



60 GHz 频段下射线追踪模型与 IEEE 802.11ad 信道模型性能对比

李冬博, 韦再雪, 桑 林

(北京邮电大学无线理论与技术研究室 北京 100876)

摘 要: 如今毫米波通信和大规模 MIMO、3D MIMO 技术等成为移动通信领域的研究热点, 对无线信号的传播预测要求更为精细。目前常用的室内信号无线传播模型有两种: 经验模型和确定性模型。在 3D MIMO 场景下受到广泛关注的 IEEE 802.11ad 信道模型是根据信道测量得到的经验模型; 而射线追踪模型则属于确定性模型。主要研究了 IEEE 802.11ad 信道模型和射线追踪模型, 对两种模型进行了设计和实现, 针对选定的室内场景分别使用 IEEE 802.11ad 信道模型和射线追踪模型进行仿真, 并对仿真出来的数据进行统计, 得到了到达时延、时延扩展、到达角、角度扩展参数的对比结果。仿真结果表明, 两种信道模型都可以正确地对室内信道场景进行建模, 但这两种模型还存在一定的差异。

关键词: IEEE 802.11ad; 信道模型; 射线追踪; 60 GHz

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2015345

Performance Comparison Between Ray Tracing Channel Model and IEEE 802.11ad Channel Model in 60 GHz Band

Li Dongbo, Wei Zaixue, Sang Lin

(Wireless Theories and Technologies Lab, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: Now millimeter wave communication and large scale MIMO, 3D MIMO technology have become the research hotspot in the field of mobile communication. IEEE 802.11ad channel model, which is widely concerned in MIMO 3D scenario, is the empirical based on the measuring of the channel. However, ray tracing model belongs to the deterministic model. IEEE 802.11ad channel model and ray tracing channel model were introduced. Then the method of IEEE 802.11ad channel model and ray tracing channel model were simulated in the indoor scenes and the simulation data was counted that the comparison results of TOA, DS, AZIMUTH and AS were obtained. It turns out that both of the two channel models can be modeling for the indoor scenes correctly. But the two models also exist certain differences.

Key words: IEEE 802.11ad, channel model, ray tracing, 60 GHz

收稿日期: 2015-09-28; 修回日期: 2015-12-15

论文引用格式: 李冬博, 韦再雪, 桑林. 60 GHz 频段下射线追踪模型与 IEEE 802.11ad 信道模型性能对比. 电信科学, 2015345

Li D B, Wei Z X, Sang L. Performance comparison between ray tracing channel model and IEEE 802.11ad channel model in 60 GHz band. Telecommunications Science, 2015345

1 引言

无线电波传播特性是研究移动通信系统的基础和首要问题,掌握无线传播特性对移动通信无线传输技术的研究、开发和移动通信的系统设计是至关重要的。研究无线电波传播特性实际上就是研究和探讨无线信道的特点。如今人们对无线通信系统高速的数据传输率和更好的服务质量的需求日益增加,为了更好地满足这种需求,对无线信道的建模是首要任务^[1]。

随着数字蜂窝移动通信在世界范围的飞速发展,有限的频谱资源与急速增长的容量需求之间的矛盾,使得无线通信已经向着“微蜂窝”的方向发展。在这一进程中,一方面电波的有效覆盖问题变得日益严重突出,另一方面原有的大区传播模型越来越不适用,微小区电波传播的研究热潮就产生了,尤其是近几年,电波传播的研究越来越重视对微蜂窝传播环境传播特性的研究。因此对于微蜂窝小区电波传播的研究是很有现实意义的,从根本上影响了微蜂窝技术的发展^[2]。

微蜂窝传播预测模型有多种,概括起来主要包括统计性信道模型和确定性信道模型两种。统计性模型是基于实测统计方法获得的,优点在于模型使用过程中运算量小,易于仿真和刻画信道特征,缺点是和实际的信道有较大的偏差;确定性模型则是根据具体的现场环境利用无线电波传播理论来模拟无线电波在环境模型中的传播,从而预测无线信道的特性,优点在于对仿真的计算结果更加精确,缺点则是它需要清楚场景的具体信息,包括场景中物体的位置、材料等,而且计算量大,相比于统计性模型需要更多的时间^[3]。

