



具有认知偏差的雷达对抗建模方法^{*}

马红光, 龙正平, 闫彬舟, 宋小杉

(西安大衡天成信息科技有限公司, 西安 710026)

摘要: 认知偏差是认知电子战中的客观存在。基于动态博弈方法, 针对认知雷达对抗过程中因不完整信息和测量误差导致的认知偏差, 研究雷达对抗建模方法; 以雷达抗干扰改善因子和干扰机干扰效益因子计算博弈双方的效益, 采用精炼贝叶斯均衡建立动态雷达对抗模型, 分析认知偏差造成的影响。仿真实验结果证明了所提方法的有效性。

关键词: 认知电子战; 认知偏差; 雷达对抗; 动态博弈; 精炼贝叶斯均衡

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202436.230303

Modeling method for radar countermeasure with cognitive bias

Ma Hongguang, Long Zhengping, Yan Binzhou, Song Xiaoshan

(Xi'an Daheng Tiancheng IT Co. Ltd., Xi'an 710026, China)

Abstract: The cognitive bias is an objective existence of cognitive electronic warfare. Based on the method of dynamic gaming, this paper investigates the approach to modeling radar countermeasure with the cognitive bias caused by the incomplete information and the measuring error in the cognitive radar countermeasure. It adopts the anti-jamming improvement factors of radar and the jamming payoff factors of jammer to calculate the utilities of both adversarial parties. Thereafter, the dynamic radar countermeasure model is setup with the perfect Bayesian equilibrium. The influence of cognitive bias on gaming result is further analyzed. The results of simulation test validate the effectiveness of the proposed method.

Key words: cognitive electronic warfare, cognitive bias, radar countermeasure, dynamic game, perfect Bayesian equilibrium

2022年2月24日, 俄罗斯总统普京发起了针对乌克兰的特别军事行动, 这场持续至今的武装冲突充分凸显了认知电子战在现代信息化战争中的重要性^[1]。以美国为首的北约凭借其地、海、空、天立体信息网络, 对战场态势进行了实时感知, 为乌克兰提供了准确的俄军动态, 使乌军对俄军的重要目标实施精确打击和高级指挥官的斩首行动^[2]。反观俄罗斯, 尽管其拥有强大的陆基和空基电子战装备, 由于俄军仍坚持二战时期的作战理念, 片面地秉持“强功率压制是对敌最有效手段”的落后理念^[3], 忽视对战场电磁态势的精准把控, 致使其丧失了作战主动权, 这一教训提醒我们必须重视对战场电磁态势的精确分析与掌控。

认知对抗是随电磁频谱战应运而生的信息对抗新概念, 即通过电子侦察系统实时感知对方的状态, 调整自身的对抗策略, 达到干扰/抗干扰效能最大化^[4]。现有的认知对抗均是假设完全感知对方状态信息的前提下, 在功率分配、工作频段、对抗时间及空域制定相应的对抗措施, 建立效益评估模型; 然而, 实际的对抗是一个“开环”环境, 对抗双方不可能完全掌握对方的状态, 在非完整感知信息条件下, 如何评估对抗策略的有效性是一个尚待解决的科学问题^[5]。认知对抗起源于认知无线电技术, 所谓“认知”是指一种具有意识的进行思考、推理、记忆、想象、学习、处理信息、应用知识、改变优先权等的智力活动^[6]。在雷达对抗领域, 所谓“认知雷达”是对雷达系统赋予感知所处环境的能力, 并能利用人工智能技术不断学习和推理外部环境的变化规律, 自适应地调整自身工作方式, 如调整发射功率、工作频率、调制方式、发射波形和采用波束副瓣消隐等措施, 使雷达在复杂的对抗环境中降低被

* 收稿日期: 2023-09-08; 修订日期: 2024-03-13
基金项目: 陕西省青年托举计划项目 (XXJS202221)
联系方式: 马红光, mahg@wavedesk.cn.

