

11 GHz 室内场景中具有人体遮挡的无线传播特性研究^①

马嘉文^② 杨丽花^③ 吕文俊 薛寒 魏苏皖

(南京邮电大学通信与信息学院 江苏省无线通信重点实验室 南京 210003)

摘要 本文对 11 GHz 频段下室内场景的无线传播特性进行了研究,并特别考虑了收发天线高度差和人体遮挡效应对信号传播的影响。基于实测数据,构建了一种具有高度差和人体遮挡双因子影响的路径损耗(path loss, PL)模型,并在小型室内办公、走廊和大型实验室等多种不同场景下对其进行了验证。研究表明,在无人体遮挡时,路径损耗随高度差的变化服从二次函数分布。在不同高度差时,人体遮挡对无线传播特性的影响不同,即当发送端的高度在人体身高以下至臀部位置时,人体遮挡引起的路径损耗与其距离发送端的距离可近似描述成二次函数关系;当发送端的高度高过人体,人体遮挡引起的路径损耗与其距离发送端的距离可近似描述成三次函数关系。本文研究结论可为室内体域网通信系统的设计奠定基础。

关键词 室内场景; 11 GHz; 路径损耗; 阴影效应; 高度差; 人体遮挡

近年来,随着数字通信技术的快速发展以及第 5 代通信技术的不断深入与普及,更多不同的设备接入互联网中,导致数据流量呈指数型增长。此外,物联网、自动驾驶、虚拟现实等新型业务的出现对数字通信技术也提出了更高的要求,使得现在 6 GHz 及以下的频谱资源越来越紧张,已经无法满足未来新型业务和海量设备接入的需求。为了解决未来数据业务需求的迅猛增长与通信容量有限之间的矛盾,需要开拓并利用更高频谱资源^[1-3],而为了更好地利用更高频段资源,对于其传播特性的研究必不可少。

当今很多社会活动和工作都在室内进行,如居家办公、室内办公已经成为主流,而不同室内的空间大小、复杂多变的环境布局,以及人体/障碍物的遮挡等不同因素都会影响无线信道的传播特性。因此,对更高频段室内场景的无线传播特性进行研究具有至关重要的意义^[4]。目前,国内外已有很多关于高频段室内场景的无线传播特性的研究,例如,文

献[5]深入探讨了 9~12 GHz 频段下室内办公场景中金属遮挡物对无线传播特性的影响。文献[6]对 10 GHz 频段下的室内办公环境的无线传播特性进行了分析,并针对视距与非视距 2 种不同场景分别构建了路径损耗(path loss, PL)模型。文献[7]针对 60 GHz 频段探讨了室内空间的大小对视距与非视距 2 种场景中无线传播特性的影响。文献[8]研究了中心频率为 11 GHz 的室内场景中人体对无线传播特性的影响,并给出了一个考虑人体影响的 PL 模型。文献[9]研究了毫米波频段下室内不同人体尺寸以及人体不同行走方向对无线传播特性的影响。文献[10]针对太赫兹室内场景,研究了视距与非视距 2 种场景的无线传播特性,并考虑发送角度和接收角度的影响。文献[11]对 28 GHz 频段下多种室内场景中的路径损耗衰减指数进行了详细的分析,并探讨了其与环境的关系。文献[12]针对 8~11 GHz 频段的室内场景,研究了不同极化方式对无线传播特性的影响。文献[13]关注于 15 GHz 频段

① 江苏省重点研发计划(BE2022067, BE2022067-1, BE2022067-2)资助项目。

② 男,2000 年生,硕士生;研究方向:无线信道的测量与建模;E-mail:1586721011@qq.com。

③ 通信作者,E-mail: yanglh@njupt.edu.cn。

(收稿日期:2024-11-20)

下的室内环境中收发天线之间的角度对 PL 的影响。文献[14]对 110 ~ 170 GHz 频段下室内办公场景进行了测量与研究,并提出了一种室内办公场景中具有不同障碍物影响的 PL 模型。

综上所述可以发现,学者们已对高频段室内场环境中影响无线传播特性的多种因素进行了研究,在这些研究中,人体的活动是一个不可忽视的因素,因为它会直接影响无线信号的传输效果,比如,人体的不同运动姿势、体型差异、行动方向以及所处位置等因素均会对无线传播特性产生影响^[15]。尽管先前的研究已经涵盖了许多影响无线传播特性的因素,但实际通信中,收发端之间的相对位置、相对高度的改变以及不同的应用场景,均会对无线传播特性产生不同的影响。因此,为了更好地理解高频段无线信号在室内环境中的传播机制,并进一步优化室内无线通信系统的性能,研究不同高度条件下人体遮挡对无线传播特性的影响显得尤为重要。

考虑高频段中 X 波段(8 ~ 12 GHz)被 IEEE 802.15.6 标准推荐为无线体域网体外通信的频段,为了深入地探究室内场景中存在收发端高度差时人体遮挡对无线传播特性的影响,本文针对中心频率为 11 GHz 的不同室内场景进行了研究。通过收集与分析大量的测量数据,本文详细地探讨了收发端间存在高度差时人体遮挡对无线传播特性的影响,并构建了一个具有高度差与人体遮挡影响的双因子 PL 模型。为了进一步验证研究结果的准确性,本文在小型办公室、楼内走廊以及大型实验室等多种不同场景进行了无线信道测量与分析研究。

1 信道测量场景、仪器及测量方法

1.1 测量场景

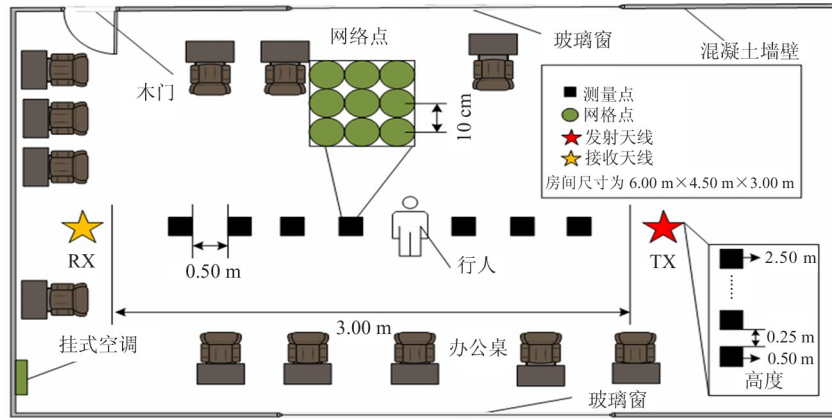
为了对比验证不同场景下的人体遮挡、收发端高度差变化对无线传播特性的影响,本文采用了某大学科研楼中的一间小型办公室(6.00 m × 4.50 m × 2.80 m)、楼内走廊(高 2.30 m、宽 1.50 m)以及一间大型实验室(10.00 m × 7.00 m × 4.00 m)来搭建测量场景,如图 1 所示。图 1(a)是小型室内办公场景的示意图,室内有若干桌子凳子、壁挂式空调等,地

板是木质地板,墙壁均为混凝土墙壁,南北两面都有玻璃窗。图 1(b)为楼内走廊场景的示意图,两面墙壁均为混凝土墙,地面材料是瓷砖,两侧有若干房间门。图 1(c)是大型实验室场景的示意图,室内两侧是办公桌椅,还有一些其他的实验设备等。在此,本文主要考虑单个行人在收发端间进行直线行走的情况,这样可以更好地探究无线信道被人体完全遮挡时的特性。

