

面向5G的毫米波技术应用研究

The Application Study on Millimeter Wave Communication Technology for 5G

张长青(中国移动通信集团湖南有限公司岳阳分公司,湖南 岳阳 414000)

Zhang Changqing (China Mobile Group Hunan Co., Ltd. Yueyang Branch, Yueyang 414000, China)

摘要:

5G时代是一个万物互联的高速网络时代,既可以承载终端海量接入率,也可以传输网络的高数据率。毫米波通信技术的最大特点是波长极短和带宽极大,优点是波束窄、方向性好、天线增益高,缺点是视距传播。当这些优缺点应用到5G网络中时,恰好可以解决5G网络的许多现实需求。首先介绍了微波、毫米波和5G系统,然后详细地介绍了毫米通信技术。在参考LTE网络结构的前提下,又着重分析了面向5G的一种毫米波网络架构,讨论了面向5G的毫米波天线技术。

关键词:

5G;毫米波;大带宽;窄波束;网络架构

doi:10.16463/j.cnki.issn1007-3043.2016.06.007

中图分类号:TN929.5

文献标识码:A

文章编号:1007-3043(2016)06-0030-05

Abstract:

The 5G era is a high-speed network era of the interconnection of all things, it can load the many terminals access and high data transfers rate. The biggest characteristics of millimeter wave technique are extremely-short wavelength and extremely-broad bandwidth. Its merits are narrow wave beam, good directivity and high antenna gain, the weakness is propagation on range of visibility. When these merits and weakness are applied to the 5G, it can just solve many needs of 5G networks. It firstly introduces microwave, millimeter wave and 5G system, and describes millimeter wave communication in detail. Based on the reference of LTE network architecture, it analyzes millimeter wave network architecture for 5G, discusses millimeter wave antenna technique for 5G.

Keywords:

5G; Millimeter wave; Broad bandwidth; Narrow wave beam; Network architecture

0 前言

毫米波通信属于微波通信,波长范围是1~10 mm,频率范围是30~300 GHz,属于微波通信波长分段中极高频段的前段,后段波长为0.1~1 mm,频率为300 GHz到3 THz的亚毫米波通信。显然,毫米波通信更接近光通信,与光通信属性基本相同,即频率高、波长短,以直射方式传播,同时波束窄,具有良好的方向性,遇到阻挡就被反射或被阻断等光通信特点。毫米波受大气吸收和降雨衰落影响较大,通信距离严重受限,30 GHz毫米波传播距离约十几km,60 GHz毫米波只能传播0.8 km。因为波长短、干扰源少,所以传播稳定

性高;因为传播距离短,所以方便热点区密集型基站布局;因为具有直线传播特性,所以适用于室内分布。

毫米波通信技术是一种高质量、恒定参数和技术成熟的无线传输通信技术,5G移动通信系统是一个广覆盖、高容量、多连接、低时延和高可靠性网络,将毫米波通信技术应用到5G通信系统,是一种业界普遍认同的愿景。本文简单介绍了微波、毫米波和5G通信,介绍了毫米波通信技术的相关特性,分析了目前流行的、被业界广泛认可的毫米波在5G系统中的网络架构,分析了面向5G网络的毫米波天线技术和相关应用的特点,指出5G系统使用毫米波通信中的最佳透明窗口,以及在室内短距离通信中的最佳衰减窗口,为进一步了解毫米波通信技术和5G通信系统提供了有益的帮助。

收稿日期:2016-04-01

1 毫米波通信技术简介

大气中影响毫米波传播的主要成分是氧气和水蒸气。氧气是磁极化分子,直径0.3 nm,水蒸气中的水分子是电极化分子,直径0.4 nm,这些直径相当的极化分子与毫米波作用后,产生对电磁能量的谐振吸收。所以在雨、雪、雾、云等与水蒸气相关的大气吸收因素,和在尘埃、烟雾等悬浮物相关的大气散射因素的作用下,会因吸收与散射使信号强度降低,会因介质极化改变而影响传播路径,最终使毫米波传输陷入衰减陷阱。试验发现,在整个毫米波频段中,大气衰减主要由60 GHz、119 GHz 2个因氧气分子作用的吸收谱线和由183 GHz因水蒸气作用的吸收谱线组成,在使用毫米波段通信时,除了特殊应用,应避开这3个衰减窗口。

