

文章编号: 2095-4980(2017)01-0059-06

一种基于干信比的电子干扰信号环境度量方法

陶 欢, 周小平, 孙永全, 任 彦

(中国北方电子技术研究所, 北京 100191)

摘 要: 通过对复杂电磁环境的构成要素多样性及其对装备影响机理差异性的分析, 从电磁信号的时域、频域、功率、调制和极化参数入手, 提出了一种基于干信比的电子干扰信号度量方法。建立了基于调制匹配系数、极化匹配系数和相对功率强度的度量指标, 实现了电磁环境特征、装备技术特点以及电磁环境度量结果的一致性。最后通过仿真计算验证了度量方法的可行性和合理性。

关键词: 干信比; 电子干扰; 度量

中图分类号: TN806

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201701.0059

An evaluation method of electronic jamming signal environment based on SJR

TAO Huan, ZHOU Xiaoping, SUN Yongquan, REN Yan

(China Northern Electronic Technology Institute, Beijing 100191, China)

Abstract: According to the analysis on the variety of complex electromagnetic environment elements and the differences of their effects on the equipments, from the aspects of time, frequency, power, modulation and polarization parameters of electromagnetic signals, a new evaluation method on electronic jamming signal environment based on Signal to Jamming Ratio(SJR) is proposed. A new evaluation index based on modulation matching coefficient, polarization matching coefficient and relative power intensity is established, which achieves the consistency among electromagnetic environment characteristic, equipment technical features and evaluation results. Simulation tests are performed to validate the feasibility and rationality of this method.

Keywords: Signal to Jamming Ratio; electronic jamming environment; evaluation

复杂电磁环境是指电磁辐射源种类多, 辐射强度差别大, 信号分布密集, 信号样式多样, 能对作战行动和武器装备运用产生严重威胁和影响的电磁环境^[1]。由于复杂电磁环境对信息化战争的进程和结局影响重大, 近年来, 对于复杂电磁环境的度量成为了一个热点和难点问题。国内已有不少学者对电磁环境复杂度量进行了初步研究。针对战场电磁环境定量描述难的特点, 文献[2]提出了一种基于时间占有度、空间覆盖度、频率占用率的电磁环境度量方法。文献[3]比较了目前战场电磁信号环境定量描述方法, 提出了一种定量的战场电磁信号环境层次描述方法。针对不确定性, 文献[4]使用 Shannon 概率熵对电磁态势信息进行度量, 构建了复杂电磁环境的参数不确定性空间。为有效描述战场电磁环境复杂性指标的模糊性和突变性, 文献[5]采用模糊数学的评价方法对战场电磁环境复杂性进行评估。文献[6]指出脉冲密度和频谱占用度对于战场电磁环境复杂度评估不具有普遍性和科学性, 针对跳频信号分选, 提出了评估电磁环境复杂度的复合信息熵方法。文献[7]提出了一种基于作战效能准则的战场电磁环境评估方法。文献[8]证明了电磁环境的分形特征, 提出基于数学形态学的电磁环境分形维数计算方法。上述方法主要是从电磁环境的宏观特征进行考虑, 复杂电磁环境构成要素多样, 影响机理复杂, 使得电磁环境的度量结果的适应性不强。为此, 需要结合其构成要素、装备技术特点和影响机理进行细化研究。

1 复杂电磁环境的基本特点及其对装备的影响

复杂电磁环境主要由敌方电磁辐射、我方用频设备自扰互扰、民用电子设备电气设施辐射以及自然电磁现

象等 4 个要素构成, 这些要素中来自敌方的电磁辐射具有持续强烈、不可控制和影响巨大等特点, 是复杂电磁环境研究中应当关注的核心要素。敌方的电磁辐射可以分为 2 类: 一类称为电子目标信号, 主要包括敌方通信、雷达、导航等装备的辐射信号, 这类信号是我方电子对抗和侦察装备的作战目标; 另一类是电子干扰信号, 主要包括敌方通信干扰、雷达干扰、光电干扰等信号, 这类信号是我方通信、雷达、导航等电子信息设备的主要电磁威胁。

