

中图分类号: N 945. 12 文献标识码: A

基于复杂网络的舰艇编队协同反导作战模型研究

夏 昱¹ 毛旭东¹ 尹延涛¹ 姚 斌²

(1. 海军航空工程学院 科研部, 山东 烟台 264001; 2. 大连舰艇学院, 辽宁 大连 116018)

摘要: 现代战争已进入网络化作战时代, 利用小世界网络具有较小的最短路径和较大的聚类系数, BA 无标度网络的择优连接特性, 提出传感器之间采用 NW 小世界网络连接, 决策器之间采用 BA 无标度网络连接, 建立了舰艇编队协同反导作战网络模型, 应用复杂网络的若干特征参数对作战网络效能进行了仿真分析。通过仿真结果的对比, 表明在网络中心战条件下, 提出的舰艇编队协同反导作战网络实现了战场信息互通和共享, 能够大大提高舰艇编队的作战效能。

关键词: 复杂网络; 舰艇编队; 小世界网络; 无标度网络

Research on Ship Formation Cooperation Anti-missile Operation Model Based on Complicated Network

XIA Yu¹, MAO Xudong¹, YIN Yantao¹, YAO Bin²

(1. Department of Scientific Research, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China, 2. Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China)

Abstract: Modern wars enter the times of network operation. Sensors connect by NW small world network with small shortest path length and big clustering coefficient, and decision makers connect by BA scale-free network with the excellence selection connection feature, so the ship formation cooperation anti-missile operation network is built. Simulation analysis is carried out by the feature parameters of complicated network. The results show that on the condition of network centre operation, the proposed network realizes the communications and share of battle field information, so greatly enhances the ship-formation operation effects.

Key words: complicated network; ship formation; small world network; scale-free network

1 引言

“网络中心战”将成为未来战争的主要作战样式^[1], 通过战场空间各个作战实体之间的网络化连接, 将信息优势转变为作战行动优势, 使各

分散配置的部队实现战场态势的共同感知, 从而通过同步与协同, 发挥最大作战效能。

复杂网络是近来复杂性理论研究的热点问题, 脱胎于 20 世纪 60 年代两位匈牙利数学家 Erdos 和 Renyi 创造的随机图理论^[2], 是人们描述复杂系统内部结构的一种新的手段, 被誉为网络

基金项目: 海军装备部预研资助项目(4010804040201)

的新科学。现代战争更加突出地表现为基于网络的体系对抗,战场的每一方都是一个以作战平台中特定方式耦合的动态网络,而这正是复杂网络关注的焦点。目前复杂网络的研究主要集中于信息网络、生物网络和社会网络等领域,将其运用到作战领域的成果^[3-5]还较少。

舰艇编队受敌方飞航式反舰导弹的威胁日益增加,利用“网络中心战”思想,将舰艇编队协同反导作战体系作为复杂网络进行研究,具有重要的军事理论和应用价值。本文在系统地研究舰艇编队协同反导作战体系结构的基础上,构建了作战网络模型,并使用特征参数对该网络进行系统的研究仿真,提出的网络具有较好的作战效能。

1 复杂网络理论

复杂网络的基本模型有 ER 随机网模型、小世界网模型和 BA 无标度网模型等。ER 随机网模型^[2]由匈牙利数学家 Paul Erdos 和 Alfred Renyi 提出,开创了研究复杂网络中貌似随机的拓扑复杂性的新纪元。ER 随机网络模型和随机图理论大大拓展了网络研究的范围,奠定了网络理论,尤其是大规模网络研究的基础。

WS 小世界网模型^[6]由 D. J. Watts 和 S. H. Strogatz 提出,采用介于完全规则网络和完全随机网络之间的小世界网络模型,来刻画庞大的网络中大多数节点间有较短的连结(路径)的性质。它从规则网络模型开始,以概率 P 随机地“重连”每条边,同时保证没有自连接和重复边(即保持为一个简单图)。WS 小世界网模型具有规则网的大平均集群系数和随机网络的小平均距离特征,即“小世界效应”,其表现为“六度分离概念”或小世界现象。

由于 WS 小世界模型构造算法中的随机化过程有可能破坏网络的连通性,Newman 和 Watts 提出了 NW 小世界网络模型^[7],该模型是通过用“随机化加边”模式来取代 WS 小世界网络模型构造中的“随机化重连”。

