面向星上算力中心的太赫兹通信技术：需求与挑战

Terahertz Communication Technology for Orbital Computing Centers: Requirements and Challenges

宋瑞良/Song Ruiliang，张海鹏 /Zhang Haipeng
（中国电子科技集团公司第五十四研究所，中国 石家庄 050081）
(The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China)

DOI：10.12142/ZTETJ.202605005
网络出版地址：https://link.cnki.net/urlid/34.1228.TN.20261020.1141.006
网络出版日期：2026-10-20
收稿日期：2026-07-15

摘要：将算力部署于轨道平台的“星上算力中心（ODC）”是重要发展方向。星上算力的价值取决于数据在轨、星间与星地间的高速流动能力——通信而非计算本身，成为太空算力关键使能要素。梳理了星上算力中心的内涵、运行模式与驱动因素，并对比欧美国家与中国的进展，量化其星间/星地高速互联需求。论证了太赫兹（THz）通信具备超大带宽、小型化与准全天候特性，能够弥补微波通信容量不足、激光通信易受天气制约的短板，是空间通信的重要技术路线，并剖析其在空间应用中面临的大气吸收、高功率器件、波束捕获跟踪与标准化四大难题。

关键词：星上算力中心；轨道边缘计算；太赫兹通信；星间链路；星地链路

Abstract: Deploying computing power onto orbital platforms—the “orbital data center (ODC)”—is emerging as an important development direction. Yet the real value of in-orbit compute hinges on the high-speed data transmission across space, inter-satellite and space-to-ground links; communication, rather than computation, is the key enabler of space-based computing. This paper systematically reviews the concept, operation modes and driving forces of the on-orbit computing center, compares its progress in Europe, the United States and China, and quantifies the requirements for ultra-high-speed inter-satellite/space-to-ground interconnects. It then argues that terahertz (THz) communications—with ultra-wide bandwidth, miniaturization and quasi-all-weather penetration—precisely fills the gap left by capacity-limited microwave and weather-sensitive laser links, forming an important technical route of heterogeneous space networks, and dissects four key challenges: atmospheric absorption, high-power devices, beam acquisition/tracking and standardization.

Keywords: orbital computing center; orbital edge computing; terahertz communication; inter-satellite link; space-to-ground link

引用格式：宋瑞良，张海鹏. 面向星上算力中心的太赫兹通信技术：需求与挑战 [J]. 中兴通讯技术，2026, 32(5): 29-37. DOI: 10.12142/ZTETJ.202605005

Citation: Song R L, Zhang H P. Terahertz communication technology for orbital computing centers: requirements and challenges [J]. ZTE technology journal, 2026, 32(5): 29-37. DOI: 10.12142/ZTETJ.202605005

过去10余年，移动互联网、云计算与生成式人工智能共同推动全球算力规模持续扩张。国家能源局公开数据显示，2025年中国算力用电量已达约1 700亿度，占全社会用电量的1.6%；预计“十五五”期间，中国算力用电量年均新增超千亿度，到2030年将达8 000亿度，占全社会用电量的6%[1]。美国劳伦斯伯克利国家实验室研究人员的估计显示，到2030年美国算力中心用电量可能占美国总用电量的11.8%，不同预测情景下占比区间为9.5%～15.3%[2]。此外，业界普遍认为，制冷系统是算力中心的第二大耗能环节，占比约为30%～40%，也是算力中心能耗压力最突出的环节[3]。

在此背景下，将算力向天基平台“迁移与拓展”的星上算力中心概念被提出并受到广泛关注，被视为继地面数据中心之后新的竞争维度。与地面相比，天基平台在“电力”与“散热”两大基础约束上具备天然优势。然而，太空算力与地面数据中心存在本质差异：后者依赖PB级内部交换与稳定电力供给；前者虽不受场地与电力约束，但其所需的原始数据、模型与协同结果必须在星间、星地间高速流动，这是决定其能否有效运转的关键因素[4-5]。

为突破传统微波与激光的各自局限，太赫兹（0.1～10 THz，

基金项目：国家重点研发计划项目（2023YFE0206600）

常用0.1～3 THz频段）通信凭借超大瞬时带宽、短波长带来的小型化与高增益，以及对云雾粒子的准全天候穿透能力，成为贯通星间、星地乃至空天地一体化网络的高速互联候选方案[6-7]。

从技术谱系看，太赫兹位于“电子学”与“光子学”的过渡频段。其波长短于微波1～3个数量级，使天线和射频前端可高度集成于厘米乃至毫米尺度，便于与星上计算载荷共封装、共散热[8-9]；同时，它无需像自由空间光通信（FSO）那样进行精密光学对准。因此，在星间链路上，太赫兹既具备Tbit/s级带宽潜力，又具有更宽松的捕获、指向与跟踪容限。具体而言，太赫兹波束宽度通常较激光大1～2个数量级，因而失锁恢复更快、组网更灵活。在0.35、0.41、0.67、0.85、1.03 THz等大气窗口附近，太赫兹对雾、霾、沙尘的穿透能力显著优于激光，这正是其“准全天候”特性的物理成因[10]。

进一步看，频谱与标准层面的进展也为其实用化铺平了道路：WRC-19已为275～450 GHz划定共137 GHz的空-地/空-空业务频段；IEEE 802.15.3d-2017在252～325 GHz频段定义了最高100 Gbit/s的点对点物理层，推动太赫兹从“概念频段”走向标准化部署[11-12]。

1 星上算力的内涵、运行模式与驱动因素

1.1 概念内涵与运行模式

星上算力是指将数据处理、存储、智能分析与决策能力部署于卫星、空间站等天基平台的新兴计算范式。其本质是将传统地面数据中心的核心功能向天基平台迁移与拓展，构建分布式在轨计算节点，并与地面算力深度融合，最终指向“天地一体、算力无界”的全域分布式算力网络。

与单纯的“星上处理”不同，星上算力的内核是“算力作为一种可调度、可协同的基础设施”，强调跨节点的任务编排、模型流动与弹性供给，而非单点设备的局部计算。按算力与数据的空间关系，其运行模式可归纳为3类：天数天算、地数天算、天地协同，如表1所示。

1.2 驱动因素

当地面算力在能源、土地与散热三重约束下逐渐逼近容量上限，近地空间凭借充裕的太阳能、天然真空辐射散热以及可复用运载带来的低成本到达能力，为算力部署提供了新路径。星上算力中心的兴起，实为能源、太空环境、商业航天与AI/6G需求四重因素共同作用的结果。

