

一种改进的室内无线电波传播模型

张晋笙¹, 杨晶晶^{1*}, 吴季达², 张彬², 黄铭¹

¹云南大学信息学院, 云南 昆明

²云南省无线电监测中心, 云南 昆明

收稿日期: 2023年5月14日; 录用日期: 2023年6月12日; 发布日期: 2023年6月20日

摘要

无线电波传播特性主要取决于收发设备之间的距离, 然而当电波传播环境复杂时, 对数距离传播模型的预测误差较大。为了解决这一问题, 提出了一种由传播距离和方位角共同确定的改进的室内无线电波传播模型, 并以云南大学信息学院四楼局部区域为例对模型的有效性进行了仿真和验证。结果表明, 所提出的模型能够比较准确地预测满足特定传播距离与方位角的区域的无线电波传播特性, 并可以通过参数 n 的取值推断预测区域与在发射设备之间存在建筑墙体的数量。在发射场景1下对数距离传播模型的最大均方根误差为12 dB, 所提模型仅为2 dB; 在发射场景2下对数距离传播模型的最大均方根误差为25 dB, 所提模型仅为5 dB。不同场景下得到相似的结论表明所提模型具有普适性, 同时预测误差小表明其具有潜在的应用价值。

关键词

对数距离传播模型, 仿真, 传播距离, 方位角, 均方根误差

An Improved Indoor Radio Wave Propagation Model

Jinsheng Zhang¹, Jingjing Yang^{1*}, Jida Wu², Bin Zhang², Ming Huang¹

¹School of Information Science and Engineering, Yunnan University, Kunming Yunnan

²Radio Monitoring Center of Yunnan Province, Kunming Yunnan

Received: May 14th, 2023; accepted: Jun. 12th, 2023; published: Jun. 20th, 2023

Abstract

The radio wave propagation characteristics mainly depend on the distance between the tran-
*通讯作者。

sceiver devices. However, when the radio wave propagation environment is complex, the prediction error of the log-distance path loss model becomes large. In order to solve this issue, an improved indoor radio wave propagation model determined jointly by the propagation distance and azimuth angle is proposed, and the effectiveness of the model is simulated and verified by taking the local area on the fourth floor of the School of Information Science & Engineering, Yunnan University as an example. Results show that the proposed model can accurately predict radio wave propagation characteristics in areas satisfying the specific propagation distances and azimuth angles, and can infer the number of building walls between the predicted area and the transmitting device through the value of the parameter n . In scenario 1, the maximum root mean square error of the log-distance path loss model is 12 dB, and the proposed model is only 2 dB; in scenario 2, the maximum root mean square error of the log-distance path loss model is 25 dB, and the proposed model is only 5 dB. The similar conclusions obtained in different scenarios show that the proposed model is universal, and the small prediction error shows that it has potential application value.

Keywords

Log-Distance Propagation Model, Simulation, Propagation Distance, Azimuth Angles, Root Mean Square Error

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

无线通信作为 5G 时代最基本的通信技术, 其数据信息主要是以无线电波为载体的形式在无线信道中进行传输的[1]。因此, 对信道建模以预测电波传播特性是构建无线通信的基础[2]。但由于无线信号在室内环境下的传播情况复杂多变, 导致电波会以不同的传输形式到达接收点, 从而使接收信号与发射信号并不相同。只有精确预测无线信号的传播特性, 才能为无线网络的设计、部署等提供合理的策略[3]。

目前, 无线信道的建模方法主要可以分为三种[4]。即基于信道测量的统计性建模方法[5]; 利用传播环境与电磁波传播理论来分析并预测的确定性建模方法[6]; 以及介于上述两种方案, 融合其优点, 并降低复杂度的半确定性建模方法[7]。一般主流的建模方法为半确定和确定性的建模方法, 此类方法是通过了解详细的信道环境信息, 如地理特征、建筑结构、收发设备位置和材料特性等, 对数据进行拟合建模的方式[8]。相比于统计性建模方法, 此方法省去了大量的实测工作, 仅通过传播环境实现对大范围内下的传播特性进行预测[9]。

然而在室内环境下, 构建能适用于复杂场景的电波传播模型是比较困难的[10]。室内电波模型的构建一般采用的是对数距离路径损耗(Path Loss)模型, 它是通过构建发射源(TX)与接收源(RX)之间关于对数距离的一维函数, 来反映收发设备之间电波传播特性的一种电波传播模型[11]。此类模型在无障碍物遮挡或空间建筑结构简单的空间环境中, 预测精准度尚好, 但随着环境的复杂模型会变得难以精确预测[12]。RX 的接收信号受室内建筑环境的影响非常大[13]。例如, 在与 TX 相同距离的不同 RX 处的路径损耗被认为是相同的, 但在实际情况中, 会因为室内建筑结构不同, 导致相同距离的不同 RX 处的路径损耗完全不同[14]。同时, 传播与房间结构、墙体和频率等因素有关[15], 因此传统的一维对数距离路径损耗模型并不能对室内空间环境下的无线电波传播特性进行很好的预测。因此, 如何构建一个能适用于室内复杂环境下的无线电波传播模型成为一个值得研究的问题。

针对上述问题,本文以室内场景为研究对象,提出了包含方位角(φ)和传播距离(d)为参数的对数路径损耗模型。首先以发射源 TX 为参考,依据分区拟合的思路,以各个接收区域 RX 与发射源 TX 之间相隔几堵墙为条件将整个室内区域进行分区;其次,基于仿真获得室内路径损耗数据;最后,对各个区域中的路径损耗分布数据,采用本文提出的包含方位角 φ 和传播距离 d 的对数路径损耗模型进行拟合。相较于传统的对数距离路径损耗[16]模型,尚未见由传播距离与方位角共同确定,并分区进行拟合的模型报道。结果表明,本文提出的模型能更加精准地预测室内各情况的无线电传播特性。在相同距离的不同 RX 处的预测值与实际值的均方根误差(Root Mean Squared Error, RMSE)始终保持在较低的值,可以对复杂的室内环境实现更精准的分析。