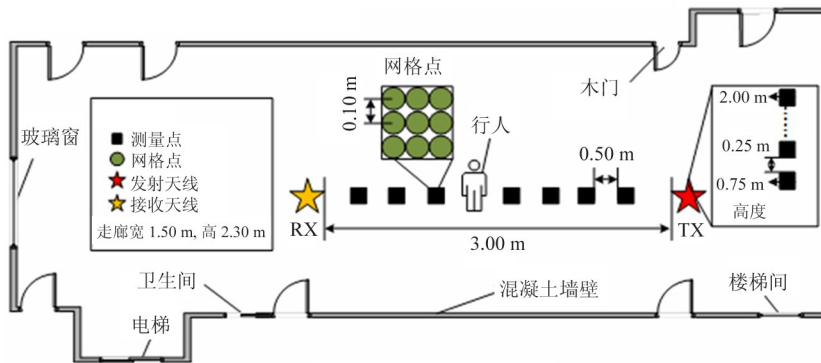
1.2 测量仪器与测量方法

本文使用的主要信道测量仪器是安捷伦生产的型号为 8720ES 的矢量网络分析仪(vector network analyzer, VNA)、2 根相同损耗的同轴电缆、校准器,以及 2 个全向天线等,其主要参数见表 1。在无线信道测量过程中,首先采用 VNA 来产生一个特定的发射信号,该信号具有 0 dBm 的功率,中心频率为 11 GHz,并且扫描了 1 601 个不同频率点的发射信号。然后发射信号经过同轴电缆传输,由发射天线辐射出去,在环境中传播并被接收天线捕获,最后接收信号通过同轴电缆送回 VNA。在整个测量过程中,接收到的信号被存储在笔记本电脑中,以便于后续的详细分析与处理。

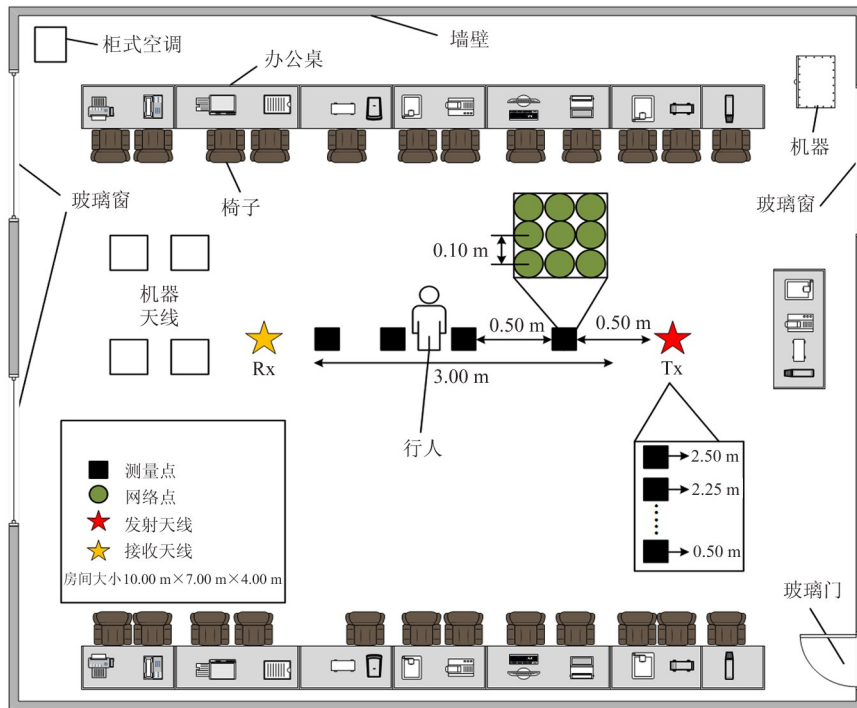
为了更好地探索人体遮挡与收发端高度差对 11 GHz 频段室内无线传播特性的影响,在实验中将考虑人体遮挡影响最大的情景,即收发端在同一直线上且中间只有人体遮挡。在实验开始,首先在无人遮挡的情况下,在收发端间距离为 3.00 m 且两者均置于距地面 1.00 m 米高的基准位置处,进行无线信道的测量实验,并将此作为后续分析的参照标准。在确定基准数据之后,引入人体遮挡的因素。实验中,选用的受测人体高度为 1.70 m,体宽大约 0.40 m。该人体按照预定的测量方案在特定的路线上移动,从紧贴发送端的位置(即距离为 0.00 m)开始,逐步移动到紧贴接收端的位置(即距离为 3.00 m)。在此测量过程中,受测人体始终保持面向发送端的姿势。在受测人体的移动路线上,每隔 0.50 m 设置一个测量点,共计 7 个测量点,每个测量点被进一步细分为 0.03 m × 0.03 m 的网格区域(如图 1 所示),以便于细致地进行数据采集和分析。



(a) 小型室内办公场景



(b) 楼内走廊场景



(c) 大型实验室场景

图1 信道测量场景的示意图

为了深入地分析高度差对无线传播特性的影响,本文设计了一系列实验来探究不同高度时的信

号传播情况。在小型室内办公场景中,首先将发送端的高度从0.50 m逐步调整至2.50 m,每次调整的

间隔为 0.25 m,在每个测量高度上均进行 9 次测量实验,以保证数据的样本数量,并且在数据分析时对数据进行平均处理以保证数据的准确性。在研究人体遮挡的测量中,在每个高度情况下,受测人体从发送端到接收端每隔 0.50 m 取一个测量点,在每个测量点上受测人体保持静止,且每个测量点划分为 9 个网格点,每个网格点分别进行 9 次测量实验以保证数据样本的数量,数据分析时对测量数据进行平均处理以保证数据的准确性。

表 1 信道测量设备的相关参数

相关设备	参数	
校准器	型号:罗德与施瓦兹 ZV-Z135	
天线	发送端:全向单极天线,增益为 5 dBi	
	接收端:全向单极天线,增益为 5 dBi	
电缆	发送端:损耗为 $0.6 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$,长度为 5.00 m	
	接收端:损耗为 $0.6 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$,长度为 5.00 m	
VNA	型号	8720ES
	测量频段	10 ~ 12 GHz
	测量带宽	2 GHz
	扫频点数	1 601
	发射功率	0 dBm
	最大时延	400.0 ns
	时延分辨率	0.5 ns

此外,为了使研究结果更具有普适性,实验不仅局限于小型室内办公环境,还扩展到了楼内走廊与大型实验室场景。在走廊环境中,发送端的高度变化范围有调整,从 0.75 m 变化至 2.00 m,同样每隔 0.25 m 进行一次测量。这样调整是为了更好地模拟实际的室内环境,因为走廊通常具有不同的结构和空间特征。在大型实验室场景中,本文将测量高度最高提高到了 3.00 m,并分析了测量高度 2.00 m 以上的无线传播特性。

