

1-15-2021

Modeling Emergence of Network Radar Countermeasure System

Huang Chen

Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China;

Jianqing Qi

Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China;

Fangzheng Liu

Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Modeling Emergence of Network Radar Countermeasure System

Abstract

Abstract: Network radar countermeasure system (NRCS) is a new kind of integrated electronic warfare system with the integrated network developing trend of radar and EW equipment, and emergence is the typical complex feature of NRCS. The connotation and composition of the NRCS emergence was interpreted. Four sources of the NRCS emergence were analyzed: *composition effect, structural effect, interaction effect and environmental effect*. *The conceptual models and mathematical models of the NRCS emergence were built from three aspects: system reconnaissance detection emergence, system target identification emergence and system jamming emergence*. Simulation results coincide with the NRCS emergence source analysis, which verifies that NRCS shows system reconnaissance detection emergence when the information fusion and sharing exists.

Keywords

network radar countermeasure system, emergence, modeling, generation mechanism

Recommended Citation

Huang Chen, Qi Jianqing, Liu Fangzheng. Modeling Emergence of Network Radar Countermeasure System[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(6): 1357-1367.

网络雷达对抗系统涌现性建模

黄晨, 祁建清, 刘方正

(电子工程学院, 合肥 230037)

摘要: 网络雷达对抗系统是电子战系统和雷达系统一体化网络化发展的新型综合电子战系统, 涌现性是其复杂特性的典型表现。从系统科学的角度研究网络雷达对抗系统的涌现性, 阐释了网络雷达对抗系统涌现性的内涵和构成, 其涌现性具体表现为系统探测侦察涌现性、系统目标识别涌现性和系统干扰涌现性。从组成效应、结构效应、交互效应、环境效应4个方面剖析了网络雷达对抗系统涌现性的产生机理, 构建了网络雷达对抗系统探测侦察涌现性、系统目标识别涌现性和系统干扰涌现性的概念模型和数学模型。仿真示例表明当网络雷达对抗系统存在信息融合和共享时, 系统出现探测侦察涌现性, 与涌现性产生机理分析相符。

关键词: 网络雷达对抗系统; 涌现性; 建模; 产生机理

中图分类号: E917; N945

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 06-1357-11

DOI: 10.16182/j.cnki.joss.2015.06.029

Modeling Emergence of Network Radar Countermeasure System

Huang Chen, Qi Jianqing, Liu Fangzheng

(Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract: Network radar countermeasure system (NRCS) is a new kind of integrated electronic warfare system with the integrated network developing trend of radar and EW equipment, and emergence is the typical complex feature of NRCS. The connotation and composition of the NRCS emergence was interpreted. *Four sources of the NRCS emergence were analyzed: composition effect, structural effect, interaction effect and environmental effect. The conceptual models and mathematical models of the NRCS emergence were built from three aspects: system reconnaissance detection emergence, system target identification emergence and system jamming emergence.* Simulation results coincide with the NRCS emergence source analysis, which verifies that NRCS shows system reconnaissance detection emergence when the information fusion and sharing exists.

Keywords: network radar countermeasure system; emergence; modeling; generation mechanism

引言

战场系统网络化, 引起战争形态的深刻变革, 加速信息战装备的转型。作为夺取战场信息优势的重要节点, 雷达和雷达对抗装备面临的作战环境以

及作战对象发生了巨大的变化, 它们的简单组合或叠加越来越无法满足当前信息作战的要求, 电子战系统和雷达系统的一体化已成为国内外信息战装备发展的重要方向^[1-3]。网络雷达对抗系统正是在这种背景下应运而生的新型综合电子战系统, 通过特定的网络协议和设备将异地部署的多个发射站、接收站和指控站连接成有机整体, 实现在时域、频域、空域协同工作, 完成对目标侦察探测、情报收集、干扰压制、火力引导等功能^[4]。由于系统组成



收稿日期: 2014-06-15 修回日期: 2014-11-14;
作者简介: 黄晨(1987-), 女, 安徽芜湖人, 博士生, 研究方向为军事运筹学; 祁建清(1962-), 女, 安徽合肥人, 博士, 教授, 博导, 研究方向为军事运筹学与信息系统安全; 刘方正(1983-), 男, 江苏盐城人, 博士, 讲师, 研究方向为军事运筹与雷达对抗。

<http://www.china-simulation.com>

• 1357 •

种类繁多、各组成部分功能不同、组成部分之间交互复杂,展现出非线性、多样性、多层性、涌现性等复杂系统的共有特性,其中涌现性是系统复杂性的典型表现。

涌现性是现代复杂科学研究的重要概念,近年来复杂性研究的发展表明,复杂系统的涌现性是系统学研究中的核心科学问题之一^[5],研究系统涌现性已成为探索系统复杂性进而评估控制复杂系统的重要手段。目前,关于系统涌现性的研究多与所研究系统的特性密切相关,尚未形成有普适意义的研究方法,如金士尧^[6]等研究了涌现性及其量化在多 Agent 系统涌现性研究中的应用;杨耀华^[7]等把涌现引入到系统设计过程;夏璐^[8]等研究了区域反导作战体系涌现性;Alexandra^[9]等提出了 1 种涌现性分布式控制策略;Vivek^[10]等研究了涌现、自组织及群体智能间的相似性和内在关联。然而,对网络雷达对抗系统复杂特性(含涌现性)的研究尚没有检索到相关文献。本文以涌现论角度研究网络雷达对抗系统,分析网络雷达对抗系统涌现性的内涵与产生机理,构建网络雷达对抗系统涌现性概念与数学模型,为准确把握网络雷达系统的复杂特性,进一步研究系统作战效能和作战运用问题奠定基础。

1 网络雷达对抗系统涌现性

1.1 网络雷达对抗系统涌现性内涵

从十九世纪英国哲学家穆勒用“涌现”描述现象的因果关系开始,到二十世纪美国生物学家贝塔朗菲把涌现概念引入系统科学,直至如今中外学者对涌现性的研究,关于涌现性的定义和内涵仍没有统一的界定^[11]。本文对网络雷达对抗系统涌现性内涵的界定基于我国运筹学家和系统科学家徐国志主编的《系统科学》对涌现性的解释:“系统与组分或者子系统相比有质的提升,新的飞跃。系统科学把这种整体才具有、孤立的部分及其总和不具有的特性,称为整体涌现性”^[12]。

