

太赫兹大气传输特性的研究概况与应用展望

徐晨辉, 张光锋, 樊振宏

(南京理工大学微电子学院(集成电路学院)南京 210094)

摘要: 介绍了太赫兹技术的发展概况及其在部分应用场景中的优势, 如在雷达中具有高分辨率、强反隐身特性等。在太赫兹大气传输特性方面, 重点介绍了 MPM 模型基本原理, 并对主流的大气传输模型如 ATM 模型、AM 模型做了简要的介绍与比较。同时介绍了近年来国内外对太赫兹大气传输特性的研究概况与新的进展, 并对太赫兹技术的发展进行了总结与应用层面的展望。

关键词: 太赫兹技术; 太赫兹雷达; 大气传输特性

中图分类号: V556.1; TN953

文献标志码: A

文章编号: 2095-1000(2024)06-0078-08

DOI: 10.12347/j.ycyk.20240703001

引用格式: 徐晨辉, 张光锋, 樊振宏. 太赫兹大气传输特性的研究概况与应用展望[J]. 遥测遥控, 2024, 45(6): 78–85.

Research Overview and Application Prospects of Terahertz Atmospheric Transmission Characteristics

XU Chenhui, ZHANG Guangfeng, FAN Zhenhong

(School of Microelectronics(School of Integrated Circuits), Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The paper provides a brief overview of the development of terahertz technology and its advantages in various application scenarios, including high resolution and strong anti-stealth characteristics in radar. Regarding terahertz atmospheric transmission characteristics, the paper focuses on the basic principles of the MPM and provides an overview and comparison of mainstream atmospheric transmission models like the ATM model and AM model. At the same time, this paper also introduces recent research developments and progress on terahertz atmospheric transmission characteristics domestically and internationally. Finally, this paper summarizes the development of terahertz technology and offers prospects for its applications.

Keywords: Terahertz; Terahertz radar; Atmospheric transmission characteristics

Citation: XU Chenhui, ZHANG Guangfeng, FAN Zhenhong. Research Overview and Application Prospects of Terahertz Atmospheric Transmission Characteristics[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2024, 45(6): 78–85.

0 引言

太赫兹(Terahertz)波是指频率范围在 0.1 THz ~ 10 THz、波长在 3 000 μm ~30 μm 的电磁波。尽管在自然界中充斥着大量的太赫兹波, 但在 20 世纪 80 年代之前, 由于没有高效的太赫兹源以及缺乏相对有效的太赫兹探测技术, 人们对太赫兹波段的电磁波并未进行深入研究, 太赫兹波成为广阔电磁波谱中鲜为人知的一段空白, 被称为“太赫兹空隙”(Terahertz Gap)^[1]。随着量子力学、固体物理学的发展以及超快激光技术的发展, 太赫兹源的种类逐渐增多, 如量子级联激光器^[2](Quan-

tum Cascade Laser, QCL)、真空太赫兹器件^[3-5]以及基于自由电子激光技术的加速器太赫兹源^[6,7]等器件的产生, 拓宽了太赫兹技术的应用范围。随着对太赫兹波研究的深入, 人们发现太赫兹波有许多不可比拟的优秀特性。例如, 太赫兹雷达相较于传统的微波雷达具有分辨率更高^[8,9]、反隐身性能卓越等优势^[10,11]。

目前, 在通信领域, 太赫兹技术已经成为 6G 无线通信技术的关键性技术之一^[12], 其对于实现高速、大容量的数据传输发挥着至关重要的作用。但由于太赫兹波的频率较高, 当其在大气空间中传播时会受到大气中的水蒸气、沙尘等因素的影

响而产生衰减。因此研究太赫兹波在大气空间中的传输特性,相关结果对于太赫兹技术在大气空间中的应用具有十分重要的意义。

1 太赫兹波的大气传输特性

太赫兹波在大气中的传输过程中受到多种因素的影响,这些因素主要包括大气成分吸收、大气散射等。其中,大气成分吸收包括水蒸气吸收与氧气吸收,由于水分子在太赫兹波段具有多条吸收谱线,因此水蒸气是大气中对太赫兹波吸收影响显著的成分之一。大气散射通常包括瑞利(Rayleigh)散射和米氏(Mie)散射。大气毫米波传输模型(Millimeter-Wave Propagation Model, MPM)由著名大气遥感领域专家 Liebe H J^[13]于1989年提出,其主要通过计算30条水蒸气的吸收谱线、44条氧气的吸收谱线、空气的连续吸收谱线,随着模型的不不断改进能够较为精确地得到1 GHz~1 000 GHz范围内太赫兹波的衰减特性。这一模型被广泛用于通信、遥感等相关领域。

