

6G 太赫兹传输链路特性分析

Analysis on Propagation Characteristics of 6G Terahertz

高 帅,张忠皓,李福昌,马静艳,延凯悦(中国联通网络技术研究院,北京 100048)

Gao Shuai, Zhang Zhonghao, Li Fuchang, Ma Jingyan, Yan Kaiyue (China Unicom Network Technology Research Institute, Beijing 100048, China)

摘 要:

6G时代,太赫兹技术将实现Tbit/s的超高容量,而更高频点电磁波将面临更为复杂的链路传播环境。分别介绍了太赫兹在晴朗空气、雨天、雾天等场景的链路损耗,给出太赫兹可用频谱建议以及太赫兹适合室外短距离覆盖以及室内覆盖的结论,最后提出相应的6G太赫兹的应用场景建议。

关键词:

6G;太赫兹;链路损耗;部署场景

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2020.04.003

文章编号:1007-3043(2020)04-0011-04

中图分类号:TN929.5

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

In the 6G era, terahertz technology will realize the ultra-high capacity of Tbps, while higher frequency electromagnetic waves will face more complex link propagation environment. It introduces the link loss of terahertz in clear air, rainy days and foggy days, gives recommendations for available terahertz spectrum, and concludes that terahertz is suitable for outdoor short-range coverage and indoor coverage. Finally, the corresponding 6G terahertz application deployment scenario are proposed.

Keywords:

6G; Terahertz; Link loss; Deployment scenarios

引用格式:高帅,张忠皓,李福昌,等. 6G 太赫兹传输链路特性分析[J]. 邮电设计技术,2020(4):11-14.

0 引言

随着高清数字电视、超高清VR/AR等多媒体业务的日益兴起,人们对高速数据传输的需求日益增长。为了实现更高的数据速率,通信系统需要分配更宽的带宽,追求更高的频谱效率。在带宽方面,100 GHz以上的载波频率是未来无线局域网最有希望的替代方案。

太赫兹(THz)波段通常从300 GHz到10 THz。这一波段的电磁波对陶瓷、纸张、木材、纺织品和塑料等介质材料可以轻易穿透,但很难穿透金属和水。在外层空间,太赫兹波可以无损耗的传输,用很小的功率

就可实现远距离通信,因此,太赫兹频段可以广泛应用于太空通信中。但在大气环境下,高自由空间损耗以及大气效应引起的额外衰减是一个巨大的挑战。在不同的天气条件下,如大气分子、雨滴或雾滴,都可能导致太赫兹波段电磁波的高衰减或散射。

然而在某些确定的太赫兹频段依旧可以产生较低的衰减,因此可以在这些频率窗口范围内进行数据传输。通常这些频率窗口被定义在300 GHz~1 THz,超过1 THz的频段由于极端的衰减不在无线通信建议的使用选项中。

因此,6G太赫兹应用落地还面临一系列的问题与挑战。运营商和各个行业已经开始从太赫兹器件和太赫兹光学应用方面进行研究,但业界对太赫兹在无线链路的传播特性的分析还比较少。本文分析了太

收稿日期:2020-02-28

赫兹在晴朗空气、雨天、雾天等场景的链路损耗,并依据太赫兹链路传播特点提出6G太赫兹应用场景建议。

1 6G 太赫兹在大气中传播特性分析

大气和天气对无线电波传播的影响表现为衰减、相移和到达角的变化,这种现象包括分子吸收(主要是由于水蒸气和氧气)、散射和闪烁。在分子(气体)吸收方面,水蒸气是大气中最基本的吸收成分,会导致太赫兹频段,尤其是300 GHz以上某些太赫兹波段衰减值较大。

1.1 晴朗天气太赫兹传播特性分析

在晴朗的天气中太赫兹波的衰减取决于电磁波和分子共振的频率差,当波的频率与共振频率重合时,衰减会达到最大值。在557 GHz和752 GHz 2种谐振频率下,均表现出较高的衰减。分子共振引起的衰减可以达到很高的值,但也有衰减小于等于100 dB/km的频率窗,可根据以下3种衰减评估模型:MPM模型、AM模型和ITU-R P.676-10模型计算不同频段太赫兹波传输时的损耗。

