

环境及其效应

战场电磁环境复杂度与战术通信性能的相关性研究

赵红梅, 苏海斌, 王健

(中国电波传播研究所, 山东 青岛 266107)

摘要: **目的** 为提升战场电磁环境复杂度评估的客观性, 基于电磁环境与通信性能的相关性提出一种电磁环境复杂度评估方法。**方法** 该方法以层次分析法和混合加权理论为基础, 以典型通信系统为例, 建立语音通信和数据通信设备性能和电磁环境复杂度等级的映射, 并据此建立通信网系性能和电磁环境复杂度的等级映射, 从目标层、准则层、指标层给出五级量化指标体系。**结果** 在 50 km×50 km 典型地域中, 上述评估方法给出了 10 部高频和 10 部超高频通信设备组成的通信网络各单链路通信质量, 分别为 IV、IV、I、IV、III、II、IV、V、IV、III、II、II、III、V、II、I、V、IV、V、V, 并在此基础上评估了整个网系的通信质量等级和整个通信网系面临的电磁环境复杂度 (IV)。**结论** 上述研究验证了方法的可行性, 同时证实了同一环境下不同设备所受的电磁环境影响具有个体差异性, 整体通信网系的受影响程度有别于单一设备。研究结果可为通信网系的电磁环境适应性试验、电磁干扰效应评估等研究提供基础和有益的参考。

关键词: 电磁环境; 复杂度; 评估, 战术通信

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2018.11.021

中图分类号: TN98 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2018)11-0113-05

Correlation of Battle Electromagnetic Environment Complexity and Tactics Communication System Performance

ZHAO Hong-mei, SU Hai-bin, WANG Jian

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

ABSTRACT: Objective To improve the objectivity of evaluation on electromagnetic environment complexity of battlefield and propose a method for evaluation of electromagnetic environment complexity, based on correlation between electromagnetic environment and communication performance. **Methods** Based on analytic hierarchy process and mixed weighted theory, with a typical communication system as an example, the mapping relation between electromagnetic environment grades and voice and data communication equipment. Based on this, the mapping relation between electromagnetic environment grades and communication network system was reconstructed to give the five-level quantitative indicator system from target level, criterion layer and index level. **Results** The above assessment method could respectively give the communication quality of single link of ten HF radio equipment and ten VHF radio equipment in the typical area of 50 km×50 km, the frequencies were IV, IV, I, IV, III, II, IV, V, IV, III, II, II, III, V, II, I, V, IV, V, V. On this basis, the communication quality of the whole network and the electromagnetic environment complexity (IV) were assessed. **Conclusion** The above research verifies the feasibility of the method and proves that influences of electromagnetic environment on different equipment in the same environment are different.

收稿日期: 2018-06-07; 修订日期: 2018-07-07

基金项目: 973 计划 (6133190102); 青岛海洋科学与技术国家实验室开放基金 (QNLM2016ORP0411)

作者简介: 赵红梅 (1980—), 女, 河北人, 高级工程师, 主要研究方向为电磁干扰与电磁兼容。

通讯作者: 王健 (1979—), 男, 河北人, 高级工程师, 主要研究方向为电磁环境评估与工程电波传播。

proves that influences of electromagnetic environment on different equipment in the same environment are different. The influencing degree of the whole communication system is different from single equipment. The research above provides basis and beneficial reference for electromagnetic environment adaptation test and electromagnetic interference effect, etc. of the communication system.

KEY WORDS: electromagnetic environment; complexity; evaluation; tactics communication