BA 无标度网模型^[8]由 A. L. Barabasi 和 R. Albert 提出,许多现实世界中的复杂网络的连接度分布具有某种幂指数的形式,由于幂律分布没有明显的特征长度,该类网络称为为无标度网络。网络模型包括:增长和优选。前者强调复杂网络是一个开放系统,新的基本单元不断加入,节点总数在不断增加;后者强调节点连接新边的概率,应该单调依赖于它已有的度,即所谓“富者更富”法则,网络的无标度特性为节点度服从幂律分布。

根据其基本单位之间是否存在相互作用,网络可抽象地表示为由点和边构成的图,采用邻接矩阵的形式表示网络结构,数组中元素的值为 0 时,表示对应的两个节点间没有边相连,反之当元素值等于 1 时,表示有边相连,由此可以构造网络的邻接矩阵,从而便于对网络参数进行分析。

为研究不同类型的网络在结构上的共同特征,常被用来分析复杂网络的最重要的几个统计特征为:

网络的边数(L):即网络包含的边的数目。

度(Degree):度定义为节点的邻边数,网络模型中一个节点的度值往往反映了它的重要程度。

特征路径长度(CPL):也称平均路径长度,定义为网络中任意两个节点间的距离的平均值。

$$CPL = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i>j} d_{ij}$$

式中 d 定义为节点 i 和 j 之间的距离,指连接这两个节点最短路径上的边数。网络的 CPL 表示了网络传递信息的能力,从一定意义上反映了网络的反应能力。

聚集系数(The Clustering Coefficient):可以表示该作战网络的紧密程度,即聚集程度。

2 舰艇编队协同反导作战网络模型

2.1 作战单元及作战过程的抽象

基于网络中心战的舰艇编队具有协同作战能力。舰艇编队反导作战网络是一个由链路连接节点的集合,节点是网络中基本元素,节点和

链接分别相当于图论中的顶点和边。敌方的飞航式反舰导弹作为目标节点 T; 舰艇上的雷达、声纳、光电传感器、参与作战的预警机、岸基观通站雷达和天基侦察卫星等作为探测传感器节点 S; 编队内各个舰艇的指挥控制中心作为决策器节点 D; 舰艇上的导弹、舰炮、鱼雷、水雷、各种干扰设备与参与作战的飞机、潜艇上的武器等作为影响器节点 I, 由目标节点 T、传感器节点 S、决策器节点 D 及影响器节点 I 组成整个信息网络, 从而极大提高了信息共享能力和部队行动速度。各节点的功能如下:

(1) 目标节点 T: 是所有具有军事价值的节点, 如反舰巡航导弹等。

(2) 传感器节点 S: 用于接收来自其他节点的可观测信息(例如目标位置和速度等信息), 并把这些信息发送给决策者即指挥员。

(3) 决策器节点 D: 接收来自传感器的信息, 并对当前及将来的部署做出决策。

(4) 影响器节点 I: 它接收决策者指令, 与其他节点相互作用并影响其状态, 也称响应节点。

2.2 基本假设

(1) S 与 T 只有单向连接, 表示传感器侦察到敌方目标。

(2) I 与 T 只有单向连接, 表示使用作战武器攻击地方目标。

(3) 每个 S 或 I 只能与一个 D 连边, 且为双向边, 表示了 S、I 与 D 之间的信息传递, 同时又保证了每个 S 或 I 不接收来自不同 D 的命令, 造成冲突。

(4) 每个 D 可以与若干个 S 或 I 连边(双向), 表示了每个决策器控制的传感器和影响器数量。

(5) 不同的 D 之间可以连边(双向), 表示不同决策单位的组织协同。

由以上基本原则和假设, 可以得到作战网络的抽象表示图, 如图 1 所示。

2.3 网络连接方式

在非战场情况下, 各类节点之间的连接与否是相对确定的; 但在战场情况下, 海况、天气及敌

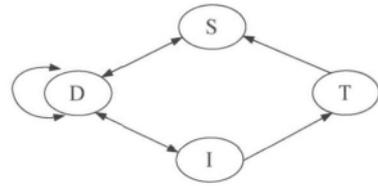


图 1 作战网络的抽象表示

Fig. 1 Abstraction of combat network

方干扰等因素会造成这些连接的不确定性。

考虑作战情况下的不确定性, 假设 T 与 D, I 与 T 之间采用随机连接。

由 2.2 假设(3)知, 每个 S 或 I 只能与一个 D 互连, 因此对每个 S 或 I 从所有的 D 中随机选择一个与之互联。

考虑传感器之间的连接, 而小世界网络模型具有规则网的大平均集群系数和随机网络的小平均距离特征, 即“小世界效应”, 因此传感器 S 之间采用小世界网络互连, 建立了 NW 小世界网络, 研究它们对整个作战网络带来的影响。

