

doi:103969/j.issn.0490-6756.2016.03.017

# 校园电磁环境测量与相关性分析

许金海<sup>1</sup>, 赵翔<sup>1</sup>, 张明安<sup>1</sup>, 闫丽萍<sup>1</sup>, 周海京<sup>2</sup>

(1. 四川大学电子信息学院, 成都 610064;

2. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

**摘要:** 本文针对某校园的电磁环境进行了测量与统计分析,展示了校园内电磁环境的空间分布情况,同时对比了不同区域电磁环境的分布,绘制了测量数据的概率密度函数图,得到了一些有价值的统计结果.这些实测数据和统计结果对于评估和分析电磁环境提供了必要的支持,对于电磁环境的理论分析方法也提供了可对比的数据.最后,本文提出了一种利用相关性来表征电磁环境复杂度的方法,利用两个场强探头同时采集空间中不同位置的电场幅值,对其电场幅值的时间序列做相关性计算,以此来评估电磁环境复杂度的高低,并给出三个不同区域电场分量与总场幅值的相关系数随距离变化图.

**关键词:** 电磁环境; 统计分析; 概率密度; 相关系数

**中图分类号:** O441      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0490-6756(2016)02-0347-06

## Measurements and correlation analysis of electromagnetic environment in a campus

XU Jin-Hai<sup>1</sup>, ZHAO Xiang<sup>1</sup>, ZHANG Ming-An<sup>1</sup>, YAN Li-Ping<sup>1</sup>, ZHOU Hai-Jing<sup>2</sup>

(1. College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China;

2. Beijing Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China)

**Abstract:** In this paper, the electromagnetic environment (EME) in a campus is measured and analyzed adopting statistical method. The results present the spatial distribution of the EME in this campus, and the characteristics of EME in various areas are compared. The probability density functions (PDFs) of the measured data are calculated and depicted, and some other valuable results are also obtained. These measured data and statistical results provide necessary support for evaluating and analyzing the EME. These data could be utilized to affirm theoretical analysis method of EME. Finally, this paper presents a method that using correlation to represent the complexity of EME. Two electromagnetic field intensity probes are applied for sampling the electric field strength of various positions simultaneously, the Correlation Coefficients between two time series of electric field strength are calculated to measure the complexity of EME, and the figures of correlation coefficient corresponding to each component and total field versus distances are presented.

**Key words:** Electromagnetic environment; Statistical analysis; Probability density; Correlation coefficient

收稿日期: 2015-03-12

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 973 计划(2013CB328904); 国家自然科学基金委员会和中国工程物理研究院联合基金(NSAF-U1530143)

作者简介: 许金海(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电磁兼容. E-mail: xujinhai0607@126.com

通讯作者: 赵翔. E-mail: zhaoxiang@scu.edu.cn

## 1 引言

随着无线通信和电子对抗技术的发展,各种电子通信设备数量的急剧增长,我们正面临着越来越复杂多样的电磁环境.1975年就有专家预言,城市中电子设备数量每三年翻一番,空间中人为电磁能量每年增长7%~14%<sup>[1]</sup>.日益复杂的电磁环境考验着高灵敏度电子元器件的工作状态和生存能力,电磁环境的评估与分析已经成为了现今研究的重要课题.

根据电磁场理论,影响电磁场时空分布的是源和边界条件,由于实际电磁环境中辐射源的种类繁多、数量巨大且分布广泛,物体不规则的几何结构和难以获取的电参数使得边界条件也很难确定,因而完全从理论上进行电磁环境的分析是极其困难的,所以对于电磁环境的研究,实际测试的方法更加适合.考虑到电磁环境分布的难预测性和不确定性,通过对电磁环境实测值的统计分析来挖掘电磁环境分布的统计规律是可行的.美国等发达国家早在二十世纪六十年代开始了对电磁环境的测试及研究,Matoi等就指出电磁环境的监管和电磁污染有着直接的关系,特别是在人口拥挤的区域,时常需要大量的时间和空间的电磁测量<sup>[2]</sup>.Calin等通过对罗马利亚布拉索夫的7个不同区域80 MHz~3 GHz频率范围内电场幅值的测量,给出了其电磁环境的分布特征,并且提出了由于电磁环境的可变性,电磁环境需要定期评估<sup>[3]</sup>.塞尔维亚的学者Kljajic等基于无线传感器网络设计出了一个可以持续地获取当前空间位置实时电磁场水平的监测系统<sup>[4]</sup>.而我国从二十世纪九十年代开始重视并着手电磁环境的研究,Chen等通过测量给出了厦门岛电场幅值的等值线图,并以城市中某移动电话基站和广播基站作为例子来说明了电磁环境的状况,最后也指出应当要对电磁环境进行必要的测量<sup>[5]</sup>.四川省辐射环境管理监测中心立足于服务公众、服务环境监管、服务涉电磁行业健康有序发展的三个原则,组织实施了成都市区电磁环境的调查<sup>[6]</sup>.Chen利用并行计算开发出了一款可以实现复杂电磁环境模拟的软件,不仅提供各种常用模型的建立,而且可以显示电磁环境分布的态势图<sup>[7]</sup>.

