

10 GHz 室内无线体域网无线信道测量与建模

杨钦^{1,2}, 杨丽花^{1,2}, 任露露^{1,2}, 黄山虎^{1,2}, 刘加欢^{1,2}

(1. 南京邮电大学江苏省无线通信重点实验室, 江苏 南京 210003;

2. 南京邮电大学通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003)

摘要: 为了探索高频段室内无线体域网通信的可行性, 对 10 GHz 室内无线体域网的传播特性进行测量与研究。基于大量的测量数据, 给出了 10 GHz 频段室内无线体域网的路径损耗、阴影效应与均方根时延扩展的统计特性, 并针对接收端身体角度变化的情况, 提出了一种具有身体角度影响的路径损耗模型, 该模型利用身体角度因子修正身体角度变化引入的路径损耗。同时, 分析了接收端天线在人体不同高度时对路径损耗的影响。研究表明, 路径损耗指数与身体角度呈二次函数关系, 由身体角度引起的路径损耗 (PBA, path loss in body angle) 与身体角度之间的关系可以用带有系数的三角函数表示, 且此系数与收发端之间的距离呈单调递减的指数函数关系。此外, 当身体处于不同角度时, 接收端天线位于人体不同高度时对路径损耗的影响比没有身体旋转角度时小。上述研究结果可以为未来 10 GHz 频段在室内无线体域网的使用提供理论基础与实践依据。

关键词: 无线体域网; 室内环境; 高频段; 路径损耗; 时延扩展; 身体角度

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2022.00259

Measurement and modeling of wireless body area network propagation characteristics of indoor environment at 10 GHz

YANG Qin^{1,2}, YANG Lihua^{1,2}, REN Lulu^{1,2}, HUANG Shanhu^{1,2}, LIU Jiahuan^{1,2}

1. Jiangsu Key Laboratory of Wireless Communication, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

2. School of Communications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

Abstract: To explore the feasibility of high-frequency in indoor wireless body area network (WBAN) communication, the propagation characteristics of 10 GHz for WBAN in indoor scenario was given. Based on a large number of measurement data, the path loss, the shadow effect and the root-based delay spread of the 10 GHz were present, and a novel path loss model with the body angle was proposed, which utilizes the body angular factor to correct the path loss caused by the change of body angle. Meanwhile, the influence of receiving antenna at different heights of body on path loss was analyzed. Research results show that the path loss exponent has a quadratic function relationship with the body angle, the relationship between the path loss (PBA) caused by the body angle and the body angle can be expressed by a trigonometric function with a coefficient, which has a monotonously decreasing exponential function relationship with the distance between the receiving and sending ends. In addition, when the body is at different angles, the effect of the receiving ends in the human body on the path loss is smaller than when there is no body rotation angle. The above research results can provide the theoretical and practical basis for the use of 10 GHz indoor wireless body area network in the future.

Key words: wireless body area network, indoor environment, high frequency band, path loss, delay spread, body angle

收稿日期: 2021-10-09; 修回日期: 2022-01-19

通信作者: 杨丽花, yanglh@njupt.edu.cn

基金项目: 江苏省自然科学基金项目资助 (No.BK20191378); 江苏省高等学校自然科学研究面上项目 (No.18KJB510034); 中国博士后科学基金资助项目 (No.2018T110530); 国家自然科学基金资助项目 (No.92067201)

Foundation Items: The Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No.BK20191378), The Natural Science Research Project of Jiangsu Higher Education Institutions (No.18KJB510034), The China Postdoctoral Science Fund (No.2018T110530), The National Natural Science Foundation of China (No. 92067201)

0 引言

无线体域网 (WBAN, wireless body area network) 是以人体周围的设备以及人体内部等为对象的特殊无线通信系统。由于无线通信技术的快速发展, WBAN 得以实现并快速发展, 如今 WBAN 在医疗保健、消费电子、娱乐、运动等领域都有着广泛应用, 尤其在医疗保健领域, 随着我国人口老龄化的加快以及慢性病患者的增加, WBAN 在此领域将发挥着巨大的作用^[1-3]。但是, 由于手机、平板计算机、智能家居和正在发展中的无人驾驶等海量设备的接入, 以及终端用户对服务质量和即时通信的需求不断增加, 低频段频谱资源逐渐拥挤, 频谱资源短缺问题日益严重, 无法满足未来海量 WBAN 设备的接入需求^[4-5]。而高频段的频谱占用度低且带宽较大能够在一定程度上解决目前频谱资源短缺的问题, 因此, 探索高频 (HF, high frequency) 段 WBAN 通信具有重要的意义。

室内环境是 WBAN 的典型应用场景之一, 是人们生产生活的主要场景, 因此研究高频段室内 WBAN 通信具有重要意义。信道传输特性是设计通信系统的关键, 为此需要研究高频段室内 WBAN 的信道传播特性。目前, 室内 WBAN 信道传播特性的研究大都是针对 9 GHz 以下频段进行探索的^[6-9], 而 9 GHz 及以上的高频段室内 WBAN 信道传播特性的研究较少^[10-11]。其中, 文献[6]针对 6~8.5 GHz 医院环境提出了一种在人体躺卧状态下的新型路径损耗模型, 该模型是具有高度相关的路径损耗指数和人体阻塞因子的模型。文献[7]给出了 2.45 GHz 室内环境下接收端天线和发送端均在人体上的窄带信道模型, 并研究了在人体不同部位, 以及测量者 4 种不同的运动方式时的信道特性。文献[8]利用矢量网络分析仪 (VNA, vector network analyzer) 测量了 2.4 GHz 室内人体到人体 (B2B, body to body) 信道传播特性, 并建立了与人体相对行进时收发两端的夹角相关的信道模型。文献[9]对超宽带 3~8 GHz 频段 B2B 的信道特性进行了测量与研究, 对发送端和接收端的不同人体位置和方向进行了测量。

