

B5G/6G——太赫兹通信研究现状以及未来发展

邱钟维

在过去的几十年里，无线数据传输速率每 18 个月翻一番，以满足数据流量的爆炸性增长。图 1 为根据 Edholm 定律预测的无线通信系统的数据传输速率曲线图。根据此图可以看出，到 2020 年前后，无线通信系统的数据传输速率接近 100 Gbit/s。在原有的无线高速通信技术上，如何进一步地提高无线网络速率是现阶段无线通信领域的一个重要的研究方向。人们设想在不久的将来将需要每秒太比特（Tbps）的链路。不幸的是，传统无线通信系统（5 GHz 以下）甚至最近研究的毫米波通信解决方案（30-300GHz）也无法实现如此高的数据速率。这激发了更高频段的探索和相应的通信解决方案。在这种情况下，太赫兹（THz）频段（0.1-10 THz）已经被提升为一个关键的无线技术来满足这个要求。太赫兹超高速无线网络是一种新型的无线网络，与传统的无线网络不同，它工作在太赫兹频段，并且可支持数 10Gbps 乃至 1Tbps 的数据传输速率。太赫兹频段的频段较宽，且大部分尚未被分配使用，能够承载 Gbps 的数据量，具有广泛的应用前景；利用太赫兹频段进行通信能够有效缓解日益紧张的频谱资源和当前无线系统的容量限制。

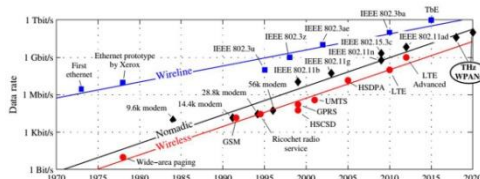


图 1 无线通信系统的数据传输速率

一、太赫兹通信

1、太赫兹的物理特性

太赫兹(Terahertz, THz)波是指频率在 0.1THz-10THz（波长在 0.03 mm - 3mm）之间的电磁波，在电磁波谱上的位置如图 2 所示。THz 波正好位于电磁辐射的毫米波波段的高频边缘和低频率的远红外光谱带边缘之间的过渡频带，它的长波段与亚毫米波重合，短波段与红外线光波重合，因此该波段兼顾电子学和光学的所有特点，可有效弥补微波通信和光波通信的不足。

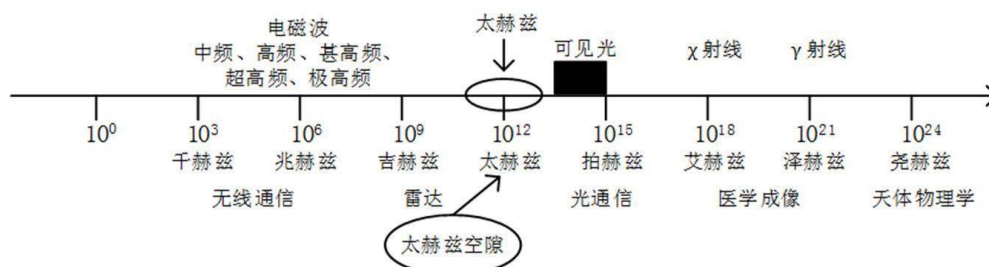


图 2 电磁波谱图

2、太赫兹通信的特征

太赫兹通信是指用太赫兹波作为信息载体进行的空间通信。太赫兹频段具有极大的未被分配使用的带宽，能够支持 10Gbps 以上的数据传输速率，而且具有更好的保密性及抗干扰能力。利用太赫兹频带进行通信能够有效缓解日益紧张的频谱资源和当前无线系统的容量限制，是未来无线通信的首要选择。太赫兹通信将减轻当前无线通信系统的频谱不足和频段带宽限制的问题。虽然太赫兹频段可以提供较大的带宽和较高的传输容量，但该频段的电磁波在空气中传播时衰减较大且当空气中水分子较多时衰减尤其严重，因此其传输距离较短，适用于室内短距离无线通信。总之，太赫兹通信在短距离超高速无线通信方面有巨大的应用潜力，能够满足人们对于超高网络速率的需求。

