

## 论电磁环境的相对性与“接地气”的复杂度评估

王健\* 张江明 王瑞 李旭  
(中国电波传播研究所 青岛 266107)

**摘要:** 为了更加客观地评估电磁环境复杂度及其对电子信息系统的影 响, 该文以通信系统为例剖析了电磁环境复杂度根源表征量——信干噪比, 建立了电磁环境等级与 2FSK, BPSK, QPSK, MSK, QAM 数据通信系统性能的映射, 并引入“电磁环境余量”和“信号余量”概念, 给出了面向典型数据通信系统的“电磁环境图谱”, 为实现有用信号强度、电磁环境干扰和噪声信号强度到电磁环境复杂度等级间转换提供了直接途径。以此为基础, 研究了面向电子信息系统的极化量提取、实时频谱分析技术, 提出了电磁环境测量评估系统组成, 分析了其工作原理, 设计了面向电子信息系统的电磁环境测量、评估流程。最后, 利用数字仿真方式, 对于应用 MSK/单极天线、64-QAM/偶极天线、QPSK/喇叭天线、2FSK/缝隙天线的 4 类通信系统, 分析了上述系统在同一电磁环境下的不同效应, 其复杂度等级分别为 III 级, V 级, IV 级和 II 级。结果显示, 面向对象的电磁环境要素测量可有效地获取与电子信息系统相关的电磁环境分量; 相同电磁环境下不同通信设备可产生不同效应, 这充分验证了电磁环境的复杂度具有明显的相对性。

**关键词:** 电磁环境; 复杂度图谱; 根源表征量; 信干噪比; 系统设计

**中图分类号:** TM937

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2016)05-1249-07

**DOI:** 10.11999/JEIT150947

## Relativity of Electromagnetic Environment and Down-to-earth Complexity Evaluation

WANG Jian ZHANG Jiangming WANG Rui LI Xu

(China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao 266107, China)

**Abstract:** To improve the objectivity of evaluation for electromagnetic environment complexity and its influence on electronic information system, taking communication system as an example, the springhead characters of electromagnetic environment complexity, namely signal to interference and noise ratio, is analyzed. The mapping relation between electromagnetic environment grades and the performance, for different systems including 2FSK, BPSK, QPSK, MSK, and QAM is reconstructed. By putting forward electromagnetic environment margin and signal margin, the atlas of electromagnetic environment complexity for typical data communication system is provided. The atlas provides a direct conversion way from signal intensity, interference and noise intensity to the complexity of the electromagnetic environment. Based on this, polarization information extraction and real time spectrum analysis technique for electronic information system are researched. Then, the system composition for measuring and evaluating electromagnetic environment is presented and the operating principle is also analyzed. Based on computer simulation technique, different effects of four communication systems are given: the electromagnetic environment complexity for communication system using MSK and vertical monopole is III grade; that for 64-QAM and horizontal dipole is V grade; that for QPSK and horn antenna is IV grade; that for 2FSK and aperture antenna is II grade. Simulation results indicate that electromagnetic environment component for different communication systems can be effectively obtained by the above-mentioned measuring system, and electromagnetic environment has different effects on the different communication systems just as electromagnetism complexities for different targets are distinct.

**Key words:** Electromagnetic environment; Atlas of electromagnetic environment complexity; Springhead; Signal to interference and noise ratio; System design

### 1 引言

影响电子信息系统的电磁环境要素涵盖各式各样的电磁噪声和干扰, 主要来源于宇宙、地球大气、

地面及工业系统产生的背景噪声和有意、无意的电磁干扰, 辐射源的多样性以及电磁波在空间传播过程中受媒质时变等非稳态因素的影响, 导致了各类噪声和干扰信号的多样化交织, 形成了覆盖频段宽, 信号数量多、密度高, 信号形式、调制类型多样, 极化方式不一且非稳态时变的复杂电磁环境。其复杂特性表现为:

(1)电磁频谱覆盖范围广: 现今, 电子信息系统的用频几乎占据了整个电磁频谱, 包括从极长波、

收稿日期: 2015-08-19; 改回日期: 2015-12-25; 网络出版: 2016-03-11

\*通信作者: 王健 wangjian@criep.com

基金项目: 青岛市自主创新重大专项基金(青科创 14-6-1-8-ZDZX), 国家 863 计划(2015AA7124068A), 国家 973 计划(6133190102)

Foundation Items: Independent Innovation Major Project Foundation of Qingdao (Qingkechuang14-6-1-8-ZDZX), The National 863 Program of China (2015AA7124068A), The National 973 Program of China (6133190102)

