



工业物联网无线信道与噪声特性

张克¹, 刘留^{1,2}, 袁泽¹, 张琨¹, 张建华², 刘志军³

(1. 北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044;

2. 北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室, 北京 100876;

3. 北京航天测控技术有限公司, 北京 100041)

摘要: 随着“中国制造 2025”“智能制造”“互联网+”等一系列国家战略规划的实施, 国内工业物联网技术将迎来迅猛的发展。然而, 工厂恶劣环境下的信道和噪声特性给工业物联网无线通信带来了极大的挑战。基于此, 对工业物联网应用的无线通信技术进行介绍和对比, 总结了工业物联网环境下的信道和噪声特点, 对工业物联网无线通信研究中的关键内容——信道和噪声特性分析进行了回顾。

关键词: 工业物联网; 无线通信技术; 信道特性; 噪声特性

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2018217

Wireless channel and noise characteristics in industrial internet of things

ZHANG Ke¹, LIU Liu^{1,2}, YUAN Ze¹, ZHANG Kun¹, ZHANG Jianhua², LIU Zhijun³

1. Institute of Broadband Wireless Mobile Communications, School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

2. Key Laboratory of Universal Wireless Communications, Ministry of Education, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

3. Beijing Aerospace Measurement and Control Technology Co., Ltd., Beijing 100041, China

Abstract: With the proposal and implementation of “Made in China 2025” “Intelligent Manufacturing” “Internet plus” and a series of national strategic planning, the industrial internet of things (IIoT) has developed rapidly in China. However, the channel and noise characteristics of the industrial poor environment have brought great challenges to the wireless communication of the industrial internet of things. The application of different wireless communication technologies in IIoT were introduced and compared and the features of wireless channel and noise in the environment of IIoT were summarized. As the key content of wireless communication research, channel and noise characteristics were analyzed overall.

Key words: industrial internet of things, wireless communication technology, channel characteristics, noise characteristics

收稿日期: 2018-01-20; 修回日期: 2018-05-20

基金项目: 北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室资助项目 (No.KFKT-2018105); 北京市科技新星计划基金资助项目 (No.Z161100004916068); 国家自然科学基金面上基金资助项目 (No.61471027)

Foundation Items: Key Laboratory of Universal Wireless Communications, Ministry of Education (No.KFKT-2018105), Beijing New-star Plan of Science and Technology (No.Z161100004916068), The National Natural Science Foundation of China (No.61471027)



1 引言

随着工业化与信息化的深度融合,企业内部互联互通的需求渐增,通过接入网络进而达到提高产品质量和运营效率的需求更为强烈,IIoT(industrial internet of things,工业物联网)应运而生。由中国电子技术标准化研究院编写的《工业物联网白皮书(2017)》指出:“工业物联网是通过工业资源的网络互联、数据互通和系统互操作,实现制造原料的灵活配置、制造过程的按需执行、制造工艺的合理优化和制造环境的快速适应,达到资源的高效利用,从而构建服务驱动型的新工业体系”^[1]。目前,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,伴随着工业物联网的发展,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深刻的变革。2017年1月由工业和信息化部发布的《物联网的十三五规划(2016—2020年)》提出,建设制造强国、网络强国,推进供给侧结构性改革,以CPS(cyber-physical system,信息物理系统)为代表的物联网智能信息技术将在制造业智能化、网络化、服务化等转型升级方面发挥重要作用^[2]。由此可见,制造业已经成为工业物联网的重要应用领域。

无线通信技术是工业物联网发展的重要基础,工业物联网的实施一般包括4个阶段:一是利用智能感知技术随时随地采集工业数据,二是通过通信网络将采集的数据传递出去,三是利用云计算、大数据等技术对这些数据进行深度挖掘和利用,四是基于信息管理、智能终端和平台集成等技术,实现传统工业的智能化改造^[1]。正是通信技术的发展保证了第二阶段的顺利进行,通信网络连接现场设备、控制器、人机界面、监控系统以及企业管理系统,是工业物联网生产系统中的信息传输通道,是生产系统稳定安全运行的重要基础。而在工业通信网络中,无线通信是其

中重要的组成部分之一,相较于有线通信网络,无线通信网络构建成本低,减少了大量电缆安装、维护所需的费用和时间,避免了振动、高温等恶劣环境对电缆的损坏。工业物联网中的无线通信技术主要可以分为两类:一类是ZigBee、Wi-Fi、Z-wave、蓝牙(bluetooth)等短距离通信技术;另一类是LPWAN(low-power wide-area network,低功耗广域网络),比较常见的如NB-IoT(narrow band internet of things,基于蜂窝网络的窄带物联网)、eMTC(增强机器类通信)、LoRa(基于扩频技术的超远距离无线传输方案)。业界对于5G提出了需求各异的应用场景,目前5G系统已经包括工业环境的通信概念,涵盖广泛的应用,包括机器类型通信、移动网络物理系统和智能工厂,这些将会使工业自动化界获益匪浅^[3]。同时,mMTC(massive machine type communication,大规模机器类通信)是ITU-R(ITU-Radio Communications Sector,国际电信联盟无线电通信组标准化组织)确定的5G三大主要应用场景之一,海量的无线物联网的研发和应用必将有效地支撑工业物联网无线技术的发展^[4]。

