全电子太赫兹星地高速通信关键技术

Key Technologies for All-Electronic Terahertz High-Speed Satellite-to-Ground Communications

邓贤进/Deng Xianjin[1,2]，林长星/Lin Changxing[1,2]，刘娟/Liu Juan[1,2]
（1. 中国工程物理研究院微系统与太赫兹研究中心，中国 成都 610200；
2. 中国工程物理研究院电子工程研究所，中国 绵阳 621999）
(1. Microsystem and Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Chengdu 610200, China;
2. Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

DOI：10.12142/ZTETJ.202605006
网络出版地址：https://link.cnki.net/urlid/34.1228.TN.20261027.1052.002
网络出版日期：2026-10-27
收稿日期：2026-08-10

摘要：面向低轨卫星高速数据下传需求，针对太赫兹星地通信中大气衰减显著、星载资源受限及波束跟踪精度要求高等问题，结合太赫兹传播特性和现有技术开展系统级分析。通过比较地面验证系统与空间载荷架构，提出“星载端简化、地面端增强”的非对称全电子学架构；综合大气吸收、天线口径、传输容量和器件性能，建议采用220 GHz中心频率。结合青海站气象衰减参考值及前瞻性器件参数，以64APSK调制、码率5/6为代表工况，参考DVB-S2X公开性能参数进行链路预算。在40 Gbaud下，理论有效信息速率约197.5 Gbit/s，估算链路余量约为8.7 dB。进一步讨论了高功率发射、低温高灵敏度接收、分层波束跟踪及高能效基带处理的实现途径，为系统设计与试验验证提供参考。

关键词：全电子太赫兹；星地通信；高速通信；太赫兹收发机

Abstract: To meet the demand for high-speed data downlink from low Earth orbit (LEO) satellites, this paper presents a system-level analysis of all-electronic terahertz satellite-to-ground communications, addressing challenges such as significant atmospheric attenuation, limited onboard resources, and stringent beam tracking requirements. By comparing terrestrial demonstration systems and spaceborne payload architectures, an asymmetric all-electronic architecture featuring a simplified spaceborne terminal and an enhanced ground terminal is introduced. Considering atmospheric absorption, antenna aperture, transmission capacity, and device performance, 220 GHz is recommended as the operating center frequency. Based on atmospheric attenuation estimates for the Qinghai ground station and prospective device parameters, a link budget analysis is conducted using 64APSK modulation with a coding rate of 5/6 as a representative configuration, with reference to published DVB-S2X performance parameters. At a symbol rate of 40 Gbaud, the theoretical effective information rate is approximately 197.5 Gbit/s, with an estimated link margin of 8.7 dB. Key implementation approaches for high-power transmission, high-sensitivity cryogenic reception, hierarchical beam tracking, and energy-efficient baseband processing are further discussed, providing guidance for system design and experimental validation.

Keywords: all-electronic terahertz; satellite-ground communication; high-speed communication; terahertz transceiver

引用格式：邓贤进，林长星，刘娟．全电子太赫兹星地高速通信关键技术 [J]. 中兴通讯技术，2026, 32(5): 38-44. DOI: 10.12142/ZTETJ.202605006

Citation: Deng X J, Lin C X, Liu J. Key technologies for all-electronic terahertz high-speed satellite-to-ground communications [J]. ZTE technology journal, 2026, 32(5): 38-44. DOI: 10.12142/ZTETJ.202605006

随着卫星互联网、高分辨率对地观测、空间科学探测和在轨智能处理的发展，卫星载荷的数据生成速率持续提高。传统微波星地链路受频谱资源和瞬时带宽限制，已逐渐成为海量数据实时回传的瓶颈。激光通信可提供较高的传输容量，但其链路建立对云层、湍流、平台稳定度及高精度瞄准、捕获与跟踪较为敏感。太赫兹频段位于毫米波与光波之间，兼具宽频谱、短波长和高方向性等特点，能够在有限天线口径下获得较高增益，被认为是未来高速星地及星间通信的重要候选频段之一[1-3]。

基金项目：国家重点研发计划项目（2023YFF0722303）

按照太赫兹信号产生与处理的技术途径，太赫兹通信系统主要可分为全电子学、光子学和光电融合3种技术路线。其中，全电子学技术路线主要利用电子器件实现太赫兹信号的产生、变频、放大和接收，不依赖光拍频及光电转换等方式产生太赫兹载波。全电子学技术涵盖固态电子、真空电子及低温超导电子等器件技术。该路线能够延续微波和毫米波通信系统的技术架构，充分发挥固态电子器件集成度高、易于小型化，真空电子器件输出功率高，以及低温超导接收器件噪声低等优势，为远距离、高速率星地通信提供技术支撑[2,4]。

