

无线通信系统综合抗干扰效能评估

陈亚丁, 李少谦, 程郁凡

(电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室 成都 610054)

【摘要】无线通信系统综合抗干扰效能评估是现代通信对抗过程中的重要环节。该文对无线通信对抗双方的博弈机理进行了研究, 基于层次分析法, 构造了敌对电磁环境下的无线通信系统指标评价体系, 提出了一种针对无线通信系统综合抗干扰能力的效能评估模型。通过对多个无线通信要素的归一化处理, 利用该模型可对各种对抗环境和研制阶段下的无线通信系统进行综合抗干扰能力评比。进一步的仿真表明, 利用该评估模型, 结合干扰识别技术, 还可有效提高无线通信系统的综合抗干扰能力。

关键词 层次分析法; 通信对抗; 效能评估; 多目标

中图分类号 TN97

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2010.02.009

Effectiveness Evaluation of Integrated Anti-Jamming for Wireless Communication System

CHEN Ya-ding, LI Shao-qian, and CHENG Yu-fan

(National Key Laboratory of Science and Technology on Communication, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

Abstract The relationship between the game players in wireless communication countermeasures is studied in this paper. Based on analysis of hierarchy process (AHP), a set of indicators for wireless communication system evaluation in adverse electromagnetism environment are constructed. Furthermore, an evaluating model for appraising the anti-jamming effectiveness of wireless communication system is provided. Through normalization processing, the basic elements of wireless communication, the anti-jamming ability of wireless communication system in various countermeasures conditions could be appraised by using this model. Simulation shows the validity of improving the integrated anti-jamming capability of the system through combining the evaluation model and jamming detection method.

Key words analysis of hierarchy process; communication countermeasures; effectiveness evaluation; multi-objective

随着科技水平的不断提高, 通信对抗作为电子战的重要组成部分, 在现代战争中的作用和地位已为人们所共识。在通信对抗双方相互对立、相互促进的发展演变过程中, 对各种通信对抗设备的研制和开发, 已成为世界各国军事领域中的重要研究课题^[1-2]。通信对抗的实质, 主要体现在敌对双方在对信息传输通道的保障与破坏。因此, 通信对抗表现为敌对双方在信息传输行为上的一种干扰与抗干扰的博弈过程。

在对无线通信的干扰与抗干扰博弈过程中, 博弈双方均需付出代价, 这是必要条件, 但不是充分

条件。因此, 通信对抗双方为了高效地达到各自的目的, 不可避免地引发他们对通信/干扰系统因采用某些技术所付代价进行效能评估^[3-5]。然而由于军事通信的特殊性和复杂性, 对关于无线通信系统综合抗干扰效能进行客观、公正、科学的评估模型至今少见分析。

从实际需求出发, 本文分析了无线通信对抗双方的博弈机制, 构造了敌对电磁环境下无线通信系统指标评价体系, 建立了无线通信系统综合抗干扰效能评估模型。利用该模型, 结合干扰识别技术, 可根据不同干扰模式选取最佳通信方式, 从而提高

收稿日期: 2008-09-04; 修回日期: 2009-11-09

基金项目: 国家自然科学基金(60502010); 国家基础科研项目(A1420080150); 国家重点实验室基金(9140C0204010703)

作者简介: 陈亚丁(1969-), 男, 博士生, 主要从事通信抗干扰技术方面的研究。

系统整体的综合抗干扰能力。

1 对抗博弈

博弈论中的一个重要法则是参与者在博弈过程中选取对自己有利的优势策略, 并认定其他参与者也都会选取自己的优势策略^[6]。在通信对抗双方的博弈过程中, 若无关于对方的技术参数先验知识, 敌对双方通常没有绝对有效的某种干扰模式和通信模式。由于干扰效果的好坏一般只有通信方知道, 所以, 从某种意义上说, 在多种干扰方式与多种通信方式的对抗选择中, 通信方有更多的方式选择优势。但通信方信息传输所要求的信噪比和信干比, 以及通信方与干扰方地理位置上的常规差异, 使得干扰方通常在无线传输环境中的干扰信号功率上占有优势。