定义 1: 网络雷达对抗系统涌现性,是指网络

雷达对抗系统整体所具有而其组成部分及组成部分的简单叠加所不具有的,且一旦把网络雷达对抗系统还原为它组分的简单叠加则不复存在的能力特性。

网络雷达对抗系统由发射站、接收站、指控站和网络总线 4 部分组成,系统的单站作战能力包括有源探测能力、无源侦察能力、目标识别能力、定位跟踪能力和干扰能力。当系统中各组成部分维持一定的结构,彼此间通过信息交互实现信息融合和共享,并通过与战场环境的能量交互实现作战协同,从而出现网络雷达对抗系统涌现性。从作战效能角度来说,网络雷达对抗系统的涌现性具体来说表现为 3 种:系统探测侦察涌现性、系统目标识别涌现性和系统干扰涌现性。

定义 2: 网络雷达对抗系统探测侦察涌现性,是指系统的探测侦察能力与系统中单站探测侦察能力叠加之和的差异。

定义 3: 网络雷达对抗系统目标识别涌现性,是指系统的目标识别能力与系统中单站目标识别能力叠加之和的差异。

定义 4: 网络雷达对抗系统干扰涌现性,是指系统对目标的干扰能力与系统中单站对目标干扰能力叠加之和的差异。

网络雷达对抗系统的 3 大涌现性在其具体表现上又可分为 2 个阶段:

第 1 阶段是同质涌现性,即指网络雷达对抗系统从各组成部分继承过来的共同功能,但这些功能的效能指标优于所有组成部分同类型效能指标的代数和,涌现性只表现于效能指标数值的增加。例如,网络雷达对抗系统探测侦察同质涌现性表现为侦察预警的发现概率提升和预警范围的扩大。

第 2 阶段是异质涌现性,指网络雷达对抗系统出现了其组成部分不具有的特性。例如,网络雷达对抗系统探测侦察异质涌现性表现为对系统中单站无法预警探测的目标(如隐身飞机)实现预警探测。

1.2 网络雷达对抗系统涌现性产生机理

探索网络雷达对抗系统涌现性产生机理, 是科学描述系统涌现性并构建系统涌现性模型的重要基础。概言之, 网络雷达对抗系统的组成效应、结构效应、交互效应、环境效应四者共同造就了系统的涌现性。

1.2.1 组成效应

系统是由元素或组分构成的, 涌现性归根结底来自系统的元素或组分, 这是涌现论的唯物主义根基^[13]。如前文所述, 网络雷达对抗系统由四大部分组成, 是电子战系统和雷达系统集成网络化发展的综合电子战系统。系统涌现性来源于系统中各组成部分的基本特性, 并受到组成成分特性的制约, 不可能任意涌现出脱离组分基本特性的性质, 例如网络雷达对抗系统的侦察预警频段不可能脱离各单站的工作频段, 系统更不可能涌现出通信对抗或光电对抗的特性。

1.2.2 结构效应

系统的组成效应是涌现性的基础, 但仅有系统的各个组成部分是远远不够的, 还需要系统组成成分间维持一定的结构相互作用, 才能把涌现的可能变为现实。一方面, 网络雷达对抗系统的涌现性是各单站按照一定结构模式协作交互的结果, 另一方面, 各单站间的相互作用也要通过结构才能体现, 不同的结构模式导致涌现特性的不同体现。例如, 网络雷达对抗系统采取线形、环形、袋形等不同的布站方式时, 其系统的探测侦察能力也会有所不同, 必然也表现出不同程度的探测侦察涌现性。

1.2.3 交互效应

这一效应描述的是网络雷达对抗系统涌现性的动力和演化过程。网络雷达对抗系统各组成成分间通过信息传递实现交互, 组成部分间的相互作用和协作导致系统整体信息量不断改变, 直至出现系统的涌现性特征。例如, 网络雷达对抗系统的单站通过协作对同一目标共同实施侦察探测, 各单站可

以获得关于目标的有源探测信息(如目标位置信息等)和无源侦察信息(如目标辐射源特征信息等), 而系统通过综合处理单站提供的不同信息, 实现信息融合, 从而产生关于目标的新信息(如目标敌我属性、威胁程度等信息), 并纠正消灭关于目标的错误信息(如对目标位置信息的综合纠偏等), 最终出现目标识别的涌现特性。

网络雷达对抗系统的交互效应(包括组成成分间的相互作用及相应的信息融合和信息共享机制)是系统涌现性的动力所在。这也是系统利用信息不守恒性的结果, 系统通过交互效应产生新信息, 消除旧信息, 纠正错误信息, 通过信息的非线性放大积累, 实现了系统涌现性。

1.2.4 环境效应

网络雷达对抗系统的涌现性还与环境因素有关。系统通过改变自我的协作方式, 构建同环境交换信息、能量的模式, 从而利用环境资源, 适应环境约束, 涌现新特性。例如, 网络雷达对抗系统最重要的一个环境因素就是空袭目标, 系统所涌现的探测侦察涌现性正是系统通过各单站的协作和信息交互, 充分利用空袭目标的 RCS(雷达反射截面)方向性, 从而获取原本各单站无法获取的信息, 并将各站信息互补融合的结果。可以说, 空袭目标的 RCS 方向性是造就网络雷达对抗系统探测侦察涌现性的重要条件。

