

面向6G的多星MIMO 协同传输技术

Multi-Satellite MIMO Cooperative Transmission Technology for 6G

杨 帅^{1,2}, 缪德山^{1,2}, 孙韶辉^{1,2} (1. 中信科移动通信技术股份有限公司, 北京 100083; 2. 中国信息通信科技集团有限公司无线移动通信国家重点实验室, 北京 100083)

Yang Shuai^{1,2}, Miao Deshan^{1,2}, Sun Shaohui^{1,2} (1. CICT Mobile Communication Technology Co., Ltd., Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Wireless Mobile Communications, China Information and Communications Technology Group Co., Ltd., Beijing 100083, China)

摘 要:

传统低轨卫星传输受卫星能力的限制,其频谱效率已无法满足日益增长的通信容量需求。MIMO传输技术可利用空间维度进行多流数据的并行传输,但由于单颗卫星的波束与用户间信道的高相关性,导致无法提供空间维度隔离。提出一种多星MIMO协同传输方案和以主卫星为时频参考点的多星同步方案,梳理了星间必要的交互信息,提出基于信道预测的预编码方案,并进行了性能评估。评估结果显示:采用4星MIMO协同传输时,平均用户速率增益可达169.6%。

关键词:

多星协同;联合传输;星间同步;预编码

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2026.08.004

文章编号:1007-3043(2026)08-0019-05

中图分类号:TN929.5

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

Conventional transmission over low Earth orbit (LEO) satellites is constrained by satellite payload capabilities, and its spectral efficiency can no longer meet the surging demand for communication capacity. MIMO transmission technology enables parallel transmission of multi-stream data by exploiting the spatial dimension. However, the high channel correlation between the beams of a single satellite and user terminals prevents effective spatial domain separation. Accordingly, a multi-satellite cooperative MIMO transmission scheme and a multi-satellite synchronization strategy taking the primary satellite as the time-frequency reference are designed, the essential inter-satellite information exchange procedures are sorted out, and a channel prediction-based precoding scheme is presented. Comprehensive performance evaluations are carried out. The evaluation results demonstrate that the average user throughput gain can reach 169.6% when adopting a four-satellite cooperative MIMO transmission configuration.

Keywords:

Multi-satellite cooperation; Joint transmission; Inter-satellite synchronization; Precoding

引用格式:杨帅, 缪德山, 孙韶辉. 面向6G的多星MIMO协同传输技术[J]. 邮电设计技术, 2026(8): 19-23.

0 引言

近20年来,随着卫星制造、火箭发射、星载设备及通信技术的长足进步,基于大规模低轨(Low Earth Orbit, LEO)卫星星座的宽带通信成为行业未来发展主流趋势^[1-7]。即便如此,当前卫星通信仍普遍采用单波束传输模式,即单个终端仅能接收来自卫星单一波束的

信号。在卫星通信时频资源受限的前提下,频谱效率遭遇发展瓶颈。如何提升频谱效率,成为卫星通信后续发展亟待解决的难题。

地面多输入多输出(MIMO)技术通过多组天线同步收发信号,将信号拆分为多路独立数据流,各路数据流经不同天线发射,再由接收端多天线完成接收,数据流之间利用空间维度的信道差异相互隔离^[8]。在卫星通信中,每一个波束均可承载一路独立数据流,终端的各副天线(或多天线终端)分别对应不同波束,

收稿日期:2026-06-08

由此构建出卫星多波束协同传输体系^[9-10]。与地面无线通信系统相比,低轨卫星通信场景具有高移动性、传输时延大、信道以视距(LoS)传输为主等特征^[11]。将 MIMO 技术落地卫星场景时,必须充分考虑上述特性带来的影响,主要包括时频同步、接入流程、资源调度等方面。

本文从同步方案设计、星间信息交互、系统建模以及性能评估 4 个维度,对多星协同 MIMO 传输技术展开研究。仿真结果表明,在大规模低轨星座中采用多星协同传输,能够有效提升用户传输速率:双星协同传输可使绝大多数用户的传输速率提升 47.3%,进一步升级为四星协同传输后,传输速率的提升幅度可达 153.7%。

