

## 9.5~10.5 GHz 频段室内离体信道的测量与建模

黄山虎<sup>1,2</sup>, 孙君<sup>1,2</sup>, 常浩飞<sup>1,2</sup>, 吕文俊<sup>1,2</sup>, 杨钦<sup>1,2</sup>

(1. 南京邮电大学, 江苏 南京 210003;  
2. 江苏省无线通信重点实验室, 江苏 南京 210003)

**摘要:** 为探索高频段室内离体信道的无线传播特性, 对 9.5~10.5 GHz 频段多个典型室内场景进行离体信道测量。在大尺度衰落方面, 通过研究路径损耗发现人体遮挡因子与旋转角度呈正弦函数关系, 并与收发端距离呈现负指数关系, 因此建立距离与角度联合相关的新型路径损耗模型, 并根据阴影衰落统计特性证明新模型的精确性与适用性。在小尺度衰落方面, 通过分析路径损耗与均方根 (RMS, root mean square) 时延扩展的线性相关性, 获得距离与角度相关的新型 RMS 时延扩展模型。证明了收发端距离与人体旋转产生的遮挡因子越大, 路径损耗和多径衰落也越严重。新型离体信道模型可用于设计物联网环境体域网 (BAN, body area network) 的离体链路, 为未来的室内无线通信系统提供理论与实践基础。

**关键词:** 离体信道测量; 路径损耗; RMS 时延扩展; 多径衰落

**中图分类号:** TN929.5

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.2096-3750.2022.00263

## Measurement and modeling of indoor off-body channel in the 9.5~10.5 GHz band

HUANG Shanhu<sup>1,2</sup>, SUN Jun<sup>1,2</sup>, CHANG Hao-fei<sup>1,2</sup>, LV Wenjun<sup>1,2</sup>, YANG Qin<sup>1,2</sup>

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

**Abstract:** In order to explore the wireless propagation characteristics of high-frequency indoor off-body channel, off-body channel measurements were carried out on multiple typical indoor scenes in the 9.5~10.5 GHz frequency band. In terms of large-scale fading, through studying the path loss, it is found that the human body occlusion factor has a sine function relationship with the rotation angle, and a negative exponential relationship with the distance between the receiver and transmitter. Therefore, a new type of off-body channel loss model related to distance and angle was established, and the accuracy and applicability of the new model was proved based on the shadow fading. In terms of small-scale fading, by analyzing the linear correlation between path loss and root mean square (RMS) delay spread, a new type of RMS delay spreading model related to distance and angle was obtained. It proves that the greater the distance between the antenna at the transceiver end and the occlusion factor caused by the rotation of the human body, the more severe the path loss and multipath fading. The new channel model can be used to design the off-body link of the internet of things environment body area network (BAN), providing a theoretical and practical basis for the future design of indoor wireless communication systems.

**Key words:** off-body channel measurement, path loss, RMS delay spread, multipath fading

收稿日期: 2021-09-06; 修回日期: 2022-02-23

通信作者: 孙君, sunjun@njupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61771255); 省部级重点实验室开放项目 (No.20190904)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.61771255), The Provincial Key Laboratory Opening Project (No.20190904)

## 0 引言

物联网作为 5G 系统的重要场景之一, 可以为用户的生活与工作提供便捷和智能化的服务, 通过在特定室内环境中(如办公室、会议室、走廊)部署小型化基站, 以较低的发送功率覆盖较小的范围, 为用户提供更加完整的网络覆盖和更优质的网络服务。而体域网(BAN, body area network)是物联网的一种重要的形式, 主要通过佩戴在用户身上的各种智能设备向基站发送信息, 再由接收端进行协同处理<sup>[1]</sup>。

在设计通信系统之前, 通常需要对目标频段与场景中的无线信道特性进行测量分析, 建立无线信道模型。而在 BAN 中, 信道按照接收和发射节点的部署位置可以分为体内信道、体表信道和离体信道 3 类。其中, 离体信道收发器一端穿戴于人体体表, 另一端接入远端热点, 在现实中应用最为广泛<sup>[2]</sup>。因此, 对体域网离体信道的传播特性进行研究, 不仅能丰富无线通信理论, 还能促进穿戴通信的发展, 具有重要的现实意义和产业前景。

与传统的短距离无线信道不同, 离体信道因为设备过于贴近人体或直接植入人体, 深受人体特性和人体姿势变化的影响。为此, 近年来专家学者对离体信道进行大量研究, 文献[3]主要针对 2.45 GHz 频段在消声室与办公室环境中分别进行测量, 并且研究不同天线对信道特性的影响, 建立离体信道路径损耗模型。文献[4]主要研究医院环境 6~8.5 GHz 频段的离体信道, 并提出包含高度相关人体遮挡因子的路径损耗模型。文献[5]提出与文献[4]相同频率和测量场景的离体信道时域自回归模型, 可以表征该场景信道的时域冲激响应。文献[6-7]研究了矿井环境中的离体信道, 实验结果表明路径损耗和均方根(RMS, root mean square)时延扩展随着收发天线间距离的增加而增加, 相干带宽和信道容量的变化规律与之相反。文献[8]测量并计算了 5 个不同天线佩戴位置(耳朵、胸部、腰部、手腕和脚踝)的路径损耗和阴影效应的统计特性。文献[9]提出在不同人员密度下适用于 3 种典型室内环境(走廊、楼梯和会议室)的路径损耗模型。文献[10]将平均路径损耗建模为 4 个分量之和, 取决于路径长度、天线方向角、发射和接收天线高度差, 证明广义加性模型用来表征平均路径损耗的有效性。文献[11]考虑不同身体姿势、不同运动状态、不同天线佩戴位置以及视距(LOS, line of sight)/准非视距(QLOS, quasi

non line of sight)/非视距(NLOS, non line of sight)等多种情况, 较为全面地研究包含人体遮挡因子的路径损耗模型。综上, 当前离体信道研究的重点是: 针对不同的场景与频段, 研究人体位置、人体姿势以及天线佩戴位置给信道特性带来的影响, 并对信道特性参数进行实际测量与数学建模。