考虑舰艇指挥控制中心之间的协同, 编队指挥舰的指控中心是该编队的中央指挥决策实体, 它在网络中应该具有较高的连接度, 而无标度网络具有择优连接特性, 因此决策器 D 之间采用 BA 无标度网络进行互连,

在确定了各类参数及网络连接方式之后就可以生成作战网络模型。

3 作战网络分析

3.1 模型仿真算例

假设有一个由 10 艘舰艇组成的舰艇编队, 每艘舰艇的指控中心看成 1 个决策器 D; 舰艇上的导弹系统、前后主炮、深弹、火箭弹等武器装备及作战飞机、潜艇上的作战武器可以抽象为 20 个影响器 I; 舰艇上的雷达、声纳、光电传感器、参与作战的预警机、岸基观通站雷达和天基侦察卫星等抽象为 20 个传感器 S; 敌方发射 5 枚飞航式反舰导弹抽象为 5 个目标 T。假设 T、S、D、I 四类节点的数目分别为 N_T 、 N_S 、 N_D 、 N_I 。这样, 整个编队就能抽象为 $N_S = 20$ 、 $N_I = 20$ 、 $N_D = 10$ 、 $N_T = 5$ 的一个

作战网络;各节点间连接概率为: $P_{ST} = 0.3$, $P_{DI} = 0.8$,传感器 S 组成的 NW 小世界网络中 ,加边概率 P_{DD} 分别取 0.2 和 0.4 ,决策器 D 之间采用 BA 无标度网络进行连接。

3.2 模型参数分析

分别研究了传感器和决策器都没有互连、传感器之间采用 NW 小世界网络连接 ($p = 0.2$, $p = 0.4$)、决策器之间采用 BA 无标度网络连接及同时利用 NW 小世界网络连接传感器 BA 无标度网络连接决策器的舰艇编队反导作战网络 ,利用 Pajek 软件得到各个网络模型特征参数。表 1 给出了传感器和决策器都没有互连的对比结果。图 2 给出了该作战网络的度分布。

表 1 传感器和决策器都没有互连的作战网络模型特征参数

Tab.1 Characteristic parameters of combat network which Sensor and decision are no interconnection

特征参数	N	L	CPL	平均度	C (介数)	平均聚集系数
数值	55	127	5.025	24	2.309	0.236

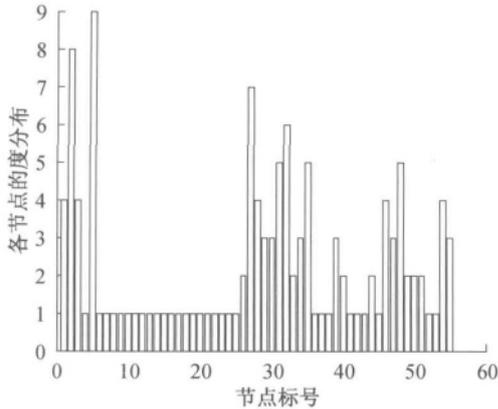


图 2 传感器和决策器都没有互连的作战网络的度分布

Fig.2 Combat network degree distribute of Sensor and decision making are no interconnection

传感器 S 之间采用 NW 小世界网络连接后 ,各传感器网络之间的互连如图 3 和图 4 所示 ,随着加边概率 p 增加 ,网络的边数增加 ,传感器节点 (第 6 到第 25 个节点) (如图 5 和图 6 所示) 的明显增加。表 2 给出了传感器采用 NW 小世界网络连接的作战网络模型参数 ,与表 1 相比 ,节点的平均度和聚集系数增大 ,网络重连能力随之加强 ;平均路径长度降低 ,网络的信息传递能力增强。

均度和聚集系数增大 ,网络重连能力随之加强 ;平均路径长度降低 ,网络的信息传递能力增强。

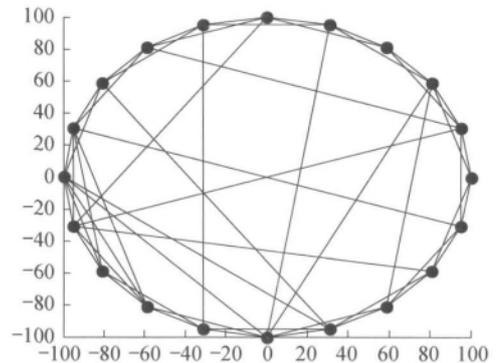


图 3 NW 小世界网络连接的传感器节点 ($p = 0.2$)

Fig.3 NW small world network connection of the sensor nodes ($p = 0.2$)