干扰和破坏的可能性^[7]。而要实现上述目标,雷达须掌握干扰方的干扰功率、干扰样式、组网形式和位置等信息,还要评估干扰方的电子侦察能力。雷达的核心抗干扰能力主要体现在对多假目标的识别概率^[8],若要识别假目标,则需要大量涵盖所有干扰样式和策略的、经人工标注的干扰信号样本^[9],这在实际中是不可能实现的条件。同理,对干扰方而言,要全部掌握雷达的抗干扰措施和信号处理方法,尤其是对假目标的识别能力也是不可能的,在实际的对抗过程中,仅能通过电子支援系统获得雷达的部分工作状态,其释放干扰的有效性不完全取决于雷达的变化信息,例如,传统的压制系数未考虑雷达的抗干扰改善因子,因此只能表示在雷达天线口面上的信干比^[10]。在不完整信息条件下,现有基于人工智能的对抗模型和效能评估方法均不符合实际对抗环境,不可能实现真正意义上的认知对抗。

为解决上述难题,目前采取的方法是对未知信息进行专家打分确定对抗双方各自具有的优势或劣势^[11],而后利用不完整信息下的静态/动态博弈判断对抗结果,在此基础上再利用多目标寻优算法规划最优对抗策略。这种做法存在人为主观性,不能从根本上解决因不完整信息造成的影响。

为克服传统方法的不足,我们提出了一种基于 Stackelberg 博弈的非完整信息条件下认知对抗建模方法^[12],所提方法成立的依据是电子支援系统能够精确地测量雷达的工作状态,即测量误差不足以对博弈过程产生颠覆性的结果^[13]。然而,在实际的复杂电磁环境中,在侦测接收机的监测频段内往往存在不同数量的辐射源信号,由于信号密度的变化和信道随机衰落等因素的影响,侦测接收机不可避免地会产生测量误差,进而引起电子支援系统对目标雷达状态的误判,因此,我们必须面对这种客观存在的认知误差。

认知偏差的概念来自股票交易市场^[14],在股票交易市场上,存在公开信息和不公开的内部信息^[15],投资者间的个体差异使得部分投资人从公开信息中读取更优质的信息,造成认知偏差,投资者随着交易量的变化会修正自己的投资策略,减少认知偏差,以期获得更多收益,由此引起市场博弈,这一过程可用精炼贝叶斯均衡描述(PBE)^[16],由于认知偏差的存在,投资者们在博弈过程中获得收益不同,必然存在盈利者和亏损者。借鉴这一概念和方法,结合侦测接收机的测量精度和测量误差,计算干扰机对雷达的认知偏差,在此基础上,评估不同认知偏差对认知雷达博弈结果的影响,为定量描述电子支援系统对复杂电磁环境的认知能力提供科学依据。

1 认知雷达动态对抗模型

在实际的雷达对抗环境中,雷达常被看作博弈的引领者,干扰方为跟随者,雷达将按照其遂行的任务对目标区域进行扫描,其发射机的状态为 $\mathbf{x} = [A_m, f_c, B_w, M_d, f_p]$,其中: A_m 为脉冲幅度; f_c 为中心频率; B_w 为瞬时带宽; M_d 为脉冲内调制方式; f_p 为脉冲重复频率。当雷达未受到干扰时,将保持其工作状态不变。干扰方由电子支援系统和干扰机构成,当电子支援系统中的侦测接收机截获了雷达发射机状态 \mathbf{x} 后,通过测量 \mathbf{x} 的各个状态变量,识别雷达工作状态,选择干扰策略并将干扰任务分配给干扰机,由于雷达信号处理过程无法监测,干扰方将持续观测雷达状态 \mathbf{x} 是否明显变化,判断其干扰是否有效。雷达收到干扰信号后,分析干扰样式,采取相应的抗干扰措施消除或降低干扰对其造成的影响,这一过程可用如下动态博弈模型描述。

1.1 认知雷达对抗博弈模型

认知雷达对抗博弈模型可表示为

$$G = \{(\mathbf{R}, \mathbf{J}), (\mathbf{A}, \mathbf{B}), (u_A, u_B), (p_r, p_j)\} \quad (1)$$

式中: \mathbf{R} 表示雷达; \mathbf{J} 表示干扰机; \mathbf{A} 为雷达具备的抗干扰策略矩阵; \mathbf{B} 为干扰机的干扰策略矩阵; u_A 为雷达获得的效益; u_B 为干扰机获得的效益; p_r 为雷达对干扰方的干扰样式识别概率; p_j 为干扰方对雷达状态 \mathbf{x} 的识别概率。

雷达所具有的抗干扰策略对干扰方而言是不完全确知的,只能根据领域知识或公开资料对矩阵 \mathbf{A} 中的抗干扰措施做合理的假设,设 $S_r = \{\text{'PulseCompress'}, \text{'WaveAgile'}, \text{'F_Agile'}, \text{'RF_decept'}, \text{'FalseT_ID'}\}$, 式中五项依次表示脉冲压缩、波形捷变、频率捷变、射频欺骗以及假目标识别。

