

博弈论应用于干扰效果动态评估的研究

黄玉川¹, 饶妮妮¹, 刘永红², 刘斌¹

(1. 电子科技大学生命科学与技术学院 成都 610054; 2. 中国电子科技集团公司第29研究所 成都 610036)

【摘要】运用博弈论思想,研究了雷达对抗中干扰效果的动态评估问题。把干扰效果作为博弈盈利函数,从时间、空间、频率、能量四个方面对干扰效果进行了定量描述,给出了干扰效果的综合评估算法,从而建立了电子对抗博弈策略矩阵模型,提出了遮盖性干扰动态效果评估的计算方法。结合实例,运用这种方法对雷达干扰效果进行了评估与分析。结果表明,博弈论运用于干扰效果评估,适应了现代电子对抗的特点,可以有效、可靠地对遮盖性干扰效果进行动态评估。

关键词 效果评估; 干扰效果; 遮盖性干扰; 博弈论
中图分类号 TN97 文献标识码 A

Dynamic Evaluation for Radar Jamming Effects Using the Game Theory

HUANG Yu-chuan¹, RAO Ni-ni¹, LIU Yong-hong², LIU Bin¹

(1. School of Life Science and Technology, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054;
2. The No. 29 Institute of China Electronic Technology Group Corporation of China Chengdu 610036)

Abstract Based on the idea of the game theory, the problems on dynamic evaluation for radar jamming effects are studied. Through acting the jamming effects as payoff function, it quantificationally describes the jamming effects in the time, space, frequency, and energy. And the synthetical evaluation method is presented. Then the game tactical matrix model of Electronic Counter Measures (ECM) is established. The calculation methods of dynamic evaluation for radar mask jamming effects are proposed. Combining a practical example, the novel method is used to make effects evaluation for the radar mask jamming. The results show that the method is well suitable to modern ECM and therefore is available and credible for evaluating danamically radar mask jamming effects.

Key words effect evaluation; jamming effect; mask jamming; The Game Theory

在现代高技术战争中,雷达是信息获取和精确制导领域中最重要装备^[1]。雷达干扰作为阻止敌方雷达获取有用信息,理所当然地作为战争的主要手段。因此,电子对抗已成为战场中的主导因素之一,世界各国都在寻求干扰和反干扰的各种措施。干扰效果是衡量电子战效果的一项重要综合性能指标,定量地评估干扰效果对实战、试验乃至电子对抗设备的研制都十分重要。现有的干扰效果评估方法大多是针对一定的雷达体制采取一定的干扰方式进行评估^[2-4]。然而,战场环境瞬息万变,特别是随着科技的迅速发展,雷达的工作体制、干扰机的干扰方式都可以随时变化。但是雷达将如何变化,作为干扰方来说是未知的,同样干扰方将采取什么样的干扰方式,雷达亦无所知。现代电子对抗过程

的实质是一个博弈的过程。相应地,干扰效果的评估也是一个动态的过程,常用的静态评估方法将不再适用。本文将“博弈论”引入干扰效果的动态评估之中,以解决干扰效果动态评估的问题。

1 对抗博弈策略矩阵模型的建立

博弈论就是关于相互包含相互依存情况中的理性行为的研究^[5]。从信息角度它包含完全信息博弈和不完全信息博弈;从局中人行动的先后次序又可分为动态博弈和静态博弈。但无论什么样的博弈,总是存在以下三要素:(1)局中人。(2)每个局中人的纯策略空间。(3)每个局中人的盈利函数。

在雷达对抗中,雷达的目的就是发射信号检测目标,而干扰机的目的就是发射干扰信号阻止雷达

收稿日期:2005-09-20

基金项目:国防科重点实验室基金资助项目(W090403)