基于此本文通过对某校园内电磁环境的测量与统计分析,展现出了校园内电磁环境的空间分布情况,并且给出了测量结果的概率密度函数图,对于验证理论分析的准确性、建立模拟真实电磁环境

的模型有着重要的参考价值.

## 2 校园电磁环境的数据测量与分析

本文所采用的测量设备为Narda S.T.S./PMM生产的EP600电场探头(以下简称为探头),如图1,相关参数如表1.需要说明的是,该探头用于读取探头所在空间处探头覆盖频率以内所有电磁波在该处叠加而成的电场幅值.将探头连接至便携式计算机可以直接读取当前空间位置上三个方向(X、Y、Z)的电场分量以及总场值.



图1 场强探头(EP600)

Fig. 1 Field intensity probe(EP600)

表1 EP600探头参数

Tab. 1 Parameters of EP600 field intensity probe

Frequency range	100 kHz~9.25 GHz
Level range	0.14~140 V/m
Overload	>300 V/m
Dynamic range	60 dB
Linearity	0.4 dB@50 MHz/0.3~100 V/m
Resolution	0.01 V/m
Sensitivity	0.14 V/m

测量时间为工作日的上午9:00到下午6:00,测试地点为某大学校区,图2为该校园的平面图.由于建筑物、绿化地带的影响,在实际测量中,我们只是测量了该校区的全部主干道.采用定点测量的方式,利用三脚架固定探头,保证其距地面高度(170 cm)不变,三脚架材料为聚丙烯,介电常数为1.5.每个点测量10次,每次间隔时间为1 s.处理数据时,取每个测量点上采集值的有效值,即均方根值(Root Mean Square),如下式所示.

$$RMS = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + \dots + x_n^2}{n}} \quad (1)$$



图 2 所测校园平面图

Fig. 2 The ichnography of measured campus

### 2.1 校园电磁环境空间分布

图 3 和图 4 分别给出了两次校园测量电场幅值的空间分布图以及 PDF (Probability Density Function) 图, 为了方便数据处理和图像显示, 将未测量区域的电场幅值默认为零来处理. 表 2 给出了两次校园测量的电场幅值统计.

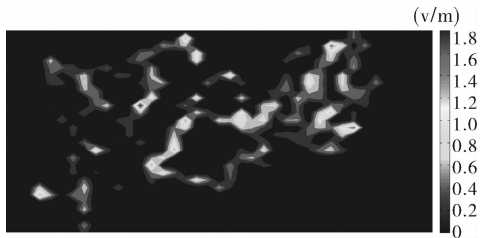
表 2 两次校园测量的电场幅值统计

Tab. 2 Statistical of electric amplitude of two measurements in campus

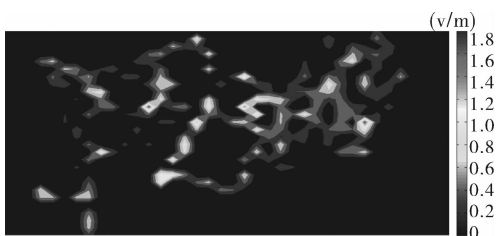
测量次数	$E_{\min}$ (V/m)	$E_{\max}$ (V/m)	$E_{\text{avg}}$ (V/m)	$E_{\text{median}}$ (V/m)	STD
第一次	0	1.97	0.532	0.491	0.428
第二次	0	1.818	0.4787	0.418	0.3078

表 2 中,  $E_{\min}$  表示最小值,  $E_{\max}$  表示最大值,  $E_{\text{avg}}$  表示均值,  $E_{\text{median}}$  表示中值, STD 表示标准差.

由于探头的最小测量值为 0.14 V/m, 因而图 3、图 4 中小于 0.14 V/m 的点, 其具体数值是不可靠的, 可以认定它们的值很小. 从图 3 可以看到, 整个校园电磁环境的分布具有一定的差异, 最大值为 1.97 V/m, 最小值仅为 0 V/m. 对比两次电场强度测量值的分布图与 PDF 图, 可以看出从整体上校园的电磁环境是相对稳定的. 从 PDF 图来看, 两次测量的数据都主要集中于 0~1 V/m 这一范围内, 电磁辐射强度并不高, 这是由于校园附近没有变电站或电视塔等大功率电磁辐射源, 而且校园中树木和建筑物很多, 测量时大部分测量点都处于建筑物或树木的遮挡之下.



