

# 面向 6G 太赫兹传播模型研究

张军民

(中国电信股份有限公司浙江分公司, 浙江 杭州 310040)

**摘要:** 6G 将向更高频段扩展, 并高效利用低中高全频谱资源。其中, 低频段频谱仍将是 6G 发展的战略性资源, 毫米波将在 6G 时代发挥更重要作用, 而太赫兹等更高频段将重点满足特定场景的短距离大容量需求。当前针对太赫兹的传播模型处于空白阶段, 从 6G 应用愿景出发, 结合太赫兹频段特点, 对太赫兹频段的传播模型进行了探讨。

**关键词:** 6G; 太赫兹; 覆盖; 传播模型

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.212297

中文引用格式: 张军民. 面向 6G 太赫兹传播模型研究[J]. 电子技术应用, 2021, 47(12): 15-17, 21.

英文引用格式: Zhang Junmin. Review of research on 6G Terahertz propagation model[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(12): 15-17, 21.

## Review of research on 6G Terahertz propagation model

Zhang Junmin

(China Telecom Corporation Limited Zhejiang Branch, Hangzhou 310040, China)

**Abstract:** 6G would expand to higher frequency bands and make efficient use of low, medium and high full spectrum resources. The low-frequency spectrum will still be a key strategic resource for the development of 6G. Compared with present, Millimeter wave will play a more important role in the 6G era. Terahertz and other higher frequency bands will focus on meeting the short-range and high-capacity needs of specific scenes. At present, the propagation model for Terahertz is in the blank stage. Starting from the vision of 6G service and combined with the characteristics of Terahertz frequency band, this paper will discuss and review the research of communication propagation model in Terahertz frequency band.

**Key words:** 6G; Terahertz; coverage; propagation model

### 0 引言

香农(Shannon)提出并严格证明了在被高斯白噪声干扰的信道中, 最大信息传送速率  $C$  的计算公式:

$$C = W \log_2(1 + S/N) \quad (1)$$

其中,  $W$  是信道带宽(单位为 Hz),  $S$  是信道内所传信号的平均功率(单位为 W),  $N$  是信道内部的高斯噪声功率(单位为 W)。近 10 年间, 无线传输速率需求正以每 18 个月一翻的速度高速增长<sup>[1]</sup>。由香农公式可见, 为追求更高的传输速率, 需要有更大的传输带宽、更强信号功率和更小的信道噪声。而在这些因素中, 更大的传输带宽是一个提升效率最高的方法。因此, 太赫兹波(0.1~10 THz)在目前看来是 6G 超高速率的频段选择<sup>[2]</sup>。

### 1 6G 业务介绍

6G 将进一步增强和拓展 5G 定义的 eMBB、uRLLC、mMTC 等特性, 全面实现万物智联<sup>[3]</sup>, 智慧连接、深度连接、泛在连接、全息连接是 6G 的重要业务特点, 6G 将融合更加先进的传感、成像、显示和 AI 等技术, 提供超连接体验。预测 2030 之后将走向虚拟与现实相结合的“数

字孪生”世界, 整个世界将基于物理世界生成一个数字化的孪生虚拟世界, 物理世界的人和物、人和物、物和人之间可通过数字化世界来传递智能信息。从智享生活、智赋生产、智焕社会三方面, 6G 的主要应用场景、指标需求和潜在使能技术如图 1 所示。

如表 1 所示, 与 5G 网络关键指标相比, 6G 网络在速率、时延、流量密度、连接密度等方面都提出了更高的期望与要求。为了满足 6G 的峰值速率 Tb/s 级、用户体验 Gb/s 级的业务要求, 太赫兹和可见光等新频谱通信技术是未来的重点之一<sup>[4]</sup>。

### 2 太赫兹介绍

太赫兹(Terahertz, 1 THz=1 024 GHz)泛指频率在 0.1~10 THz 波段(对应波长为 30~3 000  $\mu\text{m}$ )范围内的电磁波, 介于红外和微波之间。太赫兹波在电磁波频谱中所处的位置见如图 2 所示。

太赫兹波的位置处于宏观电子学向微观光子学的过渡阶段, 频率为 1 THz 的太赫兹波仅具有 4.1 meV 的光子能量, 约为 X 射线光子能量的百分之一量级。由于

