

文章编号:1007-5321(2019)01-0093-09

DOI:10.13190/j.jbupt.2018-127

工业场景电磁噪声测量及建模分析

袁 泽, 刘 留, 张 琨

(北京交通大学 电子信息工程学院, 北京 100044)

摘要: 工厂环境的电磁噪声会对以低功耗无线传感设备为核心的工业物联网技术产生巨大的影响. 为此,应用对数周期天线与频谱仪,从时域和频域 2 个角度在某汽车厂的焊接车间和办公区测量电磁噪声. 频域测量得到了 0.3 ~ 3 GHz 频段工厂中电磁噪声的频点、功率等信息,噪声频谱呈现尖峰形状,可运用截断拉普拉斯分布进行建模分析. 时域测量采集了 315、779、916 MHz 几个频点的噪声数据,提取了噪声的幅度概率分布、脉冲持续时间分布、脉冲间隔时间分布 3 个参数. 测量结果表明,天线水平、垂直极化方式测得噪声信号相近;办公区受噪声影响比焊接车间内部小.

关 键 词: 工业物联网; 电磁噪声; 截断拉普拉斯分布

中图分类号: TN92

文献标志码: A

Measurement and Modeling of Electromagnetic Noise in Industrial Environments

YUAN Ze, LIU Liu, ZHANG Kun

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

Abstract: Factory-level electromagnetic noise has a huge impact on industrial Internet of things which mainly uses low-power wireless sensor devices. For this reason, a log periodic antenna and a spectrum analyzer are used to measure the electromagnetic noise in the welding workshop and the office area of a car factory. We obtain the frequency, power and other information of electromagnetic noise in 0.3 ~ 3 GHz bands from the frequency domain measurement. The noise spectrum shows a spike shape, and the truncated Laplace distribution can be used for modeling. In time domain measurement, the noise data of 315 MHz, 779 MHz and 916 MHz are collected, and we also get the three parameters of amplitude probability distribution, pulse duration distribution and pulse separation distribution. The measurement results indicate that the results of horizontal and vertical polarization are similar. The influence of noise in the office area is less than that in the welding workshop.

Key words: industrial Internet of things; electromagnetic noise; truncated Laplace distribution

工业物联网 (IIOT, industrial internet of things) 技术作为 5G 的研究热点已经受到广泛的关注^[1-2]. 但是,工厂中的机械如焊接设备、变频器等会辐射出

大量的电磁噪声^[3-4],这些电磁噪声会对低功耗的无线传感系统产生巨大的影响^[5-6],必须采用合适的噪声模型对工厂中的噪声进行建模分析^[7-8].

收稿日期: 2018-06-14

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

作者简介: 袁 泽 (1994—), 男, 硕士生.

通信作者: 刘 留 (1981—), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: liuliu@bjtu.edu.cn.

Cheffena^[9]将工厂中的噪声与高斯白噪声进行了对比分析. Coll 等^[10]在造纸厂、钢铁厂展开了噪声的时域测量,并提取了噪声的幅度概率分布 (APD, amplitude probability distribution) 信息. Saai-fan 和 Henkel^[11]针对汽车点火系统产生的脉冲噪声进行了测量研究.

笔者运用对数周期天线与频谱仪,在某汽车厂进行了噪声的测量工作. 根据采集到的数据,提取噪声频点、带宽等相关参数. 从测量结果中得出,天

线水平、垂直极化方式测得噪声信号相近;相比于焊接车间,办公区受噪声干扰较小.

1 测量场景

在某汽车厂的焊接车间的手工点焊机、焊接机器人以及整车实验中心的办公区大厅 3 个位置各选取一点进行电磁噪声的测量. 3 个位置的实际场景如图 1 所示.



图 1 实际测量场景

焊接是汽车制造的最重要工作,汽车厂的工业物联网部署工作主要针对焊接车间. 焊接车间中主要有手工点焊机与焊接机器人 2 种设备,电磁噪声的测量主要针对这两种设备展开. 手工点焊机主要负责车门、前车盖等独立部件的焊接工作;焊接机器人主要负责对整个车身的车顶、车底等部位的焊接. 本文电磁噪声测量过程中,手工点焊机与焊接机器人两种设备均处于工作状态. 整车实验中心办公区大厅位于与焊接车间相邻的另外一栋大楼,办公区大厅相对于焊接车间属于“安静”位置. 选取上述 3 个位置进行电磁噪声的测量,旨在对比焊接车间中不同设备、焊接车间与较为安静的办公区之间的电磁噪声的异同,为工业物联网的部署工作提供电磁噪声信息.

2 测量设备及方法

电磁噪声测量分为频域测量和时域测量两部分. 频域测量旨在得到工厂电磁噪声的频谱占用情况,通过频域测量得到电磁噪声所占用的频点、功率等信息. 时域测量通过对电磁噪声信号在时域的采集,得到工厂中电磁噪声的时变特性. 测量运用对数周期天线^[12]和频谱仪,测量设备的实际工作场景如图 2 所示.

