

工业物联网中的频谱占用及噪声特性分析

张 琨¹, 陶 成¹, 刘 留^{1,2*}, 袁 泽¹, 张建华²

(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)

摘要: 工业物联网(Industrial Internet of Things, IIoT)作为 5G 低功耗大连接物联网的主要场景, 其电磁环境错综复杂. 复杂的电磁环境会对 IIoT 通信产生一定的干扰, IIoT 信道电磁干扰的主要来源是工厂机械设备工作时产生的电磁辐射. 真实准确的频谱占用及噪声特性分析是保证 IIoT 信息可靠传输的前提. 对某汽车厂焊接车间 300 MHz~6.5 GHz 的频谱占用情况进行研究, 结果显示除了已知的电信运营商信号, 车间内主要分布着 300 MHz~2 GHz 频段的窄带信号和 470~800 MHz 频段的宽带信号. 通过办公区与焊接车间测量结果以及相关文献结果的对比, 认为窄带信号来源于工厂的金属焊接和加工; 宽带信号是当地的无线广播电视信号.

关键词: 工业物联网; 5G; 频谱占用; 噪声特性

中图分类号: TN92

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2019) 01-0020-06

5G 技术已经成为通信行业的研究热点, 与传统的 4G 技术相比, 其要求在峰值速率、用户体验速率、连接数密度、时延特性、可靠性、频谱效率以及功耗效率等多方面有全面提升^[1]. 5G 技术的应用场景也不仅仅是传统的广域覆盖, 包括了增强型移动宽带场景、低时延高可靠通信场景以及 mMTC(massive Machine Type Communication)场景. 其中 mMTC 场景主要面向于物联网业务, 旨在真正做到万物互联, IIoT(Industrial Internet of Things)作为 mMTC 的主要应用场景, 其相关研究有十分重要的意义. IIoT 体系架构可分为 3 个层次^[2]: 感知层、网络层和应用层, 其中感知层主要以大量传感器、射频识别以及二维码等手段进行信息获取、信息交互、命令控制以及设备的监控维护. 传感器网络以其高可靠、低成本、低功耗以及易扩展等优势被广泛地应用于感知层中. 工业的电磁环境复杂, 例如电焊机的焊接、金属材料的加工以及其他相关工艺流程都能产生电磁干扰^[3]. 电焊机在焊接工作过程中产生大量热能和强烈光从而产生电磁辐射^[4]. 车间内金属材料加工时也会形成电火花,

高压下电火花放电也会产生高频电磁脉冲、光学辐射及热能等^[5], 从而产生电磁辐射. 这些电磁辐射都会对功率较低的无线传感器的通信产生干扰^[6], 因此工业场景的无线频谱特性以及噪声特性的研究对保证无线传感网的传输可靠性有重要的意义.

国内外学者对工业电磁噪声进行了不同方面的测量与探讨. 张连迎等^[7]在工业区环境对短波无线电噪声系数进行了昼夜测量, 对比了不同时间段的无线电噪声情况; Stenumgaard 等^[8]从功率时延谱及均方根时延等信道参数研究了工业电磁环境对信道的影响; Cheffena^[9]探讨了工业传感器网络环境的噪声与干扰, 提出了基于 2 种状态的马尔科夫过程, 对脉冲型干扰建立了数学模型; Coll 等^[10]对 439, 440, 570 和 2 450 MHz 频段的信号进行了幅度概率分布统计, 分析了工业环境的频谱特性; Myers^[11]分析了工业环境中常见的电磁干扰源, 得出了不同干扰源出现的特定频段; Skomal^[12]研究了电源线和焊接所产生的电磁辐射. 然而以往的研究大部分是针对工业环境的某个频点或频段, 没有全面探究工业环境中的频谱特性, 不能反映

收稿日期: 2018-06-26.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室开放课题 (KFKT-2018105); 国家自然科学基金 (61471027); 北京市科技新星计划 (Z161100004916068).