然而, 当前在对室内离体信道的研究中, 测量场景不丰富导致信道模型不具备代表性, 建模方式不合理导致信道模型不够精确, 以及缺少对离体信道小尺度衰落的研究。因此, 在大尺度衰落方面, 需要建立多个室内典型场景的路径损耗模型, 并联合考虑路径长度、天线方向角以及收发天线高度差影响; 在小尺度衰落方面, 需要对 RMS 时延扩展进行更加深入的研究, 探究人体特性对多径衰落产生的影响。

因此, 本文根据 IEEE 802.15.6 协议拟定的体域网使用频段(3.1~10.6 GHz)<sup>[12]</sup>, 针对办公室、会议室以及长廊等室内典型场景, 在 9.5~10.5 GHz 频段对离体信道进行测量, 获得了大量的频域幅相测量数据。基于实测数据, 建立更加全面、精确的路径损耗模型, 其包含收发端距离与人体旋转角度对离体信道的路径损耗的联合影响; 同时通过将路径损耗作为中间变量, 获得收发端距离与旋转角度联合相关的 RMS 时延扩展模型。本文所提出的新型信道模型可用于设计物联网环境中 BAN 的离体链路, 其应用可以在室内的特定场景, 如医疗信息传送、老人活动监测、室内人员位置确定, 为未来室内无线通信的研究与设计提供理论与实践基础。

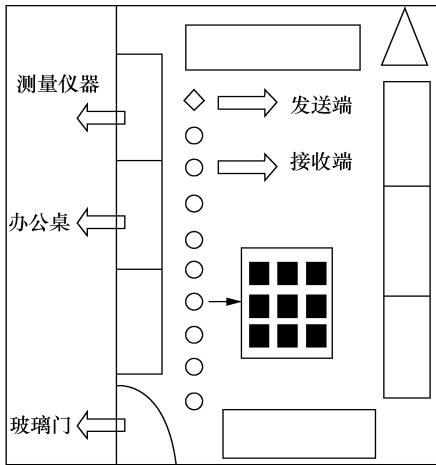
## 1 数据采集方法

数据采集的实测场景如图 1 所示, 实测场景与网格点示意图如图 2 所示, 测量地点在南京邮电大学物联网楼第 5 层的办公室(7.0 m×8.0 m×3.0 m)、会议室(20.0 m×8.1 m×3.0 m)和走廊(10 m×2.6 m×3.0 m)。室内的物体包括办公桌、试验台、计算机、立式空调以及储物柜, 墙体两面为混凝土材质, 两面为玻璃材质。

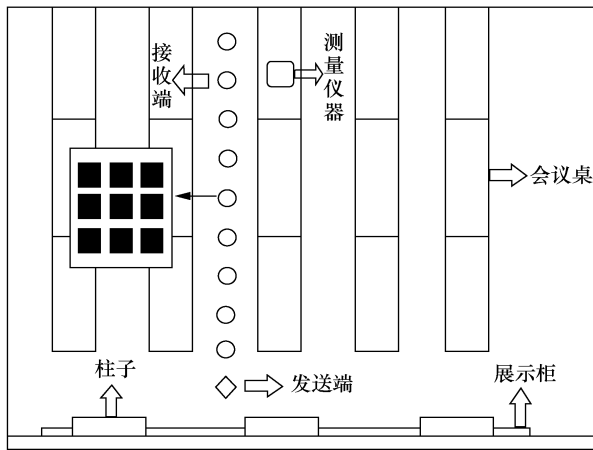
在实际测量时, 发射天线固定在三脚架上水平放置(高度为 1 m), 将接收天线佩戴在人体待测量的部位, 并且在预先设定好的测量点之间移动。在办公室和会议室场景中, 待测距离为 1~5 m, 每隔 0.5 m 放置一个测量接收点; 在长廊场景中, 待测距离为 1~10 m, 每隔 1 m 设置测量接收点。在每个接



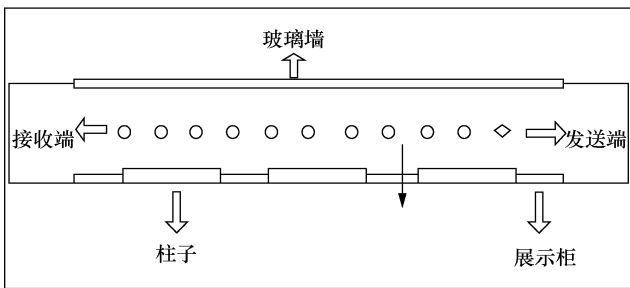
图 1 数据采集的实测场景



(a) 办公室场景示意图



(b) 会议室场景示意图



(c) 长廊场景示意图

图 2 实测场景与网格点示意图

收点设置 9 个测量网格点, 分布在  $20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$  放置一个测量接收点; 在长廊场景中待测距离从  $1 \sim 10\text{ m}$ , 每隔  $1\text{ m}$  设置测量接收点。在每个接收点设置 9 个测量网格点, 分布在  $20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$  的网格中, 间距为  $10\text{ cm}$ , 该间隔大于所研究的中心频率为  $10\text{ GHz}$  的电磁波的波长。另外, 在每个距离点进行顺时针人体旋转角度为  $0 \sim 2\pi$  的重复测量, 每次旋转角度增加  $\pi/4$ 。

本文使用频域的信道测量方法, 测量系统以是德科技公司的矢量网络分析仪 (VNA, vector network analyzer) 作为信道数据采集设备, 还包括两个全向的贴片天线、两根分别长  $5\text{ m}$  和  $10\text{ m}$  的低损耗同轴电缆, 本文使用的贴片天线物理尺寸为  $3\text{ cm} \times 3\text{ cm}$ , 因本文研究的最小距离  $1\text{ m}$  远远大于瑞利距离  $R = 2A_e^2 / \lambda$  (其中,  $A_e$  为天线物理尺寸,  $\lambda$  为电磁波的波长), 因此不存在近场效应的影响<sup>[13]</sup>。室内离体信道测量系统的基本参数见表 1。

VNA 可以测量无线信道的 S 参数,  $S_{21}$  参数是某个频点上的信道传递函数, 其通过逐步扫描待测量频段, 可以得到该频段上道频率响应, 然后存储在计算机中, 通过对频域响应加窗 (汉宁窗) 处理后, 再进行离散傅里叶反变换可以获得信道的冲激响应, VNA 频域测量法系统框图如图 3 所示。为了减少 VNA 本身对测量结果的影响, 在进行信道测量前需要进行 SOLT 校准, 该校准方法可以在信道测量过程中, 通过补偿 VNA 自身的无用频率响应, 使测得的  $S_{21}$  参数为所需要的无线信道的频率响应<sup>[14]</sup>。

