

采用 HK 模型的防空反导作战网络建模分析

孙成雨, 申卯兴, 别晓峰, 任俊亮

(空军工程大学防空反导学院, 西安, 710051)

摘要 采用 HK 网络模型对防空反导作战网络进行建模, 对网络度分布、集群系数、平均距离的统计特性进行分析。将网络模型与典型树状结构的防空反导网络和基于 BA 无标度模型的网络进行比较, 表明基于 HK 模型的防空反导作战网络具有较好的集群系数和无标度特性, 同时表明改变 TF 连接概率进行防空反导网络设计具有更好的灵活性。

关键词 防空反导; 复杂网络; 集群系数; 三角形形成法

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2015.02.006

中图分类号 O157.6 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2015)02-0024-05

Analysis of Modeling An Air and Missile Defense Operational Network Based on HK Model

SUN Cheng-yu, SHEN Mao-xing, BIE Xiao-feng, REN Jun-liang

(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: A model of air and missile defense system network is built up by adopting HK complex network model, and its degree distribution, clustering coefficient and average path length are studied. Compared the statistical characteristics of this model with those of the typical air and missile defense system network based on small-world networks, the result shows that the air and missile defense operational network based on HK complex network model has a good clustering coefficient and scale-free property. And simultaneously the model has more TF probability, and can also provide more advantages for the personnel in special field to design the air and missile defense system network

Key words: air and missile defense; complex networks; clustering coefficient; triad formation

网络化战争体系对抗是一个前沿而又极具挑战性的重大军事课题。网络是体系形成的基础, 更是体系的复杂性之源。在网络化空天作战中, 各作战节点正是通过这个规模庞大, 结构及连接关系复杂的网络平台进行战场信息的交互, 不断获得战场信息优势。运用复杂网络理论, 研究在网络化防空反

导作战体系的建立运行、管理控制之中, 如何使网络获得良好的鲁棒性、抗毁性, 具有重要的意义^[1-3]。

在防空反导作战网络的研究中, 有关作战体系和系统拓扑建模的研究为网络建设提供了很好的理论支撑。在网络化战争中, 作战网络会同时具有多种典型网络拓扑特征, 如小世界特性、无尺度特性、

收稿日期: 2014-09-28

作者简介: 孙成雨(1989—), 男, 山东临沂人, 博士生, 主要从事防空反导作战网络体系优化研究。E-mail: chengyu0539@163.com

引用格式: 孙成雨, 申卯兴, 别晓峰, 等. 采用 HK 模型的防空反导作战网络建模分析[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2015, 16(2): 24-28. SUN Chengyu, SHEN Maoxing, BIE Xiaofeng, et al. Analysis of Modeling an Air and Missile Defense Operational Network Based on HK Model[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2015, 16(2): 24-28.

不均匀性、脆弱性与鲁棒性并存等等^[4]。路建伟^[1]和张强^[6]分别利用无标度网络模型和小世界网络模型对防空反导网络进行建模,分析了网络的复杂性。但是,小世界模型显示高集群系数却不显示无标度特性,BA 无标度模型又不显示高集群系数。Holme 和 Kim 提出 HK 模型在网络的形成过程中选择邻接节点形成三角形,实现了对无标度网络集群系数的控制,这一方法在网络模型的构建中具有很大价值。本文利用 HK 模型构建防空反导作战网络,对网络的统计特性进行分析。

1 复杂网络基本模型

复杂网络中的小世界现象和无标度性质的发现,使复杂网络研究得到广泛关注,成为各领域研究复杂系统的一项具有挑战性前沿课题。常用的模型主要有:ER 随机图、WS 小世界网模型及其改进模型和 BA 无标度网模型、可调集群系数的 HK 模型、局域世界模型等^[6]。

1.1 WS 小世界模型

规则网络的研究中,常采用具有高集群特性的最近邻耦合网络。在 ER 随机图中,网络具有较小的平均距离但不具有较高的集群特性。实际的复杂网络实证研究表明它的特性是位于规则和随机之间的,为了研究表述真实网络的性质,Watts 和 Strogatz 在 1998 年引入小世界网络模型,较好地刻画了网络中大多数节点之间存在的较短路径的特性。