作者简介:黄玉川(1971-),男,硕士生,工程师,主要从事雷达干扰及效果评估方面的研究。

检测目标, 故对抗双方的雷达和干扰机就构成了博弈中的局中人, 记为 R 和 J ; 干扰机干扰雷达信号, 所采取的干扰方法就是其纯策略空间, 记为 $S_J=(J_1, J_2, \dots, J_n)$; 同时雷达对此采取相应的抗干扰措施就是雷达方的纯策略空间, 记为 $S_R=(R_1, R_2, \dots, R_m)$ 。干扰机干扰雷达的目的就是要达到好的干扰效果。同理, 雷达抗干扰的目的就是降低干扰效果。二者力求达到的目的相反, 它们可以用相同的度量标准, 只不过对度量标准的评价相反而已^[6]。故干扰效果就是双方的盈利函数, 只是干扰方要求干扰效果尽可能好, 而雷达方要求干扰效果尽可能差。若用 E_{ij} 表示当干扰机采用干扰措施 J_j , 雷达采用抗干扰措施 R_i 时的干扰效果, 则雷达对抗博弈策略矩阵为:

$$R \begin{matrix} & & & & J \\ & & & & J_1 & J_2 & \dots & J_n \\ R_1 & \left[\begin{array}{cccc} E_{11} & E_{12} & \dots & E_{1n} \\ E_{21} & E_{22} & \dots & E_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ E_{m1} & E_{m2} & \dots & E_{mn} \end{array} \right. \\ R_2 \\ \vdots \\ R_m \end{matrix}$$

根据博弈论的最小最大定理和最大最小定理来求解此矩阵, 所得结果即为该对抗的干扰效果。

2 盈利函数——遮盖性干扰效果算法

众所周知, 干扰机对雷达实施有效的有源遮盖性干扰时必须同时满足时间、空间、频率和能量四个基本方面的要求。任何一项不满足, 都将导致干扰无效。因此, 对干扰效果的评估可从以下四个方面考虑:(1) 时间域: 指干扰时间必须在雷达威胁时间之内, 用干扰时机因子 e_{jt} 来度量, 即:

$$e_{jt} = \begin{cases} 1 & t_j < t_{r1} \\ \frac{t_{r2} - t_j}{t_{r2} - t_{r1}} & t_{r2} > t_j > t_{r1} \\ 0 & t_j > t_{r2} \end{cases} \quad (1)$$

式中 t_{r1} 是雷达威胁信号到达目标的时刻; t_{r2} 是雷达威胁信号结束的时刻; t_j 是干扰机开始发射干扰信号的時刻。干扰时机因子 e_{jt} 反映出干扰信号在时间上能够压制雷达威胁信号的程度, e_{jt} 越大, 表明干扰信号在时间域上遮盖雷达信号的时间越多, 干扰效果就越好。(2) 空间域: 指干扰信号在空间上必须能够到达雷达的接收天线, 用空间对准因子 e_{js} 来度量:

$$e_{js} = \begin{cases} \left[\frac{\min(\theta_j + \theta_{j0.5}, \theta_r + \theta_{r0.5}) - \max(\theta_j - \theta_{j0.5}, \theta_r - \theta_{r0.5})}{2\theta_{r0.5}} \right] & |\theta_j - \theta_r| \leq (\theta_{j0.5} + \theta_{r0.5}) \\ 0 & |\theta_j - \theta_r| > (\theta_{j0.5} + \theta_{r0.5}) \end{cases} \quad (2)$$

式中 θ_j 、 $\theta_{j0.5}$ 和 θ_r 、 $\theta_{r0.5}$ 分别是干扰机和雷达的天线轴方向及半功率波束宽度。空间对准因子 e_{js} 反映了干扰天线在空间上与雷达接收天线的对准程度, e_{js} 越大, 表明对准程度越高, 干扰效果越好。(3) 频率域: 指干扰信号频率必须在雷达接收机通带范围之内, 用干扰频率因子 e_{jf} 来度量, 即:

$$e_{jf} = \begin{cases} \frac{\min(f_{r2}, f_{j2}) - \max(f_{r1}, f_{j1})}{f_{j2} - f_{j1}} & f_{r1} < f_{j1} < f_{r2} \\ 0 & f_{j1} > f_{r2} \text{ 或 } f_{j2} < f_{r1} \end{cases} \quad (3)$$