表 1 室内离体信道测量系统的基本参数

设备		参数	
VNA	型号	N5222B	
	发送功率	15 dBm	
	测量频段	9.5~10.5 GHz	
	测量带宽	1 GHz	
	扫频点数	801	
天线	发送端	类型	增益
	接收端	全向单极天线	5 dBi
电缆	发送端	类型	增益
	接收端	全向单极天线	5 dBi
	发送端	损耗	长度
	接收端	0.6dB/m	5 m
电缆	发送端	损耗	长度
	接收端	0.6dB/m	10 m

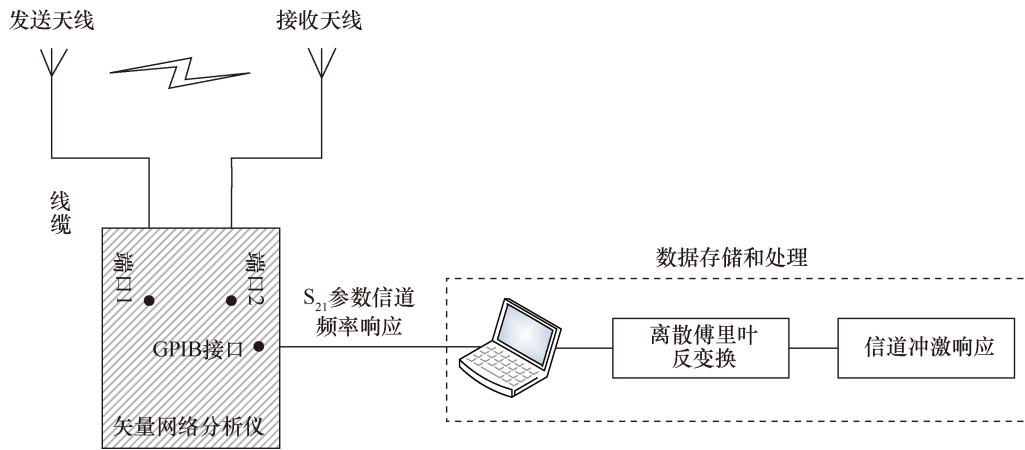


图3 VNA 频域测量法系统框图

本文主要选取办公室、会议室与长廊3个典型物联网室内场景进行测量，在实际测量过程中，人体佩戴接收天线在预先设定好的测量点之间移动，并且在每个距离点进行人体旋转，研究人体旋转产生的遮挡、移动造成的收发端距离的变化，对离体信道传输特性（大尺度衰落：路径损耗、阴影效应；小尺度衰落：RMS时延扩展、多径效应）产生的影响。

## 2 大尺度衰落模型

无线信道的大尺度衰落主要包括路径损耗与阴影效应，主要用于描述接收信号受到传输环境中的遮挡物、建筑结构与材料以及地形等因素的影响，是通信工程应用中描述信道特性的最重要的参数之一<sup>[15]</sup>。本文通过大量的室内离体信道测量实验，获得 9.5~10.5 GHz 频段的信道复频率响应  $H(d, \theta, f_i, s_j)$ ，其中  $d$  表示收发端距离， $\theta$  表示人体旋转角度， $f_i (i=1, 2, 3, \dots, F, F=801)$  表示测量的扫频频点， $s_j (j=1, 2, 3, \dots, S, S=9)$  表示各个测量的网格点，因此本文通过式(1)计算该频段的平均路径损耗值。

$$PL(d, \theta) = -10 \lg \left[ \frac{1}{FS} \sum_j^S \sum_i^F |H(d, \theta, f_i, s_j)|^2 \right] \quad (1)$$

### 2.1 LOS 场景 FI 路径损耗模型

无线信道的路径损耗模型决定了通信系统的覆盖范围，所以本文首先对室内离体信道的路径损耗进行测量与建模。现有 WINNER II 和 3GPP 标准信道模型中的浮动截距 (FI, floating intercept) 路损模型<sup>[16]</sup>、基于 Friis 传输理论的近距离参考 (CI, Close-In) 路损模型<sup>[17]</sup>两种主流路径损耗模型。本文人体手持接收天线居于腹部，接收天线正对着

发射天线 ( $\theta=0$ ) 并且收发端天线高度相同 ( $h=1\text{ m}$ )，将其视作 LOS 场景，本文采用 FI 模型作为 LOS 场景下的对数距离路径损耗模型。

$$PL(d) = \beta + 10n \lg \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma \quad (2)$$

其中， $\beta$  是浮动截距，单位 dB； $n$  是路径损耗指数 (PLE, path loss exponent)，体现路径损耗随距离的增长速率； $d_0 = 1\text{ m}$  为选取参考距离点； $X_\sigma$  是阴影因子 (SF, shadow factor)，表示距离相关的平均路径损耗的信号波动特性，其标准差也可体现路损模型的拟合效果。

FI 模型中斜率  $n$  值和浮动截距  $\beta$  是最小均方差 (MMSE, minimum mean squared error) 条件下的最佳拟合值。FI 路径损耗模型的相关参数见表 2。典型室内场景 FI 路损模型如图 4 所示，在 LOS 场景下，图 4(a)给出拟合的办公室场景的 FI 路径损耗模型曲线，图 4(b)给出办公室、会议室以及长廊场景的 FI 路径损耗模型曲线对比，为突出路径损耗值与距离  $d$  的关系，在图 4 中将距离  $d$  作为横坐标的标注，因而呈现不等距情况。

表2 FI 路径损耗模型的相关参数

实际测量场景	路损指数 $n$	浮动截距 $\beta/\text{dB}$	
办公室	2.17	46.65	
手持于腹部	会议室	1.97	46.89
长廊	1.64	47.04	

研究表明，通常室内 LOS 场景下的 FI 模型的路径损耗指数  $n$  略小于理论自由空间传播指数 ( $n=2$ )，该规律在本文中的长廊场景下有很好体现，