网络雷达对抗系统涌现性构成和产生机理总结如图 1 所示。

2 网络雷达对抗系统涌现性建模

2.1 网络雷达对抗系统探测侦察涌现性建模

2.1.1 系统探测侦察涌现性概念模型

根据定义 2, 网络雷达对抗系统探测侦察涌现性指的就是系统的探测侦察能力与单站探测侦察能力叠加之和的差异。

这里, 用探测侦察区域来表征探测侦察能力, 如图 2 所示。

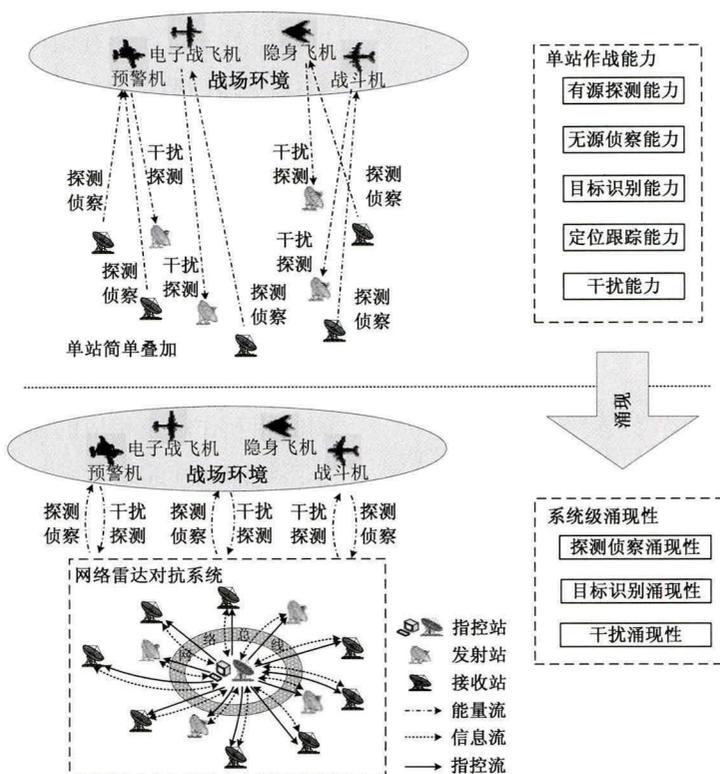


图 1 网络雷达对抗系统涌现性构成及产生机理示意图

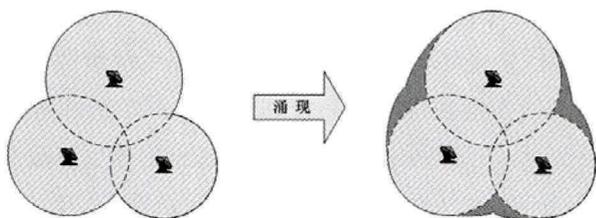


图 2 网络雷达对抗系统探测侦察涌现性示意图

定义 5 探测侦察区域: 指的是当目标处于该区域, (单站或系统) 综合使用有源探测和无源侦察手段探测侦察目标时, 对目标的综合发现概率不小于给定门限值 P_T (通常取 $P_T = 0.1$) 且虚警概率不大于给定门限值 P_F (通常取 $P_F = 10^{-6}$)。

图 2 中, 左图表示网络雷达对抗系统单站探测侦察区域的叠加和, 右图表示系统探测侦察区域, 黑色填充区域即表征网络雷达对抗系统探测侦察涌现性, 该区域内单站无法实现对目标的探测侦察, 而系统具备对目标的探测侦察能力。

简而言之, 网络雷达对抗系统的探测侦察涌现性即指的是系统探测侦察区域不等于各单站探测侦察区域之和的特性。

设网络雷达对抗系统 (Network Radar Countermeasure System, NRCS) 的组成部分为 A_1, A_2, \dots, A_n , 则网络雷达对抗系统的探测侦察涌现性概念模型 $PI^e(NRCS)$ 可表示为公式(1)。

$$PI^e(NRCS) = Area(NRCS) - Area(A_1) \cup Area(A_2) \cup \dots \cup Area(A_n) \quad (1)$$

其中, $Area(x)$ 表示 x 的探测侦察区域。

2.1.2 系统探测侦察涌现性数学模型

网络雷达对抗系统探测侦察涌现性概念模型的核心含义, 就是体现系统探测侦察区域不等于各单站探测侦察区域之和的特性。然而, 单站和系统的探测侦察区域如何计算? 如何体现单站探测侦察区域的简单叠加与系统探测侦察区域的区别? 区域计算模型如何体现系统综合使用有源探测和无源侦察手段的特点? 这些都是进一步研究系统探测侦察涌现性, 构建其数学模型需要回答的问题。

从定义 5 可以看出, 探测侦察区域实际上就是虚警概率给定时从另一个角度描述单站或系统对目标探测侦察的综合发现概率(即综合使用有源探测

和无源侦察手段时对目标的发现概率)。因此, 构建系统探测侦察涌现性数学模型的本质也就是要分别建立单站或系统对目标的综合发现概率计算模型。

设网络雷达对抗系统配置了 $M(M \geq 1)$ 个发

$$\left\{ \begin{array}{l} PI_{a-rj}^k = Q\left[\sqrt{2SNR_j^k}, \sqrt{2\ln(1/P_{fa})}\right] \\ Q[\alpha, \beta] = \int_{\beta}^{\infty} \zeta I_0(\alpha\zeta) e^{-(\zeta^2 + \alpha^2)/2} d\zeta \\ SNR_j^k = \frac{\left(\sum_{i=1}^M \sqrt{\frac{P_i G_i^{ik} G_r^{kj} \lambda_i^2 \sigma^k(U_{Ti}, \varepsilon_j, \varphi_j, \theta_{ij}) (H_i^{ik})^2 (H_r^{kj})^2}{(4\pi)^3 (R_i^{ik})^2 (R_r^{kj})^2 L_u L_j}} \right)^2}{2kTF_j B_j} \cdot I(n_j) \end{array} \right. \quad (2)$$

式中, Q 称为 Marcum Q 函数^[14], SNR_j^k 为接收站 R_j 对目标 k 的平均功率信噪比, P_{fa} 为虚警概率。 P_i 为发射站 $T_i (i=1, 2, \dots, M)$ 的发射功率, λ_i 为发射站 T_i 的信号波长, G_i^{ik} 为发射站 T_i 的发射天线在目标 k 方向上的增益, R_i^{ik} 为目标 k 距离发射站 T_i 的距离, R_r^{kj} 为目标 k 距离接收站 R_j 的距离, G_r^{kj} 为接收站 R_j 的接收天线在目标 k 方向上的增益, $\sigma^k(U_{Ti}, \varepsilon_j, \varphi_j, \theta_{ij})$ 为目标 k 的反射截面积, H_i^{ik} 为发射站 T_i 至目标 k 路径的方向图传播因子, H_r^{kj} 为目标 k 至接收站 R_j 路径的方向图传播因子, $L_u (> 1)$ 为未包括在其它参数中发射站 T_i 的发射系统损耗, $L_j (> 1)$ 为未包括在其它参数中接收站 R_j 的接收系统损耗, k 为波尔兹曼常数, T 为接收机噪声温度, F_j 为接收站 R_j 的噪声系数, B_j 为接收站 R_j 检波器前的噪声带宽, $I(n_j)$ 为接收站 R_j 的脉冲积累改善因子。