其中ITU-R P.676-10模型可以被引用在1 THz以下的频率模型中,在频率 f 点处损耗的计算公式如下:

$$\gamma = \gamma_o(f) + \gamma_w(f) = 0.182 QfN''(f) \quad (1)$$

其中 $N''(f)$ 为频率相关复折射率的虚部。

$$N''(f) = \sum_i S_i F_i + N''_d(f) \quad (2)$$

$N''_d(f)$ 为压力诱导氮吸收引起的连续体, S_i 为频谱线强度。

$$S_i = \begin{cases} a_1 \times 10^{-7} p \theta^3 \exp[a_2(1 - \theta)] & \text{氧气} \\ b_1 \times 10^{-1} e \theta^{3.5} \exp[b_2(1 - \theta)] & \text{水蒸气} \end{cases} \quad (3)$$

这里 p 是干燥空气的压力, e 是水蒸气压力, θ 是环境温度。系数 a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 可由文献[3]得出。

则由式(4)可得晴朗天气的损耗与路径距离 d 的关系:

$$L_g = d \cdot \gamma \quad (4)$$

图1展示了0.01~10 THz的太赫兹波在晴朗天气下的频率衰减谱。由图1可知,太赫兹波在大气中的传播衰减率随着频率增加呈现指数增加的趋势,在0.3 THz以下,太赫兹波的大气衰减低于10 dB/km,适合作为无线通信载波,而超过1 THz的太赫兹频段由于极端的衰减不在无线通信传输的考虑范围内。同时图1展示了A~J各频点处呈现明显的波峰,这是由于太赫兹波在长距离传输时易受水蒸气、氧气分子的

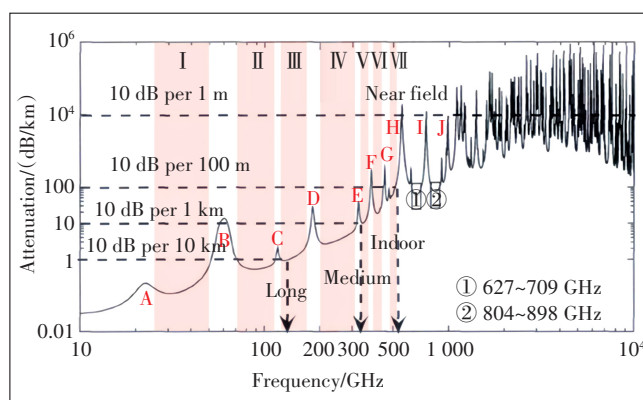


图1 太赫兹波大气衰减谱(0.01~10 THz)

影响,出现分子共振效应,导致损耗急剧增大。因此在设计太赫兹室外远距离传输系统时,应选择合适的频率窗口进行传输,来获得较高的传输效率。

表1展示了理论可用的太赫兹频率窗范围,包含94 GHz、120 GHz、140 GHz、220 GHz、340 GHz等多个可用频点。在频谱申请和应用方面,国际电信联盟ITU指定120 GHz和220 GHz频段分别用于下一代地面无线通信和卫星间通信,世界无线电通信大会WRC-2019将275~450 GHz频段定位为可用以陆地移动通信的频段,美国、欧盟、日本等分别对0.12 THz、0.24 THz的无线通信系统进行了研究。考虑到国内外太赫兹的技术成熟度和太赫兹波的高传输损耗特点,中国联通太赫兹频谱申请和应用方面,建议采用0.12 THz和0.24 THz频段作为太赫兹无线通信传输系统的主要频段。

表1 THz频率窗范围

参数	I区	II区	III区	IV区	V区	VI区	VII区
范围/GHz	24~52	70~118	120~150	190~320	330~370	387~432	480~520
频宽/GHz	18	48	30	130	40	45	40

