

单位代码: 10293 密 级: _____

南京邮电大学

硕士 学位 论文



论文题目: 高频段室内无线体域网无线信道测量与建模

学 号 1020010319

姓 名 杨钦

导 师 杨丽花 副教授

学 科 专 业 通信与信息系统

研 究 方 向 移动通信

申请学位类别 工学硕士

论文提交日期 二〇二三年四月

Measurement and Modeling of Wireless Channel in High Frequency Indoor Wireless Body Area Network

Thesis Submitted to Nanjing University of Posts and
Telecommunications for the Degree of
Master of Master of Science in Engineering



By
Qin Yang
Supervisor: Prof. Lihua Yang
April 2023

摘要

无线体域网（WBAN，Wireless Body Area Network）是一可持续监测和记录人体健康信息的无线通信技术，其不仅可以广泛应用于医疗保健领域，而且在日常生活、消费、娱乐和体育等领域中都具有广阔的应用前景，并且这些应用大多数发生在室内场景。由于无线信道传播特性是设计通信系统的关键，为此开展室内 WBAN 场景的无线信道传播特性的研究具有重要的意义。目前，国内外对于低频段（Sub-6GHz）WBAN 场景中无线信道传播特性的研究颇多，而高频段无线信道传播特性的研究鲜少。然而，随着未来海量设备的接入及终端用户对服务质量和即时通信需求的不断增加，低频段频谱资源将越来越短缺，这将使得发掘和利用高频段频谱资源成为必然。为此，本论文在不同的室内场景中开展了 10GHz 频段 WBAN 无线信道测量实验，获得了大量测量数据，基于测量数据对室内 WBAN 无线信道的传播特性进行了研究，主要贡献包括：

（1）针对办公室场景中身体角度对 WBAN 无线信道传播特性的影响，在该场景下对信道特性进行了测量与研究。在室内办公室 WBAN 环境中搭建了信道测量系统，对中心频率为 10GHz 的具有身体角度变化的场景开展了信道测量活动，获得大量的信道测量数据。基于测量数据，给出了路径损耗、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。研究结果表明：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，通过对另一个大空间室内办公室环境进行测量，验证了所提模型在不同的室内环境下仍然具有适用性。

（2）针对办公室场景中天线在人体不同高度对 WBAN 无线信道传播特性的影响，在该场景下对信道特性进行了测量与研究。在室内办公室 WBAN 环境中搭建了信道测量系统，对中心频率为 10GHz 的具有天线高度变化的场景开展了信道测量活动，获得大量的信道测量数据。基于测量数据，给出了大尺度衰落的统计特性，并针对发送端天线高度变化的情况，提出了一种具有高度影响的路径损耗模型，该模型利用高度因子来修正天线高度变化引入的路径损耗。研究结果表明：路径损耗指数与接收端天线高度呈二次函数关系，由接收端天线高度引起的路径损耗（PLH，Path Loss in Antenna Height）与天线高度之间的关系可以用带有系数的二次函数来表示。

（3）针对医院病房和走廊场景中天线角度对 WBAN 无线信道传播特性的影响，在该场

景下对信道特性进行了测量与研究。模拟医院病房和走廊 WBAN 环境搭建了信道测量系统，在中心频率为 10GHz 的频段下对具有天线角度变化的场景开展了信道测量活动，获得大量的信道测量数据。基于医院病房和走廊场景中的测量数据，提出了一种新的具有接收天线角度因子（AAF，Antenna Angle Factor）的统计路径损耗模型，其中 AAF 用于描述可穿戴或手持设备角度变化对引入的路径损耗。研究结果表明：AAF 与天线角度可以用带有系数的三角函数表示。此外，还给出了两种场景下均方根（RMS，Root Mean Square）时延扩展的统计特性，并提出了一种新的 RMS 延迟扩展估计模型。在该模型中，RMS 延迟扩展为路径损耗的线性函数，并且通过引入正态随机变量来表征测量的 RMS 延迟扩展与线性函数的偏差。最后，通过在不同的医院环境中对测量值与模拟值进行仿真，验证了所提模型的有效性及适用性。

关键词：高频段，无线体域网，室内环境，路径损耗，时延扩展，身体角度，天线高度，天线角度

Abstract

Wireless body area network (WBAN) is a wireless communication technology, which can monitor and record human health information for a long time. It not only can be widely used in the field of health care, but also has a broad applications in daily life, consumption, entertainment, sports and other industries, and most of these applications occur in indoor environments. Since the propagation characteristics of wireless channel are the key to design communication systems, it is of great significance to carry out the research on the propagation characteristics of wireless channels in indoor WBAN scenarios. At present, there are abundant studies on WBAN wireless channel propagation characteristics of low frequency band (Sub-6GHz) at domestic and abroad, while the researches on the propagation characteristics of high-frequency wireless channels are few. In addition, with the access of massive devices in the future and the increasing demand for service quality and instant messaging from users, low-frequency spectrum resources will become increasingly scarce, which will make it inevitable to explore and utilize high-frequency spectrum resources. Therefore, this thesis carries out wireless channel measurement experiments for the indoor WBAN scenarios at 10GHz and obtains a large amount of measured data. Based on the measured data, the propagation characteristics of indoor WBAN wireless channels are studied. The main contributions include:

(1) For the influence of body angle on the propagation characteristics of WBAN wireless channel in office environment, the channel characteristics are measured and studied in this scenario. A channel measurement system has been set up for indoor office WBAN environment. Channel measurement activities have been carried out for scenes with body angle changes at the center frequency of 10GHz, and the extensive channel measured data has been obtained. Based on the measured data, the path loss, the shadow effect and the root mean square (RMS) delay spread of the 10GHz are present, and a novel path loss model with the body angle is proposed, which utilizes the body angle factor to correct the path loss caused by the change of body angle. Research results show that the path loss exponent has a quadratic function relationship with the body angle, the relationship between the path loss caused by the body angle (PBA) 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, another big indoor office environment is measured to verify the applicability of the

proposed model in different indoor environments.

(2) For the influence of antenna height on the propagation characteristics of WBAN wireless channel in office environment, the channel characteristics are measured and studied in this scenario. A channel measurement system has been set up for indoor office WBAN environment. Channel measurement activities have been carried out for scenes with antenna height change in the central frequency of 10GHz, and the extensive channel measured data has been obtained. Based on the measured data, the statistical characteristics of large-scale fading were present, and a path loss model with height impact was proposed to the antenna height change at the transmitter. The model uses the height factor to correct the path loss introduced by the antenna height change. Research results show that the path loss exponent has a quadratic function relationship with the antenna height and the relationship between the path loss caused by the antenna height (PLH) at the receiving end and the antenna height can be expressed as a quadratic function with coefficients.

(3) For the influence of antenna angle on the propagation characteristics of WBAN wireless channel in hospital room and corridor environment, the channel characteristics are measured and studied in this scene. A channel measurement system has been set up for hospital room and corridor WBAN environment. Channel measurement activities have been carried out for scenes with antenna angle change at center frequency of 10GHz, and the extensive channel measured data has been obtained. Based on the measured data in the hospital room and corridor scenarios, a novel statistical path loss model with the angle factor of receiving antenna (called as AAF) were present, where AAF is used to describe the effect caused by change of the angle of a wearable or handheld device on the human body. Research results show that the relationship between the AAF and the antenna angle can be expressed by a trigonometric function with a coefficient. In addition, a novel model for estimating the RMS delay spread is presented, along with the statistical characteristics of the RMS delay spread in two scenarios. In the model, the RMS delay spread is described as a linear function of the path loss, and a normal stochastic variable is introduced and utilized to characterize the deviation of the measured RMS delay spread from the linear function. Finally, the validity and applicability of the proposed model are verified by simulating the measured and simulated values in different hospital environments.

Key words: high frequency band, WBAN, indoor environment, path loss, delay spread, body angle, antenna height, antenna angle

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 室内 WBAN 无线信道传播特性研究现状	3
1.2.1 低频段(Sub-6GHz)室内 WBAN 无线信道传播特性研究现 状	3
1.2.2 高频段室内 WBAN 无线信道传播特性研究现状	4
1.3 本论文的研究工作.....	5
1.4 本论文的组织结构.....	6
第二章 室内 WBAN 无线信道特性及测量建模方法概述	8
2.1 室内 WBAN 无线信道特性概述	8
2.1.1 室内 WBAN 无线信道传播机理	8
2.1.2 室内 WBAN 无线信道特性概述	9
2.2 室内 WBAN 无线信道测量方法概述	10
2.2.1 时域测量法.....	10
2.2.2 频域测量法.....	11
2.3 室内 WBAN 无线信道的大尺度衰落模型	11
2.3.1 路径损耗模型	12
2.3.2 阴影效应模型	13
2.4 室内 WBAN 无线信道的小尺度衰落模型	13
2.4.1 多径传播模型	14
2.4.2 时间色散参数模型	15
2.5 本章小结	15
第三章 办公室场景下身体角度影响的 WBAN 路径损耗建模	16
3.1 引言	16
3.2 信道测量场景及方案	17
3.3 新型路径损耗模型	18
3.3.1 具有身体角度影响的路径损耗模型	18
3.3.2 PBA 及 $N(\theta)$ 的表达式	19
3.3.3 建模和验证	19
3.4 时延扩展	25
3.5 路径损耗模型实验验证	27
3.6 本章小结	30
第四章 办公室场景下高度影响的 WBAN 路径损耗建模	31
4.1 引言	31

4.2 信道测量场景及方案.....	32
4.3 新型路径损耗模型.....	32
4.3.1 具有天线高度影响的路径损耗模型.....	32
4.3.2 PLH 及 $N(h)$ 的表达式.....	32
4.3.3 建模和验证.....	33
4.4 本章小结.....	39
第五章 医院场景下 WBAN 传播特性测量与建模.....	40
5.1 引言.....	40
5.2 信道测量场景及方案.....	41
5.3 新型路径损耗模型.....	43
5.3.1 具有 AAF 的路径损耗模型.....	43
5.3.2 AAF 的表达式.....	43
5.3.3 建模和验证.....	43
5.4 所提 RMS 时延扩展模型	50
5.4.1 时延扩展.....	50
5.4.2 基于路径损耗的 RMS 时延扩展模型	52
5.5 本章小结.....	57
第六章 总结与展望	58
6.1 论文总结.....	58
6.2 未来展望.....	59
参考文献.....	60

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

自 2005 年国际电信联盟（ITU, International Telecommunication Union）正式提出物联网（IoT, Internet of Things）概念以来，IoT 技术取得了飞速的发展^[1-2]。随着第五代移动通信系统（5G, 5th Generation Wireless Systems）商用的加快，IoT 将由碎片化应用进入规模化应用的新阶段，在华为发布的 5G 时代十大应用场景白皮书中就提到了包括智慧城市在内的许多涉及 IoT 的应用场景^[3]。表 1.1 给出了华为发布的 5G 时代 IoT 十大应用场景及其具体应用。

表 1.1 5G 时代 IoT 十大应用场景

应用场景	具体应用
云 VR/AR	实时计算机图像渲染和建模
车联网	远控驾驶、编队驾驶、自动驾驶
智能制造	无线机器人云端控制
智慧能源	馈线自动化
无线医疗	具备力反馈的远程诊断
无线家庭娱乐	超高清 8K 视频和云游戏
联网无人机	专业巡检和安防
社交网络	超高清/全景直播
个人 AI 辅助	AI 辅助智能头盔
智慧城市	AI 使能的视频监控

IoT 是一种通过将物体、人类和网络连接在一起，以达到方便识别、管理和控制为目的的一种与互联网结合的巨大网络。IoT 被认为是 5G 商用的前奏和基础，随着 5G 的发展 IoT 将使用户端的网络连接范围扩大到物体与物体之间，甚至物体与人之间，从而让任何物品都能感知到你的指令，并做出高效的执行。随着 IoT 技术的快速发展，作为 IoT 技术一个重要分支的无线体域网（WBAN, Wireless Body Area Network）也将成为各国重点研究的领域之一。WBAN 是一种用于人体周围或内部设备的无线通信系统^[4]，被广泛应用于医疗保健、日常生活、消费娱乐、体育和军事等领域，尤其是医疗保健领域^[5-6]，随着我国人口老龄化的加速和慢性病患者的增加，WBAN 将在医疗领域发挥巨大作用^[7-8]。

WBAN 通常由一系列传感器节点和一个中心节点组成，这些传感器节点可以被安置在人体的周围、体表或内部。根据放置位置的不同，可以将 WBAN 分为七种应用场景和四种信道模型，具体如表 1.2 所示，表中 S4 和 S6 为视距（LOS, Line of Sight）场景，S5 和 S7 为非

视距（NLOS, Non Line of Sight）场景。如图 1.1 所示，在四种信道模型中，CM1 是指传感器节点和中心节点均为植入设备，均位于人体内部；CM2 是指一类节点是植入设备，位于人体内部，另一类节点为非植入设备，位于人体表面；CM3 是指传感器节点和中心节点均为非植入设备，均位于人体表面；CM4 是指一类节点位于人体表面，另一类节点位于人体外的其他地方，两种节点均为非植入设备。目前 WBAN 的应用主要集中在 CM3 和 CM4 信道^[9]，本文主要研究的就是 CM4 信道。

表 1.2 WBAN 应用场景和信道模型

场景编号	描述	频带	信道模型
S1	植入-植入	402~405MHz	CM1
S2	植入-体表	402~405MHz	CM2
S3	植入-外部	402~405MHz	CM2
S4	体表-体表	13.5/50/400/600/900MHz 2.4GHz/3.1~10.6GHz	CM3
S5	体表-体表	13.5/50/400/600/900MHz 2.4GHz/3.1~10.6GHz	CM3
S6	体表-外部	13.5/50/400/600/900MHz 2.4GHz/3.1~10.6GHz	CM4
S7	体表-外部	13.5/50/400/600/900MHz 2.4GHz/3.1~10.6GHz	CM4

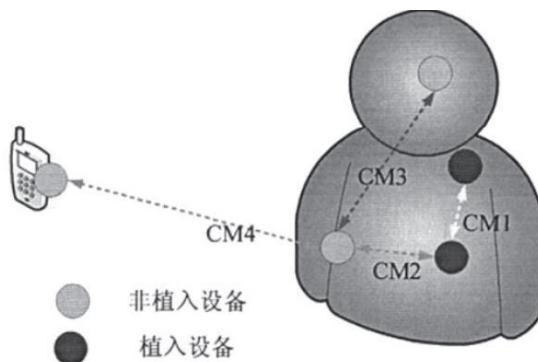


图 1.1 WBAN 信道模型示意图

随着 WBAN 的发展及无线通信设备小型化、智能化、高精度及低功率的实现，各种无线穿戴式产品开始出现，近年来 5G 的发展也激发了人们对诸如智能家居，智慧医疗等 IoT 应用的热情，相关的各种穿戴式设备也受到了消费者的追捧，然而这些穿戴式设备的大量接入不仅会消耗大量的频谱资源，而且为了满足诸如无人驾驶汽车、远程医疗等特殊应用的需求，需要提供更低时延，更高可靠性的传输需求，除此之外，随着穿戴式设备的发展，人们期望穿戴式设备能提供的功能将更加多样和智能化，这就需要提高系统的容量^[10]。不仅如此，未

来，由于手机、平板电脑、智能家居、无人驾驶汽车等大量设备的接入，以及对服务质量和即时通信需求的不断提高，低频频谱资源将逐渐拥挤，频谱资源越来越短缺。而高频频段不仅可以解决上述低频频谱资源短缺的问题，而且高频频段也将提供更大的系统容量、更低的时延及更高的可靠性。

尽管高频频段有着带宽大、传输效率高、空闲频谱资源多等特点，是未来移动通信系统研究的重点，但是其也存在明显的缺点：首先，与低频无线电波相比，高频无线电波的波长更短，导致衍射能力弱，在传播过程中难以绕过各种遮挡物，容易受其影响；其次，由于高频波段的物理特性不同，其在传播过程中衰减和损耗大^[11-12]。因此，对不同高频段、不同应用场景进行信道测量与建模，获得该场景下的无线信道传播特性将对未来移动通信系统的设计提供重要参考。

室内环境是 WBAN 通信的典型应用场景之一，也是人们生产和生活的主要场所，无论是智慧医疗、智能家居，还是智能制造都需要高质量的室内通信系统来保障^[13]。综上所述，研究室内 WBAN 高频通信不仅对 5G 的应用具有重要意义，而且能够推动可穿戴设备产业的发展。

1.2 室内 WBAN 无线信道传播特性研究现状

1.2.1 低频段（Sub-6GHz）室内 WBAN 无线信道传播特性研究现状

WBAN 主要应用于人体，会受到人体姿态和运动方式等因素的影响，除此之外，WBAN 还需要保证人体的健康，不能对人的健康生活造成影响，因此 WBAN 有着与其他通信系统不同的难点和挑战，并且 WBAN 信道传播特性与其他信道传播特性有着较大的区别。目前，我国 5G 主要使用的频段为 FR1 频段，其频率范围为 450MHz~6GHz，即 Sub-6GHz 频段，而国内外已经开展了大量的 Sub-6GHz 频段 WBAN 的信道测量与建模工作。

其中文献[14]给出了 2.45GHz 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，以及测量者四种不同的运动方式时的信道特性。文献[15]利用矢量网络分析仪（VNA, Vector Network Analyzers）测量了 2.4GHz 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[16]在 3~8GHz 的超宽带（UWB, Ultra-Wide Band）频段，对发送端和接收端天线均处于不同人体位置和方向的 B2B 信道的传播特性进行了测量与研究，并将其与离体信道和非体域网信道进行了比较。文献[17]研究了 UWB 频段在 LOS 和 NLOS 时接收端天线位于人体不

同位置对路径损耗及小尺度衰落的影响。文献[18]在 400MHz、900MHz、2.4GHz 和 UWB (3.1~10.6GHz) 频段，分别对工作频点、环境因素及人体的状态对的 WBAN 信道特性的影响进行了研究。文献[19]在 900MHz、2.4GHz 和 3.6GHz 频段，通过使用链路预算计算的接收信噪比（SNR, Signal to Noise Ratio）估计来对 WBAN 在不同频段下提出的几种路径损耗信道模型进行了比较。文献[20]在 UWB 频段，通过在办公室场景对 WBAN CM3 信道进行实地测量，通过测量数据，推导出了该场景下的路径损耗模型和功率延迟谱（PDP, Power Delay Profile）模型，并对其系统性能进行了评估。文献[21]在 4GHz 频段，利用 VNA，对 CM3 信道进行了测量，得到人体上的信道传输函数，并将路径损耗模型与平均功率损耗和峰值功率损耗进行了比较。文献[22-23]在 2.45GHz 频段矿井场景下开展信道测量活动，通过对测量数据的研究发现在路径损耗和均方根（RMS, Root Mean Square）时延扩展随距离增加而增加，相干带宽随距离增加反而减小，LOS 场景下的信道容量高于 NLOS 场景。文献[24]在 2.45GHz 频段，由特制的信道测量设备在办公室环境中分别对耳朵、胸部、腰部、手腕和脚踝进行测量，获得路径损耗和阴影衰落等大尺度衰落特性。文献[25]在 2.45GHz 频段消声室环境中，利用一对无线传感器模块在人体躯干上的各个点对 CM3 信道进行了测量。通过研究表明，在单个载波频率下的响应不仅取决于初始天线响应（由独立的人体测量确定），还取决于整体系统性能。此外，还将测量结果与使用 VNA 的传统技术的测量结果进行了比较。文献[26]在 2~6GHz 频段利用无线信道测量平台，对 6 种不同测量位置的 WBAN 无线信道进行测量，获得了该场景下的小尺度衰落特性。文献[27-28]在 402MHz 和 868MHz 频段，对 CM1 信道进行了测量活动，研究发现，无线传感器节点的辐射特性与不同人体及传感器的位置密切相关，并且女性体内的传感器节点的辐射效率较高。

1.2.2 高频段室内 WBAN 无线信道传播特性研究现状

随着通信技术的发展 Sub-6GHz 频段频谱资源已逐渐紧张，而且智能家居、可穿戴设备和无人驾驶等新技术的逐渐应用，Sub-6GHz 频段频谱资源将越来越短缺，无法满足未来 WBAN 应用的需求，而高频段的低频谱占用率和大带宽可以解决上述低频频谱的问题。因此，开发高频段资源将成为业界主流。目前，国内外对高频段室内 WBAN 无线信道的传播特性研究较少。

其中文献[29]针对 6~8.5GHz 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[30]对 6~8.5GHz 频段的 WBAN 离体信道，提出了一种新的频域自回归模型，其可以用于表征医院环境下 WBAN 离

体信道的信道脉冲响应。文献[31]在 5.9~7.2GHz 频段，对室内环境下当收发两端天线均佩戴在位于不同人体部位时的路径损耗进行了研究，同时还对运动状态及身体姿势对信道特性的影响进行了研究。文献[32]对 94GHz 频段 CM3 信道进行测量活动，重点对腰部到躯干和头部到肩部的链路进行了研究，利用射线追踪及实际测量的方法建立了信道模型。文献[33]对 60GHz 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[34]研究了 28GHz 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，并建立了身体高度相关的路径损耗模型。文献[35]分析了 28GHz 频段人体在行走和跑步过程中，腰到胸、腰到膝盖、腰到手腕、腰到头等情况下的路径损耗波动，并建立了 WBAN 动态信道路径损耗模型。

1.3 本论文的研究工作

室内场景已经逐渐成为 IoT 应用的主要战场，在上节已经对目前国内外室内场景下无线信道的传播特性的研究进行了介绍。然而，目前针对室内 WBAN 的传播特性的研究工作还存在测量频段较低、一些会对 WBAN 传播特性造成影响的因素还未考虑以及路径损耗模型不够精确的问题。因此，本文针对上述问题进行了如下工作：

第一，目前对于室内 WBAN 的信道传播特性的研究频段大多数都集中在低频段，室内高频段 WBAN 的信道传播特性的研究相对较少，而频段的高低必然会导致无线信道传播特性的不同。除此之外，室内场景环境相对复杂，不同的场景也会导致传播特性有一定的差异。因此，本文选取了室内办公室、医院病房和走廊场景，根据不同的场景设计合适的测量方案，搭建信道测量系统，在 10GHz 频段开展了不同的信道测量工作。

第二，在日常生活中人体的方向并不是固定的，它会旋转到不同的角度，人体上的可穿戴设备等也会随着身体角度的改变而改变，这必然会引起信道传播特性的改变。因此，本文通过在模拟办公室场景中搭建相关的测量场景和测量系统，获得大量的测量数据，然后对测量数据进行处理，以获得路径损耗、阴影效应、功率延迟谱和 RMS 时延扩展。通过对路径损耗的分析，建立了与人体角度相关的路径损耗模型，通过对阴影衰落的统计参数进行分析，并与实际测量数据进行了比较，验证了所提路径损耗模型具有较高的准确性，此外还在另一处大空间的室内办公室场景进行了相同的测量活动以验证模型具有适用性。

第三，除了上述人体角度会对信道传播特性产生影响之外，在实际生活中穿戴设备等在人体上的高度不是固定的，通常会位于人体不同位置，这种天线高度的变化也会对信道传播特性产生一定的影响。因此，本文在模拟办公室场景中搭建相关的测量场景和测量系统，以

获得大量的测量数据，然后对测量数据进行处理，获得路径损耗、阴影效应。通过对路径损耗的分析，建立了与人体高度相关的路径损耗模型，通过对阴影衰落的统计参数进行分析，并与实际测量数据进行了比较，验证了所提路径损耗模型具有较高的准确性。

第四，除了上述身体角度及高度会对信道传播特性产生影响外，在实际的场景中，与 WBAN 的实际应用相关的人类可穿戴设备及手持设备等的方向并不是固定的，人体活动方式、姿势或佩戴方式会对其产生影响。这将导致位于人体上的天线的角度发生变化，信道的传播特性也将改变。因此，本文通过在模拟病房和走廊场景中搭建相关测量场景及测量系统，获得大量实测数据，然后对获得的实测数据进行处理，得到了路径损耗、阴影效应、功率延迟谱和 RMS 时延扩展。通过对路径损耗的分析，建立了天线角度相关的路径损耗模型并通过对比阴影衰落的统计性参数的分析及其与实际测量数据的比较，验证了所提路径损耗模型具有较高的精确性。此外，通过对 RMS 时延扩展和路径损耗的分析建立了与路径损耗相关的 RMS 时延扩展模型，将由模型得出的 RMS 时延扩展模拟值与实际测量的 RMS 时延扩展值相比较，发现该模型具有良好的准确性。

1.4 本论文的组织结构

本论文旨在研究高频段室内场景下的 WBAN 无线信道传播特性，通过分别对室内办公室场景、医院病房和走廊场景开展信道测量的方法，获得了不同场景下的信道传播特性。具体各个章节内容安排如下：