1.1 功率分配

功率分配在信号传输与干扰过程中至关重要。排除通信对抗双方在所有信道的信号功率占有绝对优势的情况, 由于信号功率过大容易被侦别, 过小又达不到传输或干扰要求, 结合功率成本, 对抗双方信号一般采取等功率地对选取的传输或干扰信道进行分配, 而对余下的部分信道不分配^[7]。

1.2 信道分配

关于信道的分配问题应基于一个假设, 即通信对抗中任何一方不对所有信道具备绝对控制权。设系统信息传输速率为 R_b , 则对于总带宽为 W_{SS} 的公共传输频带, 通信方可获得 $PG=W_{SS}/R_b$ 倍的处理增益。需要注意的是, 处理增益 PG 不是通信抗干扰的绝对增益, 它描述的是系统为提高通信传输质量而设计的信道冗余程度, 以及隐含于假设中的 PG 倍通信信号总功率大于干扰信号总功率这一条件。若以 K 表示所有相互正交的信道总数, K_S 为通信信道总数, K_J 为干扰信道总数, 可以得到 N 个被干扰的通信信道概率为^[7]:

$$P(N) = \begin{cases} \frac{\binom{K_S}{N} \binom{K-K_S}{K_J-N}}{\binom{K}{K_J}} & N_{\min} \leq N \leq N_{\max} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

$$N_{\min} = \max(0, K_J + K_S - K) \quad (2)$$

$$N_{\max} = \min(K_J, K_S) \quad (3)$$

从干扰者的角度来看, 好的干扰效能是以较少的干扰信号功率造成对通信方的最大传输破坏。因此, 在通信对抗双方先验知识互盲前提下, 通信系

统的理想抗干扰效能应表现为等效地迫使干扰信号平稳分布在所有信道上^[7]。

2 评估模型

对无线通信系统的综合抗干扰能力进行评估涉及对系统多个指标的满足程度以及优选方案的综合值评价, 是多目标决策问题。基于多目标决策的应用很多, 其主要分析方法是根据需求建立某种指标体系和模型, 将多个非线性问题转化为单个线性问题来解决^[8-10]。由于效能评估是多层次、多视点的复杂工程, 根据不同应用和阶段, 应有所重点。本文采用层次分析法建立对无线通信系统综合抗干扰效能的评估模型。层次分析法建立过程分为4个步骤^[11-12]:

(1) 分析决定系统效能的各因素间关系, 建立FFH/MFSK系统的递阶层次结构;

(2) 对同一层次各元素关于上一层次中某准则的重要性进行比较, 构造两两比较矩阵;

(3) 由判断矩阵计算被比较元素对于该某准则的相对权重;

(4) 计算各层次元素对无线通信系统目标的合成权重, 并进行排序, 依次得到数学模型的系数。

2.1 模型建立

基于层次分析法, 对无线通信系统的综合抗干扰效能评估可分为总体效能 E 、单项效能 E_i 、技术指标3个层次, 其关系表示为:

$$E = \sum_{i=0}^m k_i E_i \quad (4)$$

$$E_i = \sum_{j=0}^n k_{ij} r_{ij} \quad (5)$$

式中 m 为单项个数; n 为因素个数; k 为权重; r_{ij} 为效能贡献值, 由置信区间内的样本统计特性确定。

根据上述层次划分, 在进行无线通信系统综合抗干扰效能评估过程中, 首先应建立符合评价需求的多级指标体系, 收集参与评价的目标对象的指标数据, 通过运用各种量化模型对指标数据进行量化, 结合专家系统对各级指标赋予的权重, 根据不同的评价方式, 对量化结果和权重数据运用模型矩阵进行数据耦合运算^[5], 得出各级目标评价分值以及各目标总的评价结果, 并以此为依据对目标对象进行效能评估。

2.2 指标体系的选取原则

对于无线通信系统而言, 若从操作复杂度、设备造价、物理尺寸、传输特性、可靠性等多个方面

考虑,所涉及的指标成百上千,虽然这些指标多少都会对系统通信传输性能产生一定影响,若对其均一考评,则会使得对系统的抗干扰效能评估成为一个极其复杂的过程。因此,对系统的综合抗干扰效能评估应按不同的发展阶段,根据各阶段研究重点,有针对性地选取评价指标。