1.1 MPM模型基本原理

通过累加水蒸气和氧气的吸收谱线可以精确地得到在1 000 GHz频率范围内由于水蒸气和干燥大气所造成的比衰减。但在较低频率下(10 GHz以下)需要考虑氧气的非谐振 Debye 频谱造成的影响,而在较高频率(100 GHz以上)需要考虑气压造成的氮气吸收。

气体比衰减的计算方法如下:

$$\gamma = 0.182f(N''_{\text{oxygen}}(f) + N''_{\text{water vapor}}(f) + N''_{\text{Other}}(f) + \dots) \quad (\text{dB/km}) \quad (1)$$

其中, $N''_{\text{oxygen}}(f)$ 与 $N''_{\text{water vapor}}(f)$ 表示该频率相关的大气复折射率的虚部。 f 是频率(单位: GHz)

$$N''_{\text{oxygen}}(f) = \sum_i S_i F_i + N''_D \quad (2)$$

$$N''_{\text{water vapor}}(f) = \sum_j S_j F_j \quad (3)$$

式(2)、式(3)中, S_i 、 S_j 分别表示氧气和水蒸气第 i 条、第 j 条谱线的强度(单位: kHz), F_i 、 F_j 是氧气和水蒸气的谱线形状因子。 N''_D 是由于气压造成的氮气衰减 Debye 频谱产生的干空气连续吸收谱。

其中:

$$S_i = a_1 \times 10^{-7} p \theta e^{a_2(1-\theta)} \quad (4)$$

$$S_j = b_1 \times 10^{-1} q \theta^{3.5} e^{b_2(1-\theta)} \quad (5)$$

θ 为大气温度的反向温度(单位: K), 根据国际电信联盟 ITU-R P.835-6 建议书^[14], 可得到氧气的分压 p 与水汽分压 q 。

F_i 与 F_j 为氧气和水蒸气的谱线函数:

$$F_i = \frac{f}{f_i} \left[\frac{\Delta f_{\text{oxygen}} - \delta(f_i - f)}{(f_i - f)^2 + \Delta f_{\text{oxygen}}^2} + \frac{\Delta f_{\text{oxygen}} - \delta(f_i + f)}{(f_i + f)^2 + \Delta f_{\text{oxygen}}^2} \right] \quad (6)$$

对于水蒸气的吸收谱:

$$F_j = \frac{f}{f_j} \left[\frac{\Delta f_{\text{water vapor}}}{(f_j - f)^2 + \Delta f^2} + \frac{\Delta f_{\text{water vapor}}}{(f_j + f)^2 + \Delta f^2} \right] \quad (7)$$

其中, Δf_{oxygen} 为考虑氧气塞曼分裂的谱线宽度, f_j 是水蒸气第 j 条谱线的中心频率。 $\Delta f_{\text{water vapor}}$ 是考虑水蒸气谱线的多普勒展宽后修正的谱宽。线强 S 、修正因子 δ 及式中所有参数均可在查阅 MPM 模型的相关参数后得到^[15]。

10 GHz 以下氧气的非谐振 Debye 频谱与 100 GHz 以上气压造成的氮气吸收 N''_D 为

$$N''_D(f) = fp\theta^2 \left[\frac{6.14 \times 10^{-5}}{d \left[1 + \left(\frac{f}{d} \right)^2 \right]} + \frac{1.4 \times 10^{-12} p \theta^{1.5}}{1 + 1.9 \times 10^{-5} f^{1.5}} \right] \quad (8)$$

其中, d 是 Debye 频谱中的宽度参数, 在温度为 25 °C、水汽含量 7.5 g/m³、大气压强 1 013 hPa 的条件下结果如图 1 所示。

由式(1)可得到晴空下太赫兹波在大气传输过程中的损耗情况, 如图 2 所示。

在云雾天气情况下通过悬浮水滴的消光截面来计算衰减^[16], 然后再在晴空模型的基础上加上悬浮液滴的折射吸收谱即可得到云雾天气下的吸收谱。

在云、雾天气下, 在 MPM 模型中, 为了简化计算可以使用瑞利吸收近似替代 Mie 散射理论。通过 Rayleigh 吸收近似公式将云雾的复折射率表示为:

$$N''_{\text{fog}} = \frac{9W}{2\varepsilon''(1+\eta^2)} \quad (9)$$

$$\eta = \frac{2+\varepsilon'}{\varepsilon''}$$

其中, W 为含水量(单位 g/m³), ε' 和 ε'' 分别为水的复介电常数的实部和虚部, 可用 double-Debye 模型^[17]求解:

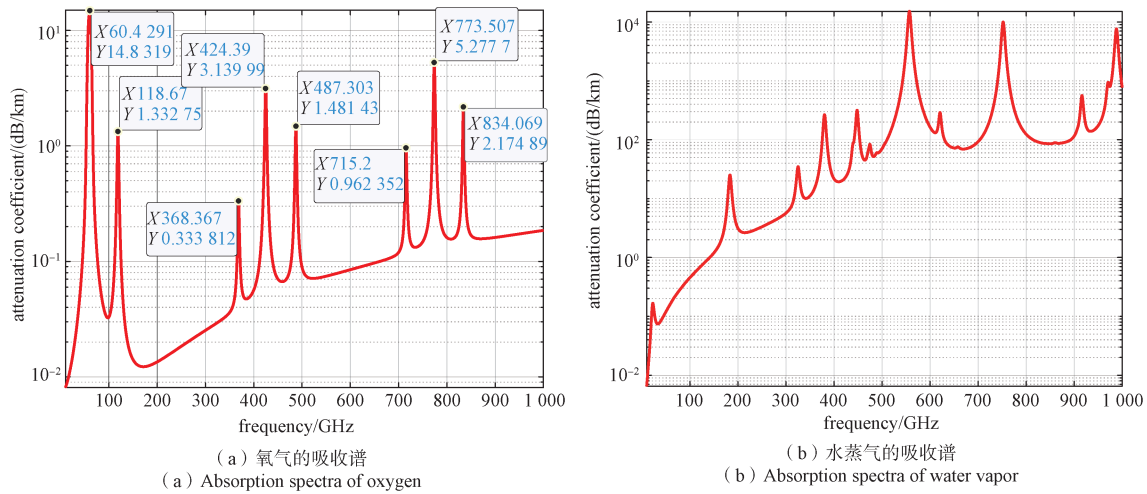


图1 氧气与水蒸气的吸收谱

Fig.1 Absorption spectra of oxygen and water vapor

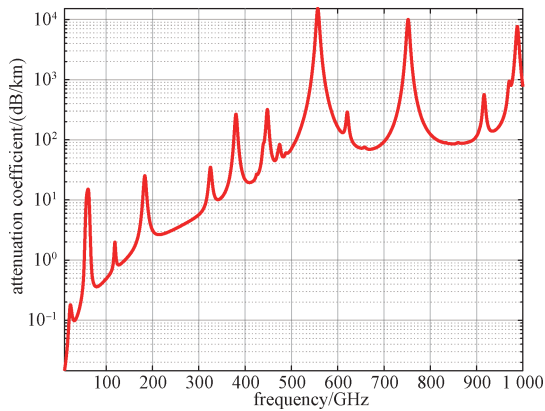


图2 晴空下太赫兹波的大气损耗

Fig.2 Atmospheric attenuation of terahertz waves under skies

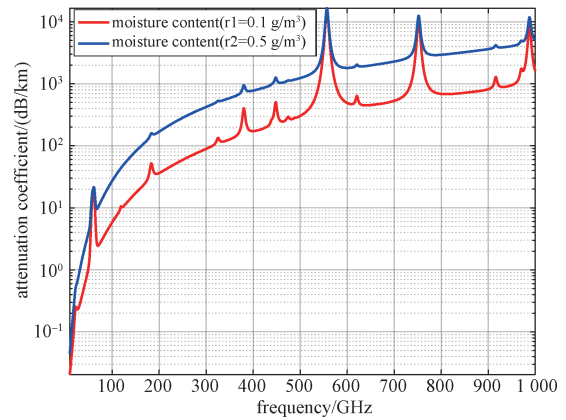


图3 云雾天气下的信号衰减

Fig.3 Attenuation in foggy weather

$$\begin{aligned} \epsilon' &= \frac{(\epsilon_0 - \epsilon_1)}{\left[1 + \left(\frac{f}{f_p}\right)^2\right]} + \frac{(\epsilon_1 - \epsilon_2)}{\left[1 + \left(\frac{f}{f_s}\right)^2\right]} + \epsilon^2 \\ \epsilon'' &= \frac{f(\epsilon_0 - \epsilon_1)}{f_p \left[1 + \left(\frac{f}{f_p}\right)^2\right]} + \frac{f(\epsilon_1 - \epsilon_2)}{f_s \left[1 + \left(\frac{f}{f_s}\right)^2\right]} \end{aligned} \quad (10)$$

其中, f_p 、 f_s 分别为主、次弛豫频率(单位: GHz)。

计算云雾的复折射率再代入式(1)中, 即可得到云雾天气下的吸收谱, 如图3所示。

图4给出了低能见度下(水汽含量 0.9 g/m^3)与晴空条件下太赫兹波传输损耗对比。

1.2 太赫兹大气传输特性的研究概况

常用的太赫兹大气传输模型主要有:

① 1978年 Dutton E J^[8]等人提出了大气传输模型主要采用分段的方法, 分别研究不同频段内的

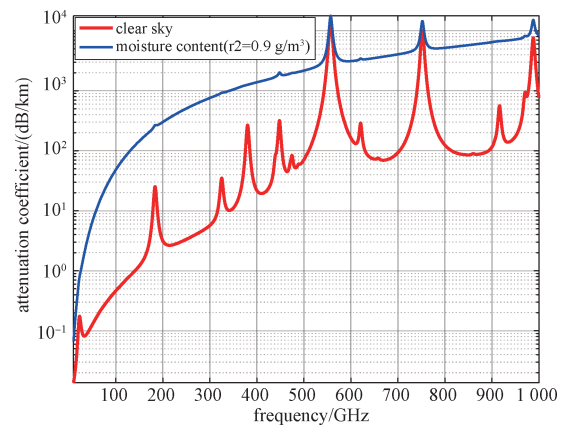


图4 低能见度下与晴空传输损耗对比

Fig.4 Comparison of transmission loss under low visibility and clear sky conditions

大气传输特性, 最高适用频率为 0.35 THz 。该模型在考虑不同气象条件(如晴空、云雾和降雨)的基础

上,描述了信号传输过程中出现的衰减和相位延迟特性。不过该模型将大气假设为均匀介质,未考虑大气湍流和大气多层次的不均匀性。随着遥感探测技术的发展,研究人员获得了更复杂、精确的大气数据,该模型基于上世纪70年代的实验数据建立,具有很大的局限性。

② MPM模型由Liebe于1989年提出,估算了0~1 THz频段内电磁波的大气衰减、相位延迟曲线,并不断修正,已成为描述毫米波和太赫兹波大气传播特性的经典模型。MPM模型主要基于电磁波在大气中的吸收和散射理论。模型考虑了各种气象条件(如雨、雾、霾)和大气成分对太赫兹波传播的影响。该模型充分考虑了各种成分(尤其是水蒸气和氧气)的吸收作用,并涵盖了大气压强、温度、湿度等环境变量带来的影响来预测信号的衰减。不过原始的MPM模型对复杂气象条件下的模拟过于简单,如在降雨条件下并未考虑降雨的尺寸分布(DSD)及雨滴粒子特性,这导致该模型的预测准确性下降。同时MPM模型的频率适用范围(10 GHz~1 000 GHz)较小,并且在极端天气下(如大雾、暴雨、沙尘暴)的准确性较差,并且MPM模型未将大气中的Ar、CO₂等微量气体考虑在内。然而,截至目前MPM模型仍是研究太赫兹波在雨、雾条件下大气传输特性的一个重要模型。

③ PARDO J R^[19]在2001年提出了长波大气光谱传输模型(Atmospheric Transmission at Microwaves, ATM),该模型对大气进行剖面解析,将

大气按照不同高度层分割,分别计算每层的吸收特性并结合高度积分获得总衰减。该模型在0~2 THz频段内较精确且最高适用频率高达10 THz,但此模型并未包含散射对衰减的影响。目前,ATM模型因其精度和适用性被运用到遥感和通信等诸多领域。

④ 2012年,Paine^[20,21]提出了AM(atmospheric model)模型,AM模型使用高精度的吸收线参数库,这些数据库提供了详细的分子吸收线参数,包括频率、强度、半宽度等,如HITRAN(High-resolution Transmission Molecular Absorption)和MTCCKD(Mlawer-Tobin-Clough-Kneizys-Davies)模型,是一个覆盖微波频段到亚毫米波段的大气辐射传输模拟工具。

目前,国内的研究大多集中在低频太赫兹波在大气空间的传输特性,以及雾、沙尘、雨、冰粒及其他大气气溶胶粒子对太赫兹波散射的影响。2015年,中国工程物理研究院的王玉文等基于修正后的VW谱性函数和辐射传输色散理论、水汽连续体吸收模型利用HITRAN数据库建立了一个太赫兹波大气传输衰减模型^[21](VVWH),并与国际已有的模型(如MPM模型)进行对比,结果符合预期。2019年,南京理工大学的娄国伟教授^[22,23]等对频率范围在100 GHz~1 000 GHz的短毫米波的目标辐射特性进行了研究。表1对几种常用的太赫兹传输模型进行了归纳。