第一章是绪论部分，首先简单介绍了未来 IoT 在各个领域的应用场景，其次说明了属于 IoT 技术一个重要分支的 WBAN 在高频段室内场景下的信道传播特性进行研究的重要性，然后分别总结了低频段和高频段室内 WBAN 场景下的无线信道传播特性研究现状，最后简单的说明了本论文的研究内容和章节安排。

第二章首先对室内 WBAN 无线信道的传播机理和特性进行了简单的概述，然后介绍了时域测量法和频域测量法这两种常见的 WBAN 无线信道测量方法，最后从大尺度衰落和小尺度衰落两个角度介绍了常见的 WBAN 无线信道模型，为后续高频段室内 WBAN 无线信道传播特性的测量与建模奠定基础。

第三章针对室内办公室场景，在对数距离路径损耗模型的基础上，提出了一种具有身体角度影响的路径损耗模型，并设计了实验方案，在 10GHz 频段开展了信道测量活动，该模型解决了室内环境下当穿戴设备随身体的转动而引入的额外路径损耗问题。基于大量的测量数据，对得到的数据进行拟合得到相关的模型参数，并与对数距离路径损耗模型进行了对比，

该模型能够更准确地反映室内办公室环境中当身体角度变化时的路径损耗。此外还对该场景下的小尺度衰落进行了简单的研究。

第四章针对室内办公室场景，考虑到各种穿戴设备会位于人体不同部位，其高度也会不同，因此在对数距离路径损耗模型的基础上，提出了一种具有天线高度影响的路径损耗模型，该模型解决了室内环境下当穿戴设备在人体不同高度而引入的额外路径损耗问题，通过设计测量方案，在 10GHz 频段开展了信道测量活动，获得大量实测数据，基于大量的测量数据，对得到的数据进行处理得到相关的模型参数。然后将对数距离路径损耗模型与该模型进行了对比，发现该模型能够更准确地反映室内办公室环境中当天线高度变化时的路径损耗。

第五章针对医院病房和走廊场景，在对数距离路径损耗模型的基础上，提出了一种在 10GHz 频段的与接收端天线角度相关的路径损耗模型，该模型解决了医院病房和走廊场景中因穿戴设备或手持设备受到用户活动方式和姿势或佩戴方式的影响其角度发生变化而引入的额外路径损耗问题。依据在病房和走廊场景下设计的测量方案，在 10GHz 频段开展了信道测量活动，获得了大量的实测数据，基于大量的测量数据，对得到的数据进行拟合得到相关的模型参数，并与对数路径损耗模型进行了对比，验证了模型的准确性。除此之外，还建立了一种与路径损耗相关的 RMS 时延扩展模型，并将通过模型得到的 RMS 时延扩展模拟值与其测量值进行了对比，发现测量 RMS 时延扩展值与模拟 RMS 时延扩展值的均值与标准差相差较小，证明了本文提出了路径损耗相关的 RMS 时延扩展模型的准确性。

第六章对本文所做工作进行了总结和展望，首先对本文的主要工作和研究内容进行了总结，然后对本文下一步的研究和工作内容进行了展望。

第二章 室内 WBAN 无线信道特性及测量建模方法概述

无线通信是指利用无线电信号进行信息传输的一种通信方式。在信息传输过程中环境因素必然会对无线电信号造成影响，一般来说室内环境相比于室外环境来说会更加复杂，因为，室内环境中存在更多的影响因素（比如：家具、人的密度和状态、墙壁的材料以及设备的高度，甚至其他设备的干扰等）。而对于室内 WBAN 场景，其收发端天线放置在人体上或人体内部，人体复杂的电磁特性会对无线电信号造成一定的损耗。尽管如此，无线电信号在室内 WBAN 场景下也会形成各种传播机理，如反射、绕射、折射和散射等。而通信系统的设计和传输技术的研究需要对 WBAN 无线信道传播特性进行研究为其提供理论指导和支撑。通常，无线信道建模的基础就是无线信道的传播特性，其信道模型能够反映无线电信号基础的传播规律。因此，在室内 WBAN 环境进行信道测量与建模来研究 WBAN 无线信道的传播特性非常重要。

本章的内容安排如下：首先，在 2.1 节对室内 WBAN 无线信道的传播机理及其信道特性进行了概述；其次，在 2.2 节分别对时域和频域的 WBAN 无线信道的测量方法进行了介绍；再次，在 2.3 节介绍了常见的 WBAN 无线信道的大尺度衰落模型，包括路径损耗模型和阴影效应模型；然后，在 2.4 节介绍了多径传播模型和时间色散参数模型这两种室内 WBAN 无线信道的小尺度衰落模型；最后，2.5 节是对本章所述内容的总结。

2.1 室内 WBAN 无线信道特性概述

2.1.1 室内 WBAN 无线信道传播机理

进行 WBAN 无线信道测量与建模工作首先需要了解无线信道的传播特性，而了解无线信道的特性就需要了解无线信道的传播机理，一般无线电信号在传播过程中主要有：直射、反射、绕射（衍射）、散射和透射五种传播机理。当无线电信号直接从发送端到达接收端，在传播过程中没有遮挡物的阻碍时，就是一种直射传播也被称为视距传播；而当无线电信号传播过程中受到障碍物的阻挡，通过反射、绕射和散射等一种或多种传播机理到达接收端时，就是非视距传播^[36]。

通常，频率越高，无线电波的波长越短，在相同条件下，其绕射能力和穿透障碍物能力越弱，其应用领域也不同^[37]。

2.1.2 室内 WBAN 无线信道特性概述

在室内 WBAN 场景中，除了人体的影响外，还会存在多种障碍物，因此，无线电信号在传输过程中不仅会形成直射分量，还会形成反射、绕射、散射以及透射等分量，这些幅度、相位及时延不同的分量到达接收端时，经过相互叠加就会形成幅度和相位等起伏、不稳定的信号，也就是“衰落”，图 2.1 给出了信道衰落特性的分类。

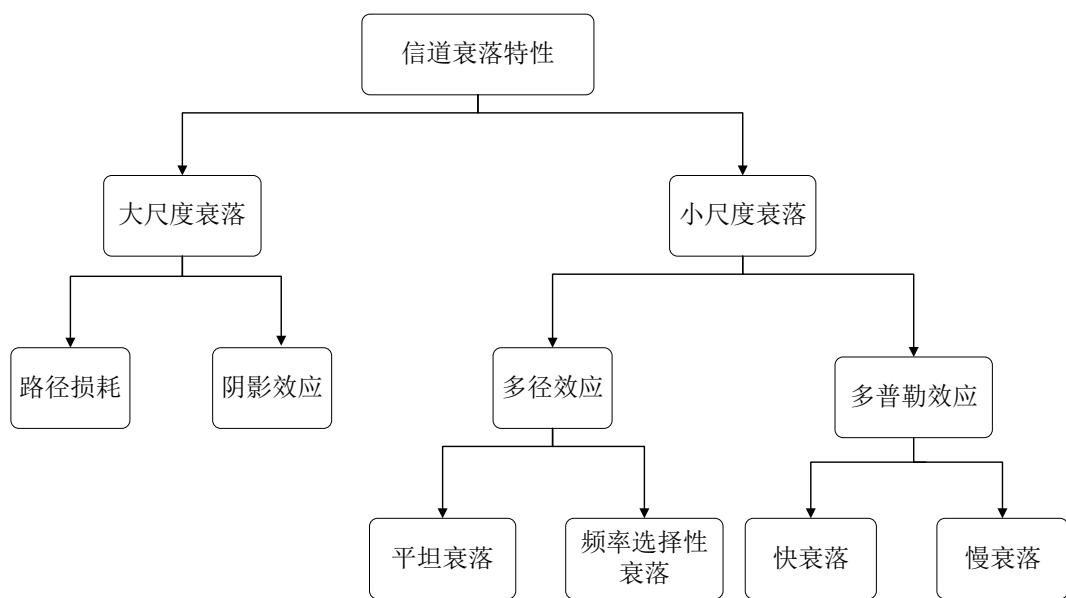


图 2.1 衰落特性分类

(1) 大尺度衰落

当无线电信号通过一段远大于其波长的距离时，就会产生大尺度衰落，这是由信号的路径损耗和传输过程中的辐射扩散造成的。一般可以用路径损耗来表示，其可以反映宏观范围内接收信号功率均值的变化。

除此之外，在实际的无线电信号传播过程中会存在由于障碍物阻挡所形成的无线电信号的阴影区，该阴影区导致信号场强中值的缓慢变化从而引起的衰落即为阴影衰落，这是一种慢衰落过程。阴影衰落不同于路径损耗，其影响是平缓而持续的，因此，在对数距离路径损耗模型中，阴影衰落是直接叠加在路径损耗上的。

(2) 小尺度衰落

当传输信道在极短时间或极短距离上变化时，就会出现小尺度衰落，这是由于无线电信号在传输过程中受到附近障碍物的反射、衍射和散射，从而导致其振幅或相位发生快速变化。其有两种表现机制：多径效应和多普勒效应^[36]。

在室内场景中，由于用户的移动速度一般小于 5Km/h，因此多普勒效应可以忽略不计。

2.2 室内 WBAN 无线信道测量方法概述

获得室内场景下的 WBAN 无线信道特性最直接最有效的方法就是进行信道测量。根据进行信道测量时所获得的数据的不同，可以将无线信道测量方法分为时域测量法和频域测量法。

2.2.1 时域测量法

时域测量法就是直接对信道的冲击响应进行测量，根据测量系统发送的是周期性的短脉冲还是伪随机序列（PN，Pseudo-Noise），可以将时域测量法分为脉冲测量法^[38-39]和相关测量法^[40]。

（1）脉冲测量法

脉冲测量法是将短脉冲作为发送端发射的探测信号，并周期性的重复发送，当发送的短脉冲周期较短时，接收端接收到的信号就可以近似的看做冲激响应^[41]，其系统框图如图 2.2 所示。

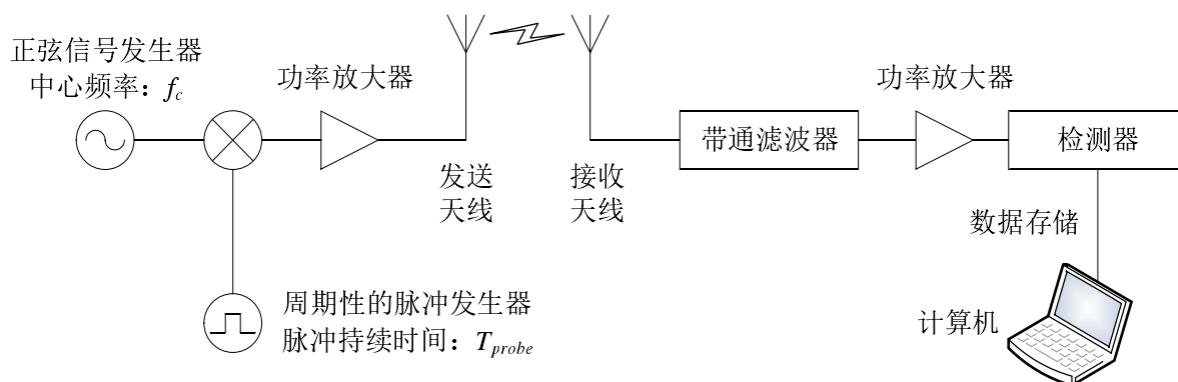


图 2.2 脉冲测量法系统框图

（2）相关测量法

相关测量法利用 PN 序列自相关特性接近于冲激函数的特性，将其作为发送端发射的探测信号。通过在接收端采用与发送端一样的 PN 序列进行相关运算，相关测量法克服了脉冲测量法发送端发射的探测信号 PAPR 大的缺点，其系统框图如图 2.3 所示。

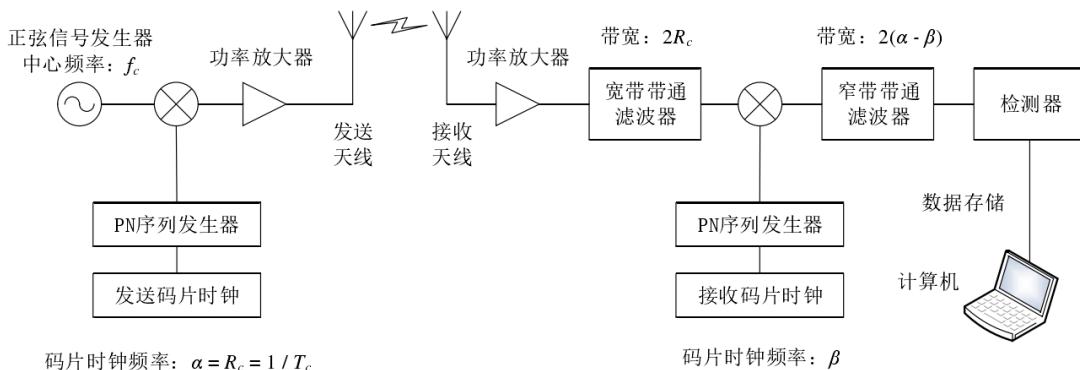


图 2.3 相关测量法系统框图

2.2.2 频域测量法

离散傅里叶反变换 (IDFT, Inverse Discrete Fourier Transform) 可以将频率响应变换为信道冲激响应^[42-43]，因此可以通过使用 VNA 等仪器获得测量频段的频率响应从而间接获得信道冲激响应。如图 2.4 给出的基于 VNA 的频域测量法系统框图所示，假设发送端信号为 $X(w)$ ，接收端信号为 $Y(w)$ ，将发送端信号与接收端信号进行比较即可得到 S 参数 S_{21} ，即信道复频率响应，然后对复频率响应进行 IDFT 即可得到信道冲激响应。

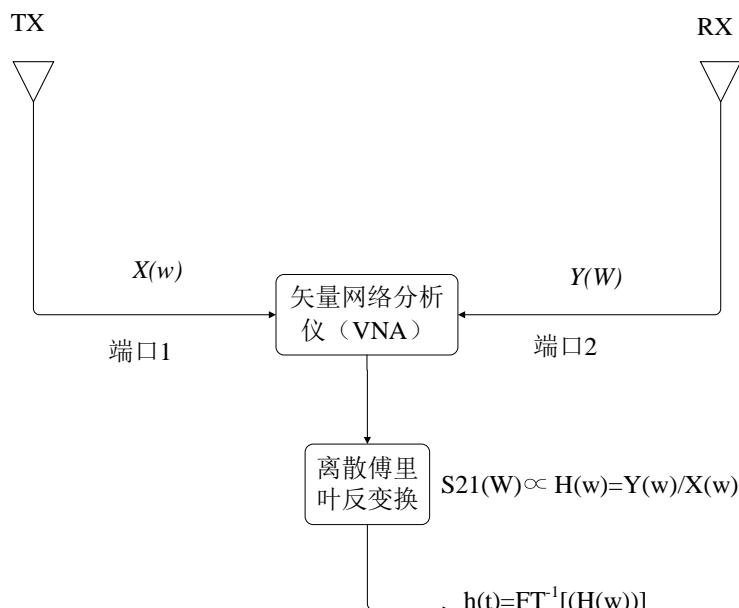


图 2.4 基于 VNA 的频域测量法系统框图

2.3 室内 WBAN 无线信道的大尺度衰落模型

由于大尺度衰落特性主要由路径损耗和阴影衰落来描述，因此 2.3 节将介绍一些常见的路径损耗模型和阴影效应模型。

2.3.1 路径损耗模型

(1) 自由空间路径损耗模型

自由空间路径损耗模型是理想状态下的没有任何系统损耗的最简单、最原始的路径损耗模型^[44]。现有的大多数路径损耗模型都是在自由空间路径损耗模型的基础上进行修正得到的，其表达式为：

$$PL(d) = 20\log_{10}\left(\frac{4\pi fd}{c}\right) = 20\log_{10}\left(\frac{4\pi}{c}\right) + 20\log_{10}(f) + 20\log_{10}(d) \quad (2.1)$$

其中， d 为发送端和接收端天线之间的距离， f 为发送的无线电信号的频率， c 为光速。从式(2.1)可以看出，路径损耗只频率和收发端之间的距离有关，是一种理想模型，没有可变参数来描述当传播环境变化时路径损耗的变化。因此，为了区分不同传播环境下的路径损耗，在自由空间路径损耗模型的基础上通过引入路径损耗指数 n 来对其进行修正，这就是对数距离路径损耗模型。

(2) 对数距离路径损耗模型

一般而言，对数距离路径损耗模型^[45-46]可以表示为：

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n\log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (2.2)$$

其中， $PL(d_0)$ 表示 d_0 处的路径损耗， d_0 为参考距离，通常选取的参考距离为 $d_0=1m$ ，一般而言， $PL(d_0)$ 可以直接通过式 (2.3) 获得。

$$PL(d_0) = 20\log_{10}\left(\frac{4\pi d_0}{c}\right) \quad (2.3)$$

(3) 多斜率路径损耗模型

当收发两端的天线处于从一种场景移动到另一种场景或者收发两端之间的距离足够远等周围环境发生巨大变化的场景时，路径损耗的斜率即路径损耗指数 n 可能会变化，这将导致路径损耗的变化趋势将不再是直线，而变为折线，从而导致中间存在断点。此时，需要一个多斜率模型来描述该场景下的路径损耗，其中，最简单的多斜率路径损耗模型就是双斜率路径损耗模型^[47]，可以表示为：

$$PL(d) = \begin{cases} PL_1 + 10n_1 \log_{10}(d), & d \leq d_{bp} \\ PL_2 + 10n_1 \log_{10}(d_{bp}) + 10n_2 \log_{10}\left(\frac{d}{d_{bp}}\right), & d > d_{bp} \end{cases} \quad (2.4)$$

其中, PL_1 为第一段距离的参考路径损耗, PL_2 为第二段距离的参考路径损耗, n_1 表示第一段距离的路径损耗斜率, n_2 表示第二段距离的路径损耗斜率, d_{bp} 表示断点距离。

(4) 线性衰减路径损耗模型

从上述三种路径损耗模型中可以看出, 收发端之间的距离 d 在式中都是以 $\log_{10}(d)$ 或 $\log_{10}(d/d_0)$ 的形式存在的。然而, 有实验结果表明, 在室内收发端位于不同楼层的场景中, 路径损耗也可以建模为在式 (2.2) 的基础上加上随距离线性变化的附加路径损耗值的形式^[48], 其可以表式为:

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + \alpha d \quad (2.5)$$

其中, α 是单位为 dB/m 的附加因子参数。

2.3.2 阴影效应模型

在实际场景中, 即使收发端距离不变, 测量的路径损耗也会随着周围环境的变化而变化。通常, 测量的路径损耗值会在平均路径损耗值的拟合曲线周围波动, 在信道模型中用阴影衰落来描述此现象。一般而言, 会将阴影衰落建模为均值 $\mu = 0$ dB、标准差为 σ 的正态分布随机变量^[45], 一般用 X_σ 表示, 其概率密度函数 (PDF, Probability Density Function) 表示为:

$$f(X_\sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(X_\sigma - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.6)$$

2.4 室内 WBAN 无线信道的小尺度衰落模型

小尺度衰落特性主要由多径效应和时变特性来决定。多径效应是指无线电信号经过反射、绕射、透射和散射等形成不同传播路径, 各路径到达接收端的时间不同, 导致接收端信号失真, 甚至产生错误。时变特性主要用于描述传播环境中发送端和接收端天线或其他物体的运动对接收端信号造成的影响。一般来说, 在室内环境下时变特性的影响较小, 因此, 本论文主要对多径效应进行研究。多径效应可以通过多种方式来描述, 包括时域角度的信道冲激效应、功率延迟剖面、平均时延和 RMS 时延扩展等时间色散参数, 以及频域方面的相干带宽和信道频率响应。由于, 傅里叶变换 (FT, Fourier Transform) 和经验关系可以实现频域与时域之间的转换, 因此, 2.4 节将介绍常见的多径传播模型和时间色散参数模型。

2.4.1 多径传播模型

(1) 双径功率延迟剖面模型

双径功率延迟剖面模型只考虑了两种传播路径，即发送端和接收端之间无障碍的直射路径以及无线电信号只经过一次反射就到达接收端的传播路径^[49]，其可以表示为：

$$P(\tau) = p_1 \delta(\tau) + p_2 \delta(\tau - \tau_{ref}) \quad (2.7)$$

其中， p_1 和 p_2 分别表示直射路径和反射路径的功率，其中直射路径和反射路径的时延分别为 0 和 τ_{ref} 。

(2) 指数功率延迟剖面模型

指数功率延迟剖面模型认为随时延的增加，多径功率将呈指数衰减^[49]，其可以表示为：

$$P(\tau) = P_0 e^{-\frac{\tau}{\tau_0}} \delta(\tau - \tau_k) \quad (2.8)$$

其中， P_0 表示第一条由发送端到达接收端的信号的直射路径功率， τ_0 表示信号由发送端到达接收端的各个不同路径的功率的衰减快慢， N 为信道多径的数量， τ_k 为第 k 条信号由发送端到达接收端的路径的功率。

实际上小尺度衰落具有随机性，而上述两种多径传播模型均为理想化的模型，因此，有必要在上述两种多径传播模型的基础上进行演变与修正以获得具有更高准确性和更大适用范围的多径传播模型。

(3) Turin 信道冲激响应模型

Turin 信道冲激响应模型假设无线信道的所有参数都是随机变量，并且随机变量都服从一定的分布，而且信道冲激响应模型可以用时变的线性滤波器表示^[50]，因此，其可以表示为：

$$h(t, \tau) = \sum_{k=1}^{N(t)} a_k(t) \delta(\tau - \tau_k(t)) e^{j\theta_k(t)} \quad (2.9)$$

其中， t 表示对信道进行测量的时刻， $N(t)$ 为信道多径的数量， τ 为信道冲激响应时延， k 为第 k 条由发送端到达接收端的信号的传播路径， $a_k(t)$ 、 $\theta_k(t)$ 和 $\tau_k(t)$ 分别表示服从对数正态分布的幅度、范围为 $[0, 2\pi)$ 的均匀分布的相位和泊松分布的信道时延。

通常，在室内环境中，如果不考虑信道的时变特性，就可以将式 (2.9) 中的 t 去掉，则可以得到时不变信道冲激响应模型：

$$h(\tau) = \sum_{k=1}^N a_k \delta(\tau - \tau_k) e^{j\theta_k} \quad (2.10)$$

经过对该信道冲激响应模型进行修正和演变，可以得到现有的大多数信道冲激响应模型和功率延迟剖面模型。

2.4.2 时间色散参数模型

时间色散参数通常由最大附加时延扩展、平均附加时延和时延扩展来描述，上述参数均由 PDP 来定义，RMS 时延扩展为 PDP 二阶矩的平方根，是最常用的时间色散参数，其可以反映信道多径衰落的程度。RMS 时延扩展一般被建模为服从正态分布、对数正态分布和 Gamma 分布等分布的随机变量^[51-52]。在建模过程中，需要根据实际情况选取最适合的分布作为 RMS 时延扩展的模型。

2.5 本章小结

本章首先对 WBAN 无线信道传播机理进行了简单的介绍，并从大尺度衰落和小尺度衰落两个角度对 WBAN 无线信道传播特性进行了简单的概述；接着从时域和频域对 WBAN 无线信道测量方法进行介绍，其中，时域测量方法主要包括脉冲测量法和相关测量法，频域测量法主要采用基于 VNA 的测量方法；然后介绍了室内 WBAN 场景下的主要由路径损耗和阴影衰落描述的大尺度衰落模型；最后介绍了室内 WBAN 场景下的常见的包括多径传播模型和时间色散参数模型在内的小尺度衰落模型。本章介绍的 WBAN 无线信道传播机理和特性、测量方法以及传播模型将为后续的高频段室内 WBAN 无线信道测量和建模工作奠定基础。

第三章 办公室场景下身体角度影响的 WBAN 路径损耗建模

本章主要研究的是高频段办公室场景下的 WBAN 无线信道传播特性，通过频域测量法获得大量的测量数据。针对 WBAN 收发端天线一端位于人体上的特殊场景，考虑到对数距离路径损耗模型并没有包括身体旋转角度的影响，只考虑了收发端距离对路径损耗的影响，为此，本文提出了一种新型的具有身体角度影响的路径损耗模型，并通过多种方法将该模型与传统的对数距离路径损耗模型进行对比，发现所提路径损耗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。此外，还对高频段办公室场景下 WBAN 的小尺度衰落进行了研究。

3.1 引言

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。然而，由于各种个人终端设备、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。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，探索高频段 WBAN 通信具有重要的意义。

办公室场景是 WBAN 的典型应用场景之一，是人们生产生活的主要场景。随着 WBAN 的迅速发展，其已广泛应用于医疗保健、消费电子、娱乐、体育、军事等领域，在这些领域中办公室场景将是其主要应用场景。因此研究高频段办公室场景下的 WBAN 通信具有重要意义。由于信道传播特性是设计通信系统的关键，为此要必要研究高频段室内 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 Sub 6GHz 频段进行探索的^[14-28]，而 6 GHz 及以上的高频段室内 WBAN 信道传播特性的研究较少^[29-35]。然而，在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^[14-35]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。