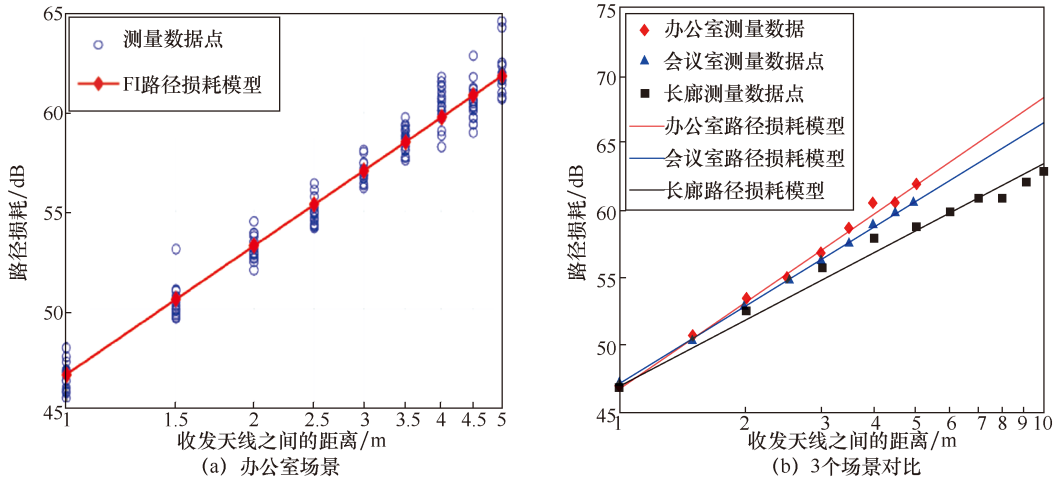


图 4 典型室内场景 FI 路损模型

这可能是室内环境发生波导效应产生的结果，并且文献[18-20]也给出了相似的测量结果；但是在办公室场景中，FI 模型的路径损耗指数略微大于理论上的自由空间传播指数 ( $n=2$ )，这是由于在本文选取的办公室场景中，电磁波的传播受室内环境的波导效应影响较小，并且测量环境周围存在大量的办公桌、金属设备以及其他物体，这都会增加无线电波在传输过程中的衰减。

### 2.2 距离角度联合路径损耗模型

本文在传统的 FI 路径损耗模型基础上，针对接收端人体旋转时，由人体遮挡对路径损耗特性造成的影响，首先引入了包含人体遮挡因子的传统加性路径损耗模型

$$PL(d, \theta) = \beta + 10n \lg \left( \frac{d}{d_0} \right) + \varphi(\theta) + X_\sigma \quad (3)$$

其中， $\varphi(\theta)$  表示与接收端旋转角度相关的人体遮挡因子，通过式(2)和式(3)

$$\varphi(\theta) = PL(d, \theta) - PL(d) \quad (4)$$

首先本文不失一般性地选取距离 3 m 作为人体遮挡因子的研究测量点，即  $\varphi(\theta) = PL(d_{3m}, \theta) - PL(d_{3m})$ ，对接收端旋转过程中由人体遮挡造成的路径损耗进行分析，发现在办公室场景下  $\varphi(\theta)$  与旋转角度  $\theta$  呈三角函数关系，如图 5(a)所示，使用最小二乘法 (LS, least squares) 拟合曲线可以表示为  $\varphi(\theta) = a \sin \left( \frac{\theta}{2} \right)$ ，其中  $\theta$  为人体旋转角度，范围区间为  $[0, 2\pi]$ ； $a$  为拟合的遮挡系数，当距离

$d = 3 \text{ m}$  时， $a = 14.59$ 。同理，根据上述方法对距离点  $d = (1 \text{ m}, 1.5 \text{ m}, 2 \text{ m}, \dots, 5 \text{ m})$  逐个做拟合，不同距离的人体遮挡因子与旋转角度关系如图 5 所示，可以看出，图 5(b)均呈现相同三角函数关系，同时在会议室和长廊场景的测量中发现相同规律，典型室内场景各距离点的拟合遮挡因子系数见表 3。

表 3 典型室内场景各距离点的拟合遮挡因子系数

距离 d/m	办公室	会议室	距离 d/m	长廊
1.0	20.36	14.70	1.0	15.86
1.5	18.21	11.85	2.0	11.37
2.0	16.77	11.69	3.0	10.16
2.5	15.68	10.70	4.0	9.63
3.0	14.59	8.88	5.0	8.03
3.5	14.12	8.53	6.0	7.33
4.0	11.99	7.69	7.0	6.71
4.5	11.58	6.60	8.0	6.05
5.0	10.63	5.41	9.0	5.21

研究表明，在拟合遮挡因子系数  $a$  的过程中， $a$  值随着收发端距离的增加而减小，因此，首先对办公室场景的距离与  $a$  值使用 LS 进行拟合，发现二者之间存在负指数函数关系，即  $a(d) = A \exp(-Bd)$ ，遮挡因子系数与距离拟合曲线如图 6 所示，拟合证明该表达在会议室与长廊场景中同样适用，典型室内场景遮挡因子系数相关参数见表 4。 $a(d)$  是关于距离  $d$  的递减函数，因此该表达式的物理意义在于当收发端距离较小时，人体遮挡造成的路径损耗值很大；当距离较大时，人体遮挡造成的路径损耗值变得很小。这是因为当距离增