随着对短距离高速无线通信需求的日益增长,毫米波通信(60 GHz)成为目前研究的热点。60 GHz 的主要特征为:极大的带宽为 Gbit/s 量级的通信速率提供了条件。近年来在 60 GHz 标准化研究上取得了较大进展,出现了 ECMA-387、IEEE 802.15.3c、wireless HD、IEEE 802.11ad 等标准。而在 60 GHz 频段下的统计性模型主要采用 IEEE 802.11ad 信道模型,确定性模型则主要采用射线追踪模型。由于射线追踪模型是通过建立具体的场景,利用电磁波理论,通过仿真追踪电磁波在仿真场景的路径来得出信道的相关特性,因此准确度非常高。而 IEEE 802.11ad 模型在不同环境下的性能表现有所区别,最适合用来进行房间内各个设备之间的高速无线传输。IEEE 802.11ad 信道模型对现实场景的建模性能又如何呢?可以将其与射线追踪

模型进行对比,以此来检验其准确性。

2 IEEE 802.11ad 信道模型及其建模方法

IEEE 802.11ad 标准抛弃了拥挤的 2.4 GHz 和 5 GHz 频段,转而使用 60 GHz 频谱。由于 60 GHz 频谱在大多数国家有大段的频率可供使用,因此 IEEE 802.11ad 模型可以在 MIMO 技术的支持下实现多信道的同时传输,而每个信道的传输带宽都超过 1 Gbit/s^[4]。同时,IEEE 802.11ad 也面临技术上的限制。比如,60 GHz 载波的穿透力很差,而且在空气中信号衰减很厉害,其传输距离、信号覆盖范围都大受影响,这使得它的有效连接只能局限在一个很小的范围内。在理想的状态下,IEEE 802.11ad 模型最适合用来作为房间内各个设备之间高速无线传输的通道^[5]。

60 GHz 传播信道被证实是一个簇聚信道^[6],这与以射线追踪技术预测的传输路径具有良好的吻合度,这一事实为信道模型的建立提供了理论支持。由于实验数据的缺失,射线追踪技术在生成簇间参数(簇到达时间、发射和接收的方位角、仰角)时起到了巨大的作用。在 IEEE 802.11ad 模型中,通过射线追踪仿真,可以得到不同簇类型的簇间参数的概率分布函数,包括到达时间、发射接收方位角、仰角分布、簇幅值等(在射线追踪仿真中没有将射线分为一阶反射与二阶反射的不同 cluster 组)。然后再通过对这些概率分布进行近似,得到可用的概率分布解析式,使用这些概率分布生成簇间参数。参数的生成方法大同小异,一般是通过射线追踪获得参数的经验概率分布函数,而后进行近似、分段,获得解析的概率分布函数,进而生成分服从一定分布的参数。此处不再赘述,详情请参见参考文献[6]。

3 射线追踪技术及其建模方法

3.1 射线追踪技术

射线追踪是一种被广泛用于移动通信和个人通信环境(室外宏蜂窝、街道微蜂窝和室内微蜂窝)中的预测无线电波传播特性的技术,可以用来辨认出多径信道中收发之间所有可能的射线路径。一旦所有可能的射线被辨认出,就可根据电波传播理论来计算每条射线的幅度、相位、时延和极化,然后结合天线方向图和系统带宽就可得到到达接收点的所有射线的相干合成结果。

3.2 射线追踪建模方法

射线追踪的建模方法有很多,而在射线追踪平台中则主要采用以下方法。



首先需要建立初始的射线管。对于初始的射线管采用 20 面体建模。先在球体内接一个正 20 面体,其由 20 个完全相同的等边三角形组成。三角形的 3 个顶点都在球面上。然后,将正 20 面体的每个三角形边镶嵌成 N 个相等的“补丁”, N 为镶嵌次数,即作平行于边的 3 条直线再分成更小的等边三角形。最后,将这些三角形投射到球面上,由此便完成了初始射线管的构造^[3]。

然后需要知道场景的具体信息,包括场景中每一个障碍物的位置以及每个面的材质等。根据这些信息建立场景模型,再根据电磁波理论,通过射线与面的相交结果判定射线是否发生了反射、透射或绕射。如果发生了,则可以根据不同的结果建立相关的射线管。