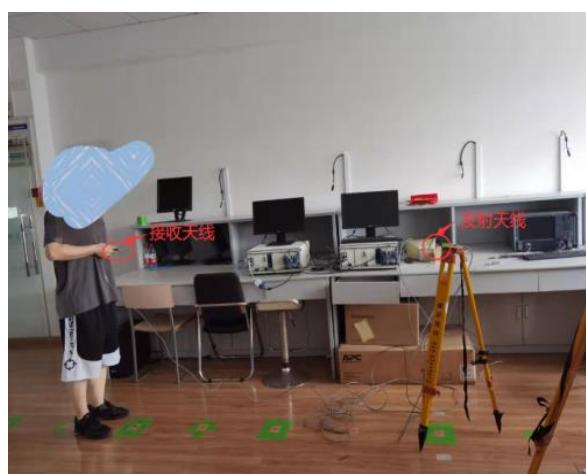
为此，本章将基于办公室 WBAN 中具有身体角度变化的场景，对中心频率为 10GHz 的频段进行测量，获取大量的测量数据。基于测量数据，建立了一种新型的具有身体角度影响的路径损耗模型，并分析了身体角度以及收发端距离对路径损耗的影响，并且给出了该场景

的小尺度衰落统计特性。

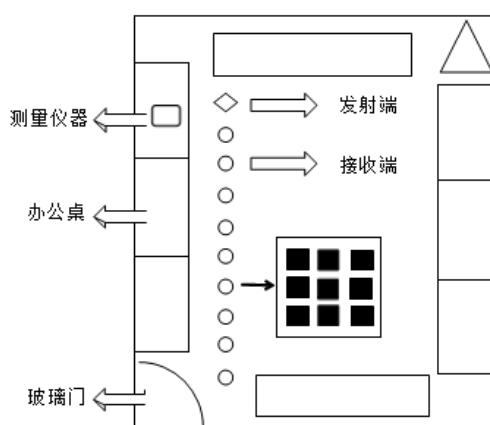
本章其余内容安排如下：首先，3.2 节介绍了信道测量场景及方案；其次，3.3 节给出了所提路径损耗模型和由身体角度引起的路径损耗（PBA，Path Loss in Body Angle）的具体表达式，并对所提模型进行了分析与验证；然后，3.4 节详细分析了小尺度衰落的统计特性；再次，3.5 节通过对另一个大空间室内办公室环境进行相同的测量活动，验证了所提模型在不同的室内环境下仍然适用；最后 3.6 节给出了本章小结。

3.2 信道测量场景及方案

测量环境的实测场景图及示意图如图 3.1 (a) (b) 所示。本测量是在南京邮电大学物联网大楼第五层的一间房间 ($7\text{m} \times 8.1\text{m} \times 3.1\text{m}$) 内进行的，室内物体主要有桌子，电脑等，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) 实测场景



(b) 测量场景示意图

图 3.1 测量场景实测图及示意图

本文所使用的的是频域测量法，其系统框图如图 2.4 所示。该测量系统由是德科技生产的 VNA 生成扫频信号，通过 5m 长的低损耗同轴电缆由发射天线发射，由接收天线接收信号后，通过一根长度为 10m 的同轴电缆将其送回 VNA。其中同轴电缆的损耗为 0.6dB/m，接收天线和发射天线均为 3cm×3cm 的可穿戴贴片天线，增益为 5dBi。测量数据存储在笔记本电脑中用于后续分析。表 3.1 给出了测量系统的参数。

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，接收端天线放置在人体腰部位置，高度均为 1m，如图 3.1 (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 1m 移动到 5m，收发端之间共有 9 个测量点，每个测量点间隔为 0.5m，在每个测量点中，使用 10 厘米的间距将该区域划分为 9 个不同的网格点。接收端人体在每个网格点处都会从 0° 旋转到 360°，间隔为 45°，在每个网格点的每个不同角度都多次重复测量。其中 0 度° 或 360° 为 PBA 的参考身体角度。

表 3.1 VNA 参数设置

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

3.3 新型路径损耗模型

3.3.1 具有身体角度影响的路径损耗模型

通常，路径损耗模型是对数距离函数，其可以表示为

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (3.1)$$

其中， $PL(d_0)$ 表示在参考距离 d_0 处的路径损耗。 n 是路径损耗指数， d 是收发天线之间的距离。 X_σ 表示阴影衰落，其服从均值为零，标准差为 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 PBA 和路径损耗指数来对式 (3.1) 中的路径损耗模型进行修正，且修正后的新型路径损耗模型为

$$PL(d, \theta) = PL(d_0) + 10N(\theta) \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + PBA + X_\sigma \quad (3.2)$$

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。

3.3.2 PBA 及 $N(\theta)$ 的表达式

(1) PBA 的表达式

由身体角度引入的路径损耗 PBA 可以建模为三角函数

$$PBA(\theta) = A \sin\left(\frac{\theta}{B}\right) \quad (3.3)$$

其中, A 为 PBA 表达式的系数, 此系数与距离相关, 可以表示为距离的函数。 B 为常数。

(2) $N(\theta)$ 的表达式

与身体角度 θ 相关的路径损耗指数 $N(\theta)$ 可以建模为二次函数

$$N(\theta) = a_1\theta^2 + b_1\theta + c_1 \quad (3.4)$$

其中, a_1 、 b_1 、 c_1 是二次函数的系数。

3.3.3 建模和验证

通过对复频率响应数据进行平均^{[14][53]}, 可以获得平均路径损耗, 计算方法如下

$$PL(d_0, \theta) = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |H(f_m, t_n; d, \theta)|^2 \quad (3.5)$$

其中 $H(f_m, t_n; d, \theta)$ 是距离 d 和身体旋转角度 θ 的复频率响应。 f_m 是第 m 个离散频率点, M 是离散频率点的个数。 t_n 表示某个网格点上某个角度的第 n 次测量, N 表示某个网格点上某个角度的总测量次数。参考路径损耗 $PL(d_0)$ 是在参考距离 $d_0=1\text{m}$ 处的初始路径损耗值。

图 3.2 给出了不同身体角度在不同距离时的路径损耗。从图可以看出, 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, 这可能是由于此时信道中的大尺度衰落主要由身体遮挡所造成的, 因此身体角度对路径损耗的影响显著, 而对身体角度的相关研究有望提高路径损耗模型精度。

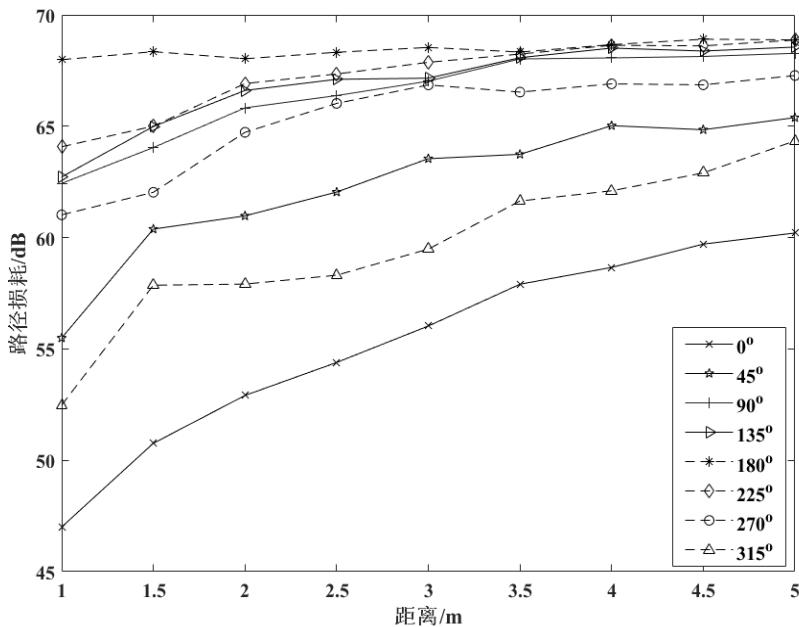


图 3.2 不同身体角度在不同距离时的路径损耗

(1) PBA 的拟合

图 3.3 给出了不同距离处 PBA 与身体角度之间的关系。通过对测量数据的研究，可以发现在每个不同的距离处，PBA 的值都是随着身体角度的增大而增大，到 180° 达到最大，随后随着身体角度的增大而减小，因此，采用最小二乘法 (LS, Least Squares) 对三角函数和幂函数与不同距离处的路径损耗进行拟合。结果表明，三角函数具有最好的拟合性能。因此，PBA 被建模为式 (3.3) 所示的三角函数。

由于式 (3.3) 中的系数 A 与距离有关。因此，表 3.2 给出了不同距离时系数 A 的值，通过对表 3.2 中系数 A 的值进行研究发现其大致符合单调递减的变化趋势，因此，使用 LS 对系数 A 和收发端距离进行拟合，如图 3.4 所示。从图可以看出，系数 A 与收发端距离之间呈单调递减的指数函数关系，可以表示为

$$A(d) = a_2 e^{-b_2 d} + c_2 \quad (3.6)$$

其中， d 表示接收端和发送端之间的距离， a_2 、 b_2 、 c_2 为指数函数的三个系数，在此，其数值分别为 21.04、0.5254、7.438。

综上对 PBA 的分析可以得到与身体角度和收发端距离联合相关的 PBA 的表达式，其表示为

$$PBA(d, \theta) = (a_2 e^{-b_2 d} + c_2) \sin\left(\frac{\theta}{B}\right) \quad (3.7)$$

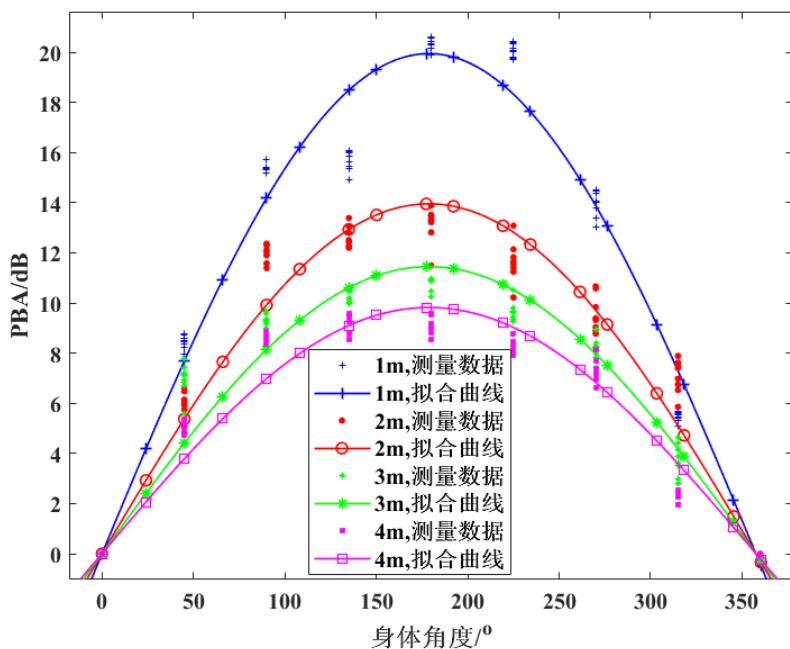
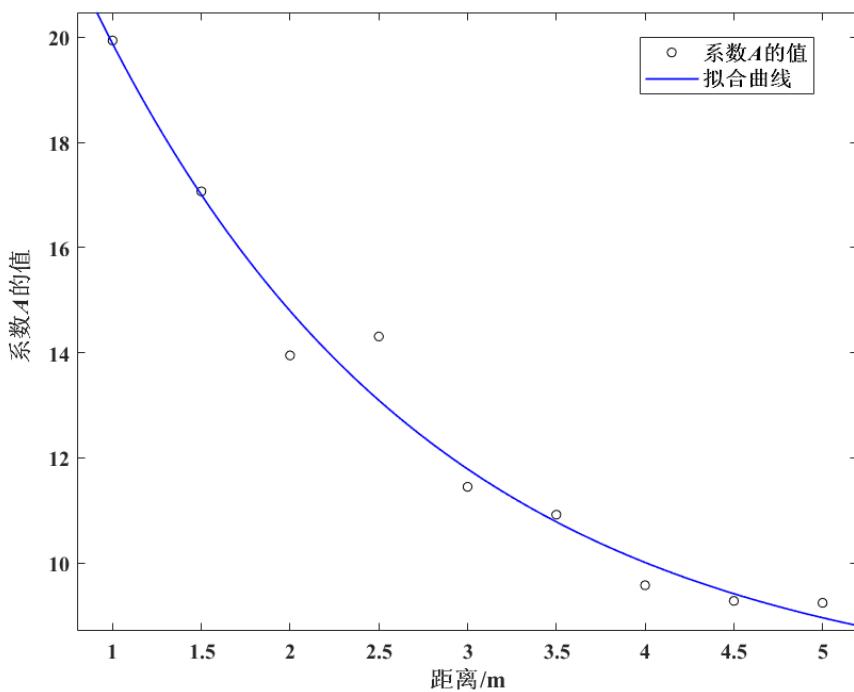


图 3.3 不同距离处 PBA 与身体角度的关系

表 3.2 不同距离时系数 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	/	/

图 3.4 系数 A 与收发端距离的关系

(2) $N(\theta)$ 的拟合

通过对不同角度的路径损耗进行研究发现不同身体角度处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，如表 3.3 所示。这可以用无线传播理论解释，当身体角度由 0° 向着 180° 旋转时，接收端接收到的来自于折射、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^[54]，而从图 3.2 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，因此，路径损耗指数存在先减小后增大的趋势，并且在其他文献中也有相似的测量结果^[55-56]。

表 3.3 不同身体角度时的路径损耗指数

身体角度/ $^\circ$	路径损耗指数	身体角度/ $^\circ$	路径损耗指数
0	1.905	225	0.7196
45	1.341	270	0.9668
90	0.8339	315	1.595
135	0.8497	360	1.947
180	0.4316	/	/

通过对表 3.3 的分析，表明随着身体角度的变化路径损耗指数也会随之改变并随身体角度的增大呈现先减小后增大的趋势。采用 LS 对三角函数和幂函数对路径损耗指数进行拟合，如图 3.5 所示。结果表明，三角函数具有最好的拟合性能。因此， $N(\theta)$ 被建模为式 (3.4) 所示的二次函数。在此， a_1 、 b_1 、 c_1 分别为 4.206×10^{-5} 、 -0.0148 、 1.9 。

(3) 所提路径损耗模型的验证

为了验证所提出模型的准确性，分别给出了对数距离路径损耗模型和所提路径损耗模型与测量数据的拟合曲面，如图 3.6 (a) (b) 所示。通过图 3.6 (a)、(b) 可以看出所提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，这可能是由于对数距离路径损耗模型仅仅与收发端天线之间的距离有关，而并未包含身体角度等环境因素的影响，而本章所提路径损耗模型由于加入了更多环境因素，因此所提路径损耗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 3.7 给出了所提路径损耗模型中阴影衰落 X_σ 的累积概率正态分布拟合曲线，图中正态分布曲线均值为零，标准差 σ 为 0.2559，可以看出阴影

衰落 X_σ 的累积概率符合零均值正态分布。

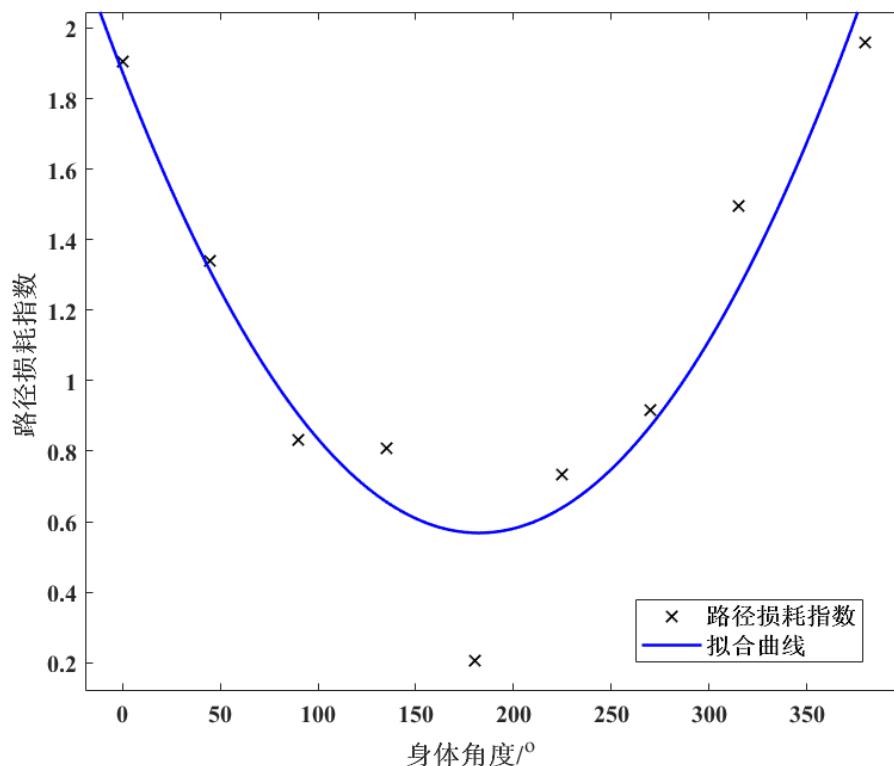
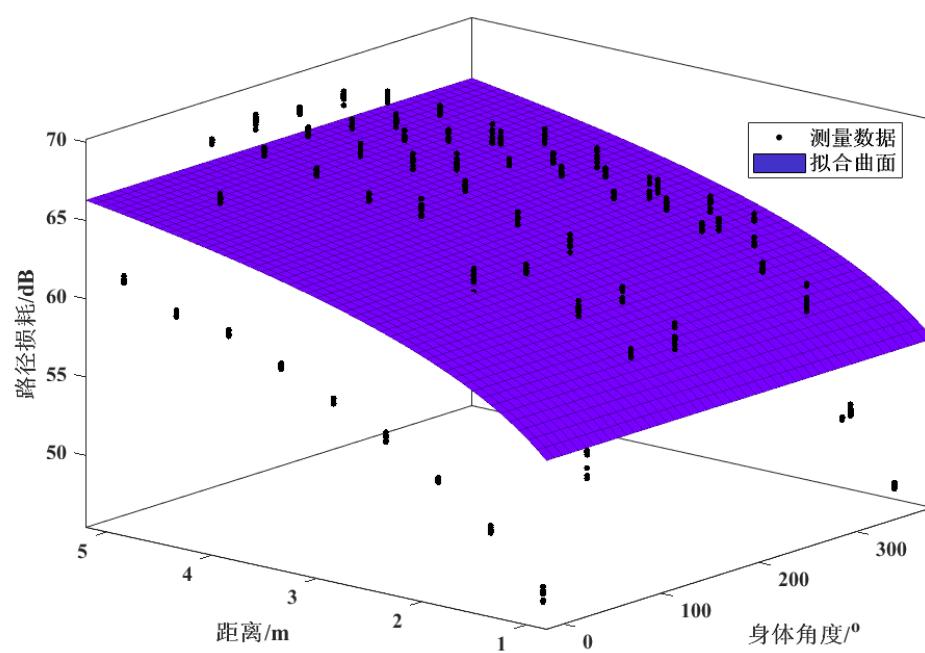
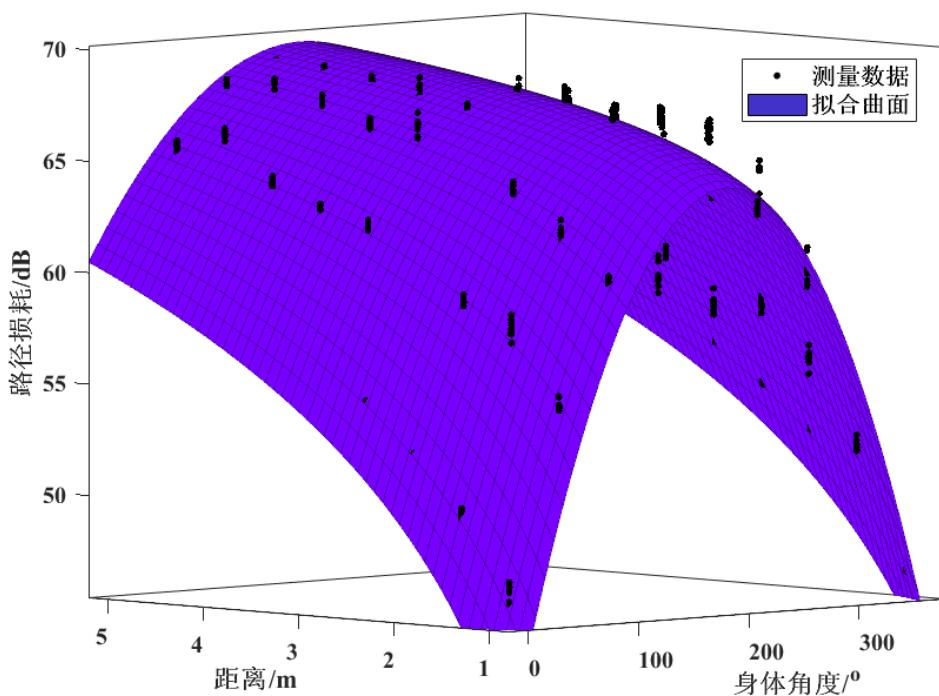


图 3.5 路径损耗指数与身体角度的关系



(a) 对数距离路径损耗模型



(b) 所提路径损耗模型
图 3.6 不同路径损耗模型与测量数据的对比

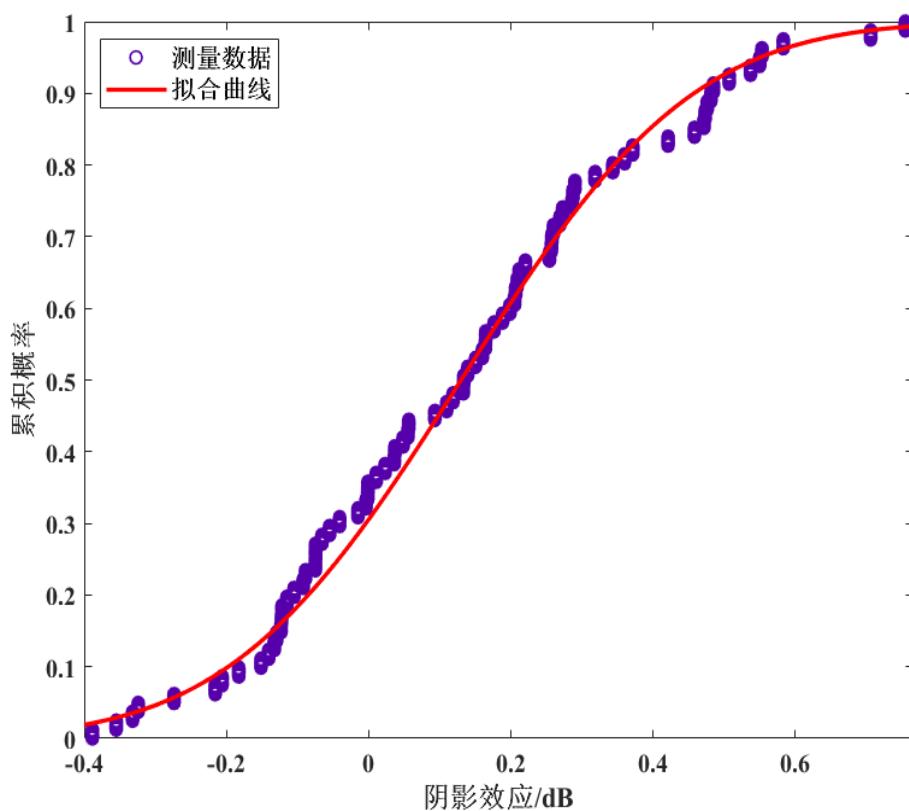


图 3.7 阴影效应正态分布拟合曲线

为了进一步确定适合应用的路径损耗模型，根据均方根误差（RMSE, Root Mean Square Error）对三种模型进行了评估，其结果如表 3.4 所示。测量数据和建模数据之间差异的均方根误差可以表示为

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{l=1}^L (X_{obs,l} - X_{model,l})^2}{L}} \quad (3.8)$$

其中， $X_{obs,l}$ 和 $X_{model,l}$ 分别是某个网格点上某个角度的第 l 次测量的测量值和模拟值， L 表示两组数据的总量。从表 3.4 可以看出，整体模型的 RMSE 最大，而最准确的模型是角度分割模型。然而，角度分割模型存在一个明显的缺陷，即身体角度变化时需要重复测量和拟合，而身体角度相关模型其精度优于整体模型，但不如角度分割模型。因此，为了便于应用，选择牺牲了模型的精度的身体角度相关路径损耗模型。

