

基于博弈值的战场电磁环境复杂度评估方法

唐书娟¹, 彭芳¹, 吴岚¹, 李德芳²

(1. 空军工程大学航空航天工程学院, 西安 710038; 2. 空军预警学院, 武汉 430019)

摘要: 为使指挥员准确认识战场电磁环境和进行正确的指挥决策, 对战场电磁环境的复杂度评估问题进行了深入研究。总结了复杂度评估的基本方法, 从作战使用的角度出发, 提出了基于博弈值的评估方法, 建立了评估模型, 并给出了模型的最优混合策略解, 分析了方法的可行性。通过对典型场景的评估计算证明, 该方法适用于对抗双方有多种作战行动方式可供选择的情况下评估电磁环境的复杂程度, 并可以得出最优作战行动概率, 从而有效提高战场决策水平和作战训练水平。

关键词: 电磁环境; 复杂度评估; 博弈值

中图分类号: V271.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2013)12-0014-04

Complexity Evaluation of Battlefield Electromagnetic Environment Based on Value of Game

TANG Shujuan¹, PENG Fang¹, WU Lan¹, LI Defang²

(1. Engineering College of Aeronautics and Astronautics, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2. Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

Abstract: To make the commander recognize the complicated electromagnetic environment and make correct decision, the complexity evaluation of battlefield electromagnetic environment was studied. The common complexity evaluation methods was summarized at first. Then, an evaluation method based on value of a Game was proposed from the perspective of operational application. A model of evaluation was constructed and the solution under the optimal mixed strategy was given. The calculation of the scenario showed that, this method can evaluate the degree of complexity while the both sides have multiple optional operation modes and make the optimized combat operation selection, thus can improve the decision-making and training effect.

Key words: electromagnetic environment; complexity evaluation; value of game

0 引言

当前军队信息化建设进程日益加快, 以电子信息系统为核心的信息化武器装备大量投入使用, 战场电磁环境日益复杂。电磁空间已成为夺取现代战争主动权的关键, 围绕电磁空间的斗争空前加剧, 并对军事活动产生着深刻的影响。战场电磁环境的构成要素众多, 在空、时、频、能4个域中体现出不同的特征, 同时武器装备使用和作战行动运用也都受到战场电磁环境的影响^[1]。为了便于分析战场复杂电磁环境这一信息

化战场的重要要素, 准确认识战场电磁环境, 利于指挥员基于战场电磁环境实际情况做出正确的决策, 需要对战场电磁环境进行复杂度的评估, 这既是深化复杂电磁环境研究的需要, 也是组织复杂电磁环境下军事训练的需要。

1 战场电磁环境复杂度评估的基本方法

战场复杂电磁环境的定义是指在一定空域、时域、频域、能域上, 多种电磁信号同时存在, 对武器装备运用和作战行动产生一定影响的电磁环境。目前常用的复杂度评估方法分为两类: 基于四域分析的一般复杂度评估和基于效能下降分析的特殊复杂度评估^[2]。

1.1 一般复杂度评估法

该方法从电磁信号在空间、时间、频谱、强度上的表现入手, 用空域、时域、频域和能域的四域特征来全

收稿日期: 2012-11-27 修回日期: 2013-01-04

基金项目: 航空科学基金(20080196005); 国家自然科学基金(60874040)

作者简介: 唐书娟(1983—), 女, 内蒙古赤峰人, 博士生, 讲师, 研究方向为战场电磁环境仿真、武器系统作战效能评估。

面、完整地加以描述^[3]。评估的基本步骤是,首先确定一个具体的战场空间,利用功率计、频谱仪等战场侦测设备测得必要参数,计算该空间内各种电磁信号的时变功率谱密度,根据装备灵敏度选取合适的电磁环境门限值,根据作战总的用频范围、总的作战时段等计算频谱占用度、时间占有度和空间覆盖率,由表1确定战场电磁环境复杂度等级。其中, F_0 表示频谱占用度, T_0 表示时间占有度, S_0 表示空间覆盖率。