最后根据接收天线的高度建立一个虚拟的接收平面,这个接收平面是平行于地面的。在这个平面上存在着很多分散且间隔均匀的 bin 点,每个点都会记录每条射线穿过此点时的射线信息。这样就完成了整个射线追踪的建模。

在设计的射线追踪平台中,射线追踪的主要过程如下。

(1)从初始射线管的列表中取出一个射线管。

(2)对该射线管进行相交测试,找出跟踪射线管的每条射线和障碍物的交点,并判断射线是发生发射、透射还是绕射。

(3)若发生反射或透射,当射线管入射到界面时,根据相关定律和理论计算出反射/透射的方向以及所消耗的能量,并建立反射/透射射线管,将其加入二代射线管列表中;若发生绕射,则根据几何绕射理论计算出绕射射线的场强,并根据初始射线管的构造方法生成绕射射线管,然后将其加入二代射线管列表中。若射线穿过虚拟平面,则记录射线穿过的 bin 点及 bin 点处电场强度和到达时延及角度等参数。

(4)跟踪该射线管在介质中的每次反射、透射和绕射,并建立不同类型的射线管,将其加入不同的射线管代数列表中。

(5)如果电场的幅度低于门限值或射线管的代数已经达到规定的最多代数,射线管的跟踪就会停止。

(6)依次对初始射线管列表中的每根射线管进行上述跟踪过程,直至遍历完所有的初始射线管。

4 射线追踪模型与 IEEE 802.11ad 信道模型的仿真设计及结果对比

本次仿真采用 IEEE 802.11ad 模型中的会议室场景,分别用射线追踪平台和 IEEE 802.11ad 信道模型平台对会议室场景进行仿真,并对其仿真结果进行对比分析。

4.1 会议室场景建模

本次仿真采用的是 IEEE 802.11ad 信道模型中的会议室场景中的 STA-STA(主机与主机)场景,即发射天线和接收天线都位于场景中桌子的水平面上,且发射天线和接收天线的位置是等概随机分布的。具体的场景如图 1 所示。

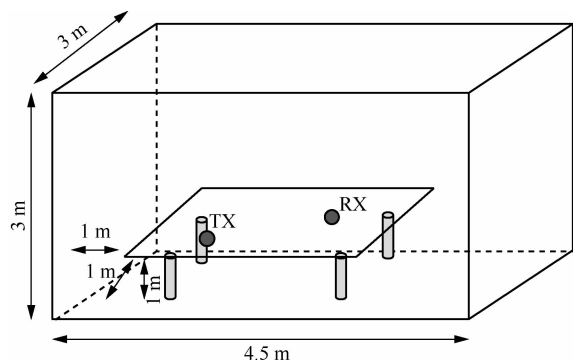


图 1 会议室场景

桌子的材料为木头,墙的材料为石灰石。具体参数取值详见表 1。

表 1 场景中材料的特殊参数

材料	参数	取值
木头	相对介电常数	2.1
	相对磁导率	1
	相对折射率	1.449 1
	电导率	0.011 7
石灰石	相对介电常数	7.5
	相对磁导率	0.95
	相对折射率	2.669 3
	电导率	0.03