式中 $f_{r1} \sim f_{r2}$ 是雷达接收机频率范围; $f_{j1} \sim f_{j2}$ 是干扰信号频率范围。干扰频率因子 e_{jf} 反映了干扰信号频率进入雷达接收机的程度, e_{jf} 越大, 表明干扰信号进入雷达接收机越多, 干扰效果将越好。(4) 能量域: 指干扰信号的能量必须能够压制目标回波信号的能量, 以阻止或影响雷达检测目标信息。这里用干信比 NSR 来度量干扰信号压制雷达信号的程度, 即:

$$NSR = J/S = P_{ji}/P_{rs}$$

式中 P_{rj} 是雷达能接收到的干扰信号功率; P_{rs} 是目标回波功率。根据雷达方程和干扰方程:

$$P_{rs} = \frac{P_t G_t^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R_t^4}, \quad P_{ji} = \frac{P_j G_j G_t(\theta) \lambda^2 \xi_j}{(4\pi)^2 R_j^2} \text{ 可得:}$$

$$NSR = \frac{P_j G_j G_t(\theta) 4\pi \xi_j R_t^4}{P_t G_t^2 \sigma R_j^2} \quad (4)$$

式中 P_t 、 P_j 分别是雷达和干扰机的发射功率; G_t 、 G_j 分别是雷达和干扰机天线增益; σ 是目标的散射面积; λ 为波长; R_j 是雷达与干扰机之间的距离; R_t 是雷达与目标之间的距离; $G_t(\theta)$ 是雷达天线在干扰方向的增益; ξ_j 是干扰信号与雷达信号的极化失配损失系数。

根据以上分析可知, 空间对准因子和频率域瞄准因子都反映了干扰信号能否进入雷达接收机的情况, 同能量域一样, 其结果最终通过接收机输出端信噪比的改变来反映。若令:

$$e_{je} = NSR e_{jf} e_{js} \quad (5)$$

则功率压制效益系数 e_p 定义为:

$$e_p = 1.0 - P_d(P_t, 10^{0.1(-10 \lg(e_{je}/K_j) + R_{0.1})}) \quad (6)$$

式中 K_f 是雷达压制系数; $R_{0.1}$ 是虚警概率为 P_f , 当 $P_d=0.1$ 时的雷达的检测因子; $P_d(P_f, R_{SNR})$ 是单个脉冲线性检波时的检测概率函数, 即:

$$P_d(P_f, R_{SNR}) = e^{-R_{SNR}} \int_{\sqrt{-2\ln(P_f)}}^{+\infty} x e^{-\frac{x^2}{2}} I_0(x\sqrt{2R_{SNR}}) dx$$

式中 R_{SNR} 是雷达检波时的信噪比; $I_0(x)$ 是宗量为 x 的零阶修正贝塞尔函数 $I_0(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^{2n}}{2^{2n} \cdot n!n!}$ 。由式(6)

可知, 功率压制效益系数 e_p 就是雷达在干扰条件下的漏报概率。故总的干扰效果 E , 也就是博弈盈利函数为:

$$E = e_{jt} e_p \quad E \in [0, 1] \quad (7)$$

显然, E 越大, 漏报概率越大, 干扰效果越好。

3 实际应用与分析

下面以某型号干扰机对某型号雷达的干扰为例, 具体阐述博弈论在遮盖性干扰效果评估中的运用。该干扰机用于机载自卫, 具有瞄准式、阻塞式两种遮盖式干扰, 发射天线增益 20 dB, 发射功率 10 W, 发射干扰噪声带宽 20 MHz, 发射损耗 2 dB, 主瓣宽度为 20° ; 雷达具有频率捷变、频率分集两种抗遮盖式干扰措施, 载波波长 8 mm, 发射功率 400 W, 天线增益是 35 dB, 天线 3 dB 带宽为 3° , 接收机带宽 4 MHz, 发射损失 2 dB, 接收损失 3 dB, 脉冲重复频率 250 kHz, 脉冲宽度 0.5 μ s, 目标平均反射截面积 1m^2 ; 则干扰方的纯策略空间为: $S_J = (J_1, J_2) = (\text{瞄准式}, \text{阻塞式})$, 雷达方的纯策略空间为: $S_R = (R_1, R_2) = (\text{频率捷变}, \text{频率分集})$ 。假设干扰机侦察测频最短反应时间为 0.4 μ s, 瞄准干扰带宽为 8 MHz; 若雷达检波输入端的压制系数 $K_f = 32$ dB, 预定的虚警概率为 $P_f = 10^{-6}$, 可采取两组频率分集; 雷达与干扰机距离为 $R = 1000$ m。若雷达天线始终对准干扰天线, 则各对抗盈利, 即干扰效果计算如下: (1) 当雷达采用频率捷变抗干扰措施, 而干扰机采用瞄准式干扰时, 由式(1)得 $e_{jt} = 0.2$; 由于雷达天线始终对准干扰天线, 故由式(2)~(5)分别得 $e_{js} = 1.0$, $e_{jt} = 0.5$, $\text{NSR} = 37$ Db; $e_{je} = 34$ dB; 再由式(6)~(7)得 $e_p = 0.96$, $E = 0.19$, 此时的干扰盈利 $E_{11} = 0.19$ 。(2) 在阻塞式干扰和频率捷变抗干扰情况下, 采用同样的计算方法可得: $e_{jt} = 1.0$; $e_{js} = 1.0$, $e_{jt} = 4$ M/20 M = 0.2, $\text{NSR} = 37$ dB, 再由式(5)~(7)得 $e_{je} = 30$ dB, $e_p = 0.65$, $E_{12} = 0.65$ 。(3) 在瞄准式干扰和频率分集抗干扰情况下, 此时干扰信号只能干扰雷达的一个频率通道, 未被干扰的雷达通道的干扰效果为 0。故由频率分集雷达总的检测概率式^[7]:

$$P_{d\Sigma} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_{di})$$

式中 n 是雷达的分集通道数 ($n = 2$); P_i 是雷达第 i 通道的检测概率; $P_{d\Sigma}$ 是雷达总的检测概率。根据式(7), 对于频率分集雷达, 若第 i 通道的干扰效果为 E_i , 则总的干扰效果为:

$$E_{\Sigma} = \prod_{i=1}^n E_i \quad (8)$$

由此计算得 $E_{21} = 0$ 。(4) 在阻塞式干扰和频率分集抗干扰情况下, 对第 i 通道有: $e_{jt} = 1.0$, $e_{js} = 1.0$, $e_{jf} = 0.2$, $\text{NSR} = 40$ dB, 将这些数据代入式(5)~(7)得 $e_{je} = 33$ dB, $e_p = 0.96$, $E_i = 0.96$, 再由式(8)得 $E_{22} = 0.92$ 。由此可得该雷达对抗博弈盈利矩阵为:

		J	
		瞄准式	阻塞式
R	频率捷变	0.2	0.65
	频率分集	0.0	0.92

对于干扰方 J , 希望干扰效果越强越好, 然而对于雷达方 R , 希望干扰效果越弱越好。在不知对方采取的策略下, 干扰方为了保证最低的干扰效果, 也就是说, 不管雷达采取那种抗干扰措施, 都将保证干扰效果不小于此值。根据最小最大的原则, 应该选取阻塞式干扰措施, 则干扰方能够使干扰效果不小于 0.65; 同理, 雷达方为了保证最高的干扰效果, 根据最大最小原则, 雷达方应该选取频率捷变抗干扰措施, 此时雷达方能够使干扰效果不大于 0.65。因此, 最终评估该对抗的干扰效果为 0.65。

上面博弈盈利矩阵在纯策略下恰好具有博弈解, 也就是说博弈双方根据最大最小原则和最小最大原则, 所得出的结果相同, 都是 0.65。假若上面盈利矩阵变为

		J	
		瞄准式	阻塞式
R	频率捷变	0.9	0.4
	频率分集	0.0	0.7

根据最小最大原则, 干扰方将采用阻塞式干扰, 可计算出干扰效果为 0.4; 同样, 雷达方根据最大最小原则, 将采用频率分集抗干扰, 计算干扰效果为 0.7, 即在阻塞式-频率分集对抗下, 干扰效果应为 0.7。但是, 如果雷达方推断出干扰方必将使用阻塞式干扰, 就会采用频率捷变抗干扰措施, 使干扰效果降为 0.4; 同理, 如果干扰方断定雷达方会使用频率捷变抗干扰措施, 就会采用瞄准式干扰, 使干扰效果提高为 0.9。此时博弈不存在纯策略解, 在此情