电磁环境复杂度评估及其对电子信息系统的影响分析技术是当前研究的热点之一。该技术不仅是电磁环境频谱管理的第一步,同时也是电子信息系统测试、试验、训练的一个重要支撑。针对此,美英等国家提出了《MIL-STD-464A Electromagnetic environmental effects requirements for systems》^[1]、《DoD Directive 3222.3:DoD Electromagnetic Environmental Effects(E3) Program》^[2]、《The Electric, Magnetic & Electromagnetic Environment》^[3]等标准和指南性文件,并进行了数次修订。国内学者在分析了复杂电磁环境内涵和特征的基础上,多以电磁环境监测数据为基础^[4-5],提出了客观和主观二类评估思想^[6]:客观评估多以统计理论为基础,从频率占用度、时间占用度、平均功率谱密度、电磁信号特征及异动信号率、信息量变化率、复合信息熵等指标进行评估^[7-11];主观评估考虑了电子信息系统和电磁环境的相关性^[12-17],部分学者探索了电磁环境复杂度根源表征量,建立了电磁环境等级与数据通信设备性能的映射^[6]。为进一步深化电磁环境评估方法,提升电磁环境评估公信力,文中从典型通信系统层面,研究电磁环境复杂度与通信系统的相关性的映射,旨在为通信系统的电磁环境适应性试验及其评估技术^[18-19]研究提供技术基础。

1 评估方法

影响电子设备的电磁环境包括噪声和干扰,覆盖为时域、频域、能量域和极化域等要素,来源于宇宙、地球大气、地面及工业系统等。源的多样性以及媒质对电磁波的影响导致了电磁环境信号具有数量多、密度高、样式多样、覆盖频段宽、极化方式不一且非稳态时变等特性。由电磁环境相对性可知,相同电磁环境对不同设备造成不同的效应,因此,可利用专用的测量设备获取影响电子信息设备的电磁环境要素,找出与特定设备相关的时域、频域、能量域和极化域信息^[6]。

基于能力的电磁环境复杂度评价,是依据受到电磁环境影响后的电子设备能力变化状况,从而判定电磁环境的复杂程度。考虑电子设备的动态工作参数与电磁环境的耦合,文献[5]定义了电磁环境复杂度根源表征量,即“电子设备在所处电磁环境接收端的信噪比”,可表示为:

$$c = \frac{1}{(t_e - t_s)} \int_{t_s}^{t_e} \frac{1}{(f_e - f_s)} \int_{f_s}^{f_e} [p(t, f) \cdot H(f) - p_0(t, f)] df dt \quad (1)$$

式中: c 为电磁环境复杂度因子; $[t_s, t_e]$ 为有效工作时间; $[f_s, f_e]$ 为有效工作频带; $H(f)$ 为设备接收频响函数; $p(t, f)$ 为电磁环境功率谱; $p_0(t, f)$ 为设备接收端信号功率谱。

对于通信设备而言,主要考虑到通信能力技术指标语音清晰度、误码率等受影响的程度,从而综合评估出针对该通信设备的电磁环境复杂度。基于通信能力的电磁环境复杂度评估方法如下。

1) 确定面向单设备的电磁环境评估体系。定义电磁环境等级及对应的通信质量等级为最终的评估目标,并据此确定准则层、指标层的数据项,见表1。

表1 面向通信系统的电磁环境评估体系

目标层		准则层	指标层
电磁环境等级	通信质量等级	语音清晰度或误码率	信噪比

2) 确定面向单设备的电磁环境分级标准。对于单个通信设备,对于常用的调制方式,根据语音通信系统清晰度指数与信噪比的映射关系^[19]:

$$A = \begin{cases} 1 & r \geq 40 \\ -1.26 \times 10^{-5} r^3 + 2.93 \times 10^{-4} r^2 + 2.57 \times 10^{-2} r + 0.31 & -20 < r < 40 \\ 0 & r \leq -20 \end{cases} \quad (2)$$

式中: A 为语音清晰度指数; r 为信噪比, dB。数据通信系统误码率与信噪比的映射关系为:

$$P = \begin{cases} 0.5 \cdot \operatorname{erfc}(\sqrt{0.5 \cdot r}) & , 2\text{FSK} \\ 0.5 \cdot \operatorname{erfc}(\sqrt{r}) & , \text{BPSK, QPSK, MSK} \\ 1 - [1 - 0.75 \cdot \operatorname{erfc}(0.8 \cdot r)]^2 & , 16\text{-QAM} \\ 1 - [1 - 0.875 \cdot \operatorname{erfc}(r/7)]^2 & , 64\text{-QAM} \end{cases} \quad (3)$$