需注意的是, 考虑到网络雷达对抗系统目标(如隐身目标)的特性, 目标 k 的反射截面积(RCS)并不是一个固定值, 而与以下 2 个因素有关: ①发射站 i 的工作频段 U_{Ti} ; ②目标与发射站、接收站的相对位置, 即与目标 k 相对于接收站 R_j 的方位角 ε_j 、俯仰角 φ_j 及与发射站 T_i 、接收站 R_j 的双站角 θ_{ij} 有关。因此将目标 k 的 RCS 表示为 $\sigma^k(U_{Ti}, \varepsilon_j, \varphi_j, \theta_{ij})$, 意为当使用不同工作频段的电磁波照射目标时, 随着目标相对于发射站和接收站的位置变化, 目标的 RCS 也是不同的, 其具体数

值通常来源于实测或仿真数据^[15]。

又设目标 k 的辐射源开机概率为 Pd_{on}^k , 接收站 R_j 对目标 k 所载辐射源的截获概率为 Pd_{p-rj}^k , 则系统对目标的无源侦察概率 PI_p^k 可表示为公式(3)。

$$PI_p^k = Pd_{on}^k \cdot \left[1 - \prod_{j=1}^N (1 - Pd_{p-rj}^k) \right] \quad (3)$$

设网络雷达对抗系统采用的融合函数记为 $R(x_1, x_2, \dots, x_n)$ (x_1, x_2, \dots, x_n 为待融合数据), 则网络雷达对抗系统对目标的综合发现概率计算模型可表示为公式(4)。

$$\begin{aligned} PI(NRCS) &= R[PI_p^k, PI_{a-r1}^k, \dots, PI_{a-rN}^k] \\ &= R\{Pd_{on}^k \cdot [1 - \prod_{j=1}^N (1 - Pd_{p-rj}^k)], \\ &\quad PI_{a-r1}^k, \dots, PI_{a-rN}^k\} \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $PI(NRCS)$ 表示网络雷达对抗系统对目标的综合发现概率, PI_{a-rj}^k 为接收站 R_j 对目标 k 的有源探测概率, PI_p^k 为网络雷达对抗系统对目标的无源侦察概率 P_D^k 。

至此, 可构建网络雷达对抗系统探测侦察涌现性数学模型为公式(5)。

式中, $Area(NRCS)$ 为网络雷达对抗系统的探测侦察区域, $Area(R_j)$ 为系统中接收站 R_j 的探测侦察区域; $PI(NRCS)$ 为网络雷达对抗系统对目标的综合发现概率, $PI(R_j)$ 为接收站 R_j 对目标的单站综合发现概率; PI_{a-rj}^k 为接收站 R_j 对目标 k 的有源探

测概率, PI_p^k 为网络雷达对抗系统对目标的无源侦察概率, Pd_{on}^k 为目标 k 的辐射源开机概率, $Pd_{p,rj}^k$ 为接收站 R_j 对目标 k 所载辐射源的无源截获概率;

P_T 为发现概率门限值(通常取 $P_T = 0.1$), P_F 为虚警概率门限值(通常取 $P_F = 10^{-6}$), 其它参数含义见公式(2)。

$$\left\{ \begin{array}{l}
 PI^e(NRCS) = Area(NRCS) - \bigcup_{j=1}^N Area(R_j) \\
 Area(NRCS) = \left\{ \begin{array}{l} \forall \text{点 } p, \text{ 当 } p \in Area(NRCS) \text{ 时,} \\ \text{在点 } p \text{ 处 } NRCS \text{ 对目标 } k \text{ 的综合发现概率 } PI(NRCS) \geq P_T \end{array} \right\} \\
 Area(R_j) = \left\{ \begin{array}{l} \forall \text{点 } p, \text{ 当 } p \in Area(R_j) \text{ 时,} \\ \text{在点 } p \text{ 处接收站 } R_j \text{ 对目标 } k \text{ 的单站综合发现概率 } PI(R_j) \geq P_T \end{array} \right\} \\
 PI(NRCS) = R \left\{ Pd_{on}^k \cdot \left[1 - \prod_{j=1}^N (1 - Pd_{p,rj}^k) \right], PI_{a,r1}^k, \dots, PI_{a,rN}^k \right\} \\
 PI(R_j) = R \left(Pd_{on}^k \cdot Pd_{p,rj}^k, PI_{a,rj}^k \right) \\
 PI_{a,rj}^k = Q \left[\sqrt{2SNR_{rj}^k}, \sqrt{2 \ln(1/P_F)} \right] \\
 Q[\alpha, \beta] = \int_{\beta}^{\infty} \zeta I_0(\alpha \zeta) e^{-(\zeta^2 + \alpha^2)/2} d\zeta \\
 SNR_{rj}^k = \frac{\left(\sum_{i=1}^M \sqrt{2 \frac{P_{ii} G_i^{ik} G_r^{kj} \lambda_i^2 \sigma^k (U_{Ti}, \varepsilon_j, \varphi_j, \theta_{ij}) (H_i^{ik})^2 (H_r^{kj})^2}{(4\pi)^3 (R_i^{ik})^2 (R_r^{kj})^2 L_u L_{rj}}} \right)^2}{2kTF_{rj} B_{rj}} \cdot I(n_{rj})
 \end{array} \right. \quad (5)$$

2.2 网络雷达对抗系统目标识别涌现性建模

2.2.1 系统目标识别涌现性概念模型

网络雷达对抗系统目标识别指的是对目标战场情况的综合研判, 不仅包括目标航迹、速度等运动信息及目标所载辐射源的个体识别信息, 还包括目标的威胁等级评判结果。根据定义 3, 网络雷达对抗系统的目标识别涌现性指的就是系统的目标识别能力与系统中单站的目标识别能力之间的差异。