目前，全电子太赫兹技术已从器件研制与短距试验，发展到远距离实时链路验证和空间载荷设计。中国0.14 THz系统实现了21 km、5 Gbit/s实时通信，并完成了27 km海面500 Mbit/s实时通信[5–6]；481.4 GHz高原链路利用天文望远镜和超导体–绝缘体–超导体（SIS）接收机完成了1.2 km高清视频传输[7]。国际上，W–Cube完成了75 GHz在轨传播测量[8]，EIVE开展了71～76 GHz调制数据传输验证[9–10]，TeraLink提出了225 GHz立方星原型技术路线[11–12]。相关研究还涉及高原链路预算、分层大气信道、临近空间中继及空天地通感融合[13–21]，如表1所示。基于上述进展，本文围绕星地通信系统总体设计、太赫兹高功率发射、高灵敏度接收、自动波束跟踪及高能效基带处理等方面，梳理了全电子太赫兹星地高速通信的关键技术与实现路线。

1 太赫兹星地通信总体技术

1.1 全电子学通信系统架构

全电子太赫兹通信系统主要由高速数字基带、中频收发通道、太赫兹射频前端、高增益天线及波束跟踪设备等组成。中国地面通信验证系统主要通过提高发射功率、天线增益和基带处理能力实现远距离高速传输，并利用低温超导接收技术进一步提升接收灵敏度[5,7]；其他国家的空间通信载荷则更注重系统的小型化、低功耗及空间环境适应性[8–12]。两类系统架构各具优势，但受卫星载荷体积、质量和功耗约束，地面高性能收发架构难以直接应用于星载系统。

综合现有地面通信验证系统与空间载荷设计经验，面向低轨卫星高速数据下传需求，本文提出“星载端简化、地面端增强”的非对称全电子学通信架构。星载发射端采用固态电子器件完成太赫兹信号产生与上变频，并通过固态功率放大器与真空电子行波管级联实现高功率输出；地面接收端采用高增益天线，结合低温SIS超导接收机实现高灵敏度接收。同时，系统采用“低频测控与辅助捕获、高频突发数传”的双平面设计：由S/Ka波段链路承担遥测遥控、星历更新和失锁恢复等功能，太赫兹链路则在可见性及气象条件满足时完成高速数据下传，地面站结合轨道预报与闭环精跟踪保障通信稳定。

1.2 频段选择

星地太赫兹通信的频段选择需综合考虑大气传播特性、天线口径、通信带宽及器件实现能力。受大气中氧气和水蒸气分子吸收的影响，太赫兹波在不同频率上的传播衰减存在明显差异。根据ITU–R P.676大气吸收模型[22]，本文计算了标准大气条件下干燥空气与湿空气的气体吸收衰减系数，结果如图1所示。由图1可知，水蒸气吸收显著影响太赫兹频段的衰减特性，但仍存在若干气体吸收相对较弱的传输窗口，可为星地高速通信的频段选择提供依据。

对于星地定向通信系统，频段选择不仅需考虑大气吸收，还应结合天线口径约束进行分析。在相同发射功率和收发天线物理口径条件下，提高频率可增加天线增益，但同时也会受到大气吸收增强的制约[23]。为比较不同频段的综合链路性能，假设发射功率为40 dBm，收发天线口径均为0.2 m，针对50 km空地链路进行计算，结果如图2所示。在上述条件下，200～300 GHz频段表现出较好的接收信噪比性能。其中，在相同天线口径和效率条件下，220 GHz相比140 GHz在理想几何链路条件下具有约3.9 dB的增益优势。

在链路性能比较的基础上，进一步分析不同频段的高速

表1　代表性全电子太赫兹（含高毫米波）星地链路与前期验证成果

年份	频率	距离/场景	实时速率说明	主要技术特征	文献
2017	0.14 THz	21 km地面	5 Gbit/s	瓦级电子发射、常温固态接收	[5]
2021	0.14 THz	27 km海面	500 Mbit/s	远距离海面实时链路	[6]
2021	75 GHz	约535 km低轨	连续波信标	Q/W双频传播测量，非数传	[8]
2023	71～76 GHz	低轨6U立方星	目标6～15 Gbit/s	5 GHz带宽、调制数据在轨验证	[9–10]
2025	481.4 GHz	1.2 km高原	高清视频	15 μW发射、望远镜+SIS接收	[7]
2025—2026	225 GHz	TeraLink拟在轨	多GHz带宽（设计）	紧凑前端、喇叭阵列与RFSoC	[11–12]