式中: P 为数据误码率; r 为信噪比; $\operatorname{erfc}()$ 为误差余函数。

可分别建立语音通信设备和数据通信设备分级标准,见表2和表3。

3) 确定面向通信系统的评估方法。在单设备评估方法基础上,采集加权求和方式,建立面向通信系

表 2 面向语音通信设备的电磁环境分级标准

目标层		准则层	指标层		
电磁环境 复杂度等级	通信质量等级	话音清晰度	信干噪比		
			AM/FM	2FSK	BPSK/QPSK/MSK
I	通信未受干扰	$\alpha \geq 0.9$	>22.5	>10.9	>7.9
II	话音质量高	$0.7 \leq \alpha < 0.9$	[14.3, 22.5)	[8.5, 10.9)	[5.5, 7.9)
III	话音基本能听懂	$0.5 \leq \alpha < 0.7$	[7.4, 14.3)	[2.9, 8.5]	[-0.06, 5.5)
IV	话音勉强能听懂	$0.3 \leq \alpha < 0.5$	[0, 7.4]	[-3.4, 2.9]	[-6.4, -0.06)
V	无法通信	$\alpha < 0.3$	≤ 0	≤ -3.4	≤ -6.43

表 3 面向数据通信设备的电磁环境分级标准

目标层		准则层	指标层			
电磁环境 复杂度等级	通信质量等级	误码率	信干噪比			
			2FSK	BPSK/QPSK/MSK	16-QAM	64-QAM
I	对系统正常工作无任何影响	$< 10^{-5}$	>12.6	>9.6	>14.0	>18.6
II	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	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	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	系统无法正常工作, 通信中断	$\geq 10^{-1}$	≤ 2.2	≤ -0.8	≤ 6.2	≤ 11.0

统的评估方法, 其量化统计值计算方法可表示为:

$$c = \frac{\sum_{i=1}^5 \left(\frac{i \cdot n_i}{5} \right)}{N} \quad (1)$$

式中: i 为单链路通信质量等级或电磁环境复杂度等级, $i=1,2,3,4,5$; n_i 为通信质量等级或电磁环境复杂度等级为 i 的通信设备数量; N 为通信设备总数。

4) 确定面向通信系统的电磁环境分级标准。根据上述评估方法所得结果, 确定面向通信系统的电磁环境等级, 见表 4。

表 4 面向通信网系的电磁环境分级标准

等级	统计量化值 c
I	[0, 0.2)
II	[0.2, 0.4)
III	[0.4, 0.6)
IV	[0.6, 0.8)
V	[0.8, 1]

2 仿真分析

假定在 50 km×50 km 作战区域内部署某通信网, 共 12 个节点组成了 2 个子网共计 20 条通信链路。链路间采用定频的通信方式, 其网络拓扑及周边地形情况如图 1 所示。各节点采用通信样式、工作频率、调制方式、工作带宽、发射功率、天线类型等参数见表 5。

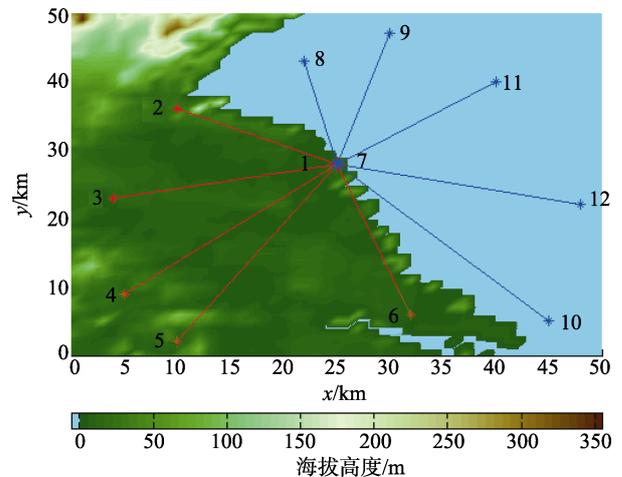


图 1 通信网络拓扑图

根据通信网部署、拓扑关系及用频参数, 利用高频地波传播以及超高频地面传播预测方法^[20-22], 计算可得各通信链路的接收信号强度, 见表 6。

根据式 (4) 确定面向通信系统的评估方法, 可得整个通信系统的面临的电磁环境量化统计值为

$$c = \frac{\sum_{i=1}^5 (i \cdot n_i / 5)}{N} = 0.68$$

进而, 可确定面向整个通信系统的电磁环境分级标准为 IV。这意味着在该电磁环境下, 1 条高频通信链路无法通信, 5 条高频通信链路话音勉强能听懂, 1 条高频通信链路话音基本能听懂, 4 条超高频数据通信链路通信中断, 1 条超高频通信链路无法实现报