(a) 第一次测量



(b) 第二次测量

图 3 两次校园测量电场幅值的空间分布图

Fig. 3 Spatial distribution of electric field amplitude in the campus

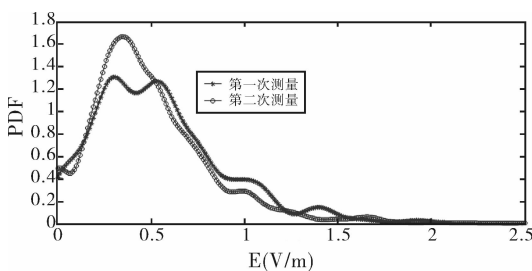


图 4 两次测量的 PDF 图

Fig. 4 PDFs of two measurements

### 2.2 不同区域电磁环境的比较

不同区域其电磁环境的水平显然是不一样的, 为了了解不同区域电磁环境分布的特点和差异, 本文选取天气条件相当的工作日, 在每天同一时间段 (10:00~18:00), 分别在空房间内 (无任何电子设备)、有大量电脑的实验室、以及开阔的平台上, 对该区域一个固定位置的电场幅值进行了数据采集, 采集数据的时间间隔为 30 s. (注: 以上三个区域均在同一楼层). 采集数据结果如图 5.

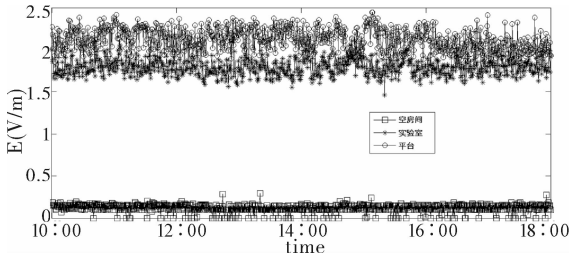


图 5 三种不同区域电场幅值随时间变化图

Fig. 5 The electric field amplitude versus time respectively in three different areas

从图 5 中可以看出空房间的电场幅值相对于实验室和开阔平台都要小的多,并且采集的很多数据都小于 0.14 V/m,因此空房间测量值仅作为一个参考.开阔平台电场幅值的大小整体上高于实验室.图 6 给出了两组实验室和开阔平台电场幅值采样值的 PDF 图.

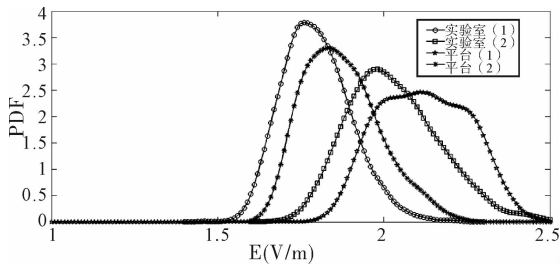


图 6 实验室和开阔平台的 PDF 图

Fig. 6 PDFs of laboratory and open platform

可以看到第一次实验室的测量电场幅值在 1.75 V/m 附近出现的频率最高,第二次则在 2.0 V/m 出现的频率最高.而第一次开阔平台的电场幅值在 2.2 V/m 附近出现的频率最高,第二次则在 1.85 V/m 出现的频率最高.虽然电磁环境是动态变化的,然而图 6 中 4 次测量的 PDF 图,它们的分布趋势却是极其相似的.尤其值得注意的是,这些分布还和混响室中电场强度模值的概率分布非常一致<sup>[8]</sup>.两者之间是否存在某些联系有待下一步的研究.

### 3 基于相关性的电磁环境复杂度研究

电磁环境的复杂性主要体现为它的难以估计性和难以预测性,不同的电磁环境具有不同的复杂性,本文提出了一种利用相关性表征电磁环境复杂度的方法.相关系数(Correlation Coefficient),是由著名统计学家卡尔·皮尔逊提出的一个统计指标,用来反映变量之间相关关系的密切程度.计算公式如(2).其值介于-1~1之间.相关系数绝对值

越大则相关性越强,正、负值代表正相关和负相关.0 代表完全不相关,1、-1 分别代表最大正相关和最大负相关,此时表示两个变量为完全线性关系.

$$\rho_{XY} = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (2)$$

其中,  $\bar{X}$ 、 $\bar{Y}$  分别是两组样本  $X$ 、 $Y$  的平均值,  $N$  为样本总数.

