



·高功率微波技术·

地面与卫星太赫兹通信高频大气窗口分析*

曹相春^{1,2}, 郝建红¹, 赵 强², 张 芳², 范杰清¹, 董志伟²

(1. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094)

摘 要: 较大的传输路径损耗限制了太赫兹无线通信在大气中的传输距离, 要想实现地面与卫星之间太赫兹波的长程传输, 必须先找到低衰减的大气透明窗口。本文结合我国大气分布特点, 通过大气辐射传输模型工具 am(atmospheric model)对大气吸收衰减建模进行分析, 从中选定适合我国地面与卫星太赫兹通信的理想地基站点; 利用真实大气数据和分层传输理论, 计算了地面与卫星之间太赫兹通信的总路径损耗, 结合信号发射功率、天线增益、信噪比、噪声功率值和相应的路径衰减阈值, 给出了天线增益分别为 0~100 dBi 时 10~15 THz 频段内的总可用带宽和大气窗口; 通过将高海拔平台作为地面与卫星之间太赫兹通信的中继链路, 给出了 1~15 THz 频段内的可用大气窗口, 为我国地面与卫星通信链路的建立、地基站点和通信频段的选取提供了理论和数值参考。

关键词: 太赫兹; 无线通信; 大气传输模型; 大气窗口; 分层传输

中图分类号: O441.4

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202133.210186

Analysis of high-frequency atmospheric windows for terahertz communication between the ground and the satellite

Cao Xiangchun^{1,2}, Hao Jianhong¹, Zhao Qiang², Zhang Fang², Fan Jieqing¹, Dong Zhiwei²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China)

Abstract: The large path loss limits the transmission distance of terahertz wireless communication in the atmosphere. To realize long-range transmission of terahertz waves between the ground and the satellite, the first and key step is to find low attenuation atmospheric transparent windows. In this paper, based on the characteristics of atmospheric distribution in China, atmospheric model (am) is used to compute and compare atmospheric absorption attenuation of terahertz waves in two representative cities, and obtain the most ideal ground-based site suitable for terahertz communication between the ground and the satellite in China. Subsequently, by means of real atmospheric data and layered transmission theory, the total path loss of terahertz communication between the ground and the satellite is calculated. Combined with the signal transmit power, antenna gain, Signal-to-Noise Ratio (SNR), noise power and the corresponding path loss threshold, the total usable bandwidth and atmospheric windows in the 10–15 THz frequency band are given. Moreover, by taking the High Altitude Platform as the terahertz communication relay link between the ground and the satellite, the usable atmospheric windows in the 1–15 THz frequency band with antenna gain of 0–100 dBi are given, which provide theoretical and numerical reference for the establishment of ground-satellite communication links and the selection of ground-based sites and communication frequency bands in China.

Key words: terahertz; wireless communication; atmospheric transmission model; atmospheric windows; layered propagation

太赫兹通信可以满足地面与卫星之间超高速、低延迟、大容量的信息传输要求, 但长距离通信所带来的传输损耗巨大。太赫兹传输损耗主要来自于两个独立的损耗, 一是典型的发散损耗, 由电磁波在介质传播过程中的发散所引起; 二是大气吸收损耗, 即由大气中特定分子吸收引起的损耗。大气中水汽、氧气将对太赫兹波产生明显

* 收稿日期: 2021-06-23; 修订日期: 2021-07-02

基金项目: 国家自然科学基金联合项目(U1730247); 高功率微波技术重点实验室项目(6142605200301)

联系方式: 曹相春, cxcxiaocao@163.com。

通信作者: 赵 强, zhaq@iapcm.ac.cn。

的吸收衰减, 衰减率与频率、温度、压强、水汽密度等诸多因素有关, 基于此, 在海平面或地基太赫兹无线通信的距离被限制在几米^[1]。目前, 多数文献所给出太赫兹通信的大气透明窗口基本都在 1 THz 以下, 如 250, 340, 410, 500, 670 GHz 波段^[2], 随着传输距离的增加, 窗口频段变化区间(单位: THz)为 [0.38 0.44], [0.45 0.52], [0.62 0.72], [0.77 0.92]^[3], 1~15 THz 频段内的大气窗口很少有文献给出。随频率的升高, 大气对太赫兹波的吸收衰减整体呈增大趋势, 但在约 7 THz 后将出现更多低衰减的大气窗口^[4]。因此, 寻找太赫兹波在大气传输中可用的高频大气窗口, 对实现卫星与地面之间太赫兹波的长距离通信传输具有重要的现实意义和研究价值。