第一作者: 张琨 (1993-), 男, 辽宁庄河人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 无线信道测量建模、信号处理. E-mail: zhangkun16@bjtu.edu.cn

*通信作者: 刘留 (1981-), 男, 云南昆明人, 博导/教授, 主要研究方向: 无线信道测量与建模、信号处理等. E-mail: liuliu@bjtu.edu.cn

工业环境中的频谱占用情况.

本文主要研究工业环境中 0.3~6.5 GHz 频率范围的频谱占用及噪声检测, 统计分析了窄带信号强度与频率的分布特性, 对比分析了宽带信号的频谱特性以及功率. 统计显示除了已知的电信运营商信号, 窄带信号主要分布在 400~800 MHz 的频段并且其强度主要分布在 $10\sim40\text{ dB}\mu\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$ 范围, 宽带信号主要分布在 470~800 MHz 的频段并且具有不同的功率. 本文通过对比相关材料和文献的结论认为窄带信号是由于工厂内的金属焊接和金属加工所造成的电磁辐射, 宽带信号是无线广播电视信号.

1 测量方法

1.1 测试场景

本文的测试场景是某汽车厂焊接车间, 图 1(a)所示为实际的焊接车间测量环境. 为了对比说明焊接车间内的频谱情况, 在该厂的办公区域选取了一个测量点, 如图 1(b)所示. 该车间厂房的规格为 $120\text{ m}\times60\text{ m}$, 高度为 10 m. 图 2 所示为焊接车间的具体环境, 车间内有 5 条生产线, 其中 4 条人工焊接生产线和 1 条自动焊接生产线, 选取的 3 个测量位置点, 分别分布在每条车行道上.

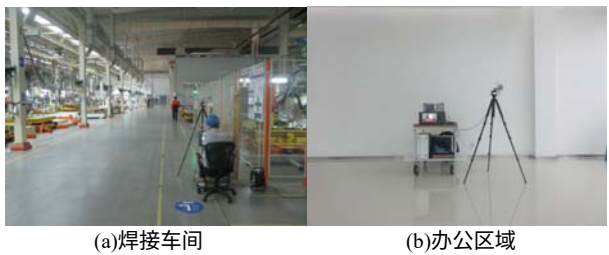


图 1 测量环境

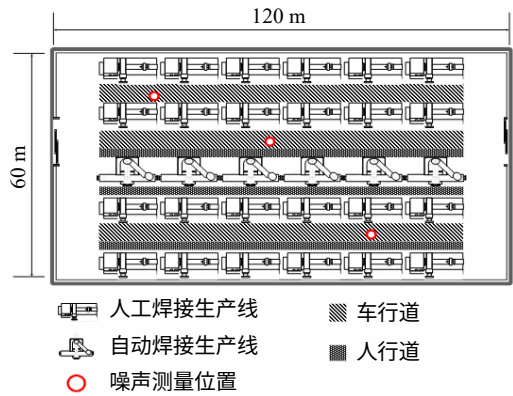


图 2 测量位置点分布

1.2 测试系统及方法

利用频谱测试仪对范围为 300 MHz~6.5 GHz 的频谱进行测量. 在每个测量位置点分别从水平极化和垂直极化 2 个极化方向进行测量. 测量系统包括频谱测试仪与接收天线, 如图 3 所示.

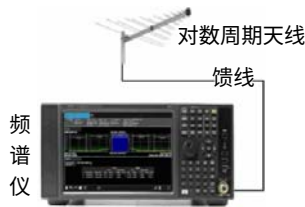


图 3 测量系统

(1)频谱仪(N9010B, 是德科技公司)测量范围为 10 Hz~44 GHz. 在测量中频谱仪的几个参数设置对测试结果的精确程度有很大影响, 因此合理的参数设置十分重要. 在测试过程中, 主要对频谱仪的衰减器、内置前置放大器、分辨带宽(Resolution Band Width, RBW)、视频带宽(Video Band Width, VBW)、量程范围以及扫描时间等重要的参数进行合理设置. 本文所测量的噪声信号功率都相对较低, 因此需要对接收信号进行一定的放大以达到频谱仪的最佳混频电平, 并且选取合理的 RBW 和 VBW 提高频谱仪的分辨率,本文所设置的频谱仪相关参数见表 1.