从信息论的角度来说, 网络雷达对抗系统目标识别涌现性本质上是信息不守恒性的体现。系统中各单站获得目标的有源探测测量信息和无源侦察信息, 而系统通过信息融合, 产生关于目标的新信息, 并纠正消灭关于目标的错误信息。此外, 系统还将信息共享给网络中的各单站, 进一步强化各单站获取目标信息的能力, 完成对目标信息量获取的正循环。这种信息的生灭传递过程才是网络雷达对

抗系统目标识别涌现性的根基。

因此, 这里用信息量的差值来度量系统目标识别能力与单站及子系统目标识别能力的差异。设网络雷达对抗系统的组成部分为 A_1, A_2, \dots, A_n , 网络雷达对抗系统的目标识别涌现性概念模型 $RC^e(NRCS)$ 可表示为公式(6)。

$$RC^e(NRCS) = H_{RC}(NRCS) - \sum_{i=1}^n H_{RC}(A_i) \quad (6)$$

式中, $H_{RC}(x)$ 表示 x 的信息量。

2.2.2 系统目标识别涌现性数学模型

网络雷达对抗系统的目标识别能力与单站目标识别能力之间的差异是与系统的目标识别处理过程相关的, 因此有必要弄清网络雷达对抗系统的目标识别的结构和流程。

网络雷达对抗系统共可获取 3 类信息: ①无源侦察量测信息 M_p ; ②有源探测测量信息 M_A ; ③敌我识别信息 M_{IFF} 。网络雷达对抗系统基于上述 3

类信息实现对目标的目标识别, 其目标识别采用集中分布式结构^[16], 如图 3 所示。需注意的是, 这里为了描述方便, 将图中各接收站获取的信息都所描绘为以上 3 类信息, 但实际上由于接收站工作模式、工作能力和环境因素的限制, 单个接收站可能只能获取上述 3 类信息的一部分, 其信息输入可能

是残缺的。

如图 3 所示, 网络雷达对抗系统对目标的目标识别处理过程分为 5 个步骤, 分别对应图中标注 F_1, F_2, \dots, F_5 的融合节点, 其中融合节点 F_1 和 F_2 位于接收站内部, 而融合节点 F_3, F_4 和 F_5 则位于指控站内, 各节点的功能和输出总结如表 1 所示。

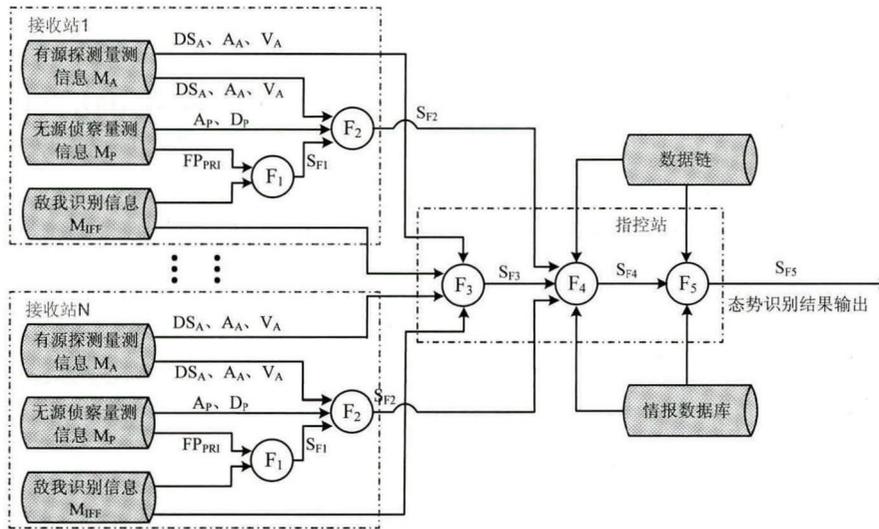


图 3 网络雷达对抗系统目标识别结构流程图

表 1 网络雷达对抗系统目标识别结构

节点编号	节点位置	节点功能	节点输出
F_1	接收站	单站目标特性信息融合	目标单站局部属性信息
F_2	接收站	单站目标状态信息融合及属性信息关联	目标单站局部航迹(含属性)信息
F_3	指控站	系统目标状态信息融合	目标系统量测航迹信息
F_4	指控站	基于目标特性信息的系统目标状态信息融合	目标系统综合航迹信息
F_5	指控站	战场态势决策融合	目标战场态势信息

至此, 网络雷达对抗系统目标识别涌现性概念模型可以进一步表示为公式(7)。

$$RC^e(NRCS) = H_{RC}(NRCS) - \sum_{i=1}^n H_{RC}(A_i) = H(S_{F_5}) - \sum_{i=1}^n H(S_{F_2}^i) \quad (7)$$

式中, $H(S_{F_5})$ 表示网络雷达对抗系统完成目标识别后(即完成节点 F_5 处理后)的信息量, $H(S_{F_2}^i)$ 表

示系统中第 i 个接收站完成单站信息融合(即完成节点 F_2 处理后)的信息量。

从信息论角度, 信息量通常是对随机变量不确定程度的一种度量, 公式(7)中的信息量指的则是目标的不确定程度。公式(7)的含义就是描述系统完成目标识别过程后对目标不确定性程度的减少情况与系统中各单站完成信息融合后对目标不确定程度减少情况的差异。

网络雷达对抗系统的目标战场态势信息由运动属性、辐射源属性、威胁属性三个维度属性组成, 这三个属性彼此间的是相互独立, 分别用随机变量 m, a, t 来表示, 其中运动属性 m 是连续型随机变量, 辐射源属性 a 和威胁属性 t 则是离散型随机变量。设接收站完成单站信息融合(即完成节点 F_2 处理后) m, a, t 的分布函数分别为 $p(m), u(a), r(t)$, 系统完成目标识别后(即完成节点 F_5 处理后) m, a, t 的分布函数分别为 $q(m), v(a), s(t)$, 则由信息熵