4.2 IEEE 802.11ad 仿真平台的设计结构

IEEE 802.11ad 信道模型平台主要设计为用户界面模块、会议室场景参数模块、场景模块、基本的数学计算模块、仿真模块。具体的平台设计结构如图 2 所示。

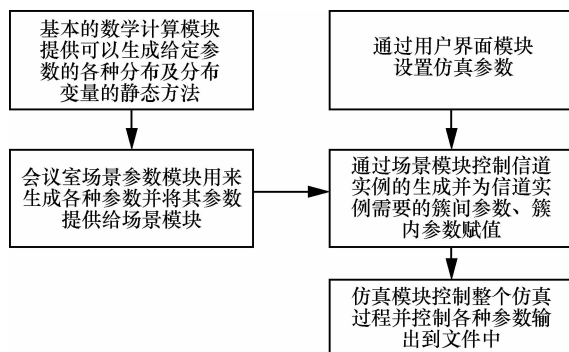


图 2 IEEE 802.11ad 信道模型平台的设计结构

4.3 射线追踪仿真平台的设计结构

射线追踪仿真平台主要设计了天线模块、场景模块、射线追踪模块、结果统计模块。整个仿真平台的设计结构如图 3 所示。

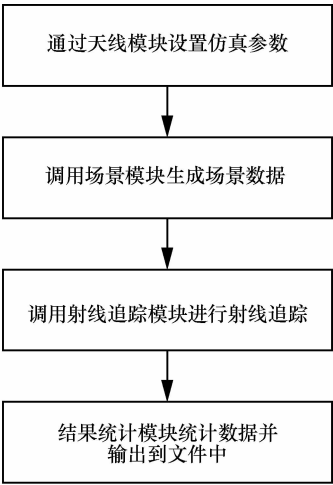


图 3 射线追踪平台的设计结构

4.4 射线追踪平台与 IEEE 802.11ad 信道模型平台仿真参数的结果对比

分别经过射线追踪平台和 IEEE 802.11ad 信道模型平台对会议室场景进行仿真,可以得到接收点的到达时延以及到达角等参数,由于从 IEEE 802.11ad 仿真中获得的这些参数是与簇相关的,而从射线追踪仿真中得到的参数是与每一条射线相关的。为了进行对比,需要将射线追踪中的射线划分成簇。具体的分簇算法可以参见参考文献[7]。通过计算可以得到时延扩展和角度扩展等参数。为了结果的准确性,要仿真多次,并比较每个参数的概率密度函数。本文设置每个仿真平台的仿真次数为 50 次,每个接收 bin 点的间隔距离为 0.005 m。

4.4.1 到达时延(TOA)

分别用两个信道模型平台对会议室场景进行仿真,用分簇算法对射线追踪平台得出的结果进行分簇,最后便可以得到到达时延参数。经过两个平台仿真后得到接收点的到达时延的概率密度曲线如图 4 所示。

计算后得到的到达时延的均值和方差见表 2。

从图 4 中可以发现,在射线追踪的结果中有两处的概率是比较大的,这分别为射线的一次反射和两次反射所造成的,说明仿真的曲线符合理论分析。同时从表 2 中可以观察到,IEEE 802.11ad 模型的到达时延均值和射线追踪模型中得出的到达时延均值是基本相近的,而两者的方差

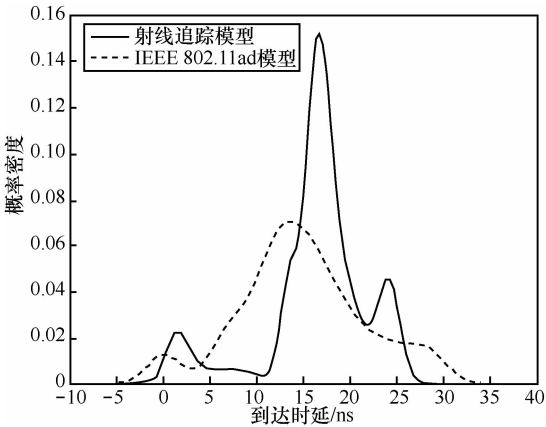


图 4 到达时延参数的概率密度函数

表 2 两个模型到达时延的均值和方差

模型	仿真项	数值/ns
IEEE 802.11ad 模型	到达时延均值	14.74
	到达时延方差	45.44
射线追踪模型	到达时延均值	16.29
	到达时延方差	30.91

却不是很相同。射线追踪模型仿真得到的方差则要比 IEEE 802.11ad 模型仿真得到的要小,说明射线追踪模型仿真得到的数据波动不大,比较稳定。由于 IEEE 802.11ad 模型的参数基本上都是基于概率密度函数得出的,因此通过每次仿真得出的结果就可能偏差较大,这也比较符合理论分析。

4.4.2 时延扩展(DS)

均方根时延扩展 σ_τ 被定义为:

$$\sigma_\tau = \sqrt{\tau^2 - (\bar{\tau})^2} \tag{1}$$

其中:

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_k a_k^2 \tau_k}{\sum_k a_k^2} = \frac{\sum_k P(\tau_k) \tau_k}{\sum_k P(\tau_k)} \tag{2}$$

$$\tau^2 = \frac{\sum_k a_k^2 \tau_k^2}{\sum_k a_k^2} = \frac{\sum_k P(\tau_k) \tau_k^2}{\sum_k P(\tau_k)} \tag{3}$$