上述这些现有的 WBAN 信道传播特性的研究^[6-9]均是针对 9 GHz 以下频段的, 由于低频段频谱资源目前十分拥挤, 不利于 WBAN 的发展与应用, 而高频段相对空闲可以提供连续的大带宽频谱资源。因此, 文献[10]对 60 GHz 室内视距和非视距场景下的离体信道

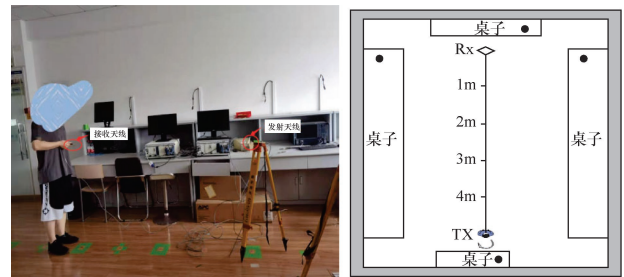
特性进行了研究, 并分析了室内空间大小对信道特性的影响。文献[11]研究了 28 GHz 频段体表信道的信道特性, 分析了路径损耗指数与身体高度的关系, 并建立了与身体高度相关的路径损耗模型。然而, 由于实际生活中人体方向不是固定的, 其会向着不同的角度旋转, 而位于人体上的接收端天线也会随着身体角度的变化而变化, 这将引起信道传播特性发生变化, 而现有的研究^[6-11]并没有考虑接收端身体角度变化对信道特性的影响。因此, 开展高频段室内 WBAN 中具有接收端身体角度变化的信道传播特性的研究具有重要的意义。

为此, 本文基于室内 WBAN 中具有身体角度变化的场景, 对中心频率为 10 GHz 的频段进行测量, 获取大量的测量数据。基于测量数据, 建立了一种新型的具有身体角度影响的路径损耗模型, 并分析了身体角度、天线高度, 以及收发端距离对路径损耗的影响, 且给出了该场景的均方根时延扩展统计特性。

1 测量环境与实验方案

1.1 测量环境

测量场景实测图及示意图如图 1(a)、图 1(b)所示。本测量是在南京邮电大学主楼第 5 层的一间房间内进行的, 室内物体主要有桌子、计算机等, 墙壁材质为混凝土, 地板为木质地板, 南面是玻璃窗, 北面为带有玻璃门的玻璃墙。该测量环境与某些办公场所或医院病房类似, 发送端与接收端之间的链路可以表示为穿戴在办公人员或病人身上的设备与某一固定在室内的接收/发送设备之间的链路。



(a) 测量场景实测场景

(b) 测量场景示意图

图 1 测量场景实测图及示意图

1.2 实验方案

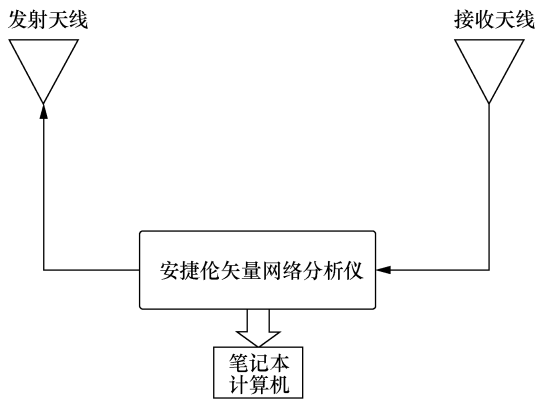
信道测量系统主要使用的是安捷伦生产的型号为 8720ES 的 VNA, VNA 参数设置见表 1。测量系统示意图如图 2 所示, 由 VNA 产生的一个功率为 0 dBm, 频率变化范围为 9~11 GHz, 扫频点数

为 801 个点的发射信号，经过同轴电缆，由发射天线发送。再经过接收天线，由一根长度为 15 m、损耗 9 dB 的同轴电缆送回 VNA。其中，发送端和接收端采用的都是全向贴片天线，测得的复频率响应数据存储于笔记本计算机中用于后续的分析。

在测量时，发射天线固定在木制三脚架上且放置在给定的位置，接收天线放置在人体腰部位置，高度均为 1 m，如图 1(a)所示。位于人体的接收端天线与发送端天线之间的距离逐渐从 1 m 移动到 5 m，收发端之间共有 9 个测量点，每个测量点间隔为 0.5 m。接收端人体在每个测量点处都会从 0° 旋转到 360°，间隔为 45°，接收端人体在每个测量点处都会以发送端和接收端天线正对为 0°，然后，接收端人体顺时针旋转，每隔 45° 测量一次，一共测量 9 次，直到人体由 0° 旋转到 360°，人体旋转时的角度为身体角度，其中 0° 为由身体角度引起的路径损耗 (PBA, path loss in body angle) 的参考身体角度。每个测量点的 9 个角度均重复测量 9 次。