1 多星 MIMO 传输系统模型

由于单颗卫星的多个波束与终端之间信道相关性极高,若想利用空域实现多路数据流隔离,由多颗卫星构成的 MIMO 传输系统是一种可行方案(见图 1)。该方案借鉴地面分布式 MIMO 思路,通过多颗卫星向同一终端发射多波束,各卫星波束承载独立数据并完成传输。得益于卫星之间相距较远,不同星地链路具备良好的空域去相关性,能够保障多星传输中的各个空间子信道稳定承载多路数据流。系统内发射端包含 M 颗卫星,每颗卫星提供一个波束,从而构成 M 根发射天线;接收端包含多天线终端的 N 根接收天线,从而构成 $M \times N$ 的信道矩阵 H ,信道矩阵通常分为 LoS 分量与非视距 NLoS 分量 2 个部分,表达式如下:

$$H = \sqrt{\frac{K}{K+1}} H_{\text{LoS}} + \sqrt{\frac{1}{K+1}} H_{\text{NLoS}} \quad (1)$$

其中, H_{LoS} 为 LoS 分量, H_{NLoS} 为 NLoS 分量, K 为莱斯(Rice)因子。

在多星协同 MIMO 传输场景中,多颗卫星会同时向同一终端发送数据,因此必须保证各卫星信号抵达终端的时间尽可能一致。以 5G 新空口(New Radio,

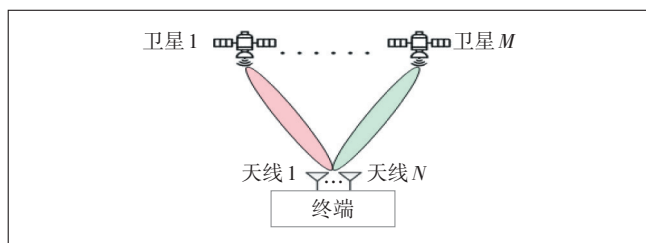


图 1 多星 MIMO 传输系统模型

NR) 系统为例,若多波束到达用户终端(User Equipment, UE)的时延差小于循环前缀(Cyclic Prefix, CP)长度的 1/2,便可通过信号层处理抵消该时延带来的影响。但由于各卫星与终端之间的相对距离通常存在差异,若不采取专门处理措施,不同卫星之间很难实现同步。

2 关键挑战和解决方案

2.1 星间同步方案

多颗卫星向同一用户开展协同传输时,如何确保来自多颗卫星的信号能够同时到达接收端至关重要。对于基于正交频分复用的 MIMO 传输系统,下发至用户终端的所有信号必须落在循环前缀容忍范围内,否则会破坏信号的完整性。针对多星之间相对位置关系具有时变性的问题,本节提出一种适用于多星协同传输的同步方案。如图 2 所示,在构成该 MIMO 系统的多颗卫星中选取一颗主卫星,作为该系统的唯一时频基准参考点,主卫星的选取原则可按照距离远近或信号强弱进行判定,系统内的其余卫星均为辅卫星,具体实现流程如下。

- 终端对可视范围内的卫星分别进行下行同步信号搜索并获取星历信息。
- 根据下行同步信号的功率或质量,或根据星历信息计算相对距离,择优选定一颗卫星作为主卫星,完成常规随机接入。
- 终端与主卫星建立连接后,将下行同步信号对应的候选辅卫星上报给主卫星;也可由主卫星根据卫星服务区域自主筛选可用辅卫星。
- 主卫星依据候选辅卫星信息,通过星间链路核验辅卫星可用性,与之组建多卫星协作 MIMO 传输系统。
- 终端向主卫星上报自身位置与速度信息,再由