任何无线通信系统都有其需求背景,在对系统进行抗干扰效能评估时,应同时考虑系统的应用需求背景。系统需求的物理参量、信道容量、信号功率、工作频带,最高误码率以及干扰模式等条件限制,可能会使某些指标要求成为对系统进行综合抗干扰效能评估的前提。因此,抗干扰效能评估结果的好坏,不应以系统某些指标的绝对优异来权衡,而应该以系统与实际需求的综合符合程度来考核。

2.3 无线通信系统指标评价体系

对无线通信系统综合抗干扰效能评估的指标体系构建,可以考虑从系统的实用性、抗干扰性和抗侦性3个单项效能构成。其中,实用性包括系统的操作灵活性、装备便利性以及系统设备可靠性等方面的考核。由于无法对一个假想敌的信号侦听能力进行妄自猜测,而假设敌方已知被测系统的工作频带、信号带宽和传输信号功率,并进行多种功率干扰是可以接受的。干扰模式可以采用几种典型的模式,如多音干扰、部分频带干扰、扫频干扰等。多种通信方式在相同干扰模式下进行抗干扰性能测试比较是客观公正的。抗侦性的评估主要是防止传输信号被敌方有针对性地干扰或截获,是衡量系统综合抗干扰效能的重要因素。单项效能的合理划分对系统特性的考评更具有针对性。由于系统实用性的评估主观因素较多,下面仅就无线通信系统抗干扰性和抗侦性的指标体系进行参考选取。

无线通信系统要进行可靠的通信通常必须经过初始同步、迟入网同步以及同步保持3个环节。其涉及抗干扰性能的指标可以初始同步/虚警概率、迟入网同步/虚警概率、同步保持时间、数传误码率、传输延迟、频带利用率为考核目标。涉及抗侦听能力的评估以初始/迟入网同步时间、初始/迟入网频率数、信号功率以及不携带信息时的信号自相关时间、信号变化随机性、信号变化周期、信号变化复杂度为考核目标。对系统抗侦效能的评估实际上是对敌方侦听能力的评估,主要根据最新研究成果、经验指标,结合系统技术参数及专家组意见给出。

2.4 评价指标预处理

在实际评价中,各评价指标数量级和量纲会存

在不同,而且属性也不一样,有的指标要求越小越好(成本型指标),有的指标要求越大越好(效益型指标),有的指标则要求稳定在某一确定理想值(固定指标)。为了消除各指标间的不可公度性,统一各指标的趋势要求,在进行评价前应对评价指标进行规范化处理^[13]。

构造对成本/效益指标和固定指标的去量纲处理如式(6)~式(8)所示^[13]:

$$r_{\text{效益}} = \begin{cases} 1 & r_{\max} \leq r_m \\ \frac{r_m - r_{\min}}{r_{\max} - r_{\min}} & r_{\min} < r_m < r_{\max} \\ 0 & r_m \leq r_{\min} \end{cases} \quad (6)$$

$$r_{\text{成本}} = \begin{cases} 1 & r_m \leq r_{\min} \\ \frac{r_{\max} - r_m}{r_{\max} - r_{\min}} & r_{\min} < r_m < r_{\max} \\ 0 & r_{\max} \leq r_m \end{cases} \quad (7)$$

$$r_{\text{固定}} = \begin{cases} a & r_{\min} \leq r_m \leq r_{\max} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

为增强评估系统的稳健性,对一些波动性较小的值可以进行模糊处理,即在某一区间内取一固定值:

$$\begin{bmatrix} 0 & x_1 \\ x_1 & x_2 \\ x_2 & x_2 \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} x_m & x_m \\ x_m & x_m \\ x_m & x_m \end{bmatrix} \quad (9)$$