表1 常用太赫兹传输模型

Table 1 Common terahertz transmission models

大气传输模型名称	适用频段	模型功能及应用	主要优缺点
大气分段传输模型	0~0.35 THz	估算均匀大气中的传播衰减及延迟特性	最早的研究太赫兹大气传输特性的模型,但模型的数据精度和适用性受限
大气毫米波传输模型(MPM)	0~1 THz	计算晴空、云雾天气下太赫兹波大气衰减	目前应用最广泛的模型,考虑了各种气象条件与环境变量的影响。但频率适用范围较小,在极端条件下准确性较差,且并未考虑大气中的微量气体造成的影响
长波大气光谱传输模型(ATM)	0~10 THz	具有高光谱分辨率,可应用于天文观测、遥感及通信等领域	在0~2 THz范围内拟合较好但模型未考虑散射对衰减的影响。
全球大气模型(AM)	0.25 THz~2 THz	利用数据库谱线参数计算微波到太赫兹波的大气传输衰减	使用高精度的吸收线参数库,在极端天气条件下存在一定的局限性。
太赫兹波大气传输衰减模型(VVWH)	0.1~1 THz	在短距离太赫兹无线通信及太赫兹雷达具有较高的应用价值	在低频段具有更高的精确度

1.2.1 不同条件干扰下的研究

2023年,华北电力大学曹相春^[24]计算了降雨

条件下地空链路上太赫兹波的衰减损耗,并对原有的降雨衰减模型进行了修正,具体方法是地将地

空链路在垂直梯度高度上进行分层, 按照高度修正每一层的温度, 按照 M-P 雨滴尺寸分布函数通过 Mie 理论与双德拜模型计算雨滴粒子对太赫兹波的消光系数, 最后积分得到总衰减。结果表明该修正后的模型相较于原有雨衰模型大大提高了降雨条件下太赫兹波沿地空路径传输损耗的精确度。2014 年, 西安电子科技大学王蓉蓉^[25,26]等计算了太赫兹波入射下雾滴粒子的消光系数, 并得到了太赫兹波段信号在不同能见度的雾中的传播特性。2015 年, 许文忠^[27]根据 Mie 散射理论与 Monte-Carlo 方法研究了在不同沙尘浓度与不同沙尘粒子存在的天气下太赫兹波单次和多次散射特性并计算了太赫兹波的传输衰减。

1.2.2 大气辐射计算软件的相关研究

20 世纪 80 年代, 美国空军地球物理实验室 (AFGL) 和波士顿大学开发了 LOWTRAN^[28,29] (Low-resolution Atmospheric Transmission) 软件并基于此开发了该软件的升级版 MODTRAN, 是用于大气透过率和辐射传输计算的软件工具。经过数十年的更新, 目前该软件于 2017 年更新至 MODTRAN6^[30,31] 版本。2007 年中科院大气光学中心^[32,33] 研发了一套通用辐射大气传输软件 CART, 2020 年更新后的 CART2 版本具有 0.1 cm^{-1} 光谱分辨率, 能够分辨出单个大气分子吸收谱线, 可以更精确地模拟大气分子的吸收, 并可以在中高光谱分辨率的光学工程和部分激光工程的大气传输计算中应用。

1.2.3 实验层面

2016 年, 西安电子科技大学与中国电波传播研究所搭建了国内第一套 0.34 THz 大气传播测试系统^[34], 该系统的太赫兹源采用 14.16 GHz 为输入信号, 经三倍频放大后再经过 3 个倍频器至 0.34 THz, 基于此系统的实验数据可以建立起 0.34 THz 的大气传输特性, 为该频段相关的通信及无线电系统设计提供基础。

1.3 太赫兹大气传输特性在部分场景中的应用展望

1.3.1 在通信中的应用

太赫兹波能够支持远超现有微波和毫米波通信系统的数据传输速率。这使得太赫兹波非常适用于卫星通信和星际通信, 满足未来高数据量、低延迟的通信需求。太赫兹大气传输特性的研究是实现太赫兹空间通信应用的关键技术^[35]。目前,

关于太赫兹在短程通信中的研究已取得不错的进展^[36-38]。对于远距离空间通信如地空通信、平流层内空对空通信、星际间卫星之间的通信等存在一些问题。目前, 大多数太赫兹空间通信的研究集中在对流层内, 而对流层又是地球大气中成分最复杂的一部分, 其中含有大量的水汽并且绝大多数天气现象都发生在对流层, 再加之没有高效稳定的大功率太赫兹源, 这使得目前太赫兹波在对流层的传输损耗较大, 无法在对流层实现中远距离的传输。不过太赫兹波存在大气传输窗口(低吸区), 通过精确测量, 对这些窗口进行建模, 可以在空间通信中利用这些窗口频段来减少信号衰减, 提高通信链路的有效性和稳定性。同时, 2019 年北京遥测技术研究所的钟育民论证了基于太赫兹技术的通信系统有望解决超高音速飞行器再入大气层时的“黑障”通信问题^[39]。2016 年, 西安电子科技大学陈伟^[40]等对太赫兹波在超高音速飞行器再入大气层时产生的等离子鞘套中的传播特性进行了研究, 并结合计算结果分析了时空非均匀等离子鞘套对太赫兹波传输特性的影响。