本文基于 HITRAN 2016^[5] 高分辨率大气分子吸收数据库, 使用大气辐射传输模型专用工具 am^[6] 对高频段太赫兹通信进行了大气建模, 将模拟的数值结果与文献中的实验数据比对, 验证了模型的准确性。对比分析了 2 个代表性地面站点的大气吸收损耗, 选定可以作为我国太赫兹通信的理想地基站点。取用 NASA/GMAO 全球大气再分析数据集 MERRA-2 (The Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2)^[7] 中的真实数据, 以更接近真实大气分布的分层结构, 计算了地面与卫星 (Ground-Based Site to Orbiting Satellite, G-S)、高海拔平台与卫星 (High Altitude Platform to Orbiting Satellite, H-S)、地面与高海拔平台 (Ground-based Site to High Altitude Platform, G-H) 之间三种情况下太赫兹通信的总路径损耗。结合实际发射功率、天线增益、信噪比和噪声功率阈值, 得到了高增益天线 10~15 THz 频段内的可用大气窗口, 同时, 考虑太赫兹功率源技术和天线增益限制, 将高海拔平台作为地面与卫星之间太赫兹通信的中继链路, 给出了 1~10 THz 频段内的可用大气窗口。

1 理论模型

1.1 am 模型

am 是一款由 SAO (Smithsonian Astrophysical Observatory) 亚毫米波接收实验室编写并用于计算大气传输辐射的专用工具。基于 HITRAN 2016 高分辨率大气分子吸收数据库, am 模型适用于微波毫米波到太赫兹频段的吸收谱分析和各路径辐射吸收等参数计算, 并包含大气分子中 H₂O, O₂ 和 N₂ 等对电磁波的连续吸收衰减的计算。通过 am 模型, 可以将大气建模为一系列的流体静力学平行平面或球形层以及用户自定义的路径段, 充分考虑路径几何学和折射因素, 这为局部热力学平衡条件下不同大气组分、温度、压力和分层路径传播的大气吸收损耗计算提供了支持。am 的主要应用领域是射电天文学和地面大气辐射测量, 涉及地面与天空之间的地面传播路径, 并已广泛应用于实验室接收机测试、毫米波无线电和无线电频谱管理项目。

1.2 路径损耗模型

由朗伯比尔定律^[8], 太赫兹波的大气透射率计算公式为

$$T(f, d) = \frac{I}{I_0} = e^{-\alpha(f)d} \quad (1)$$

式中: $T(f, d)$ 为电磁波在介质中的透射率, I 和 I_0 分别为出射和入射电磁波的能量, d 为传播距离, $\alpha(f)$ 为大气辐射衰减系数, 本文只考虑对太赫兹波衰减影响最大的线谱吸收和连续吸收贡献, $\alpha(f)$ 在此为吸收系数。整个路径的大气吸收衰减(单位: dB)为

$$A_{\text{abs}}(f, d) = 10 \lg e^{\alpha(f)d} \quad (2)$$

对于点对点链路, 全向天线间的发散损耗, 即自由空间基本传输损耗(单位: dB)可由 ITU (International Telecommunication Union) 标准中的下式得到

$$A_{\text{sp}}(f, d) = 20 \lg \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \quad (3)$$

式中: λ 为波长, d 为距离 d (单位: km), 式(3)用频率 f (单位: MHz) 替代为

$$A_{\text{sp}}(f, d) = 32.4 + 20 \lg f + 20 \lg d \quad (4)$$

因此, 总路径衰减(单位: dB)为

$$A_{\text{sum}}(f, d) = A_{\text{abs}}(f, d) + A_{\text{sp}}(f, d) \quad (5)$$

1.3 模型验证

为了验证本文研究中高频太赫兹大气吸收衰减模型的准确性, 使用 am 模拟了环境温度 $T=21$ °C、相对湿度 $RH=7\%$ 、传输距离 $d=167$ m 条件下 0.2~1.8 THz 频段内的大气透射率, 如图 1 中黑色曲线所示, 与 Yang Yihong