表 3.4 不同路径损耗模型的 RMSE 比较

模型	类型	数学表达式	RMSE
整体模型	整体数据	$PL(d_0) + 10n\log(d/d_0)$	4.794
角度分割模型	$\theta = 0^\circ$	$PL(d_0) + 10n\log(d/d_0)$	0.259
	$\theta = 90^\circ$		0.793
	$\theta = 180^\circ$		0.319
	$\theta = 270^\circ$		0.813
身体角度相关模型	提出的模型	$PL(d_0) + 10N(\theta)\log(d/d_0) + PBA(\theta)$	1.441

3.4 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延迟 $\bar{\tau}$ 和均方根延迟扩展 τ_{RMS} 来表征，这两个参数都是 PDP 的函数，可以用 PDP 计算得到^[57-59]。其中 $\bar{\tau}$ 是 PDP 的一阶矩，和 τ_{RMS} 是 PDP 二阶矩的平方根，即

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_k P(\tau_k) \tau_k}{\sum_k P(\tau_k)} \quad (3.9)$$

$$\tau_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_k P(\tau_k) \tau_k^2}{\sum_k P(\tau_k)} - (\bar{\tau})^2} \quad (3.10)$$

其中 τ_k 是第 k 个可区分路径的时延, $P(\tau_k)$ 是瞬时功率延迟谱。PDP 描述了信号功率随时间的变化, 能直观地表示室内家具、地板等物体的反射和折射引起的多径现象, 可以由测量数据进行 IDFT 得到 $P(\tau_k)$, 然后再将 $P(\tau_k)$ 取一段时间上的平均得到。

图 3.8 给出了收发端距离在 3m 时, 不同身体角度处的 PDP。从图可以看出在 0° 时主径附近时几乎没有其它径存在, 而在其他角度时主径附近均有其他径存在, 并且在 0° 时其主径功率均比其他角度大, 而且在 180° 时主径到达时间最迟。这主要是由于身体角度为 0° 时, 信号主要由直射的方式到达接收端, 因此, 传播损耗较小, 而在其他角度特别是 180° 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, 主径到达时间最晚, 多径效应更加显著。

图 3.9 给出了收发端距离为 3m 处的 RMS 时延扩展累积分布和对数正态分布拟合曲线。从图中可以发现, 0° 和 180° 时 RMS 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处的均方根时延扩展比 0° 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如表 3.5 所示。

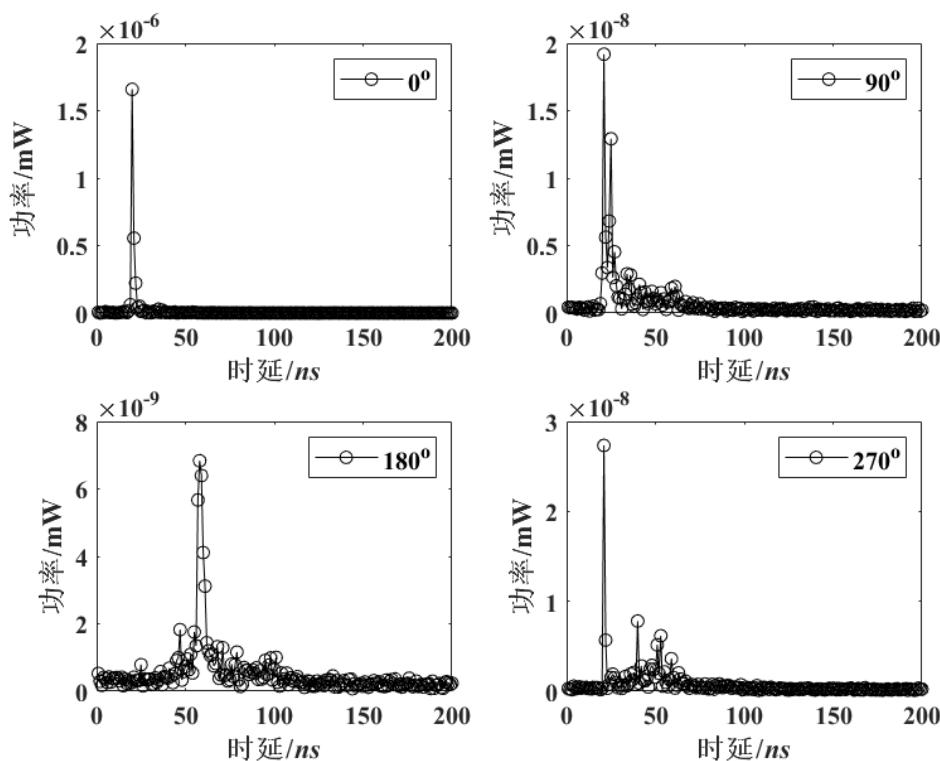


图 3.8 不同身体角度的 PDP

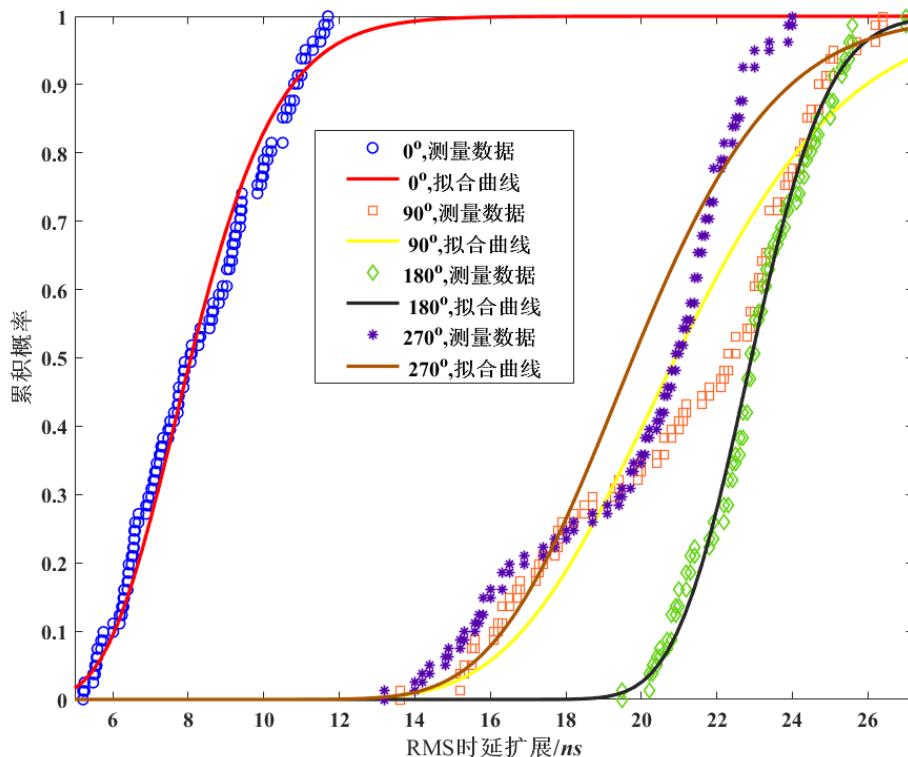


图 3.9 RMS 时延扩展的累积分布和对数正态拟合曲线的示意图

表 3.5 RMS 时延扩展均值和标准差

身体角度/°	均值/ns	标准差/ns
0	8.2726	1.8832
90	21.2057	3.6073
180	22.9700	1.5958
270	20.0041	3.0105

3.5 路径损耗模型实验验证

为了验证所提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（ $25\text{m} \times 8\text{m} \times 3.1\text{m}$ ）环境进行了测量。测量场景示意图如图 3.10 所示，实验方案不变。

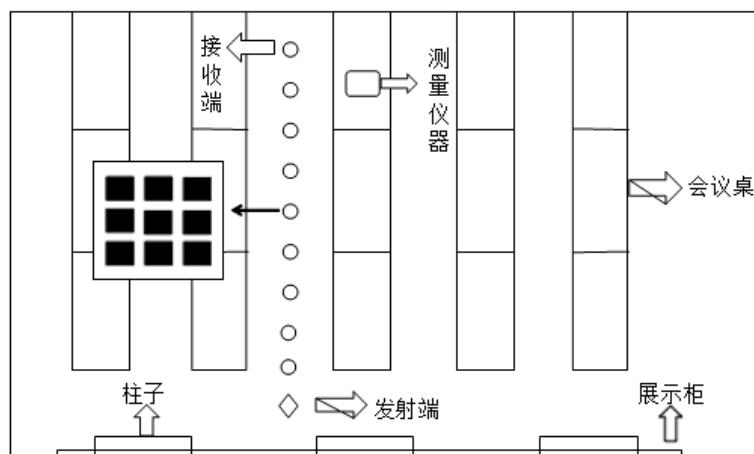


图 3.10 大空间测量场景示意图

图 3.11、图 3.12 分别给出了在不同距离处 PBA 与接收端身体角度和参数 A 与收发端距离的关系示意图。图 3.13 给出了路径损耗指数随身体角度变化的示意图。图 3.14 表示所提路径损耗模型与测量数据的对比。从图中可以看出，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。

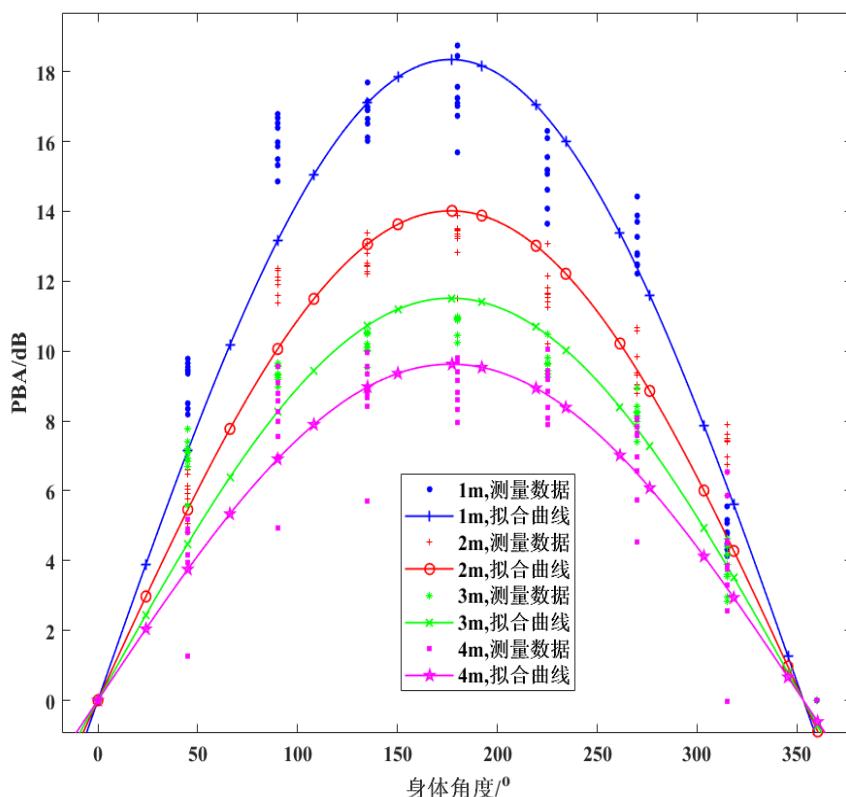


图 3.11 大空间不同距离 PBA 与身体角度的关系

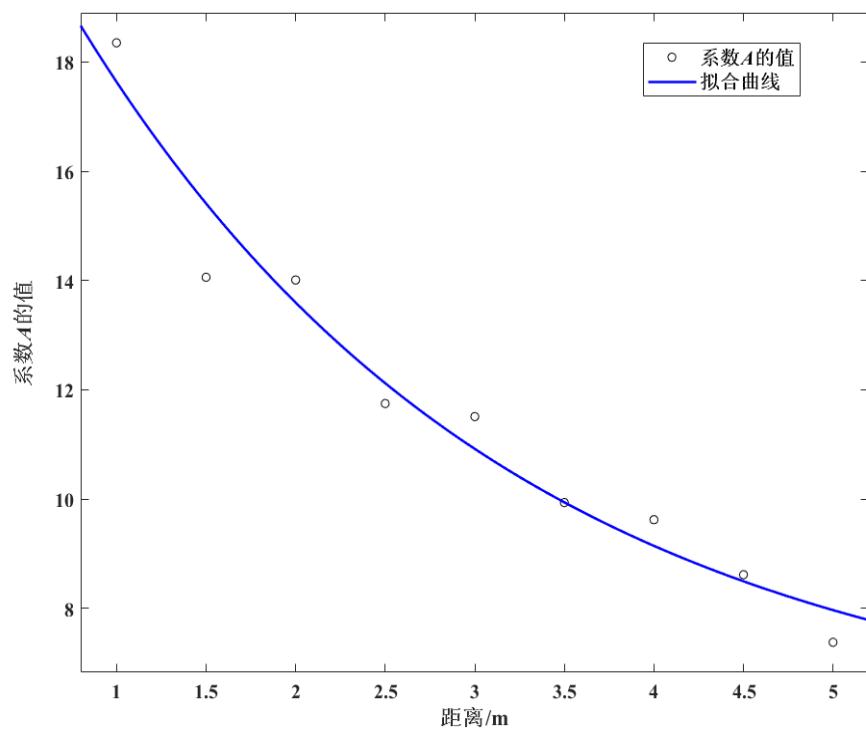
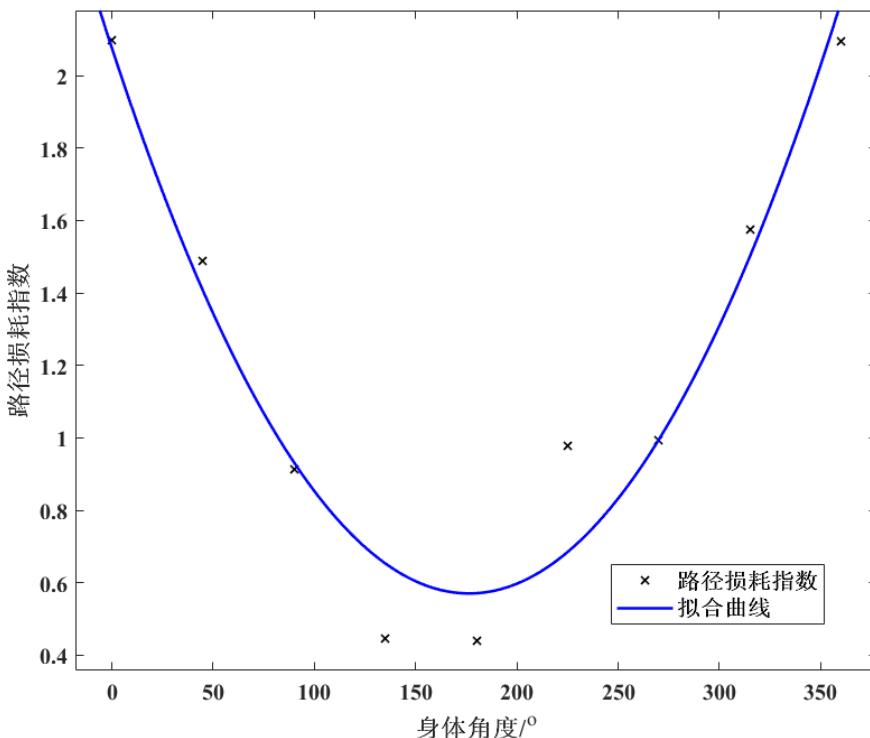
图 3.12 大空间系数 A 与距离的关系

图 3.13 大空间路径损耗指数与身体角度的关系

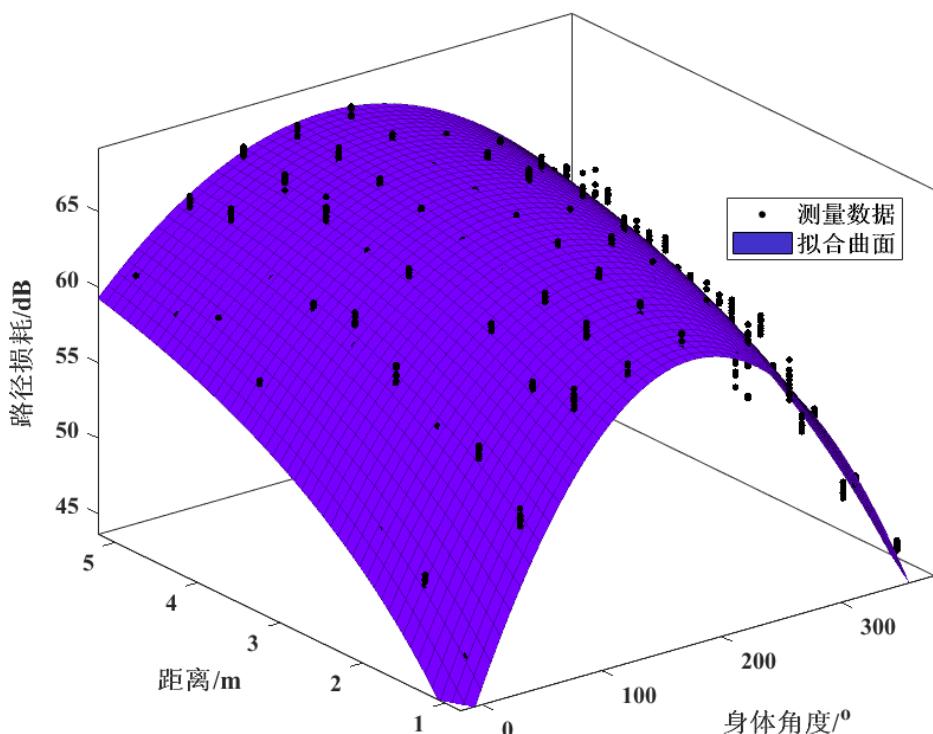


图 3.14 所提路径损耗模型与测量数据对比

3.6 本章小结

本章针对室内具有身体角度影响的无线体域网场景，在10GHz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，并通过不同的方式验证了所提路径损耗模型比对数距离路径损耗模型具有更高的精准度。同时还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。本章的研究成果对未来WBAN在与办公室相近的场景中的应用在物理层的技术开发提供了重要的理论依据和实践基础。

第四章 办公室场景下高度影响的 WBAN 路径损耗建模

本章主要研究的是高频段办公室场景下的 WBAN 无线信道的大尺度衰落特性，通过频域测量法获得大量的测量数据。针对 WBAN 收发端天线一端位于人体上的特殊场景，考虑到对数距离路径损耗模型并没有包括接收端天线位于人体不同高度时对路径损耗的影响，只考虑了收发端距离对路径损耗的影响，为此，本文提出了一种新型的具有高度影响的路径损耗模型，并通过多种方法将该模型与传统的对数距离路径损耗模型进行对比，发现所提路径损耗模型能够更准确地表征办公室环境接收端天线位于人体不同高度时的路径损耗。

4.1 引言

第 51 次《中国互联网络发展状况统计报告》指出我国网民规模达到了 10.67 亿，全国 5G+ 工业互联网项目超过 4000 个，互联网医疗用户规模达到了 3.63 亿人次，线上办公用户规模达 5.4 亿人次，而随着社会的发展，这个规模将进一步扩大。而且随着无线通信技术的发展，海量 WBAN 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，将导致低频段频谱资源逐渐拥挤，频谱资源短缺问题将日益严重，而高频段的频谱具有的占用度低且带宽较大的优点能够在一定程度上解决目前频谱资源短缺的问题，因此，探索高频段 WBAN 通信具有重要的意义。

办公室环境是 WBAN 的典型应用场景之一，是人们生产生活的主要场景，因此研究高频段办公室场景下的 WBAN 通信具有重要意义。信道传播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 Sub 6GHz 频段进行探索的^[14-28]，而 6GHz 及以上的高频段室内 WBAN 信道传播特性的研究较少^[29-35]。然而，在实际生活中穿戴设备等在人体上的高度不是固定的，通常会位于人体不同位置，这种天线高度的变化将会对大尺度衰落产生一定的影响，而现有的研究^[14-35]并没有考虑这种天线高度变化对大尺度衰落的影响。因此，开展高频段室内 WBAN 中具有天线高度影响的大尺度衰落的研究具有重要的意义。

因此，本章将基于办公室 WBAN 中具有天线高度变化的场景，对中心频率为 10GHz 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天线高度影响的路径损耗模型。

本章其余内容安排如下：首先，4.2 节介绍了信道测量场景及方案；然后，4.3 节给出了

所提路径损耗模型和具有天线高度影响的路径损耗（PLH，Path Loss in Antenna Height）的具体表达式，并对所提模型进行了分析与验证；最后 4.4 节给出了本章小结。

4.2 信道测量场景及方案

测量环境的实测场景图及示意图与图 3.1 (a) (b) 一致。在本章中测量方法与测量系统及其仪器等与第三章一致，其测量系统参数如表 3.1 所示。

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，高度为 1m。接收天线放置在人体不同高度，高度从 0.6m~1.6m，间隔为 0.1m。位于人体的接收端天线与发送端天线之间的距离逐渐从 1m 移动到 5m，每隔 0.5m 设置 1 个测量点，共 9 个测量点，每个测量点有 9 个网格点。位于人体的接收端的天线在每个网格点处测量高度都会从 0.6m 增加到 1.6m，在每个网格点处的每个高度都多次重复测量。

4.3 新型路径损耗模型

4.3.1 具有天线高度影响的路径损耗模型

通常，路径损耗模型是对数距离函数，其可以表示为式 (3.1)。为了更准确地表示室内接收端天线在人体不同高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天线高度的信息，经过测量与研究发现接收端天线高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 PLH 和路径损耗指数来对式 (3.1) 中的对数距离路径损耗模型进行修正，且修正后的新型路径损耗模型为

$$PL(d) = PL(d_0) + 10N(h) \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + PLH + X_\delta \quad (4.1)$$

式中， $N(h)$ 为与天线高度相关的路径损耗指数， PLH 为由高度引起的路径损耗， X_δ 为阴影衰落，其服从均值为零，标准差为 δ 的正态分布。

4.3.2 PLH 及 $N(h)$ 的表达式

(1) PLH 的表达式

由高度引起的路径损耗 PLH 可以建模为二次函数

$$PLH(h) = a_3 h^2 + b_3 h + c_3 \quad (4.2)$$

其中, h 表示接接收端天线在人体上的高度, a_3 、 b_3 、 c_3 为指数函数的三个系数, 它们取决于特定的环境。

(2) $N(h)$ 的表达式

与天线高度相关的路径损耗指数 $N(h)$ 可以被建模为二次函数

$$N(h) = a_4 h^2 + b_4 h + c_4 \quad (4.3)$$

其中, a_4 、 b_4 、 c_4 是二次函数的系数。

4.3.3 建模和验证

(1) 所提模型的参数

在本节中, 首先将高度引起的路径损耗视为阴影衰落的一部分, 以评估所提路径损耗模型的总体路径损耗指数。图 4.1 给出了办公室场景中的测量数据和路径损耗的拟合曲线, 该场景下的路径损耗指数为 $n=1.489$, 小于 2, 这可能是由于波导效应造成的。图 4.2 给出了办公室环境中所提路径损耗模型阴影衰落的累积概率分布, 在该场景下, 其阴影衰落服从零均值正态分布, 其标准差分别为 0.5939dB。表 4.1 总结了所提路径损耗模型的参数。

上述分析结果表明, 一般的对数距离路径损耗模型与实际测量数据较为吻合。但是, 从表 4.2 可以看出, 高度对路径损耗的影响是明显的, 因此天线高度的相关研究有望进一步提高模型精度。