从信息论的角度看,决定通信频谱效率有两个因素:一是传输的信道特征,二是传输链路的信噪比。从信道特征来看,工业场景中的传播环境与传统无线通信的传播环境存在较大的差别,传统工业有煤炭厂、钢铁厂、机械厂、木材厂、服装厂等,不同的产业制造和生产不同的产品,这些材料吸收和反射能力有很大差异,其信道传播特征(包括多径分量、路径损耗等)均表现不同;此外,工业场景中存在的机床、机械臂等金属障碍物会对电波传输损耗造成影响;金属设备在电波传播中会形成较强的镜面反射和散射,从而产生更多强度较大的多径分量;工业自动化中的机械臂转动、机器人运输移动等运动因素会让无线信道同时具有时变特性。从传输链路信噪比来看,在常规无线通信中信噪比的定量使用中,

通常使用加性高斯白噪声,即噪声的功率谱是一个常数。工厂在工作时,由于设备温度的升高、机械震动、火花放电等物理现象会辐射出大量的电磁噪声,这时会出现突发的脉冲噪声,这些噪声可能在功率谱形状、生命周期等方面和传统的加性高斯白噪声有着较大的不同;同时,工业物联网技术需要大量应用低功耗无线传感设备,工厂中的电磁噪声会对低功耗的无线传感系统产生巨大的影响。

无线通信想要真正在工业物联网发挥作用,需要对工业环境下无线信道和噪声特性开展新的研究分析,因为无线通信系统的传输速率和质量最终都要受到无线信道和噪声特性的制约,准确的信道模型可以使网络部署、优化工作更加准确和有效,从而提升无线网络的性能和可靠性^[5]。在工业物联网中,许多工业控制系统对网络有着严格的时延和可靠性要求,只有在充分掌握信道和噪声特性之后,才能采取与之相适应的物理层技术并实现合理的系统设计^[6]。目前国内外对工业环境下的无线信道和噪声特性研究分析较少,而当前国内工业物联网的发展迫切需要此类的研究。因此,本文对国外相关研究进行回顾与总结,旨在为国内工业环境下的无线信道和噪声特性分析提供一些启发,为我国的工业物联网发展提供理论基础。

2 工业物联网中的无线通信技术

对工业物联网无线通信技术的选择主要取决于其具体应用的场景,因为不同场景对信息传输的功耗、成本、速率、容量等存在差异化的需求。目前,Wi-Fi、蓝牙、ZigBee、RFID(radio frequency identification,射频识别)、UWB(ultra wideband,超带宽)、NFC(near field communication,近场通信)等技术已被广泛应用在短距离无线通信技术中,而NB-IoT、eMTC和LoRa等新的主流低功耗广域网络技术正在与这些短距离无线通信技术互补,相互配合使用于工业物联网的应用场景中。

其中,蓝牙、Wi-Fi和ZigBee技术都使用2.4 GHz频段;UWB(ultra wideband,超带宽)是一种无载波通信技术,具有定位精度高、安全性强、抗干扰能力强等特点,主要应用于工厂监控领域;RFID技术可通过无线电信号识别特定目标,单向读写相关数据,可以提供生产制造控制系统、生产制造执行系统和管理信息系统的服务信息^[7];而NFC技术在电子设备之间实现简单和安全的双向交互,应用于物品识别。这些技术各有所长,也各有所短。

NB-IoT是基于窄带(200 kHz)的蜂窝物联网技术,是专门为低功耗、广覆盖的物联网业务设计的(基于FDD模式)。NB-IoT技术穿墙能力较传统技术有大幅度的提升,且在同一基站情况下,NB-IoT可以提供现有无线技术50~100倍的接入数,一个扇区能够支持10万个连接,并且支持低时延敏感度、超低成本、低功耗和优化的网络架构^[8]。此外,NB-IoT构建于蜂窝网络,可直接部署于GSM(global system for mobile communication,全球移动通信系统)网络、UMTS(universal mobile telecommunications system,通用移动通信系统)网络或LTE(long term evolution,通用移动通信技术的长期演进)网络,以降低部署成本、实现平滑升级。NB-IoT继承了4G网络的安全能力,支持双向鉴权以及空口严格加密,确保用户数据的安全性和稳定性,有效支撑工业物联网应用。

eMTC在LTE系统的基础上,为低功耗、广覆盖物联网业务拓展了新功能,可在LTE系统上实现软件升级。eMTC支持上下行最大1 Mbit/s峰值速率,远远超过传统GPRS(general packet radio service,通用分组无线服务)、ZigBee等技术的速率;eMTC支持连接态移动性,物联网用户可以无缝切换,保障用户体验;基于TDD(time division duplexing,时分双工)的eMTC还可提供低成本的定位技术,在物流跟踪、货物跟踪等场景应用广泛^[9]。



LoRa 是一种基于扩频技术的远距离无线传输技术,最早由美国 Semtech 公司采用和推广。LoRa 极大地改善了接收的灵敏度,降低了功耗;LoRa 技术的网关支持多信道多数据速率的并行处理,系统容量大,还可以支持测距和定位。LoRa 技术的特点使其非常适用于要求功耗低、距离远、大量连接及定位跟踪的物联网应用场景^[10]。

综上所述,NB-IoT 虽然以低功耗、广域网、低速率、待机时间长而著称,但其带宽只有 200 kHz 左右,不能达到较高速率业务的需求。eMTC 带宽 1.4 MHz,具有良好的移动性和语音功能,可在 LTE 系统上直接升级软件支持。NB-IoT 和 eMTC 适合于面积广阔的公共空间,LoRa 主要用于非授权频段,受无线覆盖范围限制,适用于一些短距离覆盖和专用网络场景应用,满足很多工业生产生活中对小范围内构建局域网的需求。