表1 电磁环境一般复杂度评估表

Table 1 Complexity evaluation of common electromagnetic environment

复杂度划分	复杂度评估标准
1级(微度复杂电磁环境)	$F_0 \times T_0 \times S_0 < 5\%$
2级(轻度复杂电磁环境)	$5\% < F_0 \times T_0 \times S_0 < 20\%$
3级(中度复杂电磁环境)	$20\% < F_0 \times T_0 \times S_0 < 35\%$
4级(重度复杂电磁环境)	$F_0 \times T_0 \times S_0 > 35\%$

从四域的角度对复杂度进行评估的方法,优点是指标明确,考虑全面。但不同武器装备的电磁环境门限值与装备本身的抗干扰性能有关,比如具有低截获概率特性的新型雷达设备,其抗干扰性能比传统的设备强,所对应的电磁环境门限就高一些^[4]。由于电磁环境门限阈值选取的不确定性,使得这种方法电磁环境门限的选取会对评估结果影响较大,在实际运用时存在一定争议。另一方面,该方法只能从电磁能量角度评估电磁环境整体的复杂情况,作为一种客观的评估方法,不能反映战场电磁环境的主观因素影响。

1.2 特殊复杂度评估法

特殊复杂度评估法是针对一般复杂度评估法的缺点提出的,强调战场的主观因素影响的评估方法^[5]。所谓特殊复杂性,是指特定的个体和群体(一般指在某地域、某时间段的设备或系统)所感受的电磁环境的影响程度。一般来说,所受影响越大,电磁环境越复杂。

1) 从个体工作性能角度的评估。

根据个(群)体工作性能下降的程度,可以评判电磁环境的复杂度。特殊复杂度的判断根据训练需要的不同,往往采取不同的方法。例如,对于特定电子设备,其评估指标可以用装备性能下降程度 E_i 表示。

$$E_i = \sum_{i=1}^m w_i \times e_i = C \in [0,1] \quad (1)$$

式中: e_i 的值为特定装备某一个性能指标的下降程度,可由战场侦测装备测量得出; w_i 为各技战术指标值对应的权重, w_i 的获取可以采用灰色模型、黑板模型、证据理论等专家打分法将其量化^[6-7]。 E_i 值越大,说明装备面临的电磁环境越复杂。如表2所示,根据 E_i 的取值评估电磁环境的复杂程度。

表2 电磁环境特殊复杂度评估表

Table 2 Complexity evaluation of special electromagnetic environment

复杂度划分	复杂度评估标准
1级(微度复杂电磁环境)	$E_i \leq 10\%$
2级(轻度复杂电磁环境)	$10\% < E_i \leq 40\%$
3级(中度复杂电磁环境)	$40\% < E_i \leq 80\%$
4级(重度复杂电磁环境)	$80\% < E_i$

这种方法突出了战场环境的主观因素影响,优点是指标层次清楚,计算较为简单,缺点是 E_i 的判断含有定性描述,实际操作中受主观因素影响较大。

2) 从整体作战效能角度的评估。

整体作战效能是指武器装备体系在特定的条件下完成特定任务的程度。从整体作战效能受影响程度对复杂电磁环境进行评估,可以全面地评判电磁环境整体的复杂情况,又突出了战场主观因素影响。对整体战场电磁环境特殊复杂度的评估可以在特定个体评估方法的基础上,采用多层分级思想^[8]。

整体战场可以从上到下分为综合级、系统级、功能级、装备级。每一个上级由多个相互联系又各自独立的下一级组成,上一级的效能下降程度可以由下一级的效能下降程度计算得到。综合级,即整体作战效能的下降程度 $E(S)$ 由式(2)计算,其中系统级的性能下降 $E(r_j)$ 由式(1)计算得来。

$$E(S) = \sum_{j=1}^n v_j \times E(r_j) \in [0,1] \quad (2)$$

式中, v_j 为各分系统对整体作战效能的影响程度,值越大,说明装备面临的电磁环境越复杂。可以根据 $E(S)$ 的值评估电磁环境的复杂程度。

以上是战场电磁环境复杂度评估方法的分类及其典型评估方法,这些方法能够从电磁环境的一般复杂程度和战场电磁环境下对武器装备个体、整体作战效能影响程度评估电磁环境的复杂度。但是,这些方法没有关注电磁环境对于作战行动的影响程度。事实上,由战场复杂电磁环境的定义,也可以从作战行动的角度评估电磁环境的复杂程度^[9]。作为特殊复杂度评估的一种,这种评估方法更有利于战场指挥人员对于作战行动的指挥决策。