甚长波、长波、中波、短波、米波、微波、毫米波到红外和紫外的所有频段，特别是超宽带技术的兴起，单设备工作所占用的频带较之前有很大的改变。

(2)辐射源数量多、密度高：电子信息系统体制复杂、种类多、数量大，来自海、陆、空、天多种平台的电磁信号交织作用在同一区域，高度交叉、重叠使得电磁环境的信号密度变得越来越高。如雷达信号由20世纪70年代密度是每秒4万个脉冲上升至2010年每秒200万个脉冲<sup>[1]</sup>。

(3)辐射信号形式复杂，调制类型多样：目前，各类电子信息系统广泛采用了复杂的信号调制样式，同时新技术体制设备的投入使用进一步加剧了这种情况，如现代通信系统采用了OFDMA, WCDMA, TD-SCDMA等体制，雷达采用了频率捷变、重频参差、重频抖动、重频编码、相位编码以及多种复合调制。

(4)极化方式不一且非稳态时变：复杂电波环境下的传播常常会带来极化方式的变化，如地面反射、建筑物的反射和边缘绕射所造成的多径效应会使得电波的极化状态显著偏离，入射至电离层的线极化波再返回地面时将发生角度偏转<sup>[2,3]</sup>，等等。由此可见，复杂的电波环境加剧了电磁环境的复杂度。

如此“复杂”的电磁环境，对通信设备可能产生传不远、听不清、误码高的影响，对雷达设备可能产生看不远、辨不清的影响，对导航设备可能产生被误导、被诱骗的影响。由此可见，同一环境，对工作于其中的不同电子信息系统所产生的影响是不完全相同的，即电磁环境的复杂度具有明显的相对性，“复杂”体现了针对具体对象的主观感受，具体表现有：非同时工作的用频设备间不构成相互影响；同时但工作频率无交集的用频设备间不构成相互影响；同时、同频但不工作在同一区域内的用频设备间的影响小；同时、同频、同区域用频装备接收的有用信号高于干扰噪声时所受影响小。

因此，对于特定的电子信息系统，有针对性地获取电磁环境要素，进而评估该系统所处的电磁环境复杂度，须回答4个问题：(1)影响电子信息系统的电磁环境要素有哪些？(2)如何客观评估电磁环境对电子信息系统的影响？(3)获取影响电子信息系统的电磁环境要素所需的基础条件是什么？(4)如何获取影响电子信息系统的电磁环境要素？

对于问题(1)，可归纳为时域、频域、能量域和极化域信息<sup>[1,4]</sup>。对于问题(2)，国内外研究成果在假定获取了基础电磁环境信息——多见于功率谱密度的基础上，从“客观”和“主观”两种角度开展了电磁环境评估方法的研究；其中，客观评估多以统计理论为基础，典型指标包括空/时/频占用情况<sup>[5,6]</sup>、

功率谱密度及其散布特性<sup>[7]</sup>，异动信号率<sup>[8]</sup>等等。主观评估考虑电磁环境的相对性，结合电子信息系统的用频参数和电磁环境特征量的相关性进行探索<sup>[9,10]</sup>，但未能将电子信息系统个体的工作特征纳入评估体系，且未考虑电磁环境极化状态随机变化的特性。对于问题(3)和问题(4)如何解决，目前研究较少。

因此，本文意图结合电子信息系统个体特性，寻定电磁环境复杂度的根源表征量，并对电磁环境要素提取方法和电磁环境综合评估方法进行研究，目的是实现电磁环境更客观的评价，为电子信息系统的电磁环境适应性试验<sup>[11,12]</sup>、效应评估<sup>[13]</sup>、仿真分析<sup>[14]</sup>等深入研究提供技术基础。

## 2 电磁环境复杂度的根源表征量

为使电磁环境评估更加客观，求根溯源，发现“电子信息系统在所处电磁环境下接收端的信干噪比”是影响电子信息系统性能的关键量。因此，在此将其定义为“电磁环境复杂度根源表征量”，表示为

$$c = r = \frac{P_0(t, f)}{\frac{1}{(t_e - t_s)} \cdot \int_{t_s}^{t_e} \frac{1}{(f_e - f_s)} \int_{f_s}^{f_e} p(t, f) \cdot H(f) df dt} \quad (1)$$

式中， $c$ 为电磁环境复杂度因子， $r$ 为电子信息系统接收端信干噪比， $t_s$ 和 $t_e$ 分别为电子信息系统工作起止时间， $[t_s, t_e]$ 为电子信息系统工作时间， $f_s$ 和 $f_e$ 分别为电子信息系统有效工作带宽的起止频率， $[f_s, f_e]$ 为电子信息系统有效工作频带， $H(f)$ 为电子信息系统接收响应函数， $p(t, f)$ 为电子信息系统对应极化、对应时间、对应频段的电磁环境功率谱密度， $P_0(t, f)$ 为电子信息系统接收端信号功率。