相对衰减窗口而言,毫米波通信还有4个大气传输衰减相对较小的透明窗口,中心频率分别为35、94、140和220 GHz(见图1),对应的波长分别是86、32、21和14 mm,这些大气透明窗口对应的可用带宽分别为16、23、26和70 GHz,其中任何一个窗口的可用带宽几乎都可以把包括微波频段在内的所有低频频段容纳在内,可见毫米波段可用频带的宽度是何等富余,若加上空分、时分、正交极化或其他复用技术,5G中万物互联所需的多址问题,是可以轻易解决的。更重要的是如此富余带宽的频谱几乎免费,在5G系统中使用毫米波通信技术,不仅可以获得极大的通信容量,更能降低运营商和通信用户的使用成本。

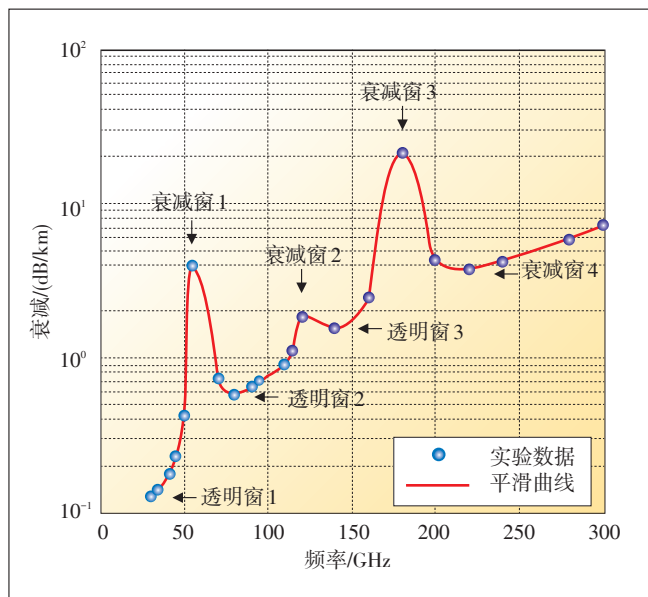


图1 毫米波在大气中的衰减曲线

由于毫米波在大气中的衰减情况与高度、温度和水蒸气浓度有较大关系,所以图1中的曲线是以海平面处,地表温度 $T=15^{\circ}\text{C}$ 、水蒸气浓度 $\rho=11\text{ g/m}^3$ 为背景,以经验公式 $\alpha(f)=a(f)+b(f)\rho+c(f)T$ 为参考,测得21组不同频率对应的 a 、 b 、 c 3个试验参数数据,并用3次多项式插值法获得的平滑曲线,单位是dB/km。虽然衰减曲线是一个受到当时条件约束的经验曲线,但仍可以看出毫米波大气衰减曲线的变化趋势是频率越高衰减越大,其中第1透明窗口频率为35 GHz处的衰减最小,为0.125 dB/km,甚至更小,而对应的可用带宽高达16 GHz,虽然是毫米波中的最小可用带宽,但已经是TD-LTE最大带宽20 MHz的600多倍。

毫米波具有波束小、角分辨率高、隐蔽性好、抗干扰性强等特点。毫米波通信设备具有体积小、重量轻、天线面不大等特征。毫米波技术研究由来已久,最早可追溯到上世纪20年代。毫米波传播特性研究在50年代就已经取得了相当的成就,研发的毫米波雷达已应用于机场交通管制。到90年代,毫米波集成电路研制已取得了重大突破,新型高效的大功率毫米波行波管、微带平面介质天线和集成天线、低噪声接收机芯片等关键应用部件的相继问世,使毫米波技术可以广泛地应用于军事和民用通信领域,如毫米波相控阵雷达,可以快速实现大范围、多目标搜索、截获与跟踪;毫米波汽车防撞雷达,可以将脉冲宽度压缩到纳米级,大大提高了防撞距离分辨率。