等人^[9]测量的实验数据(图1红色曲线)进行对比,可以看出,实验测得的透射率值整体变化趋势与模拟曲线吻合得很好,包括吸收峰与透明窗口的位置。在低频段,实验数据在约0.268 THz处透射率达到了1.1,误差较大;高频段,由实验设备和实验环境产生的系统误差和随机误差等导致两者在幅值上存在一定差值。

为减小传输距离给实验误差带来的影响,模拟温度 $T=23.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 $RH=30\%$ 、传输距离 $d=1\text{ m}$ 条件下1~3 THz频段内的大气透射率,如图2中黑色曲线所示,与Sabine Wohnsiedler等人^[10]的实验结果进行比对(图2红色曲线),可以看出,整个频段内两者在吸收峰值与窗口区的位置都吻合得很好,且在1~2.5 THz范围内模拟值与实验值非常接近,由于实验离散化误差和设备分辨率(5 GHz)造成的不确定性导致在2.5~3 THz范围内出现了比较小的频率偏移^[10]。同时,我们认为测量系统的热漂移以及测量精度和系统误差等可能是造成实验值与模拟值在幅值上存在差别的原因。

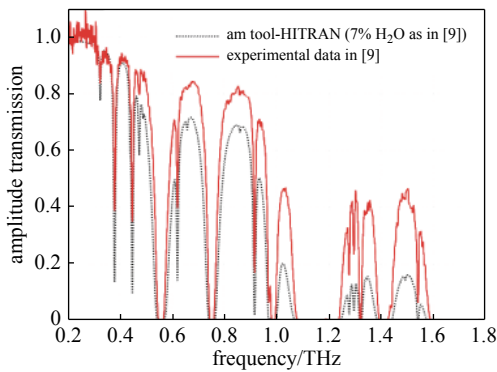


Fig. 1 Atmospheric transmittance at 0.2 to 1.8 THz

图1 太赫兹(0.2~1.8 THz)大气传输透射率

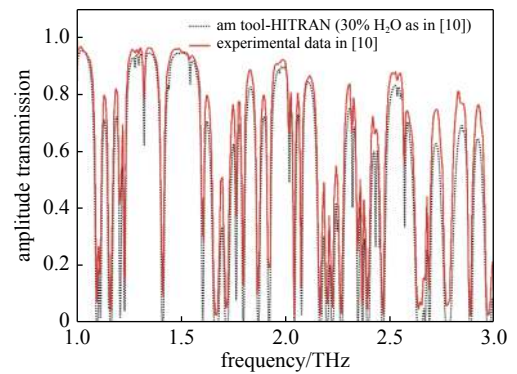


Fig. 2 Atmospheric transmittance at 1 to 3 THz

图2 太赫兹(1~3 THz)大气传输透射率

am可以分析低于15 THz范围内太赫兹波的大气传输衰减,频带宽;采用高分辨率大气分子吸收数据库HITRAN,分辨率高且更新快;同时复杂的大气分层结构也为地空路径下不同高度、天顶角和传输距离的大气辐射测量分析提供了强有力的支持。综上,以近似真实世界太赫兹波段大气辐射传输计算分析,选用am模型是合理、可靠的。

2 路径损耗分析

通过大气吸收模型,结合我国大气分布状况,本节分析了不同地理位置太赫兹波沿水平方向传输的衰减特性;利用总路径损耗模型,模拟计算了地面与卫星通信路径中太赫兹波沿垂直方向的传输损耗。

2.1 平行路径损耗

考虑我国不同经纬度、高低海拔及气候差异,选取西藏阿里、海南五指山两个站点,分别计算了0.2~15 THz太赫兹波的大气水平传输损耗,如图3所示。计算所需经纬度、海拔、气压、温度和相对湿度参数如表1所示。