当电磁环境为宽带、加性高斯白噪声，常用通信2FSK, BPSK, QPSK, MSK, QAM等调制方式<sup>[15,16]</sup>的最佳接收条件下的误码特性：

$$P_b = \begin{cases} 0.5\text{erfc}(\sqrt{0.5 \cdot r}), & 2\text{FSK} \\ 0.5\text{erfc}(\sqrt{r}), & \text{BPSK, QPSK, MSK} \\ 1 - [1 - 0.75\text{erfc}(0.8 \cdot r)]^2, & 16\text{-QAM} \\ 1 - [1 - 0.875\text{erfc}(r/7)]^2, & 64\text{-QAM} \end{cases} \quad (2)$$

式中， $r$ 为信干噪比， $\text{erfc}(\cdot)$ 为误差余函数。

根据数据通信系统性能定性和定量分级<sup>[16]</sup>，由式(2)，可建立面向数据通信系统的电磁复杂度等级映射，如表1所列。

在此，引入“电磁环境余量”、“信号余量”和“电磁环境复杂度图谱”概念，并分别定义：

表 1 面向数据通信系统的电磁复杂度等级映射

等级	定性描述	定量描述 (误码率 $P_b$ )	对应的常用调制方式下的信干噪比 $r$ (dB)			
			2FSK	BPSK/QPSK/MSK	16-QAM	64-QAM
I 级	对系统正常工作无任何影响	$<10^{-5}$	$>12.6$	$>9.6$	$>14.0$	$>18.6$
II 级	能够实现报文通信, 分组通信质量较差	$[10^{-5}, 10^{-3})$	[9.8, 12.6)	[6.8, 9.6)	[11.6, 14.0)	[16.2, 18.6)
III 级	勉强实现报文通信, 无法实现分组通信	$[10^{-3}, 10^{-2})$	[7.3, 9.8)	[4.3, 6.8)	[9.6, 11.6)	[14.2, 16.2)
IV 级	无法实现报文和分组通信	$[10^{-2}, 10^{-1})$	[2.2, 7.3)	[-0.8, 4.3)	[6.2, 9.6)	[11.0, 14.2)
V 级	系统无法正常工作, 通信中断	$\geq 10^{-1}$	$\leq 2.2$	$\leq -0.8$	$\leq 6.2$	$\leq 11.0$

(1)电磁环境余量：高出电子信息系统灵敏度的电磁环境能量值。

(2)信号余量：高出电子信息系统灵敏度的有用信号能量值。

(3)电磁环境复杂度图谱：以电磁环境余量、信号余量为变量表征电磁环境复杂度的图形。

由上述定义可知，信号余量与电磁环境余量之差(dB)即为“电子信息系统在所处电磁环境下接收端的信干噪比”。通常利用电磁环境感知系统可直接获取电磁环境干扰和噪声信号强度，同时通过测量或预测可得电子信息系统接收端信号强度。由电子信息系统灵敏度、接收端信号强度以及电磁环境强度可确定电磁环境余量和信号余量，进而可确定电子信息系统在所处电磁环境下接收端信干噪比，最终可根据表 1 所列的电磁复杂度等级映射确定电磁环境复杂度。

由表 1 和式(2)可得如图 1 所示的 6 类调制方式数据通信系统“电磁环境复杂度图谱”。从图 1 可以看出：

(1)电磁环境复杂度随电磁环境余量的增加呈递增趋势，随信号余量的增加呈递减趋势。

(2)电磁环境复杂度分界线与信干噪比的分贝值近似成线性变化，这与上述理论相符合。

(3)对于相同的电磁环境余量，达到同等通信效果，BPSK, QPSK, MSK 调制方式所需信号余量低，也就是说：相同的电磁环境，采用 BPSK, QPSK, MSK 调制方式的通信设备复杂度等级最低；该结果侧面反映出了相同环境下，采用 BPSK, QPSK, MSK 调制方式进行通信的抗扰性最强。