毫米波技术在通信领域的应用主要是毫米波波导通信、毫米波无线地面通信和毫米波卫星通信,且以无线地面通信和卫星通信为主。在毫米波地面通信系统中,除了传统的接力或中继传输通信应用外,还有高速宽带接入中的无线局域网(WLAN)和本地多点分配系统(LMDS)通信。WLAN和LMDS具有双向数据传输特点,可以提供多种宽带交互式数据和多媒体业务,可以作为移动互联网末端接入网络的AP。在毫米波卫星通信中,不仅可以解决传统C波段和Ku波段等卫星通信中频谱资源日益紧张的问题,还可以添加多波束天线、星上交换、星上处理和高速传输等更为先进的用于卫星通信系统中的其他技术。毫米波通信技术非常成熟。

毫米波通信技术中的许多特点非常契合人们对5G移动通信系统制订的相关愿景。毫米波段低端毗邻厘米波、高端衔接红外光,既有厘米波的全天候应用特点,又有红外光的高分辨率特点。毫米波通信最突

出的优点是波长短和频带宽,是微型化和集成化通信设备支撑高性能、超宽带通信系统的技术基础。毫米波千倍于LTE的超带宽,为5G系统的超高速率和超连接数量提供了保证。毫米波通信设备的体积小、重量轻,便于微型化、集成化和模块化设计,不仅可以使天线获得很高的方向性和天线增益,还特别适合移动终端的设计理念。毫米波的光通信直线传播特点,非常适应室内外移动通信,室外可以获得高稳定性,室内可以避免室内干扰。

2 面向5G的毫米波网络架构分析

毫无疑问,5G网络将会是一个具有连续广域覆盖、热点区域高容量、数据传输低时延和高可靠、终端设备低功率和海量连接数等应用特征的移动通信系统。其中,连续广域覆盖反映5G不再仅仅局限于小区概念,而是多种接入模式的融合共存,通过智能调度可在广域覆盖中为用户提供高达10 Mbit/s的体验速率。热点区高容量表明在集会、车站等人口密度大、流量密度高区域,5G可通过动态资源调度满足高达10 Gbit/s的体验速率和10 Tbit/km²的流量密度要求。数据传输的低时延和高可靠,说明5G可应用于未来自动驾驶和工业控制等领域。终端设备的低功耗和大连接则反映5G网络将是一个低功耗、低成本的万物互联体系和应用无所不能、需求无所不有的服务体系。

实践证明,在LTE演进过程中,宏站与微站并举的网络架构,为解决LTE“大带宽、小覆盖”困境,完成网络深度覆盖立下了汗马功劳。其中宏站体积大、容量大,需要机房建设、有线传输、空调、监控等配套系统,建站、维护和优化成本很高,站址选择和传输敷设非常困难,但覆盖范围一般可达200~800 m,适用于室外大范围连续区域;微站因其体积、容量、功率和覆盖范围等较小,无需机房和传输,建站简单快捷,易于实现,非常适应局部精确补盲、补热、深度覆盖,是宏站的有益补充。由于LTE是主频为2.35 GHz(以TD-LTE常用的2.3 GHz频段为例)的分米波,天线和MIMO阵列较大,所以微站天线资源占用不可小觑,以至于成为阻碍微站设计小型化和集成化的重要原因。

5G通信系统同样是一个演进系统、一个多个同构与异构网络的共存系统,一个适应万物互联和高数据率的密集型网络架构系统。为此,5G网络架构可以借用LTE宏站与微站的并举模式,建立大基站簇拥许多小基站的大基站群单元网络体系,其中大基站与LTE

宏站相当,物理上,通过无线信道下连终端和小基站,通过有线信道上连5G核心网、横连其他大基站;小基站与LTE微站相当,实际上是一个无线中继立体,由于采用了毫米波技术,基站天线可小型化和集成化,体积和重量的轻巧方便,可做成各种景观形式,可根据热点流量要求随时随地灵活部署,可在空闲或轻流量时段实时关闭或降低发射功率,可节省成本、降低能耗(见图2)。