$r_1=x_1 \quad r_2=x_2 \quad r_m=x_m$

此外,针对某些需求,对某些指标可能需要采取较复杂的非线性去量纲处理方式:

$$r = \left\| \frac{r_m}{r_{\max} - r_{\min}} \right\|^p \quad (10)$$

式中 r_{\max} 和 r_{\min} 分别为对系统的指标要求; r_m 为系统实际指标。

这种情况可以根据实际情况来设计进行。

3 仿真应用

针对某无线通信系统链路抗干扰通信能力进行综合评估。设系统工作带宽为100 MHz,在3种确定干扰模式下($E_b/N_0=13.35$ dB),要求信号干扰功率比大于-40 dB时保证正常通信,数据传输速率为4.8 kb/s~10 Mb/s,误码率不大于 10^{-2} ,数据最大延迟小于100 ms,同步概率大于90%,同步保持时间大于1 h,初同步时间小于300 ms。

根据系统基本要求及实际应用情况,构造基本评价指标体系。

效益型指标:同步概率 $P_s(r_{\max}=1, r_{\min}=90\%)$,频带利用率 $u(r_{\max}=0.2 \text{ bit/s}\cdot\text{Hz}, r_{\min}=10^{-5} \text{ bit/s}\cdot\text{Hz})$,同步保持时间 $T_k(r_{\max}=36\ 000 \text{ s}, r_{\min}=3\ 600 \text{ s})$ 。

成本型指标: 误码率 $P_e(r_{\max}=10^{-2}, r_{\min}=0)$, 传输延迟 $D_t(r_{\max}=100 \text{ ms}, r_{\min}=0)$, 初同步时间 $T_s(r_{\max}=300 \text{ ms}, r_{\min}=0)$ 。

评价条件: 信干比= $(-40 \text{ dB}, -30 \text{ dB}, -20 \text{ dB}, -10 \text{ dB})$, $E_b/N_0=13.35 \text{ dB}$ (N_0 代表附加高斯白噪声的单边功率谱密度), 干扰模式=(多音干扰, 部分频带干扰, 扫频干扰) T 。

设专家系统对系统 P_e 、 P_s 、 u 、 T_k 、 D_t 、 T_s 等指标的权重分配为 $k_i=(0.3, 0.3, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1)^T$, 其中, $i=3$, 表示3种干扰模式。系统采用跳频(FH)、直扩(DS)、变换域(TD)3种通信方式下的测试结果通过式(6)、式(7)预处理得到 $r_{i,j,l,m}$, 其中 j 表示4种不同干信比, l 表示6种不同被测指标, m 表示3种通信方式。设 $r_{i,l,j,m}=(r_{i,1,j,m}, r_{i,2,j,m}, \dots, r_{i,6,j,m})$, 通过式(5)得到各通信方式在3种干扰环境、4种信干比下的抗干扰性能评价矩阵:

$$E_m = \begin{pmatrix} r_{1,l,1,m}k_1 & r_{1,l,2,m}k_1 & r_{1,l,3,m}k_1 & r_{1,l,4,m}k_1 \\ r_{2,l,1,m}k_2 & r_{2,l,2,m}k_2 & r_{2,l,3,m}k_2 & r_{2,l,4,m}k_2 \\ r_{3,l,1,m}k_3 & r_{3,l,2,m}k_3 & r_{3,l,3,m}k_3 & r_{3,l,4,m}k_3 \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$E_{\text{FH}(m=1)} = \begin{pmatrix} 0.245 & 0.298 & 0.356 & 0.439 \\ 0.239 & 0.265 & 0.362 & 0.451 \\ 0.377 & 0.451 & 0.552 & 0.673 \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$E_{\text{DS}(m=2)} = \begin{pmatrix} 0.189 & 0.248 & 0.316 & 0.401 \\ 0.259 & 0.335 & 0.427 & 0.556 \\ 0.247 & 0.303 & 0.386 & 0.471 \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$E_{\text{TD}(m=3)} = \begin{pmatrix} 0.245 & 0.298 & 0.417 & 0.539 \\ 0.219 & 0.255 & 0.302 & 0.398 \\ 0.307 & 0.351 & 0.412 & 0.503 \end{pmatrix} \quad (14)$$