2. 研究场景和传播模型

2.1. 研究场景

本文研究的场景为云南大学呈贡校区信息学院 4 层 C 区,建筑模型依据学院蓝图等比例绘制。射线法具有坚实的理论基础,Altair WinProp 的射线法求解器广泛用于无线电波传播与无线网络规划,并且仿真计算与实验结果一致[17],因此本文采用该软件进行仿真。

首先采用 WallMan 模块,根据云南大学信息学院大楼的蓝图进行了等比例建模。模型包括了各楼层中混凝土结构的墙体,木制材料的门以及玻璃材质的窗户。设置空气的相对介电常数为 1,混凝土 6.8,木材 2.5,玻璃 3.75 [18]。研究场景规划如图 1 所示。图 1(a)中红框标注了云南大学呈贡校区信息学院大楼所在位置。图 1(a)为大楼第四层的建筑模型,图中下部分的房间属于 A 区,右部分的房间为 B 区,顶部的房间为 C 区。

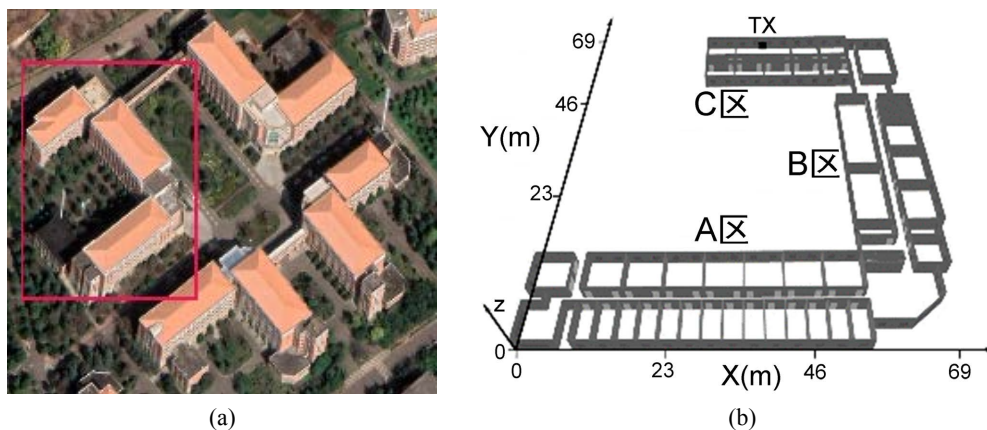


Figure 1. Research scenario planning map
图 1. 研究场景规划图

其次采用了 ProMan 模块在构建的 3D 模型中放置发射机进行特定条件下的路径损耗仿真计算。发射机用 TX 表示,发射频率为 2400 MHz,发射功率为 40 dBm,发射天线为全向(各向同性)天线,天线增益为 1 dBi。本文一共设置了两个场景下的 TX,场景 1 为主要研究情况,场景 2 为对照实验场景,以验证所提模型的可移植性与泛化性。

2.2. 传播模型

本文采用的无线电波传播模型研究区域如图 2 所示。以 TX1 为坐标原点建立极坐标系,按逆时针方向来进行 φ 的划分,在相同 φ 的情况下再按照 d 的传播范围情况进行区分。区域划分则是按照 RX 所在

区域与 TX1 在传播方向上有几堵墙体作为分区的标准。如图 2 所示, 把区域一共划分为六个部分, 分别用 P1、P2、P3、P4、P5.1、P5.2 表示。

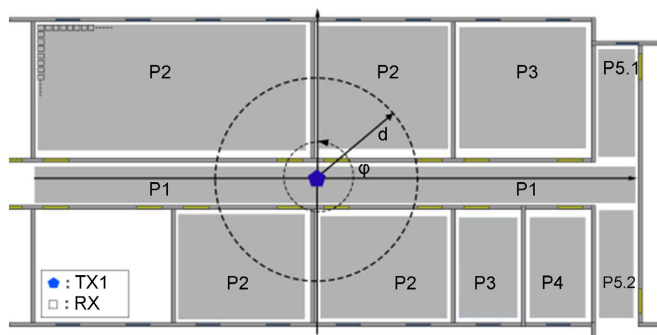


Figure 2. Study area
图 2. 研究区域

在该场景下, 以对数路径损耗模型为基准, 提出受限于 d 和 φ 的无线电波传播模型, 如公式(1)所示。

$$PL(d, \varphi) = PL_0(d_0, \varphi) + 10n(\varphi) \log(d/d_0) + X_\delta(d, \varphi) \quad (1)$$

其中, $PL(d, \varphi)$ 表示 RX 与 TX1 之间距离为 d 时和角度为 φ 情况下的路径损耗, 单位是 dB; d_0 表示参考距离(一般取 1 米); $PL_0(d_0, \varphi)$ 表示参考距离 d_0 时的参考路径损耗值; $n(\varphi)$ 表示路径损耗指数; d 表示 RX 与 TX1 之间的距离; 阴影衰落用 $X_\delta(d, \varphi)$ 表示, X_δ 遵循均值为 0, 标准偏差为 δ 的高斯分布, 通常情况下, 考虑环境因素, δ 的取值一般在 3.0~14.1 dB 之间。据公式(1), 对每个区域各 RX 处的路径损耗值进行拟合建模, 使得各区域的路径损耗预测模型的预测值满足真实路径损耗值的最大似然估计值。其中参数 X_δ 的取值方式为: 在各分区条件下, 随机生成的一个满足均值为 0 标准差为 3 的高斯分布的数值, 随机生成 10,000 次后取平均得到。参数 n 的取值方式为: 通过每次随机生成的 X_δ 来确定此次的 n 值, 这样 10,000 次后取平均得到。