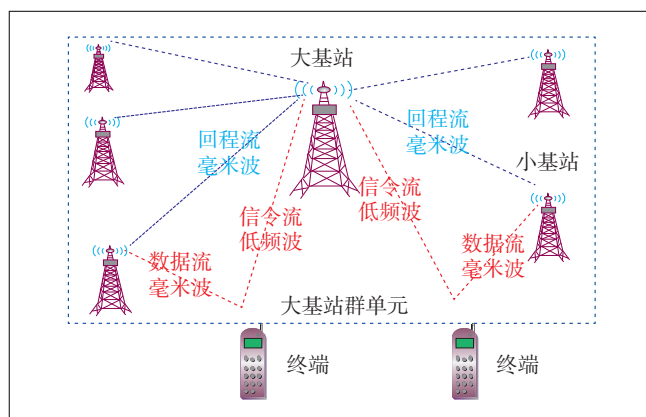


图2 5G网络架构中的基站群单元

根据通信理论,信令和数据的职能完全不同,数据直接通过通信网络由发信方传输到收信方,信令则需要通过通信网的终端、基站、核心网间传输,对其进行分析、处理,形成一系列操作和控制。为了实现对通信网的有效控制、状态监测和信道共享,移动通信系统必须有完善的控制功能。信令是通信系统中不同设备间交换的专用信息,是控制通信设备动作的专用信号,如状态标志、操作指示、拨号、呼叫等用户信令,终端与基站、基站与核心网、基站与基站间的网络信令等。通信系统中的信令和数据的传输是通过不同信道传输的,这是因为信令在建立过程中对系统的要求相对较低,一旦建立成功就无用了,LTE就有专门的信道承载不同信令。

然而,LTE的所有信道都是在同一主频下的承载资源,信令同样占用大量有效承载资源。5G网络系统可以考虑信令与数据各自通过不同主频信道承载的方案,使信令承载在低频波段,数据承载在毫米波段,即毫米波的应用场景集中在小基站与终端间的高数据量传输和小基站与大基站间的移动通信回程传输中。这种信令与数据分流通控的方案,不仅可以充分利用毫米波传输数据的频带带宽,获取极高的数据传输速率和效率,还能极大地降低信令与数据间的传输干扰。由于信令承载在低频信道,覆盖范围可以更广;同时由

于信令流量较小,控制终端数量可以更多。当数据流承载在毫米波信道时,虽然覆盖范围小,但传输带宽大,可满足终端的高速率和高接入率的要求。

在信令与数据的信道分频传输中,可以取2G或3G主频作为5G低频信令信道,从而达到可以优选部分已有基站作为5G大基站,再通过调整天线高度和下倾角,使大基站天线覆盖半径约为毫米波有效覆盖半径的1倍,使小基站正好位于终端与大基站的中间位置,这不仅可以满足大基站的信令信号可以直接传至终端,能够保证小基站的数据信号可以直接传送到终端,保证小基站的回传信号传到大基站,更重要的是这种大小基站的蜂窝布局方式和信令数据的分频传输方式,可以有效地利用原有基站,减少原有2G、3G、4G基站的数量,减少大基站中因空调和监控等电力消耗,减少基站租用、建设与维护成本,还能有效地降低站间干扰。

由于小基站只需承载毫米波信道的数据流,网络设计与局域网相当,无线蜂窝接入网中的许多职能可以由大基站承担。微型天线的收发功率不大,只要技术和工艺能够将小基站的天线设备、远程抄表电源计量设备集成在一个较小的空间内,并使小基站做得足够的小巧轻便,易于安装,使其具有足够的人性化、景观化、多样化和实用化,使之成为只需接入电源,在任何室外环境下都能正常工作的、完整的、独立的通信设备,就可以将小基站直接挂靠在路灯、景观台、高楼装饰物、纪念碑塔,甚至是图书馆、体育馆、学校、医院、政府办公楼等公用建筑和民房私宅的户外墙壁上,只要能够方便提供电源和与大基站无线直通即可。