2.1 频域测量设备及方法

频域测量运用对数周期天线和频谱仪的频谱测量模式,在选取的 3 个位置进行 0.3 ~ 3 GHz 频段的

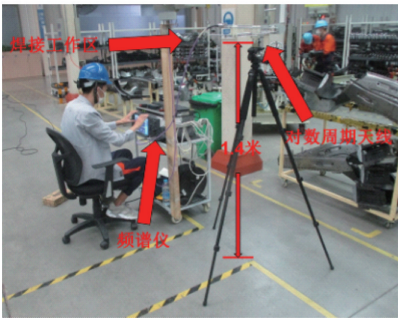


图 2 测量设备工作场景

频谱测量,得到不同测量位置的电磁噪声的频谱占用情况. 测量时天线采用垂直、水平两种极化方式. 频谱仪扫频带宽 (span) 为 50 MHz,分辨带宽 (RBW, resolution bandwidth) 为 10 kHz,视频带宽 (VBW, video bandwidth) 为 100 kHz. 频域测量的全部设置参数如表 1 所示.

表 1 频域测量参数

参数	值
频段/GHz	0.3 ~ 3
频谱仪工作模式	occupied BW
扫频带宽/MHz	50
分辨带宽/kHz	10
视频带宽/kHz	100
平均次数	10
衰减/dB	2
预放	打开
采集点数	20 001
天线极化方式	水平、垂直极化

2.2 时域测量设备及方法

时域测量在 3 个测量位置,选取 315 MHz、779 MHz、916 MHz 频点,带宽为 200 kHz,运用对数周期天线和频谱仪的数据采集模式进行时域噪声的测量. 对上述频点以及带宽噪声的基带信号进行采集,频谱仪数据采集模式采样率设置为 2 MHz. 时域测量选取的上述 3 个频点及 200 kHz 的带宽为目前市面上低功耗无线传感芯片采用的频点和带宽. 时域测量的全部参数设置如表 2 所示.

表 2 时域测量参数

参数	值
频点/MHz	315、779、916
带宽/kHz	200
采样率/MHz	2
采集时间/s	134.2
频谱仪工作模式	数据采集模式
天线极化方式	水平、垂直极化

3 噪声参数提取

3.1 噪声频域参数提取

频域测量主要提取电磁噪声的频点、功率等信息. 首先,参考 Sanchez 等^[13]的噪底选取方式选取噪底,将噪底以上的信号记为有用信号,噪底以下的信号记为背景噪声,提取噪底以上的有用信号. 然后,查阅汽车厂当地的通信信号频谱占用情况,去除有用信号中已知的通信信号,如广播电视信号以及运营商的手机信号,将剩余的信号记为噪声信号. 最后,提取噪声信号的频点、功率等信息. 汽车厂的通信信号频谱占用情况如表 3 所示.

表 3 通信信号频谱占用情况

频段/MHz	信号类型	频段/MHz	信号类型
478 ~ 486	电视广播信号	825 ~ 835	CDMA 上行
518 ~ 526		870 ~ 880	CDMA 下行
526 ~ 534		890 ~ 915	GSM800 上行
614 ~ 622		935 ~ 960	GSM800 下行
654 ~ 662		1 710 ~ 1 755	GSM1800 上行
662 ~ 670		1 755 ~ 1 785	FDD-LTE 上行
670 ~ 678		1 805 ~ 1 840	GSM1800 下行
702 ~ 710		1 840 ~ 1 875	FDD-LTE 下行
718 ~ 726		1 885 ~ 1 915	TD-LTE
758 ~ 766		2 130 ~ 2 145	WCDMA 下行
766 ~ 774		2 401 ~ 2 481	WIFI 信号
790 ~ 798		2 575 ~ 2 595	TD-LTE

3.2 噪声时域参数提取

假设某频点电磁噪声的包络波形如图 3 所示,从图中可以看出,电磁噪声的包络波形呈现出脉冲状,脉冲主要有 3 个参数:脉冲的幅值、脉冲的持续时间、脉冲之间的时间间隔^[14].

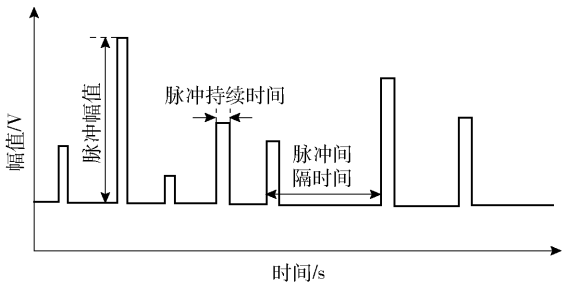


图 3 电磁噪声包络波形示意图

电磁噪声的包络特性 $n(t)$ 可以用以下表达式描述:

$$n(t) = \sum_i \lambda p_{\tau_d}(t - \tau_i) \tag{1}$$

其中: $i = 1, 2, \cdots, N$ 代表第 i 个脉冲; λ 为脉冲的幅值; τ_i 为脉冲的起始时间; τ_d 为脉冲的持续时间; $p_{\tau_d}(t)$ 为脉冲的形状.

1) 幅度概率分布

APD 用于描述噪声包络的幅值 λ 的统计特性,表示幅值高于某一规定电平的时间概率,表达式为^[14]

$$APD(\lambda_i) = P(\lambda > \lambda_i) = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^N t_k \tag{2}$$

其中: λ 为噪声幅值, λ_i 为某一规定的电平, T 为测量时长, t_k 为噪声幅值超过规定电平 λ_i 的时长. APD 代表噪声幅值超过某一规定电平的概率,则

$$APD(\lambda_i) = P(\lambda > \lambda_i) = 1 - CDF(\lambda_i) \tag{3}$$

其中 $CDF(\lambda_i)$ 为脉冲幅值的累计分布函数.