表 1 VNA 参数设置

VNA 参数	参数数值	VNA 参数	参数数值
中心频率	10 GHz	最大时延	400 ns
频率点数	801	带宽	2 GHz
频率步长	2.5 MHz	时延分辨率	0.5 ns



2 新型的路径损耗模型

2.1 具有身体角度影响的路径损耗模型

一般地，路径损耗模型为对数距离函数^[12-13]，可以表示为

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log(d / d_0) + X_\sigma \quad (1)$$

其中， $PL(d_0)$ 表示在参考距离 d_0 处的路径损耗，本文中 $d_0 = 1$ m； n 为路径损耗指数； X_σ 为阴影衰落，服

从均值为零标准方差为 σ 的正态分布。

为了更准确地表示室内接收端身体角度变化时的路径损耗，需要在对数路径损耗模型中引入接收端身体角度的信息，经过测量与研究发现接收端身体角度的变化对路径损耗指数有影响，且会引起额外的路径损耗。因此，在本文中，将引入具有 PBA 和路径损耗指数对式(1)中的路径损耗模型进行修正，且修正后的新型路损模型为

$$PL(d, \theta) = PL(d_0) + 10N(\theta) \log(d / d_0) + PBA + X_\sigma \quad (2)$$

其中， $N(\theta)$ 是与身体角度 θ 相关的路径损耗指数；PBA 为由身体角度引入的路径损耗，在本文中，将采用具有身体角度影响的路径损耗与参考身体角度处的路径损耗之间的差值作为 PBA 的测量值。

2.2 新型路径损耗模型仿真与结果分析

由于所提出的路径损耗模型不仅与收发端距离相关，还与接收端身体角度相关。因此，本节将主要从收发端距离、身体角度对路径损耗、PBA 以及路径损耗指数的影响进行分析。

不同身体角度在不同距离时的路径损耗如图 3 所示。路径损耗随着距离的增加而增大，且逐渐趋于一定值，尤其是当身体角度为 180° 左右时，随着距离的增大，路径损耗几乎不变，这表明此时收发端之间的距离对路径损耗的影响很小，这可能是由于此时接收端信号主要来自于反射、折射、绕射等方式。

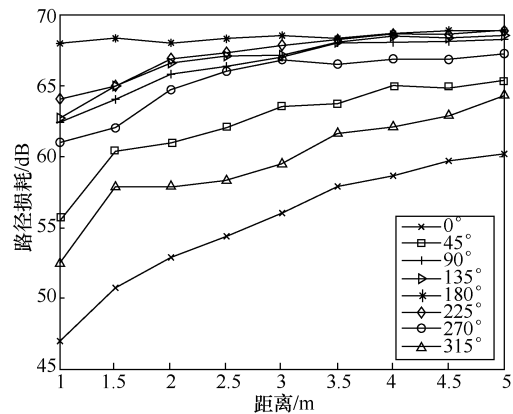


图 3 不同身体角度在不同距离时的路径损耗

不同距离处 PBA 与接收端身体角度的关系如图 4 所示。PBA 拟合曲线可以表示为

$$PBA(\theta) = A \sin(\theta / c) \quad (3)$$

其中， A 为 PBA 表达式 $PBA(\theta) = A \sin(\theta / c)$ 系数，此系数与距离相关， c 为常数。不同距离下系数 A 的值见表 2。

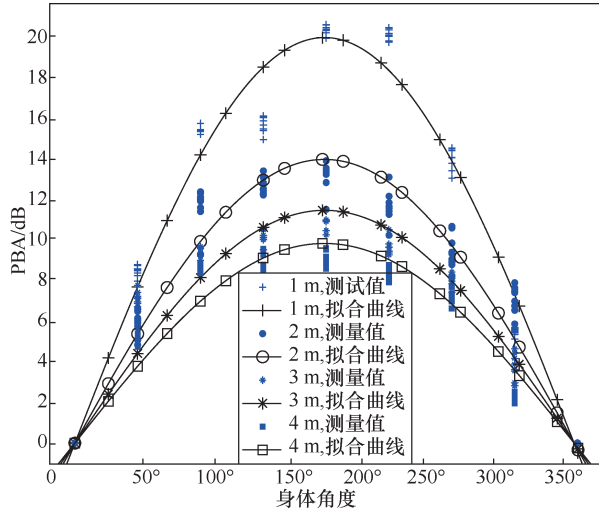


图 4 不同距离处 PBA 与接收端身体角度的关系

表 2 不同距离下系数 A 的值

距离/m	系数 A 的值	距离/m	系数 A 的值
1	19.94	3.5	10.92
1.5	17.07	4	9.578
2	13.95	4.5	9.28
2.5	14.31	5	9.243
3	11.45	/	/