1） 能源约束：地面算力中心的能耗上限

地面算力扩张正日益受到电力供给的刚性约束。在需求侧，大模型训练与AI推理推动数据中心耗电占比持续攀升，且其增速高于多数行业部门，权威机构已多次上修用电峰值预测；在成本侧，电费约占运营总成本的40%～60%（AI高密度场景可达60%～70%）[13]，电力与制冷合计占建造成本逾50%[14]。更为严峻的是，电力供给正取代建设成本，成为数据中心选址与扩产的首要约束，典型案例包括都柏林暂停新建审批、法兰克福2030年前无新增容量、新加坡仅余7.2 MW可用容量。电力需求的指数级增长与成本长期高位，已使电力由经济性约束演化为地面算力的根本性制约。

2） 空间优势：充裕的能源与受限的散热

轨道平台在能源、散热与覆盖方面具有固有优势。在能源侧，卫星可连续接收日照，单位面积太阳能效率约为地面的5～7倍，供能过程近乎零碳排放。在散热侧，约-270 ℃的深空真空环境使热量以红外辐射形式排散至3 K冷黑背景，无需依赖空调与水冷系统，“散热”由此转为近零能耗的被动辐射。但真空辐射受斯特藩-玻尔兹曼定律与面积约束：在轨散除1 kW热负荷约需1.3～2 m^2辐射器，单颗H100级图形处理器（GPU）（约700 W）即需大于1 m^2专用辐射面[15-16]——瓶颈由“能耗”转为“散热面积”。在覆盖侧，低轨星座可突破地理限制，对海洋、极地等盲区实现近100%全球无缝覆盖。能源、散热与覆盖三重优势，对应解除地面的“电、热、地”三重约束。

3） 商业航天：可复用运载体系降低部署成本

过去，“算力上天”的最大障碍是成本，而可复用运载正大幅降低建设成本：猎鹰9号入轨成本由数万美元/kg降至约2500～2700美元/kg，降幅超70%；其年发射次数由2015年约8次增至2025年约165次，可复用占比由18%升至60%[17-18]。2026年7月10日，长征十号乙火箭实现一子级海上网系回收，达成中国首次一子级可控回收、全球首次运载火箭网系回收，自主“低成本、大运力、高频次”进入能力

表1 星上算力3类运行模式及内涵

运行模式	空间关系与含义
天数天算	感知卫星→算力卫星：感知卫星采集原始数据后直接在算力卫星上完成计算/推理，仅将高价值结果回传地面，大幅减少下行数据量
地数天算	地面→算力卫星：地面将计算任务、训练集或模型上传至在轨算力集群，计算结果回传地面终端，由地面统一调度
天地协同	在轨算力集群与地面算力集群协同，形成“天上有星、地上有站、中间有智算”的3层开放架构，支持模型分发、梯度/特征互联与在轨控制

为大规模星座提供支撑。当发射能力不再受限时，星链以每周约70颗、在轨逾万颗的规模扩张；中国千帆（G60）约1.4万颗、国网约1.3万颗的规划在列。批量整星制造叠加高频发射，使单节点“建造与入轨成本”随规模下降，商业航天由此成为降低成本的主要途径。

4） AI与6G需求：从“传数据”到“流动智能”

需求侧的结构性变化构成根本牵引：AI正将互联网基础单元由“页面与连接”重构为“令牌（Token）与推理”，工作负载也由以训练为主加速转向以推理为主[19]；美国银行全球研究部预计，全球AI数据中心市场规模将由2025年的2 640亿美元增至2030年的1.7万亿美元，年复合增速达45%[20]。当算力需求持续膨胀而地面能源日益逼近上限，“让算力靠近数据、乃至上天”正由设想转变为迫切需求。6G自设计之初即强调天地一体：ITU-R IMT-2030将泛在连接列为六大场景之一，3GPP将非地面网络（NTN）视为6G基线能力；每颗卫星具备在轨算力，通信、计算与感知在星上融合，“在轨智能”正走向在轨业务。

2 全球竞速：星上算力中心的产业化布局

星上算力中心正由概念加速走向工程实践，欧美国家与中国近乎同步展开布局。如表2所示，国际机构与中国相关机构分别围绕星座级算力、星载张量处理器（TPU）编队、空间加速模组、在轨训练与碳中性论证等方向展开布局；公开披露的技术指标已转向以功耗（kW、GW）而非芯片吞吐量表征规模，这本身即表明能源已上升为首要约束。百万颗级星座、亚百米编队与在轨训练等场景，进而对星间/星地高带宽、低时延互联提出刚性需求。中国呈现以国家科研机构为主导、商业航天企业积极参与的发展格局，普遍以“天地一体、边云协同”为设计理念，将星上算力嵌入既有卫星互联网与6G体系。通信能力的同步提升成为项目成败的关键——若星间/星地链路容量滞后于算力扩张，在轨算力将面临“算力充足而数据传输能力不足”的困境。