同理,对雷达而言,干扰机的干扰策略也可根据先验知识设定: $S_j = \{\text{'WBJ'}, \text{'NBJ'}, \text{'C\&I'}, \text{'DenseTargets'}, \text{'R\&VDecept'}\}$, 式中五项依次表示宽带噪声压制、窄带灵巧噪声压制、切片干扰、密集假目标干扰以及距离-速度欺骗干扰。

在实际的对抗博弈中,双方的策略矩阵分别是 S_r 和 S_j 中各个元的组合,对雷达而言,脉冲压缩是用匹配滤波器实现的,能够有效降低噪声压制类的干扰,对假目标欺骗类信号通常没有作用,须通过波形捷变、频率捷变、射

频欺骗和假目标识别算法抵抗欺骗类干扰, 雷达的抗干扰改善因子定义如下。

1.2 雷达抗干扰改善因子

(1) 匹配滤波和脉压技术^[17]

脉压信号通常是: 线性/非线性调频信号、脉冲编码信号。相应的改善因子可表示为

$$D_L = B\tau L \quad (2)$$

式中: B 和 τ 分别为雷达脉冲的带宽和时宽; L 为脉冲压缩损耗(一般取 -1.3 dB), 对于脉冲编码信号, 其抗干扰改善因子为

$$D_p = NL \quad (3)$$

式中: N 为相位编码长度, 取值一般为: $7\sim 13$ (巴克码), $16\sim 128$ (M 序列), 16 (4 相码)。

对式(2)或式(3)的结果取分贝数后, 得到的抗干扰改善因子为

$$D_0 = 10\lg B\tau(\text{或}N) - 1.3 \text{ dB} \quad (4)$$

(2) 脉冲积累改善因子

雷达脉冲积累分为相干积累和非相干积累, 积累脉冲数可表示为

$$n = \frac{\theta_{0.5} T f_p}{2\pi} \quad (5)$$

式中: $\theta_{0.5}$ 为雷达主瓣半功率宽度; T 为雷达波束驻留时间, f_p 为脉冲重复频率。

对相干积累: $D_1 = n^{0.8}$; 对非相干积累: $D_1 = n^V$, $V \in [0.7, 0.9]$ 。

(3) 波形捷变因子^[18]

波形捷变因子可表示为

$$D_2 = 10\lg N_w \quad (6)$$

式中: N_w 为雷达波形个数。雷达通过波形变化增加干扰方对其分析的难度, 迫使干扰机增加干扰带宽, 从而降低干扰效益。

(4) 频率分集因子

频率分集因子可表示为

$$D_3 = 10\lg N_F \quad (7)$$

式中: N_F 为雷达频率分集个数。

(5) 欺骗性发射因子

欺骗性发射因子可表示为

$$D_4 = 10\lg(N_D + 1) \quad (8)$$

式中: N_D 为雷达欺骗信号频率个数。欺骗性发射是指雷达在多个频点上从辅助天线发射小功率欺骗信号, 使干扰机无法精确瞄准雷达工作主频。

(6) 假目标识别技术

由于数字射频存储(DRFM)技术被应用于雷达干扰机, 使得转发式多目标欺骗干扰可以顺利通过前述 5 项抗干扰措施而进入雷达终端, 现代雷达针对多假目标回波采取了相应的识别算法, 分别从波形参数和航迹关联等方面识别假目标, 对假目标识别的概率可近似表示为

$$D_5 = \frac{N_r}{N_t} \quad (9)$$

式中: N_r 为识别的假目标回波个数; N_t 为总回波数。因此, D_5 也可视为雷达的假目标识别概率 P_d 。

令 $s_{r1} = D_0 + D_1$, $s_{r2} = D_2$, $s_{r3} = D_3$, $s_{r4} = D_4$, $s_{r5} = D_5 R_{JS}$, 则 $A = \mathbf{a} \cdot [s_{r1}, s_{r2}, s_{r3}, s_{r4}, s_{r5}]$ 。这里, \mathbf{a} 为抗干扰策略分配矩阵, 其阵元为 0 或 1, ‘ \cdot ’ 为点乘运算符号, R_{JS} 为雷达天线口面处的干信比(其计算方法见式(11))。

