

工业物联网无线信道特性研究

李一倩, 刘留, 李慧婷, 张琨, 袁泽

(北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044)

摘要: 目前, 工业物联网已成为国家的关键竞争力, 智能制造产业加速发展, 无线技术作为工业物联网系统中的信息传输通道, 在工业领域起着强有力的支撑作用。首先介绍了工业场景的无线信道特征; 随后分析了不同频段上的传播特性, 并建议了工业专用网络初始部署的主要调整频段; 对大尺度衰落和小尺度衰落两大无线信道特性在工业场景下产生的原因、影响因素及取值范围进行了整理, 归纳了工业物联网无线信道特性的相应参数。

关键词: 物联网; 工业物联网; 无线通信技术; 信道特性

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2019.00130

Research on characteristics of industrial IoT wireless channel

LI Yiqian, LIU Liu, LI Huiting, ZHANG Kun, YUAN Ze

School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract: Nowadays, the industrial IoT has become the key competitiveness of the country, and the intelligent manufacturing industry is accelerating. As the information transmission channel in the industrial IoT system, wireless technology plays a strong supporting role in the industrial field. Firstly, the wireless channel characteristics of industrial scene were introduced. Then the propagation characteristics in different frequency bands were analyzed and the main adjustment frequency bands for the initial deployment of industrial private networks were suggested. The causes, influencing factors and value ranges of the large-scale fading and small-scale fading were summarized, and corresponding parameters of the wireless channel characteristics of industrial IoT were summarized.

Key words: Internet of things(IoT), industrial Internet of things, wireless communication technology, channel characteristics

1 引言

2013年4月, 德国在汉诺威工业博览会上正式提出“工业4.0”战略, 其核心是实现工厂的智能化生产; 我国国务院于2015年5月颁布了《中国制造2025》来指引我国的经济转型发展, 战略要求工厂实现低功耗、高智能化的转变。随着一系列国家政策和战略的提出, 工业领域发生巨大变革, 新一代信息技术条件下的智能制造正在加速发展。作

为新一代移动通信技术, 5G技术的迅猛发展切合了工业物联网(IIoT, industrial Internet of things)对无线网络的应用需求, 5G技术定义的三大场景不但覆盖了高带宽、低时延等传统应用场景, 还能满足工业环境下的设备互联和远程交互应用需求, 这种广域网全覆盖的特点为企业构建统一的无线网络提供了可能。

IIoT已成为国家关键竞争力^[1], 智能制造正加速发展。物联网、大数据、云计算等新一代信息技

收稿日期: 2019-05-14; 修回日期: 2019-08-28

基金项目: 北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室项目(No.KFKT-2018105); 国家自然科学基金重点资助项目(No.61931001)

Foundation Items: Key Laboratory of Universal Wireless Communications, Ministry of Education (No.KFKT-2018105), National Natural Science Foundation of China (No.61931001)

术的快速发展及应用,使智能制造被赋予了新的内涵,工业领域和社会发生了巨大改变,人类生产工业发生变革,使人类社会生活水平更上一个台阶^[2]。当前,提高生产效率、实现节能减排是我国制造业面临的主要战略任务,随着 IIoT 的发展,智能制造将贯穿于企业生产经营的各个环节,为我国制造业的发展带来了深刻变革。

通信系统作为工业生产制造环节中的信息传输枢纽,为稳定制造、安全生产提供了强有力的基础支撑^[1,3]。当前阶段,智能制造普遍采用的有线方案面临布线工期长、易腐蚀、维护难、成本高等诸多问题,随着柔性制造的需求越来越强烈,未来生产线需要适应客户个性化的定制需求,无线通信技术的应用不仅可以实现生产线的灵活调整和重组,而且相对于有线通信技术而言,具有成本低、安装维护便捷等优点,但同时也面临着无线电波传播损耗大等难题^[1]。

在任何移动无线通信系统中,传输信号都需要经历无线信道到达信宿,只有充分了解、分析并掌握无线信道的相关特性,才能针对具体问题提出解决方案,更好地提高通信系统的有效性及其可靠性指标^[3]。因此,准确认识 IIoT 场景下的无线信道特性是 IIoT 研究的先决条件,其原因在于:1) 各种物理层的相关技术,如最佳的调制方式和编码交织方式、均衡器的设计,或者 MIMO、OFDM 系统中的天线配置选择和子载波分配等,都必须在充分掌握信道特性后才能充分挖掘该系统的容量,进一步优化系统的性能;2) 在实际的无线通信系统部署中,需要根据实地无线传播环境进行网络规划和容量优化,准确了解无线信道特性可以使网络部署、优化、规划等工作更加准确和有效^[4]。此外,从信息论的角度来看,影响通信质量和频谱效率的因素有两个,分别是传输信道的相关特征和传输路径上的信噪比^[3]。

总之,无线信道的传播特性是构建移动无线通信系统的基础部分,对于无线通信系统从设计评估到标准化以至到最终部署的各个环节,都具有十分重要的意义,要想利用无线通信技术更好地支撑 IIoT,研究工业场景下的无线信道特性是不可或缺的^[4]。目前,国内外关于工业环境下的无线信道特性研究分析较少,面对复杂的工业互联需求,5G 的三大场景能分别支撑不同的功能应用需求,如增强移动宽带(eMBB, enhanced mobile broadband)

能支撑远程视频监控、视频会议等高带宽的应用场景,海量机器类通信(mMTC, massive machine type of communication)能满足大量低功耗嵌入式终端的数据连接与传输需求,高可靠低时延通信(URLLC, ultra reliable low latency communications)可以将网络等待时间的目标压低至 1 ms 以下,以支撑工业自动化控制过程中系统和设备对数据传输实时性的诸多指标和要求^[5],当前国内工厂要实现低功耗、高智能化的转变,需要依赖 5G 提供不同场景的无线连接方案。本文详细论述了相关领域的研究成果,探讨分析研究方法和目标,并进行了归纳整理,旨在为未来 IIoT 中的无线通信研究提供参考。

2 IIoT 场景分析

IIoT 的发展趋势是与实际应用场景进行更紧密的结合。现在 IIoT 不是以某一种方式就能够应用于所有场景,而是要与不同的场景和应用相匹配。不同于 3GPP 组织给通信行业提供的标准协议 TR 38.901^[6]中所包含的室内场景,工业场景通常有更大的工作区域,包含更多不同尺寸的金属设备和移动物体,因此信道特征与传统室内信道有较大差异。

文献[3]提出了 3 类典型工业场景:1) 精密工业场景,如手机电路板电装车间、家用电器生产线车间等,在这类场景中,生产都是在机箱内部流水线上进行,操作工人的走动会产生信道的时变性;2) 常规工业场景,如汽车加工车间,在这类场景中,有工业机器人、机械臂等自动化设备摇摆工作,传播环境属于时变信道传播环境;3) 传统工业场景,如钢铁厂车间,在这类场景中,工业建筑空间相对较大,机器设备尺寸很大,存在大型的金属设备、起重机械、装卸机等,这些金属设备会对无线电波造成较多反射。在文献[7-8]中,针对 URLLC 提出了 5 种工业场景案例:1) 自动化运动控制场景,在这类场景中应用的例子包括机器人、机床以及包装和印刷机的运动控制,在运动控制中,控制器与大量传感器和执行器交互,要考虑近距离通信和同步要求;2) 离散制造场景,包括火箭、飞机、船舶、电子设备、机床以及汽车等制造,这类场景工作区域空间比较大,信号传播时会产生较多反射;3) 过程自动化场景,如炼油厂和配水网络,在这类场景中大量存在金属管道,无线电波在传输过程中会穿透管道壁进行传播,造成穿透损耗;4) 电力能源行