3 星上算力对高速互联的需求与性能指标

与地面数据中心不同，星上算力中心的约束结构发生了根本性变化：地面设施主要受电力与场地制约，而星上算力

表2 国际代表性星上算力/星座项目布局

项目	国家/地区	核心计划	关键指标/进展	来源
SpaceX Starmind	美国	最多100万颗计算卫星，AI计算容量设计目标达100 GW	轨道数据中心卫星AI1太阳能板具备150 kW峰值功率，日常维持120 kW功率输出；2026年1月向FCC提交申请，同年联合英伟达开发Starmind AI1计算载荷；计划2027年发射，同年年底Gigasat工厂实现量产	[21]
Google Project Suncatcher	美国	650 km太阳同步轨道部署81颗搭载自研张量处理器（TPU）卫星，半径1 km编队、间距<200 m	实验室内已验证1.6 Tbit/s双向星间光链路；该项目于2025年11月公布；2027年初与Planet发射2颗试验卫星	[22]
NVIDIA Space-1	美国	星载加速计算模组，专为尺寸、重量和功耗受限的太空环境设计	Vera Rubin Space-1模组使每图形处理器（GPU）AI算力提升多达25倍；2026年3月英伟达GPU技术大会（GTC）发布	[23]
Starcloud	美国	基于太阳能面板、功率达5 GW的轨道数据中心	Starcloud-1搭载H100在轨运行Gemma、训练NanoGPT；目标能耗成本仅为地面的1/10；2025年11月发射Starcloud-1；完成人类首次太空大语言模型（LLM）训练	[24]
欧盟ASCEND	欧盟	欧洲自主“太空计算云”，探索大型数据中心部署于太空的技术可行性与环境效益	预计同等算力下的能耗比地面低约一个数量级，即能效提升约10倍；该项目于2023年启动，2024年6月发布可行性研究结果	[25]
之江实验室三体计算星座	中国	千星规模太空计算基础设施，“计算上天、星间互联、模型上天”	2025年5月首发12颗卫星，单星算力最高为744 TOPS，星间激光最大100 Gbit/s；计划2027年发射100颗卫星，2032年实现千星规模、总算力达1 000 POPS	[26]
国星宇航星算计划	中国	部署2 800颗算力卫星组网，与超100个地面算力中心互联	02组“天秤-10”单星算力将破10 POPS；2030前实现千星商用；千问Qwen3已在轨运行	[27]
北京太空数据中心	中国	在700～800 km晨昏轨道上，建设运营超过千兆瓦功率的集中式大型数据中心系统	预计2030年建成首座太空数据中心，太空算力有望达40万 POPS	[28]
天算星座	中国	实现“云原生、边云协同”，搭载3层开放平台架构	一期6颗，二期共24颗；截至2026年已累计发射8颗	[29]
中国移动CHINAMOBILE- L1/CHINAMOBILE-M1星座	中国	天地一张算力网，2 520颗低轨卫星星座+144颗中轨卫星星座	2024年发射中国移动01星；2025年开展6G天基云载荷测试；2026年发射中国移动02星	[30]

中心的核心瓶颈在于通信。一方面，地面已实现PB级整机柜交换与光互连，天地链路则受频谱、功率与对流层衰减所限，单星回传通常仅达GB级，二者相差数个数量级；另一方面，模型训练、权重下发与在轨推理均要求数据、参数和结果在星地、星间高速流动。因此，带宽直接决定在轨算力的实际效能——若链路能力滞后于算力扩张，在轨计算资源将因带宽瓶颈而难以得到有效利用。

星上算力的通信需求可归纳为3类，其带宽压力随模型与数据规模呈线性乃至超线性增长。

1）模型训练。前沿模型的训练数据量持续攀升：Llama 7B单次训练需数TB语料，405B级模型已消耗约数十TB原始数据[31]。分布式/跨星训练中，每步均需通过AllReduce进行全网梯度交换。在环式AllReduce下，单星每步收发约2P（P为参数量）梯度，全网每步约$N\times 2P$（N为卫星数），且需持续约10^5步[32]。

2）模型下发与更新。以FP16为例，7B轻量模型约14 GB，70B主力模型约140 GB，1T超大模型约2 TB[31]。模型规模越大，对星地与星间传输的带宽压力越明显。

3）在轨推理。遥感载荷原始数据率极高：高分辨率光学单星约1～3 TB/天，高光谱约1 TB/天，合成孔径雷达（SAR）可达数十TB/天；但受下行带宽限制，通常仅能回传1%～10%。

为直观说明带宽压力的量级，以100颗卫星协同训练7B模型（14 GB）为例，按10^5步计算，全周期梯度同步累计约1.4 PB；若将70B模型（140 GB）下发至1 000颗卫星，单次刷新即需140 TB。这意味着星间链路需长期维持数十至数百Gbit/s，否则训练与更新将因带宽瓶颈而效率低下，通信能力直接定义了星上算力的“有效算力”上限。

近年来，激光星间链路与高频段星地传输逐步成熟，星间/星地速率实现数量级提升，为在轨算力协同提供了关键带宽支撑。主要项目的实测与规划指标如表3所示。

星间高速链路正从“可选”变为标准配置，其价值在于构建不依赖地面站的全球网状网络，从而降低时延，提升自主性与抗毁性。对星上算力而言，星间链路决定了“算力能否协同”——分布式训练、模型同步与梯度互联均依赖星间高带宽；星地下行则决定了“结果能否回传”与“模型能否注入”。

4 太赫兹通信：技术优势与多模态协同

太赫兹（THz）指0.1～10 THz（波长3 mm～30 μm）、介于微波与红外之间的频段。受大气分子（尤其是水蒸气）吸收影响，面向星间/星地通信的可用窗口大多集中于0.1～3 THz的“亚毫米波”区段，以规避3 THz以上急剧增强的吸收带。其底层特性可概括为“大带宽、小型化”——带宽极宽、器件极小——并由此衍生出契合空天场景的链路特征：

• 超大带宽：瞬时可用带宽达数十至数百GHz，较Sub-6G的百MHz、毫米波的数GHz高出2～3个数量级，单载波即具Tbit/s潜力；典型地，在100 GHz带宽、64QAM调制下，单链路可达数百Gbit/s～1 Tbit/s，多载波聚合或相控阵可进一步上探至Tbit/s。

• 短波长：波长较微波小1～3个数量级，相同增益下口径显著缩小，有利于星载载荷小型化、轻量化与阵列化。

• 近直线传播：方向性强、绕射弱，天然适配高指向、低截获概率的星间/星地定向链路。

此外，太赫兹位于“电子学向光子学过渡”频段，可借助SiGe、InP等集成电路实现全电子式收发；相较于自由空间光通信，无需激光谐振腔与亚微弧度级精密对准，在工程复杂度、体积与抗扰动性方面更具优势。

近两年，太赫兹通信已从单点速率验证迈入系统化与外场组网阶段。6G外场试验网实现规模化扩容，单波速率达到Tbit/s量级，端到端时延降至百微秒级。全固态扩频与光子–电子融合架构分别实现19.6 km和2.2 km的实时传输。德国、韩国、日本也在300 GHz与560 GHz完成城市外场百Gbit/s级演示。具体系统指标如表4所示。

尽管太赫兹已取得显著进展，且空间真空规避了其在地面应用中的最大制约因素——大气吸收，使大带宽、高增益优势得以释放；但就星间/星地链路而言，太赫兹仍需面对微波与激光等成熟技术的竞争。如表5所示，三者并非替代关系，而是面向容量、距离、指向与可靠性等维度的协同互补。