3、太赫兹通信研究进展

当前对太赫兹无线通信的研究大多集中于太赫兹频段的空间传输模型和链路损耗等方面，对 MAC 协议的研究较少，不过太赫兹无线个域网络的标准制订已纳入进程。在 2008 年 IEEE 802.15 工作组创建了太赫兹兴趣小组^[8](THz Interest Group, IG THz)，该小组主要研究太赫兹通信以及相关工作在 275~3000 GHz 太赫兹频段的网络应用。太赫兹兴趣小组对太赫兹通信的 MAC 层理论进行了研究，对比分析几种不同太赫兹用途模型的 MAC 层需要实现的功能，指出针对不同的用途模型应采用不同的太赫兹 MAC 解决方案。太赫兹兴趣小组建议太赫兹无线个域网接入协议以 IEEE 802.15.3c MAC 部分为参考，在其上修改形成新的协议。802.15 工作组于 2013 年 7 月建立了一个研究小组 IEEE 802.15 Study Group 3d 100Gbit/s Wireless(SG 3d(100G))，向建立一个新的太赫兹标准迈出了一大步。该研究小组主要是评估 100G 标准的有效性，于 2014 年 5 月完成了工作，并进阶为任务小组 TG 3d(100G)。2016 年任务小组对 IEEE 802.15.3c 进行修订，定义一个无线点到点的物理层，其物理层速率将达到 100Gbps 乃至更多，MAC 层也要进行相应修改以支持新的物理层。

二、太赫兹通信协议、存在问题及解决方法

1、太赫兹通信协议

现有的 IEEE 802.15.3c 和 IEEE 802.11ad MAC 协议能够适用于太赫兹无线个域网络，但 802.11ad 相较 802.15.3c 具有更大的开销，且太赫兹无线个域网络是一种无线自组织网络，所以太赫兹兴趣小组建议太赫兹无线个域网络采用 IEEE 802.15.3c MAC 协议作为基准，在其上进行修订以形成新的 MAC 协议。太赫兹无线个域网络与传统无线个域网络的最主要区别在于太赫兹频段传输的高路径损耗，因此太赫兹天线具有很高的方向性且要求可控性，所以太赫兹无线个域网络 MAC 协议应该包含波束控制作为主要部分。

IEEE802.15.3cMAC 协议(以下简称 3c)使用 CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)和 TDMA(Time Division Multiple Access)混合接入方式，将信道时间划分为若干个超帧。超帧又可分为三个不同的时期，BP(Beacon Period)、CAP(Contention Access Period)和 CTAP(Channel Time Access Period)。整个网络由一个 PNC(piconets coordinator)和多个 DEV(device)组成，由 PNC 控制整个网络的信道接入。

超帧结构如图 3 所示，在 Beacon 时期，PNC 首先向各个方向广播一个 Beacon 帧给该方向中的 DEVs，Beacon 帧包含了该网络中的基本信息，如网络中节点的状态信息、数目，超帧长度、CAP 的起止时间、CTAP 中信道时隙分配信息等。收到第一个 Beacon 的节点首先会进行关联操作，加入该微微网(piconet)。若节点已经加入该网络，则有数据传输需求的 DEVs 会在 S-CAP 时期向 PNC 发送时隙请求命令，PNC 收到该请求后，判断是否能够满足该请求，如果满足则在下一个超帧的 Beacon 时期通告该节点时隙分配情况，否则 PNC 发送一个时隙请求应答帧来通知源节点该请求被拒绝。Association S-CAP 主要用于节点关联进入微微网，Regular S-CAP 主要用于设备之间传输命令帧和同步数据帧等，Regular CAP 可以用于节点间数据帧传输，CAP 各时期均采用 CSMA/CA 接入方式。CTAP 包括 CTAs(channel time allocations)和 MCTAs (managementCTAs)两种。CTAs 主要用于网络中节点之间发送同步/异步数据流、命令帧等信息，采用 TDMA 的接入方式，提供具有 Qos 保证的数据传输服务。而 MCTAs 在某些情况下可替代 CAP 传输命令帧，但该时期主要是用来进行 DEV 和 PNC 之间通信，该时期采用的是时隙阿罗华接入协议。