1.3 干扰机的干扰效益因子

相应地, 依 S_j 所列的干扰措施, 对应的干扰效益因子如下。

(1) 宽带噪声压制效益

宽带噪声压制效益可表示为

$$s_{j1} = 10\lg\left(\frac{W_j}{W_r}\right) + 10\lg(R_{JS}) \quad (10)$$

式中: W_j 为干扰带宽; W_r 为雷达接收机带宽; $R_{JS}=P_j/P_r$ 为雷达天线处的干信比; P_j 为干扰功率, 与干扰机至雷达天线的间距 R_j 的平方成反比; P_r 为目标回波功率, 与目标至雷达天线的间距 R_t 的 4 次方成反比, 在自卫干扰场景中, 有 $R_j=R_t$, 因此雷达天线处的干信比

$$R_{JS} = \frac{4\pi P_j G_j \gamma_j}{P_r G_r \sigma_t} R_j^2 \quad (11)$$

式中: G_j 为干扰机天线相对雷达方向的增益, γ_j 为干扰机天线相对雷达天线的极化失配系数, P_t 为雷达发射脉冲功率, G_r 为雷达接收天线朝向干扰机的增益, σ_t 为被掩护目标的雷达散射截面(RCS)。

(2) 窄带灵巧噪声压制效益

窄带灵巧噪声压制效益可表示为

$$s_{j2} = 10\lg\left(\frac{T_r}{1/W_r - 0.5W_j/k}\right) + 32 + 10\lg(R_{JS}) \quad (12)$$

式中: T_r 为雷达发射脉冲宽度 τ ; $k=W_r/T_r$ 为雷达脉冲带宽-时宽比; 32 为外场实验确定的校正系数。

(3) ‘C&I’切片干扰效益

‘C&I’切片干扰效益可表示为

$$s_{j3} = 10\lg(\eta^2 W_r T_r) + 12, \quad \eta \in [0, 1] \quad (13)$$

式中: η 为切片系数。

(4) 密集假目标效益

密集假目标效益可表示为

$$s_{j4} = 10\lg(N_f)(1 - P_d) \quad (14)$$

式中: N_f 为假目标数; P_d 为雷达识别假目标概率。

(5) 距离-速度欺骗效益

距离-速度欺骗效益可表示为

$$s_{j5} = 10\lg(R_{JS})(1 - P_d) \quad (15)$$

则干扰策略矩阵 $\mathbf{B}=\mathbf{b} \cdot [s_{j1}, s_{j2}, s_{j3}, s_{j4}, s_{j5}]$, \mathbf{b} 为抗干扰策略分配矩阵, 阵元为 1 时选择相应的干扰样式, 反之则不选该样式。

当雷达、干扰机参数和对抗场景确定后, 令雷达对假目标的检测概率 P_d 在 0~1 取某个确定值, 即可通过上述经验公式构建策略矩阵 \mathbf{A} 和 \mathbf{B} , 运用双矩阵 Stackelberg 博弈算法可求得雷达和干扰机的最佳策略及对应的效益 (u_A, u_B), 当 $\delta=u_A-u_B>0$ 时, 雷达是获胜者, 干扰机为失败者, 反之亦然^[12]。由此可见, 当给定 P_d 后, 博弈的结果准确与否主要取决于干扰方电子支援系统对雷达发射机状态 x 的测量精度。

1.4 基于精炼贝叶斯均衡的动态博弈

式(1)中的 $p_r = p_{0j}p(b_j|s_j)$ 为雷达接收到干扰信号 s_j 后识别干扰策略 b_j 的后验概率, p_{0j} 为雷达对干扰策略 $b_j \in B$ 的先验概率。类似地, $p_j = p_{0r}p(a_j|x)$ 为干扰方的电子支援系统对雷达状态变量 $\mathbf{x}=[A_m, f_c, B_w, M_d, f_p]$ 估计干扰策略 $a_j \in A$ 是否有效的后验概率, 这里, 用“0”和“1”表示一次对抗后雷达状态变量 \mathbf{x} 各个元是否明显变化, 共有 $x=2^5$ 个状态; 令 \mathbf{x} 的先验概率密度 p_{0r} 服从高斯混合分布模型(GMM), 在一次对抗结束后, 利用 Bayesian 方法计算雷达状态后验概率: $p_j = \text{posterior}(p_{0r}, \mathbf{x})$, 其中, $p_{0r} = \text{fitgmdist}(\mathbf{x}, 5)$ 为拟合 GMM 分布模型; 若 $p_j < 0.5$, 认为当前的干扰策略 \mathbf{B} 无效, 需要改变 \mathbf{B} ; 反之认为当前干扰策略有效, 保持 \mathbf{B} 不变。而要真正实现这种对抗仿真, 需要对抗双方都具有对方大量的实测数据, 在此基础上方能拟合出 p_{0j} 和 p_{0r} 。可以从理论上证明, 当策略矩阵 \mathbf{A} 和 \mathbf{B} 为有限集, 上述博弈存在唯一的精炼贝叶斯均衡 PBE(a^*, b^*)^[19]。