文献[10]提出应用矩阵博弈的思想,利用博弈值的大小来衡量电磁环境的复杂度。该方法可以从作战行动的角度对电磁环境的复杂度进行评估,但只分析了纯策略情况,对于没有纯策略解的大多数情况没有讨论。本文引入博弈论混合策略的基本思想,提出一种利用矩阵博弈的值来评估电磁环境复杂度的方法。该方法可以在对抗双方有多种作战方式选择的情况下评估电磁环境的复杂度,并可以按照最优概率选择作

战行动,以使作战期望效果最大化;并考虑了作战行动的对抗性和战场环境的动态性,有助于指挥员更准确地认识复杂电磁环境,提高战场决策水平。

2 对作战行动影响的复杂度评估方法

2.1 矩阵博弈基础

博弈论是指决策主体在相互对抗中,对抗双方(或多方)相互依存的一系列策略和行动过程的集合。博弈论分析的基本要素包括局中人、策略、支付和均衡等^[1]。针对本文应用的博弈论模型,必要的要素包括以下内容。

1) 局中人:是指一个博弈中的决策主体,通过选择策略以最大化自己的支付。

2) 策略:局中人在给定信息集的情况下的行动规则,它规定局中人在什么时候选择什么行动。局中人在其策略空间里选取唯一正确的策略称为纯策略。

3) 支付:指在一个特定的策略组合下,局中人得到的确定效用水平,或者期望效用水平。

4) 混合策略:局中人按一定概率分布从策略集中随机选择各种纯策略而获得的综合策略。

5) 有限零和博弈:是指有有限个参加博弈的局中人,每个局中人都只有有限个策略可供选择。在任一局势下,两个局中人的支付之和总是为零。

6) 纳什均衡的存在性定理:任何有限博弈至少存在一个纳什平衡点,且满足极大极小值定理。即对于二维博弈,若平衡点记为 (x^*, y^*) ,则满足 $f(x, y^*) \leq f(x^*, y^*) \leq f(x^*, y)$,当且仅当 $\min_y \max_x f(x, y) = \max_x \min_y f(x, y)$ 时成立。其中, f 是支付函数, $f(x^*, y^*)$ 称为博弈值,代表了在平衡点处局中人的期望效用水平。

2.2 数学模型及求解

敌我双方对抗,只能有一个取得胜利,而且其策略是有限的,属于二维有限零和博弈问题。根据矩阵博弈的定义,设有两个局中人(甲和乙),每个局中人的策略集都是有限的,分别记为 $S_1 = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m\}$, $S_2 = \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n\}$,两个局中人的支付函数分别记为 F_1, F_2 ,具有性质 $F_1 + F_2 = 0$ 。当局中人甲选定纯策略 α_i 和局中人乙选定纯策略 β_j ,就形成了一个纯局势 (α_i, β_j) 。记博弈的局势集合为: $S_1 \times S_2 = \{(\alpha_i, \beta_j) | i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n\}$,包含 $m \times n$ 个局势。

给定一个 $m \times n$ 阶矩阵 A ,用行的数目代表局中人甲的策略个数,用列的数目代表局中人乙的策略个数,用 a_{ij} 代表局中人甲在局势 (α_i, β_j) 时的支付,就给定了一个矩阵对策,记为 $G = \{S_1, S_2, A\}$,称为具有支付矩阵 A 的矩阵博弈。

设 $X_i \geq 0 (i = 1, 2, \dots, m)$ 是局中人甲选取纯策略 α_i 的概率,则称 $X = (X_1, X_2, \dots, X_m)$ 为局中人甲的混合策略。同理,设 $Y_j \geq 0 (j = 1, 2, \dots, n)$ 是局中人乙选取纯策略 β_j 的概率,则称 $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_n)$ 为局中人乙的混合策略。

局中人甲和乙的混合策略集合可以分别记为 $S_1^* = \{X = (X_1, X_2, \dots, X_m) | \sum_{i=1}^m X_i = 1, X_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, m\}$ 和 $S_2^* = \{Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_n) | \sum_{j=1}^n Y_j = 1, Y_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n\}$ 。