3. 仿真模型和数据集

本文以云南大学信息学院 4 层真实建筑情况来绘制仿真模型, 如图 3 所示。设置左下角为参考系的坐标原点, 仿真区域和研究区域为信息学院 C 区(图 3 中灰色区域)。

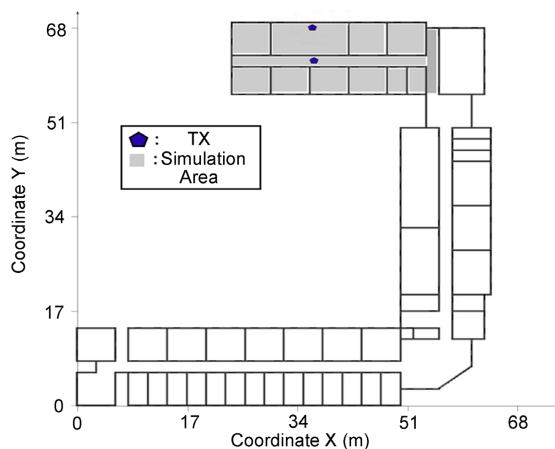


Figure 3. Simulation area planning map
图 3. 仿真区域规划图

在场景 1 中, TX 位于走廊上, 用 TX1 表示, 坐标为(42.2, 62.2); 在场景 2 中, TX 处于房间内, 用 TX2 表示, 坐标为(35.86, 67.49)。在两个发射场景下, TX 的高度均假设为距离楼层地面 1.5 m。首先, 对房间进行区域划分, 如图 4 所示。图 4(a)为 TX1 情况, 五边形点表示发射机 TX1, 黑色方框表示接收点 RX, 它是大小为 $0.1 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}$ 的方格, 分布于整个仿真区域。以接收点与发射机之间间隔了几堵墙体作为划分条件, 共分为 P1、P2、P3、P4、P5.1、P5.2 六个区域。

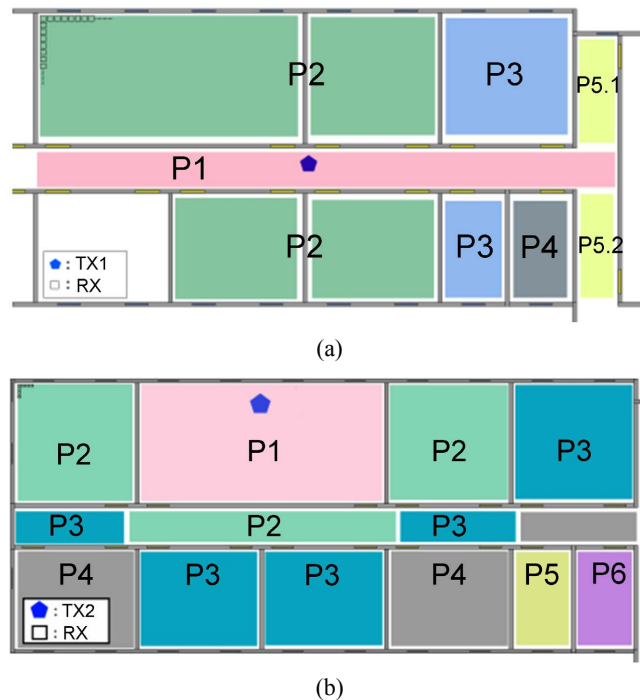


Figure 4. Regional division map. (a) TX1 scene; (b) TX2 scene
图 4. 区域划分图。(a) TX1 场景; (b) TX2 场景

P1 区域的 RX 与 TX1 之间无墙体遮挡; P2 区域的 RX 与 TX1 之间有一堵墙体遮挡; 在 P3 区域, 大部分 RX 与 TX1 之间有两堵墙体遮挡; 在 P4 区域, 绝大部分 RX 与 TX1 之间有三堵墙体遮挡; 在 P5.1 区域, 大部分 RX 与 TX1 之间有三堵墙体遮挡, 极少部分只有两堵墙体遮挡, 并且 RX 并伴有多径传播影响; 在 P5.2 区域, 大部分 RX 与 TX1 之间有四堵墙体遮挡, 极少部分有三堵墙体或两堵墙体遮挡, 并伴有一定墙体放射传播影响。TX2 的情况如图 4(b)所示, 同理划分为 P1、P2、P3、P4、P5、P6 区域。当选定不同位置发射机时, 各区域内 RX 与 TX 之间的穿墙数、划分区域块数及各区域包含的 RX 数量如表 1 所示。在发射源在位于各区域的情况下仿真得到的数据集中, 每个 RX 包含以下三个参数, 即该点坐标的 x 值(米)、y 值(米)和该点上路径损耗 PL (dB)。通过计算各个区域中的每个 RX 与 TX 之间的欧氏距离 d (米), 从而得到 TX 在各个区域中的最小与最大的传播距离。

通过构建 d 与 PL 的函数来构建无线信号路径衰落模型, 其中各区域下的关系图如图 5 所示, 图 5(a)为 TX1 的情况, 图 5(b)为 TX2 的情况。图中的横坐标表示的为各 RX 与 TX 之间的欧氏距离 d , 纵坐标表示相应的传播路径衰落损耗 PL 。仿真的路径损耗为负值, 为了方便观察和计算, 图 5 中的路径损耗值取了绝对值。

从图 5(a)可以看出, 在 TX1 场景下, 因各区域的 RX 与 TX 之间相隔的墙体数量不同, 各区域的数据区分明显, 尤其是前四个区域, 在相同的 d 数值下, 各区域之间 PL 有大约 10 dB 的差值; 在对于 P5.1、