系数 A 与收发端距离的关系如图 5 所示, 系数 A 与收发端距离之间呈单调递减的指数函数关系, 其可以表示为

$$A(d) = ae^{-bd} + c_1 \quad (4)$$

其中, d 表示接收端和发送端之间的距离, a 、 b 、 c_1 为指数函数的 3 个系数, 在此, 其数值分别为 21.04、0.525 4、7.438。

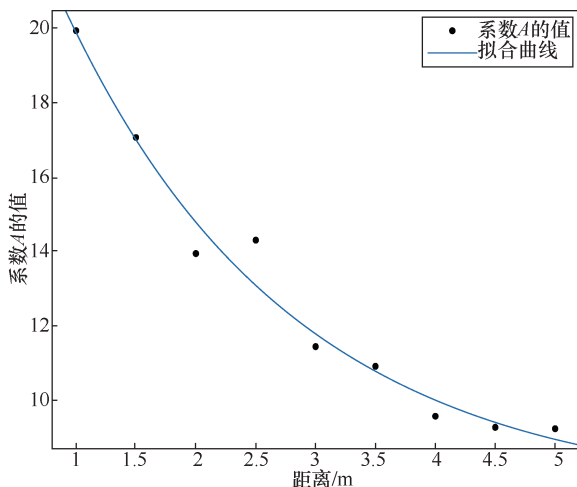


图 5 系数 A 与收发端距离的关系

综上所述对 PBA 的分析可以得到与身体角度、收

发端距离相关的 PBA 的表达式, 其表示为

$$PBA(d, \theta) = (ae^{-bd} + c_1)\sin(\theta / c) \quad (5)$$

不同身体角度的路径损耗指数见表 3, 不同身体角度的路径损耗指数不同, 且路径损耗指数随着身体角度变化呈现逐渐减小趋势, 且在 180° 时达到最小, 随后逐渐增大。这可以用无线传播理论解释, 当身体角度由 0° 向 180° 旋转时, 接收端接收到的来自折射、反射等方式的信号越来越多, 此时身体阴影对路径损耗的影响越来越大, 路径损耗不会随着距离的增加而过度增加, 且当身体角度为 180° 时此现象尤为明显, 而当身体角度由 180° 向 360° 旋转时, 接收端接收到的来自折射、反射等方式的信号逐渐减少, 身体阴影对路径损耗的影响越来越小, 距离对路径损耗的影响越来越大。由于路径损耗指数表明路径损耗随距离增长的速率^[14], 而从图 3 中可以明显看出, 当存在身体角度时, 路径损耗随距离的增长逐渐变缓, 特别是在 180° 左右时, 路径损耗随距离的增加几乎不变, 并且在其他文献中也有相似的测量结果^[15-16]。

表 3 不同身体角度的路径损耗指数

身体角度	路径损耗指数	身体角度	路径损耗指数
0°	1.905	225°	0.719 6
45°	1.341	270°	0.966 8
90°	0.833 9	315°	1.595
135°	0.849 7	360°	1.947
180°	0.431 6	/	/

路径损耗指数与身体角度的关系如图 6 所示, 路径损耗指数 $N(\theta)$ 与身体角度呈二次函数关系, 即

$$N(\theta) = a_1\theta^2 + b_1\theta + c_2 \quad (6)$$

其中, a_1 、 b_1 、 c_2 是二次函数的系数, 3 个系数分别为 4.206×10^{-5} 、 $-0.014 8$ 、1.9。

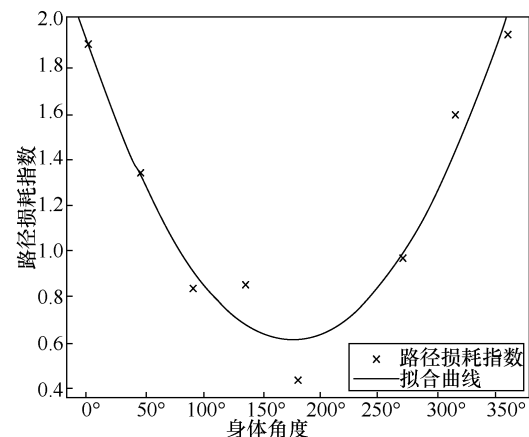


图 6 路径损耗指数与身体角度的关系

对数距离路径损耗模型、所提出的路径损耗模型与测量数据的对比分别如图 7(a)和图 7(b)所示。所提出的路径损耗模型更逼近测量数据，而对数路径损耗模型与测量值之间偏差较大，这表明所提出的路损模型能够更准确地表征室内环境身体角度变化下的路径损耗。

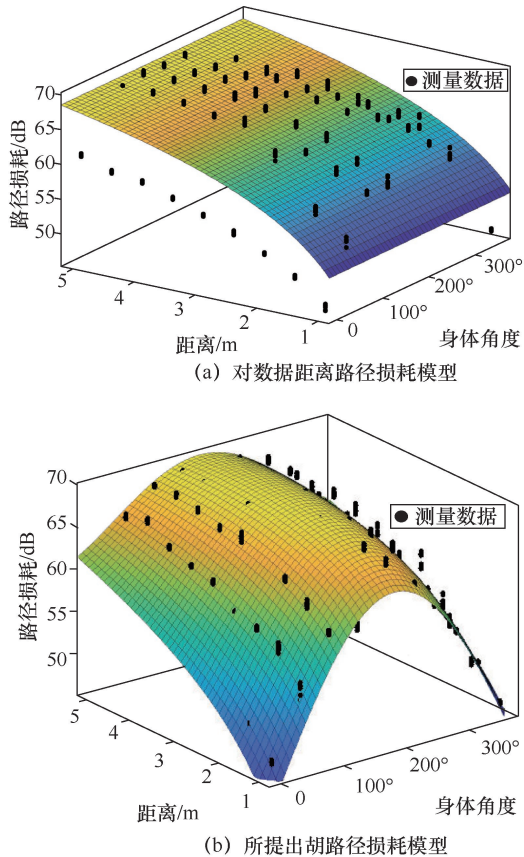


图7 不同路径损耗模型与测量数据的对比

所提路径损耗模型中阴影衰落 X_o 的累积概率正态分布拟合曲线如图 8 所示，正态分布曲线均值为零，标准差 $\sigma = 0.2559$ ，可以看出阴影衰落 X_o 的累积概率符合零均值正态分布。