由于装备技术特点的差异, 复杂电磁环境对不同类型装备的影响机理和影响程度存在较大不同。从技术特征上, 装备大体可分为 2 大类: 一类是通过发射信号来传递或获取信息的装备, 如有源雷达、通信电台等, 其主要面临的影响是复杂电磁环境中来自敌方的干扰信号, 显然干扰信号的功率、带宽和频段等对其影响较大; 另一类是仅通过接收目标信号的装备来获取信号的装备, 如电子对抗装备、技术侦察设备、无源雷达等, 其主要面临的影响是复杂电磁环境中来自敌方的通信、雷达等目标信号, 目标信号的数量、种类、密度、样式等对其影响较大。

根据作用机理和作用效果来看, 干扰信号可分为 2 类: 一种是功率型干扰; 另一种是信息型干扰。以雷达装备为例, 功率型干扰主要是指压制干扰、瞄准干扰等, 其作用是产生类似于雷达接收机的内部噪声, 遮盖或淹没信号回波, 当干扰功率足够大时, 等效的接收机内部噪声增大, 这时的噪声和信号加噪声的统计特性发生变化。在门限电平不变时, 虚警概率和漏警概率都增大, 发现概率降低。若保持虚警概率不变(恒虚警)时, 只有提高检测的门限电平, 导致发现概率大大降低。同时由于噪声的随机起伏特性, 造成波门摆动, 增大测量误差。信息型干扰主要是指欺骗干扰, 其主要作用是降低跟踪雷达的跟踪性能, 增大跟踪误差或使跟踪中断, 或产生假目标。基本原理是利用雷达的分辨力有限性, 制造假目标, 迷惑或欺骗雷达的自动跟踪系统, 当假目标具有类似于回波信号的特征, 并且对其中某一特征进行修改而雷达不能分辨时, 雷达会将假目标当作真目标, 当假目标数量足够大时, 雷达将不能正常工作。

因此需要根据装备类别和影响机理的不同, 对复杂电磁环境进行分类度量。本文主要研究电子干扰中功率型干扰信号环境的度量方法。

2 电子干扰信号环境度量方法及指标

度量电子干扰信号环境可以通过信号的时间、频率、功率、空间、调制和极化等参数来实现, 电子干扰信号对装备的影响机理需要同时满足时间上对准、频率上重合、功率上超过接收机工作门限等要求。因此, 对于电子干扰环境度量, 可以从干扰信号本身参数特征以及对装备影响机理相结合的方式, 建立评估指标。为简化问题处理, 在度量电磁环境时主要考虑到达装备天线口面处的电磁环境, 对于装备天线方向图特性、扫描方式以及电波传播等不作考虑。

2.1 度量指标

从上述分析可以看出, 对于功率型干扰而言, 其对装备影响效果可以从干扰信号的时间、空间和功率参数等 3 个方面进行表征, 信号极化和调制参数对于电磁环境复杂程度的贡献, 主要是影响接收信号功率的大小, 可以采用系数加权的方式将其归结为对装备接收干扰信号功率的影响。为此, 提出干扰信号的度量指标包括: 频谱占用度^[2]、时间占有度^[2]、调制匹配系数、极化匹配系数和相对功率强度。

1) 频谱占用度: 在一定时间范围内, 干扰信号功率超过装备工作电磁环境门限所占有的频带与装备用频范围的比值, 用式(1)计算:

$$FO = \frac{1}{(f_2 - f_1)} \int_{f_1}^{f_2} U \left\{ \frac{1}{(t_2 - t_1)} \left[\int_{t_1}^{t_2} S(t, f) dt \right] - P_{\min} \right\} df \quad (1)$$

式中: FO 为频谱占用度; U 为单位阶跃函数; $S(t, f)$ 为功率密度(W/m^2); $P_{\min}$ 为装备工作门限(W)。离散情况下, 采用分段积分求和得到。

2) 时间占有度: 在一定空间和频率范围内, 干扰信号功率超过装备工作门限所占用的时间长度与装备工作时间段的比值, 用式(2)计算:

$$TO = \frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} U \left\{ \frac{1}{(f_2 - f_1)} \left[\int_{f_1}^{f_2} S(t, f) df \right] - P_{\min} \right\} dt \quad (2)$$