P5.2 区域, 由于数据不仅受墙体数量影响, 而且受多径传播的影响, 因此数据分布有些离散。同理, 在图 5(b)中, P4、P5、P6 区域因受墙体数量和多径传播的影响, 数据也呈现了离散的效果。

Table 1. Parameters for each region

表 1. 各区域参数

TX1 坐标为(42.2, 62.2)				TX2 坐标为(35.86, 67.49)			
区域	墙数	区域块数	RX 数量	区域	墙数	区域块数	RX 数量
P1	0	1	2540	P1	0	1	4325
P2	1	4	8000	P2	1	3	4811
P3	2	2	2200	P3	2	5	5806
P4	3	1	600	P4	3, 2	3	3584
P5.1	3, 2	1	350	P5	4, 3	1	808
P5.2	4, 3, 2	1	350	P6	5, 4, 3	1	798
ALL	/	/	14,040	ALL	/	/	20,132

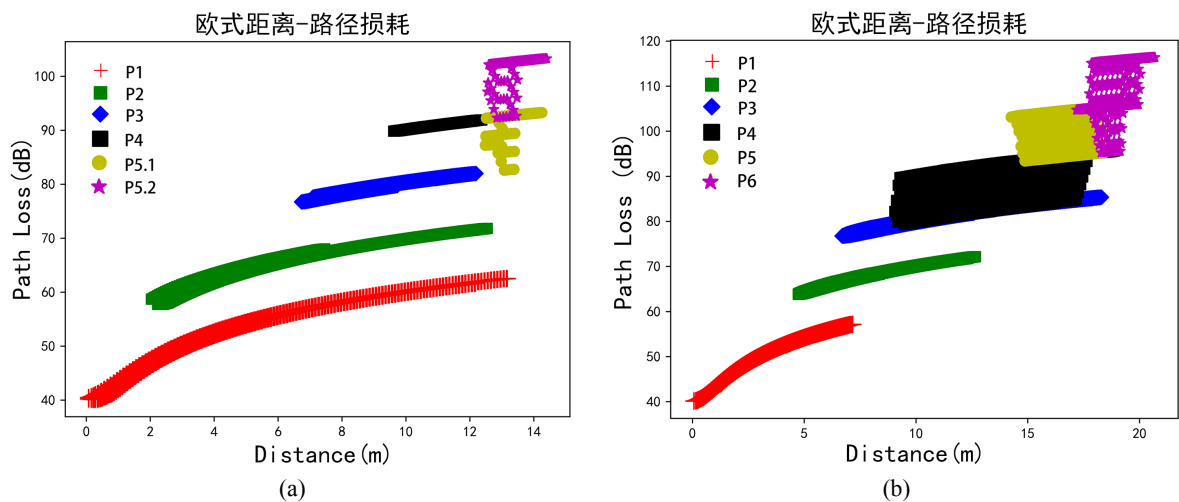


Figure 5. Relationship between euclidean distance and path loss of RX in each region. (a) TX1 scene; (b) TX2 scene

图 5. 各区域内 RX 的欧式距离与路径损耗关系图。(a) TX1 场景; (b) TX2 场景

4. 结果与讨论

通过仿真得到数据后, 首先根据公式(1)对全区域内所有的数据进行了拟合构建无线信号路径损耗模型, 再依次对分区域情况下的各区域进行单独的拟合构建无线信号路径损耗模型。以场景 1 为例, 结果表明, 对全区域内的数据进行拟合得到的公式模型对各区域的传播特性预测有较大的误差, 拟合曲线如图 6 所示。而通过分区后对各区域进行单独拟合构建的模型能更精确地预测该区域内的传播特性, 各区域的拟合曲线如图 7 所示。

在进行无线信号路径衰落模型构建时, 根据提出的传播模型公式(1)来进行数据拟合, 同时, 拟合时考虑了各区域的 φ 值范围和 d 值范围。对于 P1 区域, 相对于 TX1, 其传播方位角为 $176.2^\circ \sim 185.6^\circ$ 、 $354.9^\circ \sim 3.4^\circ$, 传播距离为 $0 \sim 9$ m; 在 P2 区域, 传播方位角为 $6.8^\circ \sim 176.2^\circ$ 、 $191^\circ \sim 349.7^\circ$, 传播距离为 $1 \sim 11$ m; 在 P3 区域, 传播方位角为 $3.4^\circ \sim 49.79^\circ$ 、 $313.09^\circ \sim 353.2^\circ$, 传播距离为 $7 \sim 12$ m; 在 P4 区域, 传播方位角为 $324.8^\circ \sim 354.9^\circ$,

传播距离为 10~12 m；在 P5.1 区域，方位角为 3.4°~25.9°，传播距离为 12~13 m；在 P5.2 区域，传播方位角为 332.13°~354.9°，传播距离为 12~13 m。对各区域进行对应的模型构建，得到如表 2 所示的传播公式。