根据实际应用, 通过对不同信干比下传输性能的权重分配, 如 $k_{j,m}=(0.4, 0.3, 0.2, 0.1)^T$, 可以获得不同干扰环境下3种通信方式的抗干扰性能评价 E_C , 若进一步对3种干扰模式进行权重分配, 如 $K_J=(0.4, 0.3, 0.3)$, 则可以得到3种通信方式的综合抗干扰性能评价 E_S :

$$E_{i \times m} = (E_{\text{FH}}, E_{\text{DS}}, E_{\text{TD}})k_{j,m} = \begin{pmatrix} 0.302 \ 5 & 0.253 \ 3 & 0.324 \ 7 \\ 0.292 \ 6 & 0.345 \ 1 & 0.264 \ 3 \\ 0.463 \ 8 & 0.314 \ 0 & 0.360 \ 8 \end{pmatrix}$$

$$E_S = K_J E_C = (0.347 \ 9 \ 0.299 \ 1 \ 0.317 \ 4) \quad (15)$$

由式(15)可以得出在特定3种干扰环境中, 综合抗干扰能力最佳的是跳频通信方式, 其抗干扰效能评估值为0.347 9。

对于现代化无线通信系统, 由于制造工艺的发展和科技水平的提高, 使得一个系统设备通常同时具备多种模式的通信能力。利用干扰识别技术^[14], 针对不断变化的干扰模式和特征参数, 采用最优的通信方式则可以获得系统多种通信方式下的最大综合抗干扰能力:

$$E = K_J (\max(E_{1,m}), \max(E_{2,m}), \max(E_{3,m}))^T = K_J (0.324 \ 7, 0.345 \ 1, 0.463 \ 8)^T = 0.372 \ 5 \quad (16)$$

此时系统获得的效能评估值 $E=0.372 \ 5$, 大于上述任意一种通信方式综合效能评估值。

因此, 在恶劣故意干扰环境中, 利用系统综合抗干扰效能评估模型, 结合干扰识别技术, 可使系统根据不同干扰模式有针对性地选取通信方式, 进一步地提高系统的综合抗干扰能力, 从而提高系统的数据传输性能。

4 结束语

对无线通信系统进行科学合理的综合抗干扰效能评估是一项艰难复杂的工作。本文分析了通信对抗双方的博弈机理以及敌对电磁环境下的无线通信系统指标评价体系, 尝试性地建立了一种基于需求背景条件的无线通信系统综合抗干扰效能评估模型。进一步的科学评价方法和依据, 还需要在长期的研究实践中检验和完善。

参 考 文 献

- [1] 郭黎利, 孙志国. 通信对抗技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2007.
GUO Li-li, SUN Zhi-guo. Communication countermeasure technique[M]. Harbin: Publishing House of Harbin Engineering University, 2007.
- [2] 赵 明, 杨小牛, 邹少丞, 等. 电子战技术与应用——通信对抗篇[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
ZHAO Ming, YANG Xiao-niu, ZOU Shou-chen, et al. Electronics warfare technology and application—communication countermeasure book[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.
- [3] 李 源, 陈惠连. 基于相关系数的ISAR干扰效果评估方法[J]. 电子科技大学学报, 2006, 35(4): 468-470.
LI Yuan, CHEN Hui-lian. Evaluation method of jamming effect on ISAR based on correlation coefficient[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2006, 35(4): 468-470.
- [4] 徐明德, 黄振和, 汪俊良. 电子对抗装备体制多目标决策ELECTRE优选模型[J]. 舰船电子工程, 2005, 25(6): 11-13.
XU Ming-de, HUANG Zhen-he, WANG Jun-liang. An electre optimal model in multi-objectives decision making of electronic countermeasures equipment system[J]. Ship Electronic Engineering, 2005, 25(6): 11-13.

- [5] 汪泽焱, 王春霞, 张金辉. 一种基于理想区间数和熵的多指标评价法[J]. 工程数学学报, 2006, 23(1): 13-19.
WANG Zhe-yan, WANG Cun-xia, ZHANG Jin-hui. The multi-object weights evaluation method based on ideal interval number and entropy[J]. Chinese Journal of Engineering Mathematics, 2006, 23(1): 13-19.

(下转第208页)