如果将相关系数中的两个变量取作空间中  $a$  点和  $b$  点处同时采集的电场幅值,通过对这两个不同空间位置测出电场幅值的时间序列做相关性计算,就可以判定该电磁环境的复杂程度.其相关系数越高,说明通过  $a(b)$  点预测  $b(a)$  点越容易,说明其可预测性越高,那么环境的复杂性就越低.反之,说明其可预测性越低,复杂度越高.由此本文给出了判定电磁环境复杂度的空间相关性的式(3).

$$\rho_{ab} = \frac{\sum_{i=1}^N (Ea_i - \bar{Ea})(Eb_i - \bar{Eb})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Ea_i - \bar{Ea})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (Eb_i - \bar{Eb})^2}} \quad (3)$$

其中,  $Ea_i$ 、 $Eb_i$  分别是空间中两点处电场幅值的时间序列,  $\bar{Ea}$ 、 $\bar{Eb}$  表示其电场幅值的平均值,  $N$  表示采集总数.

该实验需要用到两个探头,除了上面介绍的 EP600 探头外,还有一个同样是 Narda S. T. S/PMM 公司生产的 EP601 探头,EP601 探头除了在频率范围(10 KHz~9.25 GHz)以及电场测量范围(0.5 V/m~500 V/m)以外,其它方面与 EP600 并无差异.实验系统搭建如图 7 所示,有两台便携式计算机和两个场强探头.

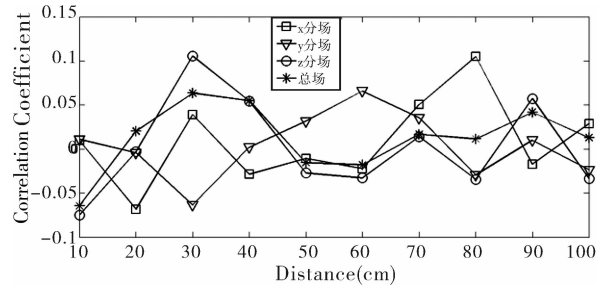


图 7 实验系统

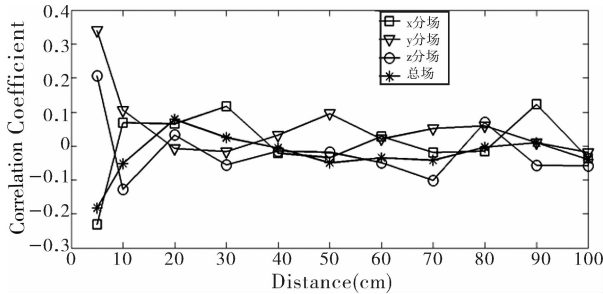
Fig. 7 Measurement system

我们分别在空房间、实验室以及开阔平台进行了电场幅值的测量和相关性分析,将两个探头分别

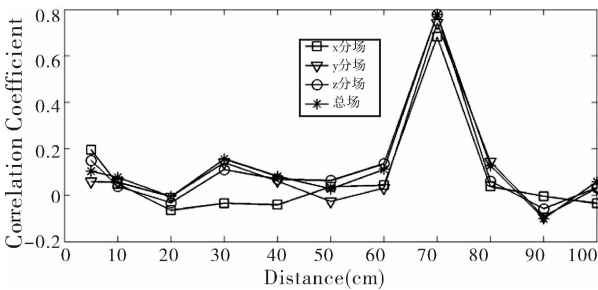
连接至两台便携式笔记本,以它们的距离作为自变量,在每个距离下两个探头分别采集该位置的电场幅值,保持开始与结束时间的一致,采集时间为 8 分钟,每次采集时间间隔为 1 s. 同时,在测量过程中,保证两个探头的 X、Y、Z 方向一致,最后可以对电场分量和总场都进行相关系数的计算,图 8 给出了三个不同区域电场总场与分量的相关系数随距离变化图. 图 9 给出了两组不同区域总场的相关系数随距离变化图.