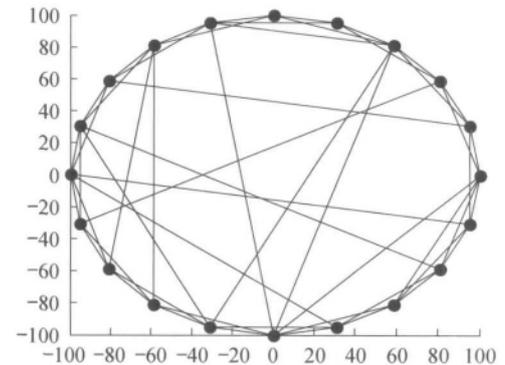


图 4 NW 小世界网络连接的传感器节点 ($p = 0.4$)

Fig.4 NW small world network connection of the sensor nodes ($p = 0.4$)

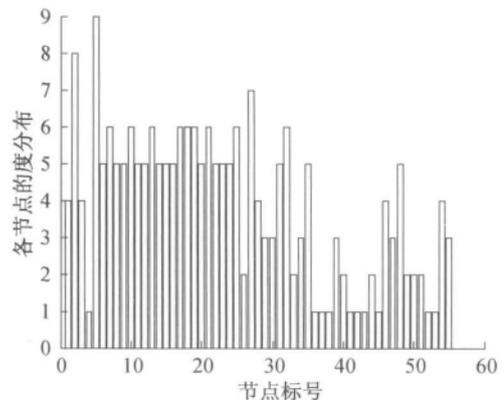


图 5 传感器采用 NW 小世界网络连接的作战网络的度分布图 ($p = 0.2$)

Fig.5 Degree distribute of combat network which using NW small world network connection ($p = 0.2$)

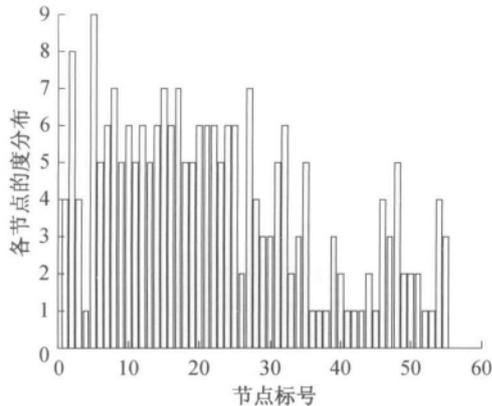


图 6 传感器采用 NW 小世界网络连接的作战网络的度分布图($p=0.4$)

Fig. 6 Degree distribute of combat network which sensor using NW small world network connection($p=0.4$)

决策器之间采用 BA 无标度网络连接后,各决策器之间的连接如图 7 所示,作战网络各节点的度分布如图 8 所示,表 3 给出了作战网络模型特征参数,决策器节点(第 26 到第 35 个节点)的度明显增加,与表 1 中的参数进行对比就能发现,通过决策器之间的互联,整个网络的平均路径长度降低,网络传递信息能力增强;平均聚集系数增加,提高了

网络的重连能力,增强了网络的抗毁性。

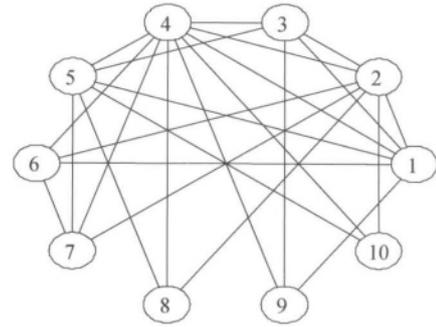


图 7 采用无标度网络互连的决策器节点
Fig. 7 Scale-free network interconnection decision device node

传感器之间采用 NW 小世界网络连接,且决策器之间采用 BA 无标度网络连接后,图 9 中显示该网络传感器节点(第 6 到第 25 个节点)、决策器节点(第 26 到第 35 个节点)的度都增加。表 4 的结果表明,与仅传感器之间采用 NW 小世界网络或仅决策器之间采用 BA 无标度网络相比,该网络虽然增加了节点的平均度,使得通信或传输成本增加,但是具有更小的平均路径长度和更大的平均聚集系数,增强了网络的传输能力,提高了网络的鲁棒性和抗毁性。

表 2 传感器采用 NW 小世界网络连接的作战网络模型参数

Tab. 2 Model parameters of combat network which sensor using NW small world network connection

特征参数	N	L	CPL	平均度	C (介数)	平均聚集系数
NW 小世界网络($p=0.2$)	55	215	3.382 73	3.909	0.124 54	0.053 37
NW 小世界网络($p=0.4$)	55	223	3.331 56	4.055	0.143 50	0.056 07