毫米波技术与大小基站组合模式,可能是支撑5G接入网络架构的重要方案。

3 面向5G的毫米波天线分析

首先,分析毫米波天线的2个重要特征:高天线增益和小天线波束角。

根据微波理论,天线增益是天线在特定方向上辐射立体角度内的能量与天线在所有方向上辐射立体角内的能量的比率,计算公式如下:

$$G = \eta \times \left(\frac{\pi \times D}{\lambda} \right)^2 = \eta \times \left(\frac{\pi \times D}{c} \times f \right)^2 = \frac{\eta \times 4\pi \times A}{c^2} \times f^2 \quad (1)$$

式中:

η ——天线孔径系数

D ——天线尺寸

A ——天线面积

c ——光速

λ ——波长

f ——频率

同理,天线的标准波束角是指天线辐射的波束能量减少到3 dB时(减少一半能量时)的位置对应的夹角,计算公式如下:

$$\varphi = 70 \times \frac{\lambda}{D} = \frac{70 \times c}{D \times f} \quad (2)$$

可以看出,天线增益正比于频率平方值,天线波束角反比于频率。也就是说,在其他条件不变时,频率越高天线增益越大、天线波束角越小。一般情况下,毫米波天线的孔径系数取值在0.5~0.8之间,若以8发射天线为例,以LTE的8发射天线面积 $A=0.45 \text{ m}^2$ 为参考,取 $\eta=0.6$, $D=0.5 \text{ m}$,频率覆盖范围取整个毫米波段 $f=30\sim 300 \text{ GHz}$,则对应的天线增益和天线波束角与频率的曲线如图3所示。注意,由于增益单位取dB,式(1)结果须进行相应的转换。

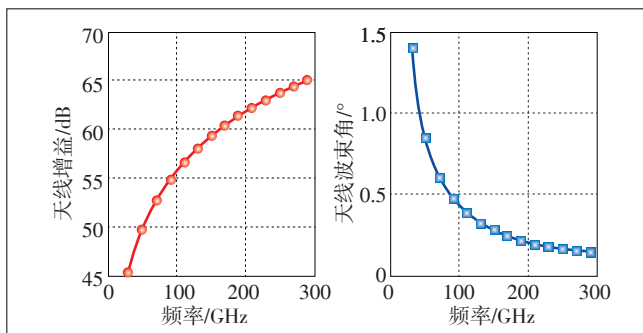


图3 毫米波的天线增益和波束角

其次,比较LTE主频天线与毫米波天线间的差异。LTE的主频率为2.35 GHz,波长为1.27 dm(以TD-LTE常用的2.3 GHz频段为例),属于分米波通信。毫米波采用第1透明窗主频率35 GHz。基站天线参数取LTE 8发射天线,则 $A=0.45 \text{ m}^2$, $\eta=0.6$, $D=0.5 \text{ m}$ 。终端参数取智能手机4发射天线,则 $\eta=0.6$, $D=6 \text{ cm}=0.06 \text{ m}$, $A=36 \text{ cm}^2=0.0036 \text{ m}^2$ 。根据式(1)和式(2),得出毫米波和LTE对应的基站天线与终端天线的增益和波束角如表1所示。

从表1中可以看出,毫米波与LTE,不管是基站天线,还是终端天线,仅天线增益和波束角2个参数,两者的差别非常大,尤其是波束角直接反映了毫米波的“准光学”传播特征。显然,毫米波的窄波束和高增益带来的高分辨率和抗干扰特性,完全可以为5G网络有

表1 毫米波和LTE的基站与终端天线参数

频率	类型	增益 G/dB	波束角 $\varphi/^\circ$
毫米波 (35 GHz)	基站天线	46.6	1.2
	终端天线	25.0	10.0
TD-LTE (2.35 GHz)	基站天线	23.2	17.9
	终端天线	2.2	149.0

