

# 5G 毫米波传播特性分析

## Analysis on Propagation Characteristics of 5G MMW

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

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

### 摘 要:

分析了5G毫米波在自由空间、视距传输(LOS)、非视距传输(NLOS)、近似视距传输等场景的链路损耗以及穿透不同材料时的损耗,并通过外场测试验证了5G毫米波的链路传播特性,给出5G毫米波适合短距离LOS以及NLOS场景覆盖的结论,提出5G毫米波的应用部署场景建议。

### 关键词:

5G;毫米波;链路损耗;穿透损耗;部署场景  
doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2019.08.004  
中图分类号:TN929.5  
文献标识码:A  
文章编号:1007-3043(2019)08-0016-04

### Abstract:

The millimeter-wave (MMW) propagation loss in free space, line-of-sight (LOS) transmission, non-line-of-sight (NLOS) transmission, and near-line-of-sight transmission scenarios are studied, then the losses when penetrating different materials are analyzed, and the propagation characteristics of MMW are verified by field test results. The conclusion that MMW is suitable for covering short distance LOS and NLOS scenarios is given, and suggestions about the main application and deployment scenarios are proposed.

### Keywords:

5G; Millimeter-wave; Link loss; Penetrate loss; Deployment scenarios

引用格式:高帅,张忠皓,李福昌,等. 5G毫米波传播特性分析[J]. 邮电设计技术,2019(8):16-19.

## 0 前言

30~300 GHz 范围的频谱称之为毫米波频段,其波长达到毫米级别。在通信发展早期,由于毫米波的工作波长短、频段宽以及抗干扰性强等特点,使得毫米波主要用于军事雷达通信<sup>[1]</sup>,后来毫米波技术逐渐被应用到汽车雷达、辐射监测,生物医学等领域<sup>[2]</sup>。相较于6 GHz 以下频率,毫米波拥有更为丰富的可用频谱资源,无线运营商所面临的全球带宽短缺,促使人们探索未充分利用的毫米波频谱,并把它用于未来的宽

带蜂窝通信网络<sup>[3]</sup>。

毫米波通信系统可以通过波束赋形技术和多单元天线阵列的空间复用来达到更大的吞吐量,实现下行超过10 Gbit/s的数据速率,用以大容量点对点通信。然而相对于6 GHz 以下频段,5G毫米波落地应用还面临一系列问题与挑战,比如由于毫米波传输频率较高而带来自由空间损耗的增加,且毫米波极易受到阴影衰落导致信号中断或间隙性传输等问题<sup>[4]</sup>。运营商和各个行业已经开始从系统应用角度考虑5G毫米波部署和应用问题,但对毫米波链路特性和传播特性的验证分析还较少。本文基于3GPP提出的毫米波视距传输(LOS)场景和非视距传输(NLOS)场景下的传播特

收稿日期:2019-02-16

性模型,并结合外场测试结果给出毫米波传播和穿透损耗结果分析。还分析了毫米波穿透混凝土、玻璃、树叶、人体等不同材质的穿透损耗,最后依据毫米波链路传播特点提出5G毫米波部署场景和部署位置的建

## 1 5G 毫米波传播特性分析

### 1.1 自由空间传播路径损耗分析

无线信道的传播模型可分为大尺度(Large Scale)衰落传播模型和小尺度(Small Scale)衰落传播模型2种。大尺度衰落主要指数百米甚至上千米距离内接收信号强度的变化情况,自由空间传播模型是一种比较典型的大尺度衰落模型。在自由空间传播中,可以认为介质是均匀分布的,一般来说卫星通信、空间通信和陆上的视距通信都是自由空间传播<sup>[5]</sup>。自由空间衰落损耗与发射机和接收机天线之间的距离以及载波频率有关,假设发射点以球面波辐射,则接收机处的功率如下式所示:

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad (1)$$

式中, $P_t$ 为发射机的发射功率, $G_t$ 和 $G_r$ 分别代表发射天线和接收天线的增益, $\lambda$ 代表波长, $\lambda = c/f$ ,其中 $c$ 为光速,即 $3 \times 10^8$  m/s, $f$ 为载波频率,单位为Hz; $d$ 为发射天线和接收天线间的距离, $L$ 是系统损耗因子。这里将 $G_t$ 和 $G_r$ 取单位增益,可得到自由空间的传播损耗PL如下式所示:

$$PL = -10 \lg(P_r/P_t) = 20 \lg d + 20 \lg f - 10 \lg \left[ \frac{c^2}{(4\pi)^2} \right] \quad (2)$$