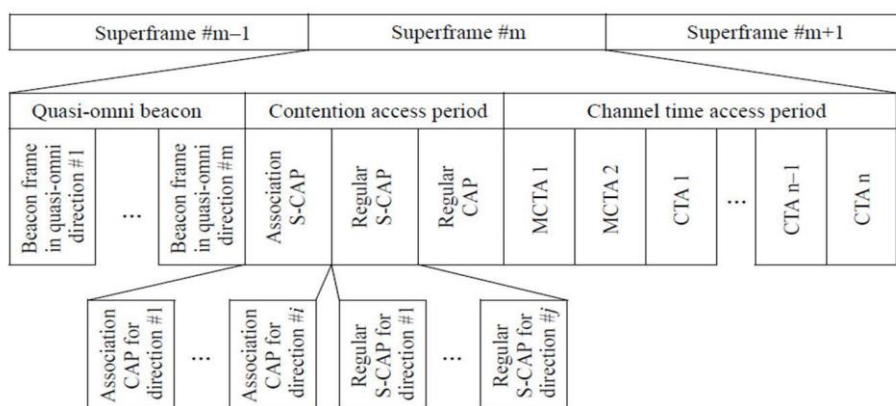


图 3 802.15.3c 超帧结构

2、主要存在问题及解决方法

由于太赫兹的衰减特性，使太赫兹在几米距离之外通信较为困难，一方面，小得多的有效面积的太赫兹天线，它与载波信号波长的平方成正比，会产生一个非常高的传播损耗；另一方面，水蒸气分子的吸收进一步增加路径损耗。鉴于太赫兹收发器有限的输出功率，通信距离超出几米需要使用高增益定向天线。

波束赋形目的是为了提高接收端信号的信噪比以实现高数据速率，同时扩大因为损耗而减小的通信范围。其原理是在不同的方向随着信号放大倍数的不同，从而形成了一个信号增益与方向的关系曲线，其操作的方式是通过相控技术给如图所示的多天线阵列设置一组特定的权重向量如图 4 所示。通过设置不同分辨率的权向量来达到不同天线增益，然后根据收发端不同的天线增益组合选择最优的传输链路。

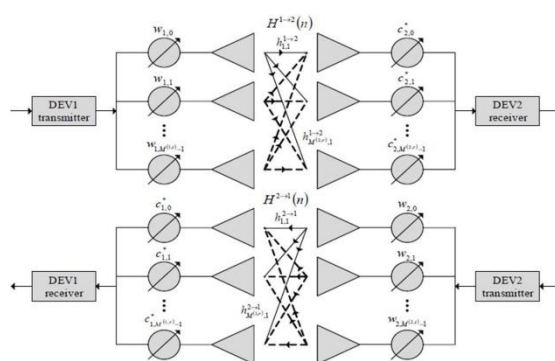


图 4 天线权重向量图

太赫兹无线网络由于使用高增益定向天线进行通信，邻居发现以及组网成为一个很关键的问题。网内节点持续扫描信道，从预先定义的编码本上选择波束赋形方案，以固定的波束宽度、增加方向性进行扫描，到最后完成扫描，从中选择最佳信噪比的波束成型方案。由于非常高的路径损耗和较低的输出功率，要想在太赫兹频段实现设备之间的连接，收发两端波束必须同时

对准对方。这种思路对于动态的太赫兹无线个域网来说带来的开销很大，而对于太赫兹准静态无线个域网来说开销是可以忍受的。为解决这一问题目前学术界提出利用带外信令的增强型组网方案：首先在低频段进行信道扫描及信令交互，确定节点间彼此的大致方位，然后在太赫兹频段使用高增益天线进行精细扫描，最后扫描结束采用太赫兹频段进行数据传输（如图 5 所示）。通过这种方式来减少进行波束赋形的时间，并且减小了因为设备移动带来了数据传输的不确定性。

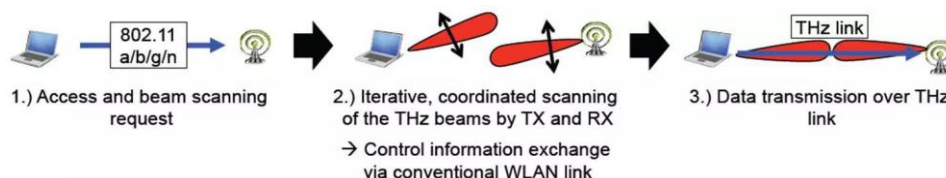


图 5 太赫兹双信道定位示意图

三、太赫兹通信的应用前景

太赫兹通信在军事领域应用前景广阔，相比于微波和光通信，在远距离卫星空间通信、大容量近距离军事保密通信、高传输速率的无线安全接入网络等方面均有广阔的应用前景。

1、外太空空间通信

太赫兹空间通信兼具激光通信和微波通信的优点。太赫兹通信相对光通信波束更宽，接收端容易对准，量子噪声较低；与微波波段相比，天线系统可以实现小型化、平面化。因此，太赫兹通信更适合卫星空间通信，可用于构建卫星之间、星地之间及局域网的宽带移动高速信息网络。国际电信联盟已为下一步卫星通信预留了 200GHz 的频段，随着卫星通信的进一步发展，必将进入 300GHz 以上太赫兹通信范围。