2) 脉冲持续时间分布

脉冲持续时间分布 (PDD, pulse duration distribution) 用于描述脉冲持续时间的统计特性,代表脉冲持续时间长度超过某一规定时长 t_d 的概率,表达式为^[14]

$$PDD(t_d) = P(t > t_d) = 1 - CDF(t_d) \tag{4}$$

其中 $CDF(t_d)$ 为脉冲持续时长的累计分布函数.

3) 脉冲间隔时间分布

脉冲间隔时间分布 (PSD, pulse separation distribution) 用于描述脉冲间隔时间的统计分布,代表脉冲间隔时间长度超过某一规定时长 t_s 的概率,表达式为^[14]

$$\text{PSD}(t_s) = P(t > t_s) = 1 - \text{CDF}(t_s) \quad (5)$$

其中 $\text{CDF}(t_s)$ 为脉冲间隔时长的累计分布函数。

在提取 APD 参数时,按照式(2)或式(3)进行运算即可。但在提取 PDD、PSD 两个参数时,需要首先选取噪底,参考 Sanchez 等^[13]的方法选取噪底;划定噪底以后,脉冲正向、反向穿越噪底的 2 个交点即为脉冲的起始、终止时间点;脉冲持续时间即为终止时间点与起始时间点之差,脉冲间隔时间即为脉冲起始时间点与上一个脉冲起始时间点之差;最后按照式(4)和式(5)计算噪声的 PDD、PSD 两个参数。此外,上述 $\text{CDF}(\lambda_i)$ 、 $\text{CDF}(t_d)$ 和 $\text{CDF}(t_s)$ 是测试实验数据统计分析得到数值结果。

按照上述理论,对 315、779、916 MHz 频点的时域电磁噪声信号进行测量,得到不同频点电磁噪声

的 APD、PDD、PSD 3 个统计参数。对比分析相同位置相同频点不同天线极化方式、相同天线极化方式相同频点不同位置、相同天线极化方式相同位置不同频点电磁噪声信号的 APD、PDD、PSD 3 个参数的异同。

4 频域测量结果及建模分析

4.1 频域测量结果及分析

在选取的 3 个测量位置进行 0.3 ~ 3 GHz 频段的测量,天线分别采用垂直、水平 2 种极化方式。根据测量得到的结果,按照 3.1 节中的噪底选取方法选取噪底,并提取噪底以上的信号记为有用信号(包含噪声信号以及通信信号),得到结果如图 4 所示。