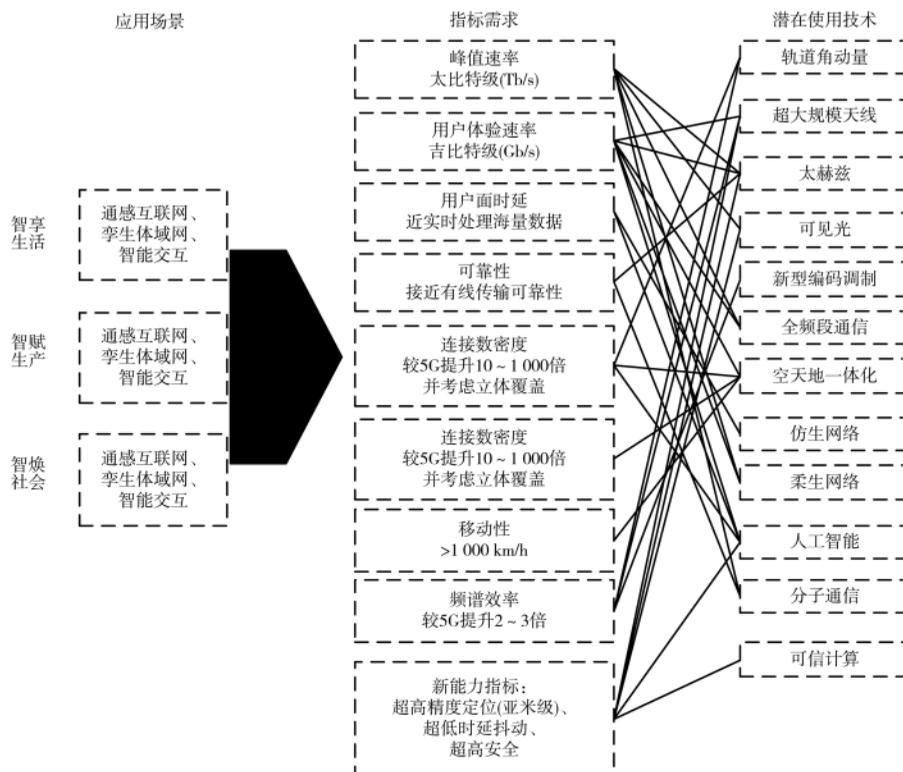


图 1 6G 主要应用场景、指标需求和潜在使能技术

表 1 6G 与 5G 关键指标对比

| 指标     | 6G  | 5G   | 提升效果       |
|--------|---|--|------------|
| 速率指标   | 峰值速率: 100 Gb/s~1 Tb/s<br>用户体验速率: 1~100 Gb/s | 峰值速率: 10~20 Gb/s<br>用户体验速率: 0.1~1 Gb/s   | 10~100 倍   |
| 时延指标   | 0.1 ms, 接近实时处理海量数据时延                        | 1 ms   | 10 倍       |
| 流量密度   | 100~10 000 Tb/s/km <sup>2</sup>             | 10 Tb/s/km <sup>2</sup>  | 10~1 000 倍 |
| 连接数密度  | 最大连接密度可以达到 1 亿连接/km <sup>2</sup>            | 100 万个/km <sup>2</sup>   | 100 倍      |
| 移动性    | 大于 1 000 km/h                               | 500 km/h   | 2 倍        |
| 频谱效率   | 200~300 b/s/Hz                              | 100 b/s/Hz   | 10 倍       |
| 定位能力   | 室外 1 m, 室内 10 cm                            | 室外 10 m, 室内 1 m  | 2~3 倍      |
| 频谱支持能力 | 常用载波带宽可达 20 GHz, 多载波聚合可实现 100 GHz           | Sub 6G 常用载波带宽可达 100 MHz, 多载波聚合可实现 200 MHz; 毫米波频段常用于载波带宽可达 400 MHz, 多载波聚合可以实现 800 MHz | 10 倍       |
| 网络能效   | 可达 200 b/J                                  | 可达 100 b/J   | 2 倍        |