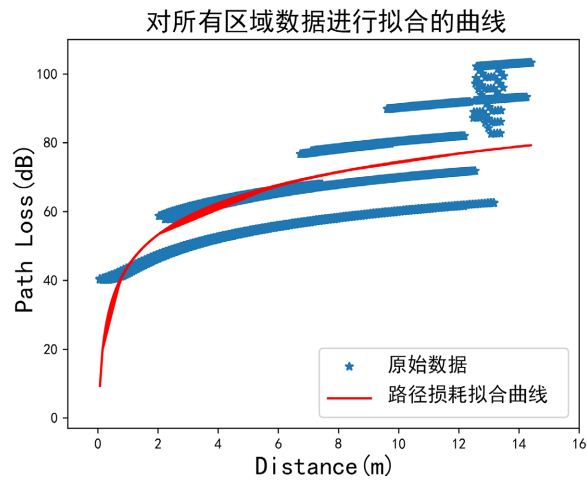


Figure 6. The results of the data fit for all regions
图 6. 对所有区域数据拟合的结果

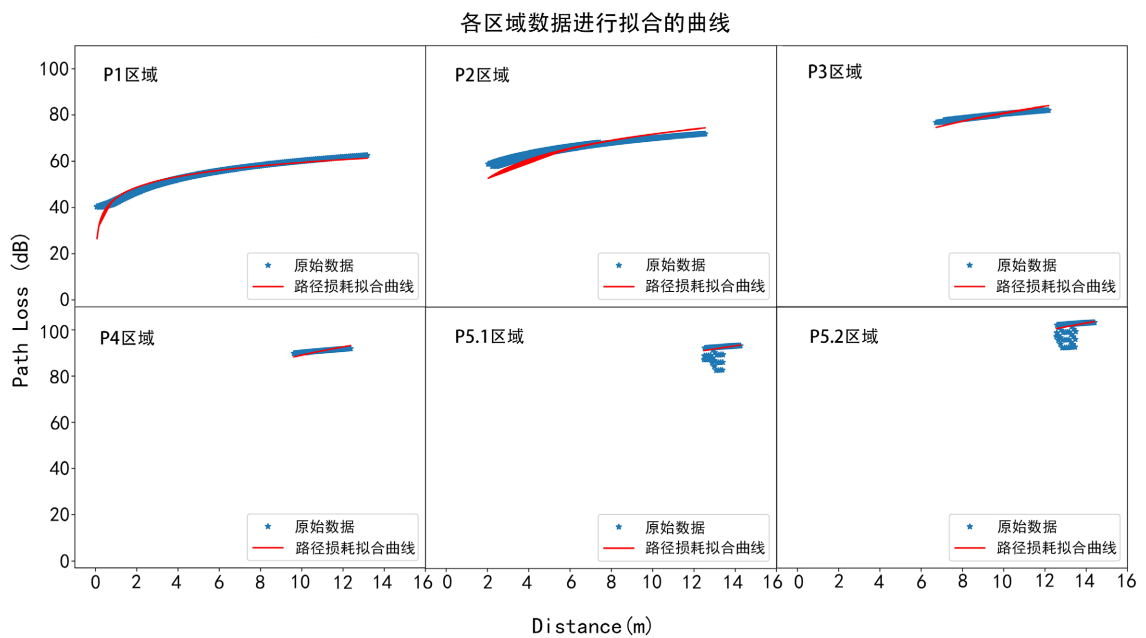


Figure 7. The fitting curves of each area in the case of TX1
图 7. TX1 情况下各区域的拟合曲线

Table 2. Radio wave propagation model of each region in the case of TX1
表 2. TX1 情况下各区域的无线电波传播模型

传播模型	$PL(d, \varphi) = PL_0(d_0, \varphi) + 10 \times n(\varphi) \times \log(d/d_0) + X_s(d, \varphi)$
	传播公式
不分区	$PL = PL_0 + 10 \times 3.0461 \times \log(d/d_0) - 0.0217$

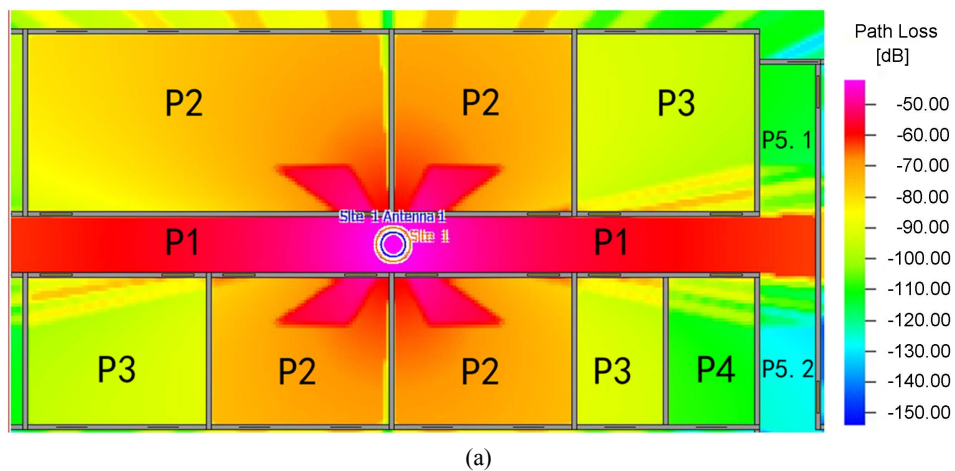
Continued

P1	$PL = PL_0 + 10 \times 1.5318 \times \log(d/d_0) - 0.0447, d = 0 \sim 9, \varphi = 176.2 \sim 185.6; 354.9 \sim 3.4$
P2	$PL = PL_0 + 10 \times 2.7564 \times \log(d/d_0) - 0.0621, d = 1 \sim 11, \varphi = 6.8 \sim 176.2; 191 \sim 349.7$
P3	$PL = PL_0 + 10 \times 3.6718 \times \log(d/d_0) - 0.0193, d = 7 \sim 12, \varphi = 3.4 \sim 49.7; 313 \sim 353.2$
P4	$PL = PL_0 + 10 \times 4.4951 \times \log(d/d_0) - 0.0154, d = 10 \sim 12, \varphi = 324.8 \sim 354.9$
P5.1	$PL = PL_0 + 10 \times 4.2886 \times \log(d/d_0) - 0.0559, d = 12 \sim 13, \varphi = 3.4 \sim 25.9$
P5.2	$PL = PL_0 + 10 \times 5.1372 \times \log(d/d_0) - 0.0189, d = 12 \sim 13, \varphi = 332.1 \sim 354.9$