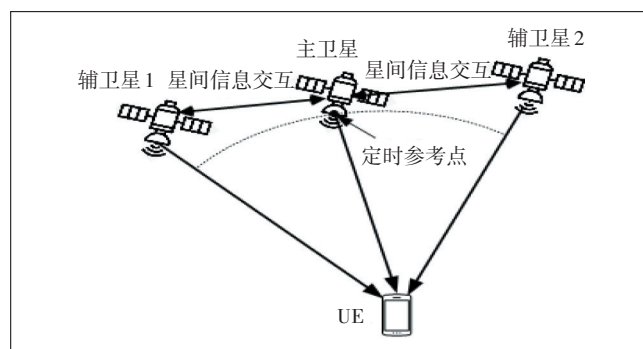


图 2 多卫星同步方案示意

主卫星将该信息同步至其余辅卫星。

f) 主卫星通过星间链路, 与各辅卫星进行信息交互, 具体交互内容参见本文第2.2节内容。

g) 各辅卫星分别计算自身、主卫星到终端的传输时频偏差, 结合两者差值开展预补偿, 确保信号抵达接收端时严格占用规划的时频资源。

2.2 星间信息交互

在多星MIMO协同传输系统中, 除了需要将待传输的数据进行分发, 还需要考虑部分额外的星间信息交互^[12], 主要包含以下内容。

a) 时间基准信息。考虑到多颗卫星分属不同小区, 对应的时间基准存在差异, 例如不同的SFN序号。主辅卫星之间需要针对时间基准的偏移值进行交互(例如SFN offset^[13]), 确保辅卫星可以推导出主卫星的时间基准。

b) 时频资源分配信息。主卫星需要把用于发送的时频资源通知给辅卫星, 辅卫星基于已经确定的时间基准对其发送时机进行调整, 确保终端在所分配的资源内可以获取到来自多颗卫星的完整信号。

c) 用户位置信息。首先, 用户需要将其位置信息上报给主卫星, 主卫星再将该信息共享给辅卫星。辅卫星基于自身星历信息与用户位置计算传输时延及对应的多普勒频偏。

d) 主卫星星历信息。辅卫星除了需要基于自身星历信息计算服务链路的时延和多普勒频偏, 还需要根据主卫星的星历信息计算主卫星与用户之间的时延和多普勒频偏, 基于二者差值发送预补偿, 确保到达终端时位于相同的时频资源。

2.3 预编码方案

5G NR在地面MIMO系统中采用闭环测量与反馈机制实现与信道环境自适应的精确预编码。基站端按周期或非周期方式发送经波束赋形或非预编码的CSI-RS资源, 用户设备基于对CSI-RS的测量估计下行信道矩阵, 并根据预先配置的码本参数执行码本搜索, 确定最优的预编码矩阵指示(PMI)、秩指示(RI)与信道质量指示(CQI)^[14]。上述CSI参量经信道编码后通过PUCCH或PUSCH承载反馈至基站, 基站据此重建预编码矩阵并调度多用户MIMO传输。

对于卫星场景, 由于星地之间存在较大的传输时延, 通过测量与反馈机制实现的码本选择存在滞后性, 导致UE上报的CSI信息参考价值大打折扣。但卫星场景也存在天然优势, 由于星地信道以直射径为

主, 信道中的信号衰减和相位旋转比较容易被预测。根据自由空间传播理论, 矩阵 H_{LoS} 中第 m 个发射天线与第 n 个接收天线之间的信道 $h_{m,n}$ 可表示为:

$$h_{m,n} = a_{m,n} g_{m,n} e^{-j\theta_{m,n}} \quad (2)$$

其中, $\theta_{m,n}$ 表示自由传播形成的信道相位, $\theta_{m,n} = 2\pi \frac{f}{c} r_{m,n}$, $r_{m,n}$ 表示第 m 根发射天线与第 n 根接收天线之间的距离, f 为载波频率, c 为光速; $a_{m,n}$ 表示第 m 根发射天线至第 n 根接收天线间的传输损耗, 该参数由自由空间路径损耗、大气衰减、云雾衰减、降雨衰减以及闪烁效应等因素共同决定^[15]; $g_{m,n}$ 表示第 m 颗卫星到终端第 n 根接收天线的增益, 其表达式为:

$$g_{m,n} = g_{m,n}^{\text{rx}} g_{m,n}^{\text{tx}} \quad (3)$$

其中, $g_{m,n}^{\text{tx}}$ 为卫星发射天线增益, $g_{m,n}^{\text{rx}}$ 为终端接收天线增益。

早在2000年, 贝尔实验室的埃姆雷·泰拉塔便利用威沙特矩阵的特征值分布, 对独立分布式MIMO平坦瑞利衰落信道各状态下的信道容量开展了数值分析。后续研究在此基础上对容量表达式进行近似求解, 进一步简化了容量计算公式^[16]。针对既定信道场景, 可通过可达信道容量分析MIMO系统性能。根据香农信道容量定理, 可基于MIMO信道矩阵 H 计算信道容量 C (单位: bits/s/Hz), 计算公式为^[17]:

$$C = \log_2 \det \left(I_M + \frac{P}{N\sigma^2 + I_p} HH^H \right) \quad (4)$$

其中, $\det()$ 表示行列式, H^H 表示共轭转置; P 表示信号功率, $N\sigma^2$ 表示噪声功率, I_p 表示接收端其他波束带来的干扰功率; M 、 N 依次为发射天线数与接收天线数, I_M 为单位矩阵。上述基于信道预测的容量表征方式将用于后续性能评估。