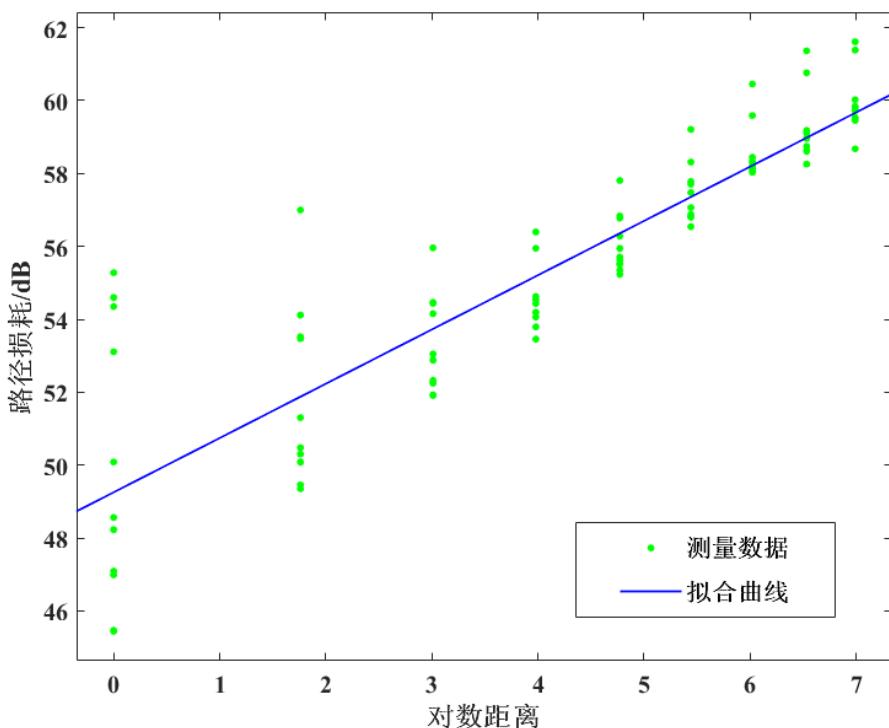


图 4.1 测量的路径损耗值和拟合曲线的散点图

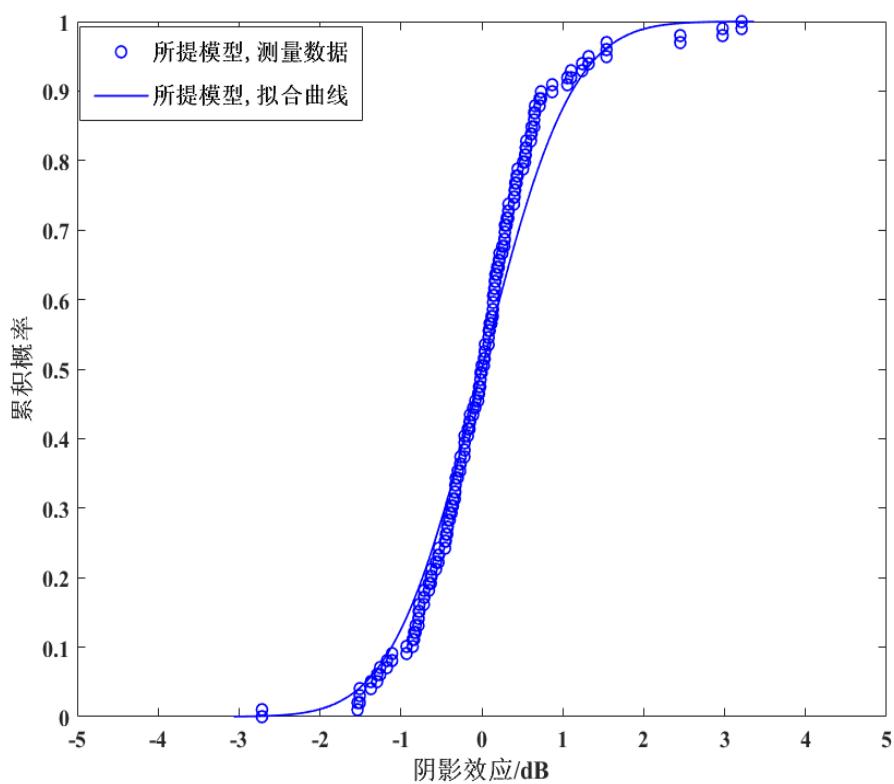


图 4.2 所提路径损耗模型阴影效应累积概率分布

表 4.1 所提路径损耗模型参数

$PL(d_0)$	PLE	X_δ	$PLH(h)$			$N(h)$		
			a_3	b_3	c_3	a_4	b_4	c_4
49.26dB	1.489	0.5939dB	20.45	-38.46	18.45	-3.141	5.982	-1.017

表 4.2 3m 不同高度的路径损耗

h	0.6m	0.8m	1m	1.2m	1.4m	1.6m
PL	56.78dB	55.95dB	55.54dB	55.34dB	56.84dB	57.81

(2) $PLH(h)$ 的拟合

图 4.3 给出了 PLH 与天线高度之间的关系。通过对测量数据的研究，发现有 PLH 有随着天线高度的增加而逐渐减小，到 1m 时达到最小，随后逐渐增大的趋势，因此，采用 LS 对三角函数和幂函数与不同高度处的 PLH 进行拟合。结果表明，二次函数具有最好的拟合性能。因此， PLH 被建模为式（4.2）所示的二次函数。

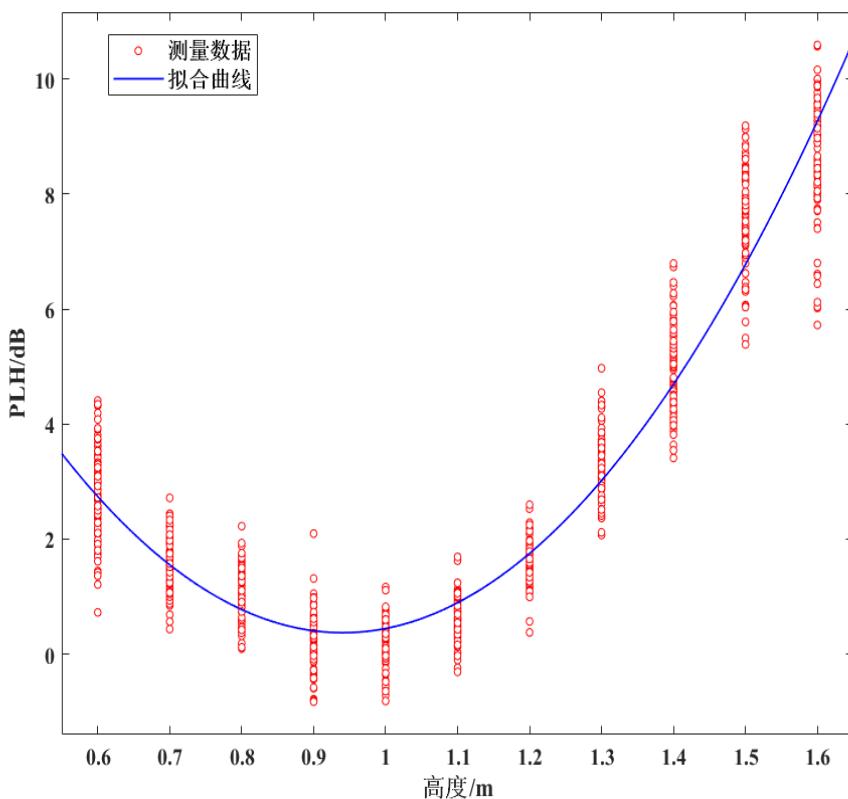


图 4.3 PLH 与天线高度的关系

(3) $N(h)$ 的拟合

图 4.4 给出了办公室场景下对数距离路径损耗模型在不同天线高度下的路径损耗拟合曲线，从图中可以看出不同高度处的路径损耗指数不同，并且以 $h=1m$ 为界限，小于 1m 时，随着高度的增加路径损耗指数有逐渐增加的趋势；大于 1m 时，随着高度的增加路径损耗指数有逐渐减小的趋势。因此，通过对所有不同高度的路径损耗指数进行研究发现路径损耗指数随着高度增加而逐渐增大，且在 1m 时达到最大，随后逐渐减小，如表 4.3 所示，这可以用双射线模型和准自由空间传播来解释^[29]。通过使用 LS 对三角函数和幂函数与路径损耗指数进行拟合，如图 4.5 所示，结果表明，二次函数具有最好的拟合性能，其中 $N(h)$ 的参数如表 4.1 所示。因此， $N(h)$ 被建模为式（4.3）所示的二次函数。

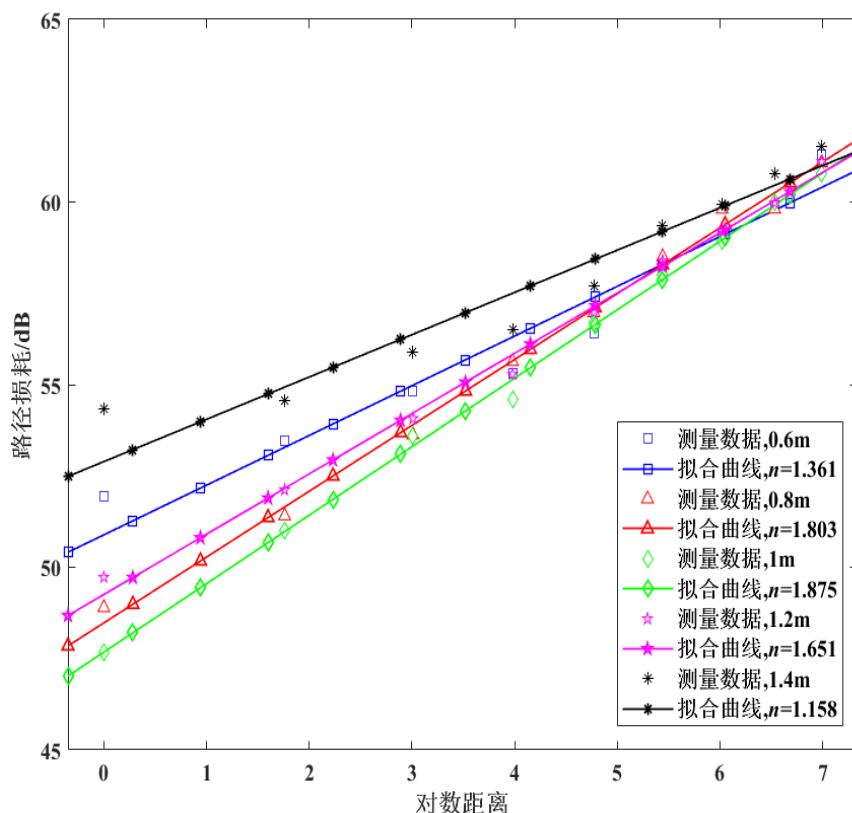


图 4.4 不同高度的拟合路径损耗曲线及其路径损耗指数

表 4.3 不同天线高度时的路径损耗指数

天线高度/m	路径损耗指数	天线高度/m	路径损耗指数
0.6	1.361	1.2	1.651
0.7	1.645	1.3	1.290
0.8	1.803	1.4	1.158
0.9	1.889	1.5	0.871
1	1.875	1.6	0.611
1.1	1.786	/	/

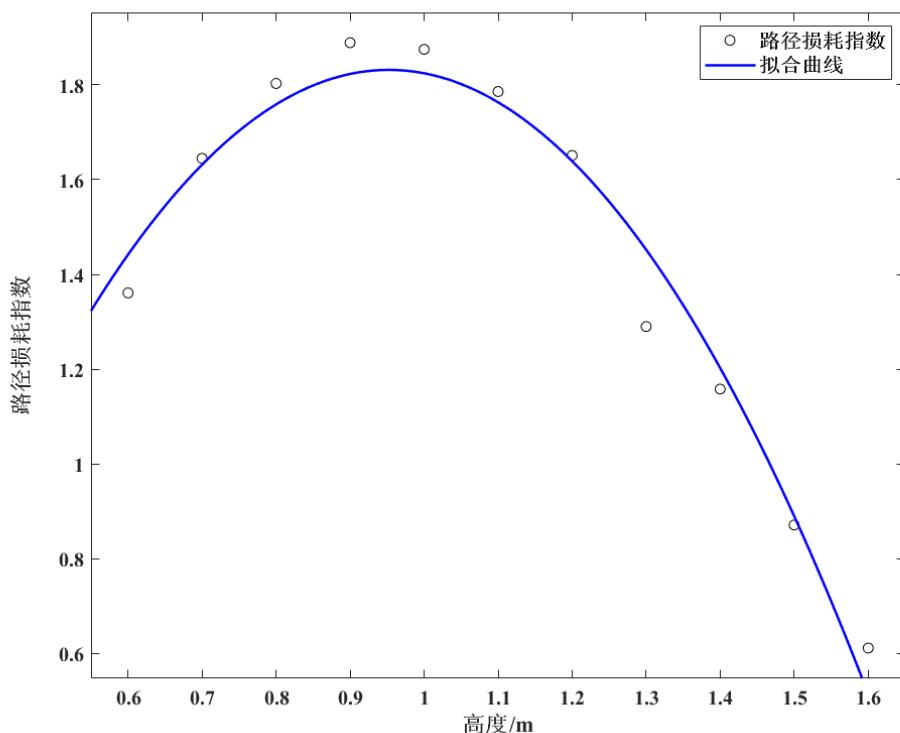
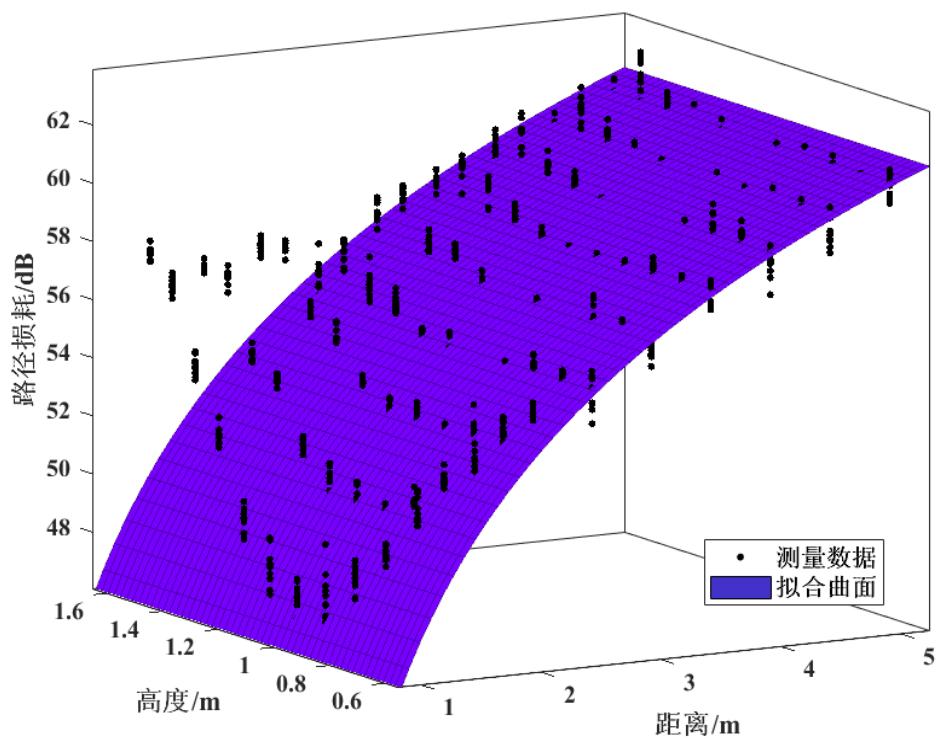


图 4.5 路径损耗指数与天线高度的关系

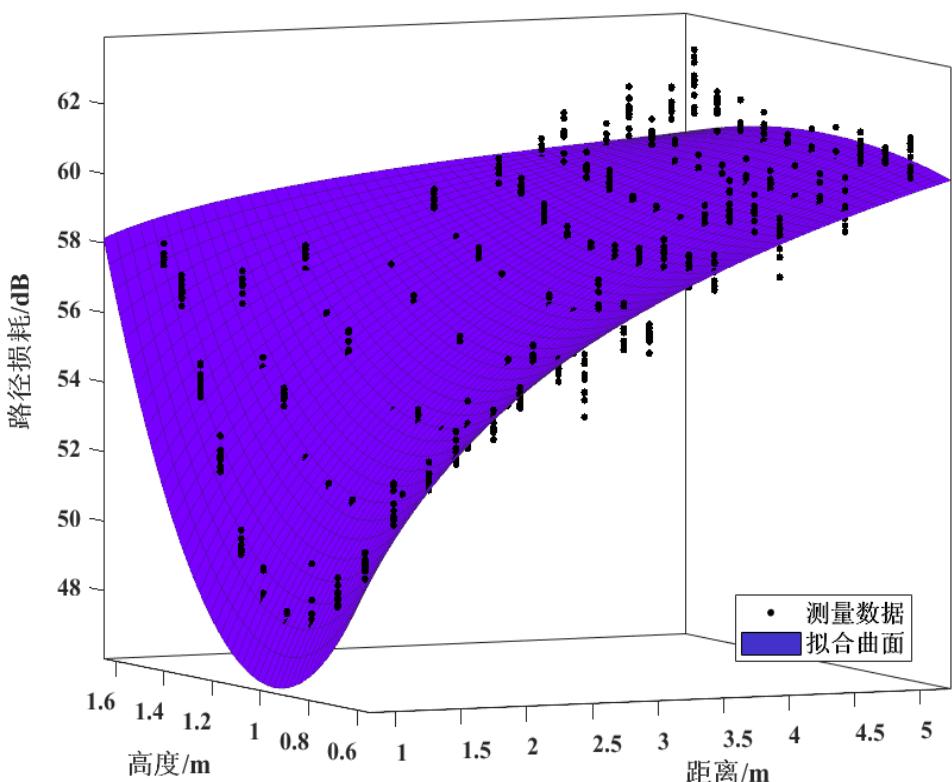
(4) 所提模型的验证

为了验证所提出模型的准确性，分别给出了对数距离路径损耗模型和所提路径损耗模型与测量数据的拟合曲面，如图 4.6 (a) (b) 所示。通过图 4.6 (a)、(b) 可以明显看出所提路径损耗模型更逼近测量数据，而对数距离路径损耗模型与测量值之间偏差较大，并且从图 4.7 中也可以看出，所提路径损耗的模型阴影效应比对数距离路径损耗的阴影效应波动小，其模型标准差也比对数距离路径损耗模型小。这是因为对数距离路径损耗模型仅仅与收发端天线之间的距离有关，而并未包含天线高度等环境因素的影响，而本章所提路径损耗模型由于加入了更多环境因素，提高了路径损耗模型的精度，减小了阴影效应对路径损耗的影响。因此所提路径损耗模型能够更准确地表征室内环境天线角度变化下的路径损耗。

为了进一步确定适合应用的路径损耗模型，根据 RMSE 对三种模型进行了评估，其结果如表 4.4 所示。从表 4.4 可以看出，整体模型的 RMSE 最大，而最准确的模型是高度分割模型。然而，高度分割模型存在一个明显的缺陷，即天线高度变化时需要重复测量和拟合，而天线高度相关模型其精度优于整体模型，但不如高度分割模型。因此，为了便于应用，选择牺牲了模型的精度的天线高度相关路径损耗模型。



(a) 对数距离路径损耗模型



(b) 所提路径损耗模型

图 4.6 不同路径损耗模型与测量数据的对比

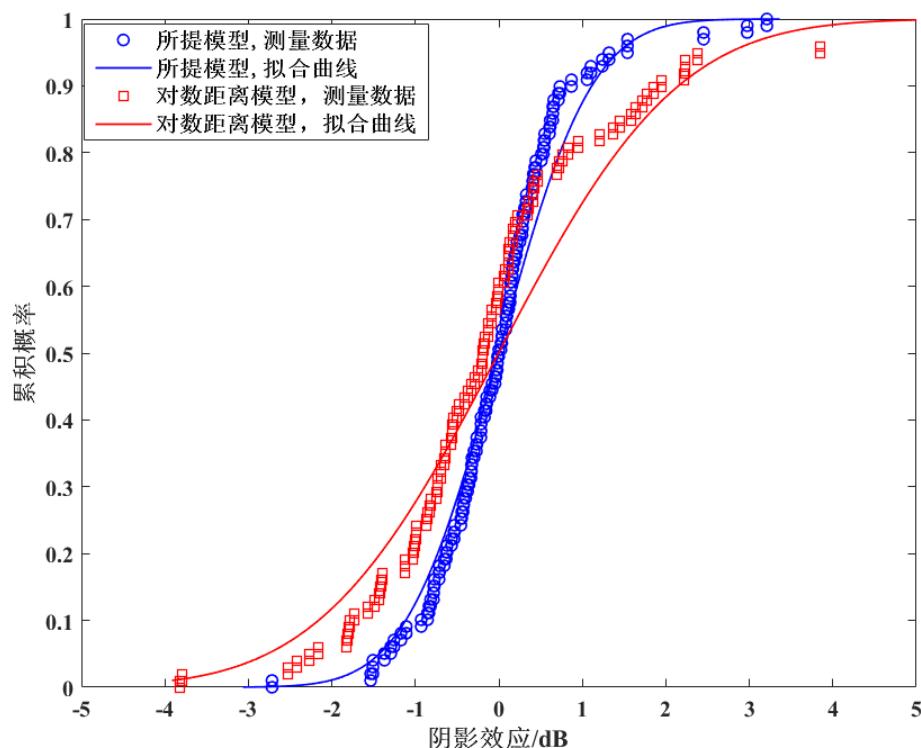


图 4.7 所提模型和对数距离路径损耗模型阴影效应累积概率分布

表 4.4 不同路径损耗模型的 RMSE 比较

模型	类型	数学表达式	RMSE
整体模型	整体数据	$PL(d_0)+10n\log(d/d_0)$	1.589
高度分割模型	$h = 0.8m$	$PL(d_0) + 10n\log(d/d_0)$	0.463
	$h = 1m$		0.366
	$h = 1.2m$		0.388
	$h = 1.4m$		0.912
天线高度相关模型	提出的模型	$PL(d_0)+10N(h)\log(d/d_0)+PLH(h)$	0.889

4.4 本章小结

本文针对室内具有天线高度影响的无线体域网场景，在 10GHz 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，并通过多种方法验证了所提路径损耗模型比传统的对数距离路径损耗模型的精度更高。本章的研究成果对未来穿戴设备在与办公室相近的场景中的应用有着重要的参考价值。

第五章 医院场景下 WBAN 传播特性测量与建模

本章主要研究的是高频段医院病房和走廊场景下的 WBAN 无线信道传播特性，通过频域测量法获得大量的测量数据。针对 WBAN 收发端天线一端位于人体上的特殊场景，考虑到对数距离路径损耗模型并没有包括接收端天线角度对路径损耗的影响，只考虑了收发端距离对路径损耗的影响，为此，本文提出了一种新型的具有天线角度影响的路径损耗模型，并通过多种方法将该模型与传统的对数距离路径损耗模型进行对比，发现所提路径损耗模型能够更准确地表征医院病房和走廊环境天线角度变化时的路径损耗。此外，还建立了一种与路径损耗相关的 RMS 时延扩展模型，该模型能够通过路径损耗来估计 RMS 时延扩展的大小。

5.1 引言

在 2019 中国物联网大会上，业内专家预测未来 80% 数据业务将发生在室内。为了应对未来室内场景中各种个人设备、智能家居和智慧医疗等大量 WBAN 设备的接入，以及在远程医疗等场景中用户对服务质量和即时通信需求的不断提高所导致的数据业务的激增，频谱资源短缺问题日益突出的低频段频谱资源将不能满足未来的用户需求。而高频频段的低频谱占用率和大带宽可以解决上述低频频谱存在的问题。因此，探索高频段 WBAN 通信具有重要的意义。

医院场景是 WBAN 的典型应用场景之一，将成为未来 WBAN 应用的重要场所。随着 WBAN 的迅速发展，其已广泛应用于医疗保健、消费电子、娱乐、体育、军事等领域，尤其是在医疗保健领域。此外，随着我国人口老龄化的加速和慢性病患者的增加，WBAN 将在医疗保健领域发挥巨大作用。因此研究高频段医院场景下的 WBAN 通信具有重要意义。由于信道传播特性是设计通信系统的关键，为此有必要研究高频段医院场景下 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 Sub 6GHz 频段进行探索的^[14-28]，而 6GHz 及以上的高频段室内 WBAN 信道传播特性的研究较少^[29-35]。在实际的 WBAN 应用场景中，人类可穿戴设备等终端的方向并不是固定的，它会受到人体活动方式和姿势或佩戴方式的影响。在这种情况下，位于人体上的接收天线的角度也会发生变化，这将改变信道的传播特性，而现有的研究^[14-35]并没有考虑接收端天线角度变化对信道特性的影响。因此，开展高频段室内 WBAN 场景中具有接收端天线角度变化的信道传播特性的研究具有重要的意义。

因此，本章将基于医院病房和走廊 WBAN 场景下天线角度变化的场景，对中心频率为

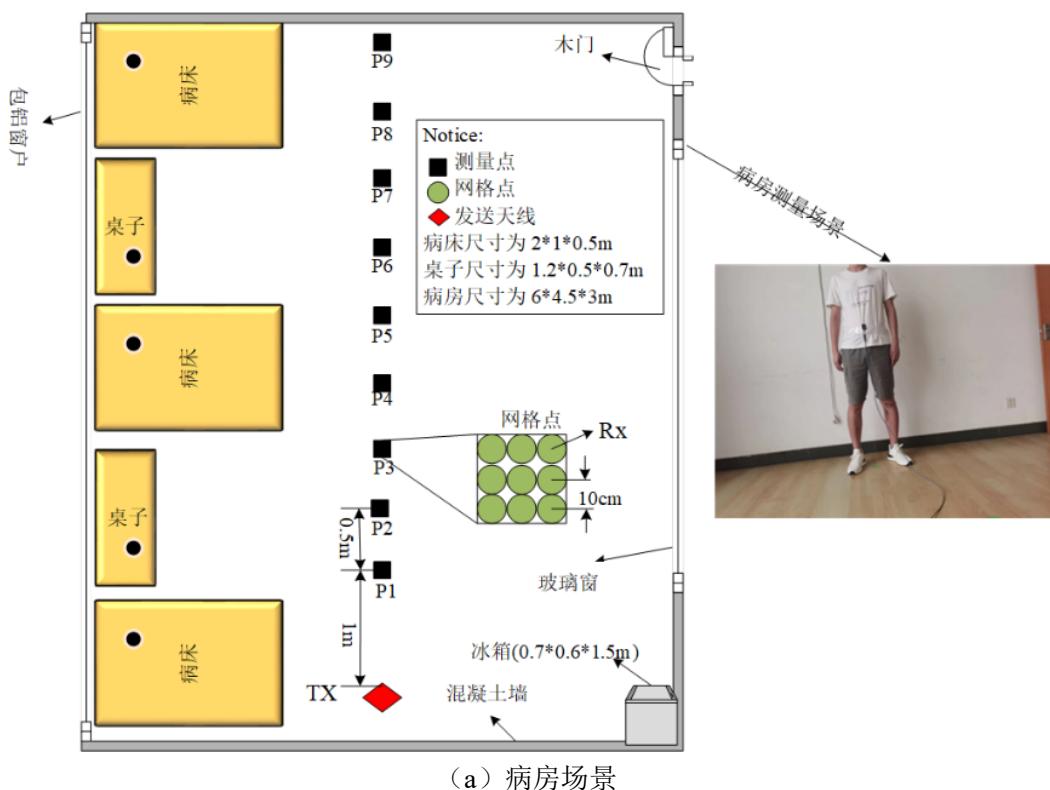
10GHz 的频段进行测量，获取大量的测量数据。基于测量数据，建立了一种新型的具有天线角度因子（AAF，Antenna Angle Factor）的路径损耗模型，并且建立了一种基于路径损耗的 RMS 时延扩展模型。