从表 2 可看出, 对不同区域进行无线电波传播模型的拟合时, 区别最大的参数是 n 。在不进行分区的情况下, 总体的参数 n 的取值范围为 3.0 左右; 分区后, 在 P1~P4 区域内, 参数 n 的取值分别为 1.5、2.7、3.6 和 4.5 左右; 在 P5.1 和 P5.2 区域内, n 分别为 4.3 和 5.1 左右。由此可见, 在不分区的情况下, 拟合公式的得到的预测值并不能很好预测各区的真实情况。由于各区域是依照与 TX1 之间存在的墙体数量来进行区分的, 因此, 结合表 2 可以看出, 在室内无遮挡情况下, 路径损耗传播模型的参数 n 取值为 1.5 左右, 每多一堵墙体遮挡, n 的取值会增加 0.9~1。由此可见, 基于分区后的模型, 可直接根据模型公式中 n 的取值情况来估计分析接收区域与 TX1 之间存在几堵墙体。

根据以上得到的传播模型, 对研究范围内各区域进行接收场强预测, 得到如图 8(b)所示的传播路径损耗热力图, 与图 8(a)所示仿真得到的传播路径损耗热力图比较, 在 P1 区域无遮挡情况下, 其预测结果与真实结果几乎一致, 说明在该情况下的预测较精准; 对于 P2 区域, 在距离发射源较近的范围内, 仿真得到的场强分布更为清晰, 而模型预测的结果则是根据电波传播公式中角度和半径的关系, 对该半径内场强值计算求平均得到的, 故没有仿真效果的清晰, 但通过模型预测出的情况依然能够反映该条件下的传播特性。

同理, 在 P3、P4、P5.1、P5.2 区域, 提出的模型都能较为准确的预测出相应的传播特性。通过预测的模型对整个研究区域进行观察, 能清晰看出各个分区内的场强分布存在明显差异, 是符合预期效果的。



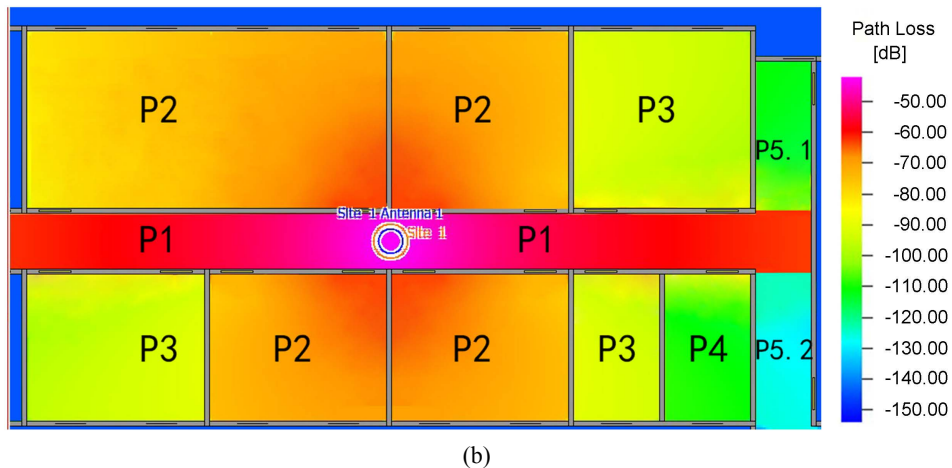


Figure 8. The simulated path loss diagram and the model predicted path loss diagram. (a) The simulated path loss diagram; (b) Model predicted path loss diagram

图 8. 仿真路径损耗图与模型预测路径损耗图。(a) 仿真的路径损耗图；(b) 模型预测的路径损耗图

为了验证模型的可靠性，以传播模型分别对传播半径为 1、3、5、7、9、11、13 m 处的路径损耗值进行预测，预测情况分为不分区条件下的预测值和分区后各区域内的预测值。预测值为表 2 中各公式在各选定传播半径下计算的 PL 值，为得到较为准确的预测效果，各 PL 值为公式计算 10,000 次后的均值。各情况下的模型预测值与真实值的 RMSE 如图 9 所示。可看出，未分区情况下，RMSE 的取值随着传播距离的增大而不断变大，而通过分区后传播模型的 RMSE 保持在 0~2 dB 较低的范围内；在 12 m 的传播距离下，分区后的 RMSE 比未分区情况下大约低 11.5 dB，分区后预测值明显好于未分区的情况。这说明了分区后模型的预测能力更佳，更能代表指定区域的无线电波传播情况。

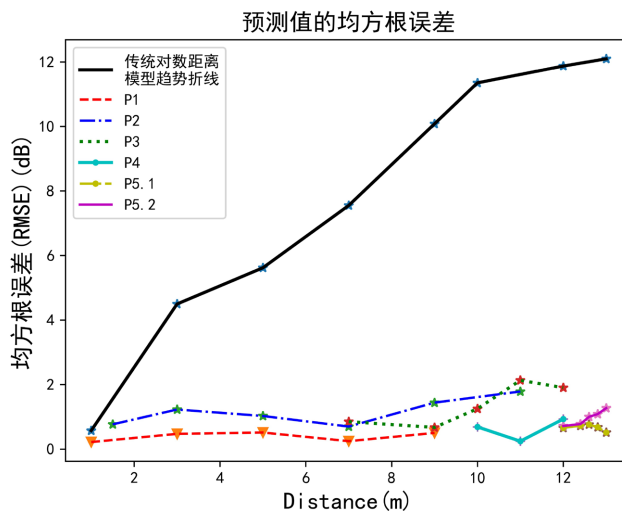


Figure 9. RMSE of each model in the case of TX1

图 9. TX1 情况下各模型的 RMSE

同时，为了验证提出的无线电波传播模型的可泛化性，本文在 TX2 情况下进行了分析，其分区示例图如图 4(b)所示，TX2 的位置处于房间内部，依照分区要求，把区域分为 P1、P2、P3、P4、P5、P6 六个区域。在 P1 区域，相对于 TX2 的传播方位角为 $180^\circ\sim 360^\circ$ ，传播距离为 1~7 m；在 P2 区域，传播方位角为 $180^\circ\sim 360^\circ$ ，传播距离为 5~11 m；在 P3 区域，传播方位角为 $202.4^\circ\sim 360^\circ$ ，传播距离为 7~8 m；在