3 性能评估

为验证多卫星单用户多输入多输出(SU-MIMO)系统的性能, 本文搭建了低轨卫星星座仿真场景, 卫星总数共计1 600颗(见图3)。该星座轨道高度为600 km, 包含40个轨道面, 每个轨道面布设40颗卫星, 轨道倾角为60°。仿真时长设置为600 s, 可完整覆盖卫星过顶的全过程。仿真参数如表1所示, 其余参数均参照3GPP相关研究报告^[18]进行配置。

每次仿真以北京地理位置坐标为基准(39°54'24"N, 116°23'51"E), 在经纬度范围±5°以内随机选取用户位置, 并记录仿真时长内, 该用户分别采用传

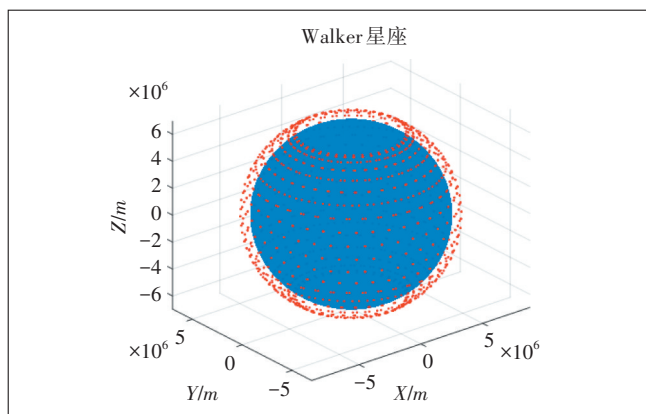


图3 仿真平台星座示意

表1 多星协同传输仿真参数

参数名称	取值	参数名称	取值
星座类型	Walker	工作频率/GHz	2
轨道高度/km	600	工作带宽/MHz	30
轨道面数量	40	极化损耗/dB	3
每个轨道面内卫星数量	40	发送端 EIRP/dBW	48.8
轨道倾角/°	60	接收端 G/T/(dB/K)	-31.6

统单星单波束传输和多星 MIMO 协同传输所获得的频谱效率与传输速率。

当协同传输的卫星数量不同时, 单次仿真的传输速率随时间的变化曲线如图 4 所示。其中, 图 4(a)、图 4(b)、图 4(c) 分别对应 2 颗、3 颗、4 颗协同传输卫星数量。随着参与协同传输的卫星数量增加, 传输性能随之提升。性能波动由卫星运动引发, 不同时刻终端与卫星的相对位置发生改变, 会造成信道状态变化, 进而影响系统容量。

同时, 仿真过程中也对基于信道预测的预编码方式与传统固定码本的方式进行了对比。图 5 所示为四星协同传输时的性能对比, 基于信道预测的预编码方式可获得更高且更稳定的频谱效率。

基于蒙特卡洛仿真得到的统计结果如图 6 所示。从图 6 可以看出, 参与协同传输的卫星数量越多, 传输速率增益越明显, 但增益并非呈线性增长。分别统计了 3 项性能指标, 95% 针对的是大多数用户, 50% 针对用户平均值, 5% 针对性能提升最优的头部用户。双星

