光子太赫兹：大容量高可靠星地传输的新途径

Photonic Terahertz: A New Path Toward High-Capacity and Reliable Satellite-Ground Transmission

蒋羽彤/Jiang Yutong[1]，张教/Zhang Jiao[1,2]，朱敏/Zhu Min[1,2]
（1. 东南大学移动通信全国重点实验室，中国 南京 210096；
2. 紫金山实验室，中国 南京 211111）
(1. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China;
2. Purple Mountain Laboratories, Nanjing 211111, China)

DOI：10.12142/ZTETJ.202605004
网络出版地址：https://link.cnki.net/urlid/34.1228.TN.20261015.1355.006
网络出版日期：2026-10-15
收稿日期：2026-08-12

摘要：面向大容量高可靠星地传输需求，建立600 km低轨地—星上行模型，以140 GHz太赫兹和1 550 nm空间激光为对象，比较晴空、云雾及降雨条件下的衰减与误码性能，分析大气湍流对链路稳定性的影响，并建立地地—星地等效传输距离映射。结果表明，太赫兹在浓雾和云层环境中更具鲁棒性，对湍流起伏较不敏感，但对降雨更敏感。在终端实现方面，光子太赫兹面临的相位噪声与调制非线性会增加功率需求，空间激光则可通过光束漂移补偿减轻湍流影响。上述传播优势的发挥还需结合收发终端设计与优化。光子太赫兹兼具超宽带传输潜力及云雾、湍流环境下的传播鲁棒性，有望降低高速星地业务对时间和地域条件的依赖，为大容量高可靠星地传输提供新途径。

关键词：光子太赫兹；星地通信；空间激光通信；大气湍流；误码率

Abstract: To address the need for high-capacity, reliable satellite-ground transmission, a 600 km low-Earth-orbit (LEO) ground-to-satellite uplink model is established for 140 GHz THz and 1 550 nm free-space optical (FSO) links. Attenuation and bit-error-rate (BER) performance are compared under clear-air, fog, cloud, and rain conditions, the effects of atmospheric turbulence on link stability are analyzed, and a ground-to-ground (G2G)/ground-to-satellite (G2S) equivalent-distance mapping is developed. Terahertz (THz) is more robust in dense fog and cloud environments and is less sensitive to turbulence-induced fluctuations, but more sensitive to rain. At the terminal level, phase noise and modulation nonlinearity in photonic THz front ends increase power requirements, while beam-wander compensation can mitigate turbulence effects in FSO links. Realizing these propagation advantages also requires transceiver design and optimization. Combining ultra-wideband transmission potential with resilient propagation through cloud/fog and turbulence, photonic THz offers a promising path toward high-capacity, reliable satellite-ground transmission with reduced temporal and geographical constraints on high-speed services.

Keywords: photonic terahertz; satellite-ground communication; free-space optical communication; atmospheric turbulence; bit-error rate

引用格式：蒋羽彤，张教，朱敏．光子太赫兹：大容量高可靠星地传输的新途径 [J]. 中兴通讯技术，2026, 32(5): 21-28. DOI: 10.12142/ZTETJ.202605004

Citation: Jiang Y T, Zhang J, Zhu M. Photonic terahertz: a new path toward high-capacity and reliable satellite - ground transmission [J]. ZTE technology journal, 2026, 32(5): 21-28. DOI: 10.12142/ZTETJ.202605004

分辨率遥感、星座组网和空天地一体化业务持续推高星地回传速率。Ka/Q/V等微波频段具备成熟的器件和组网基础，但可用连续带宽有限，难以独立承载不断增长的高速业务[1-2]。面向百Gbit/s级及更高速率，空间激光和太赫兹正在形成两条重要的宽带星地传输路线。空间激光具有可用带宽大、波束窄和抗电磁干扰等特点，已完成5.12 Gbit/s低轨星地光链路、TBIRD 200 Gbit/s在轨下行以及10 Gbit/s级工程演示[3-5]。这些成果验证了空间激光的高速传输能力，但链路连续可用性仍取决于云雾、湍流以及捕获跟踪状态。对于需要稳定回传的星地业务，除传输速率外，复杂大气条件下的链路可用性同样重要。

空间激光的环境敏感性主要来自消光与湍流两类机制。云、雾和气溶胶通过吸收与散射快速削弱接收光功率；折射

基金项目：国家重点研发计划项目（2024YFE0200202）；国家自然科学基金项目（62435003，62271135，62405384，62571563，62571564）；江苏省前沿技术研发计划项目（BF2025065）

率随机起伏会引起光强闪烁、光束漂移和耦合波动。由于空间激光波束极窄，轨道偏差、平台振动和大气扰动还会提高捕获、指向和跟踪的实现难度。上述因素随天气和传播状态变化，使光学链路的业务窗口具有明显的时间和地域依赖。

高海拔站址、站点分集、气象预测及接收孔径优化能够提高空间激光链路的可用性。孔径平均、倾斜校正与自适应光学预补偿可抑制光强起伏、光束偏移和波前畸变[6]，但浓雾和云层的强消光仍影响业务窗口。因此，在保持高速传输能力的同时提高复杂大气条件下的链路稳定性，仍是星地宽带通信的重要问题。

太赫兹频段可提供大块连续频谱，并可借助高增益口径天线形成适用于远距离传输的窄波束，为百 Gbit/s 乃至更高速率无线通信提供新的频谱资源[7-8]。传统电生太赫兹通过倍频、混频逐级提升载频，输出功率和瞬时带宽受到电子器件的限制。光子太赫兹则利用宽带光调制及高速光电器件中的光拍频产生太赫兹信号，具有带宽大、频率可调谐和易于光纤融合等特点。已有光纤—太赫兹—光纤无缝融合系统验证这一技术路线的宽带传输能力[9]。