可以看出,在发射天线和接收天线间距离不变的情况下,载波的频率越高,自由空间损耗随之增大。

### 1.2 LOS场景路径损耗分析

在无线通信系统中,电波通常在非规则的环境中传播,3GPP TR 38.901规定了无线电波在城市区域内直射路径损耗模型<sup>[6]</sup>,如图1所示,其应用范围为0.5~100 GHz的频段,表达式如下:

$$PL_{\text{UMa-LOS}} = \begin{cases} PL_1 & 10 \text{ m} \leq d_{2D} \leq d'_{\text{Bp}} \\ PL_2 & d'_{\text{Bp}} \leq d_{2D} \leq 5 \text{ km} \end{cases} \quad (3)$$

$$PL_1 = 28.0 + 22 \lg(d_{3D}) + 20 \lg(f_c)$$

$$PL_2 = 28.0 + 40 \lg(d_{3D}) + 20 \lg(f_c) - 9 \lg[(d'_{\text{Bp}})^2 + (h_{\text{BS}} - h_{\text{UT}})^2] \quad (4)$$

式中: $1.5 \text{ m} \leq h_{\text{UT}} \leq 22.5 \text{ m}$ ,  $h_{\text{BS}} = 25 \text{ m}$

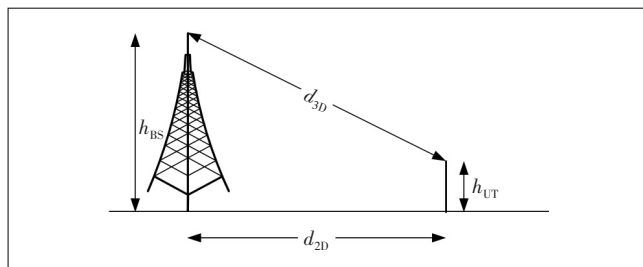


图1 城市场景室外直射路径传播示意图

此处阴影衰落分布服从对数正态分布,其标准差设置为 $\sigma = 4$ ,基站天线高度设置为25 m,接收天线终端高度为 $h_{\text{UT}}$ , $d_{3D}$ 为发射天线到接收天线的空间距离, $d_{2D}$ 为发射天线到接收天线的水平距离, $f_c$ 为载波频率,单位为GHz。在上式中,断点距离 $d'_{\text{Bp}} = 4 h'_{\text{BS}} h'_{\text{UT}} f/c$ ,这里 $c = 3.0 \times 10^8$  m/s代表光速, $h'_{\text{BS}}$ 和 $h'_{\text{UT}}$ 分别代表发射端基站和接收端终端的有效天线高度。

图2给出不同频点相对于3.5 GHz频点的路损差,假设 $f_1$ 与 $f_2$ 分别代表高低频载波,则频点带来的路损差值计算为 $20 \times \lg(f_1/f_2)$ ,计算得到28 GHz载波比3.5 GHz载波路损高 $20 \times \lg(28/3.5) \approx 18.06$  dB,也即在发射天线和接收天线增益不变的情况下,3.5 GHz载波的理论传播距离是28 GHz载波理论传播距离的 $10^{(18.06/20)} \approx 6.5$ 倍。

3GPP TR 38.901同样规定了室外覆盖室内的穿损模型<sup>[6]</sup>,如图3所示。其中:

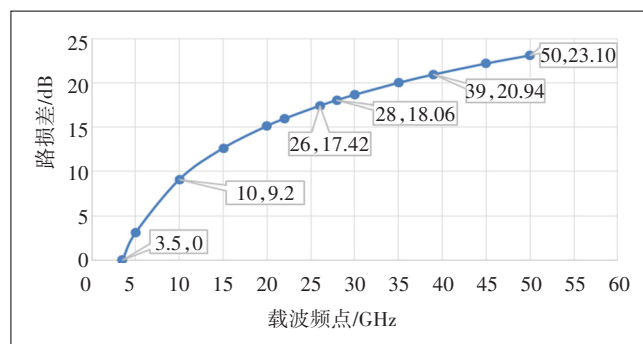


图2 不同频点相对于3.5 GHz频点的路损差

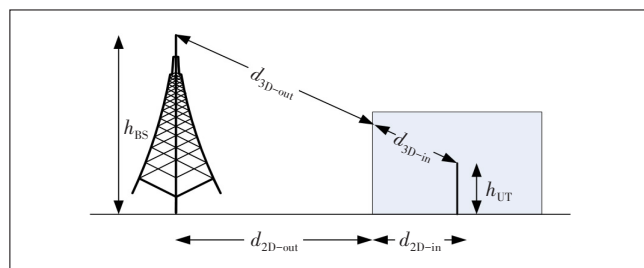


图3 城市场景室外覆盖室内示意图

$$d_{3D-out} + d_{3D-in} = \sqrt{(d_{2D-out} + d_{3D-in})^2 + (h_{BS} - h_{UT})^2}$$

由图3可知,基站发射信号穿透室内时经过墙壁或者玻璃的遮挡损失一部分性能,再经过室内传播到达接收机天线处,穿损PL值计算如下:

$$PL = PL_b + PL_{tw} + PL_{in} + N(0, \sigma_p^2) \quad (5)$$

上式中  $PL_b$  为室外路径损耗值,  $d_{3D}$  分别用  $d_{3D-out}$  和  $d_{3D-in}$  替换,  $PL_{tw}$  是无线电波穿透外墙建筑时的损耗,  $PL_{in}$  是大楼内部的链路损耗值,  $\sigma_p$  是楼内穿透损耗的标准差。室内穿透损耗  $PL_{in}$  值计算如下式所示:  
 $PL_{inH-LOS} = 32.4 + 17.3 \lg(d_{3D}) + 20 \lg(f_c) \quad 1 \text{ m} \leq d_{3D} \leq 150 \text{ m}$  (6)

由式(5)可以看出,在室外覆盖室内的穿损模型中,建筑穿损  $PL_{tw}$  占据重要的位置,不同的材质对  $PL_{tw}$  造成不同的影响。不同材质的穿透损耗表达式也不同,普通多层玻璃:  $L_{glass} = 2 + 0.2f$ ; 红外反射玻璃:  $L_{IRglass} = 23 + 0.3f$ ; 混凝土:  $L_{concrete} = 5 + 4f$ ; 木板:  $L_{wood} = 4.85 + 0.12f$ 。

可以看出,不同材质的穿透损耗值取决于载波的频率,3.5~50 GHz 电磁波经过不同材质的理论穿透损耗对比如图4所示。

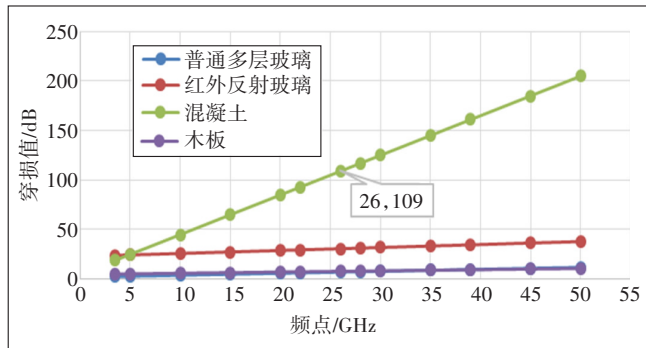


图4 不同材质下穿损值与频点的对比图

由图4可以看出,3.5~50 GHz 载波穿透普通多层玻璃和木板时的最大损耗约 12 dB,而穿透红外反射玻璃的最大损耗为 38 dB,常用毫米波频段 26 GHz 与 28 GHz 穿透红外反射玻璃时的损耗分别为 30.8 dB 与 31.4 dB。混凝土墙在 26 GHz 频点处的穿透损耗约为 109 dB,可认定为无法穿透。

### 1.3 NLOS 场景路径损耗分析

参考 2.2 节内容,得知毫米波易被建筑阻挡,基本无法穿透混凝土墙,穿透红外反射玻璃的效果也较差,因此毫米波在 NLOS 场景中会产生丰富的反射径。3GPP TR 38.901 定义了城市区域 NLOS 场景传播模型如式(7)所示,设定  $10 \text{ m} \leq d_{2D} \leq 5 \text{ km}$ ,其中  $\sigma_{SF}$  值为 6:

$$PL_{UMa-NLOS} = \max(PL_{UMa-LOS}, PL'_{UMa-NLOS})$$

$$PL'_{UMa-NLOS} = 13.54 + 39.08 \lg(d_{3D}) + 20 \lg(f_c) - 0.6(h_{UT} - 1.5) \quad (7)$$