效地防止视距通信中的传播损耗,进而达到提高天线传输效率的目的。

最后,毫米波天线是一项非常成熟的通信技术。

毫米波天线可以分为传统结构天线和基于新概念设计天线两大类。前者主要包括阵列天线、反射天线、透镜天线和喇叭天线等(与技术成熟、应用广泛的微波天线类似),后者主要有微带天线、类微带天线、极化天线和行波天线等。对于5G网络而言,前者中的阵列天线适合大规模MIMO基站天线,后者中的微带天线适合MIMO终端天线。应用于大基站和小基站的大规模MIMO天线阵列,振子数量最多可达上百,甚至更多,由于需要应用空分多址方式,上百个振子可以分成多个用户天线集群,每个集群为一个独立阵列,可为用户提供分集增益和波束赋形。终端MIMO天线只需获取分集增益和波束赋形,天线振子数最多十几个就可以了。

毫米波类微带天线,又叫集成天线和波导天线,是一种将有源器件和辐射单元集成在一块印刷电路板,甚至是集成在一个砷化镓(GaAs)基片上的微型天线,由于集成工艺完美,天线阻抗和有源器件完全匹配,甚至可以通过集成共面波导连接阵元与器件,达到降低天线损耗,提高天线效率的目的。可以预见,这类广泛应用于军事领域的毫米波天线,其成熟的微型化与集成化技术,完全可以为5G终端上的MIMO天线应用提供完美的技术基础。

4 结束语

由于毫米波通信的视距传输特点,同时由于5G系统高流量和高接入率的密集型基站分布特征,仅就市区光缆埋设和基站征地建设的实际困难,5G网络的最佳组网方案当属大基站与小基站模式,而大小基站组合模式将有可能改变传统移动接入网络,使接入网络的组网节点变得更加灵活、方便、易于连接和多样化。5G系统的信令与数据分别使用低高载频分流传输,优点是明显的,但2套收发系统的使用,无论如何都要增

加设备成本和制造难度,尤其是终端,但如果这种技术能够实现,将会使信令操作变得更加简单,使物联网和车联网中的物物通信与人物通信变得更加方便,甚至会使未来移动互联网出现革命性的变化与发展。

毫米波技术应用于5G移动通信,既是缺点又是优点。因为超短的波长,使信号的传播距离受到严格限制,从而引发信号盲区和弱区。相反波长的超短,可以使毫米波天然地具有集成射频元器件、实现紧凑型封装的优势,可以把非常多的天线集中在非常小的区域内,方便使用高指向性的波束赋型技术,以补偿毫米波长距传播中的衰减损耗。较差的穿透力,使信号极易受到密集市区建筑的影响,从而引发间歇性通信中断,若将毫米波应用在室内分布系统,较差的穿透力恰好可以避免室间通信的相互干扰,而室外通信中出现的间歇性中断,可以通过调用动态波束追踪算法和相关移动性管理策略予以克服。毫米波技术应用于5G系统,需要的是智慧和创新能力!

参考文献:

- [1] 5G愿景与需求(白皮书)[EB/OL]. [2016-01-26]. <http://www.docin.com/p-890406206.html>
- [2] 5G网络技术架构(白皮书)[EB/OL]. [2016-01-26]. <http://doc.mbalib.com/view/15d28675c92027ebe2fa7d0a2a94564b.html>
- [3] 余勇. 毫米波通信数字调制解调器的研究[D]. 南京:南京理工大学2004.07.
- [4] 王晓海. 毫米波通信技术的发展与应用[J]. 电信快报,2007(10): 19-21.
- [5] 何晓哲. 60 GHz毫米波无线通信系统调制及信道容量分析[D]. 青岛:中国海洋大学,2011.
- [6] 王虹. 毫米波通信信道编码的理论研究及其应用[D]. 南京:南京理工大学,2004.
- [7] 刘海燕. Radio-over-Fiber系统中多频率光载毫米波的产生与接收研究[D]. 长沙:湖南大学,2009.
- [8] 石星. 毫米波雷达的应用和发展[J]. 电讯技术,2006(1):1-9.
- [9] 石星. 毫米波相控阵雷达及其应用发展[J]. 电讯技术,2008(1): 6-12.
- [10] 孙伟新. 毫米波天线[J]. 电讯技术,1993(2):75-82.

作者简介:

张长青,毕业于中科院长春物理研究所,高级工程师,硕士,主要从事计算机网络和移动通信技术相关工作。