表3　典型星上算力/星座项目通信指标

项目	典型通信指标	来源
SpaceX Starmind / Starlink V3	单星下行1 Tbit/s；上行200/160 Gbit/s；星间激光400 Gbit/s	[33]
Google Suncatcher	台架验证单向800 Gbit/s、双向1.6 Tbit/s星间光链路	[22]
Blue Origin TeraWave	低轨Q/V链路144 Gbit/s；中轨光链路点对点6 Tbit/s	[34]
之江实验室三体计算星座	星间激光通信最大100 Gbit/s	[26]

表4　全球代表性太赫兹通信系统与演示试验

系统/演示	国家	时间/年	频段/GHz	关键指标	来源
北京大学/鹏城实验室/上海科技大学光纤－无线融合通信	中国	2026	>250	光纤512 Gbit/s + 无线400 Gbit/s；86路8K实时传输	[35]
复旦大学 简化相干光子太赫兹	中国	2026	322	27 Gbit/s 16QAM DMT @30 m（实时现场可编程门阵列（FPGA））	[36]
电子科技大学 全固态扩频THz系统	中国	2026	101	不扩频10.9 km达1.67 Gbit/s；扩频因子100时19.6 km降至16.7 Mbit/s	[37]
紫金山实验室 335 GHz公里级通信	中国	2026	335	27.84 Gbit/s@2.2 km	[38]
Fraunhofer HHI 城市外场传输	德国	2026	300	221.5 Gbit/s@500 m	[39]
ETRI 光子无线前传	韩国	2026	300	25 Gbit/s@200 m	[40]
德岛大学超420 GHz无线传输	日本	2026	560	112 Gbit/s	[41]

微波链路（Ku/Ka/Q/V）技术最成熟、可靠性最高，已成为当前NTN与再生式载荷的主力[42]。其波束宽、指向捕获简单、抗振动且可全天候工作；星间速率约4 kbit/s～100 Mbit/s，受频谱与功率限制，容量上限明显[43]；星地链路（Ku/Ka宽带、Q/V馈电）虽已成熟，但高频段雨衰严重（Ka约20 dB/km）。因此，微波更适合承担控制面与基础保障链路，而非高容量数据面主力。

激光链路（近红外800～1 600 nm/中红外10.6 μm）波束极窄、带宽极宽、终端轻小且抗截获强，星间骨干速率已达100～400 Gbit/s（Starlink、极光星通），星地速率达到100 Gbit/s[44]。其容量最高，且真空中无传输阻碍，但仍需μrad级指向、捕获与跟踪（PAT），捕获复杂、建链慢、对扰动敏感[45]；星地链路虽绕开微波频谱瓶颈，却受云雨/湍流制约，云遮是可用性首要威胁，须以多站分集与机会式回传弥补[46]。激光适用于大容量骨干，但动态组网与星地可用性是关键约束。

太赫兹链路（空间应用多集中于100～600 GHz，尤以200～300 GHz低吸收窗口为主）带宽可达数百GHz，波束比微波窄、方向性更好，而指向容限又优于激光，恰处二者“中间地带”。星间真空环境恰好规避其在地面应用的最大短板——大气（水汽）吸收，理论单链路潜在速率为10 Gbit/s至数百Gbit/s、远期可达Tbit/s[47]；但当前仍属“硬件受限”体制，太赫兹功率放大器（PA）非线性与相位噪声为核心瓶颈，且微弧度级指向误差即可导致显著衰落（16QAM在指向误差>10 μrad时容量偏差>10%）[48]。星地链路仍受水汽强吸收约束，需采用窗口频段，工程验证尚早。

5 太赫兹通信亟待破解的技术难题

5.1 大气与链路损耗

自由空间路径损耗（FSPL）与频率的平方成正比。以0.3 THz频段为例，1 km传输距离路径损耗约为142 dB；卫星通信场景下损耗进一步升高，可达180～220 dB，需要依靠高增益天线和波束成形技术进行补偿。太赫兹频段处于大气“吸收峰—窗口”交替分布的频谱结构之中：水汽、氧气等大气分子存在多条强共振吸收线[49]，仅在吸收线之间留有若干低衰减窗口，且频率越高，窗口越窄，损耗越大[50]。对星地链路最实用的窗口集中在0.1～0.4 THz（典型为140 GHz、220～240 GHz、340 GHz）[51-52]，更高频典型窗口约0.35～

表5　微波、激光与太赫兹空间链路特性对比

维度	微波（Ku/Ka/Q/V）	激光（FSO）	太赫兹（100～600 GHz）
典型频段/波长	12～50 GHz（厘米级波长）	800～1 600 nm（微米级）	100～600 GHz（亚毫米至数十微米）
带宽/单链路速率潜力	数百MHz～数GHz/载波；星间链路≤100 Mbit/s，难以达到Tbit/s	极宽；星间100 Gbit/s～400 Gbit/s；星地100 Gbit/s	数百GHz；潜在10～100 Gbit/s，远期Tbit/s
天线/终端尺寸	较大（厘米级波长），偏重	小，轻量低功耗	中等偏小，利于小型化
指向要求	宽松，易跟瞄，抗振动	极严（μrad PAT），捕获复杂	较严（μrad），容限优于激光
天气/环境敏感性	雨衰（Ka/Q/V显著），可全天候	星间无碍；星地受云雨/湍流严重	星间真空规避吸收；星地受水汽强吸收
安全性（抗截获能力）	中等（波束较宽）	高（极窄波束天然保密）	高（窄波束+吸收辅助保密）
空间成熟度	最高，现役主流	高，星间骨干已商用，标准化完备	低－中，在轨演示起步，标准化待定
受限体制	功率+频谱受限	几何（PAT）/大气可用性受限	硬件受限（PA非线性、相位噪声）
主要短板	频谱拥挤、容量天花板低、高频段雨衰	PAT复杂、星地大气受限、组网开销大	硬件瓶颈、热控紧张、指向误差敏感

1.03 THz。星间链路处于真空环境，无大气吸收，带宽优势最大；星地链路则受水汽/氧气吸收、雨衰与云衰叠加影响，链路预算受限。针对超低轨星地太赫兹链路的建模表明：140、220、340 GHz的大气吸收分量分别为3.5、9.3、33 dB（集中于近地0～11 km水汽层），140 GHz星地总衰减约为189 dB（含自由空间路径损耗约185 dB）；QPSK下星地可用带宽容量达284 GHz，优于中继与高空基站方案。基于西藏、青海4个高海拔站全年气象数据的验证还表明，高海拔干燥站可将链路衰减的全年波动抑制在较低水平[51]。