太赫兹波长远大于近红外光波长，对云雾颗粒和折射率起伏的敏感性较低，降雨与气体吸收则是其主要传播约束[7-8]。已有研究从星地容量、地—星可行性和空天地统一衰减模型等方面论证了太赫兹的空间应用潜力[10-12]。光子学的宽带产生与接收能力为发挥这些传播优势提供了实现基础。

本文面向低轨上行链路，比较光子太赫兹与空间激光的传播性能及实现条件，主要工作如下：

1）在统一几何、速率和误码率判据下建立链路模型，比较晴空、云雾及降雨条件下的传输性能。

2）分析收发配置、相位噪声、调制非线性及激光漂移补偿的影响，区分传播特性与终端实现对性能的作用。

3）建立地地—星地等效距离映射，为地面验证提供参考，并讨论光子太赫兹星地应用的工程要求。

1 统一星地链路模型与评价方法

1.1 140 GHz太赫兹链路

太赫兹的天线增益按照圆口径天线模型计算，自由空间路径损耗由传播距离和载波波长确定[13-14]。计入气体吸收及天气附加损耗后，对齐状态下的确定性接收功率可表示为：

$$P_{\mathrm{r,T}} = P_{\mathrm{t,T}} + G_{\mathrm{t,T}} + G_{\mathrm{r,T}} - L_{\mathrm{FSPL,T}} - L_{\mathrm{gas,T}} - L_{\mathrm{weather,T}} \quad (1)。$$

公式（1）中，$P_{\mathrm{t,T}}$、$P_{\mathrm{r,T}}$为发射和接收功率（dBm），$G_{\mathrm{t,T}}$、$G_{\mathrm{r,T}}$为天线增益（dBi）；$L_{\mathrm{FSPL,T}}$、$L_{\mathrm{gas,T}}$、$L_{\mathrm{weather,T}}$为自由空间、气体和天气损耗（dB）。气体吸收采用国际电信联盟无线电通信部门（ITU-R）标准大气剖面与吸收模型沿高度积分[15-16]，天气损耗在相应气象层内累积。太赫兹雾、云和雨衰减依据粒子谱及液态水介电特性，采用Mie吸收与散射模型计算[17-20]。

将公式（1）得到的接收功率$P_{\mathrm{r,T}}$换算为线性功率后，太赫兹接收端参考电信噪比（SNR）为：

$$\gamma_{\mathrm{T}} = \frac{P_{\mathrm{r,T}}}{k_{\mathrm{B}} T_{\mathrm{r}} B_{\mathrm{T}} F_{\mathrm{T}}} \quad (2)。$$

公式（2）中，γ_{T}为太赫兹参考电SNR；$P_{\mathrm{r,T}}$在公式（2）中以瓦特表示；k_{B}为玻尔兹曼常数；T_{r}、B_{T}和F_{T}分别为接收机温度、带宽和线性噪声因子。

1.2 1 550 nm空间激光链路

空间激光采用电副载波16阶正交幅度调制（16-QAM）强度调制/直接检测（IM/DD）体制[21-22]。传播光束为基模高斯光束，全角1/e²强度发散角为θ_{F}，等效束腰半径$W_0 = \frac{2\lambda_{\mathrm{F}}}{\pi\theta_{\mathrm{F}}}$。

对于半径$a = \frac{D_{\mathrm{r,F}}}{2}$的圆形接收孔径，对齐时的几何收集效率为$\eta_{\mathrm{geo}} = 1 - \exp\left[-\frac{2a^2}{W_{\mathrm{F}}^2}\right]$，其中$D_{\mathrm{r,F}}$为接收口径直径，$W_{\mathrm{F}}(L)$为距离$L$处的光斑半径。计入固定光学效率及传播损耗后，接收光功率为：

$$P_{\mathrm{r,F}} = P_{\mathrm{t,F}} \eta_{\mathrm{geo}} \eta_{\mathrm{sys,F}} 10^{-\left(L_{\mathrm{atm,F}} + L_{\mathrm{weather,F}}\right)/10} \quad (3)。$$

公式（3）中，$P_{\mathrm{t,F}}$、$P_{\mathrm{r,F}}$为发射、接收光功率，采用相同线性单位；η_{geo}、$\eta_{\mathrm{sys,F}}$为几何收集效率和固定光学效率；$L_{\mathrm{atm,F}}$、$L_{\mathrm{weather,F}}$为晴空大气损耗和天气消光。雾消光采用Kim模型[23]，云消光依据气溶胶和云的光学特性（OPAC）大陆性层云参数及经验能见度关系估算[18,24]。激光雨衰减采用ITU-R P.1814的降雨率幂律模型[25]。

空间激光接收端采用固定等效电噪声模型，参考电SNR为：

$$\gamma_{\mathrm{F}} = \frac{\left(m_{\mathrm{F}} \mathcal{R} P_{\mathrm{r,F}}\right)^2}{\sigma_{\mathrm{n,F}}^2} \quad (4)。$$

公式（4）中，γ_{F}为空间激光接收端参考电SNR，m_{F}为调制指数，$\mathcal{R}$为光电探测器响应度，$\sigma_{\mathrm{n,F}}^2$为等效电噪声方差，由玻尔兹曼常数、接收机温度、等效电噪声带宽、噪声因子和负载电阻确定。在该IM/DD收发体制下，接收电流与

接收光功率成正比，因此在固定等效噪声模型下电SNR与接收光功率的平方成正比。

1.3 大气湍流与光束漂移

1.3.1 大气湍流与孔径平均

两类链路采用Hufnagel－Valley（HV）参考剖面描述随高度变化的湍流强度[26]：

$$C_n^2(h)=0.005\,94\left(\frac{v}{27}\right)^2(10^{-5}h)^{10}\mathrm{e}^{-h/1\,000}+2.7\times10^{-16}\mathrm{e}^{-h/1\,500}+A_0\mathrm{e}^{-h/100} \tag{5}$$