况下,就要考虑博弈论中的混合策略,对各策略赋予一定的概率,以此获得最大的平均盈利,来求得该对抗的干扰效果。

4 结束语

本文运用博弈论对遮盖性干扰效果的动态评估进行了初步探讨。可以看出,通过适当改变干扰效果的计算方法,这种评估方法同样可以运用于欺骗性干扰和综合性干扰的效果评估。博弈论在干扰评估中的运用,可以在不知对手采取的具体策略下,对抗结果进行事先评估,这样就可以根据评估结果调整对抗策略,这对电子战的战术部署具有重要的意义。

参 考 文 献

- [1] 赵国庆. 雷达对抗原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999.
- [2] 魏保华, 吕晓雯, 王雪松. 雷达干扰效果模糊综合评估方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2000, 22(8): 68-71.
- [3] 潘志丽, 张宏科, 张思东. 现代电子干扰理论与效能评估的研究[J]. 通信学报, 2003, 24(11): 40-45.
- [4] 王 瑜. 雷达干扰未确知效果的测度评价研究[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(12): 59-61.
- [5] 施锡铨. 博弈论[M]. 上海: 上海财经大学出版社, 2000.
- [6] 魏保华, 吕晓雯, 王雪松. 一种新的雷达有源干扰效果评估准则的研究[J]. 现代雷达, 1999, 21(6): 26-31.
- [7] 李 潮, 张巨泉. 雷达频域主要抗干扰技术及其效果度量[J]. 舰艇电子对抗, 2005, 28(1): 16-20.

编辑 税 红

(上接第868页)

表1 MoM、MLFIPWA、LMLFIPWA的
矩阵填充及迭代时间对比

	MoM	MLFIPWA	LMLFIPWA
矩阵填充/s	33.77	0.17	0.17
单步迭代/s	8.19	0.94	0.75
总迭代/s	515.86	68.63	37.52

参 考 文 献

- [1] LU C C, CHEW W C. Fast algorithm for solving hybrid integral equations[J]. IEE Proceedings-H, 1993, 140(6): 455-460.
- [2] LU C C, CHEW W C. A multilevel algorithm for solving a boundary integral equation of wave scattering[J]. Microwave and Optical Tech. Letters, 1994, 7(10): 466-470.
- [3] HU B, CHEW W C, MICHIELSEN E, et al. Fast inhomogeneous plane wave algorithm for the fast analysis of two-dimensional scattering problems[J]. Radio Science, 1999, 34(4): 759-772.
- [4] HU B, CHEW W C. Fast inhomogeneous plane wave algorithm for electromagnetic solutions in layered mediums structures: two-dimensional case[J]. Radio Science, 2000, 35(1): 31-43.
- [5] PETERSON A F, RAY S L, MITTRA R. Computational methods for electromagnetics[M]. New York: IEEE Press, 1998.
- [6] 周永祖. 非均匀介质中的场与波[M]. 聂在平, 柳清伙, 译. 北京: 电子工业出版社, 1992.
- [7] CHEN Y P, HU J, NIE Z P, et al. Analysis of scattering of composite cylinder structure using multilevel fast inhomogeneous plane wave algorithm[C]// IEEE Antennas and Propagation Symposium. Washington D.C., U.S.: IEEE Press, 2005.
- [8] 胡 俊. 复杂目标矢量电磁散射的高效方法——快速多极子方法及其应用[D]. 成都: 电子科技大学, 2000.
- [9] HU J, NIE Z P, LEI L, et al. Solving 3D electromagnetic scattering and radiation by local multilevel fast multipole algorithm[C]//IEEE International Symposium on Micro-wave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications Proceedings. [S.l.]: IEEE Press, 2005.
- [10] 胡 俊, 聂在平, 雷 霖, 等. 三维局部多层快速多极子算法[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(3): 329-335.

编辑 黄 莘