本章的其余部分安排如下：5.2 节介绍了信道测量场景及方案。5.3 节给出了所提路径损耗模型和 AAF 的具体表达式，并给出了不同场景下对该模型的分析与验证。5.4 节详细分析了 RMS 时延扩展的统计特性，并建立了 RMS 时延扩展与路径损耗之间的关系模型，得出了第 5.5 节的结论。

5.2 信道测量场景及方案

测量的活动是在模拟的典型多病床医院房间环境和狭窄的医院走廊场景中进行的，如图 5.1 (a) (b) 所示。病床和冰箱是病房场景中的主要家具，墙壁由混凝土制成，一面是玻璃窗，另一面是混凝土和玻璃窗。在狭窄的医院走廊场景中，墙壁主要由混凝土制成，并在一定距离内嵌入一些木门。在这两种环境中，使用固定在高 1 米的木制三脚架上的贴片天线来模拟发射端，并使用志愿者佩戴的可穿戴贴片天线来模拟接收端。

在本章中测量方法与测量系统及其仪器等与第三章和第四章一致，其测量系统参数如表 5.1 所示。



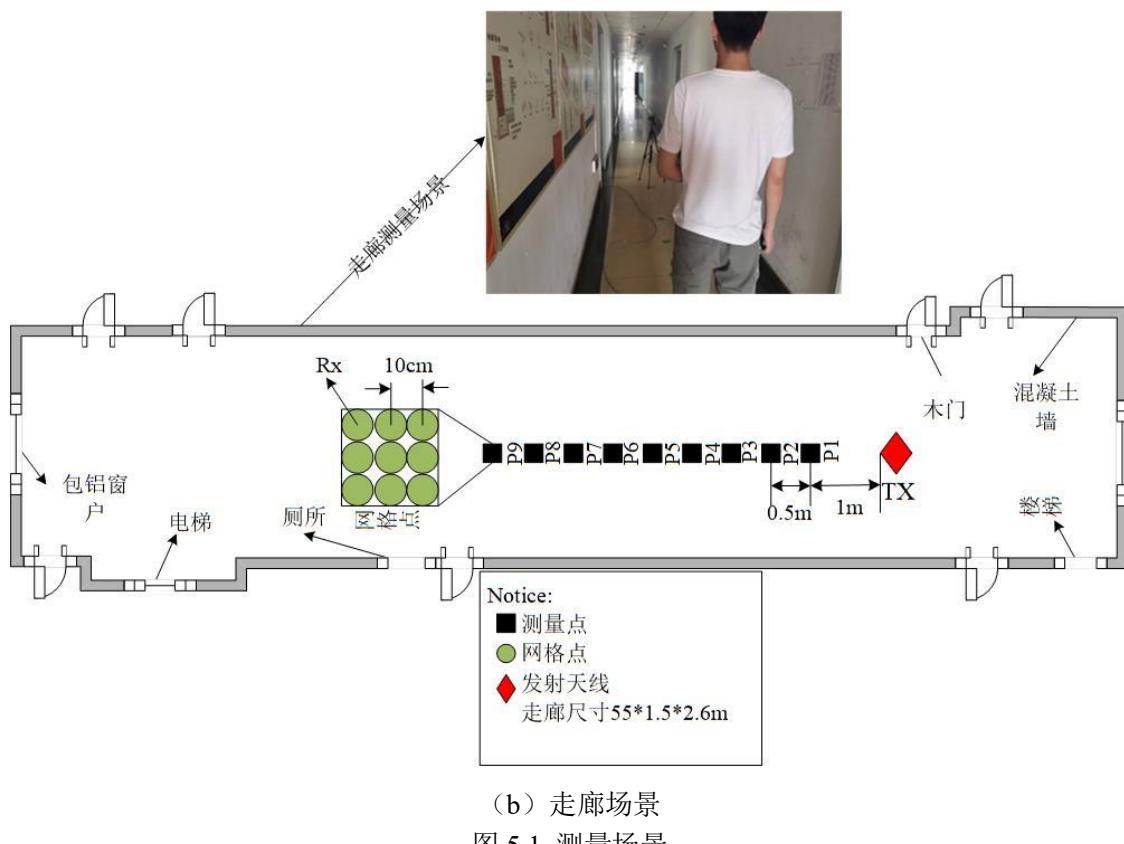


图 5.1 测量场景

表 5.1 VNA 参数设置

VNA 参数	参数数值	VNA 参数	参数数值
中心频率	10GHz	最大时延时间	800ns
频率点数	1601	带宽	2GHz
频率步长	1.25MHz	时延分辨率	0.5ns

为了研究天线角度变化对 WBAN 传播特性的影响,设计了如下测量方案:在两种环境中,部署在人体上的接收天线在竖直方向上以一定的角度旋转,发射天线放置在给定位置。在测量过程中,接收天线依次放置在从 1m 到 5m 的 9 个测量点(即图 5.1(a)(b) 所示的 P1 到 P9)。如图 5.1(a)(b) 所示,在每个测量点中,使用 10 厘米的间距将该区域划分为 9 个不同的网格点。测量时,在每个网格点上,接收天线都将从与地面垂直的方向从 0° 逐渐变为 180°, 0° 时天线指向地面, 180° 时天线指向天花板, 在每个网格点上的每个角度都多次重复测量。在 0° 到 60°、120° 到 180° 之间的间隔都是 20°, 60° 到 120° 之间的间隔是 30°。

5.3 新型路径损耗模型

5.3.1 具有 AAF 的路径损耗模型

通常，路径损耗模型是对数距离函数，其可以表示为式（3.1）。为了描述天线角度变化引起的额外路径损耗，用 AAF 建立了新的路径损耗模型，其可以表示为

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + PAA(\theta) + X_\rho \quad (5.1)$$

其中， $PAA(\theta)$ 是角度相关的 AAF，而 θ 表示接收天线的角度， n 是路径损耗指数（PLE，Path Loss Exponent）。 X_ρ 为阴影衰落，其服从均值为零，标准差为 ρ 的正态分布。其中接收端天线角度变化引起的路径损耗参考角度为 90° 。

5.3.2 AAF 的表达式

接收天线角度相关的 AAF 可以建模为三角函数

$$PAA(\theta) = a_5 \sin\left(\frac{\theta}{b_5}\right) + c_5 \quad (5.2)$$

其中 a_5 、 b_5 、 c_5 是三角函数的三个参数，它们取决于特定的环境。

5.3.3 建模和验证

（1）所提路径损耗模型的参数

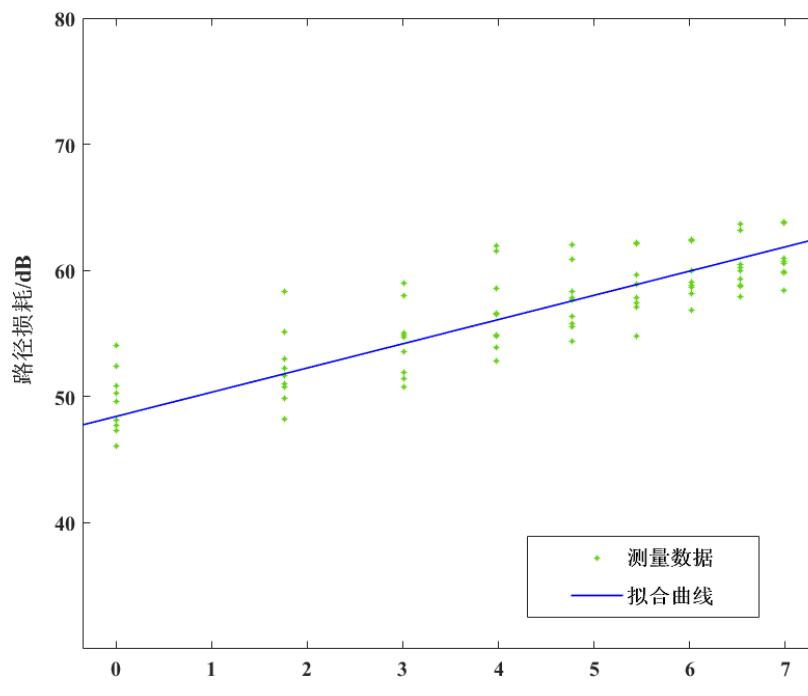
在本节中，首先将接收天线角度引起的路径损耗视为阴影衰落的一部分，以评估所提路径损耗模型的总体路径损耗指数。图 5.2 分别给出了医院房间和走廊环境中的测量数据和路径损耗的拟合曲线，从图中可以看出，医院房间和走廊环境的路径损耗指数分别为 $n=1.92$ 和 $n=1.72$ ，均小于 2，这可能是由于波导效应造成的，这是因为当无线电信号在建筑整齐的街道、隧道和较长的走廊等场景传播时都会形成波导效应，此时，无线电信号传播与在波导内传播相似，沿波导方向损耗小，信号强。因此，在走廊等会形成波导效应的场景下，其随着距离而增加的损耗的增速（即拟合曲线的斜率）会比在理想传播条件下小。

图 5.3 给出了医院房间和走廊环境中所提路径损耗模型的阴影衰落 X_ρ 的累积概率分布。

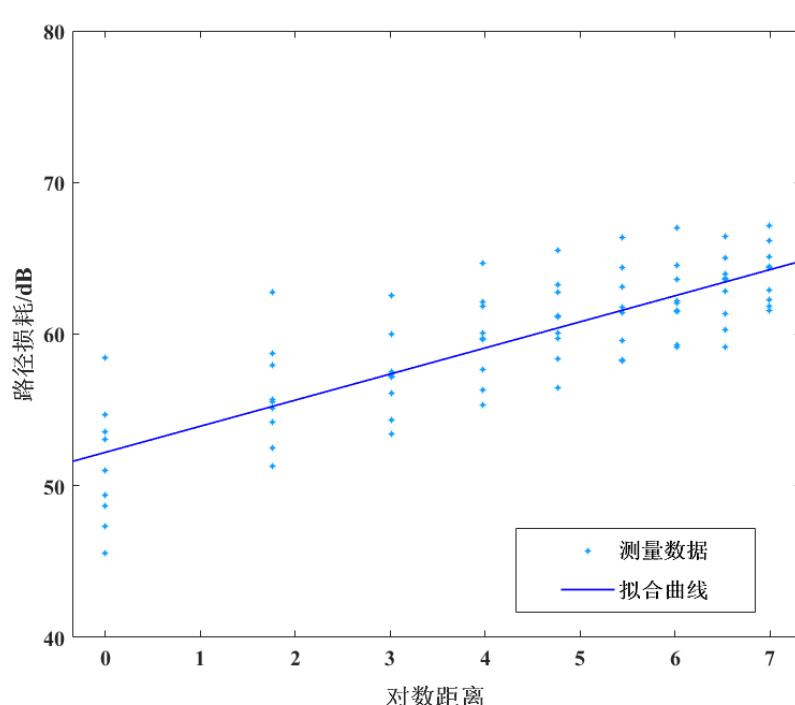
在两种场景下，阴影衰落均服从零均值正态分布，医院房间和走廊环境中所提路径损耗模型

的标准差分别为 1.3911dB 和 1.4486dB。表 5.2 总结了所提路径损耗模型的参数。

上述分析结果表明，传统的对数距离路径损耗模型与实际测量数据较为吻合。但是，从表 5.3 可以看出，接收天线角度对路径损耗的影响是明显的，因此接收天线角度的相关研究有望进一步提高模型精度。



(a) 病房场景



(b) 走廊场景

图 5.2 测量的路径损耗值和拟合曲线的散点图

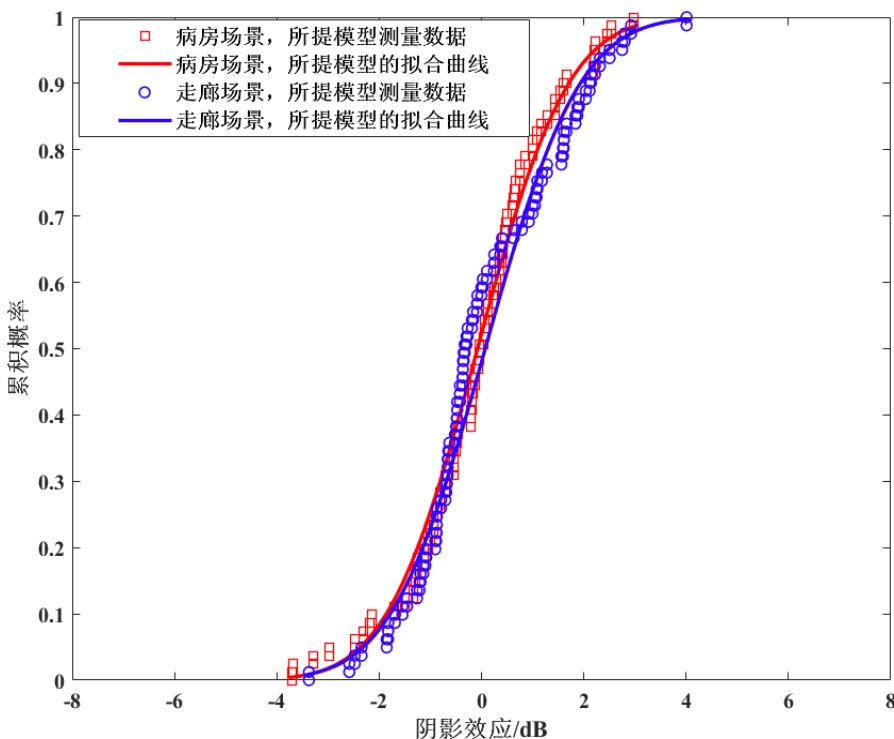


图 5.3 阴影效应的累积概率分布

表 5.2 所提路径损耗模型参数

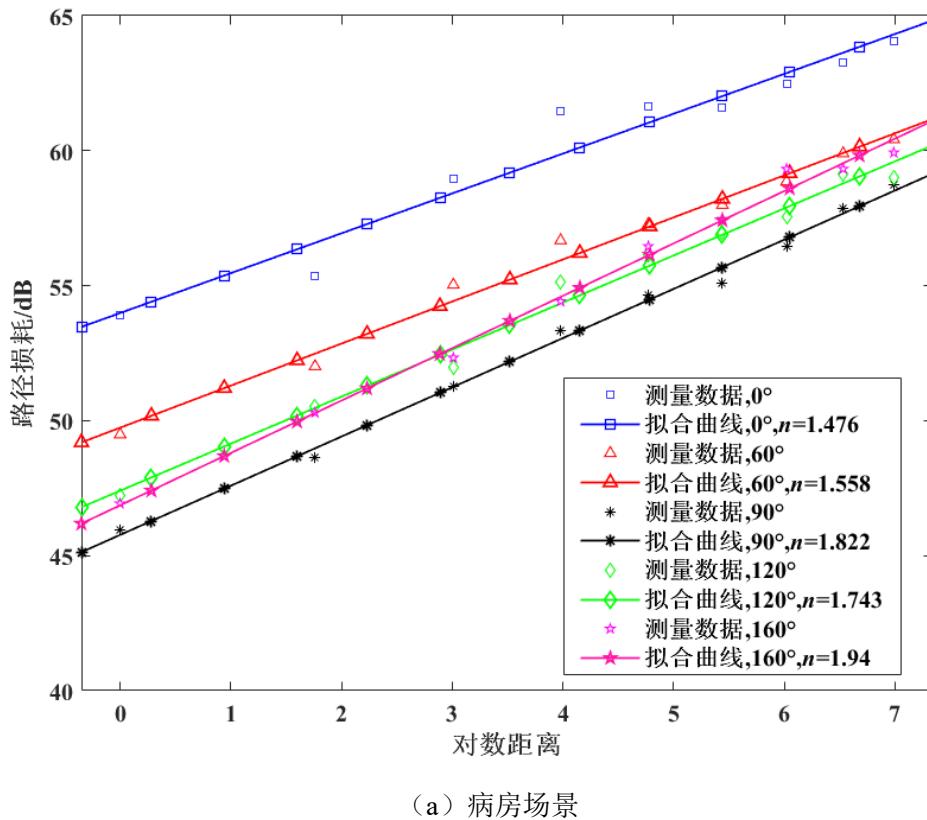
测量 场景	$PL(d_0)$	PLE	X_ρ	$PAA(\theta)$		
				a_5	b_5	c_5
病房	48.43dB	1.92	1.3911dB	-5.488	57	6.141
走廊	52.21dB	1.72	1.4486dB	-6.699	57	7.433

表 5.3 3m 距离不同角度的路径损耗

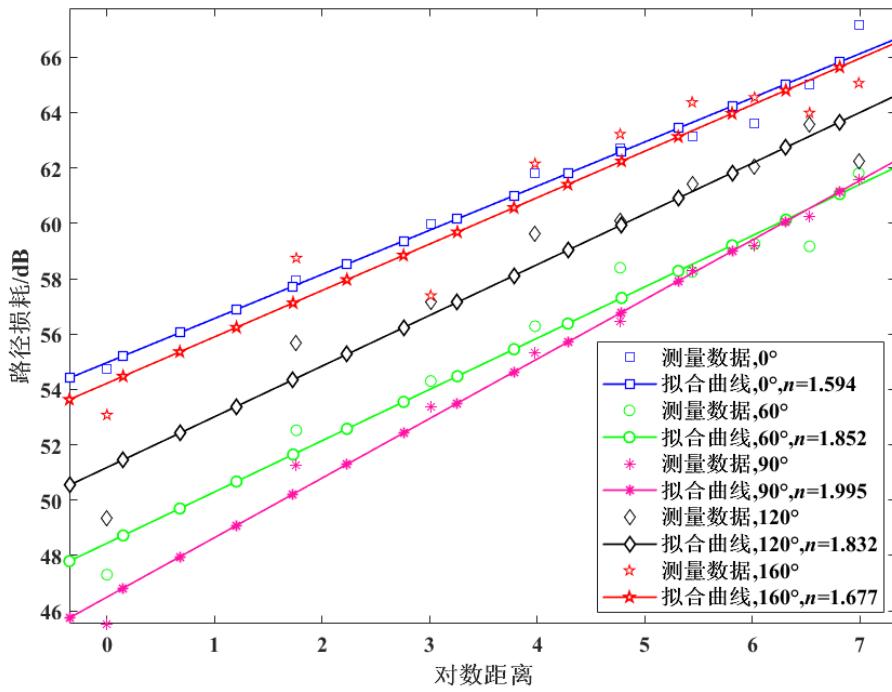
场景 \ 角度	0°	60°	90°	120°	160°
病房	60.91dB	58.60dB	57.84dB	56.34dB	55.53dB
走廊	62.73dB	58.39dB	56.46dB	60.09dB	63.22dB

(2) AAF 的拟合和验证

图 5.4 给出了病房场景和医院走廊场景下对数距离路径损耗模型在不同接收天线角度下的路径损耗拟合曲线。可以看出，在全部的两种场景下，当天线角度不同时路径损耗指数也不相同，且差距不大。这可能是由于对数距离路径损耗模型只考虑了收发端距离对路径损耗的影响，并没有考虑天线高度等环境因素的影响，因此当天线角度变化时，路径损耗的测量值会产生一定的变化^[60]，从而导致路径损耗指数存在较小的波动。



(a) 病房场景



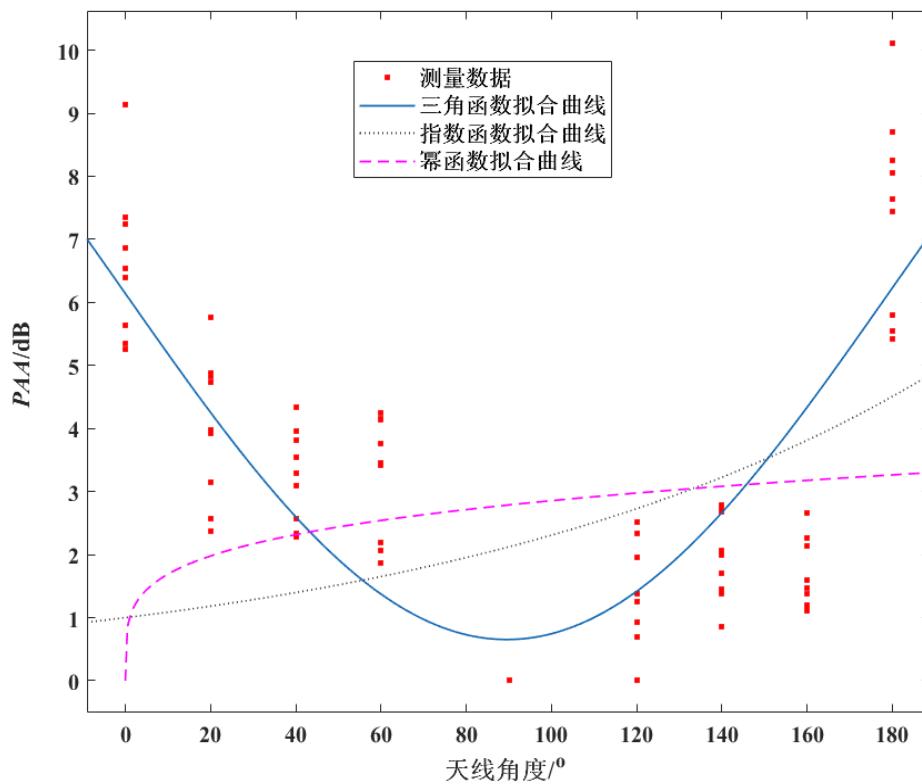
(b) 走廊场景

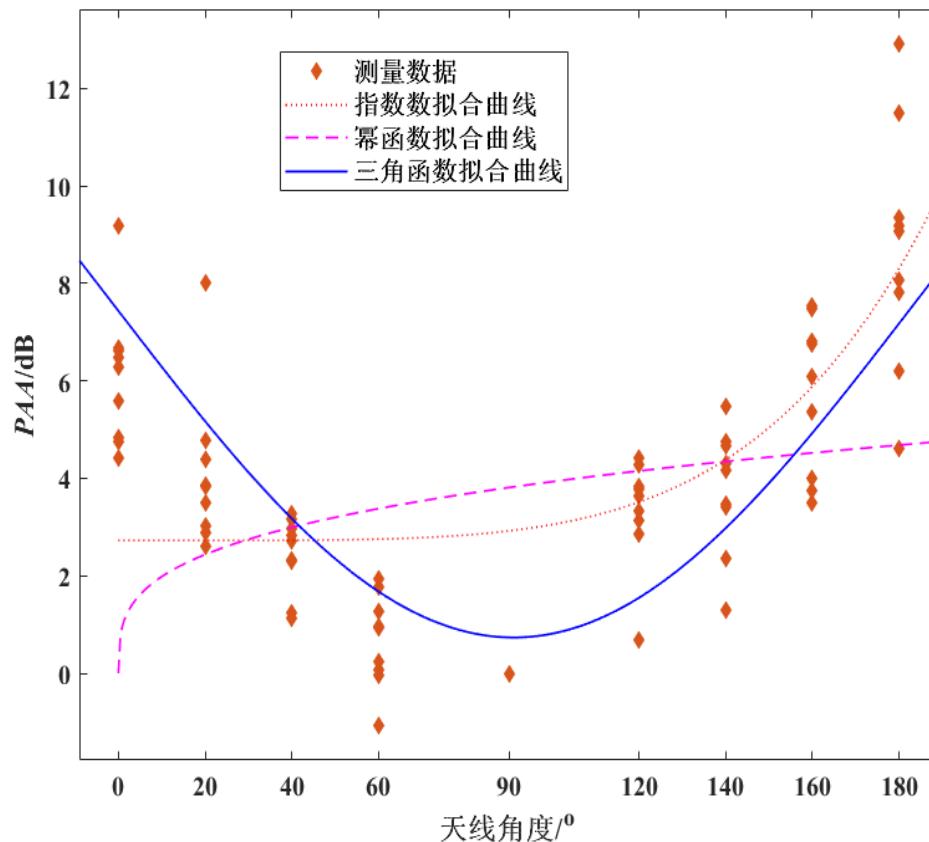
图 5.4 不同角度下的拟合路径损耗曲线及其在不同环境下的不同 PLE 值

图 5.5 给出了医院房间和走廊场景下不同函数的 $PAA(\theta)$ (即 AAF) 与接收天线角度之间的关系。通过对测量数据的研究，发现在两种场景下 AAF 有随着天线角度的增加而减小，在