公式（5）中，h为海拔高度（m），C_n^2为折射率结构参数（$\mathrm{m}^{-2/3}$），v为高空风速，取21 m/s；A_0为近地湍流强度参数。

太赫兹的强度起伏由球面波Rytov模型描述[27-28]。设$k_\mathrm{T}=2\pi/\lambda_\mathrm{T}$为波数，$s$为沿路径距离，$L$为星地距离，$L_\mathrm{turb}$为湍流积分路径长度，则点接收Rytov方差为：

$$\sigma_{\mathrm{R,T}}^2=2.25k_\mathrm{T}^{7/6}\int_0^{L_\mathrm{turb}}C_n^2(s)\left[\frac{s(L-s)}{L}\right]^{5/6}\mathrm{d}s \tag{6}$$

实际接收口径会对接收面强度起伏产生空间平均。本文按Andrews球面波孔径平均模型[27]对公式（6）的点接收方差进行修正，得到后续性能分析所用的有限孔径对数光强方差。

空间激光采用有限孔径高斯光束湍流模型[29]，对数光强方差为：

$$\sigma_{\ln I,\mathrm{F}}^2=\sigma_{\ln X,\mathrm{A}}^2+\sigma_{\ln Y,\mathrm{A}}^2 \tag{7}$$

公式（7）中，$\sigma_{\ln I,\mathrm{F}}^2$为有限孔径对数光强方差，$\sigma_{\ln X,\mathrm{A}}^2$、$\sigma_{\ln Y,\mathrm{A}}^2$为大、小尺度分量，按高斯加权孔径$W_\mathrm{G}^2=\frac{D_{\mathrm{r,F}}^2}{8}$计算[29]。两类链路均根据孔径平均后的闪烁方差构造单位均值对数正态增益[30]。

1.3.2 空间激光光束漂移与补偿

对于准直空间激光上行链路，近地折射率起伏还会引起光束质心漂移，其接收面径向二阶矩为[26]：

$$\langle r_\mathrm{c}^2\rangle=7.25(H-h_0)^2\sec^3\zeta\,W_0^{-1/3}\int_{h_0}^{H_\mathrm{turb}}C_n^2(h)\left(1-\frac{h-h_0}{H-h_0}\right)^2\mathrm{d}h \tag{8}$$

公式（8）中，$\langle r_\mathrm{c}^2\rangle$为接收面光束质心的径向二阶矩，$H$为卫星高度，$h_0$为地面站高度，$\zeta$为天顶角，$W_0$为发射端高斯束腰半径，$H_\mathrm{turb}$为湍流积分上限。本文采用Farid－Hranilovic模型[31]描述由质心漂移引起的归一化耦合损失，其指向参数$\xi_\mathrm{F}=w_\mathrm{eq}/(2\sigma_\mathrm{s})$，其中$w_\mathrm{eq}$为由接收面光斑半径和接收孔径共同确定的等效光斑半径；ξ_F越大，表示光束漂移相对有效光斑越小。倾斜校正通过减小质心偏移降低耦合损失[6]。设补偿后与补偿前漂移均方根之比为η_BW，单轴残余方差$\sigma_\mathrm{s}^2=\eta_\mathrm{BW}^2\langle r_\mathrm{c}^2\rangle/2$。补偿不改变闪烁统计，闪烁与漂移按独立随机量处理。相对于对齐状态，漂移耦合增益为$G_\mathrm{F}=U^{\frac{1}{\xi_\mathrm{F}^2}}$，其中$U\sim\mathrm{U}(0,1)$。

1.4 误码率

两类链路均采用Gray映射方形M_i-QAM。对于链路$i\in\{\mathrm{T,F}\}$，给定瞬时电SNR γ_i时，条件误码率采用常用近似式[32]：

$$P_{\mathrm{b},i}(\gamma_i)=\frac{2\left(\sqrt{M_i}-1\right)}{\sqrt{M_i}\log_2 M_i}\operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{3\gamma_i}{2(M_i-1)}}\right) \tag{9}$$

公式（9）中，M_i为QAM调制阶数，本文取M_i=16；$\operatorname{erfc}(\cdot)$为互补误差函数，$\gamma_i$为每符号电信噪比$\frac{E_\mathrm{s}}{N_0}$。

考虑有限孔径闪烁及激光光束漂移后，两类链路的瞬时SNR分别为$\gamma_{\mathrm{T,inst}}=\gamma_\mathrm{T}I_\mathrm{T}$和$\gamma_{\mathrm{F,inst}}=\gamma_\mathrm{F}(I_\mathrm{F}G_\mathrm{F})^2$，其中$I_\mathrm{T}$、$I_\mathrm{F}$为单位均值闪烁增益，$G_\mathrm{F}$为激光漂移耦合增益。

在确定性天气条件下，γ_i由相应链路预算直接得到；在湍流条件下，将有限孔径闪烁及空间激光光束漂移引入瞬时SNR后，再对随机状态下的条件误码率（BER）取统计平均得到平均BER。

本文统一采用10^{-3}作为性能门限，并以达到该门限所需的最小发射功率作为后续比较指标。

1.5 光子前端的相位与调制非线性

光子太赫兹通过光调制与光拍频产生信号，调制器非线性和光源相位噪声会使高阶QAM星座发生畸变，影响误码性能[33-34]。本文分别用IQ马赫－曾德尔调制器（IQ-MZM）的正弦场响应和载波恢复后的残余相位描述这两类影响。对于平衡、无啁啾且内支路偏置于消光点的IQ-MZM，其响应为：

$$g_m(x)=C_m[\sin(m\,\mathrm{Re}\{x\})+\mathrm{j}\sin(m\,\mathrm{Im}\{x\})] \tag{10}$$

x为单位平均功率的输入复波形；m为无量纲调制驱动系数，定义为$m=\pi V_\mathrm{s}/(2V_\pi)$，其中，$V_\mathrm{s}$为驱动电压尺度，$V_\pi$为调制器半波电压。$m$表征驱动电压相对半波电压的大小，