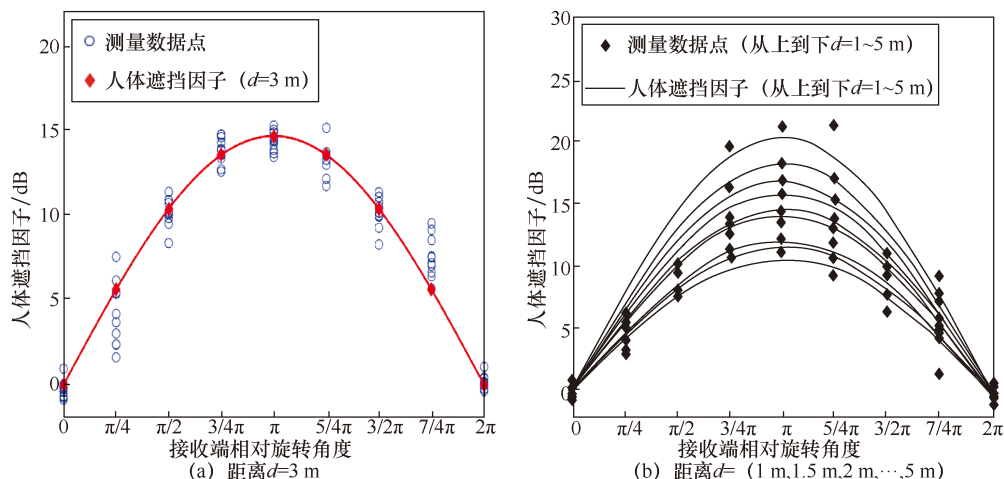


图5 不同距离的人体遮挡因子与旋转角度关系

大时，电波传输即使直射路径被人体遮挡，但是在传输过程中存在的非直射路径增多，电波的衰减也就逐渐减小。同时说明本文重点在于研究室内短距离的路径损耗，因此收发天线距离取极大的特殊情况并非在本文建模场景之内。

式修正为  $\varphi(d, \theta) = A \exp(-Bd) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$ ，因此本文提出包含人体遮挡因子的新型路径损耗模型为

$$PL(d, \theta) = \beta + 10n \lg\left(\frac{d}{d_0}\right) + A \exp(-Bd) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) + X_\sigma \quad (4)$$

在该模型中，路径损耗值  $PL(d, \theta)$  由收发端距离  $d$  与接收端人体旋转角度  $\theta$  共同决定，新型路径损耗模型拟合曲面图如图7所示，可以凸显本文新型路径损耗模型并非传统的广义加性模型，而是由距离与角度共同影响下的联合模型。

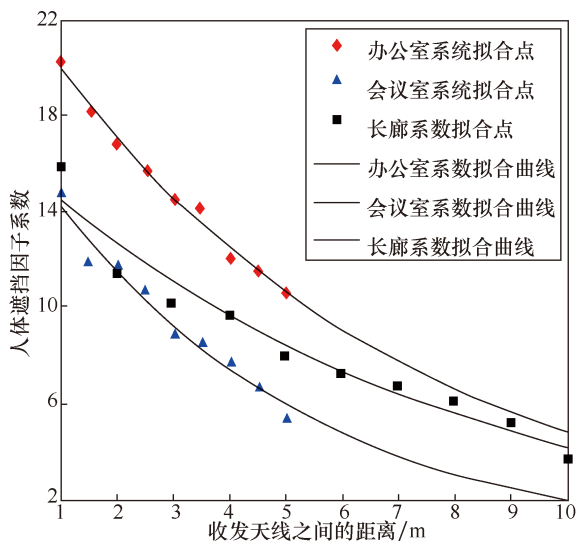


图6 遮挡因子系数与距离拟合曲线

表4 典型室内场景遮挡因子系数相关参数

参数	办公室	会议室	长廊
$A$	23.44	17.84	16.65
$B$	0.16	0.22	0.14

综上所述，与接收端人体旋转角度相关的遮挡因子并非只与旋转角度相关，还与收发端距离相关，因此需要将传统加性模型中  $\varphi(\theta) = a \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$  表

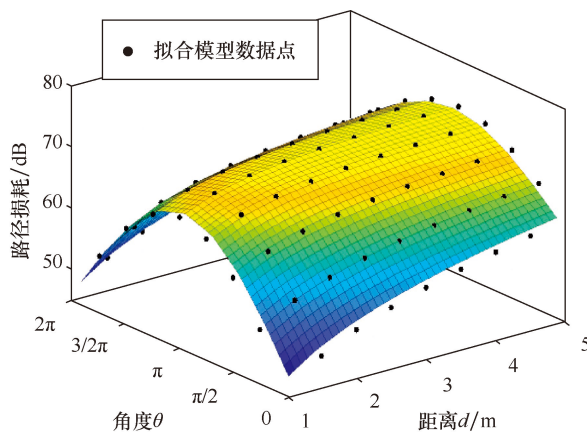


图7 新型路径损耗模型拟合曲面图

### 2.3 新型模型的阴影效应

本文根据提出的新型模型  $\varphi(\theta)$  与实际测量的数据，在办公室场景下进行数据拟合，办公室场景  $X_\sigma$  累积概率函数对比如图8所示，可知  $X_\sigma$  是均值约为0的正态分布，但是前者的标准差明显小于后者，这是因为本文新型路径损耗模型包含更多细节

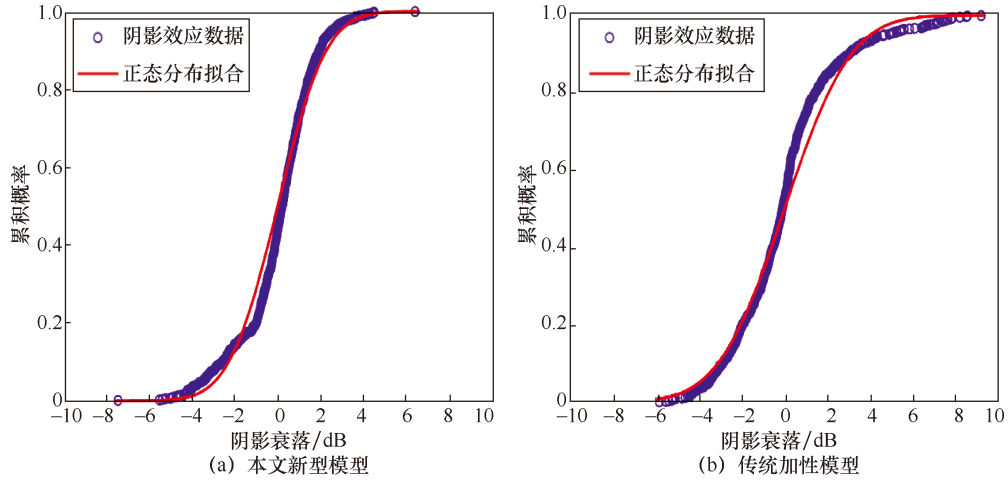


图 8 办公室场景  $X_\sigma$  累积概率函数对比

环境信息，即不同收发端距离和旋转角度下的人体遮挡因子，从而提高模型的精确性，也降低阴影效应的不确定性。

典型室内场景阴影正态分布参数见表 5，在其他场景下本文模型的标准差也远小于传统模型标准差，说明新型模型具有更高的精确性，同时，天线佩戴在不同人体部位新型模型相关参数见表 6，阴影衰落标准差均在可接受范围内，进一步证明本文模型对室内离体信道的路径损耗特性建模的适用性。

