

## 空间信息网络结构抗毁性优化设计

董飞鸿<sup>1,2</sup>, 吕晶<sup>1</sup>, 巩向武<sup>1,2</sup>, 李超<sup>3</sup>

(1. 解放军理工大学 通信工程学院, 江苏 南京 210007;  
2. 中国电子设备系统工程公司, 北京 100141; 3. 总参通信工程设计研究所, 辽宁 沈阳 110005)

**摘要:** 结合空间信息网络体系架构设计需求, 提出了一种具有强抗毁性的空间信息网络结构设计方法。分析并选择自然连通度作为网络的抗毁性测度, 提出了一种基于自然连通度的空间信息网络结构优化模型, 设计了一种具有免疫审查的人工免疫算法并进行模型求解。仿真实验表明, 在链路失效模式和节点失效模式下, 优化设计的空间网络与典型空间信息系统相比具有更好的网络结构抗毁性与顽健性。

**关键词:** 网络结构; 抗毁性; 自然连通度; 人工免疫算法; 免疫审查

中图分类号: TN915.81

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)10-0050-09

## Optimization design of structure invulnerability in space information network

DONG Fei-hong<sup>1,2</sup>, LV Jing<sup>1</sup>, GONG Xiang-wu<sup>1,2</sup>, LI Chao<sup>3</sup>

(1. College of Communication Engineering, PLA UST, Nanjing 210007, China;  
2. Institute of China Electronic System Engineering Corporation, Beijing 100141, China;  
3. Communication Engineering Design and Research Institute of PLA General Staff of Headquarters, Shenyang 110005, China)

**Abstract:** Combined with the space information network architecture design requirements, a novel optimization design technology was proposed, which could achieve strongly network structure invulnerability. The natural connectivity was analyzed and selected as the invulnerability measure. In addition, a modified artificial immune algorithm was proposed based on the natural connectivity and the immune review. Results show that the proposed method improves the network invulnerability performance and provides a better robustness compared with typical space information systems in link failure mode and node failure mode.

**Key words:** network structure; invulnerability; natural connectivity; artificial immune algorithm; immune review

### 1 引言

空间信息网络(SIN, space information network)是以空间平台(如同步卫星或中、低轨道卫星、高空平台和有人或无人驾驶飞机等)为载体,通过多种形式的链路一体化互联组网,支持海量数据的实时采集、传输和处理,实现空间信息体系化应用的信息基础设施<sup>[1]</sup>。具体来讲,空间信息网络空间段包括多个 GEO 轨道的分布式星群,临近空间段包括平

流层飞艇等高空平台(HAP, high altitude platform),地面段包括各类终端、接入站点和各类与航天活动相关的地面设施<sup>[2]</sup>。

网络抗毁性(invulnerability)研究一直备受关注,几乎所有的网络都存在抗毁性问题。对于有益的网络,例如空间信息网络、军事通信网络、交通网络,一般希望其抗毁性越强越好<sup>[3]</sup>;对于有害的网络,例如恐怖组织网络、病毒传播网络,一般希望其抗毁性越弱越好<sup>[4,5]</sup>。2000年,Albert在Nature

收稿日期: 2014-06-19; 修回日期: 2014-09-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61231011, 61032004, 91338201); 国家高技术发展计划(“863”计划)基金资助项目(2012AA121605); 中国博士后科学基金资助项目(2012M512075)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (61231011, 61032004, 91338201); The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program)(2012AA121605); China Postdoctoral Science Foundation Funded Project (2012M512075)

上发表了复杂网络与随机网络在随机失效和故意攻击模式下的抗毁性能<sup>[6]</sup>, 发现复杂网络相比于随机网络对随机失效有着更强的抗毁性, 但对故意攻击却特别脆弱。Albert 提出的这 2 种失效模式和发现的抗毁性特性引起了网络抗毁性研究的热潮<sup>[7]</sup>。

由于空间信息网络固有的脆弱性, 比如易受宇宙空间辐射干扰源(主要指太阳, 如果是激光链路, 月球的反光也要考虑)干扰, 这些干扰可能使一些节点和链路突发性地失效。更为严重的是, 卫星暴露在空间轨道上, 很容易受到非法截获、干扰乃至摧毁。一旦出现问题, 将会造成整个空间信息网络性能急剧下降, 甚至发生多米诺骨牌(Domino)效应而全网中断瘫痪<sup>[8]</sup>。现有卫星通信系统网络结构简单, 抗毁性设计考虑不足。比如, 2014 年 4 月 2 日俄罗斯格洛纳斯全球卫星导航系统(GLONASS)瘫痪 13 个小时, 业内一度陷入恐慌。而瘫痪的原因尚不清楚, 可能是赛博攻击、太阳耀斑、软件故障等<sup>[9,10]</sup>。据 NASA 统计资料显示, 截至 2008 年 7 月, 全球在轨卫星故障多达 527 次。