P4 区域, 传播方位角 $210.5^{\circ}\sim 240.9^{\circ}$ 、 $299.6^{\circ}\sim 345^{\circ}$, 传播距离为 11~18 m; 在 P5 区域, 传播方位角为 $317.5^{\circ}\sim 335.5^{\circ}$, 传播距离为 15~18 m; 在 P6 区域, 传播方位角为 $323.9^{\circ}\sim 339.3^{\circ}$, 传播距离为 15~18 m。基于公式(1)对各区域进行拟合得到的传播模型见表 3 所示。

Table 3. Radio wave propagation model of each region in the case of TX2

表 3. TX2 情况下各区域的无线电波传播模型

传播模型	$PL(d, \varphi) = PL_0(d_0, \varphi) + 10 \times n(\varphi) \times \log(d/d_0) + X_s(d, \varphi)$
	传播公式
不分区	$PL = PL_0 + 10 \times 3.4871 \times \log(d/d_0) - 0.0039$
P1	$PL = PL_0 + 10 \times 1.5524 \times \log(d/d_0) - 0.0161, d = 1 \sim 7, \varphi = 180 \sim 360$
P2	$PL = PL_0 + 10 \times 2.7612 \times \log(d/d_0) - 0.0043, d = 5 \sim 11, \varphi = 180 \sim 360$
P3	$PL = PL_0 + 10 \times 3.6024 \times \log(d/d_0) - 0.0392, d = 7 \sim 18, \varphi = 202.4 \sim 360$
P4	$PL = PL_0 + 10 \times 3.9820 \times \log(d/d_0) - 0.0002, d = 11 \sim 18, \varphi = 210.5 \sim 240.9; 299.6 \sim 345$
P5	$PL = PL_0 + 10 \times 4.7539 \times \log(d/d_0) - 0.0323, d = 15 \sim 18, \varphi = 317.7 \sim 335.5$
P6	$PL = PL_0 + 10 \times 5.2599 \times \log(d/d_0) - 0.0038, d = 18 \sim 20, \varphi = 323.9 \sim 339.3$

同理求得各模型预测值与真实值的 RMSE, 如图 10 所示。

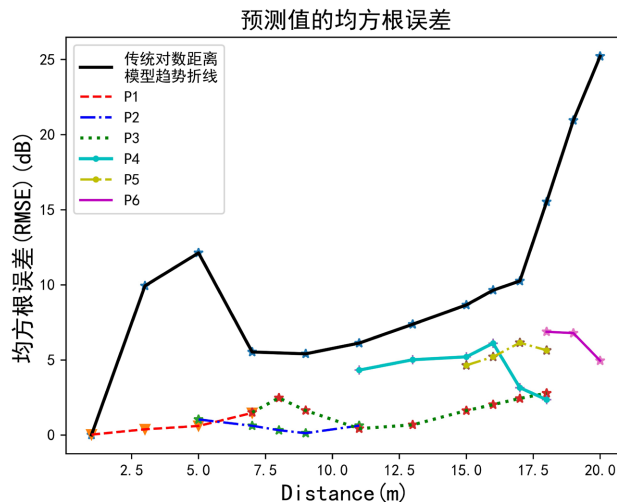


Figure 10. RMSE of each model in the case of TX2

图 10. TX2 情况下各模型的 RMSE

在图 10 中, 约 1~5 m 的传播范围内, 无分区模型的 RMSE 值随距离的增大呈增大的趋势, 而在 5~6.5 m 的范围内, 有一定的下降, 6.5 m 后, 又呈现逐渐增大趋势。其原因应是在 1~5 m 内, RX 仅分布在区域 P1 内, 所以预测值与真实值相差很大, 而大于 5 m 的传播距离下, RX 分布于至少两个区域内, 故其预测值与真实值的 RMSE 略微减小。但分区拟合模型与整体拟合模型相比, 预测值始终保持

在相对较小的 RMSE 之内, 表明了分区后的预测精度更高。

由此可见, 本文提出的基于分区思想的无线电波传播模型是具有可泛化性的。相比于传统仅考虑传播距离的无线电波传播模型, 该方法得到的传播模型能更清晰地表征室内房屋结构与无线电波传播特性的关联。与文献[19]报道的通过全景视频图像用深度学习预测室内无线电波传播特性的方法比较, 本文提出的方法物理意义更清晰, 运算速度更快。

5. 结束语

本文提出了一种通过考虑分区、角度、传播距离等因素来构建路径损耗模型的方法。主要分为三个步骤, 首先基于电磁仿真软件 Altair WinProp 进行电波传播仿真来获得仿真数据; 其次确定仿真区域内各 RX 到 TX 之间的欧式距离, 用于路径损耗模型的拟合; 最后在上述基础上, 考虑各 RX 与 TX 之间的方位角、传播范围等因素, 对室内情况进行区域划分, 得到受限于角度和传播范围的特定的路径损耗模型。