表 5 典型室内场景阴影正态分布参数

场景	本文新型模型		传统加性模型	
	$X_\sigma$ 均值	$X_\sigma$ 标准差	$X_\sigma$ 均值	$X_\sigma$ 标准差
办公室	0.003	1.77	0.002	2.42
会议室	0.02	1.26	0	2.94
长廊	0.002	1.58	-0.07	3.34

### 3 小尺度衰落模型

信号到达接收端的传播环境复杂，可能经过反

射、折射和散射等多种方式到达接收端，从而产生信号的多径衰落。经过不同路径的信号到达接收端存在一定的时间差，这就导致了接收信号呈现脉冲宽度扩展的现象，这种现象被称为时延扩展<sup>[21]</sup>。一般用平均附加时延  $\bar{\tau}$  和 RMS 时延扩展  $\tau_{\text{RMS}}$  表征时延扩展，由功率时延谱 (PDP, power delay profile) 处理获得如下两个参数<sup>[22]</sup>。

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_k P(\tau_k) \tau_k}{\sum_k P(\tau_k)} \quad (5)$$

$$\tau_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum_k P(\tau_k) \tau_k^2}{\sum_k P(\tau_k)} - (\bar{\tau})^2} \quad (6)$$

其中， $P(\tau_k)$  表示第  $k$  个可分辨时延对应路径的功率。

#### 3.1 路径损耗相关的 RMS 时延扩展模型

RMS 时延扩展是功率延迟分布的二阶矩的平方根，可以用来衡量信道多径衰落的程度<sup>[23]</sup>。本文

表 6 天线佩戴在不同人体部位新型模型相关参数

人体部位	路损指数 $n$	浮动截距 $\beta/\text{dB}$	人体遮挡因子 $\varphi(d, \theta)$	$X_\sigma$ 均值	$X_\sigma$ 标准差
腹部	2.17	46.65	$23.44 \exp(-0.16d) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$	0.003	1.77
臀部	1.44	50.36	$16.47 \exp(-0.03d) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$	-0.01	1.97
耳部	1.10	52.51	$11.30 \exp(-0.02d) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$	0.07	2.33

根据各测量点的功率时延谱计算对应的 RMS 时延扩展  $\tau_{\text{RMS}}$ ，根据不同距离点与旋转角度对应的  $\tau_{\text{RMS}}$  值，RMS 时延扩展实测数据散点图如图 9 所示。可以看出，RMS 时延扩展与收发端距离、人体旋转角度均相关，并且可直观发现，图 7 与图 9 呈现相似的变化趋势，因此不妨假设 RMS 时延扩展与路径损耗之间存在一定的相关性，文献[24-25]研究并证明二者存在相关性。

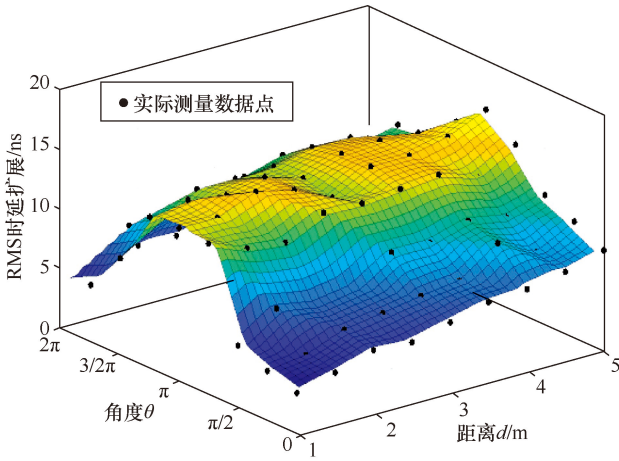
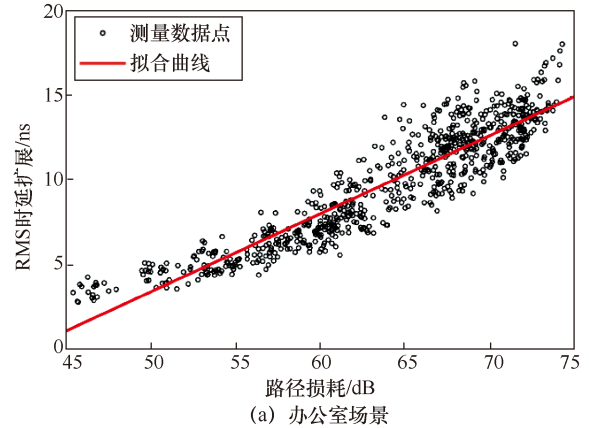


图 9 RMS 时延扩展实测数据散点图

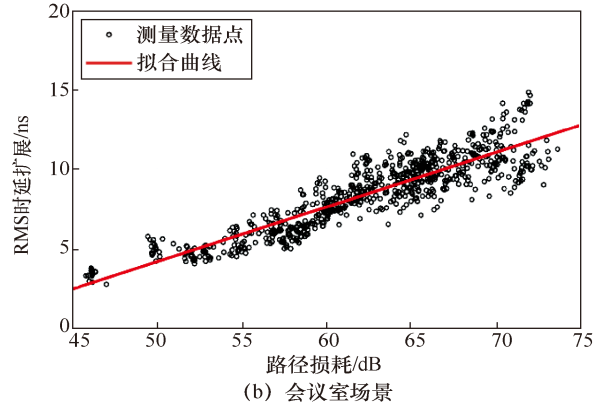
为证实上述假设，本文首先对 3 个典型室内场景下离体信道的路径损耗和 RMS 时延扩展之间的相关性进行分析，计算二者之间的相关系数。RMS 时延扩展和路径损耗之间关系模型的相关参数见表 7，在办公室、会议室与长廊场景下，路径损耗与 RMS 时延扩展的相关系数均不小于 0.9，说明二者之间存在很强的线性相关性。根据以上分析，本文将 RMS 时延扩展建模为路径损耗的线性函数，RMS 时延扩展与路径损耗的散点拟合曲线图如图 10 所示，可以看出，散点值分布在拟合直线的两侧，这可能是小尺度范围的无线电波的反射、绕射以及散射传播情况不同造成，本文参考阴影衰落的建模方法，将实测数据值与拟合曲线间的差值建模为随机变量  $T_\sigma$ ，办公室场景下累积概率函数如图 11 所示，办公室场景的随机变量  $T_\sigma$  服从均值约为 0 的正态分布，会议室与长廊场景呈现相同的分布规律。综上分析，本文把 RMS 时延扩展和路径损耗之间的关系建模为

