

# 基于UTD的室外毫米波蜂窝网络传播特性研究

严曦, 刘芫健

(南京邮电大学电子科学与工程学院, 江苏 南京 210003)

**[摘要]** 28 GHz毫米波不像60 GHz毫米波那样在大气传播中有额外的衰落,适用于下一代通信技术中室外蜂窝网络的研究.一致性绕射理论具有预测精度高、计算量小的优点,适用于研究室外蜂窝移动网络中无线电波的传播特性.基于一致性绕射理论对典型室外微小区的无线网络进行了仿真与分析,通过仿真结果与已知文献实测结果进行比较,一致性良好,验证了该方法的正确性.同时对28 GHz下基站覆盖、植被覆盖、路径增益、路径损耗的概率分布等电波传播参数作了深入分析,仿真结果可以为5G室外蜂窝移动网络的网络优化提供理论依据.

**[关键词]** 28 GHz, 5G, 一致性绕射理论, 毫米波蜂窝网络, 传播特性

**[中图分类号]** TN011 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1001-4616(2015)04-0113-09

## Simulation and Analysis of Outdoor Cellular Network Propagation Characteristics Based on UTD

Yan Xi, Liu Yuanjian

(College of Electronic Science and Engineering, Nanjing University of Posts & Telecommunications, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** At the mm-wave bands of 28 GHz, unlike at 60 GHz, atmospheric absorption does not significantly contribute to additional path loss, making it suitable for next generation cellular network outdoor mobile communications. The characteristics of radio wave propagation can be predicted accurately by Uniform Theory of Diffraction. According to its calculation amount which is smaller than those of other methods, it is widely used in studying cellular network. We study a typical urban scene by ray tracing method which based on UTD theory (Uniform Theory of Diffraction) to simulate and analyze its network. By comparing with measured data, we get expected results which verify the feasibility of this method. At the same time, we study the coverage of base station, the coverage of foliage, path gain and probability distribution on path loss. These results can provide optimization of 5G outdoor cellular network with theoretical evidence.

**Key words:** 28 GHz, 5G, uniform theory of diffraction, mm-wave cellular network, propagation characteristics

随着移动通信技术的快速发展,移动通信业逐渐从3G向4G演进,移动终端用户数量迅猛地增长,用户对移动网络性能的要求也越来越高,网络质量的好坏也越来越被行业所重视,因此蜂窝移动通信网络的规划与设计业成为网络运营商关注的热点<sup>[1]</sup>.随着4G网络的大面积商用推广,通信行业对于第五代移动通信网络的研发也提上了日程,未来的通信系统将沿着更大的系统容量、更快的传输数据速率、更高的频谱资源利用率前进,以便满足用户端智能化对通信端的要求<sup>[2]</sup>,其中毫米波所处的频率段由于其价格低廉、带宽资源丰富被不少国外学者提出可用于下一代通信技术中<sup>[3]</sup>.

现有的商用蜂窝通信网络对室外微小区的覆盖,主要通过在大蜂窝小区下引入微蜂窝和微微蜂窝网络,形成了“蜂窝式”结构网络<sup>[4]</sup>.在宏蜂窝小区中,基站天线位于大楼楼顶,高于周围的散射体,但移动台所处位置较低,通常低于周围的散射体,因此宏蜂窝网络中的基站与移动台之间的传播是以非视距传播(NLOS)为主.现代移动蜂窝网络中针对宏蜂窝网络中的“盲点”与“热点”

收稿日期:2015-04-21.

基金项目:国家自然科学基金(60671065)、教育部博士点基金(20123223120003).

通讯联系人:刘芫健,博士,教授,博士生导师,研究方向:计算电磁学、射线追踪方法等. E-mail: liuyuanjian@njupt.edu.cn

问题,使用微蜂窝网络作为无线覆盖中的补充,提高通信系统的网络容量,微蜂窝网络的基站天线低于周围散射体,其传播环境是一个典型的“城市峡谷”<sup>[5]</sup>.因此,通常1个多层次蜂窝网络是由1个上层宏蜂窝网络和数个下层微蜂窝网络组成的多元蜂窝网络.28 GHz与传统意义上的60 GHz毫米波段特性不太一样,大气中的传播不会带来太多额外的衰落,28 GHz的无线信号在恶劣天气条件下在小区半径200 m外才会衰落约80%<sup>[6]</sup>.文献[7]中纽约大学与三星电子是国外较早提出对28 GHz频段电波进行室外蜂窝研究的团队,合作结果证明了28 GHz频段对室外蜂窝网络研究的可行性,目前国内的室外毫米波蜂窝内容不够丰富,国外在该频段下的蜂窝网络研究也刚刚起步.

对于无线电波传播的预测主要分为两种方法:一种是经验模型,一种是确定性模型<sup>[8]</sup>.传统的电波传播模型研究的环境是宏小区,是通过分析大量实测数据建立起来的统计模型,这种传统的经验模型已经不能满足复杂环境中的电波传播预测;确定性模型的研究方法包括了时域有限差分算法及射线追踪算法,时域有限差分算法的计算量较大,仅对较小的模型进行计算,对于室外复杂的移动蜂窝网络则没有实际意义,而基于一致性绕射理论的射线追踪算法<sup>[9]</sup>的预测精度高且计算量小,因此在预测室外无线电波传播特性中得到了大量应用<sup>[10]</sup>.