其中, $P(\tau)$ 是功率时延扩展函数, τ_k 是射线 k 的到达时延。

通过式(1)可以计算出时延扩展参数,再通过每个时延扩展参数建立起时延扩展的概率密度函数。通过两个模型仿真并计算得到的时延扩展参数的概率密度函数如图 5 所示。

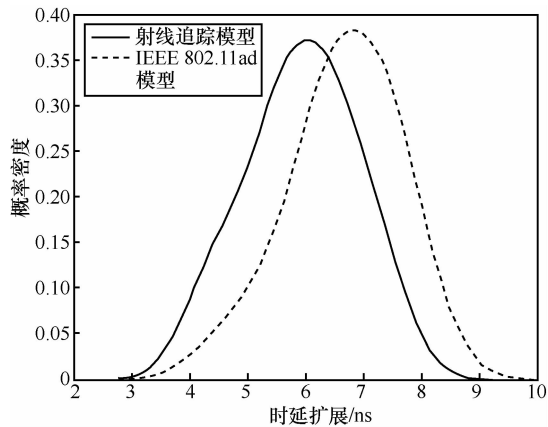


图5 时延扩展参数的概率密度函数

IEEE 802.11ad 信道模型和射线追踪仿真平台的时延扩展的均值与方差见表3。

表3 IEEE 802.11ad 模型和射线追踪模型的时延扩展的均值与方差

模型	仿真项	数值/ns
IEEE 802.11ad 模型	时延扩展的均值	6.66
	时延扩展的方差	0.80
射线追踪模型	时延扩展的均值	5.93
	时延扩展的方差	0.79

从图5可以发现,用两种方法仿真并计算得到的时延扩展大致上相似。而从表3可以发现经过两种仿真后计算得到的时延扩展的均值相差0.7 ns,可以认为其基本上相近。两者的方差也比较接近,说明两者的数据的波动幅度也基本相似。

4.4.3 到达角(AZIMUTH)

经过仿真和分簇算法后,到达角也同样可以直接得到。图6为IEEE 802.11ad信道模型平台和射线追踪平台经过分簇算法后得到的到达角的概率密度曲线。

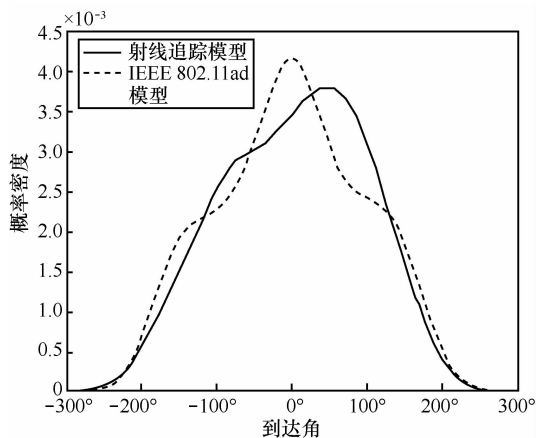


图6 到达角参数的概率密度函数

表4为通过两个仿真后得到的到达角参数的均值与方差。

表4 IEEE 802.11ad 模型和射线追踪模型的到达角的均值与方差

模型	仿真项	数值
IEEE 802.11ad 模型	到达角均值	-1.40°
	到达角方差	8.86×10 ³⁰
射线追踪模型	到达角均值	3.78°
	到达角方差	7.97×10 ³⁰

由图6中可以看出,两种仿真后得到的到达角的概率密度曲线都是在0°附近会有较大的概率,说明会有大多数的射线到达接收点的到达角为0°左右。再从表4中可以看出,两者仿真后得到的到达角的均值也比较相近,而两者的方差也都比较大,说明仿真的数据比较分散,并不是都聚集在均值两侧。

4.4.4 角度扩展(AS)

角度扩展的定义如下:

$$\sigma_{\phi,k} = \sqrt{\frac{\sum_{l=1}^{L_k} |\phi_l - \mu_{\phi,k}|^2 P_l}{\sum_{l=1}^{L_k} P_l}} \quad (4)$$