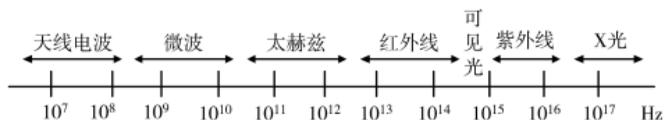


图 2 频段示意图

缺乏有效的太赫兹波产生和检测的方法,因此对太赫兹波的研究较为有限,使其成为电磁波谱研究上的“太赫兹空隙”(TerahertzGap)。太赫兹的传播特性、传播模型研究等研究也基本处于空白阶段。

### 3 太赫兹传播模型研究

传播模型是移动通信网络规划仿真的基础,无线传播模型建模的主要方法分为定性分析法、统计学分析法

和混合分析法。在严格保证其他环境条件的前提下,定性分析法运用光学传播原理能够准确描述波的传播现象。统计学分析法则运用随机分布与随机过程对信道参数进行数理建模推测,同时这种方法也存在着较为不错的可复制性。混合分析法则上述两种方法在平衡准确度与效率后的综合。针对太赫兹传播模型建模方法,视距传播与反射可运用定性分析法;而散射与衍射,统计学分析法则更为合适<sup>[5]</sup>。

从 150 MHz~100 GHz 已有成熟的传播模型。如 150~1 500 MHz 主要由 Okumura-Hata 模型,4G 网络主力频段 1 500 MHz~2 GHz 则可运用 COST 231-Hata 模型。5G 时代下,C-Band 和毫米波作为新的通信频段被引入,对于

C-Band 和毫米波, 3GPP 定义了 UMa 和 3D-UMa 传播模型分别适配 2 GHz~6 GHz 频段和 6 GHz~100 GHz 频段。

太赫兹的视距传播与反射可运用射线追踪法(Ray-Tracing)进行建模。即通过实验设备与计算机科学, 根据基本光学原理, 模拟固定无线信号源在到接收器过程中的所有传播、反射、衍射和散射进行跟踪与记录。但这种方法对器材, 设备的需求量极高, 且因为对背景条件有严格约束, 较难被广泛运用。而对于散射与衍射的统计学分析, 学术界针对 0.3 THz 的太赫兹波进行过室内传播模型建模<sup>[6]</sup>。但与定性研究法相比, 其准确度相对较低。而作为综合研究法的 SSRTH 法(随机散射放置与射线追踪综合法, Stochastic Scatterer placement and RT Hybrid approach)则平衡了以上两者的优缺点<sup>[7]</sup>。

针对 0.1~10 THz 的太赫兹频段, 理论分析太赫兹的主要传播特性如下:

(1) 赫兹波的自由空间传播损耗比无线电波高约 30~50 dB, 在空中传播时极易被空气中的水分吸收, 比较适合于高速短距离无线通信, 需要针对室内和室外的场景建立适合 THz 的多径信道模型。

(2) 太赫兹波长短, 适合采用更多天线阵子的 Massive MIMO, 同时太赫兹路径损耗的急剧增加, 需要超大规模的天线阵列来补偿路径损耗, 因为超大天线阵列已被证明能有效提升太赫兹频段波在传播距离方面的性能。

(3) 太赫兹能量效率高, 穿透能力强。

相比于中低频段主要的研究难点在于对于视线传播(LoS)、反射、散射和衍射等均需分别单独建模。同时单天线收发与超多天线收发(UM-MIMO)间存在明显不同<sup>[8]</sup>。

表 2 对 275~450 GHz 进行了链路预算估计, 天线发射(Tx)和接收(Rx)增益为 30 dB, 发射功率为 0 dBm, 链路距离为 10 m, 噪声系数为 15 dB。由于路径损耗较高(约 100 dB), 因此需要一个高度定向的锐方向性射束作为补偿。

表 2 275~450 GHz 下的链路预算估计

| 发射功率/dBm | 频率/GHz  | 距离/m | 路径损耗/dB | 大气吸收/(dB/km) | 噪声系数/dB | 天线发射/接收增益/dB | 接收功率/dBm |
|----------|---------|------|---------|--------------|---------|--------------|----------|
| 0        | 275~296 | 10   | -101.5  | 10           | 15      | 30           | -56.6    |
| 0        | 306~313 | 10   | -102.3  | 16           | 15      | 30           | -57.4    |
| 0        | 318~333 | 10   | -102.7  | 20           | 15      | 30           | -57.9    |
| 0        | 356~450 | 10   | -104.5  | 10           | 15      | 30           | -59.6    |