3 工业物联网信道测量研究现状与信道特性研究回顾

3.1 工业物联网信道特点

工业无线通信的发展和实施,能够让企业的管理部门和生产现场数据信息进行实时更新,实时掌握工厂中的生产情况,能够更迅速、及时准确地互通信息进行控制和管理。常规工厂环境大致分为 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(如图 1(a)所示)。这类场景中,生产都是在机箱内部流水线进行,加工设备在出厂之前需要 3C (China compulsory certification, 中国强制认证) 认证,对外的电磁辐射等都有限制^[11],因此,工厂内电磁干扰相对较好。而操作工人走动会导致信道的时变性。

(2) 常规工业场景

如汽车加工车间(如图 1(b)所示),这类场景中,变频器、点火系统、稳压器、高压输电线、

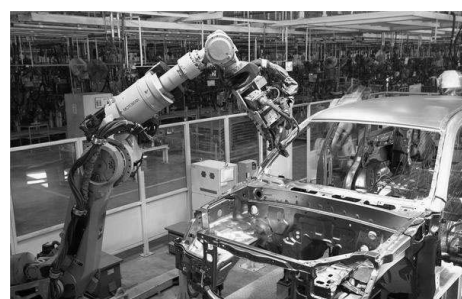
电子开关等会辐射出大量的电磁噪声^[12]。此外,这类传播环境属于时变信道传播环境,原因是厂内有工业机器人、机械臂等自动化设备摇摆工作。

(3) 传统工业场景

如钢铁厂车间(如图 1(c)所示)。这类场景中,工业建筑空间相对较大,机器设备尺寸很大,加热炉、摇臂钻床等会产生大量的噪声,同时有大型的输送机、起重机械、装卸机器等工作使这类场景信道具有时变特性。



(a) 精密工业场景 (波峰焊车间)



(b) 常规工业场景 (汽车加工车间)



(c) 传统工业场景 (钢铁厂车间)

图 1 3 种典型工厂场景

通过以上典型工业场景与其他典型场景(市区、办公室、家庭等)无线信道的对比,如果将物联网部署工业环境,工业物联网环境下的无线

信道会表现出如下不同的特点。

(1) 不同的工厂存放的材料对信道影响程度不同。例如,造纸厂仓库环境具有高吸收特点,无线电波以直射波传播并且强度快速衰减;钢铁厂环境具有高反射特点,厂内大型金属设备导致电波在信道传播过程中出现衍射和反射特性。

(2) 不同工厂的结构差异大,工业厂房比普通的住宅和办公楼的楼层高,普通住宅层高一般为2.8 m左右,而标准厂房高度一般是5~6 m,并且工厂环境比家庭和办公环境恶劣许多,如振动、浮尘等因素都会对信号进行反射和散射,从而产生多径衰落。

(3) 出现多普勒频偏现象,工厂内有工人、机器人、卡车、悬挂设备等的随机移动,这会让工厂环境中的无线信道具有时变特性。如汽车厂使用的移动机器人,机器臂的摇摆运动会带来多普勒偏移。此外,由于地面的不平稳,车体运动过程中出现不断的晃动也会产生多普勒随机频偏现象。

3.2 工业物联网信道测量研究现状

无线信号在传播中受环境、地形等因素的影响,使得无线信道的衰落特性变化十分复杂,这将从根本上制约工业无线通信系统的性能^[1],针对工业场景的信道特性研究是工业物联网无线通信系统设计中需要考虑的重要问题。1989年,参考文献[13]通过数据分析了路径损耗和时延功率谱,在美国印第安纳五座工厂 LOS (line of sight, 视距) 和 OBS (obstructed line-of-sight, 遮挡视线) 条件下重复发送一个 10 ns 脉冲信号,测量频率为 1.3 GHz,通过示波器衰减、失真,完成了信道的时域测量。2004年,参考文献[14]提出了一个在小型焚化炉厂中超宽带 (ultra wideband, UWB) 信道统计模型,分析了频率为 3.1~10.6 GHz 视距 (LOS) 和非视距 (NLOS) 的小尺度衰落和功率时延分布。2005年,参考文献[15]利用定向天线来研究无线信道,测量频率为 2.4 GHz,在马格德堡基地一个类似于制造厂的环境下分析了平均时延、均

方根延迟和相干带宽。2007年,参考文献[16]讨论了工业环境中3个频率的窄带测量,即0.9 GHz、2.4 GHz 和 5.2 GHz,开发了一种测量程序,并测量了3种场景下的路径损耗,得出了影响工业环境信号传播的因素,提出了一种工业路径损耗模型。2009年,参考文献[17]基于频域分析方法测量了频率为5.5 GHz的工厂环境,研究了工厂 LOS 条件下的信道多径分量和时延扩展。2010年,参考文献[18]在短距离室内无线传感网络环境下,利用矢量网络分析仪测量频率为5.8 GHz的信道冲激响应,研究了 LOS 和 NLOS 条件下的均方根时延,并与其他具有特定统计分布的模型进行比较,提出了对室内无线传感器网络和工业物联网应用都有效的短距离衰落模型。2012年,参考文献[19]研究了两种的重要工业环境对无线电波传播的影响,一种是高吸收环境,另一种是高反射环境,根据无绳电话和工业科学医疗使用频段选择的频率分别为0.43 GHz、1.89 GHz、2.45 GHz,分析了信道路径损耗和多径分量。参考文献[20]使用矢量网络分析仪和虚拟天线阵列方法测量了频率0.8~2.7 GHz的3种不同工业环境,分析了信道冲激响应和功率时延分布,并对经典 Saleh-Valenzuela (S-V) 模型进行了修改。2016年,参考文献[21]研究了自动化工厂车间的无线电波传播,使用宽带信道探测仪在5.85 GHz载波频率下进行信道测量,对信道时延特性进行统计研究。2017年,参考文献[22]在3个地点进行了7个场景测量,研究了频率为5.8 GHz的 LOS 和 NLOS 场景,分析了路径损耗指数、RMS (root mean square, 均方根) 时延扩展、相干带宽和小尺度衰落的幅度分布。