WS 小世界模型的构造方法是对一个规则网络进行随机化重连或者随机化加边。该模型具有较小的平均路径长度和较大的平均集群系数特征。它的度分布近似 Poisson 分布,在度平均值 $\langle k \rangle$ 处存在峰值,接着呈指数形式快速衰减。

1.2 BA 无标度模型

在复杂网络度分布函数的研究中,人们发现诸如 Internet、新陈代谢网等常见网络的度分布具有幂律形式,它们连接度并不具有比较明显的特征长度,而是表现出一种无标度的特性,故称为无标度网络。1999 年,Barabási 和 Albert 提出无标度网络模型来解释度分布幂律形式的形成原因,称为 BA 无标度模型。

BA 无标度模型考虑实际网络中的增长和优先连接特性进行网络构造,该模型同样具有较小的平均距离,当网络规模充分大时,网络不具有明显的集群特性。

1.3 HK 网络模型

WS 小世界模型显示高集群系数却不显示无标度特性,BA 无标度模型显示无标度特性却又具有高集群系数。在实际网络的研究中,同时具有高集群系数和无标度特性的网络就很有意义。Holme 和 Kim 利用三角形形成法在网络生成的过程中有意控制节点连接成三角形的数量,改变网络的集群系数,形成了 HK 网络模型^[7],较好地解决了网络中集群系数与无标度特性的统一。

2 基于 HK 模型的防空反导网络构建

在防空网络化向防空反导网络化发展的过程中,新的武器系统、预警装备、通信系统的加入会不断完善体系组成,构成更加复杂,精准、同步的作战系统。

2.1 网络基本组成

在一个典型的树状结构的防空反导作战网络中,将防空反导作战体系中的各个作战资源简化为节点,主要包括:1 个战役级指挥控制中心,下属 10 个防空导弹战术级指挥控制中心和 3 个预警雷达战术级指挥控制中心;1 个防空导弹战术级指控中心配置 4 个防空导弹火力单位,每个预警雷达战术级指控中心配置 3 个预警雷达单位^[1]。

在网络模型的构建中,需要先对网络初始模型进行假设,然后再利用网络生成方法对网络进行构建。假设初始的网络结构为:1 个战役级指挥控制节点,1 个防空导弹战术级指挥控制中心、1 个预警雷达战术级指挥控制中心、1 个防空导弹火力单位,1 个预警雷达单元,它们之间按照上下级关系相连,防空导弹战术级指控中心与预警雷达战术级指控中心也相连。此基本网络包含 5 个节点,5 条边。

2.2 基于 HK 模型的防空反导网络

在 Holme 和 Kim 引入的 HK 模型中,最重要的一点是采用了三角形形成法(TF 法),其基本原理是:如果节点 i 和节点 j 之间的连边是在上一步中利用优选法则^[6]进行连接的,那么随机选择节点 j 的一个相邻节点与节点 i 相连,这样构成一个新的三角形。

在初始网络结构的基础上利用 HK 模型生成防空反导网络的基本步骤可以表述为:

1) 从初始节点数目 $m_0 = 5$ 的基本网络开始,每次引入一个带有 $m = 4$ 条边的新节点;

2) 4 条边随机连接到其他已经存在的节点,第一条边采用优选法进行连接,剩下的 3 条边以概率 p_i 进行 TF 连接,以概率 $1 - p_i$ 进行优选连接。

已知网络的初始节点数 $m_0 = 5$, 每个新增的节点引入 $m = 4$ 条边, 网络最终的节点数为 63, 选择 TF 连接的概率 $p_t = 0.1$, 可得基于 HK 模型的防空反导网络模型见图 1。