表 1 频谱分析仪的参数

衰减器值/dB	内置前置放大器是否开启	RBW/kHz
2	是	10
VBW/kHz	量程范围/MHz	扫描时间/ms
100	10	120

(2)接收天线选择对数周期天线. 对数周期天线具有很多突出的优点: 较宽的工作带宽, 较强的方向性, 带内各频率都具备优越的增益. 图 4 所示为对数周期天线的天线系数^[13].

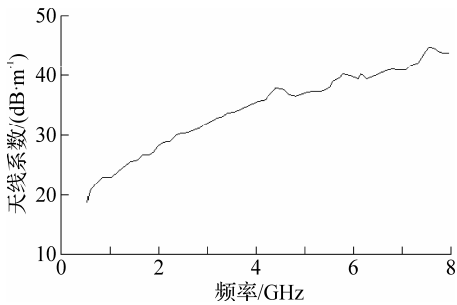


图 4 对数周期天线的天线系数

2 测量结果与分析

2.1 数值处理

为了反映车间内真实的信号辐射强度,将测量结果转换为接收天线处的电场强度,可以通过天线因子和接收功率计算得到:

$$E=V+A_f, \quad (1)$$

式中: E 为接收天线处的信号场强, $\text{dB}\mu\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$; V 为天线的输出电压, $\text{dB}\mu\text{V}$; A_f 为天线因子, $\text{dB}\cdot\text{m}^{-1}$. 其中 $x \text{ dB}\mu\text{V}=20\lg x \mu\text{V}$, $x \text{ dBm}=10\lg x \text{ mW}$.

当频谱仪输入阻抗为 50Ω 时, V 可以表达为:

$$V=P+107, \quad (2)$$

式中, P 为接收到的功率, dBm .

2.2 噪底的选取

频谱仪对信号检测的数据结果包括了背景噪声,因此需要对窄带信号进行提取.参考文献[14]的方法进行噪底划定,大于门限值认为是有用的窄带信号,门限以下认为是背景噪声.首先将所有样值按功率大小排序,通过粗略估计噪底和信号分量门限,去除占样值总数一定百分比的功率最强与功率最弱的样值,得到纯净的噪声样本;其次根据纯净噪声的样本计算噪底;最后根据噪底计算信号分量门限,如图5所示,虚线为设定的门限.

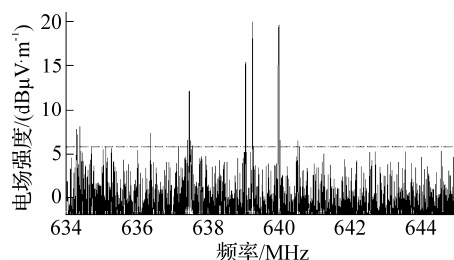


图5 门限划定方法

2.3 窄带信号

窄带信号测量是在焊接车间工作的情况下进行的,且测量点在焊接机器以及加工机床附近 3 m 处.在测量的 300 MHz~6.5 GHz 频段,将焊接车间内的窄带信号频谱与该厂区办公区域的信号频谱进行对比,结果显示除了相关电信通信信号外,焊接车间的窄带信号明显比办公区域的窄带信号分布丰富,办公区的信号频谱相对比较“纯净”,图6所示为 400~450 MHz 以及 500~550 MHz 频段的对比.焊接车间内的频谱占用度相对较高,因此本文主要研究焊接车间内窄带信号的相关特性.