RFSoC：射频片上系统　　SIS：超导体–绝缘体–超导体

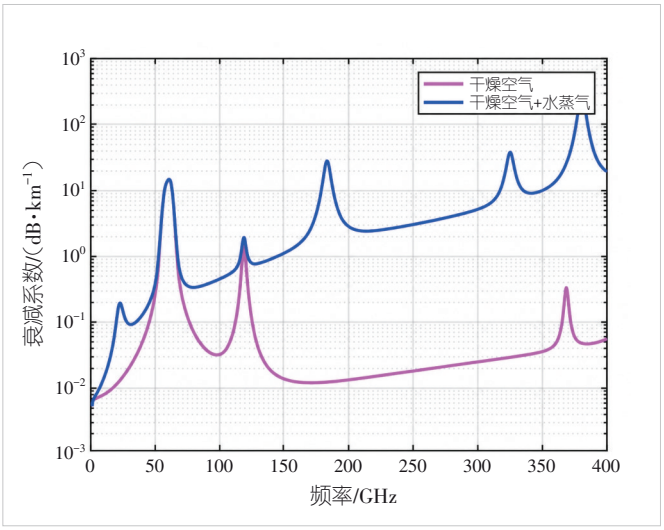


图1　电磁波标准大气吸收曲线

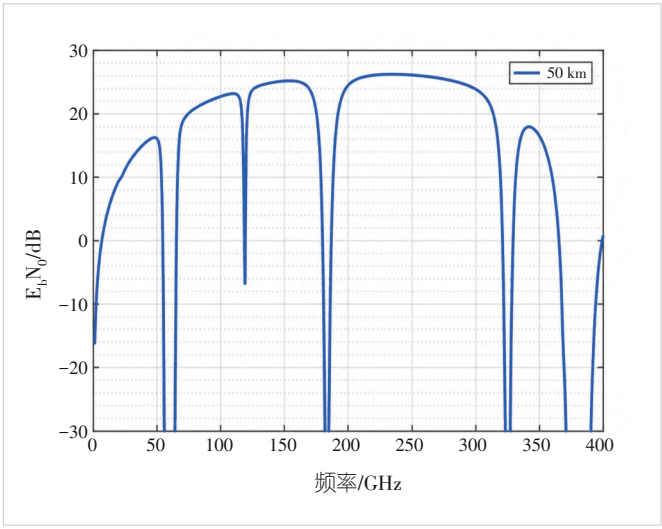
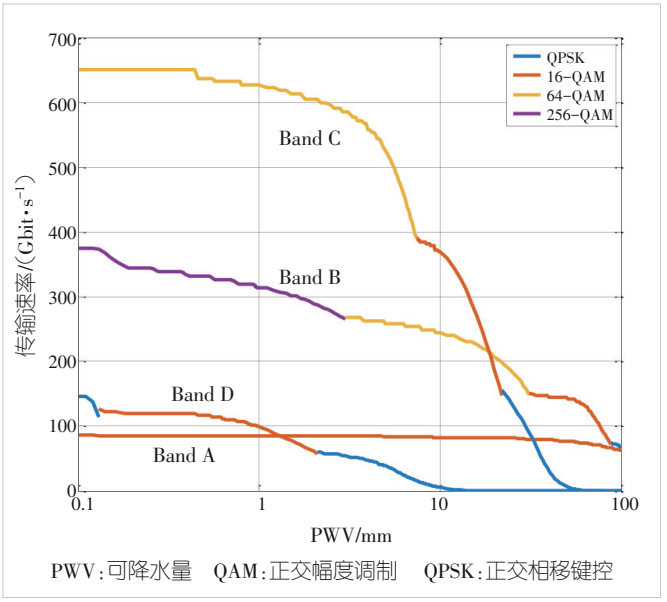


图2　相同发射功率和天线口径下的接收比特信噪比

数据传输能力。根据大气中氧气和水蒸气的主要吸收峰位置，将2～555 GHz频率范围划分为4个频段：A频段（2～66 GHz）、B频段（66～186 GHz）、C频段（186～327 GHz）和D频段（327～555 GHz）。在相同天线口径条件下，本文综合考虑不同频段的发射功率、接收灵敏度及调制方式等因素，分析大气可降水量（PWV）对各频段传输速率的影响，结果如图3所示。由图3可知，在所采用的参数条件下，当PWV低于20 mm时，C频段展现出较大的高速传输潜力，理论传输速率可达200～600 Gbit/s，体现了该频段在大气传播特性与高速数据传输能力方面的综合优势。

综合上述分析，220 GHz位于C频段（186～327 GHz），在有限天线口径条件下可获得较高的天线增益。同时，该频段已具备高功率行波管、固态功率放大器和低温超导接收器



PWV：可降水量　QAM：正交幅度调制　QPSK：正交相移键控

图3　不同PWV下各频带传输速率对比

件等研究基础[7,24–26]。因此，综合考虑大气传播、天线口径、高速传输能力及器件发展水平，本文建议采用220 GHz作为全电子太赫兹星地高速通信系统的中心工作频率，其系统级可行性将在后续链路预算中进一步评估。

1.3 链路可行性及连通率分析

在确定系统架构和推荐中心工作频率后，需进一步评估220 GHz星地高速通信的链路可行性。传统星地通信通常结合轨道几何、大气传播统计和链路预算评估通信可用性[27]，该方法同样适用于太赫兹星地通信的系统级分析。然而，220 GHz频段的大气分子吸收更强，器件性能约束也更显著，需结合相应传播特性和收发机参数进行评估。

对于低轨卫星，通信斜距和仰角随过站时间变化，链路损耗呈现动态变化特征。链路连通率可定义为几何可见期间满足通信门限的有效通信时间占比，并可结合轨道过站统计、气象衰减分析和链路预算进行联合评估。本文重点分析220 GHz频段的大气衰减条件及预期器件参数下的链路预算，为后续动态连通率验证提供设计依据。