2 具有人体遮挡与高度差影响的 PL 模型

2.1 所提 PL 模型

通常无障碍物影响的场景可视为自由空间场景,此时无线信道的 PL 模型是基于 Friis 传输理论的自由空间参考距离路损模型^[16] (close-in free

space reference distance path loss model),具体为

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (1)$$

式中: d_0 为参考距离,在此 $d_0 = 1.0 \text{ m}$; d 表示收发端间的距离; $PL(d_0)$ 是收发端距离为 d_0 时的 PL,单位为分贝 (dB); n 为路径损耗衰减指数; X_σ 为阴影衰落,它被用来描述信号在平均路径损耗上的波动情况,其服从标准差为 σ 和均值为 0 的高斯分布,其中标准差 σ 可以描述该 PL 模型的拟合度。

在实际通信场景中,收发两端往往存在高度差,而高度差的变化会对无线传播特性产生一定的影响,加之人体遮挡对无线传播特性的影响也会随着高度差的不同而产生变化。因此,本文提出一种具有高度差和人体遮挡影响的双因子 PL 模型,即

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

式中: PL_H 表示收发端高度差引起的 PL, PL_B 为人体遮挡引起的 PL。

2.2 PL_H 表达式

以小型室内办公场景为例,假设接收端高度保持 1.00 m 不变,且发送端与接收端相距 3.00 m,此时将发送端高度从 0.50 m 逐步调整至 2.50 m,则对应的收发端间高度差 Δh 则为 -0.50 m 至 1.50 m 。在此,将各个高度差下的 PL 测量值减去高度差为 0 时的 PL 测量值,则可以得到高度差引起的额外 PL 测量值(即 PL_H 的测量值)。通过采用不同的函数和最小二乘法对 PL_H 的测量值进行拟合发现, PL_H 与 Δh 的关系模型可以表示为

$$PL_H = a\Delta h^2 + b\Delta h + c \quad (3)$$

式中: Δh 是收发端间高度差; a 、 b 和 c 分别为模型的系数,这些系数会随着场景、收发端间距离等因素的不同而不同,故在实际应用中要根据具体的环境而定。

2.3 PL_B 表达式

在实际通信中,除了收发端间高度差会影响无线信道的传播特性,人体遮挡对无线信道的影响也不可忽视,为此本节将主要探索不同高度差时人体遮挡对 PL 的影响,即 PL_B 。以小型室内办公场景为例,假设高度差初始值为 -0.25 m (即发送端高度为

0.75 m,接收端高度为 1.00 m),收发端间的距离仍为 3.00 m。此种情况下,首先测量收发天线间无人体遮挡的 PL 值,然后用人体在收发天线间各个位置处测得的 PL 值减去无人体遮挡的 PL 值,从而可获得此种高度差时人体遮挡引起的 PL 的测量值(即 PL_B 的测量值)。然后,再改变高度差,重复上面操作,从而可以获取不同高度差下的 PL_B 的测量值。

通过采用不同的函数和最小二乘法对 PL_B 的测量数据进行拟合发现,在不同高度差下, PL_B 与人体遮挡的位置之间的函数关系是不同的,因此需要根据不同的高度差分别对 PL_B 进行建模,具体为

(1)当发送端的高度低于受测人体的身高时,也就是收发端间高度差约为 0.75 m 以下时, PL_B 可以被建模为

$$PL_B = mD^2 + nD + l \quad (4)$$

(2)当发送端高于受测人体的身高时,即收发端间高度差约为 0.75 m 以上时, PL_B 可以被建模为

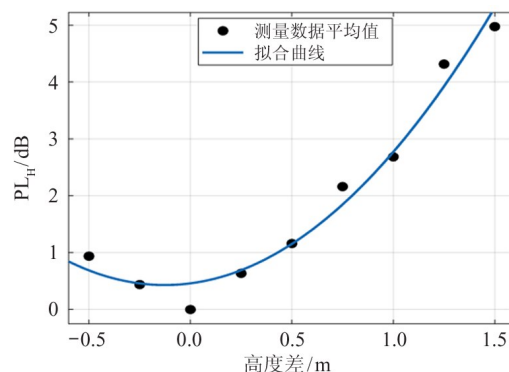
$$PL_B = mD^3 + nD^2 + pD + q \quad (5)$$

式中: D 是受测人体所在位置距发送端的距离;系数 m, n, l, p 和 q 均会随着高度差以及环境的变化而变化,故在实际应用中要根据具体的情景而定。

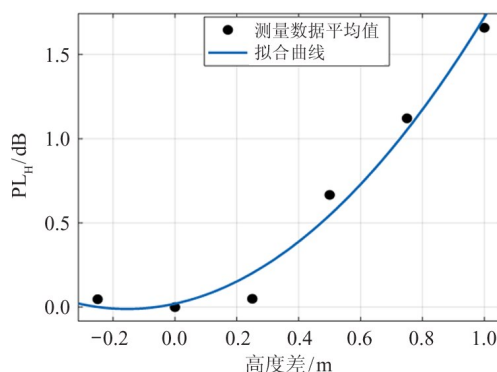
3 模型验证

3.1 PL_H 模型的验证

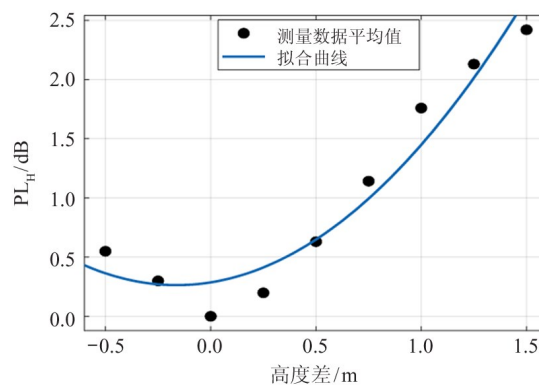
为了验证模型的准确性与普适性,首先给出不同场景下 PL_H 的测量值和拟合曲线,如图 2 所示。图 2 中,3 种场景中的收发端间距离均为 3.00 m,因为走廊条件有限,发送端高度由 0.75 m 变化到 2.00 m(对应的高度差范围为 $-0.25 \sim 1.00$ m)。从图 2 可以看出,不同收发端间高度差引起的 PL 是不同的,并且关于高度差为 0 m 呈对称趋势。通过对不同场景下的 PL_H 的测量数据采用多种数学函数与最小二乘法进行拟合发现二次函数的拟合效果最优,其表达式如式(3)所示,对应的系数如表 2 所示。此外,从图还可以看出走廊场景下的 PL_H 要小于 2 个室内场景下的 PL_H ,这是由于走廊狭窄,信号大都通过两侧墙壁和天花板等反射到接收端,从而减弱了收发端间高度差变化对 PL 带来的影响。



(a) 小型室内办公场景



(b) 走廊场景



(c) 大型实验室场景

图 2 不同场景下 PL_H 的测量值和拟合曲

表 2 不同场景下 PL_H 模型的系数

场景	a	b	c
小型室内办公场景	1.845 0	0.465 7	0.459 9
走廊场景	1.299 0	0.402 3	0.020 0
大型实验室场景	0.878 0	0.285 0	0.287 0

为了进一步验证模型的准确性,下面将对采用不同函数建模时的均方根误差(root mean square error, RMSE)进行比较分析。表 3 给出了 3 种场景下 PL_H 测量值分别采用不同函数进行拟合的 RMSE,

从表可以看出在3种场景下均是采用二次函数对 PL_H 测量值进行拟合时的RMSE最小,这也进一步说明本文提出采用二次函数对 PL_H 进行建模可以很好地反映实际信道的传播特性。