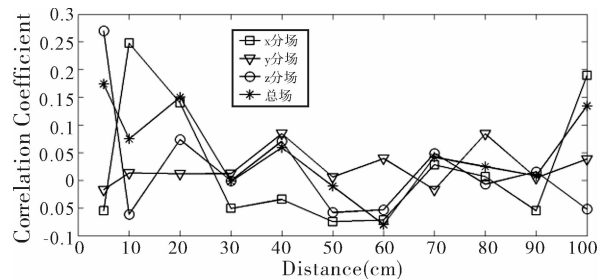
(a) 空房间



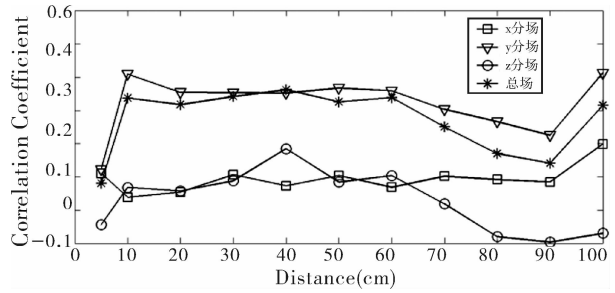
(b) 实验室第一次测量



(c) 开阔平台第一次测量



(d) 实验室第二次测量



(e) 开阔平台第二次测量

图 8 三种不同区域总场和分场的相关系数随距离变化图  
Fig. 8 Correlation coefficients of component and total field versus distance respectively in three different areas

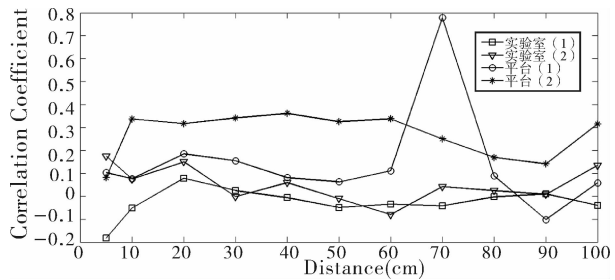


图 9 四次测量总场的相关系数随距离变化图

Fig. 9 Correlation coefficients of total electric field versus distance

从图 8 和图 9 中可以看到,三种区域电磁环境的相关性有明显差异,空房间内电磁环境的相关性最低,开阔平台最高;空房间和实验室内电场分量和总场的相关系数随距离变化比较杂乱,而平台上各分量和总场的相关系数随距离变化趋势较为一致;图 8(c)中距离为 70 cm 时,相关系数高达 0.8. 通过查看原始的采集数据,开阔平台上一一般电场幅值为 2.0 V/m 左右,而此次测量在距离为 70 cm 时,它的值普遍增加到了 5.0 V/m 以上,最大值达到了 9.26 V/m,这说明当时空间中极有可能存在某个大功率辐射源正在发射电磁波. 当空间中存在这样一个主导性的因素时,其它电磁波对于相关性的影响就小了很多,所以此时相关系数达到了 0.8,说明此时电磁环境较为简单,因为它被某单一辐射源所主导,环境由复杂变得简单了.

### 4 结束语

本文通过对校园电磁环境的测量和统计分析,给出了该校园电磁环境的空间分布图以及 PDF 图,同时对比了三个不同区域电磁环境的分布情况,分别统计了这三个区域电场幅值的 PDF 图. 通过观察和比较,本文发现它们 PDF 图的分布趋势

和混响室中电场强度模值概率分布的相似性,探究它们之间的关联性将是下一步研究的重点.另外,本文提出了一种利用相关性表征电磁环境复杂度的方法,通过计算空间中不同位置电场幅值的时间序列的相关性,来判定电磁环境的复杂度.同时给出了电场分量和总场的相关系数随距离变化图,发现了一些有价值的规律,同时验证了该方法的有效性.

#### 参考文献:

- [1] 何宏. 电磁兼容设计与测试技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008.
- [2] Matoi A, Helerea E. Electromagnetic environment and pollution[R]. Bulletin of Transilvania University of Brasov, 2008, 15(50): 618.
- [3] Calin M D, Ursachi C, Helere E. Electromagnetic environment characteristics in urban area[C]//Proceeding of 2013 4th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering. Galati: IEEE, 2009.
- [4] Djuric N, Prsa M, Bajovic V. Serbian remote monitoring system for electromagnetic environmental pollution [C]//Proceeding of 2011 10th International Conference on Telecommunication in Modern SatelliteCable and Broadcasting Services. Nis: IEEE, 2011.
- [5] 四川省辐射环境管理监测中心. 成都市区电磁环境报告简本[R]. 成都: 四川省辐射环境管理监测中心, 2013.
- [6] Chen L, Wei S, Luo C, *et al.* Measurement of electromagnetic environment of Xiamen Island[C]//Proceeding of the 5th Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics. Xi'an: IEEE, 2009.
- [7] Chen L, Shi D, Gao Y. Research on the Simulation System of the Complex Electromagnetic Environment[C]//Proceeding of 2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Tokyo: IEEE, 2014.
- [8] 张华彬, 赵翔, 周海京, 等. 混响室的概率统计分析方法及其蒙特卡罗模拟[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(9): 2475.