理论^[17], 可构建网络雷达对抗系统目标识别涌现性数学模型为公式(8)。

$$\begin{aligned}
 & RC^e(NRCS) \\
 &= (-\int q(m) \ln q(m) dm) - (-\int p(m) \ln p(m) dm) + \\
 & \quad (-\sum_a v(a) \ln v(a)) - (-\sum_a u(a) \ln u(a)) + \\
 & \quad (-\sum_t s(t) \ln s(t)) - (-\sum_t r(t) \ln r(t)) \\
 &= \int p(m) \ln p(m) dm - \int q(m) \ln q(m) dm + \\
 & \quad \sum_a u(a) \ln u(a) - \sum_a v(a) \ln v(a) + \\
 & \quad \sum_t r(t) \ln r(t) - \sum_t s(t) \ln s(t) \quad (8)
 \end{aligned}$$

2.3 网络雷达对抗系统干扰涌现性建模

2.3.1 系统干扰涌现性概念模型

根据定义 4, 网络雷达对抗系统的干扰涌现性是指系统对目标的干扰能力与系统中单站对目标干扰能力之间的差异。这里, 用干扰概率来表征干扰能力。

定义 7 干扰概率: 单位时间内干扰上的目标数与到达总目标数的比例。

设网络雷达对抗系统的组成部分为 A_1, A_2, \dots, A_n , 则网络雷达对抗系统的干扰涌现性概念模型 $JR^e(NRCS)$ 可表示为公式(9)。

$$JR^e(NRCS) = p_J(NRCS) - p_J(\sum_{i=1}^n A_i) \quad (9)$$

式中, $p_J(NRCS)$ 表示网络雷达对抗系统的系统干扰概率, 而 $p_J(\sum_{i=1}^n A_i)$ 则表示系统中各单站独立工作(不考虑作战协同)时的总体干扰概率。

也就是说, 网络雷达对抗系统的干扰涌现性描述的就是系统干扰概率不等于系统中单站独立工作时总体干扰概率的特性。

2.3.2 系统干扰涌现性数学模型

网络雷达对抗系统配置了多个发射站, 对敌各类型来袭飞机的机载雷达实施电子干扰, 保卫我方重要目标。网络雷达对抗系统对敌机雷达实施干扰的过程可以抽象为一个排队系统, 敌机来袭的过程即是排队接受“干扰”服务的过程。对该排队系统

作如下假定和说明:

① 系统部署方式为抵近被保卫目标环形配置, 简化认为其干扰压制区是重叠的, 且干扰频段可覆盖来袭敌机雷达的工作频段。

② 输入过程

设进入系统干扰压制区的目标流是密度为 λ 的泊松流, 即输入过程 $\{N(t), t \geq 0\}$ 参数为 λ 的泊松过程。

③ 排队规则

发射站服务台无损伤, 排队规则是先到先服务, 这里的“先到”指的是系统先收到的满足一定威胁等级的雷达信号。

目标在排队系统中的逗留时间(等待时间与服务时间之和)是有限的, 从目标进入系统干扰压制区且被侦察发现时刻起, 至目标飞至其作战任务空域实施作战任务的时刻止(如轰炸机飞至投弹区域实施投弹的时刻), 这段时间为目标在干扰服务系统中的逗留时间。

考虑到现代空战的特点, 敌机往往采用超低空高速突防, 突防过程中雷达不开机, 直到突入到离我被保卫目标一定距离内才突然打开机载雷达进行瞄准和攻击, 也就是说目标在干扰服务系统中的逗留时间要比干扰服务时间小得多。因此, 可认为干扰服务系统是 1 个损失制排队系统, 即一旦发射站服务台被完全占满则系统无法对后续目标提供干扰服务, 直到有服务台空闲才能继续服务。

④ 服务规则

当网络雷达对抗系统各发射站独立工作时, 采取的是“一对一”式干扰, 即对进入干扰压制区的 1 个目标只安排 1 个发射站服务台进行“干扰”服务, 可认为是多服务台单个服务的系统。而当系统协同工作时, 则采取的是“多对多”式干扰, 将系统中的所有满足假设①的发射站看成是 1 个发射站总服务台, 发射站总服务台每次干扰服务 r 个目标, 最少干扰服务 1 个目标, 即当目标数不足 r 时, 所有目标都接受发射站总服务台的干扰服务, 可认为是单服务台最多服务 r 个的批服务系统。

⑤ 服务时间

当网络雷达对抗系统各发射站独立工作时, 设

系统中共有 s 个发射站服务台, 每个服务台的服务时间相互独立, 且服从参数为 μ 的负指数分布。而当网络雷达对抗系统各发射站系统工作时, 设发射站总服务台的服务时间服从参数为 μ_{NRCS} 的负指数分布。

网络雷达对抗系统“干扰”过程如图 4 所示, 图 4a 表示的是系统内各发射站独立工作的情况, 图 4b 表示的则是系统协同工作的情况。

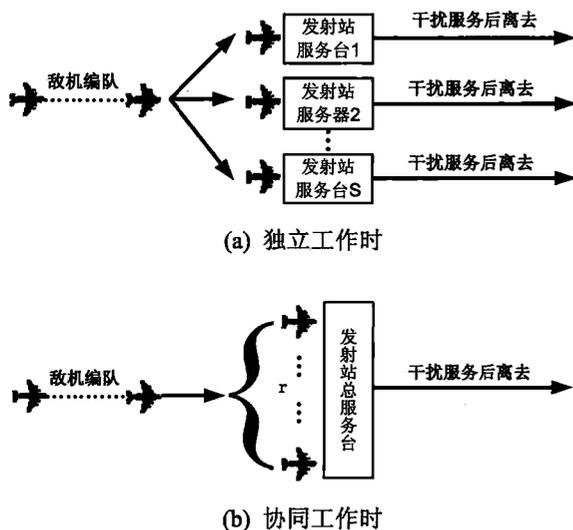


图 4 网络雷达对抗系统“干扰”服务示意图

总而言之, 当网络雷达对抗系统各发射站独立工作时, 系统干扰服务过程可以被抽象为多服务台单个服务的损失制排队系统, 记为 $M/M/s/s$; 当网络雷达对抗系统协同工作时, 系统干扰服务过程则可被抽象为单服务台最多服务 r 个的批服务损失制排队系统, 记为 $M/M^r/1/r$ 。而网络雷达对抗系统干扰涌现性就是指上述两个排队系统干扰服务能力的差异。