表3 PL_H 测量值采用不同函数拟合的 RMSE

场景	二次函数	一次函数	指数函数
小型室内办公场景	0.328 8	0.823 3	0.452 8
走廊场景	0.127 6	0.271 5	0.185 5
大型实验室场景	0.247 3	0.435 7	0.347 5

3.2 PL_B 模型的验证

图3给出了小型室内办公场景下不同收发端间高度差时人体遮挡引起的 PL_B 的实际测量值与拟合曲线。图中,“测量数据”是指多次测量数据的平均值。从图可以看出,在收发端间无高度差时(即收发端高度一样),随着受测人体在收发端间的移动,由受测人体遮挡引起的PL在收发端中间位置处最小,在靠近发/收端位置处最大,这主要是由于受测人体靠近收发端时人体对信号的遮挡影响最大,而在中间时大部分信号可以从人体周围通过散射、衍射等方式到达接收端,从而减弱了人体遮挡的影响,并且在高度差为 $-0.25 \sim 0.50$ m时 PL_B 的变化也是符合这一规律。然而,随着收发端高度差继续增大,可以发现受测人体距离发送端越近,人体遮挡的影响越小,而受测人体越靠近接收端,人体遮挡带来的

PL 越大,这是因为此时发送端的高度高于人体高度,在贴近发送端到一定距离以内,人体的影响不是很大,越靠近发送端影响越小,甚至可以忽略不计。当受测人体移动到收发端间中间位置时,发送的信号有的会被受测人体遮挡,当受测人体移动至距离接收端较近距离处时,大部分信号被受测人体遮挡,因此受测人体越靠近接收端 PL_B 越大。另外,随着高度差越来越大,发送端的高度也越来越高,受测人体遮挡的影响会变得越来越小。通过使用一次函数、二次函数、幂函数、指数函数以及各种复合函数对 PL_B 的测量数据进行拟合发现:当收发端间高度差不高于 0.75 m,即发端高度低于人体高度时,采用二次函数来拟合 PL_B 的测量值效果最佳,其表达式如式(4)所示,模型对应的系数的取值见表4;当收发端间高度差大于 0.75 m,即发端高度大于人体高度时,采用三次函数来拟合 PL_B 的测量值效果最佳,其表达式如式(5)所示,模型的相关系数见表4。值得一提的是,如果受测人体身高改变,则仅会影响分界点,而不会改变 PL_B 的变化规律;同样受测人体站立或者坐着的姿态也仅会影响高度差的分界点。

为了验证 PL_B 模型的准确性与普适性,进一步给出了走廊场景中不同收发端间高度差时人体遮挡引起的 PL_B 的实际测量值与拟合曲线,如图4所示。在测量中,考虑实际场景中走廊高度的限制,在此设置收发端间高度差最大为 1.00 m。从图4可以看出,在走廊场景中,存在高度差时人体遮挡引起的

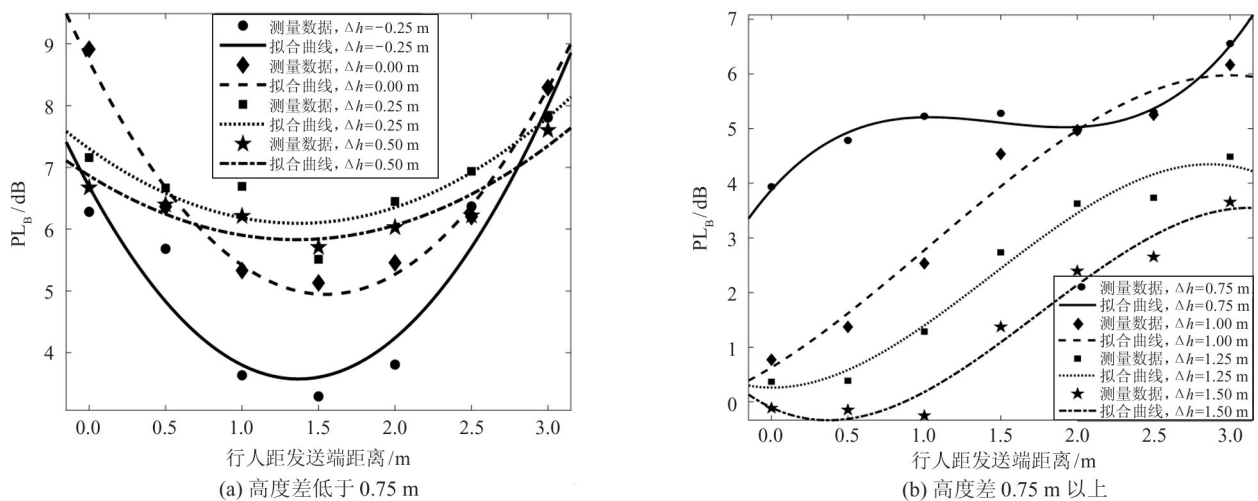
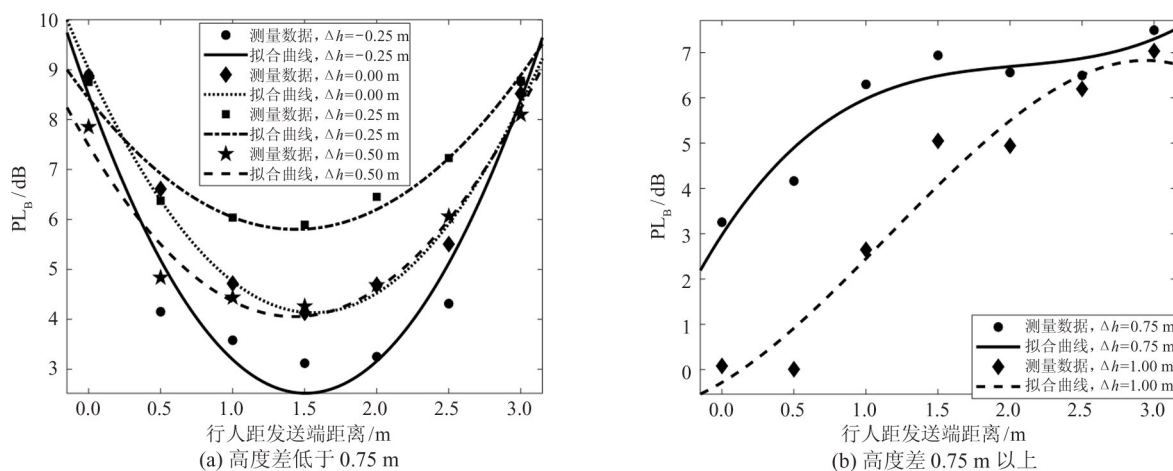


图3 小型室内办公场景中不同高度差时人体遮挡引起的 PL_B 的测量值与拟合曲线

表 4 小型室内办公场景中不同高度差下的 PL_B 模型的系数

高度差/m	m	n	l	高度差/m	m	n	p	q
-0.25	1.664 0	-4.555 0	6.672 0	0.75	0.528 6	-2.339 0	3.140 0	4.191 0
0.00	1.579 0	-4.884 0	8.262 0	1.00	-0.205 4	0.640 0	1.700 0	0.557 8
0.25	0.644 6	-1.765 0	7.248 0	1.25	-0.349 7	1.500 0	-0.020 0	0.650 8
0.50	0.562 9	-1.528 0	6.874 0	1.50	-0.372 6	1.952 0	-1.294 0	-0.441 6