在局势 (X, Y) 下,局中人甲的支付函数为 $E(X, Y) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} x_i y_j$,则矩阵对策 $G = \{S_1, S_2, A\}$ 的混合扩充为 $G^* = \{S_1^*, S_2^*, E(X, Y)\}$ 。

根据纳什均衡的存在性定理, $G^* = \{S_1^*, S_2^*, E(X, Y)\}$ 一定有解,记为 (x^*, y^*) ,其中 $x^* \in S_1^*; y^* \in S_2^*$ 。对于任何策略 $x \in S_1^*; y \in S_2^*$, (x^*, y^*) 满足

$$x^T A y^* \leq x^{*T} A y^* \leq x^{*T} A y \quad (3)$$

则 $e(x^*, y^*) = x^{*T} A y^*$ 为对策值,记为 V 。

对于矩阵博弈的求解,核心是满足式(3)的纳什均衡。可以转化成如下线性规划问题:找 $X_1, X_2, \dots, X_m; Y_1, Y_2, \dots, Y_n; V$;满足

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^m a_{ij} x_i \geq V, \sum_{i=1}^m x_i = 1, i = 1, 2, \dots, m \\ \sum_{j=1}^n a_{ij} y_j \leq V, \sum_{j=1}^n y_j = 1, j = 1, 2, \dots, n \\ x_i \geq 0, y_j \geq 0, i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (4)$$

记 $x'_i = x_i/V, y'_j = y_j/V$,不等式(4)可以转化为一对对偶规划问题

$$\min \sum_{i=1}^m x'_i \quad (5)$$

$$\text{s. t. } \sum_{i=1}^m x'_i \geq 1, i = 1, 2, \dots, m; x'_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, m$$

$$\max \sum_{j=1}^n y'_j \quad (6)$$

$$\text{s. t. } \sum_{j=1}^n y'_j \leq 1, j = 1, 2, \dots, n; y'_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n。$$

当线性规划式(5)和式(6)有最优解 $X^* = (x'_1, x'_2, \dots, x'_m), Y^* = (y'_1, y'_2, \dots, y'_n)$,且 $\sum_{i=1}^m x'_i = \sum_{j=1}^n y'_j = \frac{1}{V}$ 时, $X^* = V(x'_1, x'_2, \dots, x'_m), Y^* = V(y'_1, y'_2, \dots, y'_n)$ 是矩阵对策 $G^* = \{S_1^*, S_2^*, E(X, Y)\}$ 的解, V 是博弈的值。

2.3 电磁环境复杂度的评估方法

如前所述,博弈值 V 代表了在最优混合策略下,局中人的期望效用水平,该值越大,对于我方来说,作战行动有效期望越高,如果不考虑其他因素,则敌方为我方制造的电磁环境对作战行动的影响越小,即电磁环境越简单。因此,可以用博弈值 V 来对我方面临的电磁环境的复杂度进行评估,该值越大电磁环境越简单。

假设合理选取 V_1, V_2, V_3 作为分界值,且 $V_1 < V_2 < V_3$, 可以将电磁环境划分为 4 个等级:微度复杂、轻度复杂、中度复杂、重度复杂。若某次对抗计算出的博弈值为 V ,则该次作战或训练中电磁环境的复杂程度依照表 3 进行判断。

表 3 依据博弈值的电磁环境复杂度评估表
Table 3 Complexity evaluation of electromagnetic environment based on value of a game

复杂度划分	复杂度评估标准
1 级(微度复杂电磁环境)	$V \geq V_3$
2 级(轻度复杂电磁环境)	$V_2 \leq V < V_3$
3 级(中度复杂电磁环境)	$V_1 \leq V < V_2$
4 级(重度复杂电磁环境)	$V < V_1$

3 评估方法验证

3.1 评估场景

以某次复杂电磁环境下对抗训练为例进行说明。训练的目的在于检验与提高红方(通信部队)的通信能力。蓝方(通信对抗分队)的存在是为了使红方在复杂且逼真的电磁环境下得到锤炼,进而提高红方部队的作战能力。