业场景，这些场景工作区域空间比较大，通常存在照明设备、温度传感器、发电机等，这些设备会对无线电波造成反射，从而使得无线信号产生多径传播，由于配电是一项基本的基础设施，因此通常由专用网络提供服务；5) 智能交通系统（ITS，intelligent transport systems）和车用无线通信技术（V2X，vehicle to everything），ITS 和 V2X 包含多种与通信有关的应用，主要指交通参与者（车辆、自行车、行人等）之间以及与基础设施之间的协作系统，这类场景的信道时变性突出。

通过以上对典型工业场景的介绍，可以得出 IIoT 场景相较于室内场景的区别，主要包括以下 4 点。

1) 较大的工作空间

工业场景内通常存在固定的建筑和基础设施，这些设施中大部分为金属反射体且形状大小各异，它们的密度和分布会对无线电波产生反射和散射，从而对视距（LOS，line of sight）传播产生影响。

2) 突出的信道时变特性

首先，工业场景存在操纵器、叉车、起重机、机器人等设备，这些设备工作时会引起信道时变，导致多普勒频偏；其次，工业场景中存在的组件到组件的移动是具有双重移动性的，这种移动性还会导致遮挡效应^[9]；最后，在物体或天线移动的情况下，可能发生 LOS 和非视距（NLOS，non-line of sight）的信道条件之间的快速转换^[10]。

3) 灵活部署的基站和设备终端

工业场景的设备终端包括机器、装配线、叉车和起重机等，这些设备可以分布在固定位置，也可以与基站位置呈 3D 部署状态，即基站可以高于或

低于用户终端。

4) 天线的部署取决于具体的工厂布局和应用

当工厂空间宽阔且直射路径较多时，天线部署在墙壁或者柱子上；当短距离传输高速数据量时，需要在天花板上部署密集的天线网络。

5G-ACIA（5G alliance for connected industries and automation）的工业场景如图 1 所示，5G-ACIA^[11]提出了一个具有典型尺寸、拓扑结构和环境特征的工业场景。场景尺寸为 180 m×80 m×25 m，空间中没有或很少有内墙。室内工业场景被划分为不同的工作区，如装配区、生产区、存储区和办公室，不同的工作区域可能具有不同的信道特征。

此外，文献[12]提出了一种新的工业场景分类：开放式生产空间（OPS，open production space）和密集式混合工厂空间（DFC，dense factory clutter），并描述了两种不同场景下的天线分布方式：嵌入式基站和高架基站。两种工业场景的特征如表 1 所示。

综上所述，工业场景的无线信道特征与传统室内场景有很大不同，其传播空间更大、多径分量更多、多普勒效应更突出、基站和设备终端的部署更灵活，5G-ACIA 提出的工业场景模型是一个具有典型尺寸、拓扑结构的工业场景，涵盖了大多生产制造的工厂，在之后的研究中，建议参考 5G-ACIA 提出的工业场景模型，此外，可以把 OPS 和 DFC 两大类工业场景作为参考，此外，还要考虑不同工业场景下的信道特征以及同一场景不同工作区域内的天线部署方式。

3 IIoT 中无线信道的频段

IIoT 中无线信道的频段选择与不同场景和不同

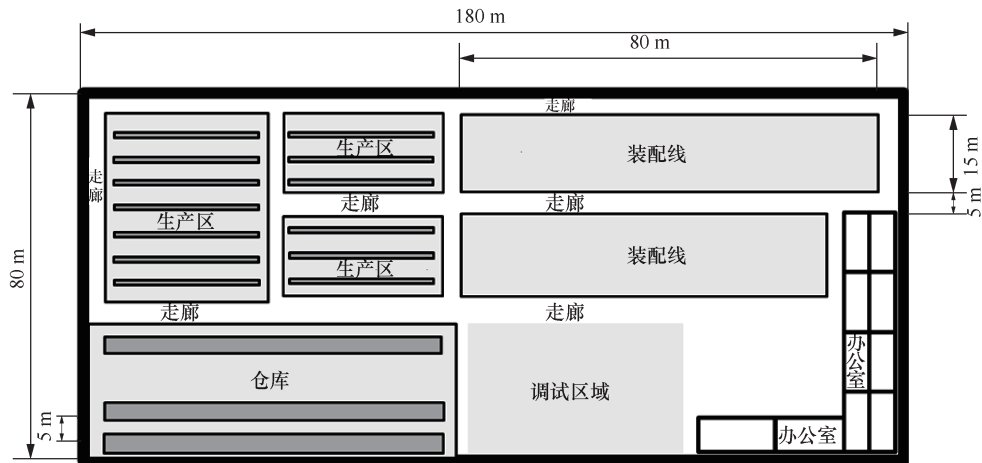


图 1 5G-ACIA 的工业场景

表1 两种工业场景的特征

工厂特征	OPS	DFC
工厂尺寸	100 m×60 m	100 m×60 m
天花板的高度	5 m	10 m
布局	几个混合生产区域，具有开放空间和长装配线以及存储区域	主要生产线和大型机械
机械设备结构	中型不规则机械设备	大型规则形状的机械设备
机械设备平均高度	2.5 m	5 m
用户终端高度	0.25 m 和 1.75 m	0.25 m 和 1.75 m
基站部署方式	0.25~3.2 m	0.25~4.1 m
其他考虑	完全自动化之前，生产线周围有大量工人和一些小型移动运输车	工人少

应用有关，各频段特性不同，适用于不同的部署场景。一般来说，从低功耗大连接的工业场景到高可靠低时延的工业场景，低于 6 GHz 和毫米波频段的部署都需要研究^[13]。

在低功耗大连接的工业场景下，工业无线网络通常使用的频段有甚高频（VHF）、特高频（UHF）和超高频（SHF），如 230 MHz 频段、433 MHz 频段和 470~510 MHz 频段、2.4 GHz 和 5.8 GHz 频段等免授权频段，也包括电信运营商购买的授权频段^[1]。在短距离无线通信中，Wi-Fi、Bluetooth、ZigBee、射频识别（RFID，radio frequency identification）、超宽带（UWB，ultra wide band）等技术被广泛应用，这些技术的使用频段在 2.4 GHz。此外，基于蜂窝的窄带物联网（NB-IoT，narrow band Internet of things）、基于 LTE 演进的物联网接入技术（LTE eMTC，LTE enhanced MTC）、低功耗超长距离无线通信技术（LoRa，long rang）和 Sigfox 等新的主流低功耗广域网络技术与这些短距离无线通信技术能够互补，相互配合使用于 IIoT 的应用场景中^[2]。四大新型主流低功耗广域网络技术对比如表 2 所示。

在工程机械制造场景、能源行业场景和其他工业设施场景中，对无线信道测量使用的频段包含了 0.9~5.8 GHz，主要集中在 2.4 GHz，在不同工业场

景下部署的频段及其特殊考虑如表 3 所示。

对于高可靠低时延的工业场景，无线的传输带宽相对于大连接场景较大，在该工业场景下，所使用的频段可以选取毫米波频段，通常认为毫米波频率范围为 26.5~300 GHz，带宽高达 273.5 GHz，毫米波频谱容量大、频谱利用率高，具有较高的空间复用能力。在 IIoT 通信中使用毫米波的明显优点是可以利用大量未被利用的连续频谱，也可以提供高数据速率、低时延和高精度定位的服务，还可以通过中继来交换丰富的频谱以增加覆盖范围。

文献[7]考虑了在 52.6 GHz 以上的频段中，工业自动化物联网、智能电网自动化配电、ITS、V2X、AR（augmented reality）/VR（virtual reality）、冗余网络应用等低时延、高可靠性要求的场景应用。文献[24]对频段范围为 3.1~10.6 GHz 的 UWB 频带进行了无线信道的测量。文献[25]在工厂大厅进行了测量，测量频段为 28 GHz，并考虑了天线部署在较高位置和较低位置两种情况。文献[26]在多个室内场景中进行了信道测量，测量带宽为 6 GHz，中心频率为 54 GHz 和 70 GHz，并分析了测量结果。文献[27]对走廊进行了测量，测量频带为 60 GHz，并考虑了 LOS 和 NLOS 两种方式。