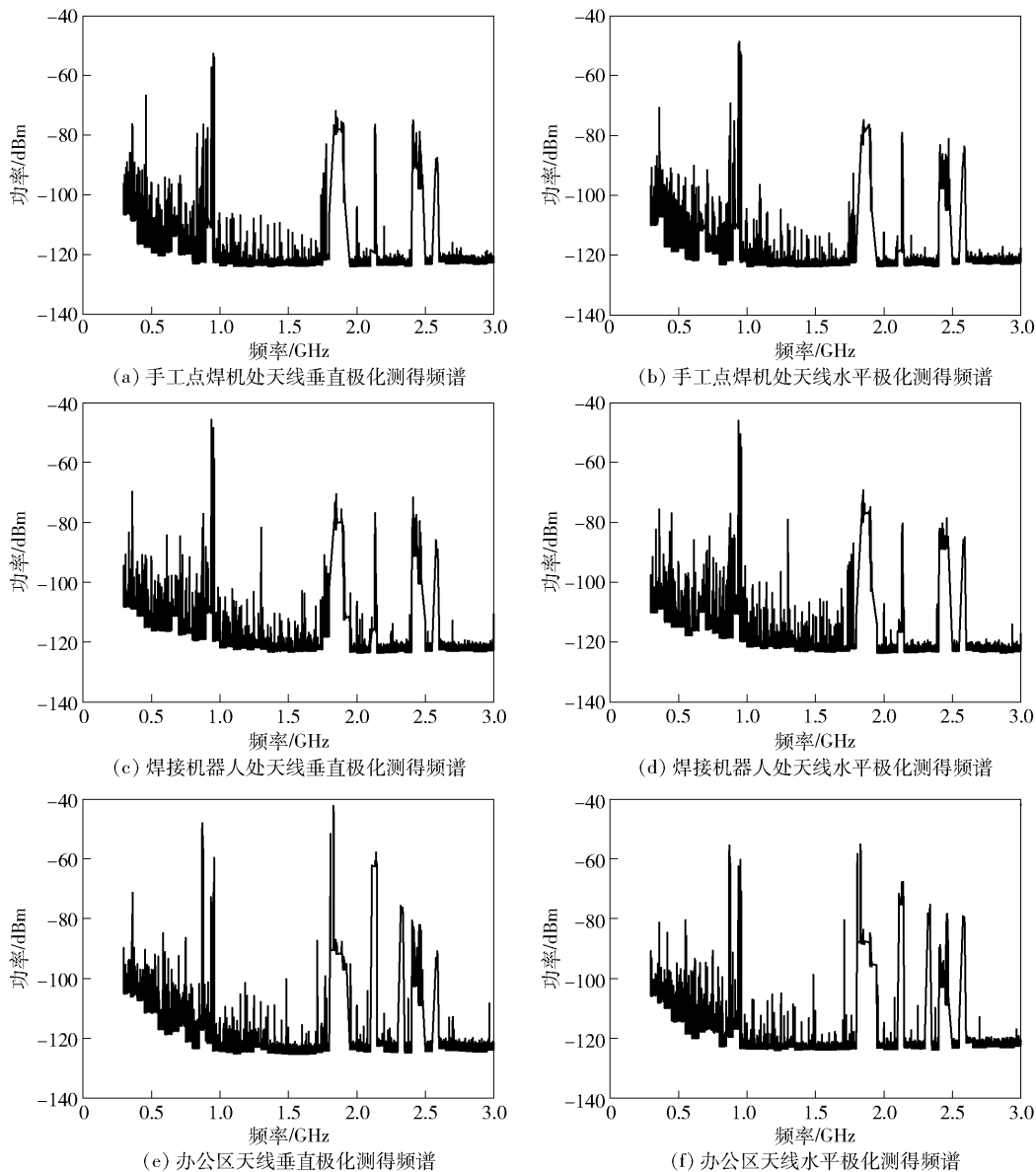


图4 频域测量结果

图 4 中包含工厂中的噪声信号和通信信号,在 0.8 GHz 以下的频率范围存在广播电视信号;在 0.9 GHz、1.8 GHz 附近频段存在运营商发射的手机通信信号;在 2.4 GHz 附近频段存在 WIFI 信号。图中出现的明显大带宽、高功率的宽带信号均为通信信号,工厂中的噪声信号均为窄带信号。

Stenumgaard 等^[4]在钢铁厂进行了频域噪声的测量工作,测量得到了 2 GHz 以下钢铁厂的无线频谱占用情况,该测量结果与本文的测量结果大体近似,这可能是由于钢铁厂和汽车厂都需要大量应用稳压器、变频器、伺服驱动器等机械设备,因此噪声分布情况相近。

根据表 3 中的通信信号频谱占用情况,从有用信号中去除通信信号,余下的信号记为噪声信号。噪声信号功率的概率密度函数 (PDF, probability density function) 曲线如图 5 所示。

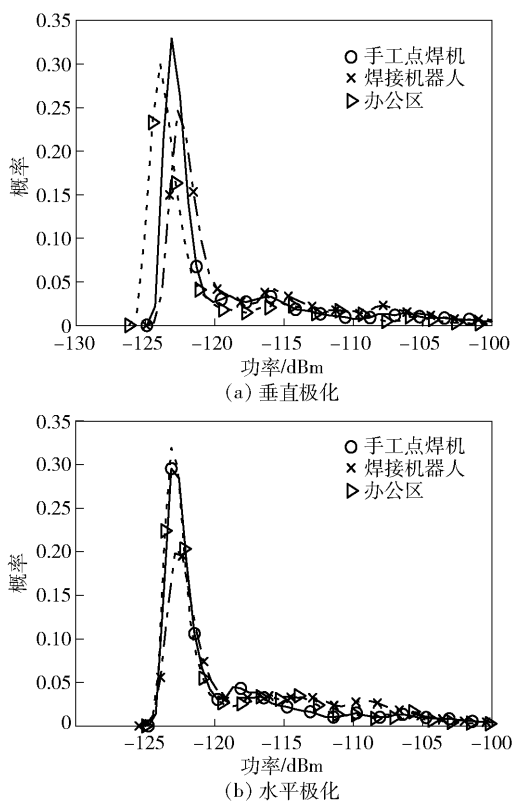


图 5 噪声功率 PDF 曲线

从图 4 和图 5 中可以得到以下结论。

1) 工厂中辐射出的电磁噪声信号主要集中在 0.3 ~ 1 GHz 频段,噪声功率大体分布在 -125 ~ -115 dBm 之间。

2) 随着频率的升高,工厂中辐射出的电磁噪声信号的功率呈明显的下降趋势,在 1 GHz 以后,噪声

信号功率趋于平缓,噪声功率不再随频率的升高出现明显的降低。

3) 垂直、水平两种天线极化方式测得的信号大体相同。

4) 手工点焊机与焊接机器人旁测得电磁噪声分布大体上相同,但不完全吻合。这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、焊接汽车的部位不同,导致噪声略有不同,但两者总体上大致相似。

5) 在办公区测得的噪声功率略低于在另外两个测量位置测得的噪声功率,这是由于手工点焊机与焊接机器人均位于焊接车间内部,车间环境相比于办公区更为嘈杂,电磁干扰更强。但办公区距离焊接车间不远,也会受到车间辐射出的电磁噪声干扰,所以办公区测得噪声功率仅仅略低于焊接车间中测得的噪声功率。

4.2 噪声频谱建模分析

根据测量得到的噪声频谱可以得知,噪声的频谱呈现出尖峰形状,这与角度功率谱形状相近,因此可以用截断拉普拉斯分布进行建模分析。截断拉普拉斯分布的概率密度函数为

$$f(x) = \frac{Q}{2\lambda} e^{-\frac{|x-\mu|}{\lambda}}, \mu - \Delta x \leq x \leq \mu + \Delta x \quad (6)$$