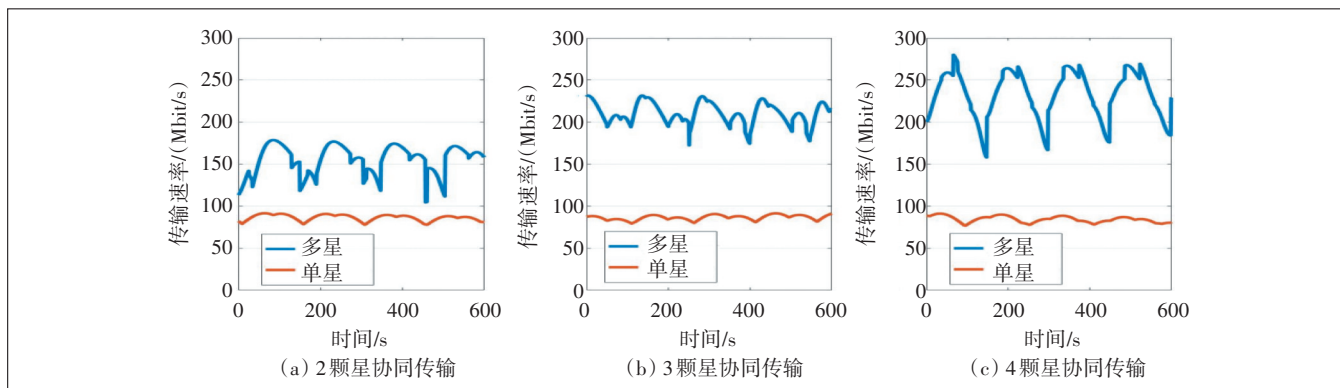


图4 传输速率随卫星过顶时间变化示意

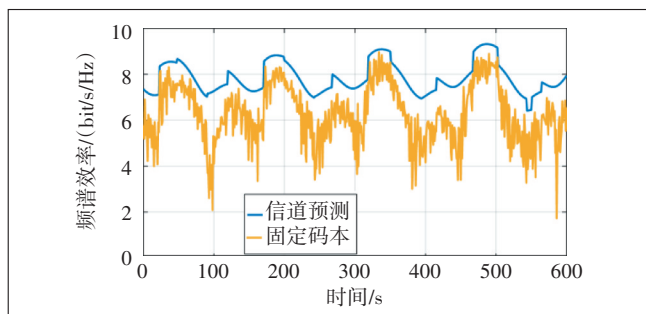


图5 基于信道预测和固定码本的预编码性能对比

协同传输可为大多数用户提供 47.3% 的速率增益, 平均用户速率增益可达 62%; 当协同卫星数量增至 4 颗时, 大多数用户的速率增益可达 153.7%, 平均用户速

率增益可达 169.6%。速率增益呈现非线性特征的主要原因为: 随着卫星数量增加, 新增卫星与用户终端的距离通常远大于已有卫星, 信道中的衰落会明显高于已有卫星, 因此其带来的性能提升会逐步受限。

4 总结

本文针对面向 6G 的多星 MIMO 协同传输技术展开研究, 旨在提高用户的频谱效率, 使用户在有限带宽下获得更高的频谱效率。首先, 提出了一种多卫星 SU-MIMO 传输方案。针对时频同步问题, 提出了一种以主星为唯一时频参考点的同步方案, 并分析了星间信息交互涉及的内容。通过搭建的多星协同传输仿

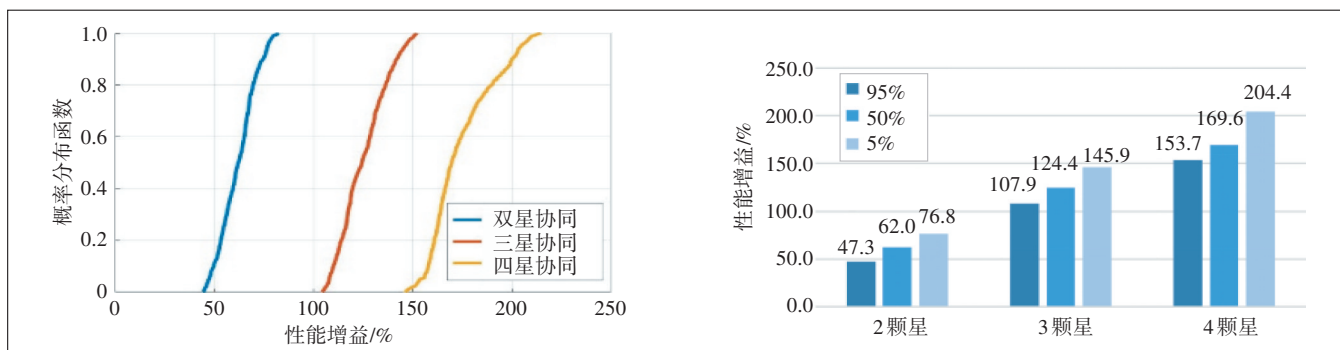


图6 多次仿真的性能增益概率分布统计

真平台对相关性能进行了评估。仿真评估结果表明,采用4颗卫星进行多星MIMO协同传输可为绝大多数用户提供高达153.7%的速率增益。随着6G时代的来临,星地融合已成为未来可预见的发展趋势。多卫星协同传输的发展也受到业界的广泛关注。在2025年初的3GPP研讨会上,许多公司提出要在6G阶段重点发展卫星波束协调。本文的研究将为今后的标准化工作提供参考。