据 2014 年 4 月 17 日中国钱学森运载技术实验室发布的《空间态势评估报告》显示: 截至 2013 年 8 月, 全球共有 1 084 颗卫星在轨运行。随着在轨卫星不断增加, 卫星故障发生数量呈逐年上升趋势。在战时, 卫星更是军事干扰、摧毁的重要目标<sup>[11]</sup>。因此, 研究空间信息网络结构抗毁性的需求极为紧迫。

2013 年, 美国空军要求发展分散式太空系统以提升抗毁性。同年, 美国空军航天司令部发布白皮书, 提出推进军事航天计划新构架, 并且指出, 目前整个卫星通信网络仍建立在冷战时期的战略基础上, 失去一颗先进的卫星, 就可能削弱美国的防御结构, 因此美国国防部开始研究如何提高军事卫星的抗毁能力。同时, 2014 年美国启动“卫星通信抗毁性增强”项目, 为期 4 年, 要求实施空间网络长期威胁评估和评价。

抗毁性分为单节点的容错性(卫星载荷备份, 计算、电路可重构等)和网络结构的抗毁性。文献<sup>[12]</sup>针对网络结构的局部不对称性、节点的可移动性以及存在大量冗余节点和链路的特点, 提出一种基于节点重新部署的拓扑重构算法, 采用拓扑重构技术, 赋予网络自我防护和自我修复能力, 提高了空间信息网络的抗毁性。文献<sup>[13]</sup>提出了一种 GEO/LEO 双层卫星组网的网络结构抗毁性路由算法, 提出的算法充分利用了星座运行的周期性和规

律性。文献<sup>[14]</sup>分析了空间信息网络所面临的安全威胁, 提出了一种基于网络编码的抗毁路由方法, 并研究了网络防攻击技术。文献<sup>[15]</sup>针对 COMPASS 网络抗毁性需求, 提出了一种基于分群管理、群首备份、链路冗余、链路修补的第 2 代导航卫星网络抗毁路由算法。总结现有空间信息网络的抗毁性研究, 主要集中于网络路由的研究, 从理论层面解释空间信息网络结构本身的抗毁性机理文献较少。本文核心是探索在网络的顶层设计中如何充分考虑网络的架构和拓扑的优化来增强空间信息网络的韧性和抗毁性。

## 2 抗毁性的科学内涵

空间信息网络结构抗毁性是指空间信息网络中的卫星节点、HAP 节点或者链路发生故障或者遭受故意攻击的条件下, 空间信息网络维持其功能的能力。构建具有强健壮性的空间信息网拓扑结构, 是本文的重要研究目标。

影响空间信息网络抗毁性的因素很多, 比如卫星载荷、平台的可靠性、备份卫星的数量、网络承载数据流量的大小、网络协议体系、网络的管理策略等。文献<sup>[4,6,7,12]</sup>等对影响网络抗毁性的要素进行了深入研究, 发现网络的拓扑结构从根本上决定了网络体系结构的抗毁性。因此研究空间信息网络结构的抗毁性可以从空间信息网络拓扑结构保持连通的能力出发。

### 2.1 空间信息网络的特征谱

特征谱就好比空间信息网络的“指纹”, 不同类型的网络有着截然不同的特征谱。特征谱几乎包含了网络结构的所有信息。

设  $\mathbf{E}(G) = (a_{ij})_{N \times N}$  表示空间信息网络  $G$  的邻接矩阵, 其中  $a_{ij}$  表示网络节点  $i$  和节点  $j$  之间的连接情况, 若  $i$  和  $j$  之间存在链路, 则  $a_{ij} = 1$ , 否则  $a_{ij} = 0$ 。考虑双向通信链路,  $G$  可以等效为一个无向图, 因此  $\mathbf{E}(G)$  为对称矩阵。

设网络中卫星节点或 HAP 节点  $i$  与网络中节点的通信链路数目总和为  $d_i$  (又称为节点的度), 则  $\hat{\mathbf{D}} = \text{diag}\{d_i\}$  为网络节点的度构成的对角阵。可以得到网络  $G$  的拉普拉斯矩阵  $\mathbf{L}(G) = \hat{\mathbf{D}}(G) - \mathbf{E}(G)$ ,  $\mathbf{L}(G)$  为半正定对称矩阵。

设  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_n$  为  $\mathbf{E}(G)$  的特征根,  $\mu_1 \geq \mu_2 \geq \dots \geq \mu_n$  为  $\mathbf{L}(G)$  的特征根, 则集合

$\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\}$  和集合  $\{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n\}$  分别称为网络的邻接矩阵特征谱和拉普拉斯特征谱。