表 3 决策器采用 BA 无标度网络连接的作战网络模型特征参数

Tab. 3 Model characteristic parameters of combat network which decision making unit using BA scale-free network connection

特征参数	N	L	CPL	平均度	C (介数)	平均聚集系数
数值	55	161	3.14	2.927	0.233	0.008 856

表 4 传感器采用 NW 小世界网络连接且决策器采用 BA 无标度网络连接的作战网络模型参数

Tab. 4 Model parameters of combat network which sensor using NW small world network connection and decision making unit using BA scale-free network connection

特征参数	N	L	CPL	平均度	C (介数)	平均聚集系数
BA 网络 NW 网络	55	257	2.795 29	4.673	0.244 22	0.062 052 190 909 09

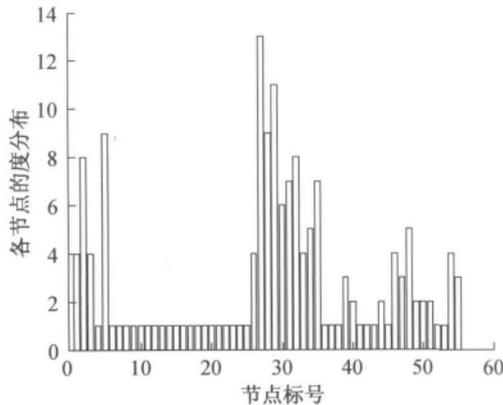


图8 决策器之间采用无标度网络连接的作战网络的度分布图

Fig. 8 Combat network degree distribute of decision making unit between the scale-free network connection

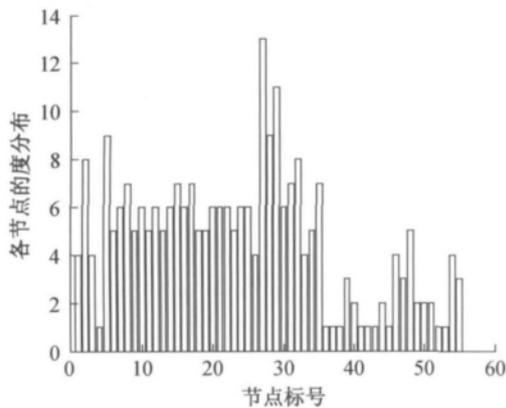


图9 传感器之间采用NW小世界网络连接且决策器之间采用BA无标度网络连接的作战网络的度分布图

Fig.9 Degree distribute of combat network which sensor using NW small world network connection and decision making unit using BA scale-free network connection

4 结论

本文提出了一个基于复杂网络的作战描述模型,把复杂的战场抽象成网络中的节点和边,将传感器之间采用NW小世界网络连接、决策器之间采用BA无标度网络进行连接,并通过若干特征参数对作战网络效能进行了分析。结果表明,采用该网络连接后,整个舰艇编队的反导作

战效能大大提高。

参考文献:

[1] 武思军. 防空反导网络化作战发展研究[J]. 现代防御技术, 2012, 40(1): 55-59.
 WU Sijun. Development research of air defense missile networking combat [J]. Modern Defense Technology, 2012, 40(1): 55-59.

[2] Paul E, Alfred R. On the evolution of random graphs [R]. [s.l.]: Mathematical Institute of the Hungarian Academy of Sciences, 1960.

[3] Cares Jeffery R. An information age combat model [R]. [s.l.]: Paper for the 9th ICCRTS, 2004.

[4] 谭东风. 一种基于随机映射的战斗效能模型[J]. 国防科技大学学报, 2006, 28(6): 102-107.
 TAN Dongfeng. A combat effectiveness model based on random map [J]. Journal of National Defense University of Science and Technology, 2006, 28(6): 102-107.

[5] 谭东风, 张辉. 随机交战的无标度网络[C]//全国复杂网络学术会议论文集, 2006.
 TAN Dongfeng, ZHANG Hui. Random scale-free network [C]//The Complicated Network Academic Conference Proceedings, 2006.

[6] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of 'Small-world' networks [J]. Nature, 1998, 393(6): 440-442.

[7] Newman M E J, Watts D J. Renormalization group analysis of the small-world network model [J]. Phys Lett A, 1999, 263: 341-346.

[8] Barabasi A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks [J]. Science, 1999, 286(3): 509-512.



夏昱 男(1984-), 浙江温岭人, 博士生, 主要研究方向为舰艇编队反导网络。



毛旭东 男(1979-), 山东莱州人, 工程师, 硕士, 主要研究方向为装备保障。