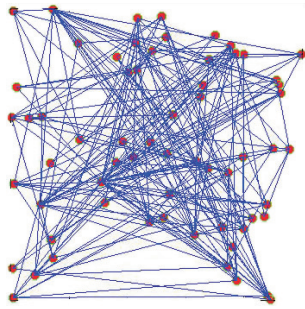


图 1 基于 HK 模型的防空反导网络

Fig.1 Air and missile defense operational network pattern based on HK model

3 防空反导网络统计特性分析

在复杂网络的研究中, 为了刻画网络的复杂性, 分析网络的统计特征, 常采用的参数有: 网络的平均距离 $\langle l \rangle$ 、节点 i 的度 k_i 、网络节点的度分布 $P(k)$ 、网络的集聚系数 C 等。这些参数也能反映防空反导网络的特性, 同时这些统计特性也描述了防空反导作战网络的性能。

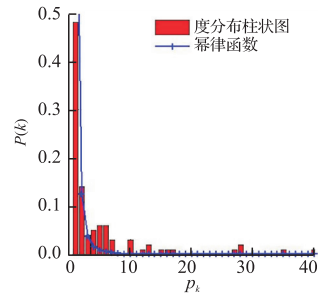
3.1 节点的度分布

复杂网络理论中, 节点的度 k_i 是指与此节点相连的邻边数。节点的度分布 $P(k)$ 是指网络中任意选择一个节点, 它的度为 k 的概率。

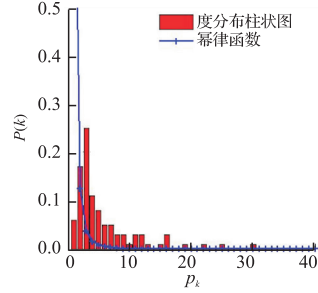
在作战网络中, 作战节点的度表示能够直接与该作战节点相连接而进行信息传递的作战单元的数量。对于无标度分布的网络, 只需要改变大约 5% ~ 10% 链路的部署, 就可以重新配置网络化效能, 提高了作战网络节点的抗打击能力。

HK 模型和 BA 模型都可由幂指数为 3 的幂律函数近似描述。图 2 给出了 TF 连接采用不同概率 p_t 时, 基于 HK 的防空反导网络模型的度分布与幂律分布函数 $P(k) \sim k^{-3}$ 的比较。

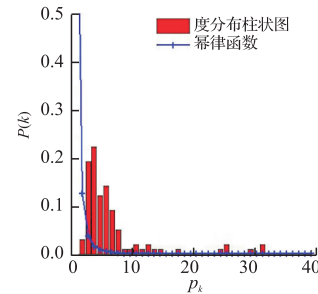
从图中可以发现, 当进行 TF 连接的概率 $p_t = 0.1$ 时, 模型度分布图具有较好的幂律形式。随着 p_t 增加, 模型度分布与幂律分布 $P(k) \sim k^{-3}$ 的偏差越来越大。这是由于 p_t 较小时, 网络的生成过程中采用较多的优选连接, 仍然近似无标度网络的生成过程, 随着 p_t 增加, TF 连接增加, 导致网络的无标度特性发生变化, 度分布逐渐偏离幂律分布形式。



(a) $P_t=0.1$



(b) $P_t=0.5$



(c) $P_t=0.9$

图 2 不同 TF 连接概率时度分布比较

Fig.2 Degree distribution from different probability of triad formation

3.2 网络的平均距离

网络的平均距离(平均路径长度)定义为任意 2 个节点之间的距离的平均值, 即:

$$\langle l \rangle = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} d_{ij} \quad (1)$$

式中: N 为网络中的节点数; d_{ij} 为节点 i 和节点 j 之间的距离。

网络的平均距离表示网络传递信息的能力。平均距离越大, 网络中信息的流动、共享与同步越困难, 作战网络为各作战单元提供迅速、准确、有效的共享态势感知越困难, 造成作战单元间协同和同步将难以实现。在网络化防空反导作战中, 节点之间存在固定连接和随机连接。例如, 首先在指控中心与作战单元之间存在的稳定隶属或配属关系, 对应于网络中的固定连接。其次, 在实际作战中, 大量的随机因素会形成部分动态指挥关系, 例如临时分配传感器和防空武器作为合作对象, 实施联合、协同、互动的规划与行动, 实现防空作战的协调性、同步