针对大气约束，缓解技术路线主要有3条：1）优选并动态切换低衰减窗口，结合高海拔干燥站址（如青藏高原、阿塔卡马）以降低水汽柱；优先选择低衰减窗口，优于单纯提升发射功率[52]；2）以超大天线阵列补偿路径损耗[53]；3）借助高空平台或中继星接力，分段规避低空水汽层。多跳中继会使空间路径损耗逐跳累积，在140 GHz下较星地直连额外高出约146 dB。因此，更稳健的路线仍是“约140 GHz+星地直连+高海拔干燥站”，其中中继宜作为弹性补充而非主用架构[51]。

从吸收强度看，太赫兹大气衰减极为陡峭：标准大气中，水汽吸收在高频段占主导；557 GHz水汽共振线心处的比衰减随湿度线性增长（按P.676–13约1.7 dB•m^{-1}•g^{-1}•m^{3}），中等湿度下线心峰值可达约2×10^{4} dB/km[53]。这意味着，选用低衰减窗口优于提升发射功率。如表6所示，工程上应优先锁定0.1～0.4 THz低衰减窗口，并以动态频率切换规避临近吸收峰。

5.2 高功率发射器件瓶颈

器件功率与效率是太赫兹能否实现星载应用的硬性约束。而航天平台对功耗、体积、重量及热控有着严苛限制，叠加系统集成度短板，进一步加剧该矛盾，成为太赫兹空间应用面临的关键挑战之一，如表7所示。

太赫兹发射功率高度依赖源技术路线：固态电子源（磷化铟基高电子迁移率晶体管（HEMT）、异质结双极晶体管（HBT）、谐振隧穿二极管（RTD）及隧道注入渡越时间二极管（TUNNETT）等）在100～300 GHz可达瓦级，但≥1 THz即骤降至毫瓦级，效率亦急剧下降，其中RTD仅μW至mW级，更宜作本振或阵列化；光子学源（单行载流子光电二极管（UTC–PD）、光混频）虽可覆盖更高频段，却依赖强泵浦激光，系统复杂。目前，硅基IC已在440 GHz实现–3.9 dBm发射，SiGe BiCMOS在1.01 THz实现–10.7 dBm发射，印证了“频率越高、功率越弱”的趋势[9]。功率不足将导致链路余量严重不足，需借助大口径天线补偿，并进一步加剧指向精度与体积方面的约束；效率低下则直接转化为热耗，而星上废热仅能依靠辐射散热[54]。

在现阶段固态源功率受限的情况下，真空电子器件提供了实现更高连续波功率的替代路线：215～220 GHz行波管（TWT）输出功率可达5 W以上，其中215 GHz下连续波输出功率达28.6 W[55]。其虽效率偏低、对星上散热提出挑战，却为空间载荷级太赫兹发射提供了现实选项。因此，“固态小功率+高集成”与“电真空高功率+大体积”两条路线将长期并存，分别适配用户终端与骨干载荷。需要进一步研究的方向包括高效功放与功率合成、低噪高增益接收前端，以及与星上散热协同的热设计。

星上热环境构成关键约束：太空近似真空，废热仅能通过辐射器排散，散热面积与温度梯度均受严格限制。因此，器件效率直接转化为散热负担——效率每降低10个百分点，在同等发射功率下即会带来额外热负荷，需经辐射器排散。这决定了高效率与高功率同等重要，功率合成与热设计必须与链路预算协同优化，而不能仅优化单一指标。这也是星上算力“功率（W）+能效（TOPS/W）”双轴框架在器件层的延续：太赫兹要成为星上算力中心的射频基础，需首先突破功率、效率与集成三重技术约束。

5.3 波束捕获跟踪

太赫兹波束虽比激光宽1～2个数量级、对准精度要求约低百倍，但仍远窄于微波/毫米波，因此在星间/星地高速相对运动下必须依赖捕获、对准与跟踪来维持链路，一旦失锁就会引发链路中断。工程上普遍采用“粗瞄（机械转台）+精瞄（电子相控阵/快速转向镜）”两级闭环：星历预报开环指向→信标/导频捕获→高速功率/角度反馈锁定[56]。

表6　太赫兹大气低衰减窗口

大气窗口频率/THz	对应波长(大约)/μm	典型特点	适用场景提示
0.35	850	低衰减窗口	星地/星间候选(受水汽影响较小)
0.41	730	低衰减窗口	星地/星间候选
0.67	450	低衰减窗口	星地/星间可选
0.85	350	低衰减窗口	星地/星间可选
1.03	290	较高频,窗口更窄、损耗更大	星间/极短距为主

表7　太赫兹空间应用的高功率器件瓶颈

视角	瓶颈	量化证据/代表技术
功率/效率硬约束（固态源）	≥1 THz输出功率跌至mW，效率骤降	InP HEMT/HBT/RTD/TUNNETT：100～300 GHz瓦级，≥1 THz毫瓦级；RTD μW－mW
功率/效率硬约束（集成路线）	电子集成逼近1 THz的功率仍处亚毫瓦	Si IC 440 GHz～3.9 dBm；SiGe BiCMOS 1.01 THz ～10.7 dBm
功率/效率硬约束（光子源）	依赖强激光，系统复杂	UTC-PD/光混频覆盖高频，但体积与功耗并不具备优势
替代路线（真空电子）	连续波（CW）功率高，但效率低、散热难	215～220 GHz TWT ≥5 W（报道达28.6 W@215 GHz）连续波
集成度不足（模组）	功率、体积、质量难兼得	TeraLink 6U：发射功率 25 dBm + 天线增益 45 dBi（EIRP≈70 dBm）→链路速率 100 Mbit/s
热约束（真空辐射）	器件效率直接转化为散热负担	效率每降低10个百分点，在同等发射功率下会带来额外热负荷，需经辐射器排散

EIRP：等效全向辐射功率　HEMT：高电子迁移率晶体管　RTD：共振隧穿二极管　TWT：行波管
HBT：异质结双极晶体管　IC：集成电路　TUNNETT：隧道注入渡越时间二极管　UTC-PD：单行载流子光电二极管