但是到目前为止,国内还没有用于描述工业物联网环境下典型无线信道的分析模型。从过去的研究中可以发现一些原因,首先是传统的信道研究,没有考虑到工厂环境时变特性对信道的影响;其次,工业无线网络中高反射材料对无线信道特性的影响



并未得到足够重视；并且，工厂环境下信道测量往往很难开展，测量数据的缺乏使得很难建立准确可靠的工业物联网无线信道传播模型。

3.3 工业物联网信道特性

3.3.1 大尺度衰落

大尺度衰落是指收发端之间距离的变化引起信号场强的变化。一方面，接收信号强度随着发射机

和接收机之间的距离以对数形式变化；另一方面，在收发端之间距离相同的条件下，由于工厂环境中的物体分布不同以及障碍物会导致信号功率损耗，通常表示为发射功率与接收功率之间的比率。

在过去的几年中，已经进行了多种工业环境下的室内信道测量。表 1 总结了各种典型工业场景大尺度衰落参数。

表 1 各种典型工业场景大尺度衰落参数

测量方法	场景		频率/GHz	路径损耗指数	阴影衰落标准差	适用范围/m
窄带信道	木厂和金属加工厂 ^[23]	LOS	0.9	2.25	5.65	15~140
		OBS ¹	0.9	1.94	4.97	
		OBS ²	0.9	2.16	5.16	
		LOS	2.4	1.72	4.73	15~140
		OBS ¹	2.4	1.52	4.61	
		OBS ²	2.4	1.69	6.62	
		LOS	5.2	1.25	4.32	15~140
		OBS ¹	5.2	0.68	3.87	
		OBS ²	5.2	1.35	3.16	
	工厂 ^[24]	LOS	0.9	2.3	5.7	15~140
		OBS ¹	0.9	2.0	5.0	
		OBS ²	0.9	2.2	5.2	
宽带信道	混凝土厂 ^[25]	LOS	0.315	2.70	12.65	-
			0.434	2.62	10.60	
			0.87	2.96	11.85	
			0.915	2.98	10.76	
	金属零件的焊接厂 ^[26]	LOS	0.315	2.70	12.65	-
			0.434	2.62	10.60	
			0.87	2.96	11.85	
			0.915	2.98	10.76	
	印刷厂 ^[25]	NLOS	0.315	4.84	14.71	-
			0.434	5.04	14.98	
			0.87	4.39	14.16	
			0.915	4.34	13.93	
	石油钻井平台 ^[26]	LOS	2.4	1.40	1.82	0~10
		NLOS ¹	2.4	2.06	2.17	
		NLOS ²	2.4	1.17	1.22	
		LOS	5.8	1.76	1.83	0~10
		NLOS ¹	5.8	2.44	2.45	
		NLOS ²	5.8	1.41	1.31	
	工厂 ^[16]	NLOS	3.1	1.1	1.1	1~30
	工厂 ^[13]	混合	2.2	2.2	7.9	5~100

表1总结了各种工业测量中的路径损耗相关参数,其中OBS¹与OBS²表示遮挡程度不同。在环境、频率和链路配置方面,观察到参数有很大的不同。对于许多环境,路径损耗指数范围在1~3。另外,随着频率的增加,反射体增加,会导致路径损耗指数降低。然而,不同的工业环境,路径损耗指数和频率之间没有明确的关系。因为路径损耗不仅取决于路径长度,而且还与工业建筑材料类型(金属、木材和混凝土等)、散射体的大小和密度有关。

3.3.2 时间色散

时间色散主要是因为多径传播造成信号时间扩散现象。与其他典型室内环境相比,时间色散在工业环境下无线信道会有很大的不同,时间色散受发射机、接收机和工厂物理环境等因素的影响。PDP(power delay profile, 功率时延分布)可以用于定量地描述时间色散。在参考文献[27]中,可以得出电波在传播过程中受建筑物大小、密度、结构、室内地板布局和室内装饰位置等影响。在参考文献[28]中在LOS条件下进行测量,从测量结果得到随着收发端天线间距越来越远,时延也随之增加。由以上研究,可以发现,工厂环境无线信道时间色散取决于环境中散射体的大小、类型、密度和分布,并且多径分量到达时间与接收天线间距有关。在参考文献[13]中,对印第安纳州5家大型工厂进行测量,每个工厂具有不同特点,所有工厂均方根时延平均值在LOS条件下大于96 ns;在NLOS条件下大于105 ns。数据表明,在工厂建筑物中的无线传播可以通过混合的几何或者统计模型来进行适当的描述,要考虑到墙壁和天花板的镜面反射以及来自仓库物品和设备产生的随机散射。因为在工厂环境中,建筑物的年龄、物品分布、墙壁位置和天花板高度都是影响均方根时延的关键因素。在参考文献[29]中,随着接收天线间距增加,均方根时延扩展增加。在参考文献[15]中图3对比了4种典型场景下测量场景