下面分别讨论 2 种情况下网络雷达对抗系统的干扰概率。

(1) 网络雷达对抗系统中单站独立工作时

此时, 排队系统为 $M/M/s/s$ 。设 $X(t)$ 表示时刻 t 排队系统中的目标数, 即 $\{X(t), t \geq 0\}$ 为排队系统的状态过程。可以证明^[18], 其状态过程是生灭过程, 生率、灭率分别为公式(10)。

$$\begin{cases} \lambda_k = \lambda, & k = 0, 1, 2, \dots, s-1 \\ \mu_k = k\mu, & k = 0, 1, 2, \dots, s \end{cases} \quad (10)$$

而系统达到平稳状态后的平稳状态的分布为公式(11)。

$$p_k = \frac{\lambda_{k-1}\lambda_{k-2}\dots\lambda_0}{\mu_k\mu_{k-1}\dots\mu_1} p_0 = \frac{1}{k!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k p_0, k = 1, 2, \dots, s \quad (11)$$

$$p_0 = \left[\sum_{k=0}^s \frac{1}{k!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k\right]^{-1}$$

此时, 系统的损失率为公式(12)。

$$p_{JF} \left(\sum_{i=1}^n A_i\right) = p_s = \frac{1}{s!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^s / \left[\sum_{k=0}^s \frac{1}{k!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k\right] \quad (12)$$

因此, 系统的干扰概率为公式(13)。

$$p_J \left(\sum_{i=1}^n A_i\right) = 1 - p_{JF} \left(\sum_{i=1}^n A_i\right) = 1 - \frac{1}{s!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^s / \left[\sum_{k=0}^s \frac{1}{k!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k\right] \quad (13)$$

(2) 网络雷达对抗系统中单站协同工作时

此时, 排队系统为 $M/M^r/1/r$, 其状态过程也是生灭过程, 系统达到平稳状态后的状态分布为公式(14)。

$$q_k = \left(1 - \frac{1}{x_0}\right) \left(\frac{1}{x_0}\right)^k, \quad k = 0, 1, 2, \dots, r \quad (14)$$

其中, x_0 满足 $1 + \frac{\lambda x_0^{r+1}}{\mu_{NRCS}} = \left(1 + \frac{\lambda}{\mu_{NRCS}}\right) x_0^r$, $|x_0| > 1$

系统的损失率为公式(15)。

$$p_{JF}(NRCS) = q_r = \left(1 - \frac{1}{x_0}\right) \left(\frac{1}{x_0}\right)^r \quad (15)$$

系统的干扰概率为公式(16)。

$$p_J(NRCS) = 1 - p_{JF}(NRCS) = 1 - \left(1 - \frac{1}{x_0}\right) \left(\frac{1}{x_0}\right)^r = 1 - \left(\frac{1}{x_0}\right)^r + \left(\frac{1}{x_0}\right)^{r+1} \quad (16)$$

至此, 网络雷达对抗系统的干扰涌现性数学模型 $JR^e(NRCS)$ 可表示为公式(17)。

$$\begin{cases} JR^e(NRCS) = p_J(NRCS) - p_J \left(\sum_{i=1}^n A_i\right) = \\ \frac{1}{s!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^s / \left[\sum_{k=0}^s \frac{1}{k!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k\right] + \left(\frac{1}{x_0}\right)^{r+1} - \left(\frac{1}{x_0}\right)^r \\ s.t. \quad 1 + \frac{\lambda x_0^{r+1}}{\mu_{NRCS}} = \left(1 + \frac{\lambda}{\mu_{NRCS}}\right) x_0^r \text{ 且 } |x_0| > 1 \end{cases} \quad (17)$$

3 仿真示例

限于篇幅,这里以网络雷达对抗系统探测侦察涌现性为例进行仿真分析。

设网络雷达对抗系统含 1 个发射站和 3 个接收站,发射站位置为(0, 0) km, 3 个接收站成倒 Y 型布站,分别位于(0, 100) km, $(50\sqrt{2}, -50\sqrt{2})$ km, $(-50\sqrt{2}, -50\sqrt{2})$ km 处;发射站发射功率为 800 kW, 天线增益为 45 dB, 发射信号载频为 9 GHz; 3 个接收站天线增益分别为 36 dB、38 dB、32 dB, 无

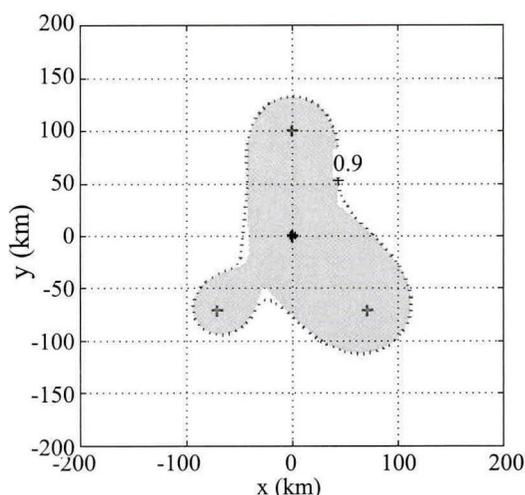


图 5 系统探测侦察涌现性仿真 1(发现概率门限为 0.9)

图 5 和图 6 中,“*”表示发射站所在位置;“+”表示接收站所在位置;阴影填充区域表示单站探测侦察区域的叠加和;虚线包围的区域表示网络雷达对抗系统探测侦察区域;上述 2 个区域的差集即表示网络雷达对抗系统探测侦察涌现性区域。

可以看出,当网络雷达对抗系统存在信息融合和共享时,系统出现探测侦察涌现性,且当发现概率门限值越低时,系统探测侦察涌现性表现的越明显。仿真结果说明信息融合共享及单站间的协同机制有累积效果,使系统从探测侦察同质涌现性(发现概率门限为 0.9 时的效果)升华到探测侦察异质涌现性(发现概率门限为 0.1 时的效果),此时当目标处于探测侦察异质涌现性区域时,各单站无法发现目标,而系统可以发现目标,与系统涌现性产生机理分析相符。