本文基于一致性绕射理论(UTD)研究室外蜂窝网络的传播链路特性<sup>[11]</sup>,通过UTD理论的计算机实现和数字地图Google Earth(简称GE)的环境数据建模,对典型街区蜂窝网络进行建模分析,通过现代常规移动通信频段与28 GHz频段下的室外蜂窝网络进行对比研究,与已知文献在该模型下的实测数据进行分析比较,验证了模型的合理性与准确性,又在实测数据的基础上对该小区蜂窝网络在不同频段下的链路数据进行预测,为以后的5G室外蜂窝网络的研究提供了理论依据及技术支持<sup>[12]</sup>.

## 1 基础理论及其实现方法

### 1.1 无线信道场强计算的理论基础

无线移动通信系统中,电波传播的机制可以归结为直射、反射、绕射和散射.这4种传播机制也从一定角度上解释了无线信号快慢衰落的原理.蜂窝网络下无线信道很少有视距传播,非视距传播下大量的反射和绕射,而直射场与反射场的计算可以由电磁波理论导出,UTD理论由于适用于过渡区边缘绕射场的计算,解决了GTD理论在阴影区和照亮区交界附近的过渡区具有非一致性的难点<sup>[13]</sup>,被广泛用于计算绕射场.

电磁波在空气中的传播可以近似地认为是均匀平面波在理想介质中的传播.假设电波由原点(0,0,0)传播到任意一点(x,y,z), $\mathbf{E}_0$ 、 $\mathbf{H}_0$ 为原点的电场矢量和磁场矢量, $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{H}$ 为(x,y,z)处的电场矢量和磁场矢量.关系为:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{-jk_x x - jk_y y - jk_z z}, \mathbf{H} = \mathbf{H}_0 e^{-jk_x x - jk_y y - jk_z z}. \quad (1)$$

其中:  $k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = k^2 = \omega^2 \mu \epsilon$ ,  $k$  为波数.

当天线是理想的点源天线的时候,有远区场的公式

$$E_\theta = \hat{e}_\theta \frac{\sqrt{30P_t}}{r} e^{-jkr}. \quad (2)$$

当天线为半波振子的时候,有远区场公式

$$E_\theta = j \frac{\sqrt{30P_t D}}{r} e^{-jkr} \frac{\cos[(\pi/2)\cos\theta]}{\sin\theta}. \quad (3)$$

即可得到接收点直射波的电场强度大小.而在接收点的接收功率为  $P_r = \frac{E_r^2}{\eta} A_e$ ,其中如果采用理想点源天线的话,  $A_e = \frac{\lambda^2}{4\pi}$ ,所以接收功率为

$$P_r = \frac{E_r^2 \lambda^2}{\eta 4\pi}. \quad (4)$$

根据电磁场理论,平行极化波的反射系数和折射系数为:

$$R_{//} = \frac{\eta_2 \cos \theta_i - \eta_1 \cos \theta_t}{\eta_2 \cos \theta_i + \eta_1 \cos \theta_t}, T_{\perp} = \frac{2\eta_2 \cos \theta_i}{\eta_2 \cos \theta_i + \eta_1 \cos \theta_t} \quad (5)$$

$\eta_1$  和  $\eta_2$  为介质 1、2 的固有阻抗(其中  $\varepsilon$  为介电常数,  $\mu$  为磁导率)大小为:

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \frac{1}{\sqrt{1 - j\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}}} \quad (6)$$

$\theta_i$  为入射角,  $\theta_t$  为折射角,  $\cos \theta_t = \left[ 1 - \left( \frac{|\eta_2|}{|\eta_1|} \right)^2 \sin^2 \theta_i \right]^{1/2}$ , 垂直极化波的反射系数和折射系数为:

$$R_{\perp} = \frac{\eta_2 \cos \theta_i - \eta_1 \cos \theta_t}{\eta_2 \cos \theta_i + \eta_1 \cos \theta_t}, T_{//} = \frac{2\eta_2 \cos \theta_i}{\eta_2 \cos \theta_i + \eta_1 \cos \theta_t} \quad (7)$$

由前所述,对于任何线极化入射波,都可以根据入射平面,分解为平行极化波和垂直极化波.因此,根据前面的推导,已知入射到平面的电场  $E_0$ ,可以得出反射后的电场大小  $E_r$  为

$$E_r = [(E_0 \cdot e')R_{\perp}]e_{\perp} + [(E_0 \cdot e')R_{//}]e_{//} \quad (8)$$

绕射点  $Q$  处为入射波末场  $E^i(Q)$ , 绕射场场点  $s$  处的绕射末场  $E^d(s)$ ,  $E^i(Q)$  乘以绕射系数得到绕射后在绕射点处的绕射波初场  $E^d(Q)$ , 最后由绕射波初场计算场点  $s$  处的绕射场末场  $E^d(s)$ , 当电波斜入射到夹角为  $(2-n)\pi$  的导电劈, 设  $Z$  轴为劈的无限边, 在射线基底坐标下, 绕射场的平行和垂直电场分量为:

$$\begin{bmatrix} E_{\beta_2}^d(s_2) \\ E_{\alpha_2}^d(s_2) \end{bmatrix} = - \begin{pmatrix} D_s & 0 \\ 0 & D_h \end{pmatrix} \begin{bmatrix} E_{\beta_1}^i(D) \\ E_{\alpha_1}^i(D) \end{bmatrix} \cdot A(s_1, s_2) e^{-jks_2} \quad (9)$$

式中,  $D_s$  和  $D_h$  分别为软极化波和硬极化波的绕射系数,  $A(s_1, s_2) = \sqrt{\frac{s_1}{s_2(s_1 + s_2)}}$  是入射波为球面波条件下的衰减系数.

### 1.2 仿真的实现方法

①室外结构的建模:室外建筑结构进行简化及抽象化,并赋予每个面1个唯一的标识符来表示该平面,同时记录每个平面的几何数据及形态数据.然后将这些数据按照事先规定好的格式输入到数据库中加以处理,并建立相应的优先列表.