用于考察调制非线性的影响；C_m用于保持平均辐射功率一致，以$m=0$表示小信号线性极限。匹配滤波和增益校正后的符号u_k叠加残余相位与高斯噪声[34]：

$$r_k = u_k e^{j\varphi_k} + n_k, \varphi_k \sim \mathrm{N}(0, \sigma_\varphi^2) \quad (11),$$

其中，σ_φ为载波恢复后的残余相位均方根，n_k为增益校正后的加性高斯噪声。波形采用根升余弦成形，经过调制器、匹配滤波和增益校正后计算条件误码率，再对湍流增益取平均。

1.6 场景和系统设置

本文考虑地面站至低轨卫星的上行地—星链路。基准场景中，地面站高度为10 m，卫星轨道高度为600 km，地面站仰角为60°。光子太赫兹与空间激光采用相同的传播几何和气象状态，以便比较不同传播机制对链路性能的影响。两类链路均采用25 GHz占用带宽和16–QAM调制，传输速率统一设置为100 Gbit/s，并统一以BER=10^{-3}作为性能门限。两类链路的载波、天线/光学口径、发散角及接收机参数按各自技术特点设置，主要参数见表1。

同一路径和大气状态下，上下行的气体吸收及云雾、雨消光相同，云雾传播优势也适用于下行。湍流作用则与方向有关：上行在近发射端经历强湍流，角度偏移经长距离放大；下行主要湍流段靠近接收端，需按下行几何重新计算闪烁与孔径平均[6,21]。因此，下行功率门限还需结合星载发射和地面接收配置评估。

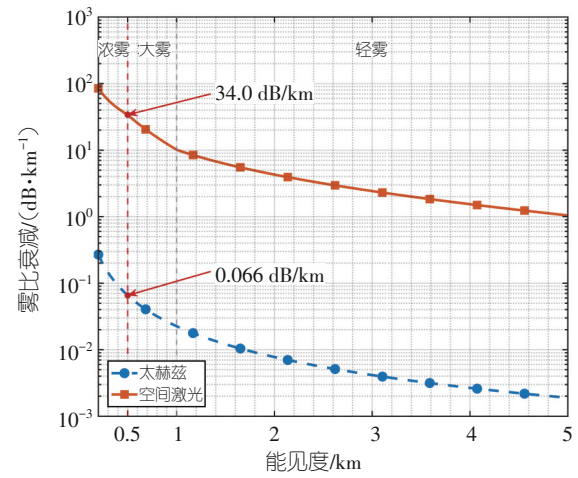
2 光子太赫兹星地链路性能分析

2.1 云雾传播优势及降雨边界

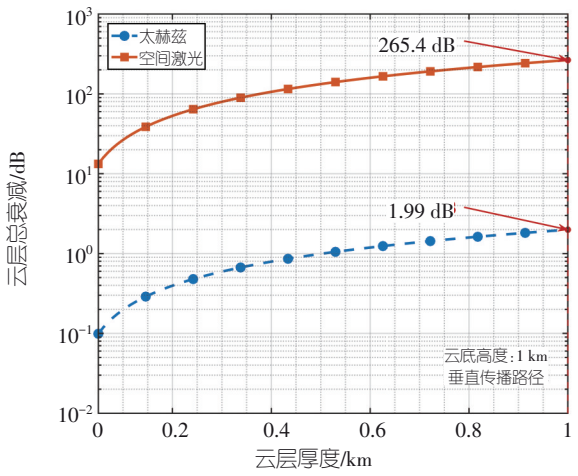
图1比较雾、云和雨条件下两类载波的衰减。随着能见

表1　地—星上行主要终端与接收机参数

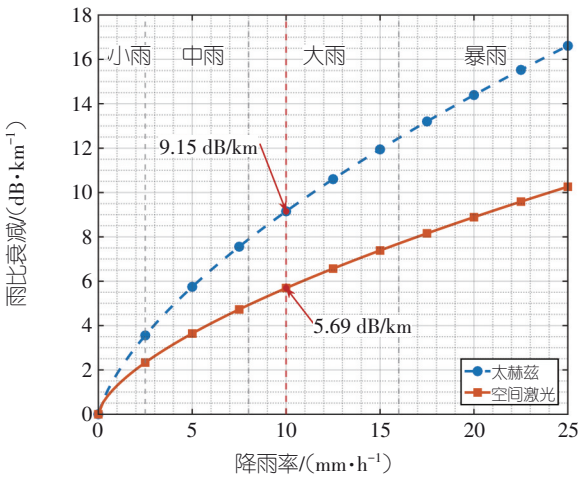
参数	光子太赫兹	空间激光
中心频率/波长	140 GHz	1 550 nm
发射口径	3 m	0.3 m
接收口径	0.6 m	0.1 m
发射增益/全角发散角	70.65 dBi	15 μrad
接收增益	56.67 dBi	—
天线效率	0.6	—
固定光学损耗	—	3.5 dB
噪声系数	10 dB	5 dB
探测器响应度	—	0.95 A/W
接收机温度	290 K	290 K
负载电阻	—	50 Ω



(a) 雾比衰减



(b) 云层总衰减



(c) 雨比衰减

图1　雾、云和雨条件下140 GHz太赫兹与1 550 nm空间激光的大气衰减

度降低，空间激光雾消光迅速增加，而太赫兹变化较缓。能见度0.5 km时，激光与太赫兹的雾比衰减分别约为34.0和0.066 dB/km，相差两个数量级以上。大陆性层云中的差异更显著：1 550 nm激光的云比衰减约为265.4 dB/km，云层厚度为1 km时，其总衰减约为265.4 dB，太赫兹约为1.99 dB。上述结果表明，太赫兹在浓雾和云层等强光学消光场景中能够保持较低的附加传播损耗。