图 4 走廊场景中不同收发端间高度差时人体遮挡引起的 PL_B 实际测量值与拟合曲线

PL_B 的变化规律与小型室内办公场景中变化规律基本一致。同样,我们通过采用各种函数与最小二乘法对 PL_B 的测量值进行拟合,发现也是在收发端间高度差不高于0.75 m时采用二次函数拟合效果最

佳,在收发端间高度差大于0.75 m时采用三次函数拟合效果最好,对应的拟合系数如表5所示。因此,所提的 PL_B 模型是准确的,并具有一定的普适性。

为了进一步验证 PL_B 模型的准确性与普适性,

表 5 走廊场景中不同收发端间高度差时 PL_B 模型的系数

高度差/m	m	n	l	高度差/m	m	n	p	q
-0.25	2.636	-7.937	8.541	0.75	0.365 1	-2.241	4.883	3.043 0
0.00	2.011	-6.268	8.997	1.00	-0.340 3	1.179	1.893	-0.343 9
0.25	1.268	-3.648	8.274	-	-	-	-	-
0.50	1.685	-4.808	7.606	-	-	-	-	-

给出了大型实验室场景中不同收发端间高度差时人体遮挡引起的 PL_B 的实际测量值与拟合曲线,如图5所示。从图5可以看出,此场景中 PL_B 的变化规律与小型室内办公场景以及走廊场景中的变化规律一样(PL_B 模型的相关参数见表6),这进一步表明所构建的 PL_B 模型的准确性,并具有一定的普适性。

为了进一步验证所提 PL_B 模型的准确性,给出

了不同场景中不同收发端间高度差时采用不同函数拟合 PL_B 测量值时的RMSE,如表7与表8所示。从这些表可以看出,不论是在哪种场景中,当收发端间高度差低于0.75 m时采用二次函数进行拟合的RMSE最佳,高度差高于0.75 m时采用三次函数对 PL_B 测量数据进行拟合的RMSE最佳。因此,式(4)与式(5)所给出的 PL_B 的模型可以很好地表征实际场景中人体遮挡引起的路径损耗。

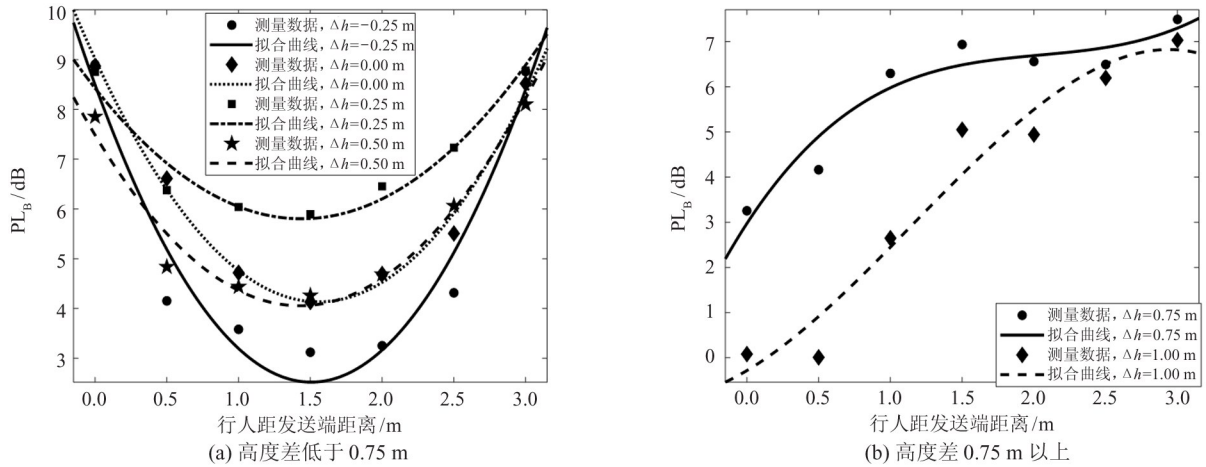


图5 大型实验室内场景中不同高度差时人体遮挡引起的 PL_B 实际测量值与拟合曲线

表6 大型实验室场景中不同高度差下的 PL_B 模型的系数

高度差/m	m	n	l	高度差/m	m	n	p	q
-0.25	1.241	-3.681	8.906	0.75	-0.538	2.261	-0.451	2.708
0.00	1.364	-3.456	8.206	1.00	-0.981	3.857	-0.613	-0.061
0.25	1.243	-3.702	9.007	1.25	-0.622	3.025	-1.431	0.259
0.50	1.302	-3.742	9.575	1.50	-0.416	2.308	-1.069	0.141

表7 室内办公与走廊场景中不同高度下采用不同函数拟合 PL_B 的 RMSE 值

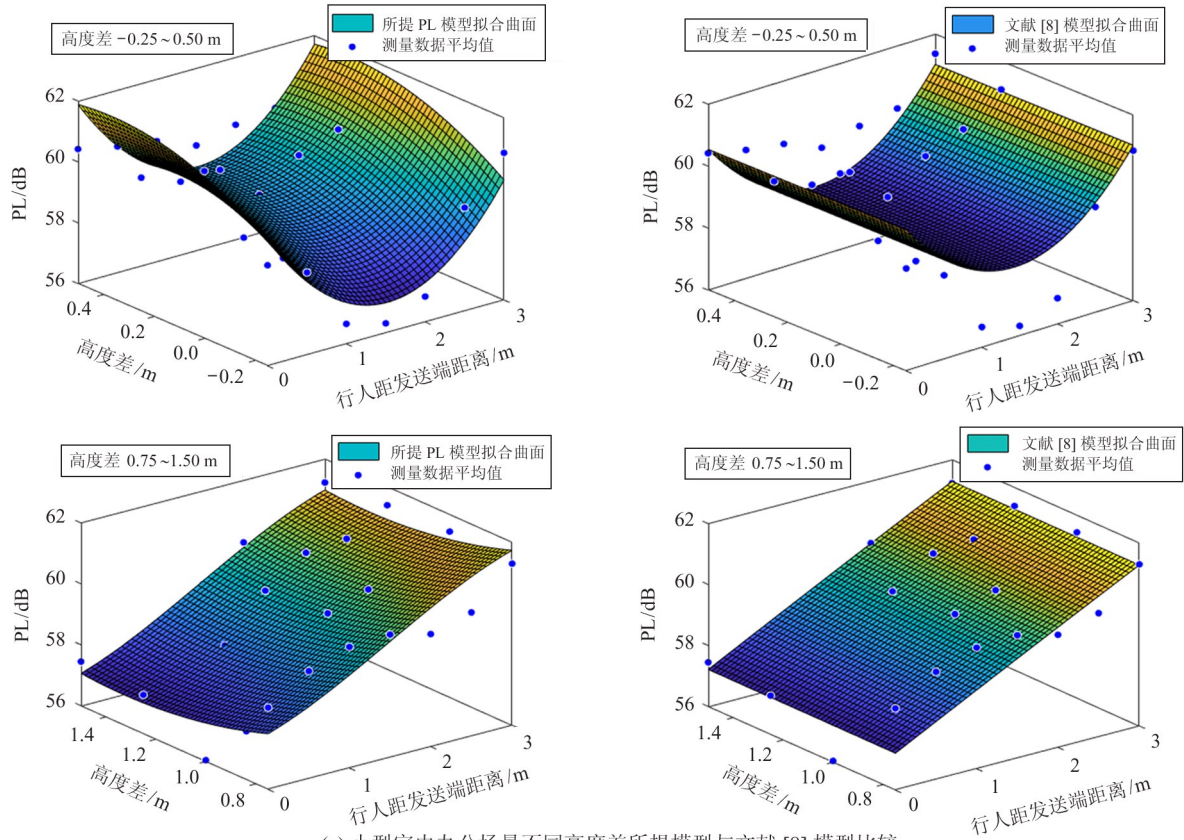
场景	室内办公场景			走廊场景			
	二次函数	一次函数	指数函数	二次函数	一次函数	指数函数	
高度差 1	-0.25 m	0.529 7	1.801 5	1.778 4	0.796 5	2.793 4	2.676 5
	0.00 m	0.244 7	1.632 6	1.630 5	0.279 5	2.075 5	2.069 5
	0.25 m	0.329 2	0.752 6	0.750 5	0.349 1	1.336 1	1.334 1
	0.50 m	0.245 3	0.636 3	0.634 3	0.402 9	1.763 3	1.756 6
高度差 2		三次函数	一次函数	指数函数	三次函数	一次函数	指数函数
	0.75 m	0.148 9	0.451 1	0.448 2	0.612 1	0.831 7	0.927 3
	1.00 m	0.347 8	0.508 1	0.852 4	0.897 4	0.931 8	1.359 0
	1.25 m	0.361 8	0.407 2	0.678 9	-	-	-
	1.50 m	0.419 4	0.528 3	0.652 1	-	-	-