毫米波无线通信系统路径损耗较高, 而太赫兹无线通信的路径损耗则更高。例如, 28 GHz 下在 10 m 距离上的路径损耗为 81 dB, 但在 280 GHz 下增加到 101 dB。

表 3 总结了关于最先进太赫兹无线通信系统及其在 275~450 GHz 下性能的不完全调研。电子方法和光电方法都证明数据速率高达 100 Gb/s, 但通信距离大多不

表 3 太赫兹链路性能

| 技术             | 频率/GHz | 数据速率/(Gb/s) | 距离/m | 发射功率/dBm | 调制    |
|----------------|--------|-------------|------|----------|-------|
| GaAs mHEMT     | 300    | 64          | 1    | -4       | QPSK  |
| InP HEMT       | 300    | 20          | 0.8  | +3       | ASK   |
| CMOS           | 300    | 56          | 0.05 | -5.5     | 16QAM |
| CMOS           | 300    | 105         | -    | -5       | 32QAM |
| CMOS           | 300    | 20          | 0.1  | -        | 16QAM |
| InP-HEMT       | 300    | 100         | 2.22 | -        | 16QAM |
| InP-HEMT       | 300    | 120         | 9.8  | -        | 16QAM |
| InGaAs         | 300    | 60          | 0.5  | -7       | 16QAM |
| Optoelectronic | 280    | 100         | 0.5  | -10      | 16QAM |
| Optoelectronic | 300    | 10          | 0.5  | -20      | OOK   |

到 2 m。于此同时, 通过 InP-HEMT 技术在 9.8 m 的距离下实现了高达 120 Gb/s 的数据速率。同时还介绍了一个光电系统, 该系统由一个光子单行载流子二极管发射机和一个基于 InGaAs HEMT 技术的有源电子接收机组成。据说该系统能够在 15 m 的距离内实现高达 100 Gb/s 的数据速率。

#### 4 结论

传播模型是规划仿真的基础。作为 6G 时代新型频率资源的太赫兹频段, 其特性理论研究和传播模型均处于起步阶段, 学界内较普遍地将综合研究法作为太赫兹频段传播模型建模的探索方向。由于太赫兹频段路径损耗高, 因此覆盖增强的 MASSIVE MIMO 乃至 UL-MASSIVE MIMO 技术将成为太赫兹频段在 6G 时代正式商用部署的关键。在实验室研究方面, 受限于太赫兹芯片和射频器件, 太赫兹传播特性测试和研究难度目前仍然较高, 近期基于 InP、GaAs、SiGe、乃至 CMOS 技术的运用已使得整体研究在较低的 THz 频段产生了一些突破。而太赫兹传播模型的确立也将为 6G 网络仿真、覆盖规划奠定基础。

#### 参考文献

- [1] AKYILDIZ I F, JORNET J M, HAN C. TeraNets: ultra-broad-band communication networks in the Terahertz band[J]. IEEE Wireless Commun., 2014, 21(4): 130-135.
- [2] SONG H J, NAGATSUMA T. Present and future of Terahertz communications[J]. IEEE Trans. Terahertz Science and Technology, 2011, 1(1): 256-263.
- [3] 魏克军, 赵洋, 徐晓燕. 6G 愿景及潜在关键技术分析[J]. 移动通信, 2020(6): 17-21.
- [4] 魏克军. 全球 6G 研究进展综述[J]. 移动通信, 2020, 44(3): 4.
- [5] HAN C, YI C. Propagation modeling for wireless communications in the Terahertz band[J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(6): 96-101.
- [6] PRIEBE S, KURNER T. Stochastic modeling of THz indoor radio channels[J]. IEEE Trans. Wireless Commun., 2013, 12(9): 4445-4455.