参考文献:

- [1] Chen S, Sun S, Kang S. System integration of terrestrial mobile communication and satellite communication—the trends, challenges and key technologies in B5G and 6G [J]. China Communications, 2020, 17(12): 156–171.
- [2] Miao D S, Han B, Kang S L, et al. Key technologies and potential challenges of mobile phone directly connecting to the satellite network [C]//Ninth Symposium on Novel Photoelectronic Detection Technology and Applications. SPIE, 2023: 1261728.
- [3] Chen S, Sun S, Miao D, et al. The Trends, Challenges and Key Technologies of Beam-Space Multiplexing in the Integrated Terrestrial-Satellite Communication for B5G and 6G [J]. IEEE Wireless Communications, 2022, 17(12): 16.
- [4] Kang S, Miao D, Sun S, et al. TDD Mode on NTN Direct to Satellite Service [EB/OL]. [2026-04-16]. <https://futurenetworks.ieee.org/articles/tdd-mode-on-ntn-direct-to-satellite-service>.
- [5] Chen S Z, Liang Y C, Sun S H, et al. Vision, Requirements, and Technology Trend of 6G: How to Tackle the Challenges of System Coverage, Capacity, User Data-Rate and Movement Speed [J]. IEEE Wireless Communications, 2020, 27(2): 218–228.
- [6] Sun S H, Hou L M, Miao D S. Beam switching solutions for beam-hopping based LEO system [C]//2021 IEEE 94th Vehicular Technology Conference (VTC2021-Fall), 2021: 1–5.
- [7] Ma D, Liu X, Wang X, et al. On the performance indexes of physical layer security for multi-beam satellite networks [C]//International Conference on Wireless Communications & Signal Processing, IEEE, 2015.
- [8] Shi T, Sun S, Sun W, et al. High-Performance Receiving Beamforming With Low-Resolution Arrays in Multisatellite Communications [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2024, 61(1): 1237–1245.
- [9] Singh V, Eappen G, Martins W A, et al. Diversity Combining Scheme for Time-Varying STBC NGSO Multi-Satellite Systems [J]. IEEE Communications Letters, 2024, 28(4): 882–886.
- [10] Goto D, Shibayama H, Yamashita F, et al. LEO-MIMO Satellite Systems for High Capacity Transmission [C]//IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), 2018: 1–6.
- [11] Meng M, Hu B, Chen S, et al. Max-min fairness robust beamforming for LEO satellite multibeam communication systems with two CSI uncertainty model [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 11(6): 9368–9381.
- [12] 陈山枝, 范志文, 金家德, 等. 卫星互联网星间激光通信的分析及建议 [J]. 电信科学, 2024, 40(2): 1–10.
- [13] 3GPP TS 38.331 V18.1.0 Radio Resource Control (RRC) protocol specification (Release 18) [S].
- [14] 3GPP TS 38.214 V19.1.0 Physical layer procedures for data (Release 19) [S].
- [15] 3GPP TR 38.811 V15.2.0 Study on New Radio (NR) to support non-terrestrial networks (Release 15) [S].
- [16] Telatar I E, Tse D N C. Capacity and Mutual Information of Wideband Multipath Fading Channels [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(4): 1384–1400.
- [17] Gayraud J D. Terabit satellite: myth or reality? [C]//2009 IEEE International Conference on Space Communications. Piscataway: IEEE, 2009: 1–6.
- [18] 3GPP TR 38.821 V16.1.0 Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN) (Release 16) [S].

作者简介:

杨帅, 工程师, 博士, 主要从事3GPP NTN相关的标准化工作以及相关前沿技术的研究工作; 缪德山, 高级工程师, 博士, 主要从事3GPP NTN、低轨卫星通信、星地融合空口及6G空天地一体化技术研究与标准化工作; 孙韶辉, 高级工程师, 博士, 长期负责星地融合移动通信体系架构与标准化顶层设计, 重点研究5G NTN非地面网络、低轨卫星协同组网、星地多波束传输、6G空天地全域覆盖、通感一体化关键技术。