为讨论问题方便起见, 设雷达对干扰策略的识别概率 $p_r=1$, 仅考察干扰方的侦测接收机对雷达状态变量

$\mathbf{x}=[A_m, f_c, B_w, M_d, f_p]$ 测量误差对后验概率 p_j 的影响。这里, 认为侦测接收机对 \mathbf{x} 中的 5 个变量的测量相互独立, 测量误差包括固定误差和随机误差, 固定误差也称作测量精度, 可通过高精度信号源在实验室条件下标定。随机误差则是由多种因素造成, 如前所述, 对抗环境中信号密度的增加会导致信号分选的难度, 由此引起较大的测幅、测频误差; 而信道的随机衰落会造成更大的脉冲幅度测量误差。对于低截获雷达信号, 由于其采用复杂的扩频机制, 对调制方式的识别率低、误差大。当随机误差超过一定门限时, 对后验概率 p_j 的计算误差将引起电子支援系统的误判。因此, 必须定量地分析认知偏差对博弈结果的影响。

2 认知偏差对动态博弈的影响

首先对侦测接收机的工作过程做简要描述, 在观测时间段 $(0 \sim t_d)$ 内, 接收机在其监测频段内收到包括目标雷达信号及其它干扰信号在内的混合信号, 经信号分选后, 获得 N 个目标雷达发射脉冲; 接收机将分别测量脉冲幅度 A_m 、中心频率 f_c 、瞬时带宽 B_w 、脉内调制方式 M_d 和脉冲重复频率 f_p , 由于信号分选误差及信道随机衰落等因素, 造成这些测量值表现为服从高斯分布、长度为 N 的随机序列, 测量序列的均值和方差 (μ, σ) 是判断其真值和随机误差的依据。通常的做法是根据噪声的强度 σ 确定一门限, 当测量值在门限以下时认为测量值变化不明显, 超出门限时则认为测量值发生了明显改变。由此可见, 不同的门限选取原则将造成不同的认知结果, 为度量这一现象, 定义一个描述认知偏差程度的系数 k , 当 $0 < k < 1$ 时为低认知偏差, 当 $k > 1$ 时为高认知偏差。

定理 1. 当干扰方的认知偏差为 $0 < k < 2$ 时, 雷达与干扰机的博弈存在唯一的线性 PBE, 在此条件下, 双方的收益分别为

$$\begin{aligned} \tilde{u}_A &= \alpha_0 u_A + \beta_0 u_{A0} \\ \tilde{u}_B &= \alpha_s u_B + \beta_s u_{B0} \end{aligned} \quad (16)$$

式中: $\alpha_0 = \frac{2k-1}{3\lambda}$; $\beta_0 = \beta_s = -\frac{\gamma}{3\lambda}$; $\gamma = 2-k$; $\alpha_s = \frac{2-k}{3\lambda}$; $\lambda = \sqrt{\frac{(1+k)(2-k)\sigma}{9d}}$; d 为侦测接收机的测量精度; σ 为测量方差; u_{A0} 、 u_{B0} 为不存在认知偏差时的效益。当不满足条件 $0 < k < 2$ 时, 博弈不存在均衡。

证明: 当博弈双方的策略矩阵 \mathbf{A} 和 \mathbf{B} 为有限集时, 必然存在最佳均衡策略 (a^*, b^*) 和后验概率 p_j^* , 并满足下列条件

$$1) u_A(a^*, b^*) \geq u_A(a, b), a \in \mathbf{A}, b \in \mathbf{B};$$

$$2) u_B(b^*, a^*) \geq u_B(b, a) \cdot p_j^*, a \in \mathbf{A}, b \in \mathbf{B};$$