②创建波前球和发射管:发射天线辐射出的电波波束可以看作是由许多由发射天线射出的射线管.而要产生射线管,就必须对波前球进行划分,使划分后的每个波前面的形状和大小均相同,并且这些波前面能够完全地、无重复地覆盖整个波前球.为了符合这些要求,波前面可以是正三角形、正四边形及正六边形.

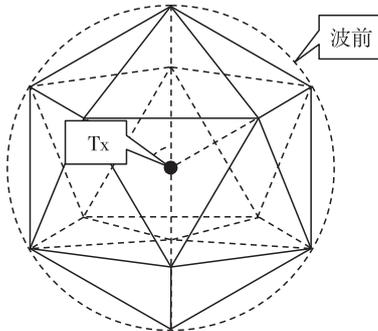


图2 波前球示意图

Fig.2 Front of the wave ball

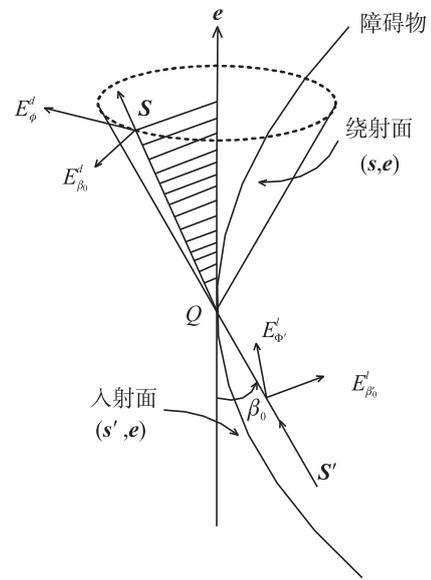


图1 直劈的绕射

Fig.1 Diffractions of straight chopping

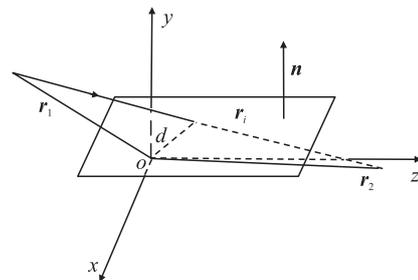


图3 相交测试示意图

Fig.3 Test of the intersection

③相交测试:假设射线的起点和终点矢径分别为  $r_1$  和  $r_2$ . 那么射线上的任意一点矢径  $r$  为  $r(t)=r_1+t(r_2-r_1)$ . 已知平面  $Ax+By+Cz+D=0$  的单位法向矢量为  $n$ , 该平面离坐标原点的距离  $d$  为  $d=\frac{|D|}{\sqrt{A^2+B^2+C^2}}$ , 如果  $(r_2-r_1)\cdot n=0$  的话, 射线就平行于该平面, 可作不相交处理. 若满足  $(r_2-r_1)\cdot n=0$  和  $r_1\cdot n+d=0$ , 则射线在该平面上, 因此和该平面有无限多个交点. 如果  $(r_2-r_1)\cdot n\neq 0$  的话, 平面就和射线或包含射线的直线有1交点, 且交点处的射线参数  $t_i$  是  $t_i=-\frac{r_1\cdot n+d}{(r_2-r_1)\cdot n}$ , 如果  $0<t_i<1$  的话, 射线与平面相交, 其交点就在射线两端点之间, 交点的矢径给出为  $r_i=r_1+t_i(r_2-r_1)$ .

④场的判断:由镜像法得到镜像点,再计算出射射线管的3条射线与结构表面的3个交点,分别连接镜像点和3个交点便可以确定反射射线管. 对于绕射场的处理是检查是否存在绕射点. 如果存在绕射点,绕射射线对接收机的作用可以归咭为1个等效源(镜像). 换句话说,这条绕射射线可以被认为由镜像源发出. 镜像位置为  $\rho_{od}$ . 如图4所示,源点和场  $T$  点  $R$  (它可以是接收点,也可以是反射点或下一个绕射点)在线段  $AB$  上的垂直投影分别是  $O(O)$  和  $R'(R')$ ,  $t$  是直劈棱的单位方向矢量,由下式可得到:

$$O=(\overline{BT}\cdot t)t+B, R'=(\overline{BR}\cdot t)t+B. \tag{10}$$

那么镜像点位置  $C(C)$  为  $C=O+\left|\overline{OT}\right|\frac{\overline{RR'}}{\left|\overline{RR'}\right|}$ ; 线  $AB$  与线  $RC$  的交点  $D$  为

$$D=C+\overline{CR}\frac{\left|\overline{OT}\right|}{\left|\overline{RR'}\right|+\left|\overline{OT}\right|}. \tag{11}$$

检查  $D$  点是否在线段  $AB$  内, 如果在的话, 则  $D$  点是绕射点, 并且绕射射线对接收机的作用归结为一个等效源(镜像点  $C$ ).

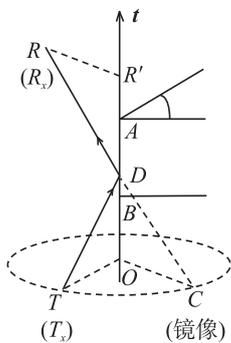


图4 直劈的绕射

Fig.4 Diffractions of straight chopping

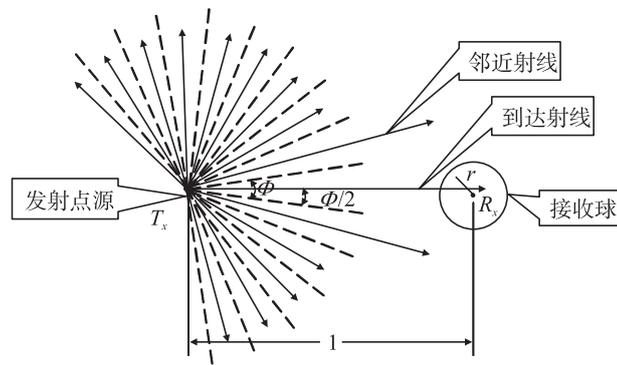


图5 接收球示意图

Fig.5 Schematic diagram of the receiving wave ball

⑤射线的接收:射线从点源发射出去后经过反射、透射、绕射等电磁现象后是否可以被接收的依据为是否可以到达接收球,即接收球的判收,接收球半径的大小对于计算结果的准确性有很大影响.