1.3.2 在大气遥感中的应用

太赫兹波的波长与典型的冰云粒子尺寸相当, 使其在冰云和冷云的观测中具有优势。太赫兹遥感技术可以提供有关冰云含量、粒子尺寸等重要信息, 为研究冰云的辐射特性和气候影响提供数据支持。例如 2020 年华中科技大学的陈柯^[41]等人利用 DOTLRT 辐射传输模式对太赫兹冰云辐射散射特性进行了研究。目前, 太赫兹技术在大气遥感领域的应用潜力已逐渐显现, 但太赫兹波在穿过大气层时也存在严重衰减, 限制了遥感设备的性能, 因此通过研究太赫兹大气传输特性能够极大地推进太赫兹大气遥感应用的发展。

2 太赫兹大气传输特性的未来研究趋势

建立准确的太赫兹大气传输模型是研究太赫兹大气传输特性的核心问题, 现已有部分文献关于太赫兹大气传输特性的研究, 但大多数研究都是针对某一特定频率或低频段太赫兹波的传输特性建模进行传输衰减分析, 缺乏对宽频带太赫兹波尤其是高频段太赫兹波的传输特性较为精确、系统的研究。一方面, 目前所使用的大部分谱线数据是基于仿真计算模拟得出, 缺乏以实验为基础的大气各成分吸收谱线的精确数据; 另一方面,

世界不同地区的大气各成分含量存在明显差异,甚至同一地区的大气成分也存在明显的时变特征,这为建立具有普适性和精确性的太赫兹波大气传输特性模型带来了很大的困难。因此,未来针对太赫兹大气传输特性的研究应该聚焦以下几个方面。

① 进一步关注大气中各成分对太赫兹波的吸收、散射特性。尤其是大气中微量气体所造成的影响,如Ar、CO、O₃等。同时由于MPM模型中关于水汽的连续吸收谱是通过经验公式得到的,所以应围绕水汽对太赫兹波的连续吸收问题开展深入研究。

② 太赫兹大气传输特性的研究涉及电磁波与电磁场、大气科学与气象学、光学与光谱学、固体电子学等多学科交叉。针对大气成分变异影响太赫兹大气传输模型精确性与普适性的问题,可以通过对不同地理区域的大气成分进行系统研究,建立不同区域的大气成分数据库。这将有助于理解和建模各区域内太赫兹波传输特性的差异,为制定更具普适性的传输模型提供基础数据支持。开展大气成分的时变特性研究,捕捉不同时间段内大气成分动态变化的动态变化。通过长时间的监测和数据积累,建立能够反映大气成分时变特征的动态模型,采用动态模型将提高太赫兹波传输特性模型的时效性和精确性。另外,太赫兹源的设计制造涉及固体电子学等学科,目前大部分太赫兹源都是通过倍频器级联实现的,并且转化效率较低,不能满足目前对高效大功率太赫兹源的需求^[42],因此目前通过实验测量太赫兹波的传输衰减还有一定难度,但随着技术的不断突破,实验测量太赫兹波传输衰减或将实现。

③ 针对目前高频段宽频带太赫兹波在大气传输过程中衰减特性研究的不足,未来针对这一频段建立衰减模型或在现有模型的基础上进行改进均存在许多困难,需要随着研究的不断深入逐步积累经验。

3 结束语

随着无线设备和应用的普及,人们对带宽的需求显著增加。太赫兹波能提供广阔的带宽,未来无线通信载波必然向太赫兹频谱扩展,而且太赫兹通信技术有望对超高音速飞行器再入大气层时产生“黑障”现象导致通信中断这一问题的解

决提供了新的可能。

由于太赫兹波成像系统具有穿透性强、分辨率高等优点,使得其在安防、反隐身目标探测中具有重要应用。太赫兹波对许多气体具有特定的吸收谱线,可用于对大气污染物和温室气体的监测。

但太赫兹技术也面临限制与挑战。如太赫兹波在大气传输过程中的衰减与散射较高,限制了其有效传输距离,因此研究太赫兹大气传输特性是必要的。同时关于太赫兹源和探测器等器件的开发仍需突破,特别是在成本、稳定性与高效性方面。