3) $p_j^* = p_{0r} p(a^*/x)$ 为干扰方依据对雷达的先验概率 p_{0r} 在观察到雷达的状态 x , 并估计出雷达最佳抗干扰策略 a^* 后得到的后验概率。

当干扰方对雷达存在认知偏差 k 时, 由 3σ 准则可知, 在正态分布中数值分布在 $(\mu-\sigma, \mu+\sigma)$ 中的概率为 0.6826; 数值分布在 $(\mu-2\sigma, \mu+2\sigma)$ 中的概率为 0.9544; 数值分布在 $(\mu-3\sigma, \mu+3\sigma)$ 中的概率为 0.9974。可以认为, 认知偏差为 $0 < k < 2$ 时, 接收机测量误差的 95% 被包含在博弈效益中, 不满足该条件时为小概率事件, 所对应的后验概率值不可信。

证毕。

3 仿真实验

为验证所提方法的有效性, 以 AN/SPY-1 雷达为对象, 建立对抗仿真场景: 设被掩护目标携带自卫干扰机, 其雷达散射截面 $RCS=0.03 \text{ m}^2$, 距离雷达的斜距为雷达相对该 RCS 的最大作用距离 $R_t=R_m=310 \text{ km}$, 目标相对地面垂直高度为 $H=20 \text{ km}$ 。

根据公开资料^[20-21], 该雷达的主要技术参数如表 1 所示。

干扰机主要技术参数为: 干扰功率 $P_j=1 \text{ kW}$; 天线增益 $G_j=20 \text{ dB}$; 干扰带宽 $W_j=2W_r$; 干扰波束宽 $\theta_j=2\theta_r$; 极化失配系数 $\gamma_j=0.5$ (设干扰机为圆极化)。根据上述参数可计算得到雷达抗干扰改善因子和干扰机的效益 (详见文献 [12])。

表 1 AN/SPY-1D 雷达参数

Table 1 Parameters of radar AN/SPY-1D

central frequency	bandwidth	range resolution	antenna	antenna gain	beam	peak power	pulse width	pulse press	maximum
f_c/GHz	W_r/MHz	$\Delta r/\text{m}$	aperture/ m^2	G/dB	width θ_r	P_t/MW	$\tau/\mu\text{s}$	ratio k	range/ km
3.1~3.5	40	0.5~1	12	42	$1.7^\circ \times 1.7^\circ$	4~6	6.4~51	128	310

将雷达对假目标的识别概率 P_d 作为未知信息, 令 $P_d=0.1:0.1:1$ (即步长 0.1) 递增, 博弈结果如图 1 所示。

由图 1 可见, 当雷达对假目标的检测概率 $P_d < 0.6$ 时, 干扰机的效益 u_B 大于雷达所获得的效益 u_A ; 反之, u_A 随 P_d 线性增加, u_B 跳变到小于 u_A 后基本保持不变。这是 Stackelberg 博弈采用线性规划所造成的结果。

图 2 为认知偏差对上述博弈结果的影响, 设接收机测量精度 $d=1$, 测量误差 $\sigma=1$ 。由图 1 可知, 当 $P_d=0.5$ 时, $u_A=41.43$, $u_B=72.55$ 。

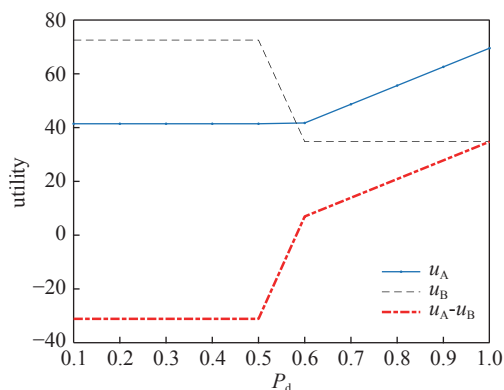


Fig. 1 Results of game with different false target identification probabilities P_d