## 2 仿真模型参数及其正确性验证

### 2.1 模型环境参数

本文将1个典型街区作为传播模型研究案例,分别研究了3条典型街区,路径1(以非视距为主的传播)的信号来自于宏蜂窝基站BS1,路径2的信号(视距传播)来自微蜂窝基站BS2,路径3的信号(非视距传播)来自微蜂窝基站BS2. 建模过程中的一切模型参数均来自于数字地图GE的三维信息<sup>[14]</sup>(如图6(a)所示),结合平面图按比例尺进行建模(图6(b)),发射天线以及接收天线的位置如图6(c)所示,而A、B的接收天线区域有植被覆盖.

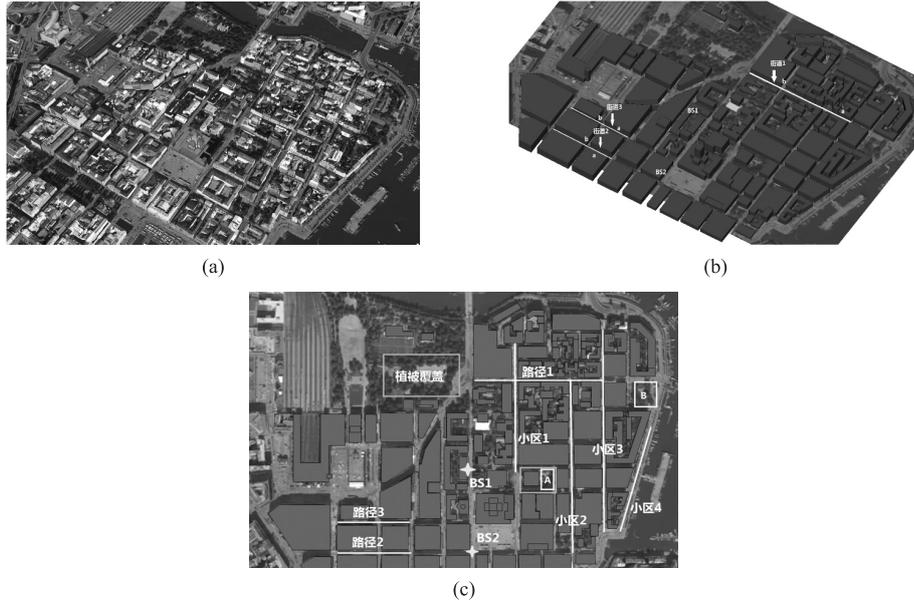


图6 实际场景图与建模仿真图

Fig.6 Map of the actual scene and simulation model

仿真的模型参数如下:(模型中建筑取相对介电常数为5,电导率为0.01 s/m;植被由于其复杂,采用等效处理的方法,即将树林或其他植被等效为一种介质,高度取10 m,介电常数为1,厚度为0.3 m,信号的衰减取1 dB/m)

表1 天线参数

Table 1 The parameters of antennas

	发射天线	接收天线
高度(m)	BS1:30(高于房顶) BS2:13(低于房顶)	1.7
天线增益(dBi)	10	8
极化方向	垂直极化	垂直极化
输出功率(dBm)	40	/
载波频率(GHz)	2.154/ 28	2.154/ 28

基站1由于其架设高度高于房顶,可以将其作为宏蜂窝基站模型,基站2高度低于楼顶,将其作为微蜂窝基站模型,在蜂窝传播环境中,收发天线通常比周围建筑物低,射线从建筑物顶部到达接收点至少需经过劈边缘的两次绕射.由于两次以上绕射的衰减很大,且从建筑物顶部远比侧面到达接收点的射线少,因此,可以舍弃建筑物顶部的绕射射线.所以只需考虑建筑物“峡谷”中的射线,故本文在仿真过程中射线跟踪的计算深度为8次反射、1次绕射.

## 2.2 模型正确性验证

本文对两条街道的路径增益进行了仿真,并与文献[15]的实际测量值进行了比较,得到了下列结果:

### ①街道1的实测数据与仿真数据

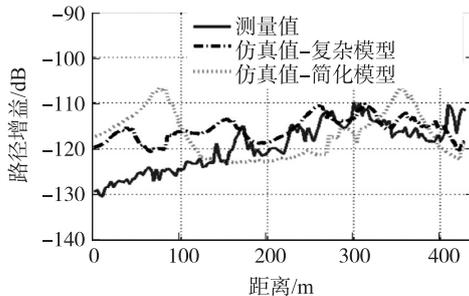


图7 文献[15]路径1的仿真实测数据

Fig.7 Measurements and simulation path gain of route 1 in literature[15]