其中: λ 为尺度参数, μ 为位置参数, Q 为归一化系数,且

$$Q = \frac{1}{1 - e^{-\frac{\Delta x}{\lambda}}} \quad (7)$$

在运用截断拉普拉斯分布对噪声的频谱进行建模分析时,要根据实测噪声的频点、带宽以及功率选取合适的参数。中心频点 400.5 MHz、带宽 32.5 kHz 的实测噪声频谱以及运用截断拉普拉斯分布的仿真的频谱如图 6 所示。

图 6 中实线代表实测噪声频谱,虚线代表拉普拉斯仿真频谱。拉普拉斯模型中, $\mu = 400.5$ MHz, $\Delta x = 16.25$ kHz, $\lambda = 5200$ 。从图中可以看出,实测噪声频谱与截断拉普拉斯仿真的频谱相近,因此可以运用截断拉普拉斯分布对噪声的频谱进行仿真。

5 时域测量结果及分析

在手工点焊机、焊接机器人、办公区 3 个测量位置运用天线水平、垂直极化采集了 315、779、916 MHz 3 个频点的电磁噪声。测量时,手工点焊

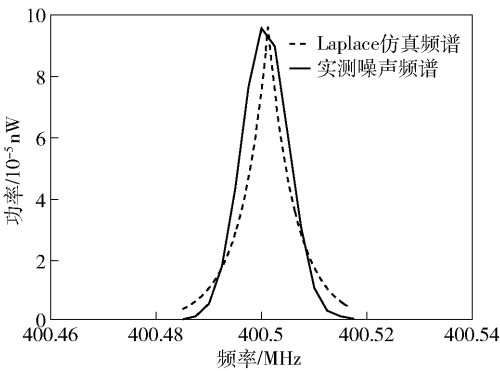
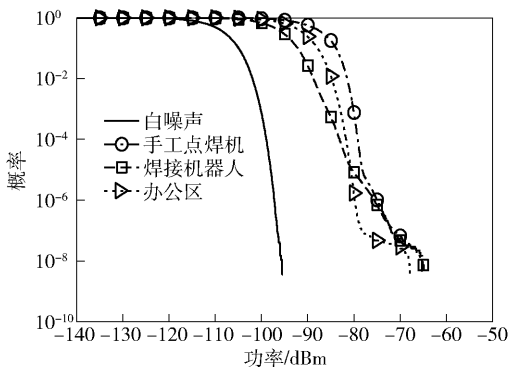
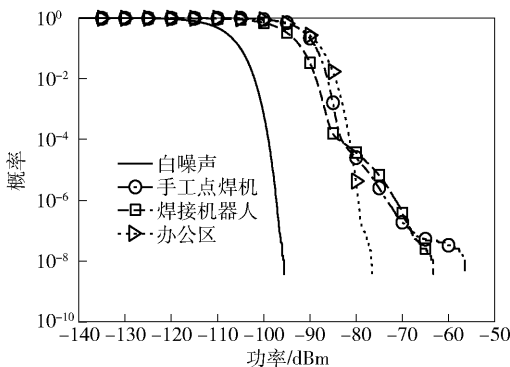


图 6 实测与仿真噪声频谱

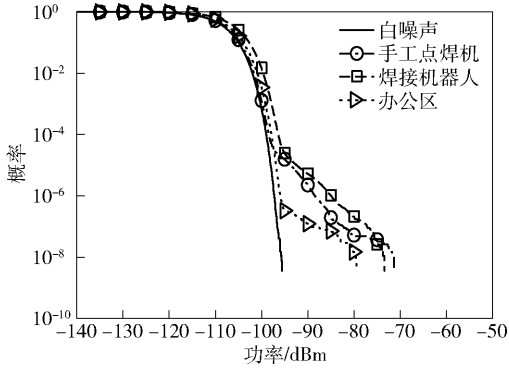
机正在进行车门的焊接工作;焊接机器人正在对车顶、车底进行焊接工作;办公区较为安静,没有