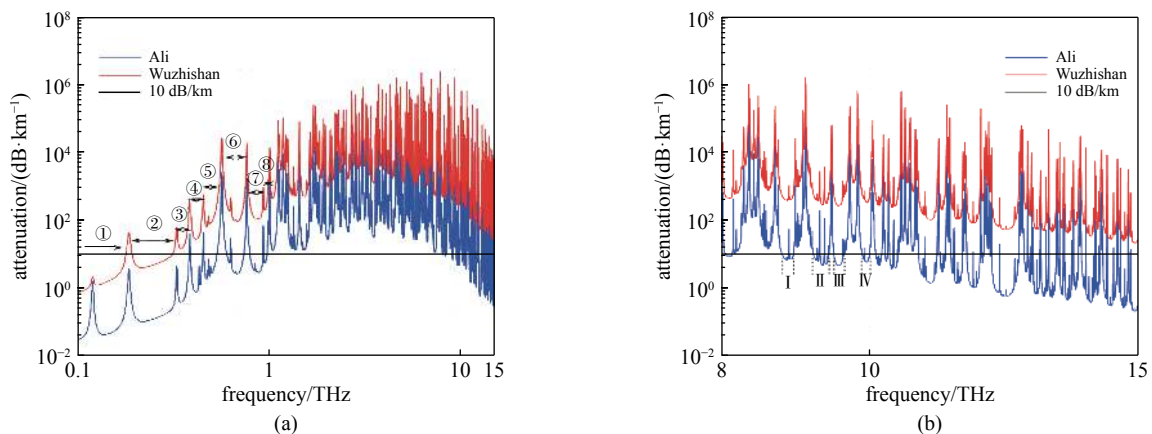


Fig. 3 Terahertz atmospheric absorption attenuation propagating along horizontal direction, where (b) is a local graph of (a)

图3 太赫兹波沿水平方向传输时的大气吸收衰减,(b)是(a)的局部图

表 1 两个站点经纬度、海拔、气压、温度、相对湿度数据

Table 1 Longitude and latitude, altitude, air pressure, temperature and relative humidity data of two sites

site	longitude/(°)	latitude/(°)	altitude/m	p /hPa	T /K	RH %
Ali	80.026	32.326	5060.0	544.4	259.4	37
Wuzhishan	109.52	18.77	327.2	979.5	292.2	81

注: 数据来源于MERRA-2中2007—2016年1, 2, 12月平均数据和中国气象数据网2019年1, 2, 12月平均数据。

将 0.2~15 THz 分为 3 个区间段, 即 0.2~1, 1~10, 10~15 THz, 以吸收损耗小于 10 dB/km 作为太赫兹传输可用大气窗口的判别标准^[3]。由图 3 可以看出, 两个地区在 0.2~1 THz 范围存在 7 个窗口区, 即②~⑧, 基本与文献 [2-3] 中的窗口区间相吻合。在 1~15 THz 范围五指山站点因大气吸收衰减严重无可用大气窗口, 而相比之下, 阿里站点在该高频段内存在众多低衰减的大气窗口, 其中, 1~10 THz 频段内可用的大气窗口分布范围为 8.774~8.917 THz (I)、9.268~9.4 THz (II)、9.482~9.602 THz (III)、9.895~9.995 THz (IV)。

通过对比分析可知, 水气含量对太赫兹波吸收衰减的影响巨大, 对于太赫兹无线通信站点的选取应以高海拔、低温和低湿为选取依据, 阿里地区以其天然的地理优势和得天独厚的条件可以作为地空太赫兹无线通信的理想地基站点。