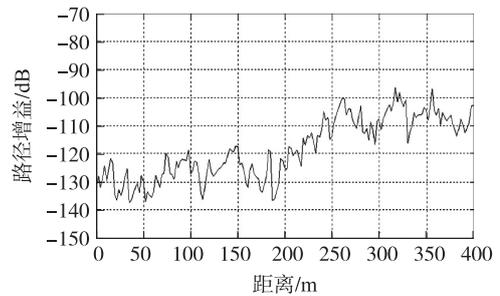


图8 本文街道1路径增益的仿真数据

Fig.8 Simulation path gain of route1 in this paper

②街道2的实测数据与仿真数据

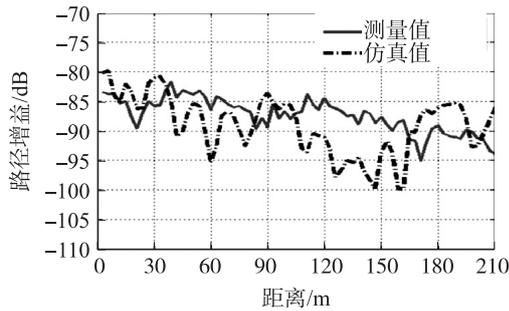


图9 文献[15]路径2的仿真与实测数据

Fig.9 Measurements and simulation path gain of route 2 in literature[15]

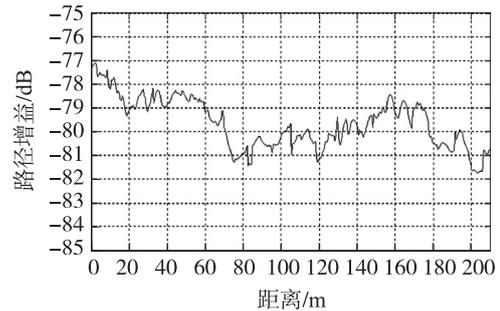


图10 本文街道2路径增益的仿真数据

Fig.10 Simulation path gain of route 2 in this paper

由上述数据可以看出仿真值与实测数据较文献中的仿真值更为接近实测值,趋势大小基本吻合,一致性良好.存在较小(5~10 dB左右)的误差,考虑到街道室外微小区环境的复杂性,误差在可接受范围之内,因此可以认为仿真模型能较好地反应该小区的实际情况.

### 3 仿真结果与分析

本节对比2.1 GHz与28 GHz频段下该室外环境的无线链路参数,分析了基站接收功率覆盖、路径增益,研究了微蜂窝基站下视距传播与非视距传播对不同频段下的影响.

#### 3.1 基站接收功率覆盖

作者出于计算效率的考虑用微小区模型仿真了4个小区街道及A、B的接收功率,进行了基站的覆盖测试与比较,其中接收功率覆盖情况分布如下图所示,可以较好地反映该街道的信号衰落情况.

①2.1 GHz频段

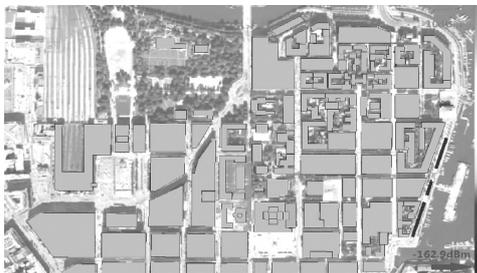


图11 基站BS1在2.1 GHz的接收功率

Fig.11 Receive power of Base Station1 at 2.1 GHz

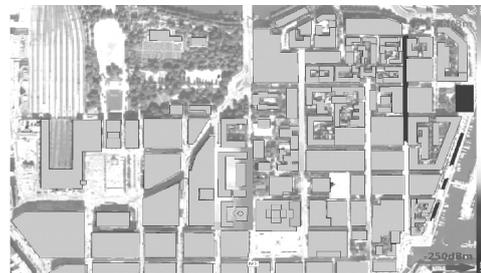


图12 基站BS2在2.1 GHz的接收功率

Fig.12 Receive power of Base Station2 at 2.1 GHz

②28 GHz频段

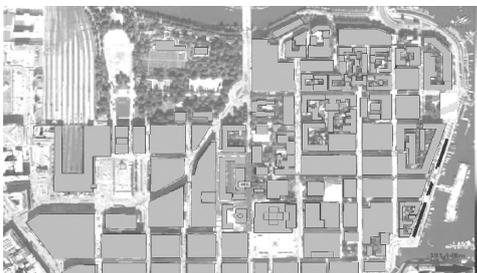


图13 BS1在28 GHz下的接收功率

Fig.13 Receive power of Base Station1 at 28 GHz

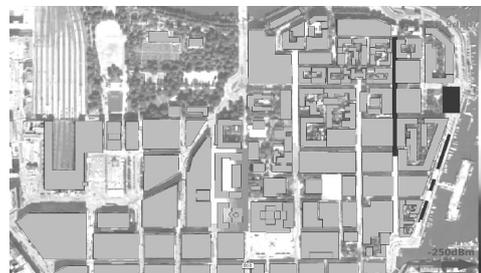


图14 BS2在28 GHz下的接收功率

Fig.14 Receive power of Base Station2 at 28 GHz

③结果分析

(a)宏蜂窝网络由于其架设高度较高,有的链路可以从楼顶处经过少量的反射和绕射到达,因此覆盖半径较大,2.1 GHz下的宏蜂窝基站图中小区几乎都可以认为能有效接收到发射天线的信号,仅在半径600~700 m处的小区4及B区出现了明显的衰落,而这两处正位于宏蜂窝网络下微小区的“盲点”.