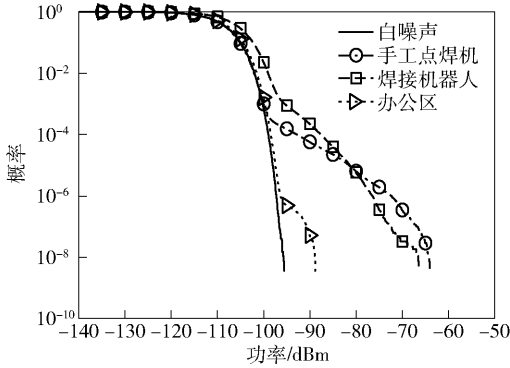
(a) 315 MHz垂直极化噪声APD曲线



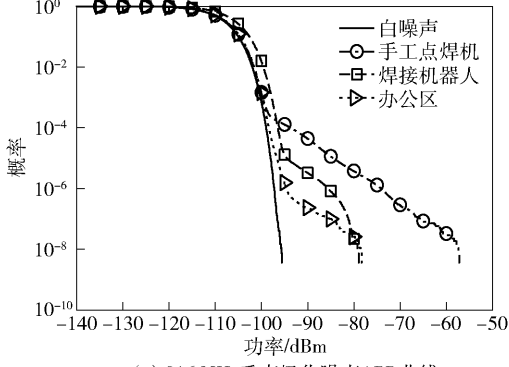
(b) 315 MHz水平极化噪声APD曲线



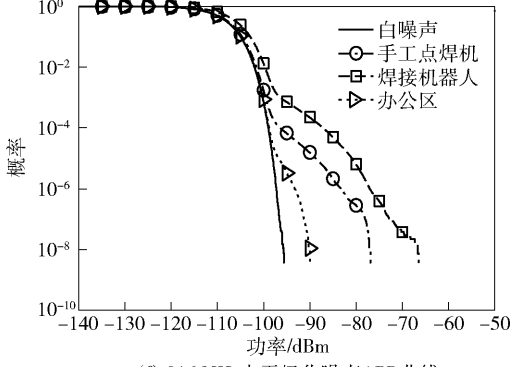
(c) 779 MHz垂直极化噪声APD曲线



(d) 779 MHz水平极化噪声APD曲线



(e) 916 MHz垂直极化噪声APD曲线



(f) 916 MHz水平极化噪声APD曲线

图 7 噪声 APD 曲线

过往的行人或工作的机械设备. 运用 3.2 节中介绍的参数提取方法提取噪声的 APD、PDD、PSD 3 个参数,得到的结果如图 7 所示.

5.1 APD 测量结果及分析

图 7 展示了 3 个测量频点、两种天线极化方式测得的不同位置电磁噪声的 APD 曲线,图中实线代表没有连接天线采集到的接收机热噪声的 APD 曲线,剩余 3 条曲线分别代表 3 个不同测量位置的 APD 曲线.

从图 7 中可以看出,在相同频点、相同测量位置,天线水平、垂直极化方式测得的电磁噪声的 APD 分布大体相同,在较低的概率 (10^{-3}) 以下 APD 曲线会有略微差异. 相同位置、相同天线极化方式

下,在 315 MHz 频点测得噪声的功率最大,这是由于噪声频点越低,传播时的损耗越小,故在 315 MHz 频点测得的噪声功率高于其他 2 个频点测得的噪声功率. APD 曲线的尾部(概率在 10^{-8} 量级)代表测得噪声功率的最大值,在相同频点、相同天线极化方式下,办公区测得的噪声的最大功率明显低于其他 2 个测量位置测得噪声功率的最大值,这是由于办公区环境较为安静,相比于在焊接车间中的 2 个测量位置所受噪声的干扰较小.

5.2 PDD 测量结果及分析

在提取 PDD 参数时,首先要选取噪底,并确定脉冲的起始、终止时间点,然后计算脉冲的持续时间. 按照 3.2 节中的 PDD 参数提取方式,得到 3 个

测量频点、两种天线极化方式测得的不同位置电磁噪声的 PDD 曲线如图 8 所示,图中 3 条曲线分别代表 3 个不同测量位置的 PDD 曲线.

从图 8 中可以看出,在相同频点、相同测量位置,天线水平、垂直极化方式测得电磁噪声的 PDD 分布基本相同,在较低的概率(10^{-1})以下有略微差异. 在相同频点、相同天线极化方式下,办公区测得的电磁噪声的 PDD 分布与手工点焊机、焊接机器人处测得的 PDD 分布近似,只在较低概率(10^{-1})以下会有所差异;当概率(纵坐标)小于 10^{-1} 时,办公区测得的 PDD 曲线位于其他 2 条 PDD 曲线的左侧,这表明办公区受持续时间较长的电磁噪声的影响小于其他 2 个测量位置,这是由于办公区环境较为安