综上所述，用于工业场景的候选频段的范围很广，至少要考虑 3.4~4.2 GHz、26 GHz/28 GHz 频

表2 四大新型主流低功耗广域网络技术对比

技术	频段	信道带宽	吞吐量	时延	建网
NB-IoT	800 MHz; 900 MHz	180 kHz	<250 kbit/s	10 s	LTE 软件升级
LTE eMTC	1.8 GHz; 2.1 GHz	1.4 MHz	<1 Mbit/s	<100 ms	LTE 软件升级
LoRa	470 MHz; 868 MHz; 915 MHz	125 kHz/500 kHz	<50 kbit/s	NA	新建网络
Sigfox	470~510 MHz	100 Hz	<100 bit/s	NA	新建网络

表 3 在不同工业场景下部署的频段及其特殊考虑

工业场景	频段/GHz	传播方式	距离 d/m	其他考虑
汽车焊接车间 ^[14]	1.1、1.6、2.55 和 3.5	LOS	120	天线分别在金属箱内部、外部
		NLOS	120	
工业设备 ^[15]	2.40	LOS	100	考虑了其他无线电的干扰
		NLOS	100	
化学纸浆和电缆工厂 ^[16]	2.45	LOS	95	研究多种场景，测量在不同的位置进行
核电站 ^[16]	2.45	LOS	—	
工业设施 ^[17]	1.30	LOS 和 NLOS	100	测量时延达 300 ns 的情况
石油钻井平台 ^[18]	2.40 5.80 2.40 5.80	LOS	10	在一个模拟典型工业环境的测试平台进行测量
		LOS	10	
		NLOS	10	
		NLOS	10	
金属加工厂 ^[19]	0.90 2.40 5.20	LOS	140	在多径分量丰富的环境中进行测量
		LOS	140	
		LOS	140	
500 kV 变电站 ^[20]	2.40	LOS	20	对电力能源场景进行全面测量，包括 LOS 和 NLOS
		NLOS	20	
地下变压器 ^[20]	2.40	LOS	20	
		NLOS	20	
主电源室 ^[20]	2.40	LOS	20	
		NLOS	20	
生产设备装配间 ^[21]	0.90 1.60 2.45	LOS	16	研究了一个新的信道容量模型
		LOS	16	
		LOS	16	
生产设备电子室 ^[21]	0.90 1.60 2.45	LOS	16	
		LOS	16	
		LOS	16	
生产设备机械室 ^[21]	0.90 1.60 2.45	LOS	16	
		LOS	16	
		LOS	16	
走廊 ^[22]	1.90	LOS	—	对 K 因子进行新的估计
实验室 ^[22]	1.90	LOS	—	
工业厂房 ^[22]	1.90	LOS	—	
工业生产实验室 ^[23]	2.30、5.70	LOS 和 NLOS	35	天线在空间中均匀配置

段^[12]还有毫米波频段，其中，3.4~4.2 GHz 频段是带宽高达 100 MHz 的工业专用网络初始部署的主要调整频段；26 GHz/28 GHz 频段可以提供高达 1 GHz 的带宽用来满足未来的应用场景，如具有基于 HD 摄像机的传感器和超高采样要求的过程^[12]；毫米波频段可以用于高可靠低时延的工业场景，此外要注意的是，毫米波频段的遮挡效应会高于 6 GHz 以下

频段，原因在于衍射损耗与频率有关^[28]。

4 大尺度衰落

大尺度衰落的定义为：在几个波长的距离间隔内，观测到的接收信号功率随距离的变化^[29]。表征大尺度衰落的参数有路径损耗、阴影衰落和遮挡效应。传播距离与信号强度关系如图 2 所示。

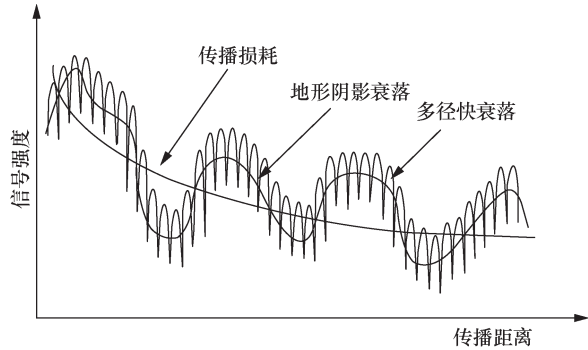


图2 传播距离与信号强度关系

4.1 路径损耗

路径损耗是由信号沿传播路径衰减引起的, 计算方法为有效发射功率与接收功率之间的差值, 在实际场景中, 平均接收信号功率随距离的变化呈对数衰减, 平均大尺度路径损耗可表达为

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

其中, n 为路径损耗指数, 表示平均路径损耗随距离的增长速率; $PL(d_0)$ 为近地参考距离下的路径损耗, d_0 由测量决定。 n 反映了无线电波传输时的损耗情况, n 越大则表明无线链路损耗随着距离增加越严重。

文献[15]中, 信道测量是在 2.4 GHz 的工业设备中进行的, 在 LOS 和 NLOS 情况下, 路径损耗指数分别为 1.6 和 3.73。文献[16]在 3 种不同的工业室内使用 LOS 场景进行测量, 其中, 化学纸浆和电缆工厂的路径损耗指数为 1.1, 核电站的路径损耗指数为 1.86。文献[18]研究了一个模拟石油钻井平台的试验台, 对 LOS 和 NLOS 场景分别测量了 2.4 GHz 和 5.8 GHz 的路径损耗参数。测量和仿真结果显示, LOS 的路径损耗指数 n 小于 2, 这是由金属板的波导效应引起的; 两种场景下, 5.8 GHz 频段的路径损耗指数 n 均大于 2.4 GHz 频段的路径损耗指数。文献[38]研究了在炼油厂和汽车组装厂的路径损耗参数, 在 LOS 场景下, 这些高反射场的路径损耗指数大于 2。文献[19]研究了各种工业地形 (900 MHz、2 400 MHz 和 5 200 MHz) 的路径损耗参数, 测量结果发现, 所有的路径损耗指数 n 都小于 2 (即自由空间中的路径损耗)。文献[20]研究了用于智能电网应用的电力环境路径损耗测量结果。文献[21]中给出了从 900 MHz、1 600 MHz 和 2 450 MHz 共 3 种不同工业室内环境中获得的类似结果。

工业测量中路径损耗参数如表 4 所示, 可以发

现, 这些参数随环境、频率和链路配置的不同而发生显著变化。在许多环境中, 可以观察到路径损耗指数 n 小于 2, 这可能是由于金属设备表面发生镜面反射产生波导效应。对于表 4 中的许多环境, 路径损耗指数和频率之间没有明确的关系, 这表明路径损耗不仅与传播距离有关, 还可能与工业建筑的拓扑结构以及散射体的材料类型 (金属、木材、混凝土等)、尺寸和密度有关。