的信道冲激响应。从平均时延、均方根时延和相干带宽得到的数据结果发现,受干扰的因素不完全依赖于LOS条件,与金属阻碍物的分布有关。在静态模式下,RMS时延扩展超过72 ns,这表明了金属设备的反射是主要影响因素;当接收天线间距较短时,均方根时延扩展几乎是恒定的。当发射机天线与接收机天线逐渐移开时,反射信号幅度变大,均方根时延增加。

由以上均方根时延测量研究可以发现工厂内设施、天线间距具有不同的反射水平。因此,从一个环境获得的测量结果不适用其他环境,这会使无线技术的可靠性复杂化。

3.3.3 时变特性

如今的工业中,工厂自动化随处可见,厂内人员移动、机器人运动和小车在行驶中摆动等因素使工业环境中的无线信道具有时变特性,会出现多普勒频移现象。一方面,工厂内人员移动、机器人运动等会引起多普勒频偏。在参考文献[30]中,将人体建模为垂直定向的圆柱体,通过将来自室内环境的地板、天花板和墙壁的反射以及来自移动人体散射的多径分量进行参数化,符合Rice(莱斯)分布并且信号随着工作人员的移动而变化。参考文献[33]研究了工业中有机器人工作的无线信道的时变特性,测量的接收天线安装在做周期圆周运动的机器人手臂上。该机器人手臂重复运动的周期为1.5 s,运动线速度为2 m/s,中心频率为2.44 GHz。测量时间为10 s,从多普勒频移的测量结果发现,在前6 s变化快速,在后4 s变化缓慢,然后机器人停止工作,由此得到工业中机器人手臂在做周期性圆周运动时会使信道具有时变特性。另一方面,课题组研究了某汽车厂LOS场景下运输小车的信道时变特性,研究发现运输小车的多普勒频移并不是理论上的纯多普勒值,而是在理论值的基础上还存在一定的随机频偏。图2是某汽车厂测量场景,沿箭头从左向右匀速推动运输小车,在移



动运输小车的过程中, 工厂地面不平, 使得小车有不规则摆动。

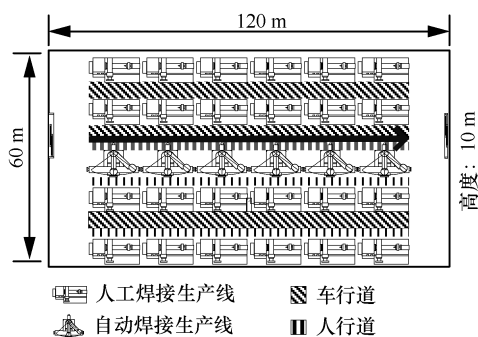


图2 汽车厂实测场景

根据测量频率为 5.8 GHz 的实测数据将运输小车移动对信道的影响进行了分析, 如图 3 所示为瞬间多普勒功率谱, 图 3(a)是 LOS 条件下的仿真数据, 图 3(b)为 LOS 条件下的实测数据。从测量结果得到运输小车不规则的摆动会导致信号产生有波动频差, 并根据实测结果对工业环境下运输小车的多普勒频偏提出了一种数学模型, 该模型的多普勒频移符合理论的多普勒频移加具有一定高斯分布的随机频偏值, 工厂环境下运输小车多普勒频偏满足:

$$f'_d(t) = f_d(t) + \Delta f \quad (1)$$

其中, $f_d(t)$ 是一定速度下的理论多普勒频移, 即

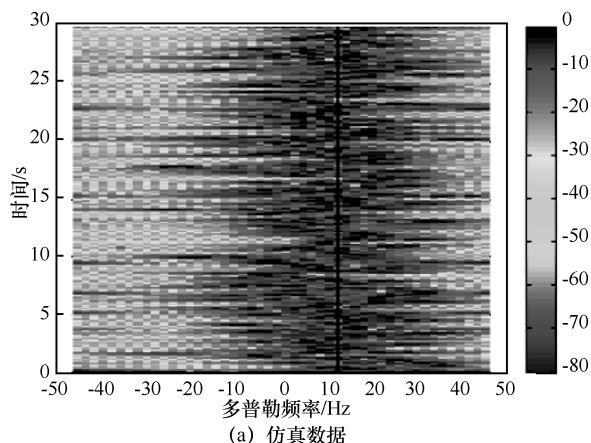
$$f_d(t) = \frac{v(t) \cdot \cos \alpha(t)}{\lambda}, \text{ 其中 } \Delta f \text{ 是均值为 } 0、\text{ 方差}$$

为 σ_2 的高斯分布变量。这些研究表明, 工厂内工作人员的移动导致显著的信号变化; 如果链路被卡车和大型机器人穿过, 则会使信号出现更多的变化; 在工厂工作过程中, 有其他因素使得小车或其他设备有不规则的摆动, 将会导致信号产生随机波动频差。