表8 大型实验室场景中不同高度下采用不同函数拟合 PL_B 的 RMSE 值

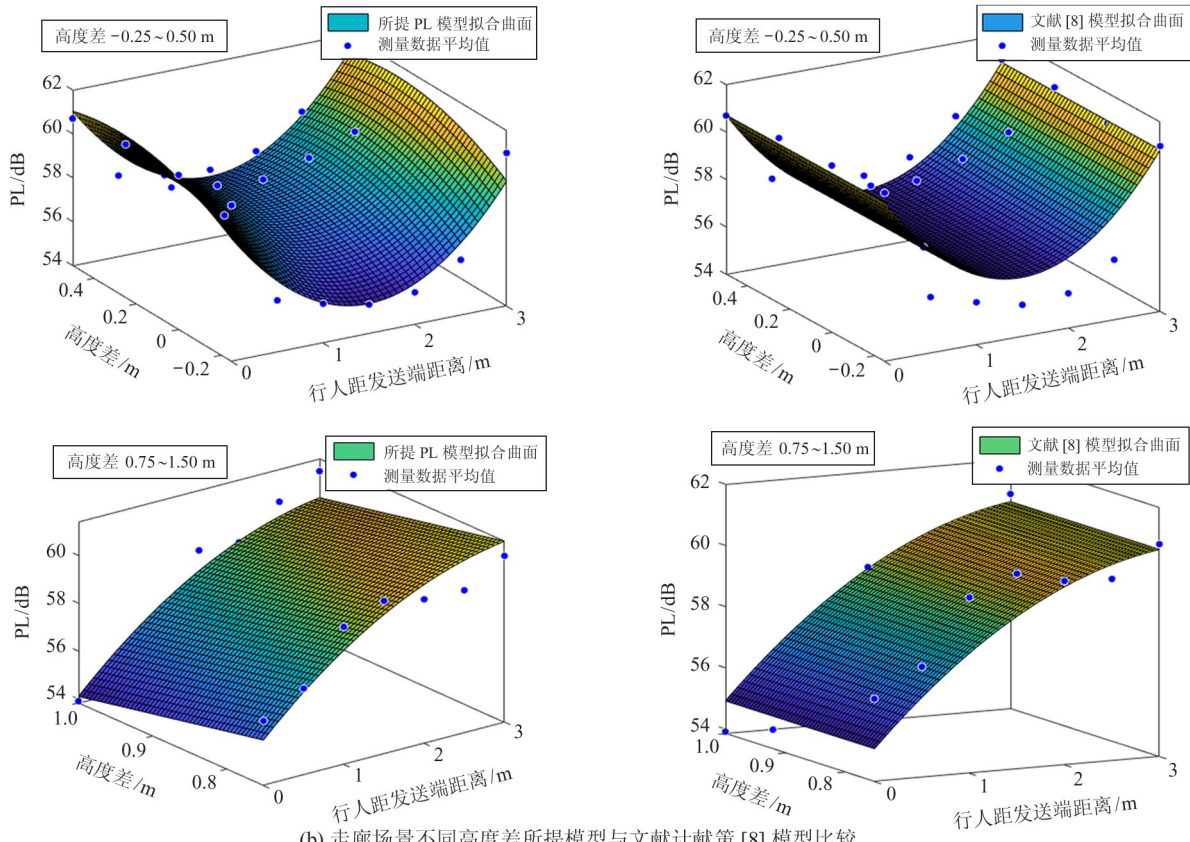
场景	大型实验室场景			
	二次函数	一次函数	指数函数	
高度差 1	-0.25 m	0.251 2	3.856 4	2.956 7
	0.00 m	0.246 5	3.056 4	3.584 9
	0.25 m	0.251 1	3.452 8	3.524 8
	0.50 m	0.231 4	2.985 4	3.445 6
高度差 2		三次函数	一次函数	指数函数
	0.75 m	0.387 8	1.025 8	0.448 2
	1.00 m	0.407 7	1.266 2	0.852 4
	1.25 m	0.520 1	1.153 6	0.678 9
	1.50 m	0.572 6	1.574 6	0.652 1

3.3 所提 PL 模型的验证

第3.1与3.2节主要是对所提 PL 模型中 PL_H 与 PL_B 的模型进行了验证,而本节将在此基础上进一步对所提的双因子 PL 模型进行验证。首先,为了更直观地展示所提 PL 模型的拟合效果,图6给出了小型室内办公场景、大型实验室内场景与走廊场景中 PL 的实测数据与采用不同 PL 模型进行拟合的三维对比图,模型的相关系数如表9所示。在图6中,文献[8]是指在不收发端高度差且只存在人体遮挡时建立的 PL 模型。从图6可以发现,在小型室内办公、大型实验室内和走廊这3种场景下,当收