表4 工业测量中路径损耗参数

工业场景	频段/GHz	传播方式	距离 d/m	路径损耗指数 n
工业设备 ^[15]	2.40	LOS	100	1.60
		NLOS	100	3.73
化学纸浆和电缆工厂 ^[16]	2.45	LOS	95	1.10
		核电站 ^[16]	2.45	LOS
工业设施 ^[17]	1.30	LOS	100	2.20
石油钻井平台 ^[18]	2.40	LOS	10	1.39
		LOS	10	1.76
	2.40	NLOS ¹	10	2.06
		NLOS ¹	10	2.44
	2.40	NLOS ²	10	1.17
		NLOS ²	10	1.41
金属加工厂 ^[19]	0.90	LOS ³	140	3.51
		LOS ⁴	140	2.49
	2.40	LOS ³	140	3.44
		LOS ⁴	140	2.16
500 kV 变电站 ^[20]	2.40	LOS ³	140	2.59
		LOS	20	2.42
地下变压器 ^[20]	2.40	NLOS	20	3.51
		LOS	20	1.45
主电源室 ^[20]	2.40	NLOS	20	3.15
		LOS	20	1.64
生产设备装配间 ^[21]	0.90	NLOS	20	2.38
		LOS	16	1.72
		LOS	16	1.37
生产设备电子室 ^[21]	2.45	LOS	16	1.69
		LOS	16	1.96
		LOS	16	1.83
生产设备机械室 ^[21]	0.90	LOS	16	1.81
		LOS	16	1.79
		LOS	16	1.59
走廊 ^[22]	1.90	LOS	16	1.69
		LOS	16	1.59
		LOS	16	1.69
走廊 ^[22]	1.90	LOS	—	1.80
实验室 ^[22]	1.90	LOS	—	2.20
工业厂房 ^[22]	1.90	LOS	—	1.40

表 4 中, NLOS¹ 建模使用了与 LOS 建模相同的 $PL(d_0)$, NLOS² 建模使用独立的 $PL(d_0)$, $PL(d_0)$ ³

由固定截距法确定^[29], $PL(d_0)^4$ 由非固定截距法确定^[29]。

3GPP 室内热点 InH 模型能够在一定程度上预测工业场景中的路径损耗, 在此基础上, 为了更好地反映工业场景下的信道特征, 文献[25]提出了一种 InH 信道模型的参数修正方案, 新修正方案考虑了 OPS 和 DFC 两种工业场景以及高架基站和嵌入式基站两种天线部署方式, 这样能更好地覆盖空间环境。修正的 InH 信道模型如表 5 所示。

表 5 修正的 InH 信道模型

工业场景	路径损耗衰落模型	σ_{SF} / dB
LOS	$PL_{\text{LOS}} = 32.45 + 20\lg(f_c) + 20\lg(d_{3D})$	3
LOS	$PL_{\text{NLOS}} = 32.45 + 20\lg(f_c) + 10n_{\text{NLOS}}\lg(d_{3D})$	σ_{NLOS}
	高架天线: $n_{\text{NLOS}} = 2.47, \sigma_{\text{NLOS}} = 5.17 \text{ dB}$	—
	嵌入式基站: $n_{\text{NLOS}} = 2.96, \sigma_{\text{NLOS}} = 7.56 \text{ dB}$	—
LOS pr.	$Pr_{\text{LOS}} = \begin{cases} 1 \\ \exp(-\frac{d_{3D} - \text{dref}}{K}) \end{cases}$	—
	开放式生产空间: $\text{dref} = 10 \text{ m}, K = \text{dref}^{1.5}$	—
	混合密集式工厂: $\text{dref} = 5 \text{ m}, K = \text{dref}^{1.2}$	—

4.2 阴影衰落

阴影衰落是由收、发两端之间的障碍物造成的, 这些障碍物通过吸收、反射、散射和绕射等方式衰落信号功率, 常用来描述这些因素的模型是对数正态阴影模型

$$p(\psi_{dB}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\psi_{dB}}} \exp\left[-\frac{(\psi_{dB} - \mu_{\psi_{dB}})^2}{2\sigma_{\psi_{dB}}^2}\right] \quad (2)$$

其中, $\sigma_{\psi_{dB}}$ 和 $\mu_{\psi_{dB}}$ 分别为正态分布的均值和标准差。

考虑阴影衰落的影响, 即在相同的收发距离 d 下, 不同接收位置的平均路径损耗不同, 收发距离值为 d 时的路径损耗值为随机的正态对数分布, 其表达式为

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

其中, X_σ 为均值为零、标准差为 σ 的高斯分布随机变量, 单位为 dB。

工业测量中阴影衰落参数如表 6 所示, 从表 6 中可以看出, 当无线信号经过反射或绕射到达接收端时, 阴影衰落指数较小, 一般在 10 dB 以下; 印刷厂仓库环境具有高吸收特点, 阴影衰落可达 15 dB; 此外, NLOS 的阴影衰落指数较高。

表 6 工业测量中阴影衰落参数

工业场景	频率/GHz	阴影衰落/dB
金属加工厂 ^[14]	0.9	<6
混凝土墙后区域 ^[17]	2.4	>20
金属零件的焊接厂 ^[18]	2.4	>10
石油钻井平台 ^[18]	2.4	<3
木材加工厂 ^[19]	0.9~5.2	12
石油钻机 ^[24]	2.4, 5.8	5~10
混凝土厂 ^[30]	0.315~0.915	>10
印刷厂 ^[30]	0.315~0.915	14~15
金属管道 ^[31]	3.1	1.1
NLOS ^[32]	3~11	20~30

4.3 遮挡效应

室内工业场景中存在遮挡, 通常分为金属动态遮挡和金属静态遮挡两大类。其中, 金属动态遮挡一般由两种情形造成: 一方面, 金属物体诸如叉车、自动导引车等的移动造成的阴影和遮挡; 另一方面, 机器臂与机床之间的运动, 尤其是当机器臂深入金属柜或腔体内工作时, 金属柜壁和腔体壁可能对机器臂上的通信设备造成遮挡, 产生穿透损失^[28]。而静态遮挡通常是指舱壁对于舱室内的通信设备构成的遮挡或是恒定的穿透损耗。此外, 不同尺寸、位置和移动模式造成的遮挡情况也不同。工业测量中遮挡效应参数如表 7 所示, 从表 7 可以看出, 无线信号穿过金属货架、管道、机械的穿透损耗较小^[37], 穿过密集钢管的穿透损耗较大, 最多可达 50 dB^[18]; 无线信号穿过混凝土墙和地板所造成的穿透损耗较高, 最多可达 20 dB; 穿过染色玻璃的穿透损耗是穿过无色玻璃的 8 倍^[40]。由此可见, 工业场景中的金属设备和染色玻璃对遮挡效应影响很大。

TR 38.901^[6]中给出了关于遮挡的建模方法, 通常有两种遮挡模型: 模型 A 和模型 B。两种模型的应用场景和范围有所区别: 模型 A 采用随机方法捕获人和物体的遮挡, 当没有特定需求或者逼真度要求较低时可以采用此模型, 是一种通用的模型; 模型 B 采用几何方法来捕获人和物体的遮挡, 当模型有特定要求或者逼真度要求较高时采用该模型。遮挡模型 B 在工业场景的模拟如图 3 所示, 展示了 TR 38.901 中使用遮挡模型 B 来模拟遮挡对传播信道的的影响^[42]。在图 3 中, 把工厂大厅的遮挡类型分为两类: 一类是宽为 0.2 m、高为 3 m 的在装配线上固定的金属栅栏, 用图 3 中的黑线表示; 另一类是

机械、框架、柱子、工人、运输车等金属物体,宽为0.5~2 m、高为1~3 m,用图3中的红色方块表示,通过改变这些遮挡物的密度,可以体现工业场景中不同程度的金属设备密度及其影响。

表7 工业测量中遮挡效应参数

工业场景	频率/GHz	穿透损耗/dB
密集钢管后面区域 ^[18]	2.4	20~50
在开放且密集的生产实验室 ^[33]	2.3、5.7	大于45
金属仓库货架(每一货架) ^[34-35]	2.4	4.6
各种常见的工厂设备 (包括墙壁和地板) ^[36]	1.3	2~20
铁罐、管道、重型机械 ^[37]	2.4	小于10
混凝土楼板 ^[38]	2.4	大于30
穿过混凝土墙 ^[39]	2.4	大于15
厚度小于1.3 cm的无色玻璃 ^[40]	28	3.6
厚度小于1.3 cm的染色玻璃 ^[40]	28	24.5
穿过厚度为38.1 cm的墙壁 ^[40]	28	6.8
穿过柜壁 ^[41]	28	5~20
穿过木门 ^[41]	28	小于17