性^[8-9]。因此在网络化防空反导作战中,作战网络需要具有较小的平均距离。

在不同的 TF 连接概率 p_t 下,分别进行 100 次蒙特卡洛仿真,获得平均距离变化情况见图 3。

从图 3 中可以看出, $p_t = 0.1$ 时, $\langle l \rangle = 2.56$,网络生成过程中主要进行优选连接,部分进行 TF 连接。 $p_t = 1.0$ 时, $\langle l \rangle = 2.24$,网络生成过程中完全进行 TF 连接。分析网络平均距离的变化可知,由于 p_t 增加,网络生成过程中 TF 连接数目增加,节点之间的路径减小,整个网络的平均距离减小。

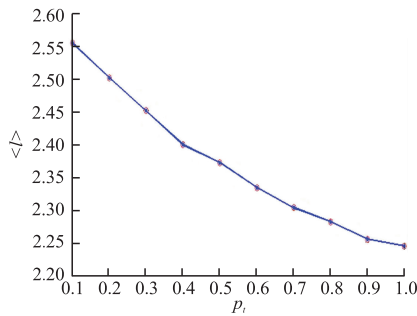


图 3 网络平均距离变化

Fig.3 Average path length from different TF probability

3.3 网络的集群系数

网络节点的集群系数 C_i (又称网络的聚类系数)描述网络中节点的邻点之间也互为邻点的比例。网络的集群系数 C 是指网络中所有节点集群系数的平均值。节点 i 的集群系数 C_i 定义为:

$$C_i = \frac{E_i}{k_i(k_i - 1)/2} \quad (2)$$

式中: k_i 为节点的度; $k_i(k_i - 1)/2$ 为与节点 i 相连的 k_i 个节点之间可能存在的总的边数; E_i 为这 k_i 个节点之间实际存在的边数。

在防空反导作战网络中,网络的集群系数具有以下含义:①表示在某个作战过程中,同一作战单元(或作战编组)内各个节点之间相互协调的能力;②在网络重组时表示网络的重组能力。当作战网络遭受敌方打击而失去部分节点和连边,具有较高网络集群系数的节点可通过任意节点与网络中的重要节点迅速取得联系进行重组。

对基于 HK 模型的防空反导网络进行仿真,得到该模型的集群系数在不同的 TF 连接概率条件下的变化情况见图 4。仿真图表明网络模型的集群系数随 TF 连接概率的增加呈现先增大再减小的变化。网络的集群系数的增加有利于提高网络的协同能力和重组能力。

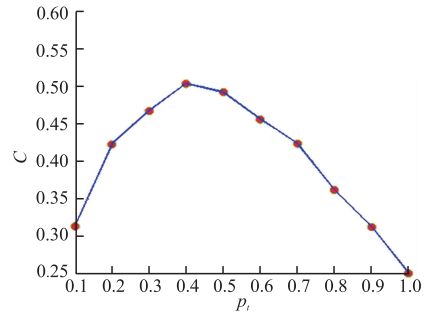


图 4 网络集群系数变化情况

Fig. 4 Clustering coefficient from different TF probability

3.4 网络特性比较

设采用相同的初始网络,基于 BA 无标度网络的模型在每次增加节点时新增 4 条边,得到一个包含 63 个节点的网络。可以得到典型的树状结构网络、基于 BA 无标度网络的模型、基于 HK 模型的防空反导网络模型的统计特性见表 1。

表 1 3 种网络统计特性比较
Tab.1 Properties from two networks

网络类型	节点数	集群系数	平均距离	平均度
常规树状网络	63	0	3.40	1.92
BA 无标度网络	63	0.23	2.22	7.10
HK 模型($p_t = 0.1$)	63	0.32	2.56	4.17
HK 模型($p_t = 0.3$)	63	0.46	2.45	5.00
HK 模型($p_t = 0.6$)	63	0.45	2.34	6.03
HK 模型($p_t = 0.9$)	63	0.32	2.26	6.76