28 GHz下的宏蜂窝覆盖范围变小,信号可接收的半径约为500 m,500~600 m部分链路可以探测到,但600 m半径的衰落可认为无法接收,同一位置功率减少了约20~30 dBm,距离基站天线越远衰落越大。(b)微蜂窝网络发射天线一般低于楼顶,传播环境近似于“城市峡谷”,没有来自楼顶的无线链路,都是楼群之间的大量反射与绕射,覆盖范围较宏蜂窝明显变小,该发射天线在2.1 GHz的有效半径约为400~500 m,非视距链路在半径400 m处还是可以接收的.但在28 GHz下微蜂窝网络视距传播与非视距传播差距很大,视距传播可接收半径可达300~400 m,但非视距链路从半径200 m开始的小区“群楼”内就会有一定的衰落,与2.1 GHz相比同一非视距链路接收点处接收功率小了30 dBm以上,因而28 GHz下的微蜂窝网络有效半径只有200 m.

### 3.2 植被覆盖

作者在28 GHz频段的接收功率仿真时加入了室外植被的因素进行对比,分析了图2(c)中A区域在28 GHz时的接收功率,文献[16]指出,植被在电波传播研究中有一定的复杂性,可以采用等效处理的方法,即将树林或其他植被等效为1种介质,高度取10 m,介电常数为1,厚度为0.3 m,信号的衰减取1 dB/m,结果如图15~图18所示.

#### ① BS1

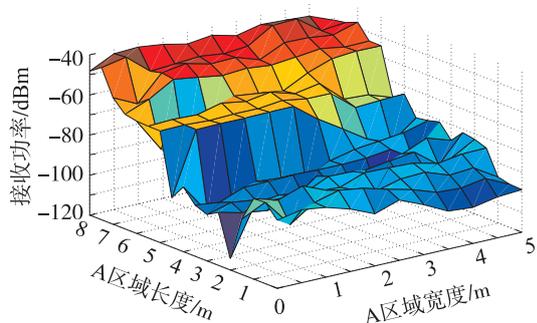


图15 28 GHz BS1下A区域的接收功率

Fig.15 A-area's receive power of Base Station1 at 28 GHz

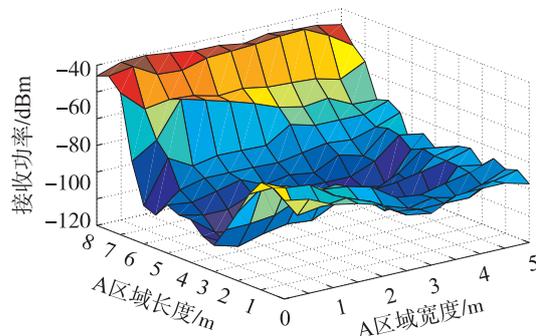


图16 28 GHz BS1考虑植被下A区域的接收功率

Fig.16 A-area with vegetation's data of Base Station1 at 28 GHz

#### ②BS2

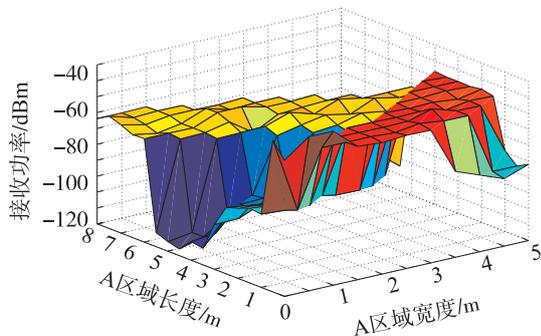


图17 28 GHz BS2下A区域的接收功率

Fig.17 A-area's receive power of Base Station2 at 28 GHz

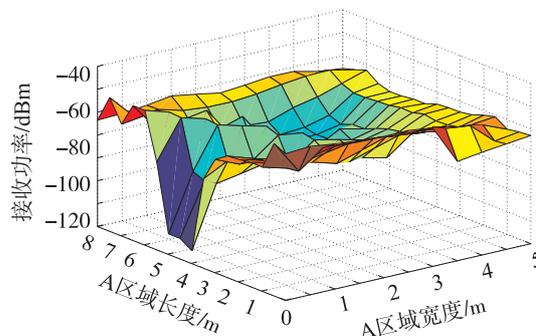


图18 28 GHz BS2考虑植被下A区域的接收功率

Fig.18 A-area with vegetation's data of Base Station2 at 28 GHz

#### ③结果分析

植被的覆盖对28 GHz的影响很大,28 GHz频段有一定毫米波特性的,高频率带来的毫米级波长对于植被这种散射体很敏感,宏蜂窝网络下A处的接收功率因植被减少了约10~40 dBm,微蜂窝网络A处的接收功率因植被减少约了30~90 dBm,植被覆盖的因素在未来可能的毫米波网络建设中是不得不考虑进去的因素.

### 3.3 路径增益

路径增益即路径损耗取负,反应了无线链路信号的强度,作者对图6(c)3条路径的路径增益进行了仿真.路径1接收来自宏蜂窝BS1的信号,以非视距传播为主但存在极少量LOS链路;路径2接收来自微蜂窝BS2的信号,是典型的视距传播链路;路径3接收来自微蜂窝BS3的信号,是非视距传播链路.除了对比2.1 GHz与28 GHz下链路特性的不同,还对比了视距传播与非视距传播在28 GHz毫米

波段下的链路特性,为观察方便图20、图21的链路数据在matlab处理时采用双y轴坐标,以便观察曲线的变化.