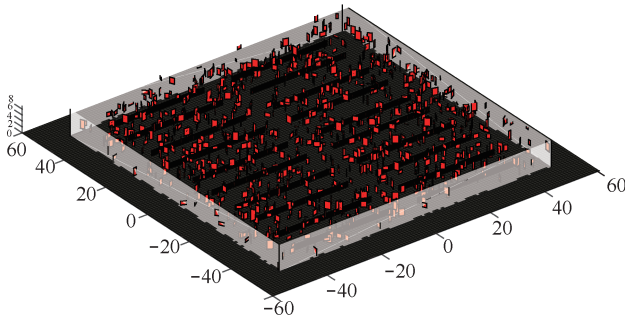


图3 遮挡模型B在工业场景的模拟

遮挡在工业场景中十分常见,会对通信的质量产生影响,在之后的研究中,可以进一步讨论无遮挡模型、遮挡模型A、遮挡模型B分别适用于哪些室内工业场景,或者可以考虑建立新的遮挡模型。

5 小尺度衰落

由于多径传播,接收信号幅度发生急剧变化,由此产生的衰落称为小尺度衰落。在工业场景下,无线信道的多径、物体间的相对运动和不同的散射环境,使得无线信道在时间、频率和角度上形成了色散。

5.1 时间色散

时间色散是由不同时延的多径信号叠加产生

的效果,其依赖于发射机、接收机和周围的物理环境之间的几何关系。由于工业场景与诸如办公室、住宅区等典型室内环境相比区别很大,且时间色散会受物理环境的影响,所以工业场景下的时间色散与典型环境下的时间色散有极大区别。通常采用功率时延分布(PDP, power delay profile)来定量描述时间色散。一般PDP是通过信道冲击响应的平均值^[43]。

$$PDP(m, \tau) = \frac{1}{W_{av}} \sum_{k=m}^{m+W_{av}-1} |h(k, \tau)|^2 \quad (4)$$

其中, W_{av} 是平均窗的长度, $h(k, \tau)$ 为信道冲击响应。

为了进一步描绘时延扩展的程度,通常用PDP的一阶距和二阶距:平均附加时延和均方根(RMS, root mean square)时延扩展 σ_τ 作为时延扩展的统计参数,其中,平均附加时延 $\bar{\tau}$ 定义为

$$\bar{\tau} = \frac{\int_0^\infty \tau P(\tau) d\tau}{\int_0^\infty P(\tau) d\tau} = \int_0^\infty \tau P(\tau) d\tau \quad (5)$$

RMS时延扩展表达为

$$\sigma_\tau = \sqrt{E(\tau - \bar{\tau})^2} = \sqrt{\frac{\int_0^\infty (\tau - \bar{\tau})^2 P(\tau) d\tau}{\int_0^\infty P(\tau) d\tau}} = \sqrt{\int_0^\infty (\tau - \bar{\tau})^2 P(\tau) d\tau} \quad (6)$$

时延扩展有可能导致频率选择性衰落,即当信号带宽大于相干带宽时就会发生频率选择性衰落,否则为平坦衰落。

文献[3]在LOS条件下测量时间色散,测量结果表明,收、发端天线距离越大,则时延扩展现象越明显,时延越大。在工业场景中,无线信道的时延与物理环境中物体的体积、排列、类型等因素有关^[44],并且与收、发端天线间的距离有关。不同工业场景下的时延扩展参数如表8所示。

根据表8可以看出,时延扩展范围为10~300 ns,时延扩展参数值与大厅的大小有一定的关联,从较小房间大厅的50 ns到大型工厂大厅或仓库的300 ns。最大时延扩展与房间容量如图4所示,图4是根据表8的测量数据观察到的最大时延扩展与房间容量之比,红色线可以作为时延扩展的粗略上界,该上界取决于房间大小。此外,利用电磁学理论,可以利用房间的大小和吸收信号速率来预测时延扩展^[46,54-55]。需要注意的是,当使用波束成形技术使波束更窄时,时延扩展可能会减小^[10]。

表 8 不同工业场景下的时延扩展参数

工业场景	尺寸	传播方式	RMS 时延平均值/ns
大型金属 ^[15]	100 m×43 m	LOS	10~200
工厂设备 ^[24]	20 m×50 m	LOS	11
		NLOS	22
大型金属仓库货架 ^[26]	40 m×20 m×3 m	LOS	<10
		NLOS	<50
金属仓库货架 ^[31]	20 m×20 m×5 m	NLOS	76
炼油厂 ^[38]	数公顷	NLOS	<150
混凝土楼板 ^[45]	14 m×9 m×8 m	LOS	30~50
	94 m×70 m×10 m		
各种常见的工厂设备 ^[45]	20 m×77 m×12 m	LOS	35
		NLOS	55
在开放且密集的生产实验室 ^[46]	21 000~100 000 m ²	LOS	30~170
		NLOS	
瓷砖建筑 ^[47]	40 m×40 m	LOS	<25
石油钻机 ^[47]	120 m×20 m	LOS	40~140
	300 m×120 m×30 m	NLOS	40~300
管道 ^[48]	15 m×17 m×5 m	LOS	30~50
	18 m×27 m×5 m		
重型机械 ^[48]	29 m×15 m×7.3 m	LOS	20~30
		NLOS	30~35
密集钢管后面区域 ^[49]	4 m×8 m×3 m	LOS	<45
混凝土墙 ^[50-51]	85 m×150 m×8 m	NLOS	220
混凝土墙后区域 ^[52]	130 m×59 m×8 m	NLOS	<15
钻机 ^[53]	16 m×45 m×10 m	LOS	30~105

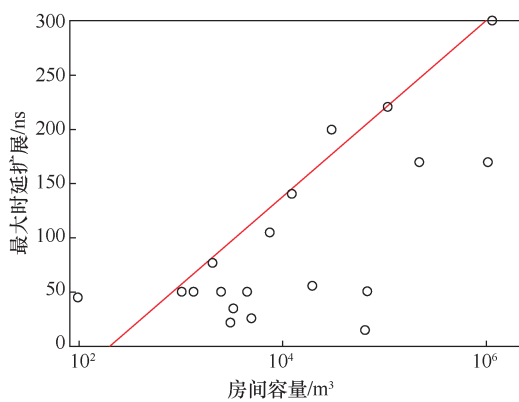


图 4 最大时延扩展与房间容量

5.2 时变特性

时变特性是由终端和基站之间的相对运动引起的，或者是由于信道中存在移动的物体，通常用多普勒功率谱密度 (DPSD, Doppler power spectral density) 来描述信道的时变特性。

在传统室内环境中，导致信道时变性的主要原因是人的移动，文献[56]在某大学教室进行了测量，主要关注学生的课下活动对信道时变的影响，采用 COST2100 信道模型的多普勒特性，在 50 ns 到达的第一个多径分量测量到的多普勒扩展值约为 36 Hz。文献[57]在同样的场景下做了测量，测量结果显示，长时课间休息和短时课间休息的最大多普勒频偏分别为 36 Hz 和 40 Hz，此外，利用最大似然估计的方法对多普勒频谱建模，显示柯西分布在大多数情况下能达到最好的拟合效果。文献[58]在大型开放式办公室进行了 LOS 和 NLOS 测量，测量结果表明，在 LOS 和 NLOS 两种传播方式下，振幅大多数服从瑞利分布，LOS 方式下的多普勒频谱较窄。

而在工业场景下，存在工人、机器人、卡车、高架起重机、悬挂设备或其他物体的随机或周期

性运动,这些设备工作时会引起多普勒频移,从而导致信道时变,文献[59]的测量结果显示,多普勒频偏最高达 50 Hz。此外,随着毫米波技术的发展与应用,多普勒频偏对信道时变性的影响也越来越明显。