(4)电磁环境复杂度图谱可实现由电子信息系统灵敏度、接收端信号强度、电磁环境强度，或信

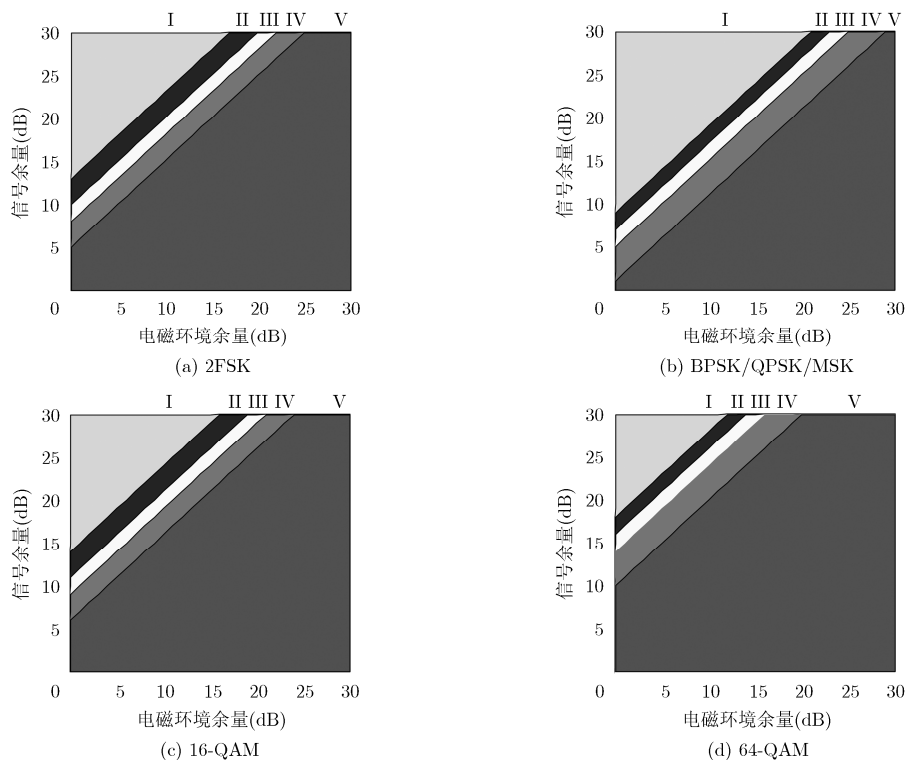


图 1 常用数据通信系统的电磁环境复杂度图谱

号余量、电磁环境余量直接到电磁环境复杂度等级的转换，这正是建立电磁环境复杂度图谱的意义。

### 3 面向对象的电磁环境要素测量

常规的无线电频谱监测系统多配备的是单极化接收天线，也就是说只能测量到与该接收天线相匹配的极化方式的频谱分量。而综合影响电子信息系统的电磁环境包括时域、频域、能量域、极化域等特征要素，归纳为一个基础量，即：不同极化方式下的电磁能量的时频分布。在固定的空间位置点上，对于频谱特性时变且极化状态不固定的电磁信号组合而成的复杂电磁环境，要求测量系统能够获取与电子信息系统相关的极化分量及其实时的时频变化特性。为实现针对性的测量<sup>[17]</sup>，并在此基础上完成有针对性的电磁环境评估，须选用能够进行全极化量测量的天线，如正交极化天线，同时接收两个正交极化分量，进而可根据极化变换理论从中提取出所关注的分量，即与电子信息系统相匹配的极化分量。

根据“任意极化均可由一对正交极化以不同的幅度比和相位差相合成”理论<sup>[2,18]</sup>，电磁环境信号均可统一表征为两正交极化分量  $E_x(t, f)$  和  $E_y(t, f)$  时频分布的组合，以功率形式表达为瞬态 Stokes 矢量为

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} g_0(t, f) \\ g_1(t, f) \\ g_2(t, f) \\ g_3(t, f) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_x E_x^* + E_y E_y^* \\ E_x E_x^* - E_y E_y^* \\ E_x E_y^* + E_x^* E_y \\ -i(E_x E_y^* - E_x^* E_y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |\mathbf{E}|^2 \\ |E_x|^2 - |E_y|^2 \\ 2 \operatorname{Re}(E_x E_y) \\ 2 \operatorname{Im}(E_x E_y) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中， $g_0$  为电磁信号两正交极化基上分量的功率之和， $g_1$  为电磁信号在两个正交极化基上分量的功率

之差， $g_2$  为电磁信号两正交极化基上分量互 Wigner-Ville 分布的实部， $g_3$  为电磁信号两正交极化基上分量互 Wigner-Ville 分布的虚部。

由上分析可知，电磁环境利用任意正交极化天线接收得到电磁环境全极化分量，再利用不同极化基条件下的转化关系得到与电子信息系统相匹配的极化分量及其时频幅度谱。综上，电磁环境测量评估系统可设计为 4 个部分，具体包括测量天线阵、单极化射频转换单元、实时频谱分析单元、极化分选网络，其工作原理示意图如图 2 所示。从图 2 可看出：

(1) 测量天线阵用于完成电磁环境中相互正交的两个极化分量的测量。能够实现全极化分量测量的常用方法有旋转线极化天线法、正交极化天线法、多天线法等<sup>[19]</sup>，该 3 种方法的对比如表 2 所列。考虑工程难易度，推荐选用正交极化天线法，在接收时用两副极化正交的天线，并将两个通道信号以不同幅相关系相合成，分析得到与电子信息系统相匹配的极化分量。