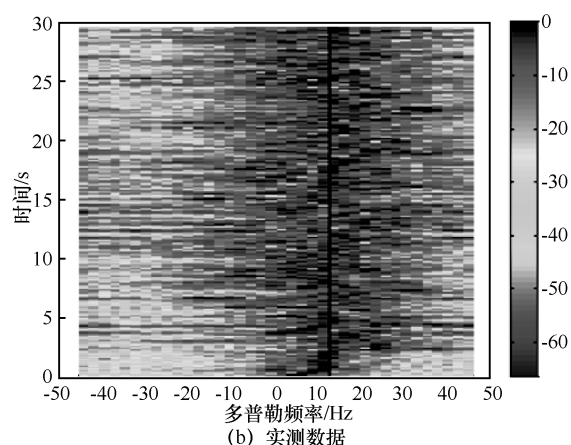
4 工业物联网电磁噪声特点与噪声特性研究现状

4.1 工业物联网电磁噪声特点

噪声对无线通信系统的影响十分显著, 分析



(a) 仿真数据



(b) 实测数据

图3 瞬间多普勒功率谱

噪声的特点对工业无线网络的稳定性设计十分重要。噪声工业环境下与其他典型环境(市区、办公室、家庭等)也有所不同, 其特点主要分为以下几个方面。

(1) 工厂噪声的种类较多, 对无线信号产生影响的噪声主要有机械性噪声和电磁性噪声。机械性噪声由机械撞击、摩擦、转动而产生, 如破碎机、球磨机、电锯和机床等发出的噪声; 电磁性噪声由于磁场脉动、电源频率脉动引起电器部件震动而产生, 如发电机、变压器、继电器产生的噪声。

(2) 工厂噪声的分布频率范围较大, 且各种类型的噪声总是同时存在于工厂内各个随机的位置。比如焊接产生的噪声频率可以达到数百 MHz, 火花放电产生的电磁噪声辐射分布在几百 MHz 到 GHz, 用于控制机械设备的计算机产生的电磁

辐射频率分布在几十 Hz 到 3 GHz。

(3) 工厂噪声不仅有高斯白噪声影响, 还有突发的脉冲噪声等, 且工厂环境的噪声在强度、频率范围、带宽、功率谱形状、生灭特征等方面与传统的高斯白噪声存在很大的差异; 在工厂正常工作时, 由于机械设备的间歇性工作, 其辐射出的电磁噪声也会呈现出一定的时变特性。

4.2 工业物联网电磁噪声研究现状

在参考文献[31]中提出了工业无线网络的宽带信道模型, 该模型考虑了恶劣工厂环境中噪声的影响, 采用一阶两态马尔可夫过程描述工业环境中典型突发脉冲噪声的特性。脉冲噪声的幅值与噪声功率比有关, 当噪声功率变大时, 脉冲噪声的幅值增大。从测试结果中发现, 如果没有考虑噪声对信道的影响, 工厂环境的噪声会极大地降低无线通信系统的性能。在参考文献[32]中测量了 100 MHz~6 GHz 频段下变电站的电磁噪声环境, 给出了脉冲率、脉冲幅度、脉冲持续时间、脉冲发生时间等统计分析, 构建了基于统计和频谱特性的脉冲噪声模型, 用于评估变电站无线设备的部署相关情况。在参考文献[33]中提出了用 APD (amplitude probability distribution, 幅度概率分布) 统计方式评估电磁噪声对通信系统的影响, 将幅度概率分布定义为干扰强度超过某个电平的时间概率, 计算式为:

$$APD(x_0) = \Pr[X > x_0] = 1 - F(x_0) \quad (2)$$

其中, $F(x_0)$ 是 X 的 CDF (cumulative distribution function, 累积分布函数)。通过幅度概率分布统计参量的测量结果, 可以获得噪声电平的平均值和有效值, 能够真实地反映噪声的特性, 评估噪声对不同类型的通信系统的影响。在参考文献[30]中, 用 APD 测量的环境是典型钢铁厂, 其中心频率分别为 439 MHz、440 MHz、570 MHz 及 2 450 MHz, 其中, 干扰在 439 MHz 时最明显, 因为有一辆汽车、一辆运输机器人和一台起重机同时工作。在造纸厂电动机将大块木头粉碎的过

程中, 产生的噪声使得 DECT (digital enhanced cordless telecommunication, 室内无绳电话) 系统突然出现问题无法使用。本文对某汽车厂焊接设备的电磁噪声展开了研究, 采用对数周期天线分别测量了手工点焊机与焊接机器人附近的噪声信号, 得到了噪声功率、噪声带宽、噪声之间频率间隔等相关参数。图 4 (a) 和图 4 (b) 分别为手工点焊机与焊接机器人附近的噪声信号, 从测量结果中可以看出, 手工点焊机与焊接机器人工作时产生的噪声分布大体上相同, 但并不完全吻合。两种焊接设备的噪声信号主要分布在 300~900 MHz 频段, 其功率主要集中在 -110~-97 dBm, 带宽在 4~20 kHz 范围相对较窄。这主要是由于两种机械设备采用的焊头相同, 故噪声情况相近, 但工作时焊头的高度、焊机工作方式略有差异, 导致噪声略有不同, 但两者总体上大致相似。由这些研究可以看出, 不同工厂噪声差异很大, 对于噪声测量应全面考虑工业物联网所应用的频段。若影响无线通信系统的噪声只用加性高斯白噪声 (additive white Gaussian noise) 表示, 在恶劣的工厂环境中存在的脉冲噪声会显著降低无线系统的可靠性和有效性。