2.2 垂直路径损耗

ITU 定义高海拔平台的高度范围为 20~50 km, 假设高海拔平台位于固定位置 20 km 处, 考虑卡门线(外太空与地球大气层的分界线)的位置为海拔 100 km 处, 并假定椭圆轨道卫星近地点位于固定的海拔 99 km, 以气压梯度作为大气分层的依据, 将阿里站点上空的大气层分为 27 个初始气压边界层, 充分考虑大气折射作用, 以此对地基站点与卫星(G-S)、高海拔平台与卫星(HAP-S)、地基站点与高海拔平台(G-HAP)之间 3 种情况下太赫兹通信的总路径损耗进行计算, 如图 4 所示。结果表明, 随着海拔增加, 相比大气吸收衰减, 自由传播损耗将逐渐成为太赫兹衰减的主要贡献, “空-天”网络之间更容易建立太赫兹通信链路。对于地面与近空间轨道卫星之间的太赫兹无线通信, 由于传输距离较长, 高频(1~15 THz)段的衰减值都在 200 dB 以上, 借助于高增益天线, 随着天线增益增加, 可用的大气窗口将从高频段向低频段依次增多, 考虑天线增益限制和对太赫兹功率源的技术和成本要求, 就现阶段而言, 10~15 THz 频段长距离通信的难度较大。通过将空中飞行设备如高海拔平台作为地空太赫兹通信的中继链路, 可以在 1~10 THz 频段内找到可用的大气窗口, 从而为地面与卫星之间的高速通信提供行之有效的解决方案。

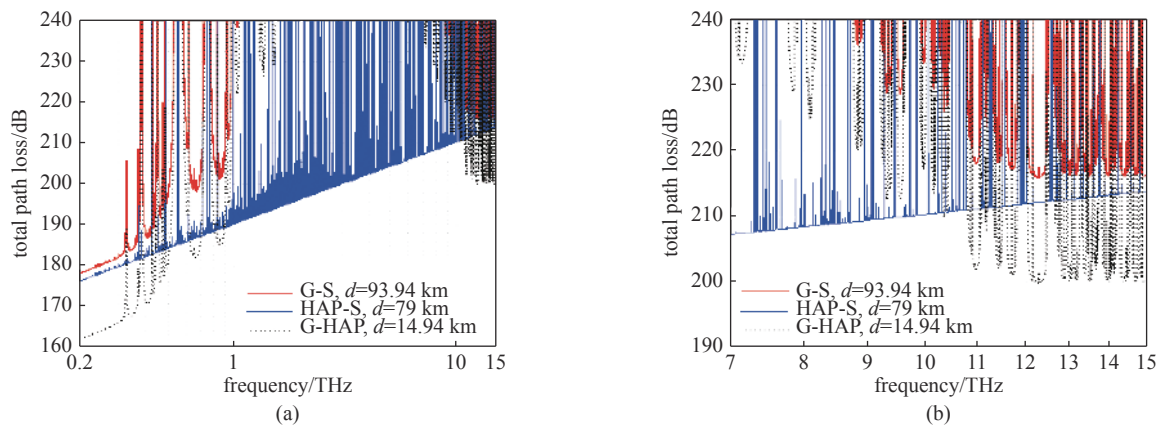


Fig. 4 Total path loss of terahertz communication corresponding to Ground-based site-to-Satellite (G-S), High Altitude Platform-to-Satellite (HAP-S) and Ground-based site-to-High Altitude Platform (G-HAP), where (b) is a local graph of (a)

图 4 地基站点与卫星(G-S)、高海拔平台与卫星(HAP-S)、地基站点与高海拔平台(G-HAP)之间太赫兹通信总路径损耗, (b)是(a)的局部图

3 太赫兹高频大气窗口分析

要得到太赫兹通信可用的高频大气窗口, 需要确定总路径损耗的衰减阈值(单位: dB), 计算公式为^[11-13]

$$A_{\text{sum}}^{\text{th}}(f, d) = P_{\text{tx}} + G_{\text{tot}} - \gamma_{\text{th}} - P_n \quad (6)$$

$$G_{\text{tot}} = G_{\text{tx}} + G_{\text{rx}} \quad (7)$$

式中： P_{tx} 为信号发射功率，单位 dBm； G_{tot} 为全向天线增益； G_{tx} 和 G_{rx} 分别为全向发送、接收天线增益，单位 dBi； γ_{th} 为最小信噪比，单位 dB； P_n 为噪声和干扰功率，单位 dBm。 P_{tx} 和 γ_{th} 此处分别取值为 33.6 dBm^[14-15]，10 dB^[13]。 P_n 可以表示为^[11]

$$P_n = k_B T_0 B \quad (8)$$

式中：玻耳兹曼常数 $k_B=1.38e^{-23} \text{ m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ；热力学温度 $T_0=293 \text{ K}$ ； B 为光谱分辨率带宽。式(8)可以改写为