(2) 射频转换单元用于实现两个正交极化分量信号由射频到中频、基带的转换。为保持全极化量信息，正交极化天线阵所接收的正交极化分量需进行分别的处理，考虑两分量的处理过程类似，设计中共用振荡器等模块。射频转换单元的设计与工作原理如图 2 所示。

(3) 实时频谱分析单元用于完成信号的宽带、实时、快速、无损失的处理。传统频谱分析技术，频谱分析的时间长于数据帧持续时间因此会造成数据帧的丢失。为获取超宽带通信、雷达等系统的无线电频谱，或实现对多系统信号的获取，则要求完成电磁频谱的宽带或超宽带实时测量。区别于传统的

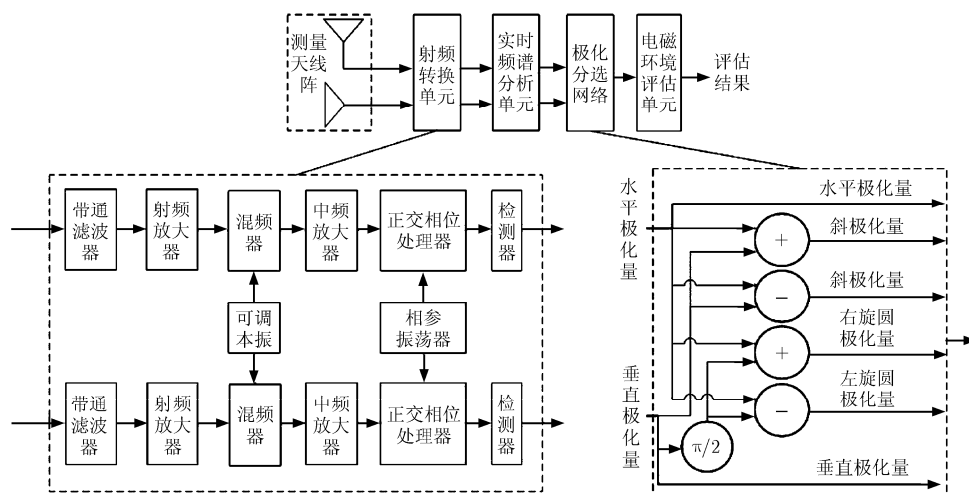


图 2 电磁环境测量评估系统组成及工作原理图

表2 全极化量测量方法分析

测量方法	天线类型	优点	缺点
旋转线极化天线法(极化方向图法)	旋转式线极化天线	设备组成简单, 采用一幅天线、一个通道实现	天线旋转式测量, 非瞬时测量, 无法测量极化捷变信号, 圆极化信号旋向无法直接确定, 需借助辅助设备完成, 测量精度低
正交极化天线法(幅度-相位法)	正交的线极化天线或正交的圆极化天线	侦测能力较强, 双通道处理	对器件性能要求高, 成本较高
多天阵法	三对正交极化天线组	不需要进行相位差的测量	不能测量同时到达的信号, 极化分辨率低, 对多通道的一致性要求较高

“扫频式结构处理分析模式”, 在充分利用数字化技术进行信号捕获和测量的基础上, 通过快速 FFT 等数据信号处理手段实现信号实时分析。该方法可对一定带宽内的所有频率成分同时分析处理, 实现对突发信号、复杂调制信号和干扰信号的观测和分析<sup>[20]</sup>。采用实时频谱分析技术, 其实现的关键是提高频谱分析算法的处理能力, 对数据帧进行频谱分析的时间不大于数据帧的持续时间, 不会漏掉瞬态信号。

(4)极化分选网络用于实现提取与电子信息系统相匹配的极化分量信号。利用任意正交极化天线接收得到电磁环境全极化分量, 再利用不同极化基条件下的转化关系, 得到与电子信息系统相匹配的极化分量及其时频幅度谱。若以垂直、水平双极天线接收, 可分别得到  $E_H$  和  $E_V$ , 及其合成场量  $E$ ; 根据不同极化基条件下的转化关系可由  $E_H$  和  $E_V$  得到其它极化基条件下的各极化分量, 如左/右旋圆极化分量可由下列过程求得: (a)计算垂直/水平极化基下的瞬时 Stokes 矢量  $[g_0^{VH} \ g_1^{VH} \ g_2^{VH} \ g_3^{VH}]^T$ ; (b)根据左/右旋圆极化基与垂直/水平极化基下 Stokes 矢量关系  $[g_0^{LR} \ g_1^{LR} \ g_2^{LR} \ g_3^{LR}]^T = [g_0^{VH} \ -g_3^{VH} \ g_1^{VH} \ g_2^{VH}]^T$  计算左/右旋圆极化基下对应的  $[g_0^{LR} \ g_1^{LR} \ g_2^{LR} \ g_3^{LR}]^T$ , 计算得出左/右旋圆极化分量  $E_L$  和  $E_R$  对应的功率值; (c)同理, 可根据正交斜极化基下垂直/水平极化基下 Stokes 矢量关系  $[g_0^{DS} \ g_1^{DS}$