1.2 雨天太赫兹传播特性分析

在雨天环境中,空气中的雨滴球形散射会给太赫兹波带来额外的衰减,雨衰的大小与雨滴的直径有关,因此雨滴大小的分布是监测降雨以及预测雨衰的重要因素。在ITU-R II.838-3雨衰模型中计算了信号的衰减随着降雨速率、信号频率、偏振度等因素的变化函数,如式(5)所示:

$$\gamma_r = kr^a \quad (5)$$

式中:

r ——降雨速率(mm/h)

k 和 a ——取自于频率函数(1~1 000 GHz)的参数

由于雨滴的形状、大小与射频信号的波长相关,雨衰也是一个关于信号偏振的函数,则雨衰与路径 d 的关系可表示为:

$$L_r = d\gamma_r \quad (6)$$

图2展示了不同频率电磁波的水平极化波在多种雨天环境下的损耗,低于10 GHz的雨衰可以忽略,10~120 GHz的雨衰随着频率增加而递增,超过300 GHz到900 GHz雨衰会随着频率增加而递减,但仍维持一个较高的损耗水平。由此可知,雨水吸收衰减将会使得太赫兹波应用于室外无线通信时面临很大的挑战,是太赫兹器件设计和网络规划时需解决的问题。

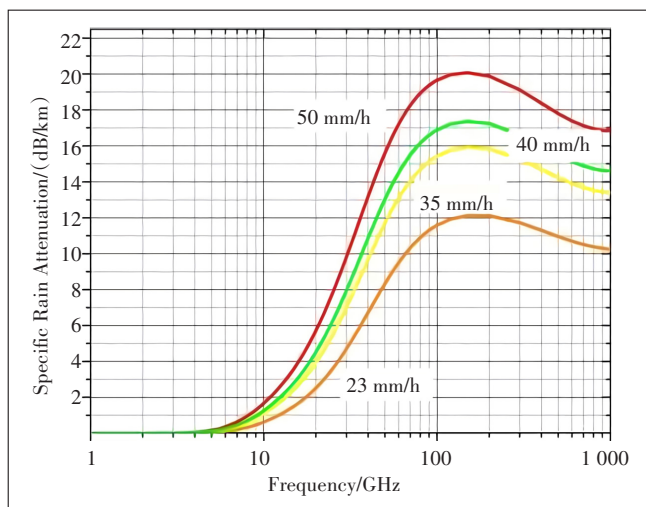


图2 不同频率电磁波在雨天的损耗

1.3 雾天太赫兹传播特性分析

在大雾天气中,太赫兹波的衰减随着频率和雾的密度增加而增加。图3展示了在15°C条件下,不同频段电磁波穿透300 m范围的雾时(0.05 g/m³)与穿透50 m范围的雾时(0.5 g/m³)的链路损耗对比。由图3可知,对于400 GHz以上的频率,在50 m范围内0.5 g/m³的雾天环境下额外的衰减为10 dB/km,因此雾天环境也会影响太赫兹波的传输效率。

1.4 自由空间太赫兹传播特性分析

在自由空间中采用经典的Friis公式描述太赫兹波的链路损耗:

$$L_{FS} = 32.4 + 20\log f + 20\log d - G_{Tx} - G_{Rx} \quad (7)$$

图4显示了参考距离为1 km时,不同频段电磁波在晴朗天气、多雨天气以及叠加自由空间损耗的晴天和雨天环境中的链路损耗对比,所考虑的晴天和雨天2个场景分别代表最佳和最差的环境条件。与预期一样,50 mm/h的降雨速率会导致最大的衰减,因此,