式中 TO 为时间占有度, 离散情况下, 采用分段积分求和得到。

3) 调制匹配系数: 对于干扰信号而言, 信号调制方式主要影响接收到干扰信号的功率, 可以用调制匹配系数 C_M 表示干扰信号与有用信号在调制方式上的匹配度, 对于某一类型调制信号而言, 其取值为[0,1]间的一个数值。

4) 极化匹配系数: 对于干扰信号而言, 信号极化方式主要影响接收到干扰信号的功率的大小, 可以用极化系数 C_p 表示干扰信号与有用信号在极化方式上的匹配度。典型情况下, 极化系数的具体取值如表 1 所示。

表 1 极化系数取值表
Table1 Values of polarization coefficients

polarization type of transmitted signal	polarization type of received signal	polarization coefficient C_p
vertical polarization	vertical polarization	1
vertical polarization	inclined polarization(45° or 135°)	1/2
vertical polarization	horizontal polarization	0
vertical polarization	circular polarization	1/2
horizontal polarization	horizontal polarization	1
horizontal polarization	inclined polarization(45° or 135°)	1/2
horizontal polarization	circular polarization (right-handed or left-handed)	1/2
circular polarization (right-handed to left-handed)	circular polarization (right-handed to left-handed)	1
circular polarization (right-handed to left-handed)	circular polarization (left-handed to right-handed)	0
circular polarization (right-handed or left-handed)	inclined polarization(45° or 135°)	1/2

5) 相对功率强度: 为了表征到达装备天线口面处干扰信号强度对装备的影响程度, 以干扰信号功率 P_{ij} 和装备接收到的期望信号功率 P_{rs} 的比值与装备正常工作所需干信比的相对大小作为度量指标, 它主要表征干扰信号功率强度对电磁环境的贡献程度。

设干扰信号功率为 P_j , 则接收到干扰信号功率可表示为:

$$P_{ij} = C_M \times C_p \times P_j \quad (3)$$

由此, 相对功率强度可用式(4)表示:

$$EP = \begin{cases} 1, & 10 \lg(P_{ij}/P_{rs}) \gg 2K_j \\ 2 \left(\frac{10 \lg(P_{ij}/P_{rs})}{K_j} - 0.5 \right), & 0.5K_j < 10 \lg(P_{ij}/P_{rs}) < 2K_j \\ 0, & 10 \lg(P_{ij}/P_{rs}) < 0.5K_j \end{cases} \quad (4)$$

式中: P_{ij} 为装备接收到的干扰信号功率; P_{rs} 为期望信号功率; K_j 为装备正常工作所需干信比界限。

2.2 度量方法

依据上述选取的电子干扰环境度量指标, 采用非线性加权方法进行度量, 其度量方法可用式(5)表示:

$$S = \sqrt[3]{FO \times TO \times EP} \quad (5)$$

根据电磁环境度量结果, 可结合表 2 中给出的评定标准, 确定电磁环境的复杂度等级^[2]。

表 2 电磁环境复杂度分级标准

grading standard	evaluation on complexity
grade 1(uncomplicated electromagnetic environment)	$0 \leq \sqrt[3]{FO \times TO \times EP} \leq 10\%$
grade 2(mild electromagnetic environment)	$10\% < \sqrt[3]{FO \times TO \times EP} \leq 40\%$
grade 3(moderate electromagnetic environment)	$40\% < \sqrt[3]{FO \times TO \times EP} \leq 70\%$
grade 4(severe electromagnetic environment)	$70\% < \sqrt[3]{FO \times TO \times EP} \leq 100\%$