$g_2^{DS} \ g_3^{DS}]^T = [g_0^{VH} \ -g_2^{VH} \ g_1^{VH} \ g_3^{VH}]^T$  求出两个正交斜极化分量对应的功率值。不同极化基条件下 Stokes 矢量的转化关系如表 3 所示。

表 3 不同极化基条件下Stokes矢量的转化关系

极化基	与垂直/水平极化基条件下的 Stokes 矢量的关系			
垂直/水平	$g_0^{VH}$	$g_1^{VH}$	$g_2^{VH}$	$g_3^{VH}$
左/右旋圆	$g_0^{VH}$	$-g_3^{VH}$	$g_2^{VH}$	$g_1^{VH}$
正交斜极化基	$g_0^{VH}$	$-g_2^{VH}$	$g_1^{VH}$	$g_3^{VH}$

在此测量基础上, 计算电磁环境复杂度根源表征量, 结合电磁复杂度等级映射, 便可实现针对于电子信息系统的电磁环境复杂度评估。

### 4 仿真分析

假定利用垂直/水平正交极化天线阵, 测量获取 VHF 频段垂直极化和水平极化的场强幅度如图 3 所示。利用如上所述面向对象的电磁环境要素测量方法, 可得表 3 的 4 类设备(所用天线分别为单极天线、偶极天线、面天线、缝隙天线)对应的工作时间、工作频率和极化方式下的电磁环境分量分别如图 4 所示。

基于获取的与电子信息系统相关电磁环境分量, 利用面向数据通信系统的电磁复杂度等级映射可评估出所列 4 类设备在同一环境下的电磁环境复杂度, 如表 4 所列。

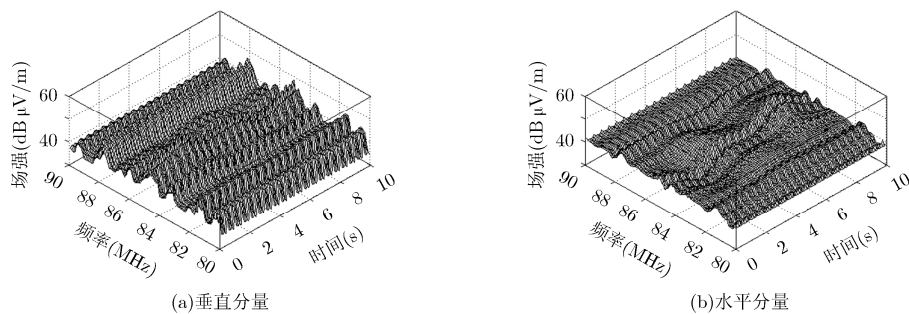


图 3 测量所得的垂直/水平极化正交分量

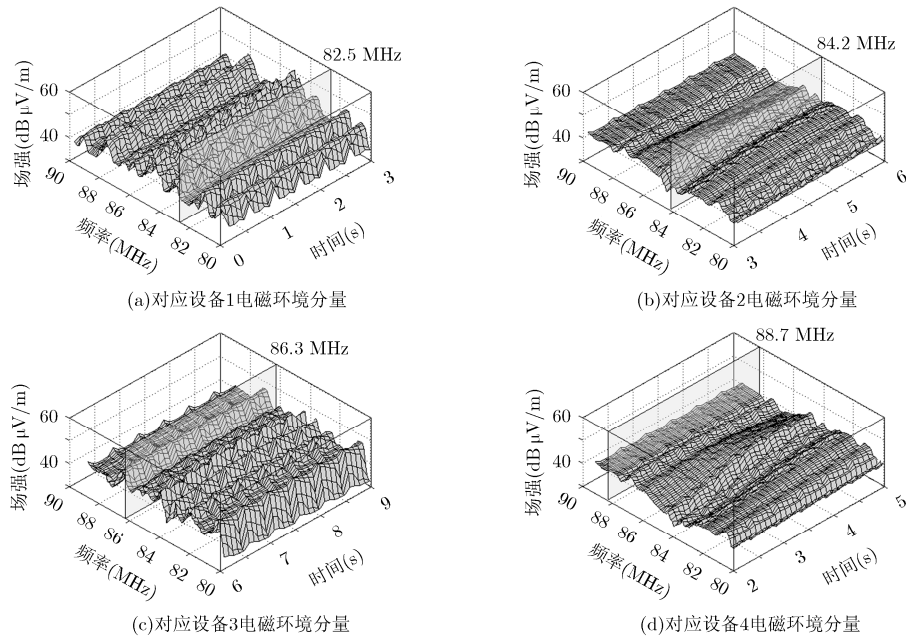


图4 对应不同设备的电磁环境分量(图中切片为对应设备的中心频率)