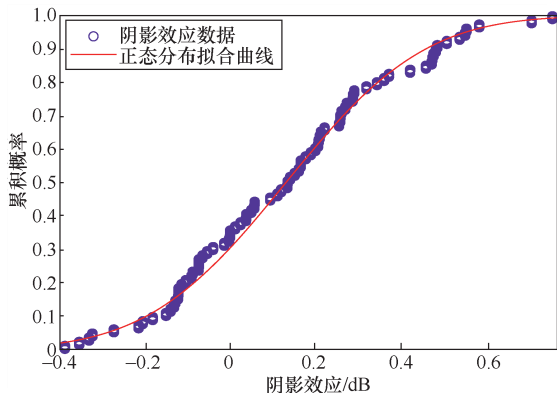


图8 所提路径损耗模型中阴影衰落 X_o 的累积概率正态分布拟合曲线

2.3 具有高度影响的路径损耗

由于接收端天线的高度也会对路径损耗造成一定的影响^[17-19]。因此，本文对接收端天线放置在人体上手臂自然垂下的腕部、头部以及腰部等部位时，且收发两端距离为 3.5 m 的场景进行了信道测量与分析。

不同高度处不同身体角度的路径损耗见表 4。在不同身体角度不同高度下的路径损耗是不同的。当身体角度在 180°左右时，路径损耗的最大值与最小值之间的差值为 0.849 5 dB，路径损耗随高度的变化不明显；而在其他身体角度时，路径损耗最大值和最小值之间的差值明显增大。这表明在室内环境下接收端身体角度在 180°左右时接收端高度对路径损耗几乎没有影响，这可能是由于在 180°时，接收端天线接收到的信号主要来自于反射、折射、绕射等方式。

表4 不同高度处不同身体角度的路径损耗

高度/m	身体角度			
	0°	90°	180°	270°
1.7(头部)	61.480 2 dB	67.265 5 dB	67.667 0 dB	68.148 0 dB
1(腰部)	57.906 0 dB	68.021 3 dB	68.130 7 dB	65.532 6 dB
0.7(腕部)	57.648 2 dB	66.787 1 dB	67.281 2 dB	67.373 8 dB

2.4 身体角度与天线高度对路径损耗的影响总结

根据以上对收发端距离、身体角度、接收端高度对路径损耗、路径损耗指数以及 PBA 的影响的分析，得出如下结论。

1) 在有身体角度影响的情况下，路径损耗会随着距离的增大而增大，且逐渐趋于一定值，身体角度为 0°左右时，路径损耗会随距离的增大而显著增大，但是，当身体角度为 180°左右时，路径损耗几乎不随距离的增大而增大。

2) 身体角度影响着路径损耗指数的大小：在 0°和 360°时，路径损耗指数略小于自由空间传播路径损耗指数，而在其他身体角度处路径损耗指数均明显小于自由空间传播路径损耗指数，且在 180°时路径损耗指数最小。此外，路径损耗指数和身体角度呈二次函数关系。

3) 在有身体角度影响的情况下，PBA 与身体角度之间关系可以用带有系数的三角函数表示，且此时三角函数的系数与收发端之间的距离呈单调递减的指数函数关系。

4) 接收端天线的高度对路径损耗也具有一定的影响，且当身体角度不同时，接收端天线高度对路径

损耗的影响不同: 当身体角度为 180°左右时, 接收端天线高度对路径损耗几乎没有影响, 而在其他角度, 接收端天线高度对路径损耗影响显著。

3 时延扩展

由于信号与接收端之间传播环境复杂, 会出现发射端的信号经过反射、折射、绕射等现象才会到达接收端, 从而造成不同的路径到达接收端的信号之间存在一定的时间差, 从而导致了时延扩展, 时延扩展主要由平均附加时延 $\bar{\tau}$ 和均方根(RMS, root mean square)时延扩展 τ_{RMS} 来表征, 这两个参数都是功率延迟谱(PDP, power delay profile)的函数, 可以用 PDP 计算得到, 其中 $\bar{\tau}$ 是 PDP 的一阶矩, 和 τ_{RMS} 是 PDP 二阶矩的平方根^[20-22], 即

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_k P(\tau_k)\tau_k}{\sum_k P(\tau_k)} \quad (7)$$

$$\tau_{\text{RMS}} = \sqrt{E(\tau^2) + (\bar{\tau})^2} \quad (8)$$

其中, $P(\tau_k)$ 是功率延迟谱。

$$E(\tau^2) = \frac{\sum_k P(\tau_k)\tau_k^2}{\sum_k P(\tau_k)} \quad (9)$$

PDP 描述了信号功率随时间的变化, 可以直观地表现由室内的家具、地面等物品的反射、折射等造成的多径现象。在此, 可以通过对测量得到的频率响应进行离散傅里叶逆变换(IDFT, inverse discrete Fourier transform)处理获得。

收发端距离在 3 m 时, 不同身体角度的 PDP 如图 9 所示。不同身体角度的主次径区分明显, 在 0°时主径附近时几乎没有其他径存在, 而在其他角度主径附近均有其他径存在且具有更大的主径衰减, 说明信号到达接收端时主要路径不止一条, 这主要是由于身体角度不同时信号通过反射、折射、绕射等方式到达接收端, 因此造成的传播损耗更大, 多径效应更加显著。