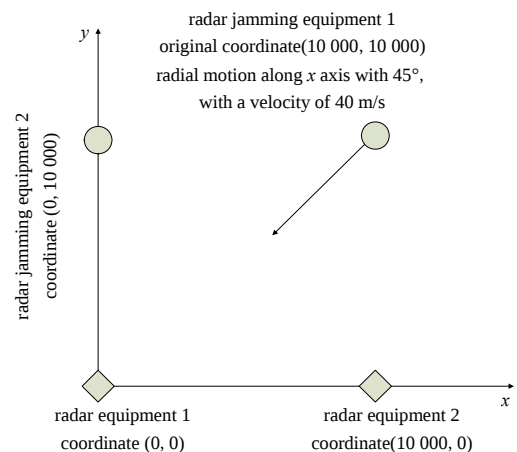


Fig.1 Situation of radiations

图 1 辐射源配置情况图

3 仿真分析

假定有 2 部雷达考虑部署于地面,在作战中主要面临 1 部地面雷达干扰装备和 1 部机载雷达干扰装备形成的电子干扰环境。为简化处理,假定各装备均在同一平面内,所有用频装备均以雷达装备 1 为参考点确定各自的空间位置,雷达干扰装备载机处于匀速直线飞行状态,方向为沿 x 轴 45° ,速度为 40 m/s ,其他装备位置不变,目标回波采用斯威林-2 模型,其均值为 10^{-7} ,各干扰信号相对于雷达信号的调制系数和极化系数分别为 1,仿真时间为 300 s ,如图 1 所示。各雷达装备和雷达干扰装备的工作时间、频率和功率参数如表 3、表 4 所示。

表 3 雷达装备工作参数

Table3 Operation parameters of radar equipment

status of radar equipment	operation period of time/s	frequency range/GHz	echo power/W	operation threshold/W	blanket factor/dB
equipment 1	status 1	08:00:00-08:02:59	3.0-3.2	0.1×10^{-11}	10
	status 2	08:03:00-08:05:00	3.3-3.5	0.1×10^{-11}	10
equipment 2	status 1	08:00:00-08:02:59	4.1-4.3	0.1×10^{-10}	40
	status 2	08:03:00-08:05:00	4.4-4.6	0.1×10^{-10}	40

表 4 雷达干扰装备工作参数

Table4 Operation parameters of radar jamming equipment

status of radar jamming equipment	operation period of time /s	frequency range /GHz	transmitted power/kW	radio wave propagation
jamming equipment 1	08:00:00-08:05:00	3.1-4.5	10	range of visibility
jamming equipment 2	08:02:00-08:05:00	3-5	20	range of visibility

3.1 计算频谱占用度和时间占有度

计算干扰装备 1 在工作状态 1 对雷达装备 1 产生的干扰功率:

$$\bar{S}_{11} = \frac{P}{4\pi R^2} = \frac{10^4}{4\pi \left[(\sqrt{2} \times 10\,000 - 40t) \right]^2}, t = 0, 1, \dots, 300 \quad (6)$$

依据式(1)、式(2)分别计算雷达装备 1 在工作状态 1 的频谱占用度:

$$FO_{11} = \frac{1}{(f_{11U} - f_{11D})} \int_{f_{11D}}^{f_{11U}} U \left[S_{11}(t, f) - P_{\min} \right] df = \frac{U \left[\frac{10 \times 10^3}{4\pi \times \left[(\sqrt{2} \times 10\,000 - 40t) \right]^2} - 0.1 \times 10^{-13} \right] (3.2 - 3.1) \times 10^9}{(3.2 - 3) \times 10^9} = 0.5 \quad (7)$$

式中 $t = 0, 1, \dots, 120$ 。

$$TO_{11} = \frac{1}{(t_{11E} - t_{11S})} \int_{t_{11S}}^{t_{11E}} U \left[S_{11}(t, f) - P_{\min} \right] dt = \frac{U \left[\frac{10 \times 10^3}{4\pi \times \left[(\sqrt{2} \times 10\,000 - 40t) \right]^2} - 0.1 \times 10^{-13} \right] (2 - 0) \times 60}{(2 - 0) \times 60} = 1.0 \quad (8)$$

式中 $t = 0, 1, \dots, 120$ 。

同理,可以得到雷达装备 1 在工作状态 2 的频谱占用度为 1,时间占有度为 1。

将雷达装备 1 工作状态 1 和工作状态 2 面临的电磁环境的频谱占用度代入下式,计算雷达装备 1 在整个过程中面临的电磁环境频谱占用度:

$$FO_1 = \frac{\sum_{i=1}^2 [(f_{1iU} - f_{1iD}) FO_{1i}]}{\sum_{i=1}^2 (f_{1iU} - f_{1iD})} = \frac{(0.5 \times 0.2 + 1 \times 0.2) \times 10^9}{(0.2 + 0.2) \times 10^9} = 0.75 \quad (9)$$