表5 通信网设备用频参数

子网	节点	相对位置	通信样式	工作频率/MHz	调制方式	工作带宽/kHz	发射功率/W	天线类型	灵敏度/dBm
A		(25, 28)	语音	对应节点 2—5	AM	6	100	鞭状天线	-115
		(10, 36)	语音	3.6	AM	6	100	鞭状天线	-115
		(4, 23)	语音	3.9	AM	6	100	鞭状天线	-115
		(5, 9)	语音	4.2	AM	6	100	鞭状天线	-115
		(10, 2)	语音	4.9	AM	6	100	鞭状天线	-115
		(32, 6)	语音	5.2	AM	6	100	鞭状天线	-115
B		(25, 28)	数据	对应节点 8—12	2FSK	25	25	鞭状天线	-117
		(22, 43)	数据	450.2	2FSK	25	25	鞭状天线	-117
		(30, 47)	数据	452.9	2FSK	25	25	鞭状天线	-117
		(45, 5)	数据	455.6	2FSK	25	25	鞭状天线	-117
		(40, 40)	数据	457.4	2FSK	25	25	鞭状天线	-117
		(48, 22)	数据	459.8	2FSK	25	25	鞭状天线	-117

表6 通信质量和面临的电磁环境复杂度等级

序号	通信链路	通信距离/km	噪声干扰强度/dBm	信号强度/dBm	信噪比/dB	话音清晰度	误码率	单链路通信质量和面临的电磁环境复杂度等级
1	1—2	17.00	-44.71	-38.49	6.22	0.47	—	IV
2	1—3	21.59	-40.71	-40.30	0.41	0.17	—	IV
3	1—4	27.59	-66.08	-42.31	23.77	0.40	—	I
4	1—5	30.02	-48.39	-43.02	5.37	0.45	—	IV
5	1—6	23.09	-49.17	-40.80	8.37	0.26	—	III
6	2—1	17	-54.75	-38.49	16.26	0.47	—	II
7	3—1	21.59	-45.70	-40.30	5.40	0.45	—	IV
8	4—1	27.59	-36.59	-42.31	-5.72	0.42	—	V
9	5—1	30.02	-48.41	-43.02	5.39	0.19	—	IV
10	6—1	23.09	-49.12	-40.80	8.32	0.53	—	III
11	7—8	15.30	-56.47	-43.19	13.28	—	1.20E-05	II
12	7—9	19.65	-56.54	-45.37	11.17	—	7.18E-04	II
13	7—10	30.48	-58.62	-49.18	9.44	—	6.17E-03	III
14	7—11	19.21	-46.66	-45.17	1.49	—	2.47E-01	V
15	7—12	23.77	-58.72	-47.02	11.70	—	3.07E-04	II
16	8—7	15.30	-57.47	-43.19	14.28	—	7.61E-07	I
17	9—7	19.65	-40.54	-45.37	-4.83	—	4.24E-01	V
18	10—7	30.48	-56.62	-49.18	7.44	—	3.12E-02	IV
19	11—7	19.21	-46.66	-45.17	1.49	—	2.47E-01	V
20	12—7	23.77	-48.72	-47.02	1.70	—	2.39E-01	V

文和分组通信, 1条超高频通信链路勉强实现报文通信无法实现分组通信, 3条超高频通信链路能够实现报文通信分组通信质量较差, 其余链路通信基本未受影响。

3 结论

文中从电磁环境复杂度根源表征量出发, 结合典型通信系统, 提出典型通信单设备和全网系的电磁环境复杂度评估方法, 建立了面向语音通信设备和数据通信设备的电磁环境分级标准和映射。通过仿真验证

了方法的可行性, 证实了同一环境下不同设备所受的电磁环境影响具有个体差异性。整体通信网系的受影响程度有别于单一设备, 这为客观评估通信系统的电磁环境复杂度推进了一步。上述研究为电磁环境仿真^[23]、装备适应性试验^[24]、电磁干扰性能评估^[25]、用频管理^[26]等研究提供了基础和有益的参考。

参考文献:

- [1] MIL-STD-464C, Electromagnetic Environmental Effects Requirements for Systems[S].