由于波束较激光宽，太赫兹的捕获扫描范围更大、再捕获更快，且可借助电子相控实现宽角度扫描与灵活波束调度，被视为弥补激光不足的关键。实验方面，300 GHz光控相控阵已实现基于接收功率反馈的实时跟踪，静态合成增益达11.5 dB（接近理论极限），可在±40°范围内、最高3.58°/s角运动下稳定跟踪[57]。

指向误差抑制须应对姿态误差、百赫兹微振动与近300℃温差热变形等多类扰动。太赫兹波束较宽，对亚微弧度级精瞄的要求低于激光，可在较宽松容限内借助电子相控降低对精密机械的依赖；但初始捕获仍高度依赖星历精度与扫描策略。跟踪误差影响随频率升高而放大——在0.34 THz时影响有限，1.5 THz以上则显著劣化；星间平台振动达数百μrad时即造成约5%的指向衰减，可借相控阵孔径与波束赋形在容量与稳健性之间折中。即便如此，高阶调制（如16QAM）仍要求指向误差小于10 μrad，否则容量偏差将超过10%[58]，捕获跟踪精度需严格满足该精度下限。

5.4 通信标准缺失

在频谱层面，ITU对太赫兹（275～1 000 GHz）的划分目前仅覆盖地面有源业务：WRC-19在275～450 GHz内识别出137 GHz带宽供固定/陆地移动使用，并以脚注保护卫星地球探测（无源）业务；但面向空-地/空-空的空间有源业务（星间/星地太赫兹链路）尚未获得专门划分，亦未涉及路由、多跳与星间时频同步[59]。在组网协议层面，目前唯一成体系的太赫兹标准是IEEE 802.15.3d-2017：其仅定义252～325 GHz、最高100 Gbit/s的“交换式点对点”物理层（PHY）/媒体接入控制（MAC），面向短距无线个域网（WPAN），缺少路由、多跳与星间同步，无法直接支撑星座级空间组网。

标准碎片化的根源在于：太赫兹空间通信尚无在轨验证，难以形成基于实测的信道模型与协议需求；而既有标准仅定义短距点对点，与地面/星间NTN体系不衔接。近期可行路线是在既有天地一体协议内“以新增物理承载方式接入太赫兹”：复用空间数据系统咨询委员会（CCSDS）/空间数据协会（SDA）统一数据链路层（USLP同栈统一星地/星间，物理层兼容微波与激光），将太赫兹作为继微波、激光后的第3类承载，并对接3GPP NTN（TR 38.821）与6G太赫兹演进，待在轨验证积累后再推动专属组网标准。

6 结束语

星上算力中心已成为重要发展趋势，也是各国竞争的焦点，而高速互联是其关键使能要素。算力的空间部署只是起点，能否实现可靠连通与高速传输，才决定其能否有效运转。

太赫兹通信凭借超大带宽、小型化与准全天候等特性，为空间通信补齐了关键一环，弥补了微波通信容量有限、激光通信受天气影响较大的不足，已成为空间通信的重要技术路线。但太赫兹潜力虽大，却远未成熟——大气穿透、高功率器件、对准与标准化等难题仍有待攻克，从器件到协议、从星地大气传输到在轨验证，挑战依然严峻。

实现太空算力的高效运行，有赖于微波、激光、太赫兹的异构融合，构建完整的星间、星地通信链路。对此，未来研究可重点围绕以下方向开展系统攻关：

- 高效高功率THz固态源与功率合成：突破≥1 THz毫瓦级瓶颈，发展InP/GaN器件与阵列化功率合成；
- 大气窗口动态切换与高空平台（HAP）/中继星接力：以干燥站址、超大天线阵列与高空平台补偿链路损耗；
- 电子相控波束捷变与高可靠PAT：以“粗瞄+精瞄”两级闭环实现星间/星地快速捕获与稳定跟踪；
- 面向星间/星地的THz组网协议与标准：在NTN框架

内嵌太赫兹链路层，逐步推动专属标准；

• 星上智能路由、调度与算力预测：将通信、计算、散热一体化协同设计，使“流动智能”与“高速互联”协同演进。

综上所述，星上算力中心有望重塑未来信息基础设施格局，太赫兹通信是实现星间-星地互联、发挥太空算力效能的关键技术，虽具备巨大应用潜力，但现实挑战同样严峻，从器件、协议到星地传输与在轨验证，均需要产学研协同开展攻关。随着6G NTN标准化推进与在轨验证积累，“天地一体、算力无界”的全域分布式算力网络有望从理论构想逐步迈向工程实践。

参考文献

[1] 国家能源局. 去年全国算力中心总用电量1 700亿千瓦时 [EB/OL]. (2026-05-29) [2026-08-12]. https://www. nea. gov. cn/20260529/18c09743776c4dddb55288ceea38b8b1/c.html

[2] Smith S J, Hubbard A, Newkirk A,, et al. United States data center energy usage report: 2025 update [R/OL].[2026-08-12]. https://doi.org/10.71468/P1RP4F

[3] 新华网. 数据中心建设强化“算电协同” [EB/OL]. (2026-06-08) [2026-08-12]. https://www.news.cn/tech/20260608/05f785a31b4241d2a3abd6454c0fa9b0/c.html

[4] 陈岩, 宋文彬, 张平. 抢占太空算力战略制高点: 全球竞争态势与中国路径 [J]. 中国科学院院刊, 2026, 41(5): 1028-1039. DOI: 10.3724/j.issn.1000-3045.20260205002

[5] van Berkel K. The cost and network limits of space-based AI compute [PP/OL]. arXiv (2026-07-15) [2026-08-12]. https://arxiv.org/abs/2607.14172

[6] Gao W J, Han C, Chen Y, et al. Terahertz aerospace communications: enabling technologies and future directions [J]. Science China information sciences, 2025, 68(12): 220302. DOI: 10.1007/s11432-025-4652-0

[7] Han C, Wang Y Q, Li Y B, et al. Terahertz wireless channels: a holistic survey on measurement, modeling, and analysis [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2022, 24(3): 1670-1707. DOI: 10.1109/COMST.2022.3182539

[8] Jornet J M, Petrov V, Wang H, et al. The evolution of applications, hardware design, and channel modeling for terahertz (THz) band communications and sensing: ready for 6G [C]//Proceedings of the IEEE. IEEE, 2025: 920-951. DOI: 10.1109/JPROC.2024.3412828