训练中红方有 4 种通信方式:定频通信、扩频通信、跳频通信、跳时通信,记为 $s_1 = \{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4\}$;蓝方有 4 种干扰方式:欺骗式干扰、瞄准式干扰、扫频式干扰、拦阻式干扰,记为 $s_2 = \{\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4\}$ 。在蓝方选择不同干扰方式的情况下,红方通信成功率记为 p_{ij} ,若不考虑其他因素,蓝方干扰成功的概率记为 $c_{ij} = (1 - p_{ij})$ 。对于红方来说,使用不同的通信方式对应的作战效能也不同,设红方使用通信方式 α_i 对应的效能为 K_{α_i} ;对于蓝方来说,使用不同干扰方式 β_j 对应的作战效能记为 K_{β_j} ,在充分考虑红蓝双方作战构成以及不同策略对整体作战行动影响的基础上,可按式(7)的方式构造支付矩阵,其中, $K_{\alpha_i}, K_{\beta_j}$ 可以根据双方的作战构成情况通过战场侦查预先得知。

$$A = \left[p_{ij} \cdot \left| \frac{K_{\alpha_i}}{K_{\beta_j}} \right| \right], i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n \quad (7)$$

3.2 算例验证

假设在某次对抗训练中,蓝方采用某种干扰方式下,红方采取不同通信手段对应的成功率如表 4 所示。

表 4 某电磁环境下红方的成功率
Table 4 Success rate of red side under a certain electromagnetic environment

红方	蓝方			
	欺骗式干扰	瞄准式干扰	扫频式干扰	拦阻式干扰
定频通信	0.125	0.765	0.32	0.85
跳频通信	0.39	0.45	0.47	0.89
扩频通信	0.375	0.844	0.48	0.5
跳时通信	0.8	0.72	0.32	0.6

注:表中数据为虚构,实际应用中由训练或情报获得。

假设红方通信方式对应的效率 $K_{\alpha_i} = [1, 0.9, 0.8, 0.5]$;蓝方干扰方式对应的效率 $K_{\beta_j} = [0.5, 0.9, 0.8, 1]$ 。在表 4 所示情况下,按照式(7),局中人红方的支

付矩阵 $A = \begin{bmatrix} 0.25 & 0.85 & 0.40 & 0.85 \\ 0.70 & 0.45 & 0.53 & 0.80 \\ 0.60 & 0.75 & 0.48 & 0.40 \\ 0.80 & 0.40 & 0.20 & 0.30 \end{bmatrix}$,可以看出,矩

阵博弈无纯策略解,必须求解混合策略。设红方选用定频通信、扩频通信、跳频通信、跳时通信 4 种通信方式的概率是 X_1, X_2, X_3, X_4 ,则根据式(5)的线性规划可以解得: $X_1 = 0.15, X_2 = 0.45, X_3 = 0.3, X_4 = 0.1; V = 0.51$ 。其中, X_1, X_2, X_3, X_4 是红方的最优混合策略。它的含义是:当红方不知道蓝方采取何种干扰方式时,可以按照一定的概率分布选择合适的通信方式,其中使用扩频通信的概率最大,达到 0.45;使用跳时通信的概率最小,为 0.1。决策值 V 表明电磁环境的复杂度。

3.3 结果分析

1) 假设表 3 中, V_1, V_2, V_3 的取值依次为 0.3、0.5、0.8,则上例中的结果 $V = 0.51$,说明此次红方面对的电磁环境复杂度为 2 级,是轻度复杂电磁环境。

2) 在实际运用中,上面提到的分界值应当依据大量训练数据进行合理选取,同时,分界点的选取决定了复杂程度划分的细致程度。

3) 算例中, $c_{ij} = (1 - p_{ij})$ 是在只考虑蓝方构建的电磁环境对红方影响的基础上成立的。在实际作战过程中,红方通信成功,蓝方干扰一定失败,但蓝方干扰失败,红方通信不一定成功,还受到其他因素影响,因此, $c_{ij} \leq (1 - p_{ij})$ 。可以考虑利用此种性质衡量其他因素对作战行动的影响情况。

4) 支付矩阵的构造是依据作战实践进行的,式(7)只给出一种方法作为示例。

4 结束语

复杂电磁环境是信息化战场的基本特征,是信息化条件下军事训练不可或缺的基本要素。对其进行深入研究有助于促进军事训练内容、手段和方法的创新发展,加速信息化条件下军事训练体系的构建和完善。本文提出的利用博弈值来判断战场电磁环境复杂度的方法,有助于深化部队对复杂电磁环境的认识,进一步提高在复杂电磁环境下的训练质量与训练效益,提高打赢能力。

参考文献

[1] 王汝群. 战场电磁环境[M]. 北京:解放军出版社, 2006.