文献[59]在某一汽车焊接车间模拟了自动导引车 (AGV, automated guided vehicle) 的移动性。测量工厂的尺寸为 120 m×59 m×8 m,为了捕捉 AGV 随时间变化的特征,使一个装有接收器的手推车在规定路径中匀速运动,速度为 1 m/s。AGV 多普勒功率谱如图 5 所示,包含了测量数据中提取的多普勒频谱和随机多普勒偏移的模拟多普勒频谱 (中心频率为 3.5 GHz)。研究发现,手推车的多普勒频偏与理论值之间存在瞬时频率偏差,提取偏差值的统计特性后发现,这些偏差的值遵循高斯分布,从物理角度来看,这可能是手推车运动引起的天线振动造成的。

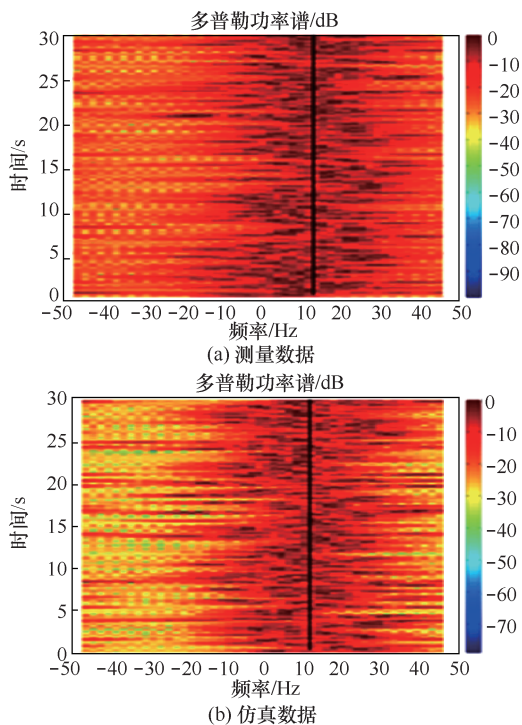


图5 AGV多普勒功率谱

此外,文献[59]为了研究机械臂 (MRA, mechanical robot arms) 工作时的无线信道的时变特性,进行 MRA 摆动测量以模拟安装在机械臂内的传感器的运动, MRA 多普勒功率谱如图 6 所示。从测量数据中可以看出,由移动 MRA 引起的多普勒频移值的模拟结果与测量结果基本一致。

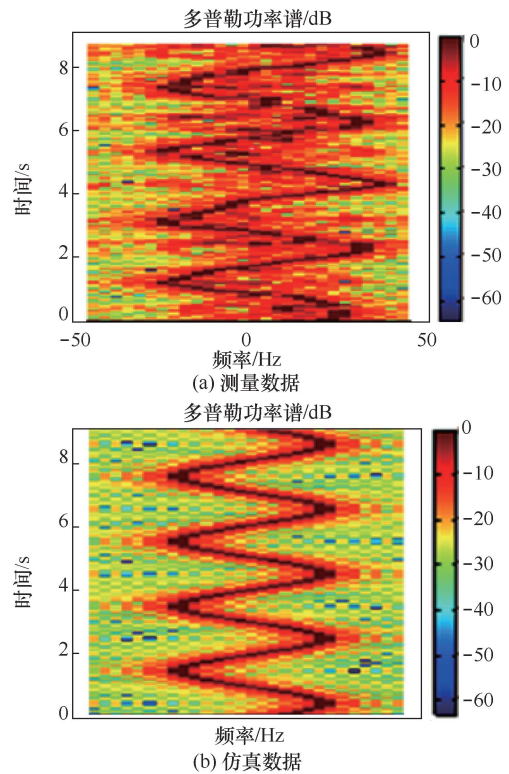


图6 MRA多普勒功率谱

文献[60]研究了移动机器人手臂的无线信道时变性,采用软件定义的无线电 (SDR, software defined radio) 作为发射机,实时频谱分析仪 (RSA, real time spectrum analyzer) 作为接收机。将 SDR 安装在机器人手臂上,后者在以 4 个点为标记的路径上重复运动,周期为 1.5 s, RSA 与机械手之间的距离约为 3 m。在 RSA 和移动机器人手臂之间的时变无线信道特性如图 7 所示,横轴表示 2.42~2.46 GHz 的频率,纵轴表示测量时间可达 10 s。颜色表示从 -65 dB (蓝色) 到 -40 dB (红色) 的颜色条所对应的信道增益,信道增益相差可达 25 dB。从图 7 中可以看出,机器人手臂在前 6 s 变化较快,在后 4 s 变化较慢,表明机器人手臂处于静止状态。

5.3 角度色散

角度色散是指由于无线通信中终端和基站周围的散射环境不同,多天线系统中不同位置的天线经历的衰落不同,从而产生空间选择性衰落。通常用角度功率谱 (PAS, power azimuth spectrum) 描述无线信道在角度上的色散。在工业场景中,由于生产空间较大并且金属反射物体较多,无线电波经过多径反射、散射,到达接收天线时的到达角度会展宽。此外,工厂大厅的空间尺寸会影响角度扩展,多径分量越多,则角度扩展可能越宽^[28]。

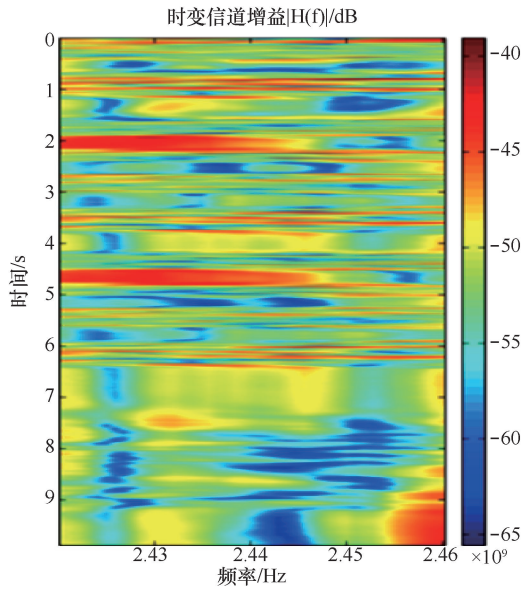


图7 在RSA和移动机器人手臂之间的时变无线信道特性

在文献[26]和文献[44]中测量了工业场景无线信道的角度扩展。在文献[26]中，测量工厂的角度扩展为 $30^\circ \sim 60^\circ$ ，这些角度扩展比 3GPP InH 场景所预测的结果要低。在文献[44]中，汽车制造大厅的角度扩展为 $5^\circ \sim 25^\circ$ ，飞机装配机库的角度扩展为 $10^\circ \sim 35^\circ$ ，角度扩展可能与工厂的大小有关，但需要进一步测量，此方面是未来的研究方向。

5.4 接收信号包络分布

在无线信道中，由于存在多径现象，接收信号的包络呈现随机性，包络一般服从瑞利分布、莱斯分布两种分布，还有的包络服从 Nakagami-m 分布和韦伯分布。

文献[16]在化学纸浆工厂、电缆生产大厅和一个核电站平台进行了测量，结果显示，接收信号的包络服从瑞利分布。文献[31]对在某家生产涂料树脂的化学公司的焚化炉大厅进行了测量，测量结果显示，除了 LOS 传播部分，所有时延分量的包络都服从瑞利分布，对应的概率密度函数为

$$p(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \quad (7)$$

其中， σ 是包络检波之前所接收的信号的 RMS 值， r 是信号幅度。

文献[17]在印第安纳州的 5 座工厂内进行了测量，首先提出了在固定位置上接收的信号包络线随时间的变化遵循莱斯分布，这在文献[19]和[52]中通过测量得到验证，其中，文献[19]给出了莱斯分布的累积分布函数（CDF，cumulative distribution function）

$$\text{Prob}(R_i < R) = \frac{1}{b^2} \int_0^R t \exp\left[-\frac{(t^2 + A^2)}{2b^2} \times I_0\left(\frac{At}{b^2}\right)\right] dt \quad (8)$$