以青海德令哈站为例，本文结合风云FY-3A卫星遥感旬数据、FY-3C卫星轨道数据、NASA Aqua与Terra卫星遥感资料，以及ITU-R P.676[22]、P.618[27]和P.840[28]传播模型，估算220 GHz信号的气体吸收、云雾衰减和降雨衰减。表2给出了99.9%、99%、95%和90%概率水平下各项衰减及其叠加结果，对应的叠加衰减分别为40.7 dB、19.6 dB、11.4 dB和9.3 dB。需要说明的是，该结果主要供链路设计参考，部分传播模型在220 GHz频段的适用性及外推误差

表2 青海站地区大气层引起的220 GHz总衰减

概率阈值/%	大气衰减/dB	云雾衰减/dB	降雨衰减/dB	总衰减/dB
99.9	8.9	8	23.8	40.7
99	8.7	4.2	6.7	19.6
95	8.1	1	2.3	11.4
90	7.8	0.2	1.3	9.3

仍需进一步验证。

在上述分析基础上，采用1.1节提出的非对称全电子学架构，对220 GHz星地高速通信进行前瞻性链路预算，结果如表3所示。假设卫星轨道高度为500 km、通信斜距为1 000 km，星载发射功率为46 dBm（40 W），收发天线增益分别为64 dBi和70 dBi；自由空间损耗取199.3 dB，大气衰减参考青海站气象统计结果取20 dB，其他损耗取3 dB，则接收功率约为−42.3 dBm。地面采用低温SIS接收机，简化预算中取单边带等效接收噪声温度为200 K，暂不计入大气辐射及馈线等附加噪声。

表3 220 GHz星地高速通信链路预算表(64APSK 5/6代表工况)

项目	值	单位	说明
工作频率	220	GHz	
传输距离	1 000	km	轨道高度500 km
发射功率	46	dBm	调制信号线性平均输出功率假设
发射天线增益	64	dBi	口径约1 m
自由空间损耗	−199.3	dB	220 GHz,距离1000 km
大气空间损耗	−20	dB	青海站19.6 dB参考值取整
接收天线增益	70	dBi	口径约2.5 m,HPBW约0.0353°
其它损耗	−3	dB	对准等损耗
接收信号功率	−42.3	dBm	按链路功率预算计算
接收噪声温度	200	K	单信号边带等效值,简化假设
编码调制	64APSK 5/6	—	DVB−S2X, LDPC/BCH级联编码[30]
符号率	40	Gbaud	
滚降系数	0.15	—	DVB−S2X支持[30]
信号带宽	46	GHz	40×1.15
物理层空口速率	240	Gbit/s	未扣除编码及成帧开销
有效信息速率	197.5	Gbit/s	标准正常帧、无导频条件
接收符号信噪比	27.3	dB	
标准解调译码门限	16.55	dB	64APSK、5/6,理想AWGN,QEF条件[30]
解调实现损耗	2	dB	预算假设
链路余量	8.72	dB	

APSK：幅度相移键控
AWGN：加性高斯白噪声
BCH：博斯−乔杜里−霍昆格姆码
DVB−S2X：第2代数字视频广播卫星扩展标准
LDPC：低密度奇偶校验码
QEF：准无误码

对比参考数字视频广播卫星通信标准（DVB−S2/S2X）[29−30]，本文选择64APSK、码率5/6的低密度奇偶校验码（LDPC）/博斯−乔杜里−霍昆格姆码（BCH）级联编码作为代表工况，符号率取40 Gbaud，滚降系数取0.15，对应信号带宽约46 GHz，物理层空口毛速率为240 Gbit/s。根据标准正常帧、无导频条件下的频谱效率，获得有效信息速率约为197.5 Gbit/s，接收符号信噪比E_s/N_0约为27.3 dB。在理想加性高斯白噪声（AWGN）条件下，采用DVB−S2X标准给出的准无误码门限16.55 dB[30]，并预留2 dB接收实现损耗，得到理论链路余量约为8.7 dB。采用相同链路参数与计算方法，选择32APSK 9/10和128APSK 3/4模式时，标准条件下有效信息速率分别约为178.1 Gbit/s和206.5 Gbit/s，可在可靠性和传输容量之间进行模式选择。

2 太赫兹高功率发射前端技术

面向220 GHz星地高速通信需求，星载发射前端需兼顾高输出功率、宽带调制及载荷功耗等要求。受现有太赫兹固态功率放大器输出能力限制，单纯采用固态电子技术难以同时满足远距离高速传输需求。因此，本文建议采用固态电子与真空电子器件相结合的全电子学发射架构：由固态器件完成宽带信号产生与驱动，由高功率行波管实现末级放大，从而兼顾固态电子技术的集成化优势与真空电子器件的高功率输出能力。