2、高速飞行器通信

对于高速飞行的临近空间飞行器及重返大气层的飞行器（如导弹、飞船等），飞行器周围都会产生频率为几十 GHz 的等离子体，形成“黑障”通信盲区，造成无线电遥测信号迅速衰减和中断，太赫兹波通信是唯一可穿透等离子体的通信工具。

3、军事通信

大容量近距离军事保密通信可采用太赫兹通信技术。高频段的太赫兹波在空中传播时极易被水分吸收，信号衰减严重，传输距离短；且比微波波束更窄，带宽宽，具有更强的抗干扰能力，可实现（2~5）km 内的战场短距

离定向保密通信，具备大容量通信优势。太赫兹通信可应用在 GHz 带宽扩调频通信、战术级区域保密通信与组网、航空编队通信等。

4、室内超高速通信

目前对室内宽带高速无线通信系统有着持续增长的需求，地面点对点高速蓝牙传输、地面超高速组网（无线接入、无线下载、无线互联等）如图 6 所示，通信速率要求很高从 1GB/S 到几百 GB/S。太赫兹波具有 10GB/S 以上的通信速率，可用于高传输速率的无线安全接入，未来很有可能代替目前的蓝牙和无线局域网。

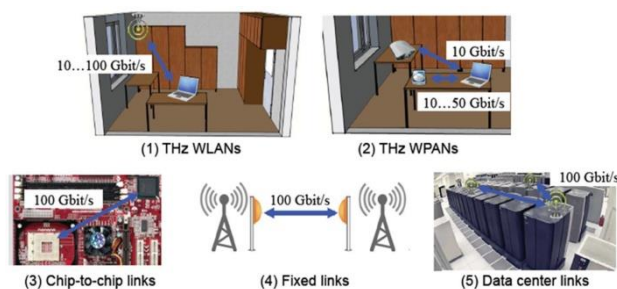


图 6 太赫接入网应用示意图

四、总结与展望

THz 通信是一个极具应用前景的技术，THz 波有非常宽的还没分配的频段，并且具有速率高、方向性好、安全性高、散射小、穿透性好等许多特性。发展 THz 通信技术成为各国研究热点。无论从技术上还是战略上，研究 THz 通信都具有必要性。THz 通信必将给通信系统带来很大技术进步，解决目前面临的一些技术问题，同时给新的应用提供了技术支持。在高速无线技术进一步发展，高速率的趋势必然会向更高频率的 THz 频段发展，而作为主干网上成熟的光通信，在接入网和无线化移动化的发展要求下，也必然会寻求与毫米波亚毫米波相结合。另外，在国际安全和空间通信方面，THz 波也表现出很多优秀的性质，具有很大的发展潜力。

参考文献：

- [1] Smulders P. The road to 100 Gb/s wireless and beyond: basic issues and key directions[J]. Communications Magazine, IEEE, 2013, 51(12): 86-91.
- [2] Petrov V, Pyattaev A, Moltchanov D, et al. Terahertz band communications: Applications, research challenges, and standardization activities[C]// International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops. IEEE, 2016:183-190.

- [3] 郑显华,王新柯, 孙文峰,等. 太赫兹数字全息术的研发与应用[J]. 中国激光,2014(2):24-34.
- [4] 罗雪梅. 后 5G 时代[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018(3).
- [5] 安国雨. 太赫兹技术应用与发展研究[J]. 环境技术, 2018(2).
- [6] 陈实, 胡伟东. 太赫兹探测与通信技术新进展[J]. 无线电通信技术, 2017, 43(4):1-5.
- [7] You Lei, Ren Zhi, Chen Cong, et al. An improved high throughput and low delay access protocol for terahertz wireless personal area networks[J]. Journal of Computers, 2017, 28(3): 147-158.
- [8] Akyildiz I F, Jornet J M. Realizing Ultra-Massive MIMO (1024×1024) communication in the (0.06-10) Terahertz band[J]. Nano communication Networks, 2016, 8(2016): 46-54.
- [9] Rappaport T S, Xing Y, Maccartney G R, et al. Overview of Millimeter Wave Communications for Fifth-Generation (5G) Wireless Networks-with a focus on Propagation Models[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(12): 6213-6230.
- [10] 韩晓, 安景新, 钟玲玲. 太赫兹通信技术动态分析及启示[J]. 电子世界, 2018(3):5-7.
- [11] 杨鸿儒, 李宏光. 太赫兹波通信技术研究进展[J]. 应用光学, 2018(1):12-21.

作者简介：邱钟维，重庆邮电大学硕士研究生，研究方向：太赫兹通信。

(本文原载：微信公众号：临菲信息技术港)