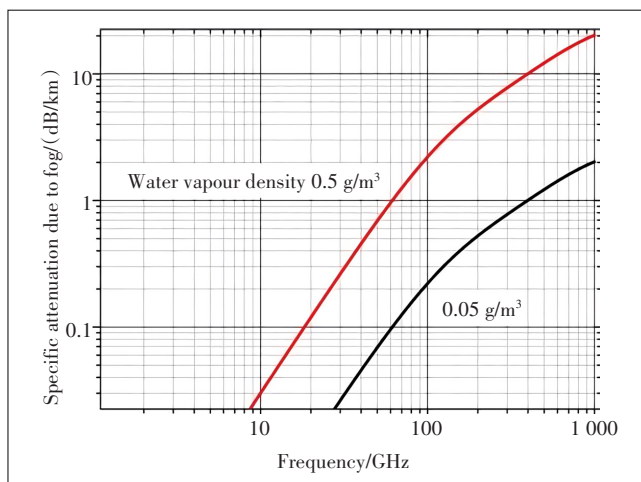


图3 不同频段电磁波在大雾天气的损耗

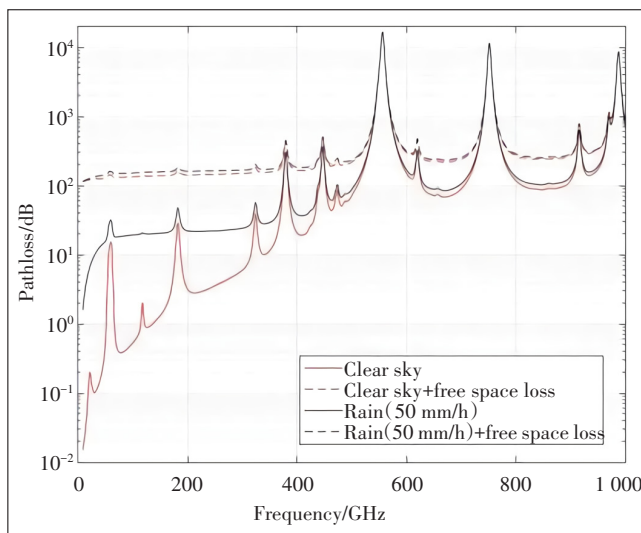


图4 不同频段在干净大气与雨天场景的损耗图

通常来说这将是未来太赫兹通信系统运行的极限情况。

2 太赫兹应用场景分析

2.1 太赫兹适用于室内场景

由图4可以看出,由于受到水蒸气以及大气其他气体的吸收,超过0.3 THz的频段在大气中的损耗较高,1 THz以下有几个频率窗口的损耗在100 dB/km之下,但是依旧保持较高的损耗值。因此在不考虑收发两端高天线增益条件下,可以认为太赫兹波不适合作为室外数据传输的载体,但是可以将其应用在室内环境,一般室内无线场景只有10 m的通信距离或者更短,在10 m的范围内比如0.3 THz的信号衰减约为0.1 dB/m或者更小,这在室内环境是可以忽略的。

借助太赫兹超大的可用带宽以及极高的传输速率,在室内的环境下太赫兹可以作为替代 WLAN 的一种方案,比如用于无线显示、家庭高清电视、从一个服务器的高速上传下载大文件、回传链路或者点对点配置、校园或者礼堂部署、自动化制造等室内场景,利用太赫兹系统将会促进超宽带视频业务在室内移动、静止等场景中的应用。

2.2 太赫兹适用于室外场景

考虑到太赫兹室外通信的主要问题是水蒸气引起的大气衰减以及目前较低的资源利用率和低发射功率,补偿损失的一种方法是在链路两端使用极高的天线增益,即使用大规模的天线阵列。

此时,通常可以引入参数 EIRP 与 G_{α} ,该参数分别代表输出功率和链路两端可用的天线增益。这样,任何平衡链路损耗(自由空间路径损耗、大气等)的系统需求都可能来自天线增益,而不是发射功率。

在参考文献[4]中,对 EIRP+ G_{α} 参数进行了3个值的检验,分别是 50 dBm、100 dBm 和 150 dBm。同时,文章假设环境温度为 300 K,接收机噪声为 10 dB。图 5 给出了晴空条件下 1 km 固定无线链路的最大数据速率。由于这是衰减方面的最佳方案,因此参数 EIRP+ G_{α} 的 3 种不同情况下显示的数据速率为峰值速率。随着 EIRP+ G_{α} 的增加,可以用于数据传输的波段成倍扩宽。因此未来太赫兹产业链需要研究超高增益的天线技术,小型化高功率射频前端、超高速信号处理技术、波束捷变天线技术、新型高效 MAC 协议、新型网络技术等技术来弥补超高的路损,提供 Tbit/s 的超高速率。