推荐的发射前端架构如图4所示。考虑到国产高速模数转换器（ADC）/数模转换器（DAC）器件在采样率、模拟带宽及有效位数等方面的限制，采用零中频I/Q正交调制架构，通过I、Q两路并行基带处理降低单通道高速数模转换的实现难度。高速DAC产生的I、Q基带信号经滤波后，由太赫兹正交次谐波混频器上变频至220 GHz，本振信号由低相噪频率源经倍频链产生。上变频信号经固态功率放大及必要的功率合成后，由太赫兹行波管进行末级功率放大，并通过高增益天线发射。该架构的关键技术主要包括宽带低相噪频率源、固态功率放大与合成技术，以及宽带高功率行波管。

在固态功率放大方面，Huang等研制的220 GHz功率放大器饱和输出功率超过了400 mW，在215.4 GHz处达到436 mW，最大有源功率合成效率达到89%[24]。在真空电子功率放大方面，Zhang等研制的220 GHz行波管实测最大输出功率达到31.2 W，3 dB带宽超过23 GHz，功率带宽积大于717.6 W·GHz[25]。上述成果为星载高功率发射提供了器件基础，但与本文链路预算采用的40 W发射功率和46 GHz

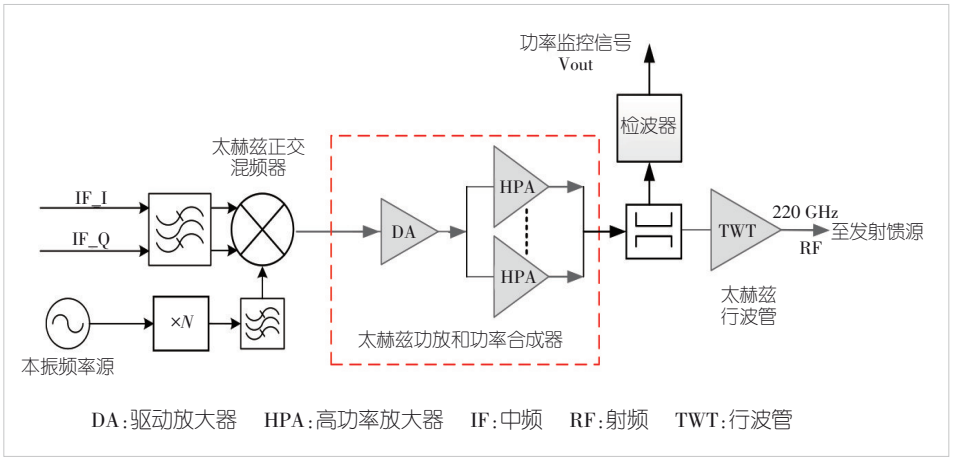


图4　固态驱动与行波管级联的全电子太赫兹发射前端架构

信号带宽相比仍有差距，尚需突破宽带高功率线性放大技术，改善增益平坦度与功率回退能力，并进一步应对星载高压电源、散热、重量及空间环境可靠性等工程约束。

3 太赫兹高灵敏度宽带接收前端技术

面向220 GHz星地高速通信需求，地面接收前端需具备高灵敏度和宽带接收能力。现有全电子太赫兹接收技术主要包括常温固态和低温超导两种技术路线。常温固态接收技术具有集成度高、功耗较低等优势，但接收噪声相对较高。目前，中国288～318 GHz频段固态接收前端的噪声温度为1 055～1 722 K[31]，195～230 GHz频段高集成接收前端的噪声温度为1 009～1 158 K[32]。相比之下，低温超导接收可获得更高的接收灵敏度，更适用于对设备体积和功耗约束相对宽松的地面接收站。

SIS混频器可在低温条件下实现接近量子噪声极限的接收性能。紫金山天文台已研制出工作于200～280 GHz频段、双边带噪声温度低于100 K的SIS接收器件[26]。2025年，Miao等采用工作于481.4 GHz、输出功率为15 μW的电子学发射机，结合60 cm口径卡塞格伦望远镜与接近量子极限的SIS接收机，实现了1.2 km高清视频实时传输[7]，验证了低温超导技术在低发射功率通信中的应用潜力。

综合考虑接收性能与工程实现条件，本文建议地面站采用大口径高增益天线与低温SIS接收机相结合的技术方案。根据现有SIS器件的噪声性能，在双边带增益相等的假设下，简化链路预算中取单边带等效接收噪声温度为200 K。

4 高精度高增益太赫兹自跟踪技术

高增益天线是补偿太赫兹星地链路损耗的重要手段，但天线增益越高，波束宽度越窄，对指向精度的要求也越高。根据表3的链路设计参数，220 GHz地面接收天线增益为70 dBi，半功率波束宽度约为0.035 3°。采用高斯主瓣近似模型时，天线指向损耗可表示为：

$$L_p \approx 12\left(\frac{\theta_e}{\theta_{\mathrm{HPBW}}}\right)^2 \qquad (1),$$

其中，θ_e为指向误差，θ_{HPBW}为半功率波束宽度。若将地面天线指向损耗控制在1 dB以内，则要求指向误差不超过约0.010°，体现了太赫兹高增益天线对精密跟踪的要求。