将雷达装备 1 工作状态 1 和工作状态 2 面临的电磁环境的时间占有度代入式(10),计算雷达装备 1 在整个过程中面临电磁环境的时间占有度:

$$TO_1 = \frac{\sum_{i=1}^2 [(t_{1iE} - t_{1iS}) TO_{1i}]}{\sum_{i=1}^2 (t_{1iE} - t_{1iS})} = \frac{(1 \times 2 + 1 \times 2) \times 60}{(2 + 2) \times 60} = 1 \quad (10)$$

同样，可计算得到雷达装备 2 在整个工作期间的频谱占用度 1，时间占用度为 1。

3.2 计算功率强度

设雷达截面积的概率密度函数 $p(\sigma) = \frac{1}{\sigma} \exp(-\frac{\sigma}{\sigma})$ ， $\sigma = 10^{-7}$ ，仿真过程中 2 部雷达在不同时刻的回波信号功率随机产生，可以得到 2 部雷达装备面临干信比如图 2 所示。

从图 2 可看出，在仿真过程中雷达的干信比随时间动态变化，雷达装备 2 由于频谱占用度较雷达装备 1 高，其面临的干信比大于雷达装备 1，即面临的电磁环境更为恶劣。利用式(4)计算得到整个过程中电磁环境功率强度如图 3 所示。

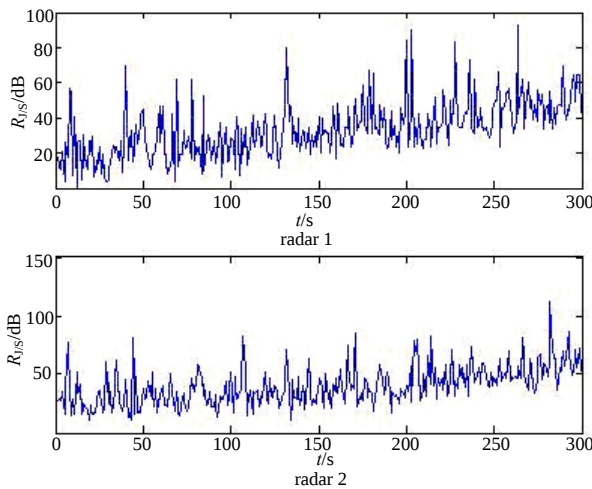


Fig.2 Jamming to Signal Ratio of each radar
图 2 雷达干信比情况图

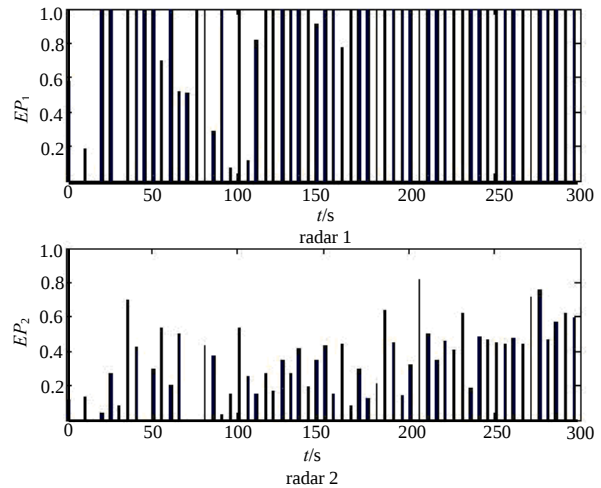


Fig.3 Power intensity of each radar
图 3 雷达功率强度图

对于各时间点功率强度复杂度数值求数学平均，得到雷达 1 面临的功率复杂度为 $EP_1 = 0.90$ ，雷达 2 面临的功率复杂度为 $EP_2 = 0.33$ 。

从图 3 中可看出，由于雷达 2 的干信比界限大于雷达 1，因此虽然其面临的干扰信号强度大，但其功率强度要小于雷达 1，说明由于该雷达的复杂电磁环境适应能力较强，电磁环境对该雷达的影响程度要小于雷达 1。