### 1.4 近似 LOS 场景路径损耗分析

毫米波在传播过程中,容易受到降雨、树丛遮挡,以及人体对电波的遮挡和吸收等影响<sup>[7-8]</sup>,若树木或人体遮挡较少可看作近似 LOS 场景,这时需要额外考虑树叶和人体遮挡带来的损耗,其中考虑树叶遮挡时需要考虑不同季节、不同品种的树木对毫米波的遮挡情况,考虑人体遮挡时应考虑身体部分遮挡和身体全遮挡等情况。

## 2 5G 毫米波测试验证

### 2.1 LOS 场景路径损耗验证分析

在毫米波外场的 LOS 场景下进行路损测试,3GPP 定义的城市 LOS 标准模型 PL 曲线与测量所得 PL 拟合曲线对比如图 5 所示。其中外场测试采用帧结构 DDDS, EIRP 为 58 dBm,载波频率为 26 GHz。

图 5 中得到的路损测试拟合函数  $PL = 28 + 20 \times \lg 26 + 22.29 \lg d$ ,基本符合公式(4)中 3GPP 定义的城市 LOS 模型  $PL = 28 + 20 \times \lg 26 + 22 \lg d$ ,测试中 26 GHz 毫米波在 100 m 距离处大约有 100.9 dB 的路损。

由以上理论分析和实际测试结果来看,现有的高频通信系统将受到直射路径链路损耗带来的极大影响,使得毫米波覆盖能力大打折扣,因此应考虑毫米波进行短距离覆盖,5G 毫米波基站部署时应该更加密集,趋向于热点区域覆盖。

在外场测试的 LOS 场景也验证了不同材料遮挡

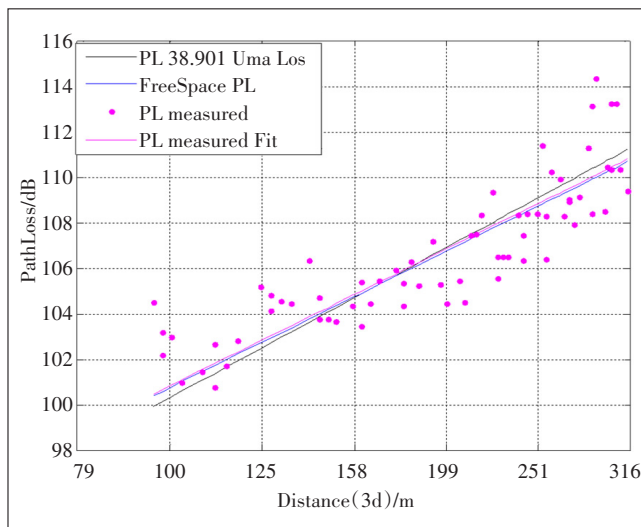


图5 实际测试PL拟合曲线与城市LOS模型PL曲线对比图

时对毫米波性能的影响,5G毫米波穿透性能损耗测试结果表明:混凝土墙无法穿透;木门(5 cm):6 dB;普通玻璃:5 dB;房车车体:17~23 dB。

测试中采用28 GHz毫米波进行穿透测试,由测试结果可知,毫米波可以轻松穿透普通玻璃和木门,但是无法直接穿透混凝土墙,因此5G毫米波室外覆盖室内场景会导致无线链路损耗过大,接收端信号质量严重下降,无法满足用户的需求,在组网时不建议采用室外覆盖室内的组网方案。