表4 通信设备及其所处电磁环境复杂度

设备	工作时间 (s)	工作频率 (MHz)	调制 方式	带宽 (kHz)	天线类型	极化 方式	系统灵敏度 (dB $\mu$ V/m)	电磁环境 余量(dB)	信号余 量(dB)	信干噪 比(dB)	复杂度 等级
1	0-3	82.5	MSK	58.0	单极天线	垂直 极化	30	14.70	20	5.30	III
2	3-6	84.2	64-QAM	200.0	偶极天线	水平 极化	30	20.56	28	7.44	V
3	6-9	86.3	QPSK	57.6	喇叭天线	左旋 圆极化	30	10.47	12	1.53	IV
4	2-5	88.7	2FSK	100.0	缝隙天线	水平 极化	30	9.48	20	11.52	II

由上述仿真和表4可以看出：面向对象的电磁环境要素测量可有效地获取与电子信息系统相关电磁环境分量；相同电磁环境下不同电子信息系统所产生的效应是不同的，这充分验证了“电磁环境具有个体相对性”。

## 5 结论

本文从影响电子信息系统的电磁环境要素出发，结合通信系统，剖析了电磁环境复杂度根源表征量——信干噪比，建立了针对数据通信系统的电磁环境复杂度分级体系，目的在于解决“如何客观评估电磁环境对通信系统的影响”这一问题，将客观评估电磁环境复杂程度的工作向前推进一步。同时，以Stokes矢量为基础，提出了相关极化量提取方法，结合实时频谱分析技术设计了电磁环境测量评估系统，确定了“获取影响电子信息系统的电磁环境要素所需的基础条件”，同时回答了影响电子信息系统对应的电磁环境要素如何获取的问题。仿真

结果证明了“相同电磁环境下不同类型通信系统所产生的效应是不同的”，验证了“电磁环境具有个体相对性”。上述研究可为面向个体的“接地气”的电磁环境评估、电子信息系统的电磁环境适应性试验提供基础。

## 参考文献

- [1] 王月清, 王健, 王凡, 等. 一种复杂电磁环境量化描述方法[J]. 电波科学学报, 2013, 28(4): 744-748.  
WANG Yueqing, WANG Jian, WANG Fan, *et al.* A method for quantificational analysis for complex electromagnetic environment[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2013, 28(4): 744-748.
- [2] 王被德. 电磁波的极化及其应用[J]. 电波科学学报, 1999, 14(3): 347-356.  
WANG Beide. Polarization of electromagnetic wave and its applications[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 1999, 14(3): 347-356.
- [3] 赵红梅, 江长荫, 王健. 电波极化面旋转特性研究[J]. 空间科