①宏蜂窝下以非视距为主的传播(路径1)

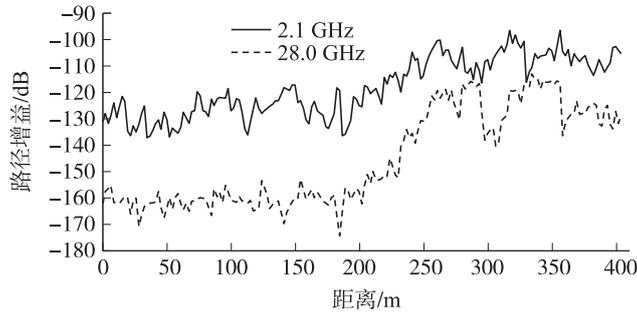


图19 路径1的链路增益

Fig.19 Path gain data in route 1

②微蜂窝下的视距传播(路径2)

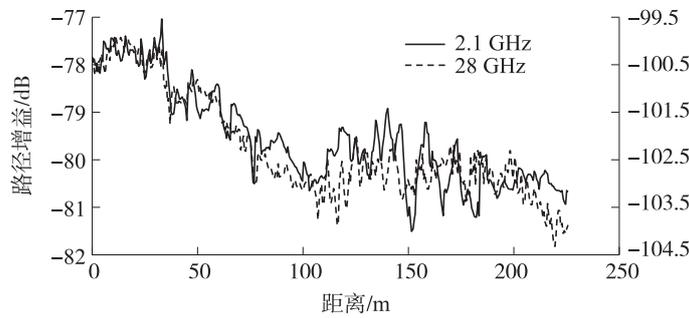


图20 路径2的链路增益

Fig.20 Path gain data in route 2

③微蜂窝下的非视距传播(路径3)

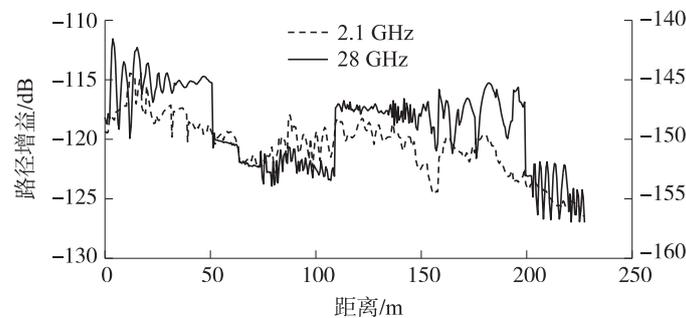


图21 路径3的链路增益

Fig.21 Path gain data in route 3

④结果分析

(a)宏蜂窝网络下的2.1 GHz与28 GHz的链路增益趋势基本一致,但是28 GHz相比2.1 GHz路径增益衰落了20~30 dB.(b)微蜂窝网络下视距传播2.1 GHz与28 GHz趋势也基本一致,多径快衰落较2.1 GHz更为明显,28 GHz的增益较2.1 GHz衰落了20 dB左右.(c)微蜂窝网络下非视距传播趋势走向基本一致,但是多径快衰落较2.1 GHz更为明显,28 GHz的路径增益较2.1 GHz衰落了30 dB.非视距传播在28 GHz毫米波段的多径效应明显,这是由于其毫米级的波长远小于散射体尺寸造成的.

3.4 路径损耗的概率分布

路径损耗是指由于反射、建筑膜周围的散射等造成的接收信号随着通信距离增大而减小的现象.在任何情况下,信号覆盖范围计算的核心都是路径损耗模型.在移动通信系统中,传播损耗和频率、距离、收发天线高度有关,更和地形高度有关.本节对微蜂窝网络下视距(路径2)与非视距传播(路径3)的两种情况的路径损耗仿真值分别进行了对比,并用matlab进行了概率统计处理,结果如下图.

## ①路径2

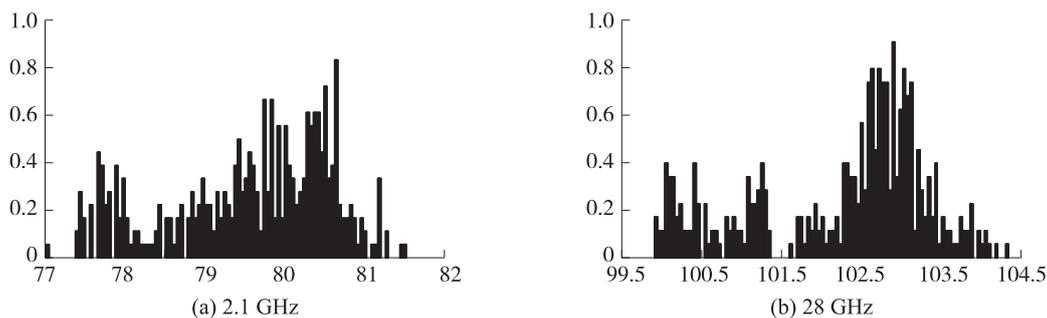


图22 路径2路损概率分布图

Fig.22 The probability distribution of path loss in route 2

## ②路径3

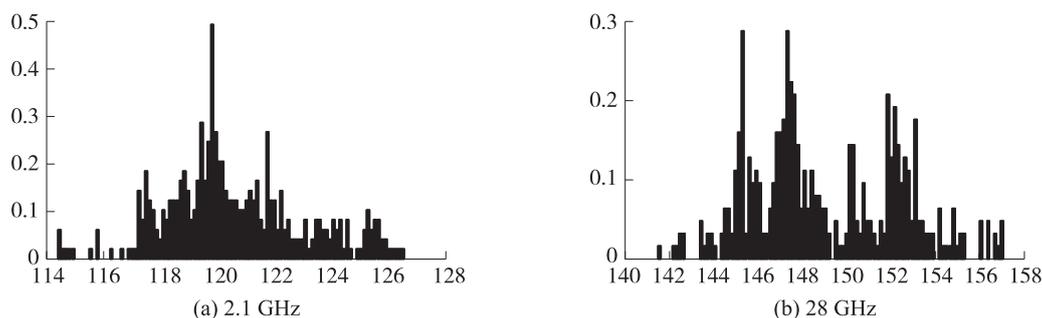


图23 路径3路损概率分布图

Fig.23 The probability distribution of path loss in route 3

## ③结果分析

(a)非视距链路的功率较视距链路更为集中,信号能量主要集中在少量反射的路径上,视距传播能量的分布较为均匀;(b)非视距链路能量在毫米波段较视距传播衰落得更快,路径2的路损范围在77~82 dB,毫米波下变成99.5~104.5 dB,路径2则从114~128 dB变成了142~158 dB;(c)毫米波段的路损值较现有通信波段更大,增加了大约30 dB;(d)毫米波在室外的覆盖半径较现有通信波段更小,同样的基站非视距下的通信距离较视距传播更小.