收发端距离为 3 m 时, RMS 时延扩展的累积分布和对数正态分布拟合曲线如图 10 所示。0°和 180°时均方根时延扩展的累积分布符合对数正态分布, 而 90°和 270°用对数正态分布拟合效果最好。并且, 可以看出其他身体角度时的均方根时延扩展比 0°时的均方根时延扩展大得多, 说明此时

多径传播的影响显著。RMS 时延扩展在不同身体角度的均值和标准差以及对数正态拟合参数 μ 、 σ 分别见表 5、表 6。

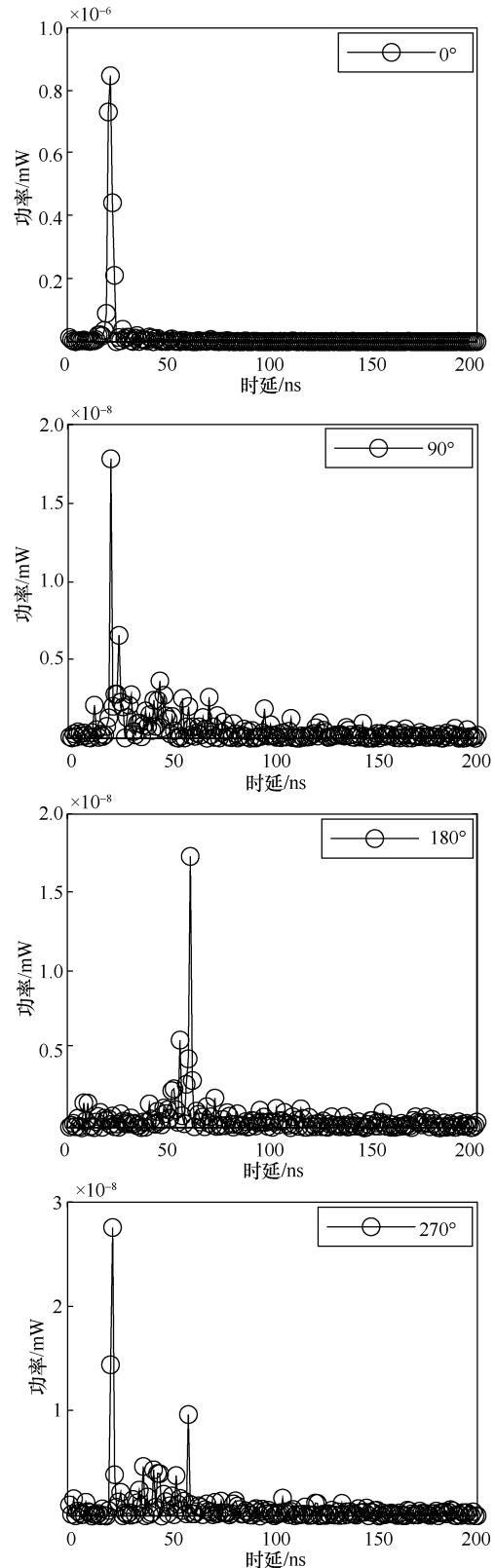


图 9 不同身体角度的 PDP

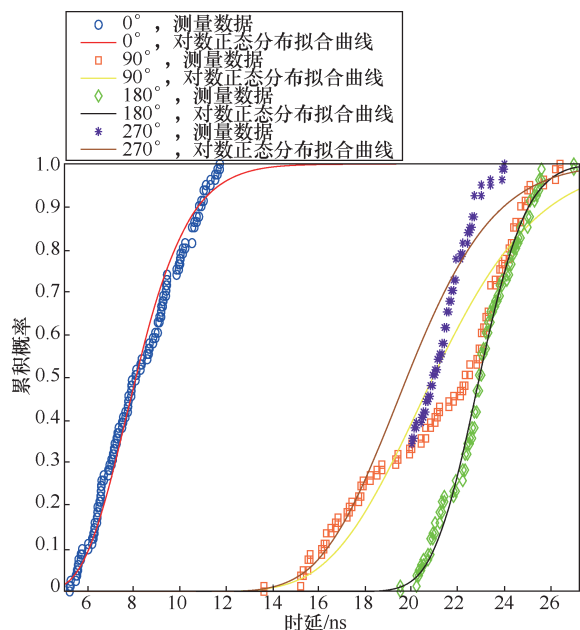


图 10 RMS 时延扩展的累积分布和对数正态分布拟合曲线

表 5 RMS 时延扩展在不同身体角度的均值和标准差

身体角度	时延扩展均值/ns	时延扩展标准差
0°	8.272 6	1.883 2
90°	21.205 7	3.607 3
180°	22.970 0	1.595 8
270°	20.004 1	3.010 5

表 6 对数正态拟合参数

身体角度	μ	σ
0°	-18.635 6	0.224 8
90°	-17.683 3	0.168 9
180°	-17.591 5	0.007 7
270°	-17.735 8	0.016 6