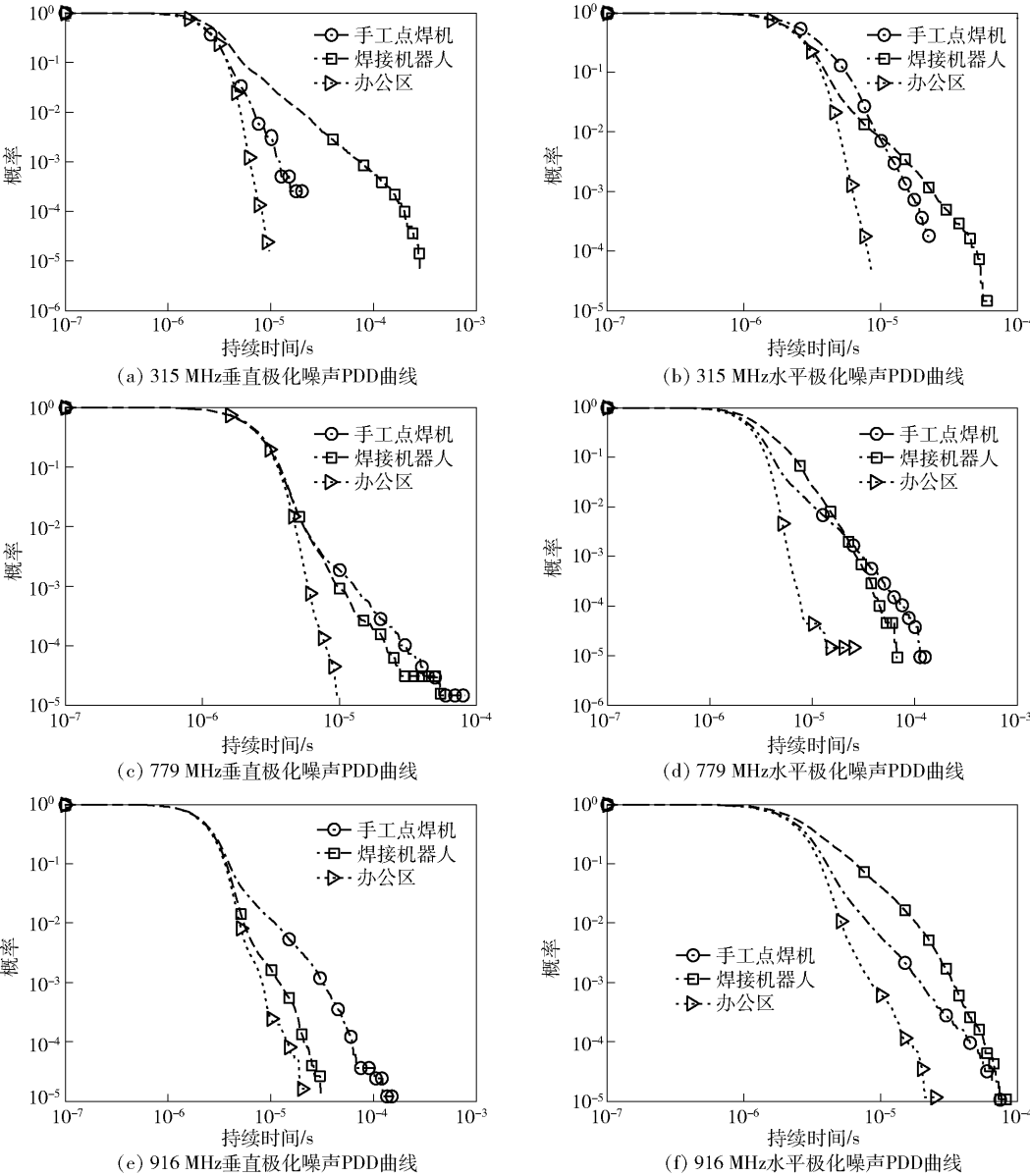


图 8 噪声 PDD 曲线

静,受工厂中电磁噪声干扰较小.

5.3 PSD 测量结果及分析

提取 PSD 参数的步骤与提取 PDD 参数的步骤相似,都需要先选取噪底,并计算脉冲的起始、终止时间点,但提取 PSD 参数需要计算脉冲的间隔时

间. 按照 3.2 节中的 PSD 参数提取方式,得到 3 个测量频点、两种天线极化方式测得的不同位置电磁噪声的 PSD 曲线如图 9 所示,图中 3 条曲线分别代表 3 个不同测量位置的 PSD 曲线.