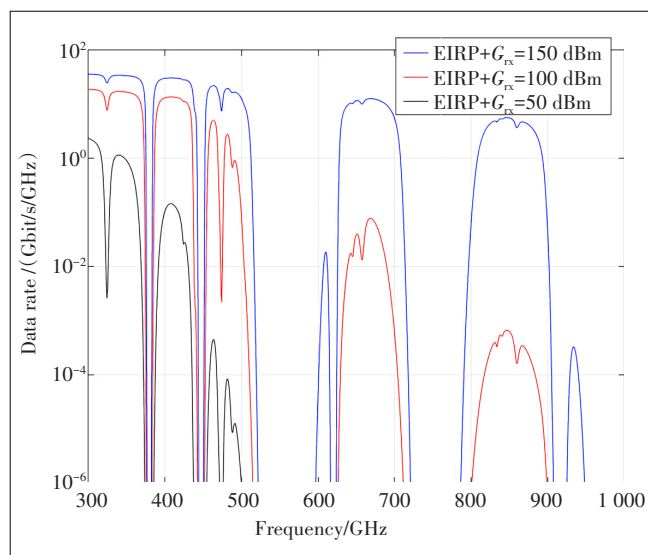


图5 不同太赫兹频率下的峰值速率

3 太赫兹部署场景建议

太赫兹波在自由空间以及雨天、空气中的链路损耗较大,因此室外部署初期应充分考虑太赫兹短距离热点覆盖或用于宽带无线接入。应用于热点覆盖时,可搭配 5G 低频以及毫米波系统进行通信,并需要充分考虑恶劣天气如雨、雪、雾对太赫兹频段的影响。

太赫兹波同样适合室内部署,借助定向波束或丰富的反射路径来实现家庭或办公区域的覆盖,替代 WLAN 进行高清视频会议业务或高清电视业务。

4 总结

太赫兹波段的高自由空间损耗和大气衰减,可以通过使用高增益天线和特定频率窗口的传输来解决,借助这种方法,即使在恶劣的环境条件下,也有可能实现大容量的室外太赫兹无线通信网络,然而现有太赫兹的硬件方面还面临一系列挑战,比如功率放大器、处理器速度、天线和硬件技术。

若基站和终端的天线增益受限,则需要考虑在室内部署太赫兹通信系统来降低高自由空间损耗和大气衰减对通信质量带来的影响。对于较短的室内距离,由于降低了路径损耗可以实现更高的效率以及多 Tbit/s 的容量。但太赫兹通信还面临链路损耗、衍射损耗、设备封装技术不够成熟等挑战。

参考文献:

- [1] 赵国忠. 太赫兹科学技术研究的新进展[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(2): 1-6+20.
- [2] 刘盛纲, 钟任斌. 太赫兹科学技术及其应用的新发展[J]. 电子科技大学学报, 2009, 38(5): 481-486.
- [3] Attenuation due to Atmospheric Gases: ITU-R P. 676-10 [S/OL]. [2020-01-12]. https://www.itu.int/rec/R-REC-P.676-8-200910-P/_page.print.
- [4] FYTAMPANIS P G, TSOULOS G V, ATHANASIADOU G E, et al. Wireless channel capacity estimation in the THz band [C]//2017 International Workshop on Antenna Technology: Small Antennas, Innovative Structures, and Applications (iWAT). IEEE, 2017: 339-342.

作者简介:

高帅,工程师,硕士,主要研究方向为毫米波、太赫兹、MEC、5G 通信等;张忠皓,教授级高级工程师,北京邮电大学兼职教授,博士,主要从事移动网无线新技术相关课题研究、标准制定、设备验证和新业务研究工作;李福昌,教授级高级工程师,国家知识产权局中国专利审查技术专家,博士,主要从事移动通信及固网移动融合等专业的标准制定、测试验证、课题研究等工作;马静艳,工程师,博士,主要研究方向为太赫兹、毫米波、5G 通信等。