(下转第 21 页)

的技术挑战,主要包括:设计有效的通信感知一体化的波形,降低信号干扰,获得更高的协同增益;进行通信感知协同的功率控制和能耗优化,降低设备功耗,节省能源及运行成本;研究通信感知一体化的硬件架构,解决高性能全双工等带来的干扰和设备电路等设计问题。

#### 参考文献

- [1] CUI Y, LIU F, JING X, et al. Integrating sensing and communications for ubiquitous IoT: applications, trends and challenges[J]. arXiv preprint arXiv: 2104.11457, 2021.
- [2] LIU F, CUI Y, MASOUIROS C, et al. Integrated sensing and communications: towards dual-functional wireless networks for 6G and beyond[J]. arXiv preprint arXiv: 2108.07165, 2021.
- [3] LIU F, MASOUIROS C, PETROPULU A P, et al. Joint radar and communication design: applications, state-of-the-art, and the road ahead[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(6): 3834-3862.
- [4] 杨艳, 张忠皓, 马静艳. 6G 通信感知一体化架构与技术研究[J]. 电子技术应用, 2021, 47(9): 1-4, 15.
- [5] 中国移动通信有限公司研究院. 迈向 5G C-RAN: 需求、架构与挑战白皮书(v1.0)[Z]. 2016.
- [6] ZHANG A, RAHMAN M L, HUANG X, et al. Perceptive mobile networks: cellular networks with radio vision via joint communication and radar sensing[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2020, 16(2): 20-30.
- [7] ALI A, GONZALEZ-PRELCIC N, HEATH R W, et al. Leveraging sensing at the infrastructure for mmWave communication[J]. IEEE Communications Magazine, 2020, 58(7): 84-89.
- [8] KUMARI P, VOROBYOV S A, HEATH R W. Adaptive virtual waveform design for millimeter-wave joint communication-radar[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2019, 68: 715-730.
- [9] DUGGAL G, VISHWAKARMA S, MISHRA K V, et al. Doppler-resilient 802.11 ad-based ultrashort range automotive joint radar-communications system[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2020, 56(5): 4035-4048.
- [10] RAHMAN M L, ZHANG J A, HUANG X, et al. Framework for a perceptive mobile network using joint communication and radar sensing[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2020, 56(3): 1926-1941.
- [11] KAUL S K, GRUTESER M, RAI V, et al. Minimizing age of information in vehicular networks[C]//2011 8th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks. IEEE, 2011.
- [12] KAM C, KOMPELLA S, NGUYEN G D, et al. Towards an effective age of information: remote estimation of a markov source[C]//IEEE INFOCOM 2018-IEEE Conference on Computer Communications Workshops(INFOCOM WKSHPS). IEEE, 2018.
- [13] YIN B, ZHANG S, CHENG Y, et al. Only those requested count: proactive scheduling policies for minimizing effective age-of-information[C]//IEEE INFOCOM 2019-IEEE Conference on Computer Communications. IEEE, 2019.
- [14] CHENG J P, LEE C, LIN T M. Prioritized random access with dynamic access barring for RAN overload in 3GPP LTE-A networks[C]//2011 IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps). IEEE, 2011: 368-372.
- [15] CHENG R G, Chen Jenhui, Cheng Danwu, et al. Modeling and analysis of an extended access barring algorithm for machine-type communications in LTE-A networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(6): 2956-2968.
- [16] MANGOLD S, CHOI S, MAY P, et al. IEEE 802.11 e wireless LAN for quality of service[C]//Proc. European Wireless, 2002, 2: 32-39.
- [17] ZHANG J, LU L, SUN Y, et al. PoC of SCMA-based uplink grant-free transmission in UCNC for 5G[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(6): 1353-1362.
- [18] LIEN S Y, SHIEH S L, HUANG Y, et al. 5G new radio: waveform, frame structure, multiple access, and initial access[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(6): 64-71.

(收稿日期: 2021-11-19)

#### 作者简介:

邹佳琪(1998-), 女, 博士研究生, 主要研究方向: 通信感知一体化、计算机视觉。

刘宇阳(1998-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 通信感知一体化。

邹子轩(1999-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 通感一体化、视频动作分割。



扫码下载电子文档

(上接第 17 页)

- [7] MOLISCH A F. A generic model for MIMO wireless propagation channels in macro- and microcells[J]. IEEE Trans. Signal Processing, 2004, 52(1): 61-71.
- [8] AKYILDIZ I F, JORNET J M. Realizing ultra-massive MIMO (1 024×1 024) communication in the (0.06-10) Terahertz

band[J]. Nano Commun. Networks, 2016, 8: 46-54.

(收稿日期: 2021-11-04)

#### 作者简介:

张军民(1969-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 移动通信网络规划、优化和建设。



扫码下载电子文档

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所