随着科技的不断进步,太赫兹技术将在通信、遥感以及环境监测等领域得到广泛应用。

参考文献

- [1] 刘盛纲. 太赫兹科学技术的新发展[J]. 中国基础科学, 2006, 8(1): 7-12.
LIU Shenggang. Recent development of terahertz science and technology[J]. China Basic Science, 2006, 8(1): 7-12.
- [2] TERASHIMA W, HIRAYAMA H. Design and fabrication of quantum cascade laser structure based on III-Nitride semiconductors in the THz frequency range[C]//International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2008.
- [3] XI H, WANG J, HE Z, et al. Continuous-wave Y-band planar BWO with wide tunable bandwidth[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 348.
- [4] ZHANG J, ZHANG T, ALFADHL Y, et al. Study on wideband THz backward wave oscillator driven by pseudospark-sourced sheet electron beam[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2020, (99): 1-8.
- [5] PAN P, TANG Y, BIAN X, et al. A G-band traveling wave tube with 20 W continuous wave output power[J]. IEEE Electron Device Letters, 2020, 41(12): 1.
- [6] DHILLON S S, VITIELLO M S, LINFIELD E H, et al. The 2017 terahertz science and technology roadmap[J]. Journal of Physics D Applied Physics, 2017, 50(4): 043001.
- [7] SCHWARZ M. Accelerator-Based THz Radiation Sources [M]. 2020. https://www.researchgate.net/publication/341-141330_Accelerator-Based_THz_Radiation_Sources.
- [8] ESSEN H, BIEGEL G, SOMMER R, et al. High resolution Tower-Turntable ISAR with the millimetre wave radar COBRA (35/94/220 GHz)[C]//European Conference

- on Synthetic Aperture Radar. VDE, 2008.
- [9] 成彬彬, 江舸, 陈鹏, 等. 0.67 THz 高分辨力成像雷达[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11(1): 7-11.
CHENG Binbin, JIANG Ge, CHEN Peng, et al. 0.67 THz high resolution imaging radar[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013, 11(1): 7-11.
- [10] CAO X C, HAO J H, ZHAO Q, et al. Analysis of anti-stealth characteristics of terahertz wa-ves in plasma stealth[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2023, 51(2): 3273-3279.
- [11] 董海龙, 汪家春, 曾宇润, 等. 红外低发射率隐身涂层对太赫兹波的反射光谱研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(10): 3007-3012.
DONG Hailong, WANG Jiachun, ZENG Yurun, et al. Reflection spectrum study of THz wave by infrared low emissivity stealth coating[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(10): 3007-3012.
- [12] 谢莎, 李浩然, 李玲香, 等. 太赫兹通信技术综述[J]. 通信学报, 2020, 41(5): 168-186. DOI:10.11959/j.issn.1000-436x.2020107.
XIE Sha, LI Haoran, LI Lingxiang, et al. Survey of terahertz communication technology[J]. Journal on Communications, 2020, 41(5): 168-186.
- [13] LIEBE H J, HUFFORD G A, COTTON M G. Propagation modeling of moist air and suspended water/ice particles at frequencies below 1000 GHz[J]. Ape, 1993.
- [14] ITU-R. (2017) ITU-R P.835-6-2017[S]. 2017.
- [15] ITU-R. (2022) ITU-R P.676-13-2022[S]. 2022
- [16] 王文涛. 毫米波被动探测空中目标技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
- [17] GERBER H E. Relative-humidity parameterization of the Navy Aerosol Model (NAM)[J]. DTIC, 1985: 1-16.
- [18] DUTTON E, DOUGHERTY H. Estimating year-to-year variability of rainfall for microwave applications in the U.S.A.[J]. IEEE Transactions on Communications, 1979, 27(5): 829-832.
- [19] PARDO J. R, CERNICARO J, SERABYN E. Atmospheric transmission at microwaves (ATM): An improved model formillimeter/submillimeter applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2001, 49(12): 1683-1694.
- [20] PAINE S. The am atmospheric model[J]. 2016.
- [21] 王玉文, 董志伟, 周逊, 等. 太赫兹波大气传输衰减模型[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(10): 82-87.
WANG Yuwen, DONG Zhiwei, ZHOU Xun, et al. Thz atmospheric attenuation model[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(10): 82-87.
- [22] 李旺. 空中目标毫米波辐射特性及探测方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2019.
- [23] 龚冰. 毫米波/亚毫米波目标辐射特性及探测技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- [24] 曹相春, 郝建红, 赵强, 等. 地空路径太赫兹波雨天衰减特性分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2023, 21(8): 971-976.
CAO Xiangchun, HAO Jianhong, ZHAO Qiang, et al. Characteristic analysis of rain attenuation for terahertz waves transmission along earth-space path along earth-space path[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2023, 21(8): 971-976.
- [25] 王蓉蓉. 大气水凝物中 THz 波和红外波的辐射传输特性[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- [26] 王蓉蓉, 吴振森, 张艳艳, 等. 太赫兹波段信号在雾中的传输特性研究[J]. 红外与激光工程, 2014(8): 2662-2667.
WANG Rongrong, WU Zhensen, ZHANG Yanyan, et al. Transmission characteristics of terahertz signal in fog[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014(8): 2662-2667.
- [27] 姚建铨, 许文忠, 钟凯, 等. 太赫兹波在沙尘中衰减特性[J]. 红外与激光工程, 2015(2): 523-527.
YAO Jianquan, XU Wenzhong, ZHONG Kai, et al. THz wave attenuation characteristics in sand and dust[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015(2): 523-527.
- [28] KNEIZYS F X, SHETTLE E P, GALLERY W O, et al. Atmospheric transmittance/radiance, computer code LOWTRAN 5[J]. Unknown, 1980: 233.
- [29] KNEIZYS F X. Atmospheric Transmittance/Radiation : Computer Code LOWTRAN6[J]. Air Force Geophys Lab, 1983: 83.
- [30] BERK A, ANDERSON G P, Acharya P K. MODTRAN4 User's Manual[J]. Unknown, 1999.
- [31] BERK A, HAWES F, Validation of MODTRAN®6 and its Line-By-Line Algorithm, J. Quant. Spectrosc[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2017, 203: 542-556.
- [32] 魏合理, 戴聪明, 武鹏飞, 等. 通用大气辐射传输软件 CART 在场景计算中的应用(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(5): 1-10.
WEI Heli, DAI Congming, WU Pengfei, et al. Applications of scene calculations of atmopsheric radiative transfer by using of CART(Invited)[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(5): 1-10.
- [33] 魏合理, 戴聪明, 武鹏飞, 等. 更新升级的通用大气辐射传输软件 CART2(特约)[J]. 红外与激光工程, 2020,