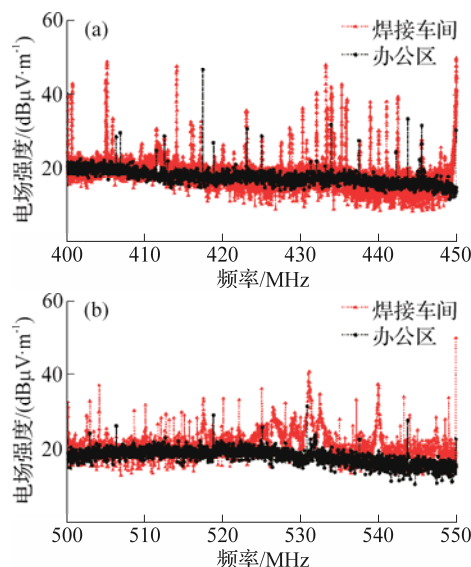


图6 办公区与焊接车间频谱

通过与办公区的窄带信号对比以及提取,并结合相关材料和文献,窄带信号被认为来源于金属焊接及金属加工相关工业活动.窄带信号分布在 300 MHz~2 GHz 的频率范围,其中大量窄带信号分布在 300 MHz~1 GHz 的频率范围,少量的窄带信号分布在 1 GHz 以上.焊接过程产生的窄带信号大量分布在数百 MHz 的频段范围^[10];电火花放电辐射的窄带信号能够分布在很宽的频谱范围,从数十 kHz 到上 GHz,并且该类窄带信号主要分布在 300 MHz~1 GHz 的频率范围^[15-16],这也与本文测量结果相吻合.图7所示为3个位置点不同极化方向上的窄带信号分布情况.

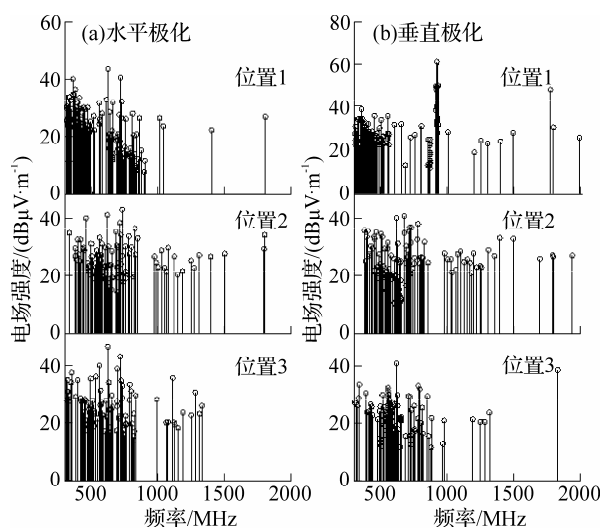


图7 窄带信号分布

从图7中可以看出每个位置不同测试极化方

向的窄带信号分布情况大致相同; 在 300~400 MHz 频段位置 2 的窄带信号相比位置 1 与 3 大量减少, 主要因为位置 2 是自动焊接生产线, 在测量期间内并没有一直处于工作状态。

为了进一步得到车间内窄带信号的整体分布情况, 本文整合了 3 个测量位置的窄带信号, 分别分析了频率概率密度分布以及电场强度概率密度分布对窄带信号进行具体描述。

(1) 频率概率密度分布: 图 8 所示为 3 个位置点窄带信号的频率概率密度分布, 在 400~700 MHz 的频率范围, 水平极化测得的窄带信号概率密度略高于垂直极化测得的结果。从图中可以看出 2 种测试极化方向窄带信号的频率分布变化大致相同, 并且主要分布在 400~800 MHz 的频率范围。