## 2.2 NLOS场景路径损耗验证分析

如图6所示,毫米波外场测试中测试了NLOS场景对比LOS场景下的SSB-RSRP衰减为10~14 dB,测试载波频点为28 GHz。因此可以判定毫米波适合部署

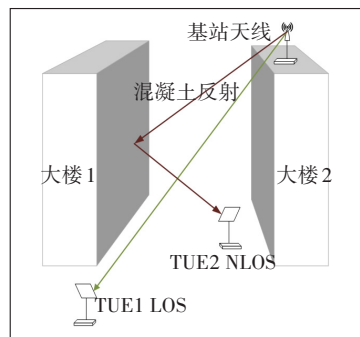


图6 NLOS与LOS接收信号对比

在信号反射丰富的室外NLOS场景下,比如商业区或写字楼。

## 2.3 近似LOS场景路径损耗验证分析

在室外近似LOS场景中,考虑到城市中夏季树木的遮挡情况,在外场测试中对树叶遮挡进行定点测

试,测试时选择28 GHz频段,测试树木树冠直径约为4 m,TUE1、TUE2和基站距离相等。当接收终端TUE2被树木完全遮挡时,接收信号SSB-RSRP相对于直射路径下TUE1的SSB-RSRP衰减了20 dB左右,证明树叶遮挡对毫米波的传播影响较大,部署毫米波时应充分考虑树叶遮挡情况。

为了测试室外近似LOS场景中人体遮挡对毫米波信号造成的影响,外场测试中分别对1人、2人、4人遮挡终端场景进行了测试,测试时选择28 GHz频段,最终得到接收终端被人体遮挡时较未被遮挡时信号衰减11~28 dB。可以得知,在人群密集环境中,部署毫米波应充分考虑人体穿透损耗,在人群密集场景应将毫米波基站部署在较高位置,比如部署在屋顶或楼顶处。

在外场测试中没有进行雨雪等恶劣天气对于毫米波的影响测试,参考文献[9]包含了对毫米波雨衰的分析,不同的降雨量和雨水密集程度都会对毫米波造成不同的影响,毫米波速率也因此会有不同程度的下降。

## 3 5G毫米波部署场景建议

考虑到毫米波相对于6 GHz以下频段在直射路径下损耗较大<sup>[10]</sup>,因此部署初期应考虑毫米波以短距离热点覆盖为主,搭配其他通信系统保证接收终端的通信质量,并需要充分考虑恶劣天气如雨、雪、雾对毫米波的影响。

在LOS场景或近似LOS场景下推荐的部署地点包括大型露天体育场、机场、大型广场等地点。此类场景阻挡物少或无遮挡,用户密度高、具有整体流动性,流量需求大等特点,毫米波在此类场景下用以提供高速的内容下载和高清直播观看。

毫米波同样适用反射路径丰富的NLOS场景,比如商业街、工厂等地点。此类场景反射路径丰富,终端接入量大,毫米波在此类场景下用以提供大容量的终端接入以及高速率的内容上传和下载。

### 参考文献:

- [1] 王少华,印世平,秦晓磊.毫米波雷达在军事对抗中的应用[J].四川兵工学报,2010,31(5):30-32.
- [2] 陈成仁,席德熊,滕俊恒.毫米波的非军事应用及发展趋势[J].北京广播学院学报(自然科学版),1996(3):13-20.
- [3] RAPPAPORT T S,SUN S,MAYZUS R,et al. Millimeter wave mobile communications for 5 G cellular: It will work![J]. IEEE access, 2013 (1):335-349.
- [4] RANGAN S,RAPPAPORT T S,ERKIP E,et al. Millimeter-wave cellular wireless networks: Potentials and challenges[J]. Proceedings of the IEEE, 2014 (3):366-385.
- [5] 杨大成. 移动传播环境[M]. 北京:机械工业出版社,2003.
- [6] Technical Specification Group Radio Access Network; Study on Channel Model for Frequencies from 0.5 to 100 GHz (Rel. 15): 3GPP TR 38.901 [S/OL]. [2019-02-07]. <ftp://ftp.3gpp.org/>.
- [7] 钟旻.毫米波的传播特性(上)[J].数字通信世界,2018(10):5-8.
- [8] 钟旻.毫米波的传播特性(下)[J].数字通信世界,2018(11):1-3.
- [9] XIAO M,MUMTAZ S,HUANG Y,et al. Millimeter wave communications for future mobile networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017,35(9):1909-1935.
- [10] 何世文,黄永明,王海明,等.毫米波无线通信发展趋势及技术挑战[J].电信科学,2017,33(6):11-20.

### 作者简介:

高帅,工程师,硕士,主要研究方向为毫米波、MEC、5G通信等;张忠皓,教授级高级工程师,博士,北京邮电大学兼职教授,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,博士,国家知识产权局中国专利审查技术专家,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;延凯悦,工程师,硕士,主要研究方向为毫米波、MEC、5G通信等。