[9] Choi W, University S N, Kenneth K O. Enabling applications of electromagnetic waves at 0.3 – 1.0 THz using silicon electronic integrated circuits [J]. ACS photonics, 2024, 11(4): 1362-1375. DOI: 10.1021/acsphotonics.3c01129

[10] Liu J T, Yang X W, Wei Y, et al. Integrated THz/FSO communications: a review of practical constraints, applications and challenges [J]. Micromachines, 2025, 16(11): 1297. DOI: 10.3390/mi16111297

[11] IEEE 802.15.3d-2017—Amendment 2: 100 Gbit/s wireless switched point-to-point physical layer [S]

[12] ITU. Radio regulations, resolution 246 (WRC-19): frequency ranges above 275 GHz for active services [R]. 2019

[13] 人民网. 中卫云计算产业用电负荷突破30万千瓦 [EB/OL]. (2026-05-27) [2026-08-12]. https://nx. people. com. cn/n2/2026/0527/c192482-41592198.html

[14] DC Deployed. Building data centers: inside the $500B construction gold rush [EB/OL]. (2026-06-12) [2026-08-12]. https://dcdeployed.com/articles/building-data-centers-inside-the-500b-construction-gold-rush/

[15] Data Center Atlas. The heat problem [EB/OL]. [2026-08-12]. https://dcatlas.io/en/frontiers/orbit/the-heat-problem

[16] Satnews. The “physics wall”: orbiting data centers face a massive cooling challenge [EB/OL]. (2026-03-17) [2026-08-12]. http://satnews. com/2026/03/17/the-physics-wall-orbiting-data-centers-face-a-massive-cooling-challenge/

[17] TechTimes. Falcon 9 reusability passes 650 flights: block 5 now flies past its accounting life [EB/OL]. (2026-06-12)[2026-08-12]. https://www. techtimes. com/articles/318286/20260612/falcon-9-reusability-passes-650-flights-block-5-now-flies-past-its-accounting-life.htm

[18] Business. Reusable rockets reshape global space race as launches surge [EB/OL]. (2026-07-11) [2026-08-12]. https://www.turkiyetoday. com/business/reusable-rockets-reshape-global-space-race-as-launches-surge-3223689 s=1

[19] 人民日报. 2025年我国用于人工智能训练和推理的数据总量同比增长42.86% [EB/OL]. (2026-04-29)[2026-08-12]. https://www.gov.cn/lianbo/202604/content_7067308.htm

[20] Bank of America Global Research. The AI data center systems market to reach $1.7 trillion by 2030 (45% CAGR) [R]. 2026

[21] FCC. Space bureau accepts for filing spacex’s application for orbital data centers [EB/OL]. (2026-02-04[2026-10-09]. https://docs.fcc.gov/public/attachments/DA-26-113A1.pdf

[22] Blaise A A, Travis B, Maria B, et al. Towards a future space-based, highly scalable AI infrastructure system design [EB/OL]. arXiv (2026-06-17) [2026-10-09]. https://doi. org/10.48550/arXiv.2511.19468

[23] 英伟达. 太空计算：利用NVIDIA加速计算平台，推动AI应用从地球扩展到太空 [EB/OL]. [2026-10-09]. https://www.nvidia.cn/edge-computing/space-computing/

[24] StarCloud. Star Cloud-1 [EB/OL]. [2026-10-09]. https://www.starcloud.com/starcloud-1

[25] Thales Alenia Space. Thales Alenia Space reveals results of ASCEND feasibility study on space data centers [EB/OL]. (2024-06-27) [2026-10-09]. https://www. thalesaleniaspace. com/en/press-releases/thales-alenia-space-reveals-results-ascend-feasibility-study-space-data-centers-0

[26] 之江实验室. 一箭十二星！太空计算卫星星座成功发射 [EB/OL]. (2025-05-14) [2026-10-09]. https://www. zhejianglab. org/lab/post/3617

[27] 人民日报. “星算计划”发布 [EB/OL]. (2024-12-02) [2026-10-09]. https://paper. people. com. cn/rmrbhwb/pc/content/202412/02/content_30032357.html

[28] 北京市科学技术委员会、中关村科技园管理委员会. 从“为什么”到“怎么做”，解读北京布局太空数据中心四大看点 [EB/OL]. (2025-12-08) [2026-10-09]. https://kw. beijing. gov. cn/ztzl/rdzt/kjrmt/202512/t20251208_4327255.html

[29] 天算星座. 天算星座 [EB/OL]. [2026-10-09]. http://www.tiansuan.org.cn/

[30] 中国经营网. 中国移动规划两星座2 664颗卫星 中低轨搭配组网 [EB/OL]. (2026-01-17) [2026-10-09]. http://www. cb. com. cn/index/show/bzyc/cv/cv135274661646

[31] Grattafiori A, Dubey A, Jauhri A, et al. The llama 3 herd of models [PP/OL]. arXiv (2024-07-31) [2026-08-12]. https://arxiv. org/abs/2407.21783

[32] Liang F, Zhang Z, Lu H F, et al. Communication-efficient large-scale distributed deep learning: a comprehensive survey [EB/OL]. arXiv (2024-09-09)[2026-08-12]. https://arxiv.org/abs/2404.06114

[33] SpaceX. Starlink version 3 satellites [EB/OL]. [2026-10-09]. https://starlink.com/tz/updates/starlink-version-3-satellites

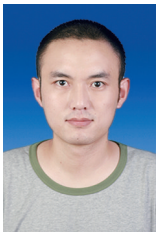
[34] Blue Origin. Terawave: space-based connectivity [EB/OL]. [2026-