(a) 小型室内办公场景不同高度差所提模型与文献 [8] 模型比较



(b) 走廊场景不同高度差所提模型与文献计献策 [8] 模型比较

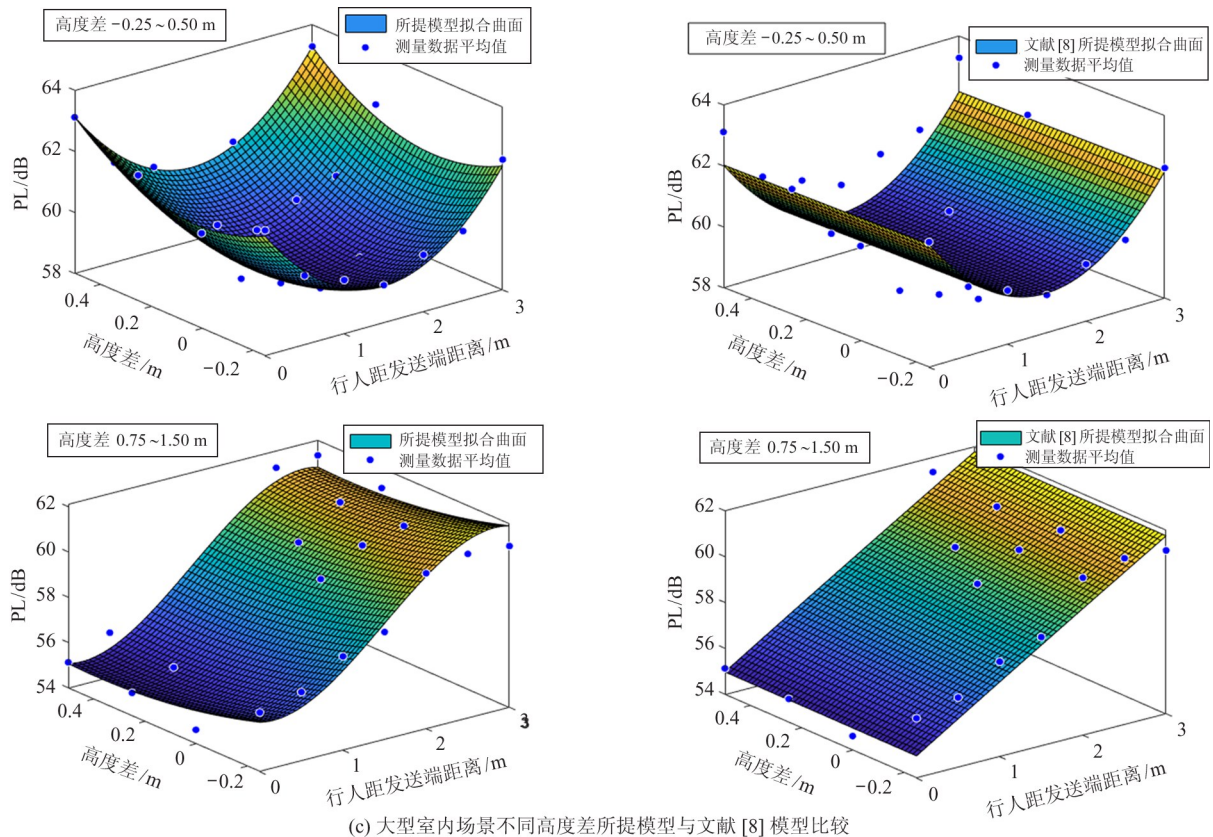


图6 不同场景中存在高度差情况下采用不同模型时 PL 的拟合情况

表9 室内办公与走廊场景采用所提 PL 模型进行拟合的模型系数

场景	小型室内办公	走廊	大型实验室	场景	小型室内办公	走廊	大型实验室		
高度差 1	<i>a</i>	-2.562	-6.464	8.024	高度差 2	<i>a</i>	2.469 0	-0.070 0	2.818 0
	<i>b</i>	3.217	3.505	-0.415		<i>b</i>	-6.580 0	-6.433 0	-2.198 0
	<i>c</i>	9.040	10.875	13.580		<i>c</i>	9.895 0	11.560 0	5.907 0
	<i>m</i>	1.112	1.900	1.241		<i>m</i>	-0.100 0	0.010 0	-0.639 4
	<i>n</i>	-3.179	-5.670	-3.681		<i>n</i>	0.439 9	-0.532 0	2.863 0
	<i>l</i>	-1.250	-2.140	-5.070		<i>p</i>	0.883 8	3.388 0	-0.890 8
	-	-	-	-		<i>q</i>	-1.112 0	-3.140 0	-2.356 0

发端间存在高度差时,使用本文提出的 PL 模型对测量数据进行拟合,其效果优于文献[8]中提出模型的拟合效果。这说明在存在高度差的情况下,不仅需要考考虑人体遮挡的影响,还需要考考虑高度差带来的影响。因此,本文所提模型比现有模型能更好地表征实际无线传播特性。

为了进一步验证所提 PL 模型的准确性,表 10 给出了 3 种场景下采用不同 PL 模型对测量数据进行拟合的 RMSE 值。从表 10 同样可以看出,无论是在哪一种场景中,采用所提 PL 模型进行拟合与实际测量值的误差最小,这进一步表明所提 PL 模型

更贴近真实的测量场景,这主要是由于所提 PL 模型考虑了高度差和人体遮挡 2 种因素。此外,从表 10 还可以看出,在不同场景中利用 PL 模型拟合的 RMSE 也是不同的,这主要是由每种场景的大小不一样并且室内物品分布和材质不一样等原因导致的。

此外,通过对比不同 PL 模型拟合时的阴影衰落也可以评价模型的拟合效果。这是因为在收发天线间距离相同的情况下,当缺少对传播环境中其他因素的考量时,所得到的 PL 测量值会出现较大的波动(这个波动即为阴影衰落),而只有在 PL 模型中加入更详细的环境参数或进行适当的校正后,这

表 10 不同测量场景中采用不同 PL 模型拟合的 RMSE 值

场景	小型室内办公场景			走廊场景			大型实验室场景		
	所提 PL 模型	文献[8]模型	传统对数距离模型	所提 PL 模型	文献[8]模型	传统对数距离模型	所提 PL 模型	文献[8]模型	传统对数距离模型
高度差 1	0.638 7	1.450 3	4.406 8	0.683 4	1.068 9	4.056 3	0.937 6	1.346 7	3.754 8
高度差 2	0.717 0	1.263 8	5.174 8	0.888 3	1.336 6	4.336 9	0.918 3	1.456 3	4.068 6

些波动才会逐渐减小^[17]。因此,通过阴影衰落的标准偏差也可以看出所提模型的拟合质量。图 7 展示了小型室内办公与走廊 2 种场景下采用不同 PL 模型后阴影衰落的累计概率分布情况,图中阴影衰落的测量值是通过利用 PL 的实际测量值减去采用的 PL 模型建模值得到的。从图 7 可以看出,在小型室内办公场景下采用所提 PL 模型时,阴影衰落在高度差为 1 和 2 情况下分别服从均值为 0、标准方差

为 0.407 5 与 0.496 9 的正态分布;而采用文献[8]模型时,阴影衰落在高度差为 1 和 2 情况下分别服从均值为 0、标准方差为 0.936 2 与 0.979 4 的正态分布。而在走廊场景下所提 PL 模型的阴影衰落在高度差为 1 和 2 情况下分别服从均值为 0、标准方差为 0.432 3 与 0.753 9 的正态分布;而采用文献[8]模型时,阴影衰落在高度差为 1 和 2 情况下分别服从均值为 0、标准方差为 0.978 9 与 0.988 5