4 路径损耗模型实验验证

为了验证所提出的模型在不同的室内环境下仍然适用,对另一个大空间室内办公室环境进行了测量。大空间测量场景示意图如图 11 所示,实验方案不变。

大空间不同距离处 PBA 与接收端身体角度的关系如图 12 所示,大空间系数 A 与收发端距离的关系如图 13 所示,大空间路径损耗指数与身体角度变化的关系如图 14 所示,所提出的路径损耗模型与测量数据对比如图 15 所示。当测量环境发生了改变,PBA 与身体角度及收发端距离之间的关系不变,路径损耗指数与身体角度之间的关系不变,所提出的路径损耗模型仍然能够比较准确地表征室内环境身体角度变化下的路径损耗。

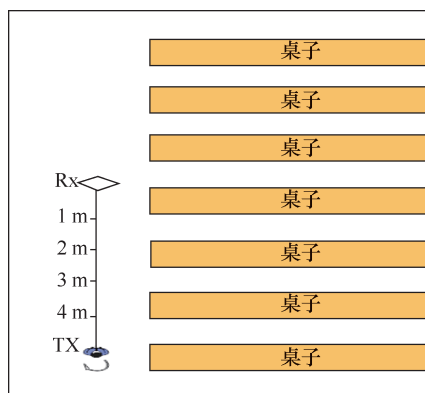


图 11 大空间测量场景示意图

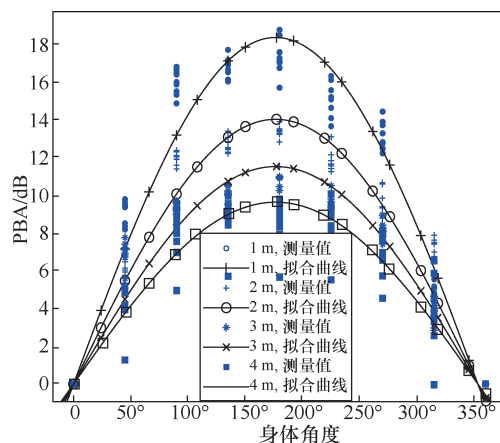


图 12 大空间不同距离处 PBA 与接收端身体角度的关系

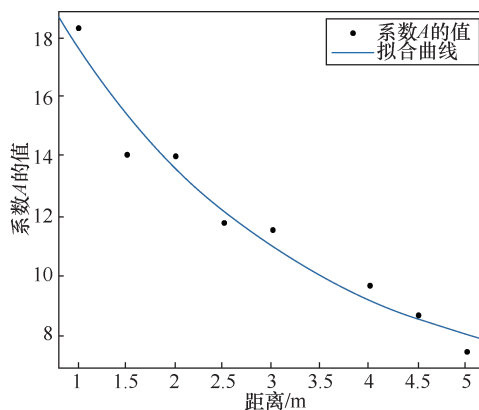


图 13 大空间系数 A 与收发端距离的关系

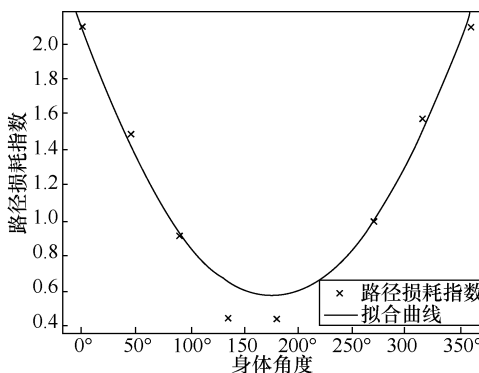


图 14 大空间路径损耗指数与身体角度的关系

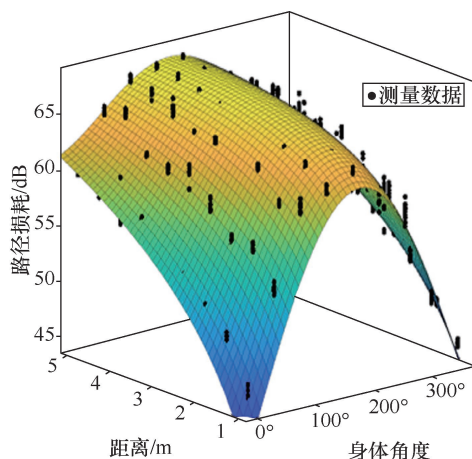


图 15 所提出的路径损耗模型与测量数据对比

5 结束语

本文针对室内具有身体角度影响的无线体域网场景, 在 10 GHz 频段上对该场景下的信道特性进行了研究。基于大量的测量数据, 提出了一种具有身体角度影响的新型路径损耗模型, 同时对该场景下的路径损耗、阴影效应及均方根时延扩展统计特性进行了研究, 并针对接收端存在身体角度影响的情况, 分析了收发端距离、身体角度及接收端高度对路径损耗的影响。本文的研究结果对未来无线体域网在医疗保健、消费电子、娱乐等领域的应用有着重要的参考价值。

参考文献:

- [1] BOUAZIZI A, ZAIBI G, SAMET M, et al. Wireless body area network for e-health applications: Overview[C]//Proceedings of 2017 International Conference on Smart, Monitored and Controlled Cities (SM2C). Piscataway: IEEE Press, 2017: 64-68.
- [2] AMAGASA S, KOJIN H, KAMADA M, et al. Evaluation of physical activity using smart phones and wearable devices in healthcare: current situation and future perspectives[J]. Japanese Journal of Public Health, 2021, 68(9): 585-596.
- [3] MOVASSAGHI S, ABOLHASAN M, LIPMAN J, et al. Wireless body area networks: a survey[C]//Proceedings of IEEE Communications Surveys & Tutorials. Piscataway: IEEE Press, 2014, 16: 1658-1686.
- [4] RAPPAPORT T S, MACCARTNEY G R, SAMIMI M K, et al. Wide-band millimeter-wave propagation measurements and channel models for future wireless communication system design[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(9): 3029-3056.
- [5] PI Z Y, KHAN F. An introduction to millimeter-wave mobile broadband systems[C]//Proceedings of IEEE Communications Magazine. Piscataway: IEEE Press, 2011, 49: 101-107.
- [6] CUI P F, YU Y, LU W J, et al. Measurement and modeling of wireless off-body propagation characteristics under hospital environment at 6-8.5 GHz[C]//Proceedings of IEEE Access. Piscataway: IEEE Press, 2017, 5: 10915-10923.
- [7] ROSINI R, VERDONE R, D'ERRICO R. Body-to-body indoor channel modeling at 2.45 GHz[C]//Proceedings of IEEE Transactions on

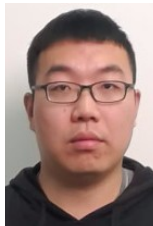
- Antennas and Propagation. Piscataway: IEEE Press, 2014, 62: 5807-5819.
- [8] MANI F, D'ERRICO R. A spatially aware channel model for body-to-body communications[C]//Proceedings of IEEE Transactions on Antennas and Propagation. Piscataway: IEEE Press, 2016, 64: 3611-3618.
- [9] BHARADWAJ R, KOUL S K. Experimental analysis of ultra-wideband body-to-body communication channel characterization in an indoor environment[C]//Proceedings of IEEE Transactions on Antennas and Propagation. Piscataway: IEEE Press, 2019, 67: 1779-1789.
- [10] COTTON S L, CHUN Y J, SCANLON W G, et al. Path loss models for indoor off-body communications at 60 GHz[C]//Proceedings of 2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1441-1442.
- [11] LIU J, SHAO Y, LUO J, et al. On-body channel modeling based on different body heights at 28GHz[C]//2019 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), 2019: 1-3.
- [12] RAPPAPORT T S. Wireless communications: principles and practice[M]. Prentice Hall PTR, 1996.
- [13] 马建生, 金志强, 姜光, 等. 室内无线通信系统的路径损耗模型研究[J]. 信息通信, 2016, 29(1): 213-216.
- MA J S, JIN Z Q, JIANG G, et al. Study on path-loss model of indoor wireless communication system[J]. Information & Communications, 2016, 29(1): 213-216.
- [14] 崔燕妮, 桑维, 林仔, 等. 移动通信路径损耗指数及标准偏差的估计研究[C]//全国微波集成电路与移动通信学术会议. 2010.
- CUI Y N, SANG W, LIN Q, et al. Estimation of mobile communication path loss index and standard deviation[C]//National microwave integrated circuit and mobile communication academic conference. 2010.
- [15] 许拓. 28GHz毫米波在室内电波传播特性及建模[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.
- XU T. The propagation characteristics and modeling of 28 GHz millimeter-wave in indoor environment[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018.
- [16] AMBROZIAK S J, CORREIA L M, KATULSKI R J, et al. An off-body channel model for body area networks in indoor environments[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016, 64(9): 4022-4035.
- [17] YU Y, DONG J, YE A P, et al. Effect of antenna height on propagation characteristics under indoor stair environment[C]//Proceedings of 2014 3rd Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation. Piscataway: IEEE Press, 2014: 710-712.
- [18] ELMEZUGHY M K, AFULLO T J, OYIE N O. Investigating the impact of antenna heights on path loss models in an indoor corridor environment[C]//Proceedings of 2020 International Conference on Artificial Intelligence, Big Data, Computing and Data Communication Systems (icABCD). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-7.
- [19] 刘洋, 吕文俊, 朱洪波. 室内楼梯环境 2.6GHz 频段传播特性测试与建模[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2014, 34(6): 28-33.
- LIU Y, LÜ W J, ZHU H B. Measurement and modeling of radio propagation characteristics in indoor stair environment at 2.6GHzband[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science), 2014, 34(6): 28-33.
- [20] CASSIOLI D, WIN M Z, MOLISCH A F. The ultra-wide bandwidth indoor channel: from statistical model to simulations[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2002, 20(6): 1247-1257.
- [21] 杨大成. 移动传播环境: 理论基础、分析方法和建模技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- YANG D C. Mobile propagation environment: Theoretical principle, analytic

method and modeling technique[M]. Beijing: China Machine Press, 2012.

[22] 刘加欢, 杨丽花, 张捷, 等. 室内办公室场景 10 GHz 频段传播特性研究[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2021, 41(1): 17-24.

LIU J H, YANG L H, ZHANG J, et al. Propagation characteristics of 10GHz band in indoor office scenario[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2021, 41(1): 17-24.

[作者简介]



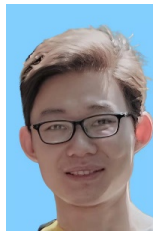
杨钦 (1996-), 男, 南京邮电大学硕士生, 主要研究方向为移动无线通信。



黄山虎 (1996-), 男, 南京邮电大学硕士生, 主要研究方向为移动无线通信。



杨丽花 (1984-), 女, 博士, 南京邮电大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为移动无线通信、通信信号处理、多载波通信系统等。



刘加欢 (1995-), 男, 南京邮电大学硕士生, 主要研究方向为移动无线通信。