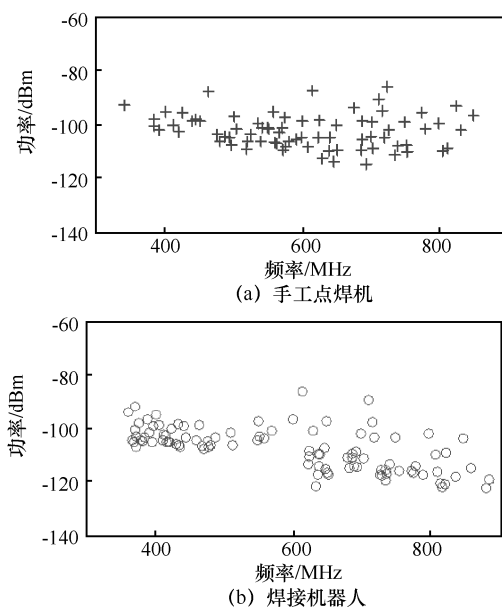


图4 手工点焊机与焊接机器人附近的噪声信号



5 结束语

工业物联网时代已经开始, 想要实现自动化工厂, 需要加速完善通信技术来改进生产流程和管理系统。本文首先对工业物联网中使用的无线通信技术进行总结和对比, 归纳了工业物联网环境下的信道和电磁噪声特点, 回顾了工业物联网信道和噪声测量以及研究的已有成果。本文讨论了不同工业环境条件下的路径损耗, 分析了信道时间色散、时变特性以及噪声特性, 并强调了影响它们的因素。研究发现只有充分了解无线信道和噪声特性以及不同无线技术适用的工业场景, 才能使工业生产中不可预测的干扰风险降至最低。工业物联网的发展离不开无线通信技术的支持, 未来迫切需要对不同工厂环境、不同频率和链路配置的信道和噪声测量以及对其特性展开分析, 以进一步验证现有的模型或开发新的模型, 适应工业物联网的迅猛发展。

参考文献:

- [1] 杜玉河. 《工业物联网白皮书》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] 工业和信息化部. 物联网的十三五规划(2016-2020)年[R]. 2016.
Ministry of Industry and Information Technology. IoT 13th five-year plan (2016-2020) years[R]. 2016.
- [3] 陈山枝. 发展 5G 的分析与建议[J]. 电信科学, 2016, 32(7): 1-10.
CHEN S Z. Analysis and suggestion of future 5G directions [J]. Telecommunications Science, 2016, 32(7): 1-10.
- [4] 宫诗寻, 陶小峰. 5G 大规模机器类通信中的传输技术[J]. 中兴通讯技术, 2017, 23(3): 20-23.
GONG S X, TAO X F. Transmission technologies in massive machine type communication for 5G[J]. ZTE Technology Journal, 2017, 23(3): 20-23.
- [5] 刘留, 陶成, 余立, 等. 高速铁路无线信道测量与信道模型探讨[J]. 电信科学, 2011, 27(5): 54-60.
LIU L, TAO C, YU L, et al. Discussion on the channel measurement and channel model under high speed railway environment [J]. Telecommunications Science, 2011, 27(5): 54-60.
- [6] 赖春媛, 闫文卿, 亓晋. 基于云雾融合的工业物联网能源管理架构[J]. 电信科学, 2017, 33(10): 2-9.
LAI C Y, YAN W Q, QI J. An energy management framework based on fog-cloud combining for industrial internet of things [J]. Telecommunications Science, 2017, 33(10): 2-9.
- [7] 常洁, 王艺, 李洁, 等. 工业通信网络现有架构的梳理总结和未来运营商的发展策略[J]. 电信科学, 2017, 33(11): 123-133.
CHANG J, WANG Y, LI J, et al. Summary of existing framework in industrial communication networks and future development strategies for communication operators [J]. Telecommunications Science, 2017, 33(11): 123-133.
- [8] SKYLAB. 物联网时代的黑马——NB-IoT[R]. 2017.
SKYLAB. The black horse in the age of the internet of things——NB-IoT[R]. 2017.
- [9] 邢宇龙, 张力方, 胡云. 移动蜂窝物联网演进方案研究[J]. 邮电设计技术, 2016(11): 87-92.
XING Y L, ZHANG L F, HU Y. The evolution research of mobile cellular communication technology for IoT[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2016(11): 87-92.
- [10] 严小强, 李星. 基于 LoRa 功耗及其响应速度设计研究[J]. 电子质量, 2017(9): 9-12.
YAN X Q, LI X. Research on power consumption and response speed design based on LoRa[J]. Electronics Quality, 2017(9): 9-12.
- [11] 韩磊. 移动用户终端的电磁辐射发射测试软件开发[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
HAN L. The development of electromagnetic radiation emission test software for mobile user terminal[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [12] CHEFFENA M. Propagation channel characteristics of industrial wireless sensor networks [wireless corner][J]. IEEE Antennas & Propagation Magazine, 2016, 58(1): 66-73.
- [13] RAPPAPORT T S. Characterization of UHF multipath radio channels in factory buildings[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 1989, 37(8): 1058-1069.
- [14] KAREDAL J, WYNE S, ALMERS P, et al. Statistical analysis of the UWB channel in an industrial environment[C]//Vehicular Technology Conference (VTC2004-Fall), Sept 26-29, 2004, Los Angeles, CA, USA. Piscataway: IEEE Press, 2004: 81-85.
- [15] MIAOUDAKIS A, LEKKAS A, KALIVAS G, et al. Radio channel characterization in industrial environments and spread spectrum modem performance[C]//2005 IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA 2005), Sept 19-22, 2005, Catania, Italy. Piscataway: IEEE Press, 2005: 93.
- [16] KAREDAL J, WYNE S, ALMERS P, et al. A measurement-based statistical model for industrial ultra-wideband channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(8): 3028-3037.
- [17] KOZLOWSKI S, SZUMNY R, KUREK K, et al. Statistical modelling of a wideband propagation channel in the factory environment[C]//2009 European Conference on Wireless Technology, Sept 28-29, 2009, Rome, Italy. Piscataway: IEEE Press, 2009: 190-193.