10–09]. https://www.blueorigin.com/zh–CN/terawave
[35] Zhang Y H, Shu H W, Guo Y J, et al. Integrated photonics enabling ultra–wideband fibre – wireless communication [J]. Nature, 2026, 651(8105): 348–355. DOI: 10.1038/s41586–026–10172–9
[36] Zhang L, Zhu M, Yu J J, et al. Real–time simplified coherent photon–assisted 322GHz terahertz signals transmission over 30–m wireless using parallel Kramers–Kronig receiver and FPGA operation [C]//Proceedings of Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2026. Optica Publishing Group, 2026: M4H. 5. DOI: 10.1364/ofc.2026.m4h.5
[37] Xu Z C, Liu K, Chen W R, et al. Wireless real–time transmission of 101GHz terahertz signals over 19.6 km: fully solid–state prototype design and experimental validations [J]. npj Wireless technology, 2026, 2: 26. DOI: 10.1038/s44459–026–00025–2
[38] Cai Y C, Zhang L, Zhang J, et al. Surpassing kilometer–scale terahertz wireless communication beyond 300 GHz enabled by hybrid photonic – electronic synergy [J]. Light: science & applications, 2026, 15: 228. DOI: 10.1038/s41377–026–02321–6
[39] Baek I H, Stiewe O, Elschner R, et al. Record 221 Gbit/s dual polarization THz wireless transmission over 500 m using PCS–64QAM at 300 GHz [C]// Proceedings of Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2026. Optica Publishing Group, 2026: Mo2D–2
[40] Sung M, Moon S R, Kim S, et al. Toward practical photonic THz links: field demonstration of beam alignment for real–time wireless fronthaul at 300 GHz [C]//Proceedings of Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2026. Optica Publishing Group, 2026: M4H.4. DOI: 10.1364/ofc.2026.m4h.4
[41] First demonstration of 100 Gbit/s–class wireless transmission beyond 420 GHz: toward ultra–high speed mobile backhaul for 6G [EB/OL]. (2026–05–18) [2026–08–12]. https://www. tokushima–u. ac.jp/english/news/71627.html
[42] Amendola G, Cavallo D, Chaloun T, et al. Satellite microwave communications: the growing role of Ku/Ka–band technologies [J]. IEEE microwave magazine, 2023, 24(5): 38–51
[43] Fan F, Wang B, Zhang R Y, et al. Research on development and standardization of inter–satellite link technology [J]. Journal of astronautics, 2025, 46(12): 2450–2461. DOI: 10.3873/j.issn.1000–1328.2025.12.003
[44] Wang G, Yang F, Song J, et al. Free–space optical inter–satellite links: a survey of architectures, challenges and standardization [PP/OL]. arXiv (2023–10–26) [2026–08–12]. https://arxiv. org/pdf/2310.17505
[45] Hwang J S, Lee J Y, Chun H. Ego–satellite perspective multi–PAT configurations for O–ISL [J]. IEEE Access, 2024, 12: 144412–144419. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3469889
[46] 赵云, 王汉, 董滨滨, 等. 星地激光通信研究现状与前沿技术 [J]. 空间科学学报, 2025, 45(2): 612–628. DOI: 10.11728/cjss2025.02.2024–0148
[47] Aliaga S, Petrov V, Benincasa A, et al. Sub terahertz LEO satellite communication: vision, opportunities, and challenges toward the first prototype in space [PP/OL]. arXiv (2026–06–13) [2026–08–12]. https://arxiv.org/abs/2606.15410
[48] Zhou K X, Li J G, Zhou Q C, et al. Modeling and analysis of terahertz inter–satellite communication–ranging system under platform vibrations [J]. IEEE transactions on communications, 2026, 74: 4772–4788. DOI: 10.1109/TCOMM.2026.3663153
[49] ITU–R recommendation P. 676 attenuation by atmospheric gases [S]
[50] Jornet J M, Akyildiz I F. Channel modeling and capacity analysis for electromagnetic wireless nanonetworks in the terahertz band [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2011, 10(10): 3211–3221. DOI: 10.1109/TWC.2011.081011.100545
[51] Zhang M X, Chang W Z, Yang J, et al. Terahertz channel performance in ULEO satellite–to–ground communications [J]. Applied optics, 2026, 65(7): 2372. DOI: 10.1364/ao.584243
[52] Tang A, Li R. Terahertz communications empowering satellite internet: technological potential, link performance, and future challenges [J]. Acta optica sinica (online), 2025, 2(20): 2013001. DOI: 10.3788/AOSOL250495
[53] Taleb F, Alfaro–Gomez M, Al–Dabbagh M D, et al. Propagation of THz radiation in air over a broad range of atmospheric temperature and humidity conditions [J]. Scientific reports, 2023, 13: 20782. DOI: 10.1038/s41598–023–47586–8
[54] Dong H F, Akan O B. Fundamental limits of THz inter–satellite ISAC under hardware impairments [PP/OL]. 2025: arXiv: 2509.15902. https://arxiv.org/abs/2509.15902
[55] Zhang L Q, Ma G W, Jiang Y, et al. A wideband 220–GHz traveling wave tube based on slotted piecewise sine waveguide [J]. IEEE electron device letters, 2023, 44(8): 1352–1355. DOI: 10.1109/LED.2023.3285738
[56] Ding Y M, Shi X, Gao S, et al. Analysis of tracking–pointing error and platform vibration effect in inter–satellite terahertz communication system [C]//Proceedings of Chinese Automation Congress (CAC). IEEE, 2017: 430–434. DOI: 10.1109/CAC.2017.8242806
[57] Li B, Che M, Ye S H, et al. Demonstration of optoelectronic THz beam tracking using real–time phase optimization [J]. IEEE photonics technology letters, 2025, 37(19): 1109–1112. DOI: 10.1109/LPT.2025.3584618
[58] Cao D P, Shao M, Zhao T S. Analysis of the impact of spacecraft pointing error on terahertz communication [C]//Proceedings of 2025 IEEE 8th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC). IEEE, 2025. DOI: 10.1109/ITOEC63606.2025.10968382
[59] Kurner T, Hirata A. On the impact of the results of WRC 2019 on THz communications [C]//Proceedings of Third International Workshop on Mobile Terahertz Systems (IWMTS). IEEE, 2020: 1–3. DOI: 10.1109/iwmts49292.2020.9166206

作 者 简 介



宋瑞良，中国电子科技集团公司第五十四研究所北京研发中心主任，正高级工程师；主要研究领域为太赫兹通信、空天地一体化网络；承担国家重点研发计划、国家国防科技工业局（科工局）民用航天等国家及省部级重点项目10余项；获得省部级科技进步奖5项；发表论文50余篇，拥有授权专利30余项，出版论著1部。



张海鹏，中国电子科技集团公司第五十四研究所北京研发中心正高级工程师；主要研究领域为空天地一体化网络；发表论文20余篇，拥有授权专利20余项。