分析典型的树状结构网络模型统计特性可以发现:网络集群系数为 0,表明网络的协调能力和重组能力较弱;较高的平均距离会导致信息、能量的传输距离增加,降低传输效率;较低的平均度则表明网络节点之间的连接少,不利于网络的互联互通。

相比之下,BA 无标度网络和基于 HK 模型的网络的统计特性如下:

1)当 p_t 较小时,HK 模型的集群系数优于 BA 模型;随着 p_t 增加,前者的集群系数先增加,随后减少并逐渐趋向 BA 模型的集群系数。

2)基于 HK 模型的网络平均距离随着 p_t 增加而减小,逐渐趋向 BA 模型。

通过以上分析可以发现,基于 HK 模型的网络能够具有较高的集群系数,同时满足无标度特性,虽然网络的平均距离相比 BA 模型稍大,但整体上该模型具有更好的灵活性。为了获得统计特性优越的作战网络,使之具有较高的战场适应能力,需要根据对网络的能力需求合理地选择 TF 连接概率 p_t 。

4 结语

本文采用 HK 网络模型对防空反导作战指挥

网络进行建模研究,对网络的统计特性进行了分析,表明了该网络比典型的树状结构网络模型和BA无标度网络具有更好网络统计特性和设计灵活性。这对于研究认识、分析和设计作战网络具有重大的理论意义,同时,也给防空反导作战网络的抗毁性奠定了基础。

参考文献(References):

- [1] 路建伟,姚增建,王濛.基于无标度网络的防空反导系统构建[J].指挥控制与仿真,2013,35(03):10-13.
LU Jianwei, YAO Zengjian, WANG Meng. Construction for Air Defense and Anti-Missile based on Scale-Free Networks[J]. Command Control & Simulation, 2013, 35(03): 10-13. (in Chinese)
- [2] 金伟新.体系对抗复杂网络建模与仿真[M].北京:电子工业出版社,2010.
JIN Weixin. SoS-Ops M&S Based on the Complex Network[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010. (in Chinese)
- [3] 申卯兴,郭岗,商长安,等.弹道导弹防御系统反导作战的SD模型研究[J].空军工程大学学报:自然科学版,2012,14(3):33-41.
SHEN Maoxing, GUO Gang, SHANG Changan, et al. Study of System Dynamics Model of anti-TBM Operation of Ballistic Missile Defense(BMD) System [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2012, 14(3): 33-36. (in Chinese)
- [4] 李毅德,王新政,胡钢锋.网络化战争与复杂网络[J].中国军事科学,2006,19(3):111-119.
LI Yide, WANG Xinzheng, HU Gangfeng. Network Warfare and Complex Network [J]. China Military Sciences, 2006, 19(3): 111-119. (in Chinese)
- [5] 张强,雷虎民.基于小世界网络的防空导弹系统复杂性研究[J].现代防御技术,2010,38(6):1-5.
ZHANG Qiang, LEI Humin. Complexity of Air Defense and Antimissile System Based on Small-World Networks Theory [J]. Modern Defence Technology, 2010, 38(6): 1-5. (in Chinese)
- [6] 何大初,刘宗华,汪秉宏.复杂系统与复杂网络[M].北京:高等教育出版社,2009.
HE Daren, LIU Zonghua, WANG Binghong. Complex System and Complex Network [M]. Beijing: Higher Education Press, 2009. (in Chinese)
- [7] Holme P, Kim B J. Growing Scale-free Networks with Tunable Clustering [J]. Physical Review E, 2002, 65(2): 1-4.
- [8] 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. Research for Development of Network Centric Warfare on Air and Missile Defense [J]. Modern Defence Technology, 2012, 40(1): 55-59. (in Chinese)
- [9] 沈寿林,张国宁,朱江.作战复杂系统建模及实验[M].北京:国防工业出版社,2012.
SHEN Shoulin, ZHANG Guoning, ZHU Jiang. Operation Complex System Modeling and Experiment [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012. (in Chinese)

(编辑:田新华)