$$\tau_{\text{RMS}} = k\text{PL}(d, \theta) + t + T_\sigma \quad (7)$$

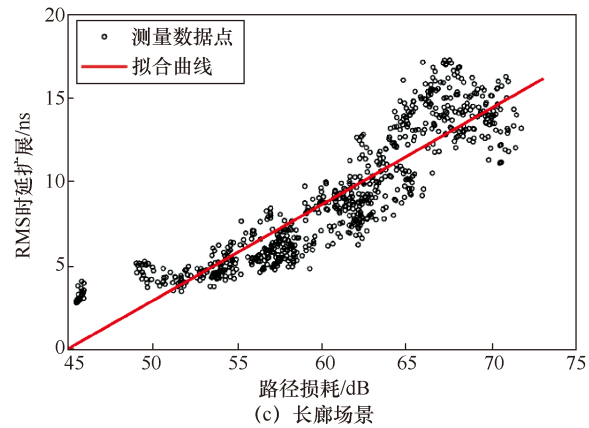
其中， $k$  和  $t$  是拟合曲线的斜率与截距，以及随机变量  $T_\sigma$  的均值与标准差详见表 7。



(a) 办公室场景



(b) 会议室场景



(c) 长廊场景

图 10 RMS 时延扩展与路径损耗的散点拟合曲线图

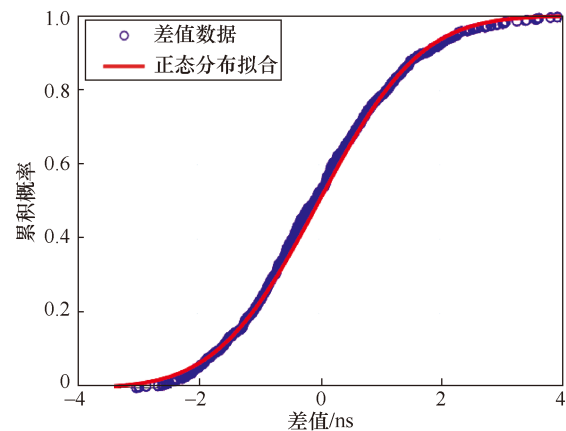


图 11 办公室场景  $T_\sigma$  累积概率函数

表 7 RMS 时延扩展和路径损耗之间关系模型的相关参数

场景	相关系数	斜率 $k$	截距 $t/\text{ns}$	$T_\sigma$ 均值	$T_\sigma$ 标准差
办公室	0.92	0.46	-19.67	0.003	1.32
会议室	0.90	0.34	-12.78	-0.001	1.02
长廊	0.90	0.57	-25.63	-0.007	1.56

### 3.2 距离角度联合 RMS 时延扩展模型

为进一步研究室内典型场景下离体信道的 RMS 时延扩展与收发端距离和人体旋转角度的关系，本文以路径损耗作为中间变量，对上述的路径损耗相关的 RMS 时延扩展模型进行如下处理，获得距离角度联合相关的 RMS 时延扩展模型

$$\tau_{\text{RMS}} = k \left( \beta + 10n \lg \left( \frac{d}{d_0} \right) + A \exp(-Bd) \sin \left( \frac{\theta}{2} \right) + X_\sigma \right) + t + T_\sigma = 10N_k \lg \left( \frac{d}{d_0} \right) + A_k \exp(-Bd) \sin \left( \frac{\theta}{2} \right) + T_k + X_k \quad (8)$$

其中， $N_k = kn$ ， $A_k = kA$ ， $T_k = k\beta + t$  均为常数， $X_k = kX_\sigma + T_\sigma$  是符合均值为 0 正态分布的随机变量，RMS 时延扩展和距离角度联合模型的相关参数见表 8。因为  $X_k$  是实测数据值与拟合曲线间的差值，所以其标准差也反映了 RMS 时延扩展和距离角度联合模型的精确性，同时该模型的精确性也与上文作为中间变量的路径损耗建模精确性相关，结果表明  $X_k$  的标准差均小于 3，说明本文模型具有较高的精确性。新型 RMS 时延扩展模型拟合曲面图如图 12 所示，能够很好地反映 RMS 时延扩展随收发端天线距离和人体旋转角度变化的特性，同时证明收发端距离越大，多径衰落越严重，人体旋转产生的遮挡因子越大，多径衰落也越严重。

表 8 RMS 时延扩展和距离角度联合模型的相关参数

场景	$N_k$	$A_k$	$B$	$T_k$	$X_k$ 均值	$X_k$ 标准差
办公室	1.00	10.87	-0.16	1.79	0.004	2.26
会议室	0.67	6.07	-0.22	3.16	0.003	1.17
长廊	0.93	9.50	-0.14	1.18	-0.002	2.84

## 4 结束语

本文针对 9.5~10.5 GHz 频段多个典型室内场景，进行基于大量实测数据的离体信道建模，并获得与收发端距离与人体旋转角度联合相关的新型路径损耗模型与阴影效应的统计特性。通过发现路径损耗