- 49(7): 53-60.
WEI Heli, DAI Congming, WU Pengfei, et al. Applications of scene calculations of atmospheric radiative transfer by using of CART(Invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(7): 53-60.
- [34] 卢昌胜, 李海英, 林乐科, 等. 0.34 THz大气传播测试系统设计[J]. *微波学报*, 2016, 32(3): 78-81.
LU Changsheng, LI Haiying, LIN Leke, et al. Design of atmospheric propagation measurement system in 0.34 THz[J]. *Journal of Microwaves*, 2016, 32(3): 78-81.
- [35] 姚建铨, 汪静丽, 钟凯, 等. THz辐射大气传输研究和展望[J]. *光电子激光*, 2010, 21(10): 1582-1588.
YAO Jianquan, WANG Jingli, ZHONG Kai, et al. Study and outlook of THz radiation atmospheric propagation [J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2010, 21(10): 1582-1588.
- [36] WANG Yiqin, LI Yuanbo, CHEN Yi, et al. 0.3 THz channel measurement and analysis in an l-shaped indoor hallway[C]// 2022 IEEE International Conference on Communications. Seoul, Republic of Korea. 2022: 2870-2875.
- [37] JIANG Tao, ZHANG Jianhua, TANG Pan, et al. A study of uplink and downlink channel spatial characteristics in an urban micro scenario at 28 GHz[J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2021, 22(4): 488-502.
- [38] SERGHIU D, KHALILY M, JOHNY S, et al. Ultra-Wideband terahertz channel propagation measurements from 500 to 750 GHz[C]//2020 International Conference on UK-China Emerging Technologies(UCET). 2020:1-4.
- [39] 钟育民, 李艳华. 太赫兹通信解决黑障问题的探讨与分析[J]. *遥测遥控*, 2019, 40(1): 14-19.
ZHONG Yumin, LI Yanhua. Discussion and analysis of terahertz communication for blackout elimination[J]. *Journal of Telemetry, Tracking and Command*, 2019, 40(1): 14-19.
- [40] 陈伟, 郭立新, 李江挺, 等. 时空非均匀等离子体鞘套中太赫兹波的传播特性[J]. *物理学报*, 2017, 66(8): 77-84.
CHEN Wei, GUO Lixin, LI Jiangting, et al. Propagation characteristics of terahertz waves in temporally and spatially inhomogeneous plasmasheath[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(8): 77-84.
- [41] 陈柯, 董彬彬, 李迎雪, 等. 太赫兹冰云辐射散射特性研究和探测参数设计[J]. *遥感学报*, 2022, 26(11): 2204-2218.
CHEN Ke, DONG Binbin, LI Yingxue, et al. Terahertz radiation and scattering characteristics of ice cloud and sounding parameter design[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2022, 26(11): 2204-2218.
- [42] 张筱健, 蒋均, 田遥岭, 等. 基于对差分结构的320 GHz三倍频器[J]. *强激光与粒子束*, 2024, 36(8): 63-69.
ZHANG Xiaojian, JIANG Jun, TIAN Yaoling, et al. A 320 GHz frequency tripler based on face-to-face differential structure[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2024, 36(8): 63-69.

[作者简介]

- 徐晨辉 2001年生, 硕士研究生。
张光锋 1975年生, 副研究员, 硕士生导师。
樊振宏 1978年生, 教授, 博士生导师。

(本文编辑: 杨秀丽)

(英文编辑: 赵尹默)