降雨对两类载波呈现不同的影响规律。随着雨强增加，太赫兹雨比衰减高于空间激光，说明强降雨会明显压缩太赫兹链路预算。因此，太赫兹的大气传播优势主要体现在雾和云层等光学受限环境，而降雨构成其星地应用的重要天气边界。

2.2 不同天气条件下的传输性能

天气附加衰减会直接改变接收功率和SNR，进而影响BER及满足业务门限所需的发射功率。图2给出晴空、雾、云及降雨条件下的平均BER。其中，雾天能见度0.5 km、雾顶0.4 km；云底1 km、垂直厚度0.1 km；降雨率10 mm/h，有效雨高约3.13 km[35]；激光残余漂移均方根（RMS）比例0.25。其余参数采用表1配置。

在雾和云场景中，太赫兹BER曲线相对晴空仅发生小幅移动，而空间激光曲线明显向高发射功率方向移动，云层引起的变化尤为显著。由此可见，图1所反映的云雾传播差异能够进一步体现为链路层的功率裕量：在相同传输速率和BER门限下，太赫兹达到业务要求所需的发射功率更低，且对云雾状态变化更不敏感。

降雨使两类链路的BER曲线均向高发射功率方向移动，太赫兹的偏移更为明显。在所设雨天场景下，太赫兹的达标发射功率高于空间激光，说明较强的雨衰会压缩太赫兹链路预算。

天气随时间变化，云雾出现频率又具有地域差异。太赫兹对云雾的低敏感性有利于缓解空间激光的时间和地域限制，降雨约束则要求系统结合站址气候选择工作条件。

2.3 湍流补偿与光子前端对链路稳定性的影响

为进一步考察大气湍流与终端实现对链路稳定性的影响，图3比较了3种太赫兹前端工况：理想前端、残余相位均方根为3°的线性前端，以及相同相位误差下调制驱动系数$m=1.2$的非线性前端。空间激光的残余漂移均方根比例η_{BW}分别取1、0.5和0.25，对应未补偿及两种补偿程度。两类接收口径分别为0.6和0.1 m。除图3外，其余性能分析采用理想光电前端，激光残余漂移均方根比例取0.25。

随着近地湍流强度增加，3种前端工况下太赫兹的达标发射功率均变化较小，表明其对折射率起伏的敏感性较低。引入残余相位误差后，太赫兹链路所需功率有所增加；叠加调制非线性后，功率需求进一步提高。因此，光子太赫兹的传播稳定性还需与良好的载波恢复和调制线性度配合，才能转化为系统性能优势。

空间激光未补偿时，达标发射功率随湍流增强而迅速上升。上行光束在近地大气中产生的角度偏移经过长距离传播放大，降低接收孔径的耦合效率。质心跟踪与倾斜校正减小残余漂移后，功率需求明显降低，曲线也更为平缓；补偿越充分，湍流增强造成的性能恶化越小。