90°达到最小，随后随着天线角度的增加而增加的趋势。因此，采用 LS 对幂函数和三角函数与路径损耗进行拟合。结果表明，在两种场景下三角函数都具有最好的拟合性能，其中 $PAA(\theta)$ 的参数如表 5.2 所示。因此， $PAA(\theta)$ 被建模为式（5.2）所示的三角函数。

基于所构建的 $PAA(\theta)$ 模型，在不同的测量环境下将所提路径损耗模型与对数距离路径损耗模型进行了比较，如图 5.6 所示。通过图 5.6 可以明显看出在两种场景下所提路径损耗模型更逼近测量数据，而对数距离路径损耗模型与测量值之间偏差较大，并且从图 5.7（a）（b）中也可以看出，两种场景下所提路径损耗模型阴影效应比对数距离路径损耗的阴影效应波动小，其模型标准差也比对数距离路径损耗模型小。这是因为对数距离路径损耗模型仅仅与收发端天线之间的距离有关，而并未包含天线角度等环境因素的影响，而本章所提路径损耗模型由于加入了更多环境因素，提高了路径损耗模型的精度，减小了阴影效应对路径损耗的影响。因此，所提路径损耗模型能够更准确地描述当接收天线角度改变时的两种环境下的路径损耗。





(b) 走廊场景

图 5.5 不同场景下 PAA 与接收天线角度的关系

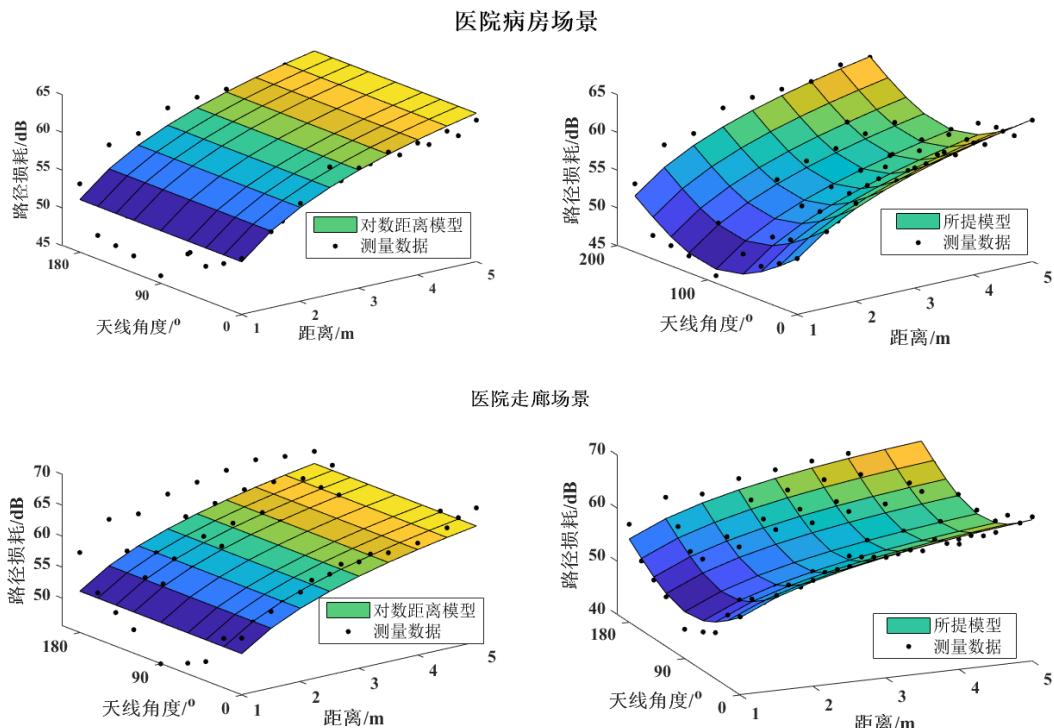
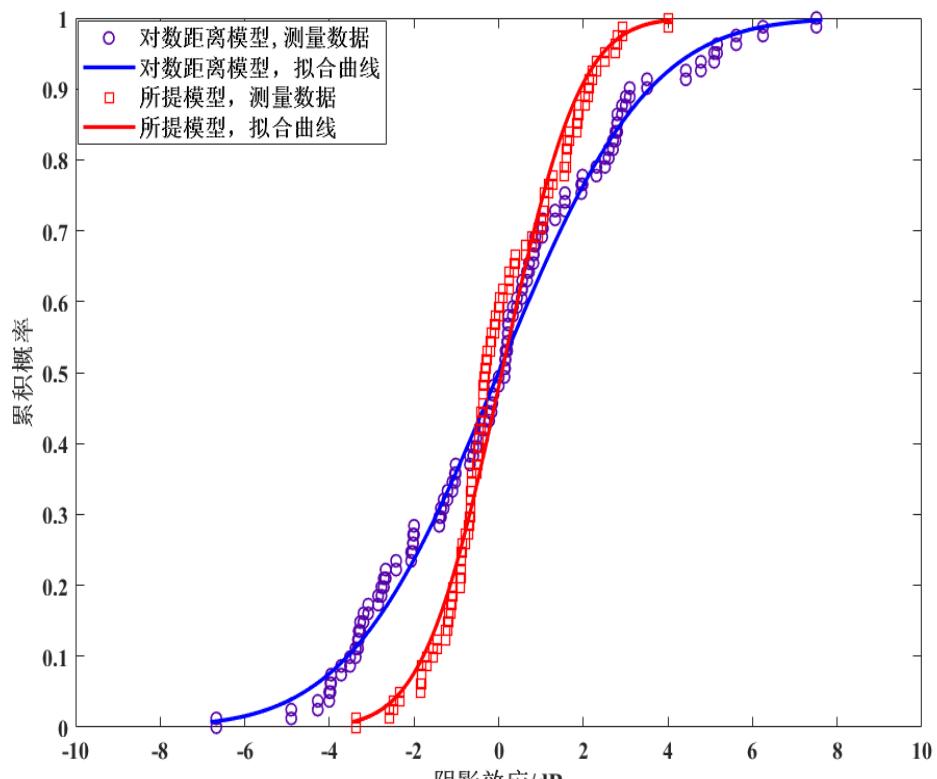
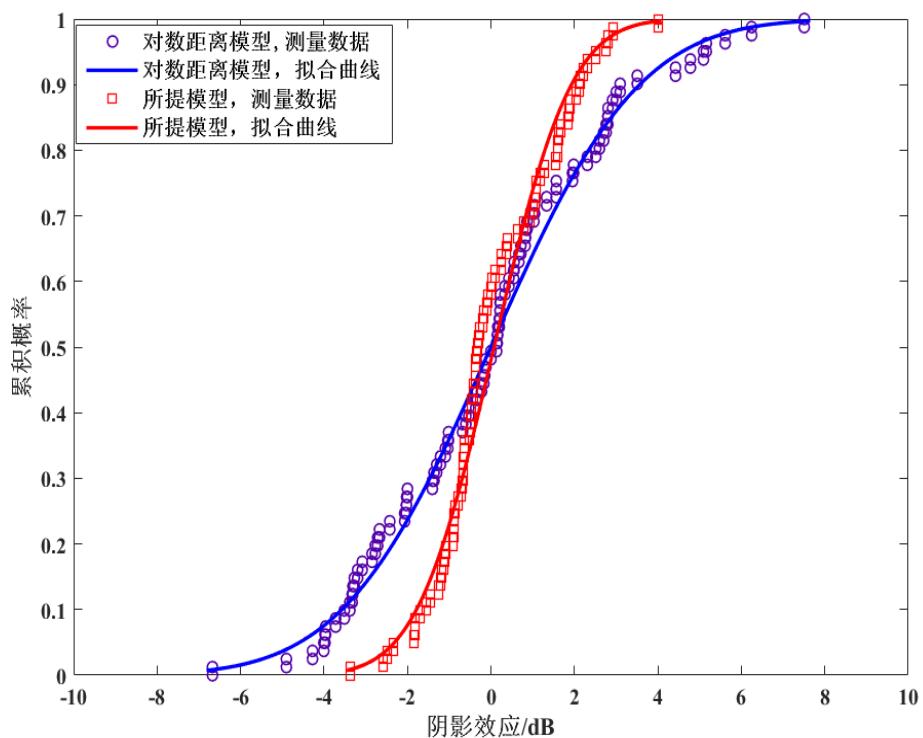


图 5.6 不同医院环境下不同路径损耗模型的比较



(a) 病房场景



(b) 走廊场景

图 5.7 所提模型和对数距离路径损耗模型阴影效应累积概率分布

为了进一步确定适合应用的路径损耗模型，根据 RMSE 对三种模型进行了评估，其结果如表 5.4 所示。从表 5.4 可以看出，整体模型的均方根误差最大，而最准确的模型是角度分割模型。然而，角度分割模型存在一个明显的缺陷，即接收天线角度变化时需要重复测量和拟合，由于接收天线角度相关模型考虑了 AAF，其精度优于整体模型，但不如角度分割模型。因此，为了便于应用，选择牺牲了模型的精度的角度相关路径损耗模型。

表 5.4 不同路径损耗模型的均方根误差比较

模型	类型	数学表达式	RMSE (病房/走廊)
整体模型	整体数据	$PL(d_0)+10n\log(d/d_0)$	2.499/2.801
角度分割模型	天线角度 0°	$PL(d_0) + 10n\log(d/d_0)$	1.055/0.632
	天线角度 40°		0.404/0.910
	天线角度 90°		0.440/0.583
	天线角度 160°		0.679/1.372
天线角度相关模型	提出的模型	$PL(d_0)+10n\log(d/d_0)+PAA(\theta)$	1.457/1.200

5.4 所提 RMS 时延扩展模型

5.4.1 时延扩展

通过对测量数据使用第 3.4 节所述的方法进行处理，可以得到该场景下的 PDP 和 RMS 时延扩展。

图 5.8 给出了当发射天线和接收天线之间的距离为 3m 时，医院房间和走廊环境中的 PDP。从图 5.8 可以看出，主路径和次路径之间的功率差很大，主次径可以明显地区分开来，在病房和走廊场景中主径到达时间大致相同。走廊环境下功率最强的次径到达接收端时间要比病房环境早，这可能是由于走廊的狭窄环境造成的。在病房场景中明显存在更多的比走廊环境功率更强的多径分量，这可能是因为病房环境中空间小且拥有冰箱、病床和桌子等造成其散射和折射等分量更丰富导致的。图 5.9 给出了不同测量环境下 RMS 时延扩展的累积概率分布及正态分布拟合曲线，从图 5.9 可以看出 RMS 时延扩展的累积概率分布服从对数正态分布，并且走廊场景中的 RMS 时延扩展大于病房场景中的 RMS 时延扩展。此外，医院病房环境下 RMS 时延扩展的均值和标准差分别为 4.6418 ns 和 1.5104 ns，走廊场景下 RMS 时延扩展的均值和标准偏差分别为 5.134 ns 和 0.8111 ns。

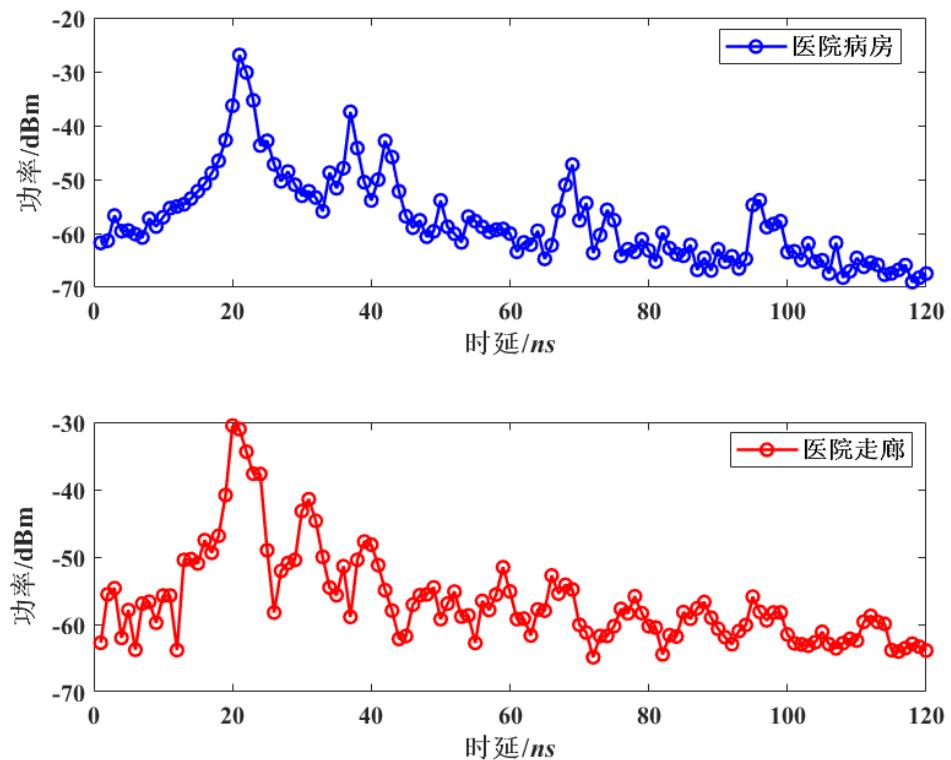


图 5.8 病房和走廊环境下的 PDP

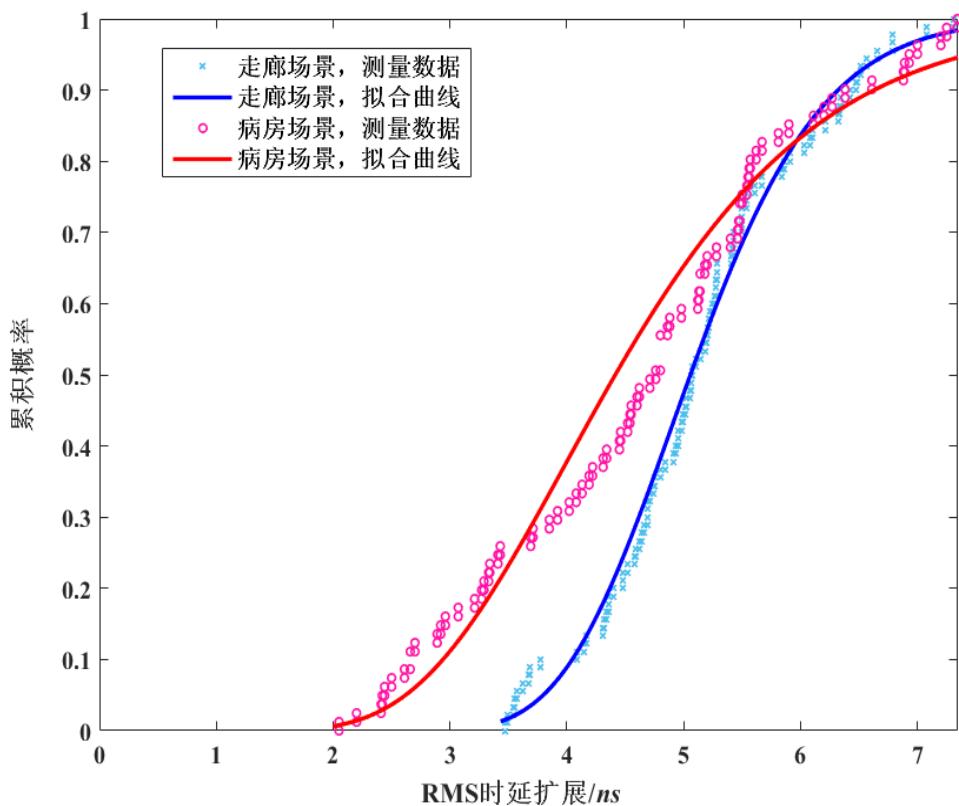
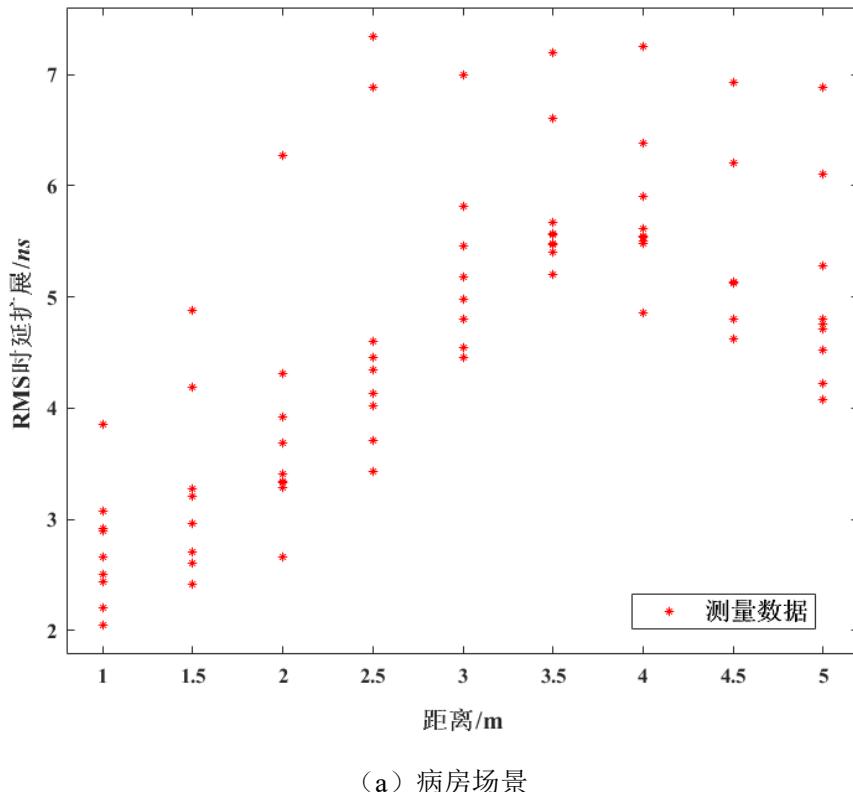


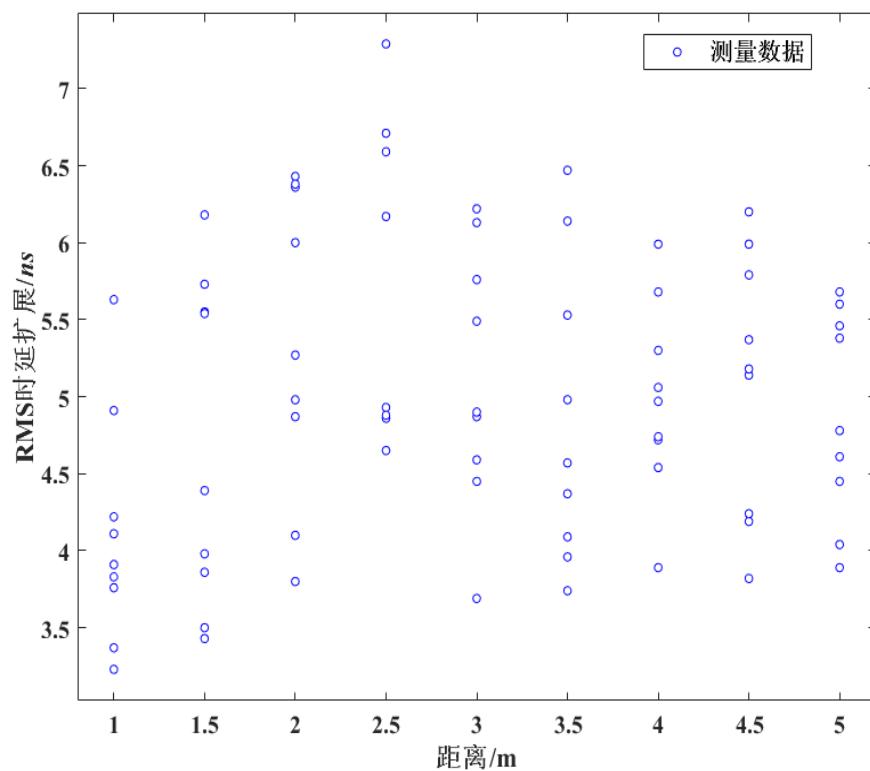
图 5.9 RMS 时延扩展在不同测量场景下的累计概率分布

5.4.2 基于路径损耗的 RMS 时延扩展模型

(1) 相关性分析

在对 RMS 时延扩展进行建模之前，首先分析了 d 与 τ_{RMS} 之间的相关性，以及路径损耗与 τ_{RMS} 之间的相关性。图 5.10 给出了收发端之间的距离 (d) 与 RMS 延迟扩展 (τ_{RMS}) 的散点图。从图 5.10 可以看出，在医院房间和走廊场景中， d 和 τ_{RMS} 之间没有线性关系。为了定量研究 d 和 τ_{RMS} 之间的相关程度，计算了 d (及其对数函数、二次函数和指数函数) 和 RMS 延迟扩展的相关系数，并将其列在表 5.5 中。可以看到，在医院房间和走廊环境下，在这些条件下的相关系数分别小于 0.8 和 0.4，这表明这两个参数之间的相关性较弱。此外，可能由于走廊长度较长，而无线电信号的频段高、波长短，从而导致到达接收端的多径分量较少且功率较小，使得 d 与 τ_{RMS} 之间的关系变得平坦，导致医院走廊环境的相关系数比医院房间环境的相关系数小。

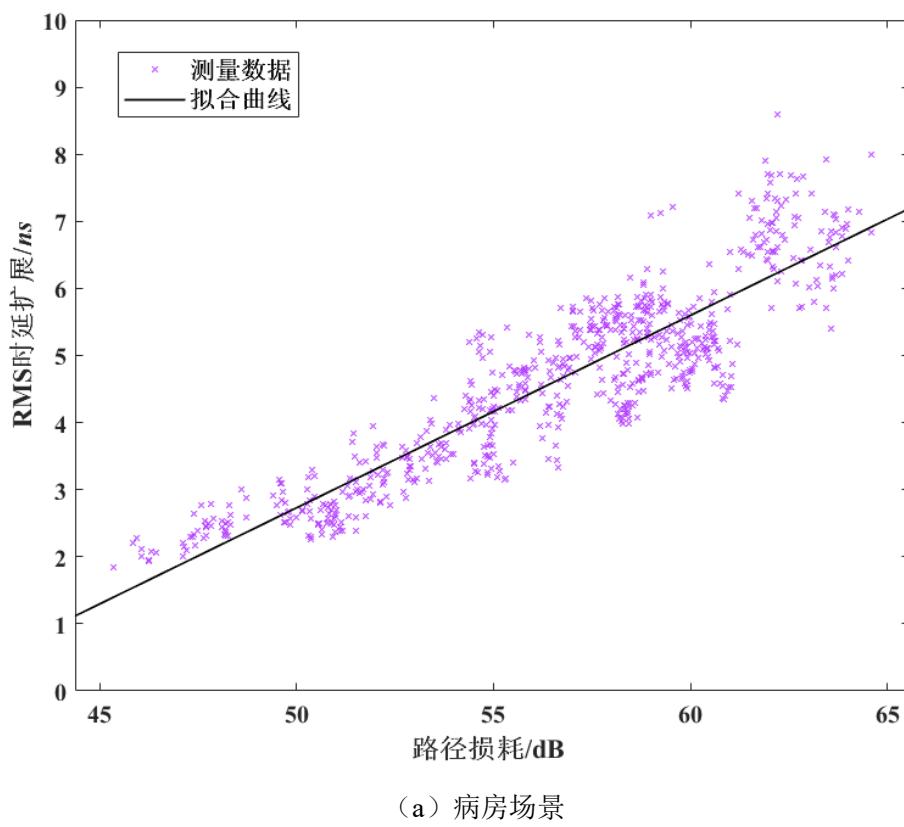




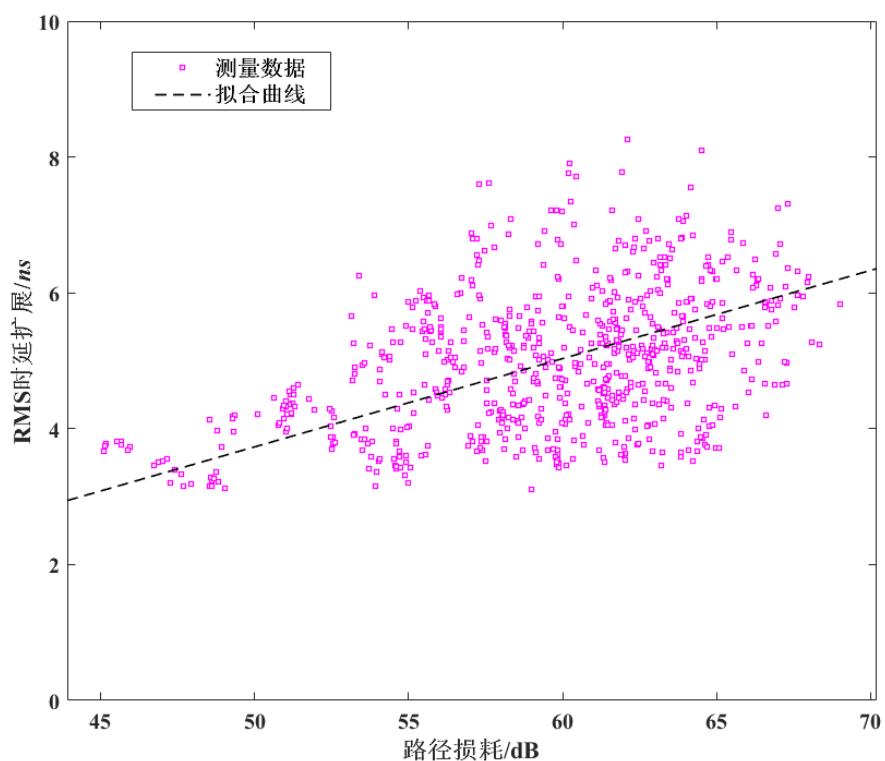
(b) 走廊场景

图 5.10 不同医院场景下 RMS 时延扩展与距离的散点图

本节还研究了路径损耗与 τ_{RMS} 的相关性。表 5.5 给出了路径损耗与 τ_{RMS} 之间的相关系数，从表中可以看出病房和走廊环境，相关系数分别超过 0.9 和 0.4，表明路径损耗与 τ_{RMS} 之间存在较强的线性相关。图 5.11 给出了路径损耗与 RMS 时延扩展的散点图及相应的拟合曲线，从图中可以看出两种场景下 RMS 时延扩展和路径损耗存在明显的线性关系。并且在病房时的线性关系比走廊更加明显，这可能也是因为走廊长度较长，而无线电信号的频段高、波长短，因此到达接收端的多径分量较少且功率较小，从而使医院走廊环境的相关系数比医院房间环境的相关系数小所导致的。