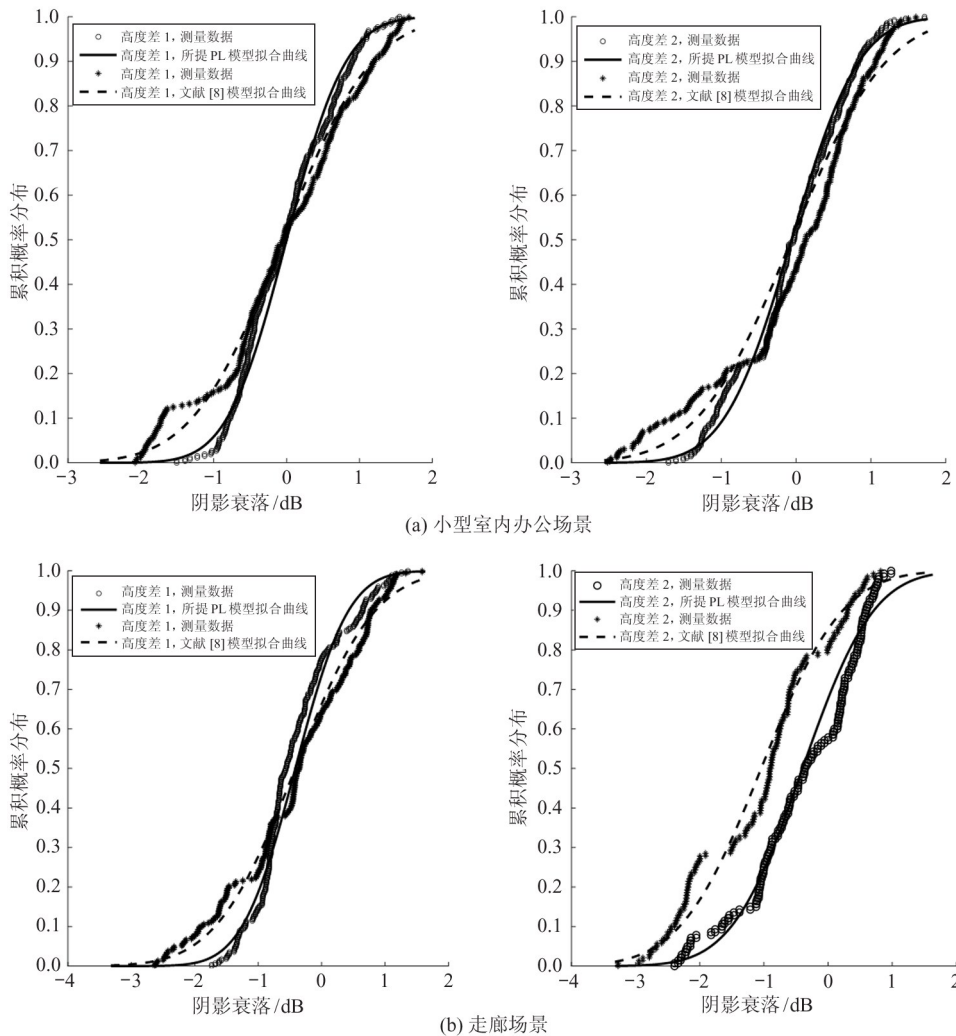


图 7 小型室内办公与走廊场景中采用不同 PL 模型时的阴影衰落的累计概率分布

的正态分布。因此,采用所提 PL 模型拟合后的阴影衰落的标准方差显著低于采用文献[8]模型拟合后的标准方差,也就是说,所提 PL 模型可以更好地描述真实的传播环境,因为该模型考虑了高度差与人体遮挡,可以减少阴影衰落对 PL 造成的不确定性。

4 结 论

本文针对小型室内办公、走廊和大型实验室 3 种不同场景,对中心频率为 11 GHz 的无线信道特性进行了深入分析。通过大量实验数据的支撑,本文探讨了在不同场景下路径损耗和阴影效应的统计特性,并构建了一个新的路径损耗模型,该模型同时考虑了高度差和人体遮挡的影响。本文研究的成果可为未来高频段通信系统的设计提供参考,并有望应用于多种场景,如室内办公场景中的设备通信、可穿戴健康设备的互联以及工业物联网领域中机器间的通信等。在未来的研究中,可继续深入探索存在多种遮挡物以及移动遮挡物等场景的无线传播特性。

参考文献

[1] 杨颖慧. 基于可重构智能表面的通信性能分析与信道建模研究[D]. 山东: 山东大学, 2023.

[2] 段开源. 面向 5G 及 5G 后应用场景的高频段信道建模研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2023.

[3] 杜昌瀚. 高频段宽带无线通信接收信号处理关键技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2021.

[4] 方箭,王坦,黄标. 高频段宽带无线通信前瞻[J]. 电信科学, 2014, 30(3): 109 – 113.

[5] 杨丽花, 刘加欢, 任露露, 等. 室内办公室高频段信道测量和大尺度衰落建模[J]. 北京邮电大学学报, 2022, 45(1): 7 – 12.

[6] 刘加欢. 室内办公室场景高频段无线信道传播特性研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2022.

[7] Cotton S L, Chun Y J, Scanlon W G, et al. Path loss models for indoor off-body communications at 60 GHz [C] //

2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation. Fajardo, USA: IEEE, 2016: 1441 – 1442.

[8] 薛寒, 杨丽花, 魏苏皖, 等. 具有行人影响的 11 GHz 室内无线信道建模与特性分析[J]. 北京邮电大学学报, 2024, 47(2): 45 – 50.

[9] Mohamed B, Yalcinkaya B G, Busra R C, et al. Modeling and measurement of human body blockage loss at 28 GHz [J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2023, 37(4): 538 – 548.

[10] Yang Y Q, Wang W M, Tang B H, et al. Channel measurements and propagation characterization for indoor terahertz communication [J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2022, 32(10): 23324 – 23323.

[11] Lei M, Zhang J, Tian L, et al. 28-GHz indoor channel measurements and analysis of propagation characteristics [C] // 2014 IEEE 25th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communication. Washington, USA: IEEE, 2014: 208 – 212.

[12] Batalha I D S, et al. Indoor corridor and office propagation measurements and channel models at 8, 9, 10 and 11 GHz [J]. IEEE Access, 2019, 7(1): 55005 – 55021.

[13] 谢利娟. 基于测量的 15 GHz 频段室内无线信道建模研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2016.

[14] Joseph W. Office room channel modeling and object attenuation at sub-THz frequencies [J]. Electronics, 2021, 10(14): 1725.

[15] 王晔. 短距离室内无线信道传播特性研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2015.

[16] Kimmd, Liang J, Lee J, et al. Path loss measurements and modeling for indoor office scenario at 28 and 38 GHz [C] // IEEE International Symposium on Antennas and Propagation. Okinawa, Japan: IEEE, 2017: 64 – 65.

[17] Andersen J B, Rappaport T S, Yoshida S. Propagation measurements and models for wireless communications channels [J]. IEEE Communications Magazine, 1995, 33(1): 42 – 49.

Research on propagation characteristics of wireless channels with human body shadowing in 11 GHz indoor scenarios

Ma Jiawen, Yang Lihua, Lyu Wenjun, Xue Han, Wei Suwan
(Jiangsu Key Laboratory of Wireless Communication, Nanjing University of Posts
and Telecommunications, Nanjing 210003)

Abstract

The characteristics of wireless channel are investigated in indoor scenarios at 11 GHz, with a specific focus on the influence of height differences between transmitting and receiving antennas, as well as human body obstruction on signal propagation. Based on measurement data, a path loss (PL) model with height difference and human body occlusion is proposed, a comparative analysis is conducted in office, corridor and large laboratory scenarios. The research indicates that the variation of PL with height differences conforms to a quadratic function distribution without human body occlusion. When the transmitter height is below the human height to the hip position, the PL caused by human body occlusion can be approximately described by a quadratic function relationship with their distance from the transmitter. However, when the transmitter height exceeds that of human body, their relationship can be approximately described by a cubic function. The research results can lay the foundation for the design of indoor body area network communication systems.

Key words: indoor scenario, 11 GHz, path loss, shadowing, height difference, human body occlusion