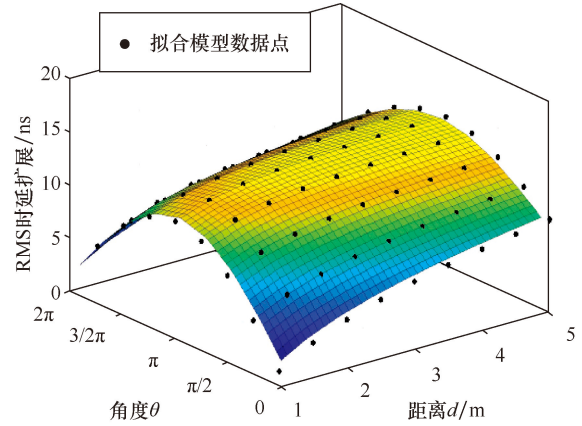


图 12 新型 RMS 时延扩展模型拟合曲面图

与 RMS 时延扩展的线性相关性，获得收发端距离与人体旋转角度联合相关的 RMS 时延扩展模型，证明收发端天线距离以及人体旋转产生的遮挡因子越大，路径损耗和多径衰落也越严重。本文所提出的模型可用于物联网环境中 BAN 的离体链路设计，对未来室内无线通信系统的设计具有重要的参考价值。

### 参考文献:

- [1] ABBASI Q H, KHAN M M, ALOMAINY A, et al. Sectorised radio channel characterisation for ultra wideband body-centric wireless communications[C]//Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP). Piscataway: IEEE Press, 2011: 191-195.
- [2] COTTON S L, D'ERRICO R, OESTGES C. A review of radio channel models for body centric communications[J]. Radio Science, 2014, 49(6): 371-388.
- [3] ROSINI R, D'ERRICO R. Off-Body channel modelling at 2.45 GHz for two different antennas[C]//Proceedings of 2012 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP). Piscataway: IEEE Press, 2012: 3378-3382.
- [4] 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[J]. IEEE Access, 2017, 5: 10915-10923.
- [5] YU Y, CUI P F, LU W J, et al. Off-body radio channel impulse response model under hospital environment: measurement and modeling[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(11): 2332-2335.
- [6] EL AZHARIM, NEDILM, ALJY S, et al. Off-body LOS and NLOS channel characterization in a mine environment[C]//2015 IEEE International Conference on Ubiquitous Wireless Broadband. Piscataway: IEEE Press, 2015: 114-118.
- [7] EL AZHARI M, NEDIL M, BEN MABROUK I, et al. Characterization of a NLOS off-body channel at 2.45 GHz using patch antenna inside a mine[C]//Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Ubiquitous Wireless Broadband. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-5.
- [8] 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.
- [9] SHE J, YANG B, LIU J, et al. Characterization of 2.6GHz wireless channel in meeting room scenario using reverberation theory[C]//Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Ubiquitous

- Wireless Broadband. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-4.
- [10] LASKOWSKI M, AMBROZIAK S J, CORREIA L M, et al. On the usefulness of the generalised additive model for mean path loss estimation in body area networks[J]. IEEE Access, 2020, 8: 176873-176882.
- [11] KHAN M M, ALOMAINY A, HAO Y. Off-body radio channel characterisation using ultra wideband wireless tags[C]//Proceedings of 2010 International Conference on Body Sensor Networks. Piscataway: IEEE Press, 2010: 80-83.
- [12] IEEE. IEEE Standard for local and metropolitan area networks - Part 15.6: wireless body Area networks: IEEE Std 802.15.6-2012[S]. 2012.
- [13] 吕文俊, 何华斌. 简明天线理论与设计应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014.
- LU W J, HE H B. Concise antenna theory and design application[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2014.
- [14] 刘娜. 室内办公环境下短距离无线信道传播特性研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2019.
- LIU N. Research on short-range wireless channel propagation characteristics in indoor office environment[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2019.
- [15] ZHU J, WANG H, HONG W, et al. Large-scale fading characteristics of indoor channel at 45-GHz band[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2014, 14: 735-738.
- [16] ROH W, SEOL J Y, PARK J, et al. Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5G cellular communications: theoretical feasibility and prototype results[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(2): 106-113.
- [17] HANEDA K, TIAN L, ASPLUND H, et al. Indoor 5G 3GPP-like channel models for office and shopping mall environments[C]//Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Communications Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2016: 694-699.
- [18] 谢利娟, 孙君, 许晖, 等. 基于计算机技术的 15GHz 频段下信道测量与分析[J]. 计算机技术与发展, 2016, 26(6): 191-194.
- XIE L J, SUN J, XU H, et al. Measurement and analysis of channel characteristics in 15 GHz based on computer technology[J]. Computer Technology and Development, 2016, 26(6): 191-194.
- [19] WANG Z, DU F, FU Z, et al. Millimeter wave channel characterization for a large waiting hall by measurements and simulations[C]//2018 24th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC). IEEE, 2018: 320-324.
- [20] SALOS S, EL-FAITORI S. Path loss models and delay spread parameters for the millimetre wave channel in indoor environments[C]//2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). IEEE, 2020: 1-3.
- [21] 刘加欢, 杨丽花, 张捷, 等. 室内办公室场景 10GHz 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.
- [22] 吴志忠. 移动通信无线电波传播[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2002.
- WU Z Z. Mobile communication radio wave propagation[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2002.
- [23] 崔鹏飞. 无线离体信道传播特性和稀疏化建模的研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2019.
- CUI P F. Research on wireless off-body channel propagation charac-

teristics and sparse modeling[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2019.

- [24] YU Y, LIU Y, LU W J, et al. Measurement and empirical modelling of root mean square delay spread in indoor femtocells scenarios[J]. Iet Communications, 2017, 11(13): 2125-2131.

- [25] 余雨. 小蜂窝场景中室内短距离无线信道传播特性研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2017.

YU Y. Researches on shortrange wireless channel propagation characteristics in indoor environments for small cell scenarios[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2017.

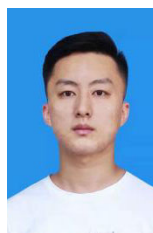
#### [作者简介]



黄山虎 (1996- ), 男, 南京邮电大学通信与信息工程学院硕士生, 主要研究方向为物联网体域网、信道测量建模。



孙君 (1980- ), 女, 博士, 南京邮电大学副研究员, 主要研究方向为无线网络、无线资源管理和物联网。



常浩飞 (1996- ), 男, 南京邮电大学通信与信息工程学院硕士生, 主要研究方向为无线网络、无线信道测量。



吕文俊 (1978- ), 男, 博士, 南京邮电大学教授, 主要研究方向为天线理论与设计、无线信道测量与建模。



杨钦 (1996- ), 男, 南京邮电大学通信与信息工程学院硕士生, 主要研究方向为无线传播、无线信道建模。