低轨卫星运动速度快，过站期间天线指向角度和角速度均持续变化。图5给出了500 km轨道卫星的角速度和距离变化仿真结果。在所示条件下，地面和星载天线的跟踪角速度不超过1°/s。此外，轨道预报误差、卫星姿态扰动和平台振动等因素也会影响跟踪精度。因此，仅依靠机械转台或轨道预报难以满足窄波束持续对准要求，需结合轨道预报与闭环误差补偿。

针对上述需求，本文建议采用“预报粗跟踪–信标捕获–闭环精跟踪”的分层架构。首先，根据轨道根数和地面站位置预测卫星运动轨迹，并由机械转台完成粗指向；随后，利用Ka波段或太赫兹宽波束信标完成搜索与捕获，并根据接收信号强度及测角结果判断是否进入窄波束捕获范围；最后，采用单脉冲测角、四象限检测或小规模电子扫描生成误差信号，驱动闭环精跟踪。精跟踪阶段，机械转台跟随预测轨迹，

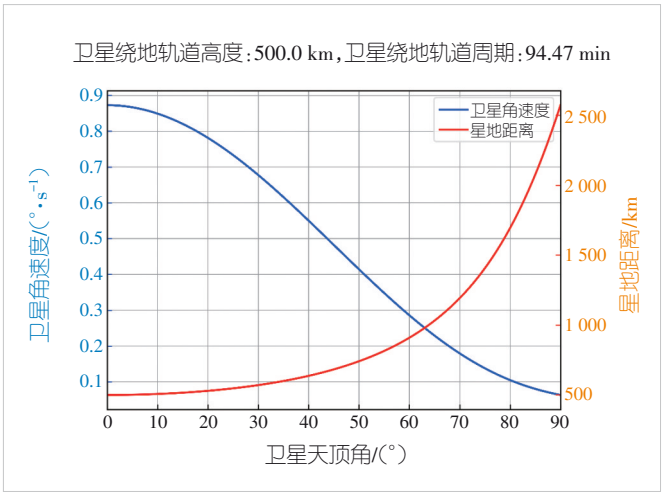


图5　500 km轨道卫星角速度及距离仿真结果

电子扫描或精密伺服补偿残余指向误差。当误差超出跟踪范围或信标失锁时，系统重新进入搜索与捕获阶段。在工程实现中，捕获时间取决于搜索角域、扫描步进及信标驻留时间，闭环带宽则需根据轨道预报残差和平台扰动特性确定。

5 高能效基带通信信号处理技术

面向220 GHz星地高速通信，200 Gbit/s级实时基带处理对数字吞吐能力、数据转换速率及星载功耗提出较高要求。根据表3中64APSK调制、码率5/6的代表工况，在40 Gbaud符号率下，编码后空口原始速率为240 Gbit/s，信号带宽约为46 GHz，标准条件下有效信息速率约为197.5 Gbit/s。LDPC/BCH编译码、调制映射及帧处理均需满足相应的实时吞吐要求。受高速DAC/ADC器件带宽、星载处理平台资源与功耗、抗辐照能力等限制，单片射频片上系统（RFSoC）难以直接完成该量级的实时处理，需探索多芯片协同、分路并行及高能效专用集成电路（ASIC）等实现架构。

大规模并行是提升基带吞吐率的重要手段，但不同信号处理模块对并行化的适应性存在差异。对于调制映射、有限脉冲响应（FIR）滤波等前向处理模块，可通过多路并行降低内部工作时钟频率；而载波同步、定时同步及自适应均衡等反馈处理模块，其性能受环路延迟和参数更新速率制约。过高的并行度可能增加反馈延迟和跨通道同步复杂度，降低动态跟踪性能。因此，高速基带设计不仅需要提升并行处理能力，还应采用低延迟环路结构、前馈与反馈相结合的同步算法以及适合并行实现的参数更新机制，以便在处理吞吐率、跟踪性能与硬件资源之间取得平衡。

中国在高速太赫兹基带处理方面已开展20 Gbit/s级实时通信研究，并在FIR滤波器并行实现、定时同步等算法方面取得进展[33-34]。此外，Benincasa等提出的225 GHz立方星通信载荷采用RFSoC实现集成数字处理[11-12]，为小型化空间载荷设计提供了参考。但面向40 Gbaud单载波通信，现有RFSoC在逻辑资源、数据转换能力及功耗方面仍存在限制。未来需重点突破低延迟高并行同步解调、超大规模实时信号处理、高速ADC/DAC及高能效专用基带芯片等关键技术，以满足200 Gbit/s级星地高速通信需求。

6 结束语

综合太赫兹传播特性、星地通信需求及现有器件技术水平，本文采用220 GHz作为中心工作频率，推荐“星载端简化、地面端增强”的非对称全电子学架构，并将固态驱动与行波管级联发射、大口径天线与低温SIS接收相结合的技术方案作为关键实现途径。结合青海站气象衰减参考值与预期器件参数，选取64APSK调制、码率5/6作为代表工况开展链路预算。结果表明，在40 Gbaud符号率及设定条件下，有效信息速率约为197.5 Gbit/s，链路余量估算约为8.7 dB，具备突破200 Gbit/s高速数据下传的理论潜力。