$$P_n = -174 + 10 \lg B \quad (9)$$

本文中对应 am 的分辨率带宽 $B=0.05 \text{ GHz}$ ，计算得 $P_n=-97.01 \text{ dBm}$ 。由式(6)可计算总可用带宽为^[11,13]

$$W_{tot} = \sum_j W_j, A_{sum} < A_{sum}^{th} \quad (10)$$

式中： W_j 为第 j 个带的可用带宽。

结合地面与卫星、高海拔平台与卫星、地面与高海拔平台之间太赫兹通信的总路径损耗(图4)，通过式(6)~式(10)，在总天线增益分别为 0, 20, 40, 60, 80 和 100 dBi 时，分别计算得到 3 种情况下太赫兹(0.2~15 THz)频段的总可用带宽，如表 2 所示。

表 2 3 种通信场景下的可用带宽统计
Table 2 Usable bandwidth statistics in three communication cases

case	total antenna gains/dBi	usable bandwidth/THz			
		total	0.2~1 THz	1~10 THz	10~15 THz
ground-based site to orbiting satellite (G-S)	0	0	0	0	0
	20	0	0	0	0
	40	0	0	0	0
	60	0.057 2	0.057 2	0	0
	80	0.323 7	0.323 7	0	0
	100	2.957 85	0.587 55	0	2.370 3
high altitude platform to orbiting satellite (HAP-S)	0	0	0	0	0
	20	0	0	0	0
	40	0	0	0	0
	60	0.014 75	0.014 75	0	0
	80	1.837 3	0.795 8	1.041 5	0
	100	14.617 1	0.798 1	8.836 3	4.982 7
Ground-based site to high altitude platform (G-HAP)	0	0	0	0	0
	20	0	0	0	0
	40	0	0	0	0
	60	0.250 95	0.250 95	0	0
	80	1.388 1	0.566 25	0	0.821 85
	100	4.353 35	0.633 35	0.296	3.424

地面与卫星通信链路，总天线增益小于 40 dBi 时，无可用带宽；总天线增益为 80 dBi 时，总可用带宽较少且集中分布在 1 THz 频段以内；在总天线增益为 100 dBi 时，频段内的总可用带宽为 2.95785 THz，其中 10~15 THz 范围内的可用带宽为 2.3703 THz，该频段内存在着大量可用的大气窗口，前 3 个高带宽窗口频段(单位：THz)，依次为 [10.886 15~11.023 05]，[12.160 95~12.430 25]，[14.815 85~14.979 60]。结果表明，依赖于高增益天线，高频段仅在 10~15 THz 频段可为地面与卫星之间的太赫兹通信提供可用的大气窗口。

高海拔平台与卫星通信链路，总天线增益小于 40 dBi 时，无可用带宽；80 dBi 时，1~10 THz 频段内的带宽可达到 1 THz；100 dBi 时，整个频段内都将存在众多且高带宽的可用大气窗口。

地面与高海拔平台通信链路，同样在较低天线增益时无可用带宽；总天线增益为 80 dBi 时，10~15 THz 频段内总可用带宽可达到 0.82 THz；100 dBi 时，相比于地面与卫星之间的通信衰减损耗，在 1~10 THz 频段内存在总

带宽为 0.296 THz 的可用大气窗口, 1~10 THz 和 10~15 THz 频段内列出前 3 个高带宽频段(单位: THz), 依次为 [9.290 7~9.338 6], [9.352 55~9.389 3], [9.495 05~9.599 9], [10.878 55~11.029 4], [12.158 45~12.431 3], [14.814 75~15]。同时从图 4 可以得出, 在增大信号发射功率的前提下, 在中心频率分别为 1.024 85, 1.271 15, 1.287 85, 1.304 5 5, 1.349, 1.486 THz 处会存在可用的大气窗口或微窗口。