- 学报, 2011, 31(2): 208-213.
- ZHAO Hongmei, JIANG Changyin, and WANG Jian. Analysis of properties for radiowave polarization plane rotation[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2011, 31(2): 208-213.
- [4] MIL-STD-464C: electromagnetic environmental effects requirements for systems[S]. 2012.
- [5] 金朝, 丁斌, 李冬, 等. 战场电磁环境复杂度评估及其应用[J]. 火力与指挥控制, 2011, 36(12): 194-197.
- JIN Zhao, DING Hong, LI Dong, *et al.* Complexity evaluation method of battlefield electromagnetic environment and study on its application[J]. *Fire Control & Command Control*, 2011, 36(12): 194-197.
- [6] 王磊, 苏东林, 谢树果, 等. 基于 EGARCH 过程的电磁频谱占用状态波动特性分析[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(11): 2767-2773. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.00165.
- WANG Lei, SU Donglin, XIE Shuguo, *et al.* Electromagnetic spectrum occupancy state volatility analysis based on EGARCH process[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(11): 2767-2773. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.00165.
- [7] ZHANG Shaojun, SU Donglin, WANG Jian, *et al.* Complexity evaluation method of electromagnetic environment oriented to communication equipment based on statistic theory[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 568-570: 1331-1335.
- [8] 王伦文, 孙伟, 潘高峰. 一种电磁环境复杂度快速评估方法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(12): 2943-2947. doi: 10.3724/SP.J.1146.2010.00063.
- WANG Lunwen, SUN Wei, and PAN Gaofeng. An evaluating quickly method for electromagnetic environment complexity [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(12): 2943-2947. doi: 10.3724/ SP.J.1146.2010.00063.
- [9] 陈行勇, 张殿宗, 王祎, 等. 面向对象的战场电磁环境复杂度评估[J]. 电子信息对抗技术, 2010, 25(2): 74-83.
- CHEN Hangyong, ZHANG Dianzong, WANG Yi, *et al.* Object-oriented battlefield electromagnetic environment complexity evaluation[J]. *Electronic Information Warfare Technology*, 2010, 25(2): 74-83.
- [10] 郝晓军, 洪丽娜, 韩慧, 等. 电磁环境复杂度动态评估方法[J]. 航天电子对抗, 2015, 31(1): 59-61.
- HAO Xiaojun, HONG Lina, HAN Hui, *et al.* Dynamic electromagnetic environment complexity evaluation[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2015, 31(1): 59-61.
- [11] 许雄, 汪连栋, 曾勇虎, 等. 装备复杂电磁环境适应性试验问题探讨[J]. 航天电子对抗, 2014, 30(4): 30-32.
- XU Xiong, WANG Liandong, ZENG Yonghu, *et al.* Discussion on the complex electromagnetic environment adaptation test problems for equipment[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2014, 30(4): 30-32.
- [12] 崔积丰. 试验电磁环境复杂等级量化方法研究[J]. 舰船电子对抗, 2014, 37(1): 32-35.
- CUI Jifeng. Research into quantization method of test electromagnetic environment complexity grade[J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2014, 37(1): 32-35.
- [13] 汪连栋, 郝晓军, 韩慧. 复杂电磁环境效应分析及环境控制实现[J]. 电子信息对抗技术, 2014, 29(6): 7-11.
- WANG Liandong, HAO Xiaojun, and HAN Hui. Analysis of complex electromagnetic environment effects and design of complex electromagnetic environment control[J]. *Electronic Information Warfare Technology*, 2014, 29(6): 7-11.
- [14] CHEN Limin, SHI Dan, and GAO Yougang. Research on the simulation system of the complex electromagnetic environment[C]. 2014 International Symposium on EMC, Tokyo, 2014: 45-48.
- [15] 赵红梅, 惠守强, 王健, 等. 通信设备受扰性能评估方法研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2013, 8(4): 398-402.
- ZHAO Hongmei, HUI Shouqiang, WANG Jian, *et al.* Study on method for performance evaluation with electromagnetic interference of communication device[J]. *Journal of China of Academy of Electronics and Information Technology*, 2013, 8(4): 398-402.
- [16] 卢树军, 李英林, 刘汉权, 等. 面向战术互联网通信链路的干扰威胁评估方法[J]. 现代军事通信, 2013, 21(3): 22-26.
- LU Shujun, LI Yinglin, LIU Hanquan, *et al.* A method for jamming threat assessment for tactical Internet communication links[J]. *Journal of Modern Military Communications*, 2013, 21(3): 22-26.
- [17] 刘胜, 张兰勇, 张利军. 基于小波分析的电磁干扰测量技术研究[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(5): 1229-1233. doi: 10.3724/SP.J.1146.2009.00631.
- LIU Sheng, ZHANG Lanyong, and ZHANG Lijun. The Study of electromagnetic interference measurement technique based on wavelet analysis[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(5): 1229-1233. doi: 10.3724/ SP.J.1146.2009.00631.
- [18] 王雪松, 李永祯, 代大海, 等. 电磁波瞬态极化的统计特性[J]. 中国科学 E 辑 信息科学, 2004, 34(8): 919-929.
- WANG Xuesong, LI Yongzhen, DAI dahai, *et al.* Studies on time-frequency analysis and target recognition with polarimetric radar[J]. *SCIENCE IN CHINA Ser. E Information Sciences*, 2004, 34(8): 919-929.
- [19] 杨永杰. 辐射源极化信息的检测和识别技术研究[D]. [博士论文], 西安电子科技大学, 2012.
- YANG Yongjie. Research on measuring and detecting polarization information of radiation source[D]. [Ph.D. dissertation], Xidian University, 2012.
- [20] 陈曾平, 吴巨红, 宿绍莹, 等. 宽带实时频谱分析技术及其应用[J]. 信号处理, 2012, 28(2): 151-157.
- CHEN Zengping, WU Juhong, SU Shaoying, *et al.* The technology and application of wideband real-time spectrum analysis[J]. *Signal Processing*, 2012, 28(2): 151-157.
- 王健: 男, 1979年生, 高级工程师, 研究方向为工程电波传播与电磁环境效应.
- 张江明: 男, 1990年生, 硕士生, 研究方向为电磁干扰与电磁环境效应.
- 王瑞: 女, 1980年生, 高级工程师, 研究方向为用频设备及其电磁环境效应.