(下转第 50 页)

由图可知,分离波形各自的自相关性较好,而彼此的互相关性很差,与原始正交波形的相关特性非常相似,则对相关性的分析能够判断侦察到的是 MIMO 雷达系统中的多路正交发射信号,从而识别出对方为多发多收的 MIMO 雷达体制。

5 结论

目前,对 MIMO 雷达的信号侦察与分选方法研究较少。针对这一问题,本文建立一种新的 MIMO 雷达信号侦察模型,使其能够满足盲源分离算法的约束条件,从而达到信号分选的目的。仿真实验结果表明,当不存在幅度起伏且信噪比为 6 dB 时,本文方法对 4 种典型 MIMO 雷达信号正交波形的分离度均低于 -10 dB,同时对分离后波形的相关性分析结果也验证了 MIMO 雷达的存在。

参考文献

[1] 张锡祥. 对 MIMO 雷达的干扰构想[J]. 现代雷达, 2010,32(4):1-4.
 [2] 梁百川. 对 MIMO 雷达的电子侦察技术[J]. 舰船电子

对抗,2008,31(5):17-20.
 [3] 盛志超. 一种对 MIMO 雷达侦察识别的新方法[J]. 舰船电子对抗,2011,34(6):4-7.
 [4] 吴庆天. MIMO 雷达的性能分析与侦察识别[D]. 西安:西安电子科技大学,2009.
 [5] TANG Xiaowei, TANG Jun. A new electronic reconnaissance technology for MIMO radar [C]//IEEE CIE International Conference on Radar, Chengdu, China, Oct. 24-27, 2011:79-83.
 [6] COMON P. Independent component analysis, a new concept [J]. Signal Processing, 1994, 36(3):287-314.
 [7] FISHLER E, GROSMANN M. Detection of signals by information theoretic criteria; General asymptotic performance analysis[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2002, 50(5):1027-1036.
 [8] NOVEY M, ADALI T. ICA by maximization of nongaussianity using complex functions [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2008, 19(4):596-609.
 [9] 刘波. MIMO 雷达正交波形设计及信号处理研究[D]. 成都:电子科技大学,2009.

(上接第 17 页)

[2] 陈行勇,张殿宗,钱祖平,等. 战场电磁环境复杂性定量分析研究综述[J]. 电子信息对抗技术,2010,25(4):44-50.
 [3] 陈利虎,张尔扬. 一种新的定量评估电磁环境复杂度方法[J]. 电子对抗,2009(2):6-8.
 [4] 金朝,丁竑,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.
 [5] 邵国培,刘雅奇,何俊,等. 战场电磁环境的定量描述与模拟构建及复杂性评估[J]. 军事运筹与系统工程, 2007,21(4):17-20.
 [6] 代合鹏,苏东林. 电磁环境复杂度定量分析方法[J].

微波学报,2009,25(3):25-27.
 [7] 连世伟,李修和,沈阳. 基于灰色关联度的战场电磁环境复杂度模型[J]. 电子信息对抗技术,2011,26(12):62-67.
 [8] 邹阳森,刘东,杨建文,等. 复杂电磁环境系统的效能评估[J]. 兵工自动化,2009,28(11):86-88.
 [9] 章季阳,王伦文. 一种改进的电磁环境复杂度定量评估方法[J]. 微波学报,2011,27(6):37-46.
 [10] 王国民,刘万洪,蔡啸,等. 复杂电磁环境及其判断方法探析[J]. 通信对抗,2008(1):46-49.
 [11] 张最良. 军事运筹学[M]. 北京:军事科学出版社, 1993.