其中, ϕ_l 为第 l 条射线的到达角, P_l 为第 l 条射线的到达功率, L_k 是在第 k 簇中射线的数量, $\mu_{\phi,k}$ 为第 k 簇中到达角的均值。 $\mu_{\phi,k}$ 可以从式(5)中得到。

$$\mu_{\phi,k} = \frac{\sum_{l=1}^{L_k} \phi_l P_l}{\sum_{l=1}^{L_k} P_l} \quad (5)$$

到达角的时延扩展参数可以通过式(4)获得。图7为IEEE 802.11ad信道模型平台和射线追踪平台仿真计算得到的角度扩展的概率密度曲线。

表5为由IEEE 802.11ad和射线追踪两个仿真平台得到的到达角参数而计算得到的角度扩展的均值与方差。

表5 IEEE 802.11ad 模型和射线追踪模型的角度扩展的均值与方差

模型	仿真项	数值
IEEE 802.11ad 模型	角度扩展均值	92.47°
	角度扩展方差	1.06×10 ²⁰
射线追踪模型	角度扩展均值	81.87°
	角度扩展方差	6.03×10 ²⁰

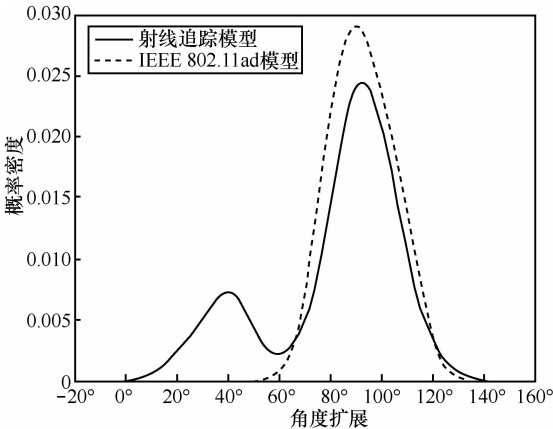


图 7 角度扩展参数的概率密度函数

从图 7 中可以看出,两者的概率曲线的大致趋势是相同的,只是射线追踪模型中会存在一定概率的 40° 的角度扩展。原因可能是 IEEE 802.11ad 模型的仿真平台中的接收点是随机分布的,即接收点为一个确定的随机点;而在射线追踪仿真平台中,则要计算所有可能的随机点的平均值,这就可能会带来一些不同的差异。而从表 5 中可以看到,两者的角度扩展的均值也相差了近 10.6°,且两者的方差也都相对较大。

4.5 影响因果的因素

从仿真和计算得到的各类参数的概率密度函数曲线中可以看出,两种方法的仿真结果的趋势大致相近,但还存在一些差异。造成这种差异的因素是多样化的。例如,如果改变射线追踪中接收 bin 点的距离,那么接收的数据就会增多或减少。而如果接收数据变得太少,对比结果就会变得很不相同。虽然说射线追踪模型是确定性模型,精确度会很高,但在仿真中不可能会做很大的计算量,且对一些结果也会进行忽略,以满足计算机仿真的要求,这样就会在精确度上有所下降。而此时的对比结果的意义就变得不大了。因此射线追踪模型中统计结果的数量会决定最后结果的精确度。当然影响结果的因素不只这一个,发射射线管的数量也会是因素之一。表 6 展示了 bin 点间隔的距离与接收数据数量的关系。表 7 则展示了发射射线管的数量与接收数据数量的关系。

表 6 bin 点间隔的距离与接收射线数量的变化关系 (发射射线管的数量为 200 000)

bin 点的间隔距离/m	接收射线的数量
0.005	616
0.006	493
0.007	399
0.008	121

表 7 发射射线管的数量与接收射线数量的变化关系 (bin 点的间隔距离为 0.005 m)

发射射线管的数量	接收射线的数量
98 000	1 180
72 000	1 480
50 000	1 697

从表 6 中可以看出,当发射射线管的数量一定时,bin 点的间隔距离逐渐变大,接收射线的数量会逐渐变少,最终结果的精确度会下降,这是符合实际理论的。因为当 bin 点间隔距离增大时,接收平面上的 bin 点就会变得很稀疏,此时能够统计到的射线数量就会减少。同样从表 7 中也可以看出,当 bin 点的间隔距离一定时,发射射线管的数量逐渐减少,接收射线的数量会逐渐增多。因为当发射射线管的数量减少时,每一根发射射线的间隔角度会变大,当发射的间隔角度变大时,在接收处就会容纳很多 bin 点,所统计的接收射线的数量也会随之增加。