(a) 病房场景



(b) 走廊场景

图 5.11 路径损耗与 RMS 时延扩展的散点图及相应的拟合曲线

表 5.5 d 、PL 和 RMS 时延扩展的相关系数

测量场景	d	$\log_{10}(d)$	d^2	$\exp(d)$
病房	0.6613	0.7192	0.6613	0.3956
走廊	0.1302	0.2049	0.1302	0.0121
	PL	$\log_{10}(PL)$	PL^2	$\exp(PL)$
病房	0.9195	0.9115	0.9082	0.4750
走廊	0.4503	0.4535	0.4265	0.1821

表中 PL 表示路径损耗 (PL, Path Loss)

(2) 所提 RMS 时延扩展模型

基于上述相关性分析, RMS 时延扩展可以表示为路径损耗的线性函数。此外, 如图 5.11 所示, 可以看到, 测量值在拟合曲线的两侧大致均匀分布, 这可能是由于无线电信号的反射、绕射和散射的不同传播条件的随机性造成的。通过采用阴影衰落的建模方法, 将实测值与拟合值之差建模为随机变量 Z_σ 。结果表明, 该随机变量 Z_σ 服从正态分布^[60-61]。图 5.12 给出了 Z_σ 在医院房间和走廊环境中的累积概率分布和正态分布拟合曲线。

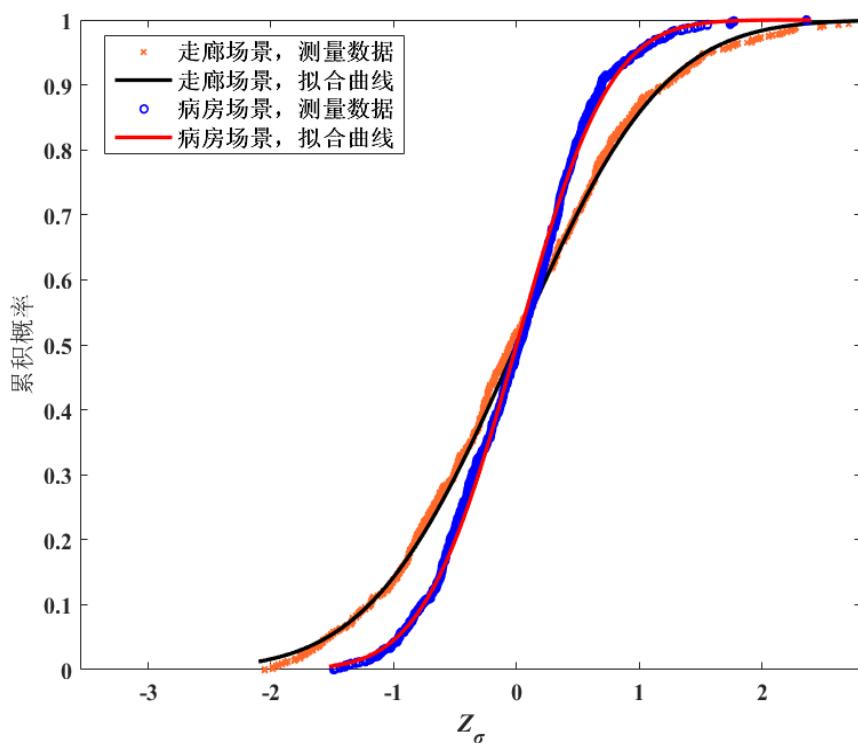


图 5.12 Z_σ 在不同医院场景下的累积概率分布

根据上述分析, 路径损耗与 τ_{RMS} 之间的关系可以建模为

$$\tau_{RMS} = qPL(d) + B_1 + Z_\sigma \quad (5.3)$$

其中 q 和 B_1 是线性拟合的斜率和截距。用 Z_σ 来描述上述随机散射效应，它是一个均值为 μ ，标准差为 σ_z 的随机变量。

将式 (5.1) 中的 $PL(d)$ 代入式 (5.3)，因此所提 RMS 时延扩展模型可以进一步写为

$$\begin{aligned}\tau_{RMS} = & q \left[PL(d_0) + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + a \sin \left(\frac{\theta}{b} \right) \right] \\ & + B + qc + qX_\sigma + Z_\sigma\end{aligned}\quad (5.4)$$

从式 (5.7) 可以发现，该模型考虑了路径损耗的随机性和路径损耗与 RMS 时延扩展关系的随机性。通常，RMS 时延扩展被建模为随机变量^[62-63]，并且 RMS 时延扩展的随机性可以用所提模型来描述。提出的模型式 (5.7) 中的参数可以通过测量数据来获得。在病室和走廊环境下公式 (5.7) 中的所有参数如表 5.6 所示， Z_σ 的累积概率分布服从零均值正态分布。

表5.6 所提的RMS延迟扩展模型的参数

场景	q	B	μ	σ_z
病房	0.29	-11.6	0	0.592
走廊	0.13	-2.678	0	0.936

(3) 模型验证

为了验证所提 RMS 时延扩展模型，给出了测量和仿真的 RMS 时延扩展的累积概率分布、平均值和标准差。图 5.13 给出了医院房间和走廊环境下测量和仿真的 RMS 时延扩展的累积概率分布。在图 5.13 中，将测量数据 $PL(d)$ 和表 5.6 中计算的 q 和 B 计入公式 (5.7) 中，可以得到仿真的 RMS 时延扩展。根据该计算方法，分别针对病室和走廊环境生成了两组仿真的 RMS 时延扩展。可以看出，所提模型能够很好地与测量数据匹配。表 5.7 显示了测量和仿真的 RMS 时延扩展的平均值和标准偏差。实测值与仿真值之间的最大误差小于 0.4 ns，验证了该模型的准确性。

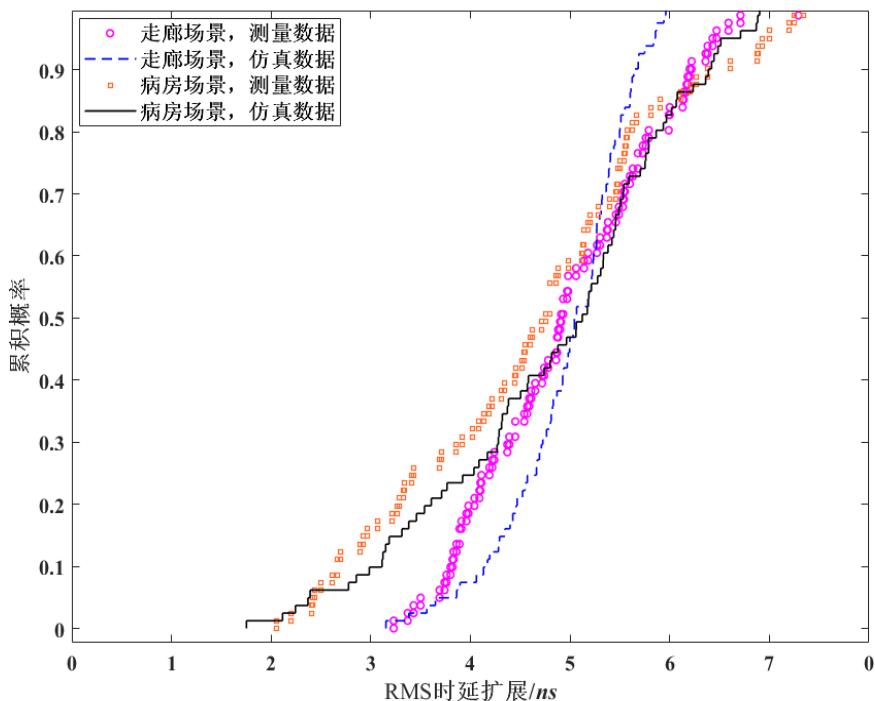


图 5.13 测量和仿真 RMS 时延扩展的累积概率分布

表 5.7 测量和仿真 RMS 时延扩展的平均值和标准差

测量 场景	测量值/ns		仿真值/ns	
	均值	标准差	均值	标准差
病房	4.6294	1.3515	4.8163	1.2589
走廊	4.9751	0.9314	4.9754	0.6124

5.5 本章小结

本论文针对 10 GHz 医院环境下的室内 WBAN 信道，提出了一种新的具有角度相关因子的统计路径损耗模型，并用多种方法对其进行了验证。该模型不仅可以提供准确的室内 WBAN 传播特性预测，而且可以为最佳接收天线角度配置提供有益的参考。同时，还研究了这些场景下 RMS 时延扩展的统计特性，并给出了估计 RMS 时延扩展的经验模型。提出的 RMS 时延扩展模型将 RMS 时延扩展描述为路径损耗加上正态随机变量的线性函数。此外，所提模型易于工程实现，并可推广到其他角度相关的场景。本章的研究成果对于未来 WBAN 在医院场景下的应用提供了理论基础和重要实践。

第六章 总结与展望

6.1 论文总结

随着 IoT 技术的发展，其在智慧医疗与健康养老、智慧城市、防控自然灾害、现代物流等领域发挥了巨大作用。体域网是 IoT 技术中十分重要的应用领域，而随着未来海量的接入设备，终端用户对服务质量和即时通信的需求，以及对通信的高速率、低时延、大连接和高可靠性等需求，使得低频段频谱资源逐渐拥挤，频谱资源短缺问题日益严重，无法满足上述需求，而高频段的频谱占用度低且带宽较大能够在一定程度上能够解决上述问题。因此，本文对室内场景中的无线体域网无线信道特性进行了研究，并针对现有文献中的不足，重点对室内 WBAN 场景下的身体角度变化、天线高度变化以及天线角度变化对信道特性的影响。具体而言，主要工作如下：

(1) 提出了一种具有身体角度影响的路径损耗模型，针对室内办公室场景，为了描述接收端身体角度变化对信道特性造成的影响，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，其表达式中，路径损耗指数与身体角度呈二次函数关系，由 PBA 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。还研究了不同角度时的 PDP 和均方根时延扩展，发现在 0° 时主径附近时几乎没有其它径存在，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，且在其他身体角度处的 RMS 时延扩展比 0° 大得多。

(2) 提出了一种具有高度影响的路径损耗模型，针对室内办公室场景，为了描述天线高度变化对信道特性造成的影响，该模型利用高度因子来修正天线高度变化引入的路径损耗，在其表达式中，路径损耗指数与天线接收端天线高度可以用带有系数的二次函数来表示，PLH 与天线高度呈二次函数关系。

(3) 提出了一种新的具有 AAF 的统计路径损耗模型，针对医院病房和走廊场景，为了描述可穿戴或手持设备角度变化对信道特性造成的影响，引入天线角度因子 AAF 修正天线角度变化引入的路径损耗，其表达式为接收天线角度的三角函数。此外，还给出了医院病房和走廊场景下时延扩展的统计特征，并提出了一种新的基于路径损耗的 RMS 时延扩展估计模型。

6.2 未来展望

本文对高频段室内环境下的 WBAN 无线信道传播特性进行了研究，已经取得一些前期成果，但受研究基础和时间所限，本文未来的研究工作主要还需从以下几个方面进行：

(1) 研究场景及频段的扩充。本文的测量场景主要有医院的病房、走廊和办公室场景，为了验证模型的普遍适用性应该在更多的室内场景进行测量与研究，比如：一些传统的室内场景（楼梯、医院手术室等），一些新兴的室内场景（工业物联网、智能家居等），一些特殊的室内场景（隧道、火车车厢等）。此外，随着 5G 普及的加快，未来毫米波通信将成为主流。因此，对上述传统的、新兴的、特殊的室内场景进行毫米波频段的测量与研究以及验证所提模型的准确性将是未来工作的重点。

(2) 更多的无线信道特性。本文所研究的无线信道特性主要是路径损耗、阴影衰落、RMS 时延扩展、PDP，这些都是典型的信道传播特性，而随着通信系统变得越来越复杂，人们为了最大效率的利用信道资源，将关注更多的无线信道特性，比如：多普勒扩展、角度扩展、到达角等信道特性。此外，对阴影衰落、RMS 时延扩展、PDP 只进行了简单的分析。因此，下一步有必要对多普勒扩展、角度扩展、到达角等信道特性进行研究，对阴影衰落、RMS 时延扩展、功率延迟谱进行更加深入的研究。

(3) 更多的对信道特性产生影响的因素。本文研究了天线角度变化、身体角度变化及天线在不同人体高度对信道特性的影响，但是在室内 WBAN 的应用中还有许多其他因素会对信道特性造成影响（如：佩戴在手臂上的穿戴设备，当手臂摆动时的影响，房间人数及状态的影响等），因此，下一步将对更多的对信道特性产生影响的因素进行测量与研究。

(4) MIMO 信道传播特性。本文所研究的都是单发单收的无线信道特性，随着 5G 商用的到来，未来的穿戴设备可能采用 MIMO 来提高信道容量，而 MIMO 信道与单一发射天线和单一接收天线的信道有一定的区别，所研究的信道特性也有所不同，如：角度扩展，信道相关性，信道容量等。因此，下一步有必要将单收单发的天线换成 MIMO 天线进行信道测量与研究。

参考文献

- [1] Zanella A, Bui N, Castellani A, et al. Internet of things for smart cities[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2014, 1(1): 22-32.
- [2] Mondal S, amit. A vision of IoT: Applications, challenges, and opportunities with dehradun perspective[J], Computer Networks, 2017, 479: 553-559.
- [3] 华为技术有限公司. 5G 时代十大应用场景白皮书[EB/OL]. 华为技术有限公司白皮书, huawei.com, 2017.
- [4] Bouazizi A, Zaibi G, Samet M, et al. Wireless body area network for e-health applications: Overview[C]. 2017 International Conference on Smart, Monitored and Controlled Cities (SM2C), 2017: 64-68.
- [5] Amagasa S, Kojin H, Kamada M, et al. Evaluation of physical activity using smartphones and wearable devices in healthcare: Current situation and future perspective[J]. [Nippon kōshū eisei zasshi] Japanese Journal of Public Health, 2021, 68(9): 586-596 .
- [6] Sachi N, Rutvij H. Recent research on wireless body area networks: A survey[J]. International Journal of Computer Applications, 2016, 142(11): 42-48.
- [7] Rappaport T S, Maccartney G R, Samimi M K, et al. Wideband millimeter-wave propagation measurements and channel models for future wireless communication system design[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(9): 3029-3056.
- [8] Pi Z, Khan F. An introduction to millimeter-wave mobile broadband systems[J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(6): 101-107.
- [9] 李畅, 庞宇, 雷倩. WBAN 信道的路径损耗模型[J]. 电子测试, 2013(05): 141-143.
- [10] Abbasi Q H, Khan M M, Alomainy A, et al. Sectorised radio channel characterisation for ultra-wide band body-centric wireless communications[C]. European Conference on Antennas & Propagation, 2011: 191-195.
- [11] 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): 5.
- [12] Pei, Zhou, Kaijun, et al. IEEE 802.11ay-Based mmWave WLANs: Design challenges and solutions[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(3): 1654-1681.
- [13] Namgeol O, Han S W, Kim H. System capacity and coverage analysis of femtocell networks[C]. Wireless Communications & Networking Conference, 2010: 1-5.
- [14] Rosini R, D'Errico R, Verdone R. Body-to-Body communications: A measurement-based channel model at 2.45 GHz[C]. Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2012: 1763-1768.
- [15] Mani F, D'Errico R. A spatially aware channel model for body-to-body communications[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2016, 64(8): 3611-3618.
- [16] Bharadwaj R, Koul S K. Experimental analysis of ultra-wide band body-to-body communication channel characterization in an indoor environment[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(3):1779-1789.
- [17] Sanguanpuak C, Bunlaksananusorn C, Promwong S. HB channel measurement and modeling in UWB for WBAN[C]. 2019 Joint International Conference on Digital Arts, Media and Technology with ECTI Northern Section Conference on Electrical, Electronics, Computer and Telecommunications Engineering (ECTI DAMT-NCON), 2019: 124-127.
- [18] 许波, 贺鹏飞, 段嗣妍. 无线体域网信道特性研究[J]. 电信科学, 2011, 27(03): 78-84.
- [19] Kadel R, Islam N. Comparison of channel models for wireless body area networks (WBANs)[C]. 2018 IEEE Conference on Wireless Sensors (ICWiSe), 2018: 77-82.
- [20] Gao A, Peng H, Zou J, et al. Performance of WBAN UWB system based on the measured on-body channel

- model[C]. 2012 IEEE 2nd International Conference on Cloud Computing and Intelligence Systems, Hangzhou, China, 2012: 893-897.
- [21] Teawchim S, Promwong S. Experimental evaluation of UWB human body transmission model for WBAN[C]. 2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Chiang Mai, Thailand, 2016: 1-5.
- [22] Azhari M E, Nedil M, Alj Y S, et al. Off-Body LOS and NLOS channel characterization in a mine environment[C]. 2015 International Conference on Electrical and Information Technologies (ICEIT), 2014: 114-118.
- [23] Azhari M E, Nedil M, Mabrouk I B, et al. Characterization of a NLOS off-body channel at 2.45 GHz using patch antenna inside a mine[C]. 2015 IEEE International Conference on Ubiquitous Wireless Broadband (ICUWB), 2015: 1-5.
- [24] 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 & Propagation, 2016, 64(9): 4022-4035.
- [25] Munoz M O, Foster R, Hao Y. On-Body channel measurement using wireless sensors[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(7):3406.
- [26] 毛刚, 龚成仙. 2-6GHz 体域网信道测量及后期数据处理[J]. 电脑知识与技术, 2015, 11(15): 18-20.
- [27] Sani A, Alomainy A, Yang H. Numerical characterization and link budget evaluation of wireless implants considering different digital human phantoms[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2009, 57(10): 2605-2613.
- [28] Sani A, Rajab M, Foster R, et al. Antennas and propagation of implanted RFIDs for pervasive healthcare applications[J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 98(9): 1648-1655.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] Khan M M, Alomainy A, Hao Y. Off-Body radio channel characterization using ultra-wide band wireless tags[C]. 2010 International Conference on Body Sensor Networks, 2010: 80-83.
- [32] Brizzi A, Pellegrini A, Zhang L, et al. Statistical path-loss model for on-body communications at 94 GHz[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2013, 61(11): 5744-5753.
- [33] 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 (APSURSI), 2016: 1441-1442.
- [34] 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.
- [35] Liu J, Shao Y, Wang P, et al. Dynamic channel modeling of WBAN at 28 GHz[C]. 2020 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting, 2020: 1481-1482.
- [36] 吴志忠. 移动通信无线电波传播[M]. 人民邮电出版社, 2002.
- [37] Bertoni H L. Radio propagation for modern wireless systems[M]. Publishing House of Electronics Industry, 2000.
- [38] Saleh A, Valenzuela R A. A statistical model for indoor multipath propagation[J]. IEEE J. sel. areas Commun, 1987, 5(2): 128-137.
- [39] Rees V, J. Measurements of impulse response of a wideband radio channel at 910 MHz from a moving vehicle[J]. Electronics Letters, 1986, 22(5): 246-247.
- [40] Bultitude R J C, Mahmoud S A, Sullivan W. A comparison of indoor radio propagation characteristics at 910 MHz and 1.75 GHz[C]. WESCANEX 88: 'Digital Communications Conference Proceedings, 1988: 161-168.
- [41] Goldsmith A. Wireless communications[M]. The People's Posts and Telecommunications Press, 2007.

- [42] Pahlavan K, Howard S J. Frequency domain measurements of indoor radio channels[J]. Electronics Letters, 1989, 25(24): 1645-1647.
- [43] Zaghloul H, Morrison G, Fattouche M. Frequency response and path loss measurements of indoor channel[J]. Electronics Letters, 1991, 27(12): 1021-1022.
- [44] Friis H T. A note on a simple transmission formula[J]. Proc Ire, 1946, 34(5): 254-256.
- [45] Cox D C, Murray R R, Norris A W. 800MHz attenuation measured in and around suburban houses[J]. Bell Labs Technical Journal, 1984, 63: 921-954.
- [46] Alexander S E. Radio propagation within buildings at 900 MHz[J]. Electronics Letters, 1982, 18(21): 913-914.
- [47] Akerberg D. Properties of a TDMA pico cellular office communication system[C]. IEEE Global Telecommunications Conference and Exhibition. Communications for the Information Age, 1988: 343-1349.
- [48] Devasirvatham D. Multi-Frequency radio wave propagation measurements in the portable radio environment[C]. IEEE International Conference on Communications, 1990: 1334-1340.
- [49] Yong S C. MIMO-OFDM wireless communications with MATLAB[M]. Wiley Publishing, 2010.
- [50] Turin G, Clapp F, Johnston T, et al. A statistical model for urban multipath propagation[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1972, 21(1): 1-9.
- [51] Hashemi H, Tholl D. Statistical modeling and simulation of the RMS delay spread of indoor radio propagation channels[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1994, 43(1): 110-120.
- [52] Awad M K, Wong K T, Li Z B. An integrated overview of the open literature's empirical data on the indoor radio wave channel's delay properties[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2008, 56(5): 1451-1468.
- [53] Wegmueller M S, Oberle M, Felber N, et al. Signal transmission by galvanic coupling through the human body[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2010, 59(4): 963-969.
- [54] 崔燕妮, 桑维, 林仟, 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: 261-266.
- [55] 许拓. 28 GHz 毫米波在室内电波传播特性及建模[D]. 武汉理工大学, 2018.
- [56] 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 & Propagation, 2016, 64(9): 4022-4035.
- [57] 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.
- [58] 杨大成. 移动传播环境[M]. 机械工业出版社出版, 2003.
- [59] 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(01): 17-24.
- [60] 余雨. 小蜂窝场景中室内短距离无线信道传播特性研究[D]. 南京邮电大学, 2017.
- [61] Yu Y, Liu Y, Lu W J, et al. Measurement and empirical modeling of root mean square delay spread in indoor femtocells scenarios[J]. IET Communications, 2017, 11(13): 2125-2131.
- [62] S. Li, Y. Liu, X. Zhang, et al. Measurement and simulation of 28 GHz millimeter-wave propagation characteristics in the corridor environment[C]. 2016 IEEE 9th UK-Europe-China Workshop on Millimeter Waves and Terahertz Technologies (UCMMT), 2016: 134-137.
- [63] Lee J, Kim K W, Park J J, et al. Omnidirectional millimeter-wave propagation characteristics of corridor environments based on measurements at 28, 38, 71 and 82 GHz[C]. 2022 16th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 2022: 1-5.