上述结果依赖于宽带高功率线性发射、低噪声宽带接收及理想编码调制性能等假设。工程实现仍需突破行波管宽带线性放大与非线性补偿、低温宽带接收、高精度波束跟踪、高速LDPC编译码及低环路延迟同步解调等关键技术，并通过地面及在轨试验验证实际通信性能与动态链路连通率，为全电子太赫兹星地高速通信系统设计提供参考。

参考文献

[1] Akyildiz I F, Han C, Hu Z F, et al. Terahertz band communication: an old problem revisited and research directions for the next decade [J]. IEEE transactions on communications, 2022, 70(6): 4250-4285. DOI: 10.1109/tcomm.2022.3171800

[2] 邓贤进, 姚军, 林长星, 等. 6G新频谱: 太赫兹无线通信之“思与行” [J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2022, 20(2): 159-165. DOI: 10.11805/TKYDA2021309

[3] Xing Y C, Rappaport T S. Terahertz wireless communications: co-sharing for terrestrial and satellite systems above 100 GHz [J]. IEEE communications letters, 2021, 25(10): 3156-3160. DOI: 10.1109/lcomm.2021.3088270

[4] Makhlouf S, Cojocari O, Hofmann M, et al. Terahertz sources and receivers: from the past to the future [J]. IEEE journal of microwaves, 2023, 3(3): 894-912. DOI: 10.1109/JMW.2023.3282875

[5] 吴秋宇, 林长星, 陆彬, 等. 21km, 5Gbps, 0.14THz无线通信系统设计与试验 [J]. 强激光与粒子束, 2017, 29(6): 1-4. DOI: 10.11884/HPLPB201729.170064

[6] Juan L, Zhou R, Wu Q Y, et al. A 27 km over sea surface, 500Mbps, real time wireless communication system at 0.14 THz [C]//Proceedings of 46th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz). IEEE, 2021: 1-2. DOI: 10.1109/irmmw-thz50926.2021.9567641

[7] Miao W, Li J, Deng X J, et al. Achieving 500 GHz communication over 1.2 km using an astronomical telescope with a quantum-limited superconducting receiver [J]. National science review, 2025, 12(8): nwaf222. DOI: 10.1093/nsr/nwaf222

[8] Säily J, Kuhno J, Flavio J, et al. First results from the W-CUBE mission: CubeSat-based characterization of wave propagation of W-band and Q-band signals [C]//Proceedings of the 1st ESA Space Microwave Week. ESA/ESTEC, 2023: 1-6

[9] Manoliu L, Schoch B, Haussmann S, et al. The technology platform of the EIVE CubeSat mission for high throughput downlinks at W-band [J]. Acta astronautica, 2023, 205: 80-93. DOI: 10.1016/j.actaastro.2023.02.039

[10] Kranz M, Eggert M, Koller M, et al. One year satellite operations of the E-band technology demonstration CubeSat EIVE [EB/OL]. [2026-08-12]. https://digitalcommons. usu. edu/smallsat/2024/all2024/52/

[11] Benincasa A, Aliaga S, Diez-Comas A, et al. A radio payload for in-space sub-terahertz communications [EB/OL]. [2026-08-12]. https://unlab. tech/wp-content/uploads/2025/10/A-Radio-Payload-for-In-Space-Sub-Terahertz-Communications.pdf