利用式(5)计算得到雷达 1 面临的电磁环境复杂度 $S_1 = 0.875$ ，即面临重度电磁环境；雷达 2 面临的电磁环境复杂度 $S_2 = 0.69$ ，即面临中度电磁环境。

4 结论

电子干扰信号是复杂电磁环境的重要构成要素，干扰信号功率大小直接决定了对于装备的影响程度。本文结合雷达压制干扰信号环境的构成要素及其对装备影响特点，提出了一种基于干信比的干扰信号环境度量方法，建立了度量指标体系，提出了评估模型。该方法有效避免了现有电磁环境度量仅从考虑战场宏观层面，未考虑不同装备技术特点和个体复杂电磁环境适应性能差异而导致的对于同一电磁环境“感受”不同的问题，有效实现了主观客观评估相统一和对电子信号环境的分类量化和定性分级。仿真试验结果表明，该方法充分反映了电磁环境的动态变化、影响相对的特点，与实际情况具有较好的一致性。

参考文献：

- [1] 军语编写组. 中国人民解放军军语[M]. 北京:军事科学出版社, 2011. (Compile group of military terms. Military Terms of PLA[M]. Beijing: Military Science Press, 2011.)

- [2] 尹成友. 战场电磁环境分类与复杂性评估[J]. 信息对抗学术, 2007,18(4):4-6. (YIN Chengyou. Classification and evaluation on complexity of battle electromagnetic environment[J]. Journal of Information Countermeasures, 2007,18(4):4-6.)
- [3] 孙智华,林春应. 战场电磁信号环境定量描述方法[J]. 舰船电子对抗, 2008,31(6):48-50. (SUN Zhihua,LIN Chunying. Quantitative description method of battlefield electromagnetic signal environment[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2008,31(6):48-50.)
- [4] 张斌,胡晓峰,胡润涛,等. 复杂电磁环境仿真不确定性空间构建[J]. 计算机仿真, 2009,26(2):11-13. (ZHANG Bin,HU Xiaofeng,HU Runtao,et al. Construction of the uncertainty in the complicated electromagnetic environment simulation[J]. Computer Simulation, 2009,26(2):11-13.)
- [5] 何祥,许斌,王国民,等. 基于模糊数学的电磁环境复杂程度评估[J]. 舰船电子工程, 2009,29(3):157-159. (HE Xiang,XU Bin,WANG Guomin,et al. Levels of complexity of electromagnetic environment based on fuzzy mathematics[J]. Ship Electronic Engineering, 2009,29(3):157-159.)
- [6] 罗小明. 基于突变理论的战场电磁环境复杂性评价方法研究[J]. 装备指挥技术学院学报, 2009,20(1):7-11. (LUO Xiaoming. Study of the complexity evaluation method of battlefield electromagnetic environment based on catastrophe theory[J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2009,20(1):7-11.)
- [7] 李勇,李修和. 基于作战效能准则的战场电磁环境复杂程度度量方法[J]. 空军工程大学学报(军事科学版), 2007,7(3):53-55. (LI Yong,LI Xiuhe. Battle electromagnetic environment evaluation method based on operation effectiveness rule[J]. Journal of Engineering University of Air Force(Military Science), 2007,7(3):53-55.)
- [8] 董俊,蒲秀英,韩慧,等. 电磁环境分形特性分析与量化[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,12(3): 428-432. (DONG Jun,PU Xiuying,HAN Hui,et al. Fractal characteristics and quantification method of electromagnetic environment[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,12(3):428-432.)

作者简介:



陶 欢(1980-),男,合肥市人,博士,主要从事复杂电磁环境建设工作,获得省部级科技进步奖 5 项,发表论文 20 余篇,email:e_end@sina.com.

周小平(1963-),男,黑龙江省克东县人,学士,高级工程师,主要研究方向为电子防御.

孙永全(1967-),男,河北省承德市人,学士,高级工程师,主要研究方向为复杂电磁环境建设.

任 彦(1978-),女,长春市人,博士,主要研究方向为复杂电磁环境构建技术.