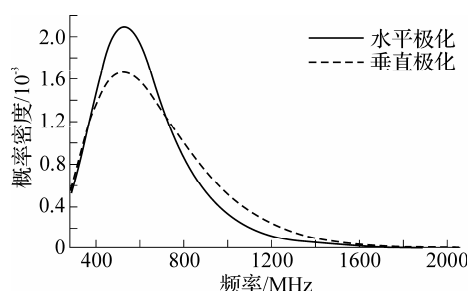


图 8 窄带信号的频率概率密度分布

(2) 场强概率密度分布: 图 9 所示为 3 个位置不同测试极化方向窄带信号的电场强度概率密度分布, 不同位置窄带信号的场强分布趋势大致相同, 窄带信号的水平与垂直极化测得的强度均值分别为 25.1 与 25.9 $\text{dB}\mu\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$, 场强主要分布在 10~40 $\text{dB}\mu\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$ 的范围。

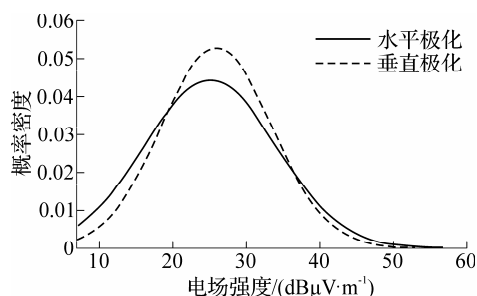


图 9 窄带信号的场强概率密度分布

(3) 本文所测量的窄带信号在水平与垂直极化方向的场强大致相同, 可能是噪声源辐射强度较强的原因。因为在电磁干扰检测中, 对待测设备分别从水平与垂直极化方向进行电磁噪声检测, 水

平噪声较高时, 一般认为噪声辐射主要是由设备内部或外部的水平导线造成的; 垂直噪声较高时, 一般认为噪声辐射主要是由设备内部或外部的垂直导线造成的; 水平和垂直噪声场强相同时, 通常表示噪声源比较强, 造成了设备内部或外部的导线耦合, 使水平和垂直极化方向的噪声场强大致相同^[17-18]。

2.4 宽带信号

宽带信号具有较宽的带宽, 实测的宽带信号频段分布情况见表 2。由表 2 可以看出车间内宽带信号的带宽都为 8 MHz, 并且分布在 478~798 MHz 的频率范围, 这些宽带信号同时存在于办公区域。无线电视广播信号每个频道的带宽为 8 MHz, 将表 2 的实测数据与当地电视广播频段和国内频段号^[19]进行对比, 各个频段的带宽以及中心频率是一致的, 并且得到了相应的国内频道号。因此可以认为这些宽带信号为当地的电视广播信号。

表 2 实测的宽带信号频段分布 MHz

实测频段	国内频道号	实测频段	国内频道号
478~486	DS-14	670~678	DS-33
518~526	DS-19	702~710	DS-37
526~534	DS-20	718~726	DS-39
614~622	DS-26	758~766	DS-44
654~662	DS-31	766~774	DS-45
662~670	DS-32	790~798	DS-48

表 2 的实测信号都具有相似的频谱形状。通过对比文献^[19], 这些当地的电视广播信号采用的是地面数字电视信号(Digital Television Terrestrial Multimedia Broadcasting, DTMB)标准, DTMB 标准同时使用了时域同步正交频分复用和残留边带复用技术。图 10 所示为 526~534 MHz 频段的实测数据频谱与标准的 DTMB 基带信号^[20]频谱的对比,