其中， A^2 是主信号路径的功率， b^2 是方差， I_0 是第一类零阶修正贝塞尔函数， $R_i = 10^{Y_i/20}$ ， Y_i 是接收信号样本。

文献[52]给出了接收信号服从莱斯分布所对应的概率密度函数

$$p(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2 + s^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{rs}{\sigma^2}\right) \quad (9)$$

其中， s^2 是 LOS 路径的功率， σ^2 是 r 的方差。强直射波的存在，使得接收信号包络从瑞利分布变为莱斯分布。

此外，文献[49]对某电子制造企业的装配车间、电子机房和机械机房进行了测量，对测量结果在显著性水平为 5% 时，采用 χ^2 检测进行假设检验，显著性水平为 5% 时的 χ^2 检测如表 9 所示，对于这 3 种工业室内环境，韦伯分布是最适合的。

文献[61]的测量结果显示，室内工业场景中不同位置的包络线分布不同，其中，大部分表现为 Nakagami-m 特征，部分表现为对数正态和瑞利分布。文献[62]中研究了 Nakagami-m 和瑞利分布的测量结果，对于每个平均功率时延分布 τ 的第一个时延分量，其包络表现为 Nakagami-m 分布，对应的概率密度为

$$p(r) = \frac{2}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\bar{\gamma}}\right)^m r^{2m-1} \exp\left(-\frac{mr^2}{\bar{\gamma}}\right) \quad (10)$$

表9 显著性水平为 5% 时的 χ^2 检测

分布	韦伯分布	正态分布	Nakagami 分布	莱斯分布
装配车间, LOS	89.8%	52.2%	60.3%	64.2%
机械房, LOS	91.3%	47.0%	54.0%	58.5%
电子机房, LOS	93.0%	50.2%	56.8%	58.5%
电子机房, NLOS	92.5%	62.7%	70.7%	74.0%

其中, $\bar{\gamma} = E(r^2)$ 是多径散射的平均功率, m 为衰落系数, 且 $\Gamma(m) = \int_0^{\infty} u^{m-1} e^{-u} du$ 。

上述结果表明, 瑞利分布适用于大多数工业场景的接收信号包络, 这可能是因为工业场景中存在高密度的反射体, 从而产生了很多独立多径分量。在之后的信道测量中, 还需要继续对接收信号的包络分布进行研究。

6 结束语

近年来, 工业领域发生了巨大变革, IIoT 已成为国家的关键竞争力, 智能制造产业加速发展, 无线技术为工业领域的信息传输提供着强有力的支撑作用。本文首先介绍了工业场景的基本特征并归纳了两类基本场景; 随后分析了不同频段上的传播特性, 并建议了工业专用网络初始部署的主要调整频段; 通过对大尺度衰落、小尺度衰落这两大信道特性在工业场景下的产生原因、影响因素及取值范围进行整理, 提出了关于 IIoT 无线信道建模的相应建议。通过分析此领域的已有研究成果, 归纳研究方法, 提供新的思路, 从而为工业领域的研究人员提供参考及帮助。

参考文献:

- [1] 杜玉河. 《IIoT 白皮书》正式发布[J]. 起重运输机械, 2017(10): 34-35.
DU Y H. The industrial Internet of things white paper was officially released [J]. Lifting and Transport Machinery, 2017(10): 34-35.
- [2] 孙玉. 我国物联网产业发展趋势[J]. 物联网学报, 2017, 1(3): 1-5.
SUN Y. Development trend of IoT industry in China[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2017, 1(3): 1-5.
- [3] 张克, 刘留, 袁泽, 等. IIoT 无线信道与噪声特性[J]. 电信科学, 2018, 34(8): 87-97.
ZHANG K, LIU L, YUAN Z, et al. IIoT wireless channel and noise characteristics[J]. Telecommunications Science, 2018, 34(8): 87-97.
- [4] 工业互联网产业联盟 (AII). 工业无线电磁环境白皮书[S]. 2018.
Industrial Internet Industry Alliance (AII). White paper on industrial wireless electromagnetic environment[S]. 2018.
- [5] 张琨, 陶成, 刘留, 等. IIoT 中的频谱占用及噪声特性分析[J]. 宁波大学学报 (理工版), 2019, 32(1): 20-25.
ZHANG K, TAO C, LIU L, et al. Analysis of spectrum occupancy and noise characteristics in IIoT[J]. Journal of Ningbo University (Science and Technology Edition), 2019, 32(1): 20-25.
- [6] 3GPP. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (Release 14)[S]. 2017.
- [7] R1-1813175 URLLC use cases and deployments for beyond 52.6 GHz[C]//3GPP TSG-RAN WG1 Meeting #95. 2018.
- [8] 3GPP. Study on communication for automation in vertical domains[S]. 2017.
- [9] R1-1812699 IIoT channel modeling for industrial indoor scenario[C]//3GPP TSG-RAN WG1 Meeting #95. 2018.
- [10] R1-1813129 Views on scenario description, frequency bands of interest, and existing literature on channel measurements for the indoor industrial scenario[C]//3GPP TSG-RAN WG1 Meeting #95. 2018.
- [11] RP-1812521 LS on channel model for indoor industrial scenarios[C]//5G-ACIA, 3GPP TSG-RAN Meeting #81. 2018.
- [12] R1-1813177 Scenarios, frequencies and new field measurement results from two operational factory halls at 3.5 GHz for various antenna configurations[C]//3GPP TSG RAN WG1 Meeting #95. 2018.
- [13] R1-1813453 Indoor industrial channel model[C]//3GPP TSG-RAN WG1 #95. 2018.
- [14] ZHANG K, LIU L, TAO C. Channel measurement and characterization for industrial Internet of thing[C]//IEEE Wireless Communications and Networking Conference. IEEE, 2019.
- [15] DANIEL S, MICHAEL M, MICHAEL L. Radio channel quality in industrial wireless sensor networks[C]//IEEE Sensors Industry Conference. IEEE, 2005.
- [16] SNORRE K, TOEKIL B. Radiowave propagation in industrial environments[C]//IEEE 26th Annu. Conference Industrial Electronics Society. IEEE, 2000: 2425-2430.
- [17] THEODORE S R. Characterization of UHF multipath radio channels in factory building[J]. IEEE Transactions Antennas Propagation, 1989, 37(8): 1058-1069.
- [18] LUO S P, NAGESH P, CHEN Z Z, et al. RF channel modeling of a WSN testbed for industrial environment[C]//IEEE Radio Wireless Symposium. IEEE, 2009: 375-378.
- [19] EMMERIC T, WOUT J, LEEN V, et al. The industrial indoor channel: large-scale and temporal fading at 900, 2400, and 5200 MHz[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(7).
- [20] VEHBI C G, LU B, GERHARD P H. Opportunities and challenges of wireless sensor networks in smart grid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(10): 3557-3564.
- [21] AI Y, MICHAEL M, LI Q H. Radio frequency measurements and capacity analysis for industrial indoor environments[C]//9th European Conference Antennas Propagation. IEEE, 2015: 1-5.
- [22] CLAUDE O, DANIELLE V J, BRUNO C. Channel characterization of indoor wireless personal area networks[J]. IEEE Transactions Antennas Propagation, 2006, 54(11): 3143-3150.
- [23] DEREJE A W, IGNACIO R L, GILBERTO B, et al. Radio propagation analysis of industrial scenarios within the context of ultra-reliable communication[C]//IEEE Vehicular Technology Conference (VTC). IEEE, 2018.
- [24] ZOUBIR I, GERARD J M J, HOMAYOUN N. UWB channel measurements and results for office and industrial environments[C]//IEEE International Conference on Ultra-Wideband, Waltham. IEEE, 2006: 225-230.
- [25] R1-1810659 Field measurement results from an operational factory floor at 3.5 GHz and 28 GHz[C]//3GPP TSG RAN WG1 Meeting #94. 2018.
- [26] XAVIER R, SANA A, ADNAN C. Indoor dual polarised radio channel characterisation in the 54 and 70 GHz bands[J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2018, 12(8): 1287-1292.
- [27] XU H, VIKAS K, THEODORE S R. Spatial and temporal characteristics of 60-GHz indoor channels[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2002, 20(3): 620-630.