源截获概率分别为 0.8、0.75、0.85,其它参数相同:接收损耗为 10 dB,接收机带宽为 3 MHz,噪声系数为 10;目标雷达截面积为 10 m^2 ,目标所载辐射源开机概率为 0.1;网络雷达对抗系统存在信息融合和共享,融合规则为秩 K, $K=1$ 的融合准则,即只要有一个接收站发现目标即认为系统发现目标;单站及系统虚警概率门限均为 10^{-6} 。此时,网络雷达对抗系统探测侦察涌现性如图 5 和图 6 所示。

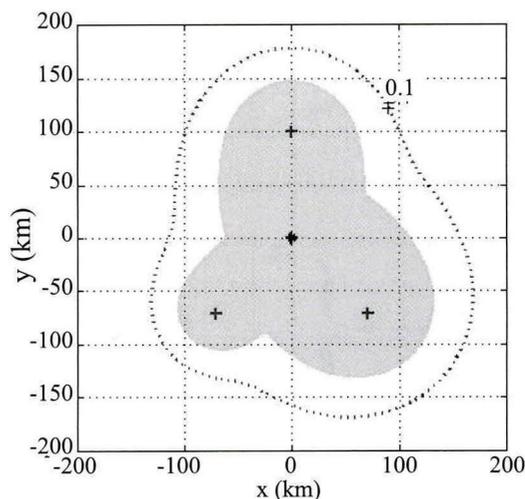


图 6 系统探测侦察涌现性仿真 2(发现概率门限为 0.1)

4 结论

网络雷达对抗系统涌现性是系统复杂特性的典型表现,是组成效应、结构效应、交互效应、环境效应四者共同作用的结果,具体表现为系统探测侦察涌现性、系统目标识别涌现性和系统干扰涌现性。本文阐释了网络雷达对抗系统涌现性的内涵,构建了 3 种系统涌现性的概念模型和数学模型。这些模型的构建为研究这一复杂综合电子战系统的作战效能提供了新的思路,下一步将应用这些模型研究如何控制网络雷达对抗系统的涌现性,进而研究其作战运用问题。

参考文献:

- [1] Jeremiah Gertler. F-35 Joint Strike Fighter (JSF) Program2: Background and Issues for Congress [R].

- USA: Congressional Research Service, 2011, 4: 2-7.
- [2] 张新相, 刘振献, 李蔚恒, 等. 雷达与电子战设备一体化设计发展述评 [J]. 空军装备研究, 2009, 3(6): 59-61.
- [3] 张东坡, 彭小名, 陈顺阳. 综合一体化电子战系统的发展探讨 [J]. 舰船电子对抗, 2010, 33(1): 29-32.
- [4] 姜秋喜. 网络雷达对抗系统导论 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [5] 狄增如. 探索复杂性是发展系统学的重要途径 [J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(S1): 37-42.
- [6] 金士尧, 黄红兵, 任传俊. 基于复杂性科学基本概念的 MAS 涌现性量化研究 [J]. 计算机学报, 2009, 32(1): 17-29.
- [7] 杨耀华, 王维平, 包战. 面向作战网络的层次化涌现建模方法 [J]. 系统仿真学报, 2011, 23(12): 2777-2782. (Yang Yaohua, Wang Weiping, Bao Zhan. Hierarchic Emergence Approach for Networked Combat Model [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2011, 23(12): 2777-2782.)
- [8] 夏璐, 邢清华, 李响. 区域反导作战体系涌现性评价模型研究 [J]. 现代防御技术, 2012, 40(3): 24-28.
- [9] Alexandra Brintrup, Tao Gong, Andreas Ligtoet, et al. Distributed Control of Emergence: Local and Global Anti-Component Strategies in Particle Swarms and Ant Colonies [C]// IEEE International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems. USA: IEEE, 2009: 216-222.
- [10] Vivek Singh, Garima Singh, Suparna Pande. Emergence, Self-organization and Collective Intelligence-Modeling the Dynamics of Complex Collectives in Social & Organizational Settings [C]// International Conference on Computer Modeling and Simulation. USA: IEEE, 2013: 182-189.
- [11] 魏巍, 郭和平. 关于系统“整体涌现性”的研究综述 [J]. 系统科学学报, 2010, 18(1): 24-28.
- [12] 许国志. 系统科学 [M]. 上海: 上海科技教育出版社, 2000.
- [13] 苗东升. 论系统思维(六): 重在把握系统的整体涌现性 [J]. 系统科学学报, 2006, 14(1): 1-5.
- [14] 雷达系统设计 MATLAB 仿真 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [15] 宫健, 王春阳, 李为民, 等. 隐身飞机模型双站雷达截面积仿真 [J]. 探测与控制学报, 2009, 31(1): 46-48.
- [16] 刘方正. 网络雷达对抗系统的侦察效能分析与评估 [D]. 合肥: 电子工程学院, 2012.
- [17] Dominik Fisch, Martin Janicke, Bernhard Sick, et al. Quantitative Emergence— A Refined Approach Based on Divergence Measures [C]// IEEE International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems. USA: IEEE, 2010: 94-103.
- [18] 孙荣恒, 李建平. 排队论基础 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.

《系统仿真学报》荣获“2014 中国最具国际影响力学术期刊”证书

由中国学术期刊(光盘版)电子杂志社与清华大学图书馆联合成立的中国学术文献国际评价研究中心, 以美国汤森路透 Web of Science 收录的 1.2 万余种期刊为引文统计源, 首次研制发布了 2012《中国学术期刊国际引证年报》(CAJ-IJCR 年报)。第一次给出了我国 5600 余种中外文学术期刊总被引频次、影响因子、半衰期等各项国际引证指标, 并采用了新的国际影响力综合评价指标 CI 对期刊排序, 发布了“中国最具国际影响力学术期刊”(排序 TOP5%)和“中国国际影响力优秀学术期刊”(排序 TOP5-10%), 在国内外学术界产生了较大反响。之后, 2013 年版年报, 将引文统计源期刊扩展到 1.44 万多种。目前, 2014 版国际、国内年报与 TOP5%和 TOP5-10%期刊的遴选业已完成, 《系统仿真学报》被列入“2014 中国最具国际影响力学术期刊”行列。

我学报连续 2 年被列入 TOP5%国内一流的中国最具国际影响力学术期刊, 走向世界, 进入国际一流, 指日可待!