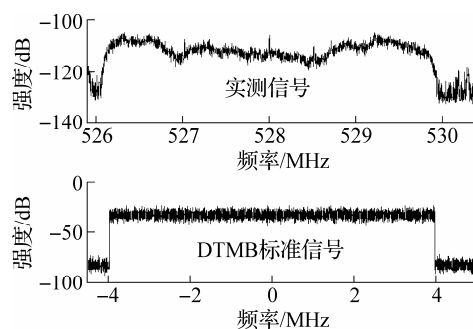


图 10 实测信号与 DTMB 信号的频谱

可以看出实测的信号频谱与标准的 DTMB 信号频谱具有相似的特征, 因此进一步说明表 2 中的实测宽带信号为当地的 DTMB 信号。

进一步罗列出各个频段信号的接收功率值, 这些宽带信号都具有不同的功率, 如图 11 所示。从图中可以看出 3 个位置的宽带信号功率变化大致相同, 中心频率为 618, 658 和 674 MHz 的宽带信号都具有相对较大的功率; 中心频率为 770 及 794 MHz 的宽带信号都具有相对较小的功率, 并且位置 1 处功率最小; 另外垂直极化测得的宽带信号功率通常都比水平极化测得的信号功率略大, 说明这些宽带信号的极化方向可能为垂直极化方向。

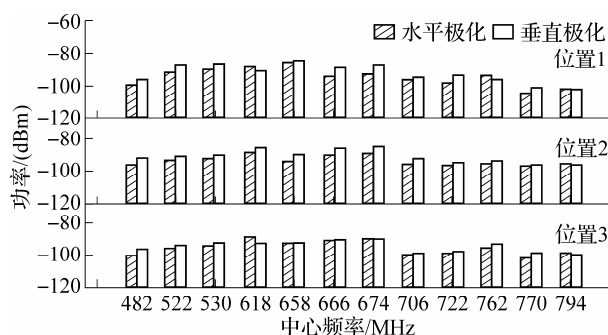


图 11 宽带信号功率

除了上述的窄带信号和宽带信号, 车间内还有电信运营商信号, 具体频段见表 3。

表 3 电信运营商信号 MHz

频段	通信信号类型
870~880	电信 CDMA 下行
890~909	移动 GSM800 上行
935~954	移动 GSM800 下行
954~960	联通 GSM800 下行
1 805~1 830	移动 GSM1800 下行
1 830~1 840	联通 GSM1800 下行
1 840~1 860	联通 FDD-LTE 下行
1 860~1 875	电信 FDD-LTE 下行
1 885~1 895	移动 TD-LTE
2 130~2 145	联通 WCDMA 下行
2 575~2 595	移动 TD-LTE

3 结论

本文主要研究了工业环境的频谱占用及噪声, 统计分析了窄带信号强度与频率的分布特性, 对比分析了宽带信号的频谱特性以及功率。统计显

示除了电信运营商信号, 窄带信号主要分布在 400~800 MHz 的频段并且其强度主要分布在 $10\sim 40\text{ dB}\mu\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$ 的范围, 宽带信号主要分布 470~800 MHz 的频段并且具有不同的功率。通过对比相关材料和文献, 认为窄带信号来源于金属焊接及金属加工相关工业活动; 宽带信号为当地的模拟和数字广播电视信号。3 GHz 以上的频谱相对“纯净”, 没有类似的大量窄带及宽带信号。这一研究相对完整地工业环境下的频谱进行了测量, 并统计了工业环境的频谱特性, 分别从信号频率以及信号强度分析了工业环境中的频谱特性, 比较全面地反映了工业中焊接车间的频谱占用情况。研究结果对工业环境的电磁噪声和频谱分布的探究有积极作用, 对保证工业无线传感网的可靠传输以及未来的工业物联网发展有重要的意义。

参考文献:

- [1] 张长青. 基于 5G 环境下的工业互联网应用探讨[J]. 电信网技术, 2017(1):29-34.
- [2] 李士宁, 罗国佳. 工业物联网技术及应用概述[J]. 电信网技术, 2014(3):26-31.
- [3] Low K S, Win W N N, Meng J E. Wireless sensor networks for industrial environments[C]. International Conference on Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation and International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce, 2005:271-276.
- [4] 张晓冬, 崔晓燕, 闻映红. 焊弧的电磁辐射研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2002, 16(4):50-54.
- [5] 于鹏飞, 郭从良, 崔恒荣. 电弧电火花的电磁辐射检测[J]. 仪表技术, 2007(9):55-56; 59.
- [6] Sanchez M G, Cuinas I, Alejos A V. Interference and impairments in radio communication systems due to industrial shot noise[C]. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2007:1849-1854.
- [7] 张连迎, 王聚杰, 弓勇义. 典型工业区无线电噪声测量与分析[J]. 电子测量技术, 2014, 37(5):85-88.
- [8] Stenumgaard P, Chilo J, Ferrer-Coll P, et al. Challenges and conditions for wireless machine-to-machine communications in industrial environments[J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(6):187-192.
- [9] Cheffena M. Propagation channel characteristics of industrial wireless sensor networks [wireless corner][J]. IEEE Antennas & Propagation Magazine, 2016, 58(1):66-73.

- [10] Coll J F, Chilo J, Slimane B. Radio frequency electromagnetic characterization in factory infrastructures [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2012, 54(3):708-711.
- [11] Myers H A. Industrial equipment spectrum signatures[J]. IEEE Transactions on Radio Frequency Interference, 2009, 5(1):30-42.
- [12] Skomal E N. Comparative radio noise levels of transmission lines, automotive traffic, and RF stabilized arc welders[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1967, 9(2):73-77.
- [13] 英联微波. 对数周期性天线参数[Z/OL]. [2017-11-01]. http://www.ainfoinc.com/cn/p_ant_1.asp.
- [14] 张建华, 卢炆, 徐鼎, 等. 基于信道测量进行噪底和信号分量门限估计方法及其装置: 101426212[P]. 2009-05-06.
- [15] 王恩济, 常培斗, 高黎明. 对火花放电时电磁辐射的探讨[J]. 电加工与模具, 1983(2):45-52.
- [16] Remley C A, Koepke G, Grosvenor C, et al. NIST tests of the wireless environment in automobile manufacturing facilities[R/OL]. [2017-11-01]. https://ws680.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=33166.
- [17] 王庆斌. 电磁干扰与电磁兼容技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [18] 郑军奇. EMC(电磁兼容)设计与测试案例分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [19] 中华人民共和国国家新闻出版广电总局. 经批准可以使用的无线广播电视发射频率/频道表[EB/OL]. [2017-11-01]. <http://211.146.6.56/plpd.aspx>.
- [20] Avateq. DTMB RF layer monitoring receiver[Z/OL]. [2017-11-01]. <http://www.avateq.com/content/47/DTMB-Monitoring-Receiver>.

Spectrum occupation and noise characteristics of welding workshop in industrial internet of things

ZHANG Kun¹, TAO Cheng¹, LIU Liu^{1,2*}, YUAN Ze¹, ZHANG Jian-hua²

(1.School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

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

Abstract: Industrial Internet of Things (IIoT) is applied in the main areas of 5G massive machine type communication, where the electromagnetic environment is very complex. This electromagnetic environment generates certain interferences to IIoT communications. The main source of the electromagnetic interference in IIoT channels is the electromagnetic radiation generated by the running machines and equipment alike. Knowing the realistic and accurate spectrum occupation and noise characteristics is the precondition to ensure the reliability of IIoT information transmission. In this paper, the measurements for the spectrum occupancy and noise distribution from 300 MHz to 6.5 GHz in the welding workshop of an automobile factory are taken. The sampled results show that, except for the signals from the telecommunication operator, narrowband signals and broadband signals are generated in this environment. Narrowband signals are mainly distributed at the frequency band from 300 MHz to 2 GHz; while broadband signals range from 470 to 800 MHz. Comparison of measurement results between office area and welding workshop, and the comparison of the related literature and results suggest that the narrowband signals are generated by the metal welding and metal processing in the factory, and the broadband signals are resulted from the local radio and TV signals.

Key words: internet of things; 5G; spectrum occupation; noise characteristics

(责任编辑 韩 超)