上述结果表明，光子太赫兹在所比较的前端工况下均保

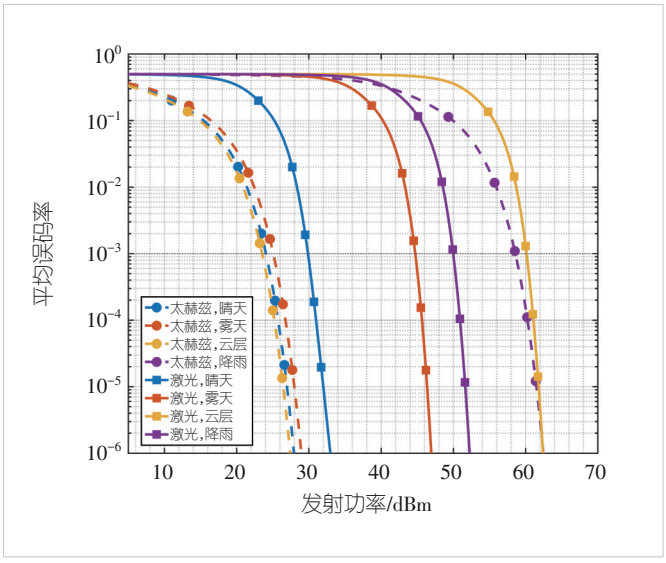


图2　晴空、雾、云和降雨时的平均误码率

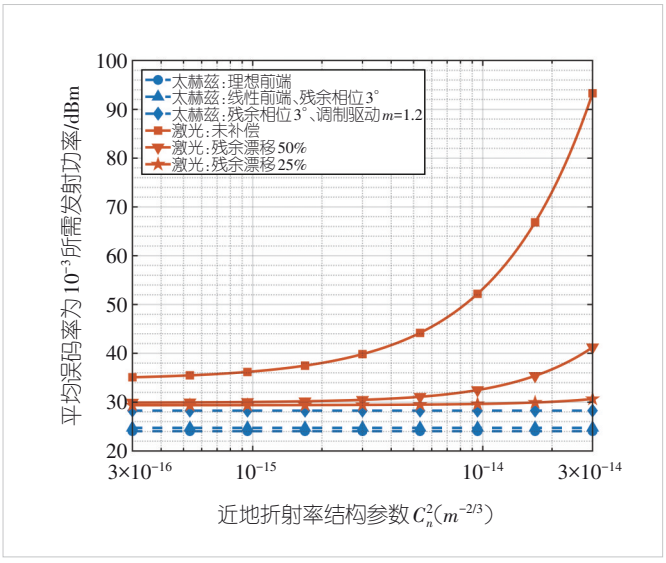


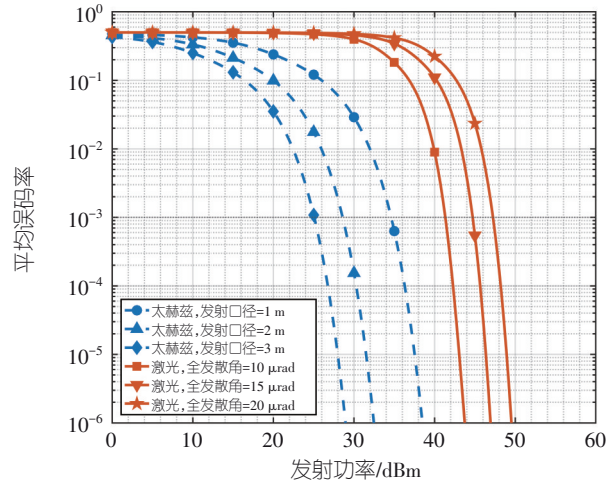
图3　光子前端与激光漂移补偿对达标功率的影响

持较低的湍流敏感性，前端损伤主要体现为额外的功率需求；空间激光则可通过有效的光束漂移补偿显著改善上行链路稳定性。

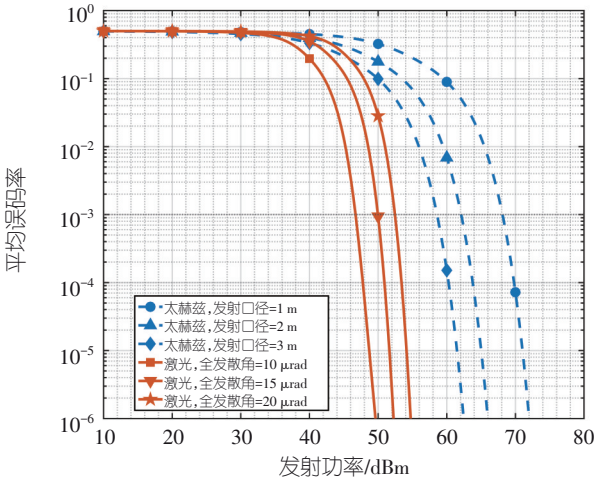
2.4 终端参数对误码性能的影响

为进一步考察收发终端配置对链路性能的影响，图4在与图2相同的雾天和雨天条件下改变太赫兹发射口径与激光全发散角。太赫兹发射口径取1、2、3 m，激光全发散角取10、15、20 μrad，其他参数保持不变。

雾天中，增大太赫兹发射口径可提高天线增益，使BER曲线向低功率方向移动。在所比较的口径范围内，太赫兹的达标发射功率均低于空间激光，表明较低的雾衰减能够在多组终端配置下体现为链路功率优势。



（a）能见度0.5 km的雾天



（b）降雨率10 mm/h的雨天

图4　雾天与雨天的终端敏感性

在给定漂移补偿条件下，缩小激光全发散角可提高接收光能收集效率，使雾天和雨天的BER曲线均向低功率方向移动。但窄光束也降低了对漂移的容忍度，需要与指向和跟踪能力相匹配。

雨天中，增大太赫兹发射口径同样能够改善链路预算，但由于太赫兹雨衰较强，其达标发射功率仍高于所比较的激光链路，与图1（c）的传播损耗差异一致。两类链路在不同天气下的互补优势，需要结合口径、发散角及跟踪补偿等终端配置加以发挥。

2.5 地地—星地等效距离映射与地面验证

开展地—星（G2S）外场验证需要卫星平台、轨道窗口和高精度捕获跟踪，成本较高且难以连续改变传播距离。为利用可重复的地—地（G2G）试验辅助星地验证，本节在100 Gbit/s传输速率、平均BER=10^{-3}条件下建立G2G—G2S等效传输距离映射。

对任一技术，在给定G2G距离下求满足目标BER的最小发射功率，并保持该功率不变，在60° G2S链路中改变卫星高度，直至达到相同BER，由此得到G2G参考距离与G2S等效高度之间的映射，其判据为：

$$P^{(s)}_{\mathrm{req,\,G2G}}(d) = P^{(s)}_{\mathrm{req,\,G2S}}\left(H_{\mathrm{eq}}\right), \qquad s \in \{\mathrm{T}, \mathrm{F}\} \tag{12}$$

公式（12）保证源端发射功率在地面参考链路与星地目标链路之间保持一致，而两条链路均以同一平均BER门限作为性能判据。因此，H_{eq}表示在给定终端、大气模型和仰角条件下，与该G2G参考链路具有相同性能要求的G2S等效传输尺度。

G2G与G2S链路分别保留各自典型终端配置。G2G太赫兹收发口径均为0.3 m；激光采用1 mrad全发散角、0.2 m接收口径和0.8 A/W响应度。G2S采用表1参数。

图5（a）给出了8～15 km G2G参考距离对应的G2S等效高度。8～15 km范围内太赫兹G2S等效高度始终高于空间激光，且差距随G2G距离增加，说明太赫兹由地面短距链路向星地长距链路映射时具有更显著的尺度扩展能力。

图5（b）进一步给出了G2G链路达标发射功率随距离的变化。较短距离内，受终端口径、增益和接收机参数共同作用，太赫兹所需发射功率较低；随着距离增加，两类链路的几何扩散损耗增量基本相当，但140 GHz太赫兹在近地水平路径中的气体吸收持续累积。8～15 km范围内，太赫兹的自由空间路径损耗增加约5.5 dB，气体吸收损耗额外增加约10 dB；同期空间激光由高斯光束扩展引起的几何损耗同