图 1 不同假目标识别概率的博弈结果

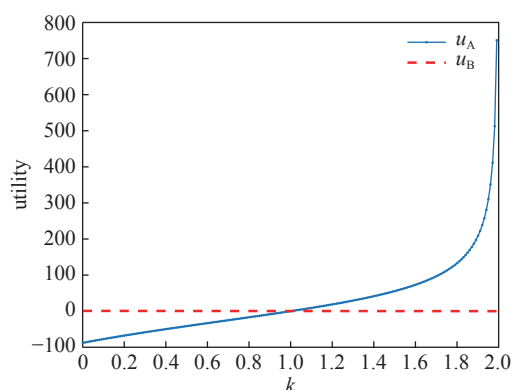


Fig. 2 Influence of cognitive bias on utilities

图 2 认知偏差对收益的影响

由图 2 可见, 干扰方的认知偏差 k 对双方博弈效益有明显的影响, 当 $0 < k < 1$ 时, 干扰方收益的降低与雷达收益的增加几乎呈线性关系, 且差异不明显, 当 $1 < k < 2$ 时, 雷达的收益呈指数规律上升, 而干扰方的收益仍保持线性降低, 这表明当认知偏差超过一定程度后, 博弈结果发生反转。

4 结论

由于电磁频谱战中的对抗双方实际存在的侦测信息的非完整性, 使传统的对抗效果评估方法变得不客观。本文在领域知识和公开信息的支持下, 提出了存在非完整信息和认知偏差的雷达认知对抗建模及仿真评估方法, 所提出的方法基于干扰方通过电子支援系统能够准确获得雷达工作状态、并考虑测量误差造成的认知偏差对博弈结果的影响, 通过仿真分析, 当认知偏差满足规定的约束条件时, 其测量误差不会对博弈造成颠覆性的结果。为验证所提方法的先进性, 我们查阅了相关文献, 尚未发现与所提方法相近的方法, 即现有的针对非完整信息的对抗博弈仅针对单一参数策略博弈, 如文献 [22-24] 仅针对通信对抗中的功率控制策略, 所谓的非完整信息是对“引领者”发射功率测量误差造成的随机性, 未考虑任何抗干扰措施带来的信息非完整性和认知偏差对博弈结果的影响。因此, 所提方法具有显著的创新性。

参考文献:

- [1] 于周吉. 从俄乌冲突看电磁频谱战走向[J]. 舰船电子对抗, 2022, 45(5): 1-6,35. (Yu Zhouji. Electromagnetic spectrum warfare trend from the conflict between Russia and Ukraine[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2022, 45(5): 1-6,35)
- [2] 武坦然, 易楷翔, 皇甫冬琦, 等. 俄乌冲突中北约电磁频谱作战介入与俄军教训[J]. 航天电子对抗, 2022, 38(3): 1-4. (Wu Tanran, Yi Kaixiang, Huangfu Dongqi, et al. The intervention of NATO electromagnetic spectrum operation in the Russia Ukraine conflict and the lessons learned by the Russian army[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2022, 38(3): 1-4)
- [3] 凌海风, 李瑞, 柏林元, 等. 俄乌冲突中俄罗斯电子战装备及运用研究[J]. 航空兵器, 2023, 30(6): 32-36. (Ling Haifeng, Li Rui, Bai Linyuan, et al. Research on Russian electronic warfare equipment and application in Russia-Ukraine conflict[J]. Aero Weaponry, 2023, 30(6): 32-36)
- [4] 曹兰英, 郭明明, 罗美方. 雷达与电子战的认知博弈[J]. 雷达科学与技术, 2021, 19(5): 552-557. (Cao Lanying, Guo Mingming, Luo Meifang. Cognitive game between radar and electronic countermeasure[J]. Radar Science and Technology, 2021, 19(5): 552-557)
- [5] 赫彬, 苏洪涛. 认知雷达抗干扰中的博弈论分析综述[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(5): 1199-1211. (He Bin, Su Hongtao. A review of game theory analysis in cognitive radar anti-jamming[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2021, 43(5): 1199-1211)
- [6] 郗文博. 基于认知无线网络的切片资源分配技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2021: 20-30. (Qie Wenbo. Research on slice resource allocation technology based on cognitive wireless network[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2021: 20-30)
- [7] 黎湘, 范梅梅. 认知雷达及其关键技术研究进展[J]. 电子学报, 2012, 40(9): 1863-1870. (Li Xiang, Fan Meimei. Research advance on cognitive radar and its key technology[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(9): 1863-1870)