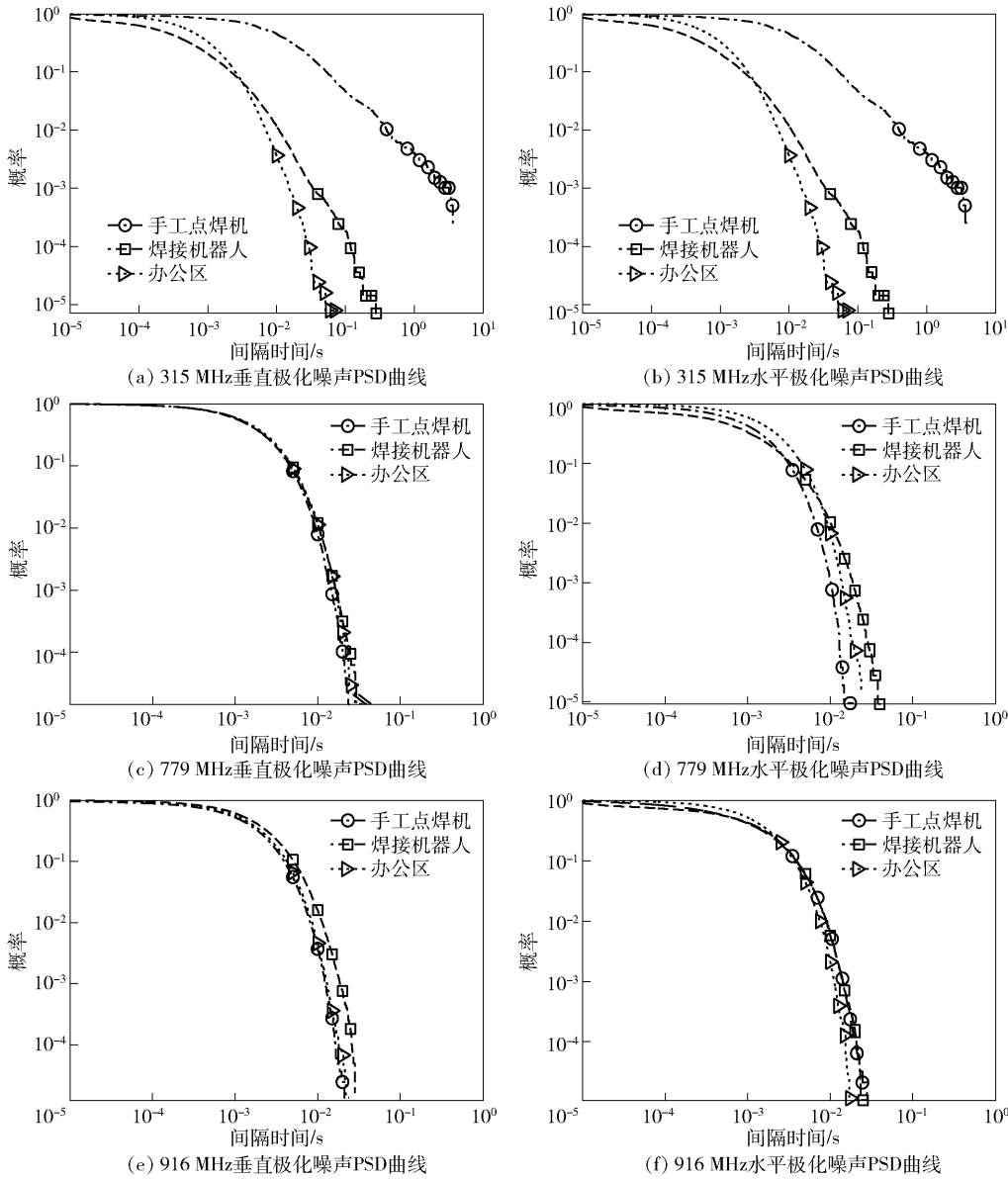


图 9 噪声 PSD 曲线

从图 9 中可以看出,在相同频点、相同测量位置,天线水平、垂直极化方式测得电磁噪声的 PSD 分布基本相同. 在相同天线极化方式的条件下, 315 MHz 频点处 3 个测量位置的 PSD 分布有所不同,在 779 MHz、916 MHz 频点处 3 个测量位置的 PSD 分布基本相同.

Coll 等^[10]在钢铁厂和造纸厂展开了电磁噪声

的时域测量,提取了噪声的 APD 特性曲线. Blankenship 和 Rappaport^[14]在医院进行了 450 MHz 频点的时域噪声测量工作,提取了噪声的 APD、PDD、PSD 曲线,通过对比分析可以看出,得出的 APD、PDD、PSD 曲线和本文测量得到的 APD、PDD、PSD 曲线趋势相近,取值范围略有不同. 因此可以说明,汽车厂焊接车间的噪声情况有较好的代表性,可以

通过对汽车厂焊接车间噪声特性的进一步建模研究构建出工厂电磁噪声的普适性模型。

6 结束语

在某汽车厂运用对数周期天线与频谱仪进行了电磁噪声的测量工作。频域主要测量工厂 0.3 ~ 3 GHz 的频谱占用情况,时域测量采集了典型频点电磁噪声的时域波形。

频域测量结果表明,工厂中辐射出的电磁噪声信号主要集中在 0.3 ~ 1 GHz 频段;噪声功率大体分布在 -125 ~ -115 dBm 之间,噪声功率随频点的升高呈下降趋势。噪声的频谱呈现出尖峰形状,根据测量得到的噪声频点、功率和带宽 3 个信息,选取合适的参数,可以运用截断拉普拉斯分布对噪声的频谱进行建模分析。时域测量采集了 315、779、916 MHz 3 个频点的噪声信号,提取了电磁噪声的 APD、PDD、PSD 3 个参数。测量结果表明,相比于焊接车间,办公区噪声幅值较小,持续时间较短,受电磁噪声影响较小。

参考文献:

- [1] Mumtaz S, Al B, Al-dulaimi A, et al. 5G and beyond mobile technologies and applications for industrial IoT (IIoT)[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(6): 2588-2591.
- [2] Mumtaz S, Alsohail Y A, Pang Zhibo, et al. Massive internet of things for industrial applications: addressing wireless IIoT connectivity challenges and ecosystem fragmentation[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2017, 11(1): 28-33.
- [3] Cheffena M. Propagation channel characteristics of industrial wireless sensor networks[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2016, 58(1): 66-73.
- [4] 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.
- [5] Low K S, Win W N N, Meng J E. Wireless sensor networks for industrial environments[C]//International Conference on Computational Intelligence for Modelling, Con-

trol and Automation and International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce. New York: IEEE, 2005: 271-276.

- [6] 钱志鸿,王义君. 面向物联网的无线传感器网络综述[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(1): 215-227.
Qian Zhihong, Wang Yijun. Internet of things-oriented wireless sensor networks review[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2013, 35(1): 215-227.
- [7] Samakande T, Shongwe T, De Beer A S, et al. The effect of coupling circuits on impulsive noise in power line communication[C]//IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications. New York: IEEE, 2018: 1-5.
- [8] Rouissi F, Vinck A J H, Gassara H, et al. Statistical characterization and modelling of impulse noise on indoor narrowband PLC environment[C]//IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications. New York: IEEE, 2017: 1-6.
- [9] Cheffena M. Industrial wireless sensor networks: channel modeling and performance evaluation[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2012, (1): 1-8.
- [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] Saaifan K A, Henkel W. Measurements and modeling of impulse noise at the 2.4 GHz wireless LAN band[C]//IEEE Global Conference on Signal and Information Processing. New York: IEEE, 2018: 86-90.
- [12] 英联微波. 对数周期天线[EB/OL]. (2017-07-27) [2018-06-11]. http://www.ainfoinc.com/cn/p_ant_1.asp.
- [13] Sanchez M G, De Haro L, Ramon M C, et al. Impulsive noise measurements and characterization in a UHF digital TV channel[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1999, 41(2): 124-136.
- [14] Blankenship T K, Rappaport T S. Characteristics of impulsive noise in the 450 MHz band in hospitals and clinics[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1998, 46(2): 194-203.