上述这些因素都会对最终的信道参数结果产生影响。而这些参数的变化究竟会产生多大的影响呢?以 bin 点间隔参数的变化为例,观察在不同的 bin 点的间隔距离下,到达时延的均值所产生的变化。表 8 为 bin 点间隔的距离与到达时延的均值的变化关系。

表 8 bin 点间隔的距离与到达时延的均值的变化关系 (发射射线管的数量为 200 000)

bin 点的间隔距离/m	到达时延的均值/ns
0.005	16.29
0.006	15.93
0.007	15.56
0.008	15.05

由表 8 可以看出,在 bin 点的间隔距离逐渐增大时,到达时延的均值也同样在逐渐增大。随着射线追踪平台中的 bin 点的间隔距离的逐渐增大,到达时延的均值与 IEEE 802.11ad 平台仿真出来的结果越来越接近,而对于其他参数也可以得出类似结果。为了验证哪种结果更接近于实际的参数值,还需要通过实际测量,得到不同的信道参数值,再将结果与 IEEE 802.11ad 仿真平台和射线追踪仿真平台仿真出来的结果进行对比,以此验证仿真结果的准确性。

5 结束语

通过对到达时延、时延扩展、到达角、角度扩展的对比,可以看出射线追踪模型与 IEEE 802.11ad 信道模型都可以很好地建模无线信道,且两种方法虽然不同,但经过



一些相关参数的对比,在多次仿真后每个参数的大致概率曲线都是相近的,只有很微小的不同,这些不同可能是由于在射线追踪平台上做了统计上的平均造成的。因为射线追踪技术是非常精确的,会具体统计到每个射线的路线,而 IEEE 802.11ad 模型中则是根据不同的概率分布得到每个射线的相关参数,需要在射线追踪平台上做统计上的平均。

本文也同样论述了一些影响结果的因素,只要在仿真时设置适当的参数值,统计结果的准确性就会更高。下一步还需要做的就是采集一些实测数据,对实测数据进行统计并与两种信道模型的结果进行比较,以增加结果的准确度与可信度。

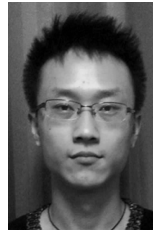
参考文献

- 1 Hoppe R, Ramulu J, Buddendick H, *et al.* Comparison of MIMO channel characteristics computed by 3D ray tracing and statistical models. *Antennas and Propagation*, 2007(11)
- 2 吴志忠. 移动通信无线电波的传播. 北京: 人民邮电出版社, 2002
- 3 侯丽莹. 基于射线追踪法的无线信道建模 (硕士学位论文). 北京: 北京邮电大学, 2011
- 4 卓兰, 郭楠. 60 GHz 毫米波无线通信技术标准研究. 信息技术与标准化, 2011, 11(22)
- 5 张昌明, 肖振宇, 曾烈光等. 基于 IEEE 802.11 ad 标准的单载波 60 GHz 通信系统性能分析. *电子与信息学报*, 2012, 34(1): 218~222

Zhang C M, Xiao Z Y, Zeng L G, *et al.* Performance analysis of single carrier 60 GHz communication system based on the standard of IEEE 802.11ad. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(1): 218 ~222

- 6 IEEE 802.11-0910334. Channel Models for 60 GHz WLAN Systems, 2010
 - 7 马恒彪. 基于射线追踪与 3D 统计信息模型的对比方法研究与仿真(硕士学位论文). 北京: 北京邮电大学, 2015
- Ma H B. The research and simulation of comparison method based on ray tracing and 3D statistical model (master dissertation). Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2015

[作者简介]



李冬博,男,北京邮电大学硕士生,主要研究方向为移动通信。



韦再雪,女,博士,北京邮电大学讲师,主要研究方向为移动通信。



桑林,女,博士,北京邮电大学教授,主要研究方向为移动通信。