4 结 论

本文结合我国大气分布特点, 以实现地面与卫星太赫兹通信为目标, 通过大气辐射传输专业模拟工具 am 对大气建模, 对比分析了我国两个具有代表性地区的大气吸收损耗, 以高海拔、低温和低湿为选取依据, 选定阿里可以作为我国太赫兹地基通信的最佳站点之一; 基于 NASA/GMAO 的全球再分析数据集 MERRA-2 和更接近真实大气分布的分层结构, 进一步计算了地基站点与卫星(G-S)、高海拔平台与卫星(HAP-S)、地基站点与高海拔平台(G-HAP)之间太赫兹通讯的总路径损耗。结合实际发射功率、天线增益、信噪比和噪声功率阈值, 分别计算了 3 种情况下 0.2~15 THz 频段的总可用带宽。对于地面与卫星之间的通信链路, 在总天线增益为 100 dBi 时, 高频太赫兹(10~15 THz)频段内将会出现大量低衰减的大气窗口, 可用带宽为 2.370 3 THz, 占总可用带宽的 80%, 前 3 个高带宽窗口频段(单位: THz), 依次为 [10.886 15~11.023 05], [12.160 95~12.430 25], [14.815 85~14.979 6]。但 1~10 THz 频段无可用大气窗口, 而通过将空中飞行设备如高海拔平台作为地空太赫兹通讯的中继链路, 可以在 1~10 THz 频段内找到可用的大气窗口, 高带宽(单位: THz)可用大气窗口主要有 [9.290 7~9.338 6], [9.352 55~9.389 3], [9.495 05~9.599 9]。此外, 如果增加信号发射功率, 在中心频率分别为 1.024 85, 1.271 15, 1.287 85, 1.304 5 5, 1.349, 1.486 THz 处还会存在可用的大气窗口或微窗口。据此, 为我国地面与卫星通信地基站点、通信频段的选取提供了理论和数值参考, 为建立卫星与地面通信链路以及“空-天-地”全维度通信网络提供了理论支持。

参考文献:

- [1] Xia Qing, Hossain Z, Medley M, et al. A link-layer synchronization and medium access control protocol for terahertz-band communication networks[C]//2015 IEEE Global Communications Conference. 2015: 1-7.
- [2] 王玉文. 太赫兹辐射大气传输特性研究与信道分析[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2017. (Wang Yuwen. Atmospheric propagation characteristics and capacity analysis of terahertz wave[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2017.)
- [3] Akyildiz I F, Jornet J M, Han Chong. Terahertz band: next frontier for wireless communications[J]. *Physical Communication*, 2014, 12: 16-32.
- [4] Shi Shengcai, Paine S, Yao Qijun, et al. Terahertz and far-infrared windows opened at Dome A in Antarctica[J]. *Nature Astronomy*, 2017, 1: 0001.
- [5] Gordon I E, Rothman L S, Hill C, et al. The HITRAN2016 molecular spectroscopic database[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2017, 203: 3-69.
- [6] Paine S. The am atmospheric model[R]. Smithsonian Astrophysical Observatory, 2012.
- [7] Molod A, Takacs L, Suarez M, et al. Development of the GEOS-5 atmospheric general circulation model: evolution from MERRA to MERRA2[J]. *Geoscientific Model Development*, 2015, 8(5): 1339-1356.
- [8] 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.
- [9] Yang Yihong, Mandehgar M, Grischkowsky D R. Broadband THz pulse transmission through the atmosphere[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2011, 1(1): 264-273.
- [10] Wohnsiedler S, Theuer M, Herrmann M, et al. Simulation and experiment of terahertz stand-off detection[C]//Proceedings of SPIE 7215, Terahertz Technology and Applications II. 2009: 101-108.
- [11] Saeed A, Gurbuz O, Akkas M A. Terahertz communications at various atmospheric altitudes[J]. *Physical Communication*, 2020, 41: 101113.
- [12] Schneider T, Wiatrek A, Preussler S, et al. Link budget analysis for terahertz fixed wireless links[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2012, 2(2): 250-256.
- [13] Han Chong, Bicen A O, Akyildiz I F. Multi-wideband waveform design for distance-adaptive wireless communications in the terahertz band[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2016, 64(4): 910-922.
- [14] Hwu S U, deSilva K B, Jih C T. Terahertz (THz) wireless systems for space applications[C]//2013 IEEE Sensors Applications Symposium Proceedings. 2013: 171-175.
- [15] ITU-R S. 1590 FRENCH-2002, Technical and operational characteristics of satellites operating in the range 20-375 THz[S].