术预研高级工程师; 主要从事标准预研工作, 研究方向包括无线信道建模、NOMA、MIMO、NTN 通信网络、超材料及应用等; 发表论文 5 篇, 申请专利 40 余项。