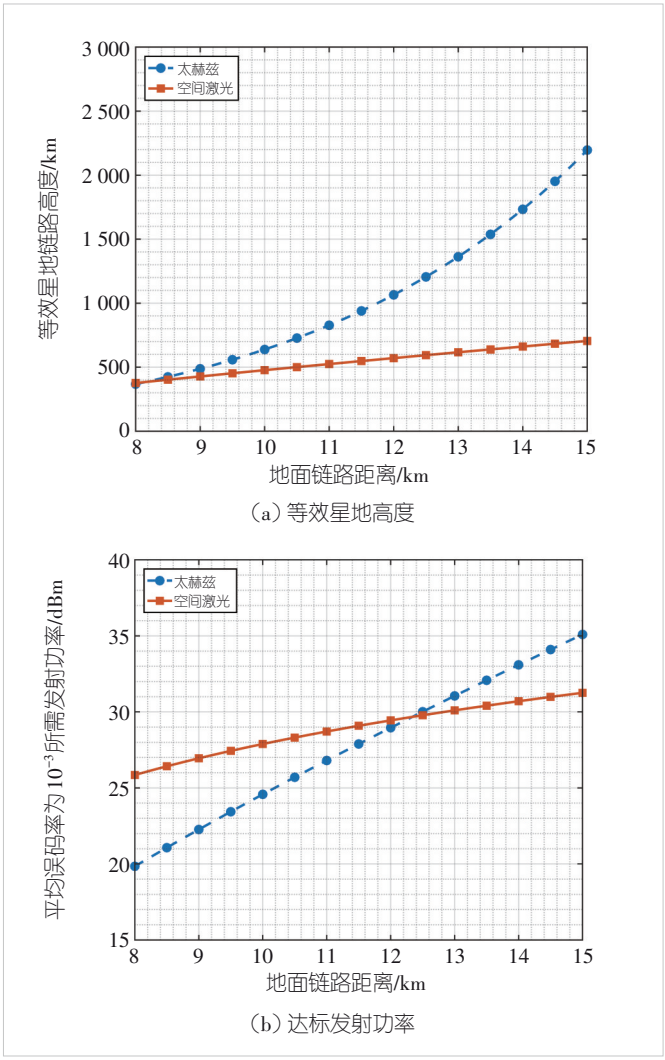


图5 地地—星地等效传输距离映射结果

样增加约5.5 dB，但大气损耗仅增加约0.07 dB。因此，太赫兹达标发射功率随距离增长更快，并在约12.3 km处与空间激光发生交叉。

3 光子太赫兹星地通信的关键工程挑战

光子太赫兹的宽带能力与云雾、湍流鲁棒性为高速星地传输提供了有利条件，其工程应用仍需解决以下问题：

1）光电器件与宽带前端：提升光源、调制器、单行载流子光电二极管（UTC-PD）及太赫兹前端的功率、带宽和转换效率，并结合载波恢复与数字预失真控制相位噪声和非线性[33-34]。

2）长距离链路与功率效率：自由空间损耗和低层大气吸收会压缩链路预算，需协同提升源功率、放大效率、接收灵敏度和天线增益，并满足星载尺寸、散热与功耗约束。

3）频率窗口与环境适应性：水汽、降雨、海拔和湿度会改变可用频率窗口，需结合站址大气条件联合优化工作频率、带宽、调制编码和发射功率。

4）捕获跟踪与在轨验证：高增益窄波束对捕获、指向和跟踪精度要求较高，仍需通过远距离和在轨试验验证终端的链路稳定性与空间环境适应性。

4 结束语

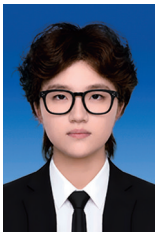
本文面向大容量高可靠星地传输，比较了光子太赫兹与空间激光在云雾、降雨及大气湍流影响下的传输性能，并建立地地—星地等效传输距离映射。结果表明，太赫兹的云雾衰减较低，误码性能随云雾状态的变化较小，对湍流起伏也较不敏感。结合光子调制与拍频技术的宽带信号产生能力，这些传播特性使光子太赫兹有望拓宽云雾环境中的高速传输窗口，降低空间激光星地通信对时间和地域条件的依赖。地地—星地等效距离映射则为利用地面试验辅助星地链路验证提供了参考。光子前端的相位噪声与调制非线性、收发口径及指向能力仍影响系统实现，降雨也是太赫兹应用需要重点应对的天气约束。通过前端性能提升、终端配置优化与气象适应策略的协同发展，光子太赫兹有望成为大容量高可靠星地传输的新途径。

参考文献

[1] Kodheli O, Lagunas E, Maturo N, et al. Satellite communications in the new space era: a survey and future challenges [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2021, 23(1): 70-109. DOI: 10.1109/COMST.2020.3028247
[2] Azari M M, Solanki S, Chatzinotas S, et al. Evolution of non-terrestrial networks from 5G to 6G: a survey [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2022, 24(4): 2633-2672. DOI: 10.1109/comst.2022.3199901
[3] Chen W B, Sun J F, Hou X, et al. 5.12Gbps optical communication link between LEO satellite and ground station [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS). IEEE, 2017: 260-263. DOI: 10.1109/icsos.2017.8357402
[4] Schieler C M, Riesing K M, Bilyeu B C, et al. On-orbit demonstration of 200-Gbps laser communication downlink from the TBIRD CubeSat [C]//Proceedings of Free-Space Laser Communications XXXV. SPIE, 2023: 1. DOI: 10.1117/12.2651297
[5] Li Y L, Zhang H Q, Huang P, et al. Demonstration of 10 Gbps satellite-to-ground laser communications in engineering [J]. The innovation, 2024, 5(1): 100557. DOI: 10.1016/j.xinn.2023.100557
[6] Osborn J, Townson M J, Farley O J D, et al. Adaptive Optics pre-compensated laser uplink to LEO and GEO [J]. Optics express, 2021, 29(4): 6113-6132. DOI: 10.1364/oe.413013
[7] 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
[8] Alqaraghuli A J, Siles J V, Jornet J M. The road to high data rates in space: terahertz versus optical wireless communication [J]. IEEE aerospace and electronic systems magazine, 2023, 38(6): 4-13. DOI: 10.1109/maes.2023.3243584
[9] Zhu M, Zhang J, Hua B C, et al. Ultra-wideband fiber-THz-fiber