- [8] 张亮, 张翔宇, 杨大伟, 等. 基于 2D-RFRFT 的密集假目标干扰自适应抑制算法[J]. 电光与控制, 2022, 29(3): 53-58,64. (Zhang Liang, Zhang Xiangyu, Yang Dawei, et al. A 2D-RFRFT based adaptive algorithm for dense false-target jamming suppression[J]. *Electronics Optics & Control*, 2022, 29(3): 53-58,64)
- [9] 陈健. 基于深度学习的窄带雷达弹头目标识别关键技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2019: 10-35. (Chen Jian. Research on narrow band radar true-false target discrimination based on deep learning[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2019: 10-35)
- [10] 张云秀. 雷达对抗中 3 种压制系数的比较[J]. 信息与电子工程, 2011, 9(4): 413-417. (Zhang Yunxiu. Comparative study of three suppression coefficients in radar countermeasure[J]. *Information and Electronic Engineering*, 2011, 9(4): 413-417)
- [11] 何小锋. 雷达综合抗干扰效能评估方法指标研究[J]. 雷达与对抗, 2020, 40(3): 11-15. (He Xiaofeng. Research on evaluation methods of radar anti-jamming efficiency[J]. *Radar & ECM*, 2020, 40(3): 11-15)
- [12] Ma Hongguang, Guo Jinku, Song Xiaoshan, et al. An approach to modeling cognitive antagonism with incomplete information[J]. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, 2024, 11(1): 795-802.
- [13] 隋金坪, 刘振, 刘丽, 等. 雷达辐射源信号分选研究进展[J]. 雷达学报, 2022, 11(3): 418-433. (Sui Jinping, Liu Zhen, Liu Li, et al. Progress in radar emitter signal deinterleaving[J]. *Journal of Radars*, 2022, 11(3): 418-433)
- [14] 刘霞, 刘善存, 张强. 信息认知偏差、有限竞争与资产定价[J]. 中国管理科学, 2023, 31(2): 9-17. (Liu Xia, Liu Shancun, Zhang Qiang. Cognitive biases, limited competition and asset pricing[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2023, 31(2): 9-17)
- [15] Paul J M. Crowding out and the informativeness of security prices[J]. *The Journal of Finance*, 1993, 48(4): 1475-1496.
- [16] Vasal D, Sinha A, Anastopoulos A. A systematic process for evaluating structured perfect Bayesian equilibria in dynamic games with asymmetric information[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2019, 64(1): 81-96.
- [17] 王国玉, 汪连栋, 王国良. 雷达抗遮盖性干扰改善因子[J]. 飞航导弹, 2000(12): 50-53. (Wang Guoyu, Wang Liandong, Wang Guoliang. Improvement factor of radar anti-masking jamming[J]. *Winged Missiles*, 2000(12): 50-53)
- [18] 廖翔, 杨龙坡. 雷达综合抗干扰能力度量模型[J]. 信息技术, 2010(4): 51-54. (Liao Xiang, Yang Longpo. Model for measuring radar anti-jamming capability[J]. *Information Technology*, 2010(4): 51-54)
- [19] Ouyang Yi, Tavaafoghi H, Teneketzis D. Dynamic games with asymmetric information: common information based perfect Bayesian Equilibria and sequential decomposition[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017, 62(1): 222-237.
- [20] 牛立强, 谢拥军, 张春刚, 等. 对抗环境下宙斯盾系统探测弹道导弹的仿真[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(6): 1195-1201. (Niu Liqiang, Xie Yongjun, Zhang Chungang, et al. Detection simulation of AEGIS combat system for ballistic missile in electronic warfare environment[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2019, 41(6): 1195-1201)
- [21] Mitsdarffer B, Slowey W, Thelen D, et al. Transient and steady state phase similarity of the AEGIS AN/SPY-1 crossed-field amplifier (CFA) as a function of duty cycle[C]//Proceedings of Abstracts. International Vacuum Electronics Conference 2000. 2000: 1-4.
- [22] Garnaev A, Petropulu A P, Trappe W, et al. A jamming game with rival-type uncertainty[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(8): 5359-5372.
- [23] 周恒杰, 孙闽红, 钟华, 等. 基于不完全信息动态博弈的多信道无线网络抗干扰传输[J]. 电信科学, 2018, 34: 2018004. (Zhou Hengjie, Sun Minhong, Zhong Hua, et al. Anti-jamming transmission in a multi-channel wireless network based on incomplete information dynamic game[J]. *Telecommunications Science*, 2018, 34: 2018004)
- [24] Jia Luliang, Yao Fuqiang, Sun Youming, et al. Bayesian Stackelberg game for antijamming transmission with incomplete information[J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, 20(10): 1991-1994.