- [18] WANG Y, LU W, ZHU H. Experimental study on indoor channel model for wireless sensor networks and Internet of Things[C]//2010 IEEE International Conference on Communication Technology, Nov 11-14, 2010, Nanjing, China. Piscataway: IEEE Press, 2010: 624-627.
- [19] FERRER-COLL J, ANGSKOG P, CHILO J, et al. Characterisation of highly absorbent and highly reflective radio wave propagation environments in industrial applications[J]. Communications IET, 2012, 6(15): 2404-2412.
- [20] AI Y, CHEFFENA M, LI Q. Power delay profile analysis and modeling of industrial indoor channels[C]//2015 European Conference on Antennas and Propagation, April 13-17, 2015, Lisbon, Portugal. [S.l.: s.n.], 2015: 1-5.
- [21] HOLFELD B, WIERUCH D, RASCHKOWSKI L, et al. Radio channel characterization at 5.85 GHz for wireless M2M communication of industrial robots[C]//2016 IEEE WCNC, May 23-27, 2016, Kuala Lumpur, Malaysia. Piscataway: IEEE Press, 2016.
- [22] CROONENBROECK R, UNDERBERG L, WULF A, et al. Measurements for the development of an enhanced model for wireless channels in industrial environments[C]// IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications, Oct 9-11, 2017, Rome, Italy. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-8.
- [23] TANGHE E, JOSEPH W, VERLOOCK L, 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): 2740-2751.
- [24] TANGHE E, JOSEPH W, MARTENS L, et al. Large-scale fading in industrial environments at wireless communication frequencies[C]// 2007 Antennas and Propagation Society International Symposium, June 10-15, 2007, Honolulu, Hawaii, USA. Piscataway: IEEE Press, 2007: 3001-3004.
- [25] ŞEYMA TÛTÛNCÜ, KARA A. UHF propagation measurements in heavy industry[C]//2016 Signal Processing and Communication Application Conference, May 16-19, 2016, Zonguldak, Turkey. Piscataway: IEEE Press, 2016.
- [26] LUO S, POLU N, CHEN Z, et al. RF channel modeling of a WSN testbed for industrial environment[C]//2011 Radio & Wireless Symposium, Jan 1, 2011, Phoenix, USA. Piscataway: IEEE Press, 2011: 375-378.
- [27] WITTMANN M, MARTI J, KURNER T. Impact of the power delay profile shape on the bit error rate in mobile radio systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2002, 46(2): 329-339.
- [28] KHAN H N, GROSINGER J, GÖRTSCHACHER L, et al. Statistical analysis of the power delay profile of a SIMO UHF backscatter RFID channel in an engine test bed[C]// 2017 Antennas & Propagation Conference, June 9-14, 2017, San Diego, CA, USA. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-5.
- [29] AI Y, CHEFFENA M, LI Q. Radio frequency measurements and capacity analysis for industrial indoor environments[C]// 2015 European Conference on Antennas and Propagation, Apr 12-17, 2015, Lisbon, Portugal. Piscataway: IEEE Press, 2015.
- [30] KAREDAL J, WYNE S, ALMERS P, et al. UWB channel measurements in an industrial environment[C]//2004 Global Telecommunications Conference (GLOBECOM'04), November 29-December 3, 2004, Dallas, Texas, USA. Piscataway: IEEE Press, 2004: 3511-3516.
- [31] CHEFFENA M. Industrial wireless sensor networks: channel modeling and performance evaluation[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications & Networking, 2012(1): 1-8.
- [32] SHAN Q, BHATTI S, GLOVER I A, et al. Characteristics of impulsive noise in electricity substations[C]// 2009 Signal Processing Conference, Aug 24-28, 2009, Glasgow, Scotland, UK. Piscataway: IEEE Press, 2009: 2136-2140.
- [33] 杨飞, 阙润田, 沙斐. 无线电骚扰的统计测量方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(1): 22-26.
- YANG F, KAN R T, SHA F. Research on statistical measurement of radio noise and electromagnetic disturbance[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2009, 23(1): 22-26.

[作者简介]



张克 (1994-), 女, 北京交通大学硕士生, 主要研究方向为宽带无线通信。



刘留 (1981-), 男, 博士, 北京交通大学电子信息工程学院教授、博士生导师, 主要研究方向为高铁无线信道测量与建模、高铁宽带接入物理层关键技术等。

袁泽 (1994-), 男, 北京交通大学硕士生, 主要研究方向为宽带无线通信。

张琨 (1993-), 男, 北京交通大学硕士生, 主要研究方向为宽带无线通信。

张建华 (1976-), 女, 北京邮电大学信息与通信工程学院教授、博士生导师, 主要方向为宽带移动通信系统新理论及技术等。

张志军 (1986-), 男, 北京航天测控技术有限公司高级工程师, 主要研究方向为测控技术、装备自动化测试等。