seamless integration communication system toward 6G: architecture, key techniques, and testbed implementation [J]. Science China information sciences, 2023, 66: 113301. DOI: 10.1007/s11432-022-3565-3
[10] Suen J Y. Terabit-per-second satellite links: a path toward ubiquitous terahertz communication [J]. Journal of infrared, millimeter, and terahertz waves, 2016, 37(7): 615-639. DOI: 10.1007/s10762-016-0257-x
[11] Saqlain M, Idrees N M, Cao X X, et al. Feasibility analysis of opto-electronic THz Earth-satellite links in the low- and mid-latitude regions [J]. Applied optics, 2019, 58(25): 6762-6769. DOI: 10.1364/ao.58.006762
[12] 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
[13] ITU-R P. 618-14 Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems [S]
[14] ITU-R P. 531-16 Ionospheric propagation data and prediction methods required for the design of satellite networks and systems [S]
[15] ITU-R P.835-7 Reference atmospheres [S]
[16] ITU-R P. 676-13 Attenuation by atmospheric gases and related effects [S]
[17] Liao X, Fan L J, Wang Y, et al. Attenuation characterization of terahertz waves in foggy and rainy conditions at 0.1 - 1 THz frequencies [J]. Electronics, 2023, 12(7): 1684. DOI: 10.3390/electronics12071684
[18] Hess M, Koepke P, Schult I. Optical properties of aerosols and clouds: the software package OPAC [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(5): 831-844. DOI: 10.1175/1520-0477(1998)079<0831:OPOAAC>2.0.CO;2
[19] Marshall J S, Palmer W Mc K. The distribution of raindrops with size [J]. Journal of Meteorology, 1948, 5(4): 165-166. DOI: 10.1175/1520-0469(1948)005<0165:TDORWS>2.0.CO;2
[20] ITU-R P. 527-5 Electrical characteristics of the surface of the Earth [S]
[21] Giggenbach D, Knopp M T, Fuchs C. Link budget calculation in optical LEO satellite downlinks with on/off-keying and large signal divergence: a simplified methodology [J]. International journal of satellite communications and networking, 2023, 41(5): 460-476. DOI: 10.1002/sat.1478
[22] Hassan M Z, Song X G, Cheng J L. Subcarrier intensity modulated wireless optical communications with rectangular QAM [J]. Journal of optical communications and networking, 2012, 4(6): 522. DOI: 10.1364/jocn.4.000522
[23] Kim I I, McArthur B, Korevaar E J. Comparison of laser beam propagation at 785 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications [J]. Optical wireless communications III, 2001, 4214: 26-37. DOI: 10.1117/12.417512
[24] Gultepe I, Müller M D, Boybeyi Z. A new visibility parameterization for warm-fog applications in numerical weather prediction models [J]. Journal of applied meteorology and climatology, 2006, 45(11): 1469-1480. DOI: 10.1175/jam2423.1
[25] ITU-R P. 1814-1 Prediction methods required for the design of terrestrial free-space optical links [S]
[26] Bas J, Dowhuszko A A. On the use of NB-IoT over GEO satellite systems with time-packed optical feeder links for over-the-air firmware/software updates of machine-type terminals [J]. Sensors, 2021, 21(12): 3952. DOI: 10.3390/s21123952
[27] Andrews L C. Aperture-averaging factor for optical scintillations of plane and spherical waves in the atmosphere [J]. Journal of the optical society of America A, 1992, 9(4): 597. DOI: 10.1364/josaa.9.000597
[28] Cang L, Zhao H K, Zheng G X. The impact of atmospheric turbulence on terahertz communication [J]. IEEE access, 2019, 7: 88685-88692. DOI: 10.1109/access.2019.2925815
[29] Ata Y, Alouini M S. Performance of integrated ground-air-space FSO links over various turbulent environments [J]. IEEE photonics journal, 2022, 14(6): 1-16. DOI: 10.1109/jphot.2022.3218512
[30] Vetelino F S, Young C, Andrews L, et al. Aperture averaging effects on the probability density of irradiance fluctuations in moderate-to-strong turbulence [J]. Applied optics, 2007, 46(11): 2099. DOI: 10.1364/ao.46.002099
[31] Farid A A, Hranilovic S. Outage capacity optimization for free-space optical links with pointing errors [J]. Journal of lightwave technology, 2007, 25(7): 1702-1710. DOI: 10.1109/jlt.2007.899174
[32] Cho K, Yoon D. On the general BER expression of one- and two-dimensional amplitude modulations [J]. IEEE transactions on communications, 2002, 50(7): 1074-1080. DOI: 10.1109/tcomm.2002.800818
[33] Napoli A, Mezghanni M M, Calabro S, et al. Digital predistortion techniques for finite extinction ratio IQ Mach - Zehnder modulators [J]. Journal of lightwave technology, 2017, 35(19): 4289-4296. DOI: 10.1109/jlt.2017.2729603
[34] Liu B W, Tanabe T. Quantifying phase noise tolerance for single-CarrierM-QAM terahertz wireless communications with advantages of photonic approaches [J]. Journal of lightwave technology, 2026, 44(6): 2223-2236. DOI: 10.1109/jlt.2026.3652308
[35] ITU-R P.839-4 Rain height model for prediction methods [S]
[36] Biswas A, Lee S. Ground-to-ground optical communications demonstration: TMO Progress Report 42-141 [R]. 2000

作 者 简 介



蒋羽彤，东南大学在读本科生；主要研究方向为太赫兹通信、卫星通信。



张教，紫金山实验室研究员，东南大学博士生导师；主要研究方向为光子毫米波太赫兹通信技术、光电融合通信技术等；主持国家自然科学基金、国家重点研发计划课题/子课题等科研项目10余项；连续多年入选斯坦福大学“全球前2%顶尖科学家榜单”，获上海市自然科学奖一等奖、全国创新争先奖牌（集体）、江苏省高层次人才培养计划等；发表论文230余篇；出版专著1部。



朱敏，东南大学信息科学与工程学院教授、博士生导师，国家高层次人才，紫金山实验室课题组负责人；主要研究方向为光子毫米波与太赫兹通信、光无线通信与网络技术；发表论文200余篇，获授权国家发明专利30余件。