实验结果表明, 相比于传统仅考虑传播距离构建的路径损耗模型, 该方法构建的模型对复杂环境的路径损耗预测更为精准, RMSE 更小, 更能精准预测复杂环境下的无线电波的传播特性, 适用性更强。虽然所提的传播模型能在研究区域的室内环境下实现较高的预测效果, 但是若室内范围扩大, 各区域存在的复杂情况增多, 则区域划分及模型构建将耗费一定的时间。因此, 如何去简化在室内复杂环境下的分区, 并简化分区后的模型, 实现更高效的室内无线电波传播特性的预测是课题组今后将进一步完善的研究内容。

基金项目

国家自然科学基金(61963037, 62261059, 61863035)。

参考文献

- [1] Chen, Y. and Ma, C. (2020) Overview of D2D Communication Technology under 5G Cellular Network Coverage. 2020 *IEEE 6th International Conference on Computer and Communications (ICCC)*, Chengdu, 11-14 December 2020, 1297-1301. <https://doi.org/10.1109/ICCC51575.2020.9344968>
- [2] Goldsmith, A. (2005) *Wireless Communications*. Cambridge University Press, Cambridge. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511841224>
- [3] Tranquillini, S., Daniel, F., et al. (2012) Process-Based Design and Integration of Wireless Sensor Network Applications. *Business Process Management: 10th International Conference, BPM 2012*, Tallinn, 3-6 September 2012, 134-149. https://doi.org/10.1007/978-3-642-32885-5_10
- [4] Ansari, Y., Tiyal, N., Feo-Flushing, E. and Razak, S. (2021) Prediction of Indoor Wireless Coverage from 3D Floor Plans Using Deep Convolutional Neural Networks. *IEEE 46th Conference on Local Computer Networks (LCN)*, Edmonton, 4-7 October 2021, 435-438. <https://doi.org/10.1109/LCN52139.2021.9525019>
- [5] Wang, W., Marelli, D. and Fu, M. (2019) A Statistical CSI Model for Indoor Positioning Using Fingerprinting. 2019 *Chinese Control Conference (CCC)*, Guangzhou, 27-30 July 2019, 3630-3633. <https://doi.org/10.23919/ChiCC.2019.8865763>
- [6] Pakravan, S. and Hodtani, G.A. (2020) Semi-Deterministic Broadcast Channel with Side Information: A Secrecy Capacity Outer Bound. 2020 *10th International Conference on Computer and Knowledge Engineering (ICCKE)*, Mashhad, 29-30 October 2020, 245-249. <https://doi.org/10.1109/ICCKE50421.2020.9303628>
- [7] 胡焱, 伍启燕, 雷霞. 复杂地形中的电波传播损耗预测研究[J]. *微波学报*, 2022, 38(4): 95-100. <https://doi.org/10.14183/j.cnki.1005-6122.202204019>
- [8] Wang, Y.-X., Liu, Z.-Y. and Guo, L.-X. (2021) Research on MIMO Channel Capacity in Complex Indoor Environment Based on Deterministic Channel Model. 2021 *IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC Workshops)*, Xiamen, 28-30 July 2021, 405-409. <https://doi.org/10.1109/ICCCWorkshops52231.2021.9538881>
- [9] Wu, Z.-Y., Ismail, M., Kong, J., Serpedin, E. and Wang, J. (2020) Channel Characterization and Realization of Mobile

- Optical Wireless Communications. *IEEE Transactions on Communications*, **68**, 6426-6439. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2020.3009256>
- [10] Hou, M., Qiu, S. and Xu, Y. (2008) Indoor Channel Modeling for Zigbee Wireless Communication System. 2008 *4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, Dalian, 12-17 October 2008, 1-3. <https://doi.org/10.1109/WiCom.2008.517>
- [11] Andersen, J.B., Rappaport, T.S. and Yoshida, S. (1995) Propagation Measurements and Models for Wireless Communications Channels. *IEEE Communications Magazine*, **33**, 42-49. <https://doi.org/10.1109/35.339880>
- [12] 朱春华, 姚金魁, 杨铁军. 无线信道建模方法综述[J]. 无线互联科技, 2015(16): 26-27.
- [13] Pometcu, L. and D'Errico, R. (2019) An Indoor Channel Model for High Data-Rate Communications in D-Band. *IEEE Access*, **8**, 9420-9433. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2960614>
- [14] Shafi, M., *et al.* (2018) Microwave vs. Millimeter-Wave Propagation Channels: Key Differences and Impact on 5G Cellular Systems. *IEEE Communications Magazine*, **56**, 14-20. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2018.1800255>
- [15] De Piante, M., Tonello, A.M., Schiozzi, M., *et al.* (2020) Indoor Path Loss Statistical Characterization and Modeling for the Broad VHF-UHF Band. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **19**, 2315-2319. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2020.3031038>
- [16] Degli-Esposti, V. (2014) Ray Tracing Propagation Modelling: Future Prospects. *The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014)*, Hague, 6-11 April 2014, 2232. <https://doi.org/10.1109/EuCAP.2014.6902256>
- [17] 刘海涛, 黎滨洪, 谢勇, 等. 并行射线跟踪算法及其在城市电波预测的应用[J]. 电波科学学报, 2004(5): 581-585. <https://doi.org/10.13443/j.cjors.2004.05.015>
- [18] Jang, K.J., Park, S., Kim, J., *et al.* (2022) Path Loss Model Based on Machine Learning Using Multi-Dimensional Gaussian Process Regression. *IEEE Access*, **10**, 115061-115073. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3217912>
- [19] Raj, N., Teja, D. and Vineeth, B.S. (2020) Pano2RSSI: Generation of RSSI Maps for a Room Environment from a Single Panoramic Image. 2020 *IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS)*, New Delhi, 14-17 December 2020, 1-6. <https://doi.org/10.1109/ANTS50601.2020.9342750>