- [28] R1-1812683 Consideration on channel model for industrial factory environment[C]//3GPP TSG RAN WG1 Meeting #95 Spokane. 2018.
- [29] MICHAEL C. Propagation channel characteristics of industrial wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions Antennas Propagation*, 2016, 58(1): 66-73.
- [30] ŞEYMA T, KARA A. UHF propagation measurements in heavy industry[C]//Signal Processing and Communication Application Conference. IEEE, 2016.
- [31] JOHAN K, SHURJEEL W, PETER A, et al. A measurement-based statistical model for industrial ultra-wideband channels[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2007, 6(8): 3028-3037.
- [32] THEOFILOS C, PANAGIOTIS G, ILIANA O, et al. Channel measurement and characterization for a complex industrial and office topology at 2.4 GHz[C]//11th International Conference on Software, Knowledge, Information Management and Applications (SKIMA). 2017: 1-8.
- [33] PHAIBOON S. Space diversity path loss in a modern factory at frequency 2.4 GHz[J]. *WSEAS Transactions on Communications*, 2014, 13.
- [34] EMMERIC T, WOUT J, LUC M, et al. Large-scale fading in industrial environments at wireless communication frequencies[C]//IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. 2007: 3001-3004.
- [35] DAVID P, EMMERIC T, ALEC P, et al. Wi-Fi network planning and intra-network interference issues in large industrial warehouses[C]//10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). 2016: 1-5.
- [36] TOM D, LUC M, JEROEN H, et al. Measurement-based wireless network planning, monitoring, and reconfiguration solution for robust radio communications in indoor factories[J]. *IET Science, Measurement & Technology*, 2016, 10(4): 375-382.
- [37] THEODORE S R, CLARE D M. UHF fading in factories[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1989, 7(1): 40-48.
- [38] KATE R, GALEN K, CHRIS H. Measurements in harsh RF propagation environments to support performance evaluation of wireless sensor networks[J]. *Sensor Review*, 2009, 29(3): 211-222.
- [39] CASSIO B A, et al. On indoor coverage models for industrial facilities[C]//7th International Telecommunications Symposium (ITS). 2010.
- [40] ZHAO H, RIMMA M, SUN S, et al. 28 GHz millimeter wave cellular communication measurements for reflection and penetration loss in and around buildings in New York city[C]//IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2013.
- [41] MACCARTNEY G R, ZHANG J, NIE S, et al. Path loss models for 5G millimeter wave propagation channels in urban microcells[C]//Globe com 2013 IEEE Global Communications Conference. IEEE, 2013.
- [42] R1-1812164 Channel Model for Factory Automation Scenario[C]//Ericsson1 RAN1#95. 2018.
- [43] LIU L, TAO C, QIU J, et al. Position-based modeling for wireless channel on high-speed railway under a viaduct at 2.35 GHz[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2012, 30(4): 834-845.
- [44] DIRK H, ANDREAS R, AXEL S, et al. Characterization of the directional mobile radio channel in industrial scenarios, based on wideband propagation measurements[C]//Gateway to 21st Century Communications Village. VTC 1999-Fall IEEE VTS 50th Vehicular Technology Conference (Cat. No.99CH36324). 1999, 4: 2258-2262.
- [45] TANGHE E, GAILLOT D P, LIENARD M, et al. Experimental analysis of dense multipath components in an industrial environment[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(7): 3797-3805.
- [46] GAILLOT D P, TANGHE E, JOSEPH W, et al. Polarization properties of specular and dense multipath components in a large industrial hall[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(7): 3219-3228.
- [47] HANNA F, LORENZO M, JULIEN K, et al. Radio channel characterization at 2.4 GHz in nuclear plant environment[C]//9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Lisbon, 2015.
- [48] HOLFELD B, WIERUCH D, RASCKOWSKI L, et al. Radio channel characterization at 5.85 GHz for wireless M2M communication of industrial robots[C]//IEEE WCNC. IEEE, 2016.
- [49] AI Y, MICHAEL C, LI Q H. Power delay profile analysis and modeling of industrial indoor channels[C]//9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). 2015.
- [50] COLL J F, OJEDA J D M D, STENUMGAARD P, et al. Industrial indoor environment characterization - Propagation models[C]//10th International Symposium on Electromagnetic Compatibility. IEEE, 2011.
- [51] COLL J F, STENUMGAARD P, et al. Characterisation of highly absorbent and highly reflective radio wave propagation environments in industrial applications[C]//IET Communications. 2012, 6(15): 2404-2412.
- [52] LIU L, ZHANG K, TAO C, et al. Channel measurements and characterizations for automobile factory environments[C]//20th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). 2018: 234-238.
- [53] MIAOUDAKIS A, LEKKSA A, KALIVAS G, et al. Radio channel characterization in industrial environments and spread spectrum modem performance[C]//10th Emerging Technologies and Factory Automation. IEEE, 2005.
- [54] CHENG S Q, GAILLOT D P, TANGHE E, et al. Polarimetric distance-dependent models for large hall scenarios[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 64(5): 1907-1917.
- [55] AI Y, JORGEN B A, MICHAEL C. Path-loss prediction for an industrial indoor environment based on room electromagnetics[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(7): 3664-3674.
- [56] HANSSENS B, TANGHE E, MARTENS L, et al. Doppler analysis of an indoor university-hall[C]//European Conference on Antennas & Propagation. IEEE, 2015.
- [57] HANSSENS B, TANGHE E, MARTENS L, et al. Measurement-based analysis of delay-doppler characteristics in an indoor environment[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 64(1): 370-374.
- [58] ZHAO X W, LI Y W, BALLA M C, et al. Performance evaluation of a new tapped-delay-line model for indoor MIMO channels[C]//9th International Conference on Communications and Networking in China. 2014.
- [59] ZHANG K, LIU L, TAO C. Doppler frequency trajectories of the mechanical robot arm and automated guided vehicle in industrial scenarios[C]//IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 2019 Spring). IEEE, 2019.
- [60] DIMITRI B, HENNING T, UWE M. Real-time characterization of fast-varying industrial wireless channels[C]//RADCOM 2013-Radar, Communication and Measurement. 2013.

- [61] NORAINI A, LATIFATH M K, MASSUDI M, et al. Interference issues and mitigation method in WSN 2.4 GHz ISM band: a survey[C]/2nd International Conference of Electronic Design. 2014.
- [62] TANGHE E, JOSEPH W, BRUYNE J D, et al. The industrial indoor channel: statistical analysis of the power delay profile[J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2010, 64(9): 806-812.

[作者简介]



李一倩（1995-），女，河北廊坊人，北京交通大学硕士生，主要研究方向为无线通信。



李慧婷（1997-），女，湖南岳阳人，北京交通大学硕士生，主要研究方向为无线通信。



张琨（1993-），男，辽宁大连人，北京交通大学硕士生，主要研究方向为无线通信。



刘留（1981-），男，云南昆明人，博士，北京交通大学教授，主要研究方向为信道测量与建模、时变信道下无线通信信号处理和宽带移动通信。



袁泽（1994-），男，黑龙江伊春人，北京交通大学硕士生，主要研究方向为无线通信。