[12] 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
[13] Zhen R C, Han C. Link budget analysis for massive-antenna-array-enabled terahertz satellite communications [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (science), 2018, 23(1): 20-27. DOI: 10.1007/s12204-018-1904-2
[14] Yang Z R, Gao W J, Han C. A universal attenuation model of terahertz wave in space-air-ground channel medium [J]. IEEE open journal of the communications society, 2024, 5: 2333-2342. DOI: 10.1109/OJCOMS.2024.3386759
[15] 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
[16] Suen J Y, Fang M T, Denny S P, et al. Modeling of terabit geostationary terahertz satellite links from globally dry locations [J]. IEEE transactions on terahertz science and technology, 2015, 5(2): 299-313. DOI: 10.1109/TTHZ.2015.2399694
[17] Balal Y, Pinhasi Y. Atmospheric effects on millimeter and sub-millimeter (THz) satellite communication paths [J]. Journal of infrared, millimeter, and terahertz waves, 2019, 40(2): 219-230. DOI: 10.1007/s10762-018-0554-7
[18] Kokkoniemi J, Jornet J M, Petrov V, et al. Channel modeling and performance analysis of airplane-satellite terahertz band communications [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2021, 70(3): 2047-2061. DOI: 10.1109/TVT.2021.3058581
[19] Civas M, Akan O B. Terahertz wireless communications in space [J]. ITU journal on future and evolving technologies, 2021, 2(7): 31-38. DOI: 10.52953/ecrl1540
[20] Mao T Q, Zhang L Y, Xiao Z Y, et al. Terahertz-band near-space communications: from a physical-layer perspective [J]. IEEE communications magazine, 2024, 62(2): 110-116. DOI: 10.1109/MCOM.004.2200429
[21] Han C, Gao W J, Yang C, et al. Joint communication and radar sensing for terahertz space-air-ground integrated networks (SAGIN) [J]. IEEE wireless communications, 2026, 33(3): 204-211. DOI: 10.1109/MWC.2025.3618244
[22] ITU-R P.676-13 Attenuation by atmospheric gases and related effects [S]
[23] Kumar R, Arnon S. SNR optimization for LEO satellite at sub-THz frequencies [J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2022, 70(6): 4449-4458. DOI: 10.1109/TAP.2022.3140217
[24] Huang K, Zhang X J, Li R X, et al. Metal 3-D stacking-enabled WR4.3-band power amplifier featuring high-power-density TM01-mode radial power combiner [J]. IEEE microwave and wireless technology letters, 2025, 35(7): 1033-1036. DOI: 10.1109/LMWT.2025.3557265
[25] Zhang L Q, Song R, Lei W Q, et al. Demonstration of a 220-GHz wideband high power low reflection folded waveguide traveling-wave tube [J]. IEEE transactions on electron devices, 2024, 71(9): 5679-5685. DOI: 10.1109/TED.2024.3427615
[26] Liu B L, Liu D, Yao M, et al. Noise performance of a 200 - 280 GHz mixer with Nb-AlN-NbN superconducting tunnel junctions [C]//Proceedings of Infrared, Millimeter-Wave, and Terahertz Technologies IX. SPIE, 2022: 6. DOI: 10.1117/12.2642052
[27] ITU-R P. 618-14 Propagation data and prediction methods required for the design of earth-space telecommunication systems [S]
[28] ITU-R P.840-9 Attenuation due to clouds and fog [S]
[29] ETSI EN 302 307-1 V1.4.1 Digital Video Broadcasting (DVB); second generation framing structure, channel coding and modulation systems for broadcasting, interactive services, news gathering and other broadband satellite applications; part 1: DVB-S2 [S]
[30] ETSI EN 302 307-2 V1.2.1 Digital Video Broadcasting (DVB); second generation framing structure, channel coding and modulation systems for broadcasting, interactive services, news gathering and other broadband satellite applications; part 2: DVB-S2 extensions (DVB-S2X) [S]
[31] 丁江乔, 梁启尧, 蒋均, 等. 基于肖特基二极管的310 GHz紧凑型接收机前端 [J]. 强激光与粒子束, 2024, 36(8): 083002. DOI: 10.11884/HPLPB202436.240119
[32] Huang K, Zhang L, Li R X, et al. A compact hybrid G-band heterodyne receiver integrated with millimeter microwave integrated circuits and Schottky diode-based circuits [J]. Electronics, 2023, 12(13): 2806. DOI: 10.3390/electronics12132806
[33] 王颖, 刘娟, 郝鑫, 等. 用于太赫兹高速通信的FIR滤波器64并行实现算法 [J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020, 18(4): 560-564. DOI: 10.11805/TKYDA2018327
[34] Hao X, Lin C X, Wu Q Y. A parallel timing synchronization structure in real-time high transmission capacity wireless communication systems [J]. Electronics, 2020, 9(4): 652. DOI: 10.3390/electronics9040652

作 者 简 介



邓贤进，中国工程物理研究院电子工程研究所研究员、博士生导师，国务院政府特殊津贴获得者，现任中国工程物理研究院微系统与太赫兹研究中心太赫兹技术首席专家、研究室主任；主要研究方向为太赫兹科学技术、微波电路与系统、太赫兹通信系统等；先后主持和参与多项国家级重点项目，作为项目首席专家牵头了0.14 THz超高速无线通信系统实验研究、太赫兹固态源技术等重点项目；获得省部级科技进步奖一等奖、二等奖、三等奖共12项；发表论文50余篇，获授权国家发明专利20余项，出版专著1部。



林长星，中国工程物理研究院电子工程研究所研究员、博士生导师，现任中国工程物理研究院微太中心太赫兹通信与雷达技术研究室副主任，微太中心太赫兹通信方向负责人，中物院首批青年科技领军后备人才、第二届青年科研新秀；主要研究方向为太赫兹通信系统设计与验证、太赫兹信道建模、高速调制解调与编译码等高速通信信号处理算法设计及实现；主持和参与国家级课题10余项，带领团队完成国际最远距离30 km的系列太赫兹无线通信演示系统及国际首次太赫兹机载通信演示；获军队及省部级科技进步奖一等奖1项、二等奖2项、三等奖1项，院所科技创新奖2项；发表论文40余篇，获授权国家发明专利11项，出版专著1部。



刘娟，中国工程物理研究院电子工程研究所副研究员；主要研究方向为毫米波/太赫兹通信系统设计与验证、高速调制解调信号处理算法设计及实现，通感一体化系统及高速信号处理研究等；完成0.14 THz国际最远距离（海面30 km）太赫兹无线通信演示系统；获国家级创新应用奖1项、院所科技创新奖1项。