## 4 结论

通过仿真对比与分析宏蜂窝网络与微蜂窝网络、视距传播与非视距传播和植被覆盖与非植被覆盖,作者得出了室外蜂窝网络在28 GHz频段下的接收功率覆盖、路径增益、路径损耗等链路特性,这将为未来5 G室外毫米波网络的研究与优化提供理论支持,但是实际的室外环境还包括了车辆、地形坡度、空气中的湿度等等因素,植被也只是简单化地做等效处理,这就需要进一步分析室外毫米波蜂窝网络在更为复杂的室外环境下的传播特性,这也是作者下一步研究和努力的方向.

## [参考文献]

- [1] 陈德荣,刘用乾,蒋丽.移动通信网络规划与工程设计[M].北京:北京邮电大学出版社,2010:57-71.
- [2] 翟冠楠,李昭勇.5 G无线通信技术概念及相关应用[J].电信网技术,2013,9(9):1-6.
- [3] RAPPAPORT T S,SUN S,MAYZUS R,et al. Millimeter wave mobile communications for 5 G cellular:it will work[J]. Access of IEEE,2013,1(1):335-349.
- [4] 陈森.基于射线追踪及遗传算法的城市微蜂窝网络规划[D].天津:天津大学,2012.
- [5] 王志彬,张娟,严军等.3.5 GHz频段城市环境路径损耗特性研究[J].重庆邮电大学学报,2010,22(4):440-444.
- [6] ZHAO Q,LI J. Rain attenuation in millimeter wave ranges[C]//International symposium on antennas propagation & EM theory, Guangzhou,2006:26-29.

(下转第128页)

- [46] MIAO Y, HAN F, PAN B, et al. Antimony(V) removal from water by hydrated ferric oxides supported by calcite sand and polymeric anion exchanger[J]. Journal of environmental sciences, 2014, 26(2): 307-314.
- [47] 李双双, 戴友芝, 罗春香, 等. 锑在水中的形态变化及除锑技术现状[J]. 化工环保, 2009, 29(2): 131-134.
- [48] DU X, QU F, LIANG H, et al. Removal of antimony(III) from polluted surface water using a hybrid coagulation-flocculation-ultrafiltration(CF-UF) process[J]. Chemical engineering journal, 2014, 254: 293-301.
- [49] GUO X, WU Z, HE M. Removal of antimony(V) and antimony(III) from drinking water by coagulation-flocculation-sedimentation(CFS)[J]. Water research, 2009, 43(7): 4 327-4 335.
- [50] ZHU J, WU F, PAN X, et al. Removal of antimony from antimony mine flotation wastewater by electrocoagulation with aluminum electrodes[J]. Journal of environmental sciences, 2011, 23(7): 1 066-1 071.
- [51] 吴丰昌, 朱静. 用铁电极-电絮凝法处理含锑工业废水的方法: CN101781042A[P]. 2010-07-21.
- [52] 张家兴, 王超, 杨波, 等. 电混凝去除水中锑污染物[J]. 环境工程学报, 2014, 8(10): 4 244-4 248.

[责任编辑: 丁 蓉]

(上接第 121 页)

- [7] AZAR Y, WONG G N, WANG K, et al. 28 GHz propagation measurements for outdoor cellular communications using steerable beam antennas in New York City[C]//IEEE international conference on communications, Budapest, 2013: 5 143-5 147.
- [8] 韩鹏. 中近距离多波段无线电波传播建模与仿真[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
- [9] 李清. 基于射线追踪模型的室外为小区电波传播预测研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
- [10] TABAKCIOGLU M B, CANSIZ A. Application of S-UTD-CH model into multiple diffraction scenarios with close building heights[C]//Mediterranean microwave symposium, Saida, 2013: 1-4.
- [11] KOUYOUJIAN R G, PATHAK P H. A uniform geometrical theory of diffraction for an edge in a perfectly conducting surface[J]. Proceedings of the IEEE, 1974, 62(11): 1 448-1 461.
- [12] LI P, HUANG X, FANG Y. Capacity scaling of multihop cellular networks[C]//Proceedings of IEEE INFOCOM, Shanghai, 2011: 2 831-2 839.
- [13] MOHTASHAMI V, SHISHEGAR A A. Accuracy and computational efficiency improvement of ray tracing using line search theory[J]. IEEE transactions on microwaves, antennas & propagation, 2010, 4(9): 1 290-1 299.
- [14] NORMAN R J, MARSHALL J L, CARTER B A, et al. A new pseudo three-dimensional segment method analytical ray tracing (3-D SMART) Technique[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2012, 60(12): 5 818-5 824.
- [15] FUSCHINI F, SALLABI H E, ESPOSTI V D, et al. Analysis of multipath propagation in urban environment through multidimensional measurements and advanced ray tracing simulation[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2008, 56(3): 848-857.
- [16] 沈黎歌. GSM信号的植被衰落研究[D]. 西安: 西安邮电大学, 2008.

[责任编辑: 顾晓天]