- [2] Department of Defense. DoD Directive 3222.3: DoD Electromagnetic Environmental Effects(E3) Program[Z]. Washington: Department of Defense, 2004.
- [3] Defence Standard 59-411 Part 2, The Electric, Magnetic & Electromagnetic Environment[S].
- [4] 胡苏, 郭惠婷, 武刚. 面向复杂电磁环境的多天线信道估计技术[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(9): 2221-2226.
- [5] 掌孝政, 陆彬彬, 关羽. 电磁兼容比对试验的实施与分析[J]. 环境技术, 2017, 35(4): 108-112.
- [6] 王健, 张江明, 王瑞, 等. 论电磁环境的相对性与“接地气”的复杂度评估[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(5): 1249-1255.
- [7] 李永志, 王景, 王凡. 一种基于感知数据特性分析的电磁环境复杂度评估方法[J]. 中国电子科学研究院学报, 2016, 11(4): 392-396.
- [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.
- [9] 李文臣, 张政超, 陆静, 等. 电磁环境复杂度等级评估模型[J]. 中国电子科学研究院学报, 2012, 7(4): 427-431.
- [10] 代强伟, 李修和, 薛磊. 一种度量战场电磁环境复杂度的新方法[J]. 装备环境工程, 2015, 12(4): 105-109.
- [11] 刘敏, 任丙印, 董树理. 基于隶属云模型的战场电磁环境复杂度评估方法[J]. 通信对抗, 2015, 35(2): 32-35.
- [12] 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, 3(2): 74-83.
- [13] 刘敏, 乔会东, 董树理. 超短波通信装备复杂电磁环境适应能力评估[J]. 通信对抗, 2016, 36(4): 575-578.
- [14] 刘军, 梁高波, 周磊, 等. 超短波跳频电台复杂电磁环境适应能力评估方法[J]. 强激光与粒子束, 2015, 29(10): 155-158.
- [15] 叶礼邦, 洪丽娜, 崔建岭, 等. 一种适合通信侦察能力试验的电磁环境复杂度定量评估方法[J]. 中国电子科学研究院学报, 2014, 9(6): 531-537.
- [16] 郭淑霞, 王亚锋, 单雄军. 复杂电磁环境下雷达探测效能的探索性分析[J]. 西北工业大学学报, 2015, 33(5): 837-842.
- [17] 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.
- [18] 邵康, 刘姜玲. 基于半实物平台的战场复杂电磁环境信号生成与实现[J]. 中国电子科学研究院学报, 2017, 12(2): 176-180.
- [19] 荣辉, 王满喜. 通信装备复杂电磁环境适应性试验评估技术[J]. 航天电子对抗, 2017, 33(1): 46-47.
- [20] 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.
- [21] 王月清, 王先义, 王健, 等. 电波传播模型选择及场强预测方法-工程实施指南[M]. 电子工业出版社, 2015.
- [22] ITU-R. Recommendation ITU-R P.368-9 Ground-wave Propagation Curves for Frequencies between 10 kHz and 30 MHz[S].
- [23] ITU-R. Recommendation ITU-R P.2001-2 A General Purpose Wide-range Terrestrial Propagation Model in the Frequency Range 30 MHz to 50 GHz[S].
- [24] 王东. 复杂电磁环境数字仿真系统研究[J]. 装备环境工程, 2018, 15(1): 100-104.
- [25] 苏东林, 戴飞, 谢树果. 系统级电磁环境效应认知方法[J]. 遥测遥控, 2016(6): 28-35.
- [26] 张江明, 王健. 用频系统电磁干扰多级筛选改进方法[J]. 中国无线电, 2016(10): 51-54.
- [27] 曲馨, 宁学侃, 赵国艳. 复杂电磁环境下的电子战频谱管理分析[J]. 微波学报, 2017(2): 575-578.