### 2.2 空间信息网络结构抗毁性测度

在图论中，一般用网络的连通度来刻画网络的抗毁性，连通度指标的不足在于只考虑了网络被破坏的难易程度，而未考虑网络遭到破坏的程度。Chvatal 等提出用坚韧度来刻画网络的抗毁性<sup>[16]</sup>，但 Bauer 等证明计算图的坚韧度是 NP 困难问题<sup>[17]</sup>。后来，Barefoot、Cozzen 等还分别提出用离散数、边连通度、代数连通度、临界移除比等，从不同的侧面度量网络的抗毁性<sup>[18]</sup>。

信息在网络中的传输路径可表示为信息经过的链路和节点的集合，因此传输路径可以表示为

$$w = \{s_1 l_1 s_2 l_2 \dots l_k s_k \mid l_i \in L, s_i \in S\} \quad (1)$$

其中， $S$  为网络中节点的集合， $L$  为网络中链路的集合， $k$  为信息经过的路径的长度。

若用任意 2 个节点之间路径长度为  $k$  的传输路径的个数  $m_{ij}^k$  来衡量网络中链路的冗余性。设网络中节点的数目为  $N$ ，对网络所有节点之间的路径冗余性进行求和，则网络的冗余性可表示为

$$W = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=0}^{\infty} m_{ij}^k \quad (2)$$

因为遍历整个网络一般是不可行的，所以  $m_{ij}^k$  一般是不可得到的， $W$  其实是得不到的一个量。在网络中，还有一个与之对应的量：网络的闭路径。闭路径是网络的一个基本属性，它与图的子图直接对应，例如网络中长度为 3 的闭路径对应网络中的三角形，网络中长度为 4 的闭路径对应网络中的四边形。如果用  $m_i^k$  表示起点和终点都为节点  $v_i$  的闭路径的数目，然后对网络中所有节点进行求和，可得

$$W = \sum_{i=1}^N \sum_{k=0}^{\infty} m_i^k = \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{i=1}^N m_i^k = \sum_{k=0}^{\infty} m_k \quad (3)$$

$W$  越大，说明网络中闭环数目越多，即网络的冗余路径越多。网络的冗余性越高，网络的顽健性、抗毁性越强。从式(3)可以看出，由于存在重复计算边和节点的可能，因此  $W \rightarrow \infty$ 。进一步研究发现越长的路径被重复计算的次数越多，因此对网络抗毁性的贡献越小，为了克服这个问题，保证收敛， $W$  进一步改写为式(4)<sup>[13]</sup>。

$$W' = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{m_k}{k!} \quad (4)$$

又  $m_k = \sum_{i=1}^N m_i^k = \sum_{i=1}^N (A^k)_{ii} = \text{trace}(A^k) = \sum_{i=1}^N \lambda_i^k$  可得式(5)

$$W' = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i^k}{k!} = \sum_{i=1}^N \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\lambda_i^k}{k!} = \sum_{i=1}^N e^{\lambda_i} \quad (5)$$

从式(5)可以发现，闭路径的数目  $W'$  可以直接通过空间信息的特征谱求得，式(5)体现了网络特征谱与网络抗毁性之间的内在关系。进一步取  $W'$  的自然对数，可得

$$\bar{\lambda} = \ln\left(\frac{W'}{N}\right) = \ln\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e^{\lambda_i}\right) \quad (6)$$

观察式(6)，可以发现  $\bar{\lambda}$  为网络的特征谱关于自然对数的特殊平均值，因此，称  $\bar{\lambda}$  为网络的自然连通度。

自然连通度具有严格单调性<sup>[4]</sup>，也就是说，随着自然连通度指标的提高，网络的抗毁性也是相应提高的。为了进一步说明自然连通度在度量网络抗毁性的精确性和有效性，本文把临界移除比、代数连通度、边连通度等抗毁性测度与自然连通度进行比较分析。

对于节点数  $N=100$ ，平均度  $\langle k \rangle = 6$  的 B-A 网络<sup>[19]</sup>而言，分别用 3 种策略对网络进行移除：策略 1，随机选择节点进行删除；策略 2，按照节点的重要性由大到小移除；策略 3，按照节点的重要性由小到大移除。网络中节点的重要性是指节点度的大小。节点度越大，与之连接的其他节点就越多，越处于网络的核心位置。

从图 1(a)可以看出，临界移除比的主要不足在于其值的波动较大，不能准确清晰地反映网络抗毁性的变化趋势。从图 1(b)和图 1(c)可以看出，边连通度与代数连通度的主要不足在于不能反映网络中核心节点与末梢节点重要性的不同；当网络不连通时，边连通度与代数连通度的值都为 0，即这 2 种测度不适用于非连通网络。从图 1(d)可以看出，自然连通度曲线比较平滑，可以稳定和精确地测度抗毁性的变化。因此本文选择自然连通度作为衡量空间信息网络顽健性、抗毁性的测度指标。

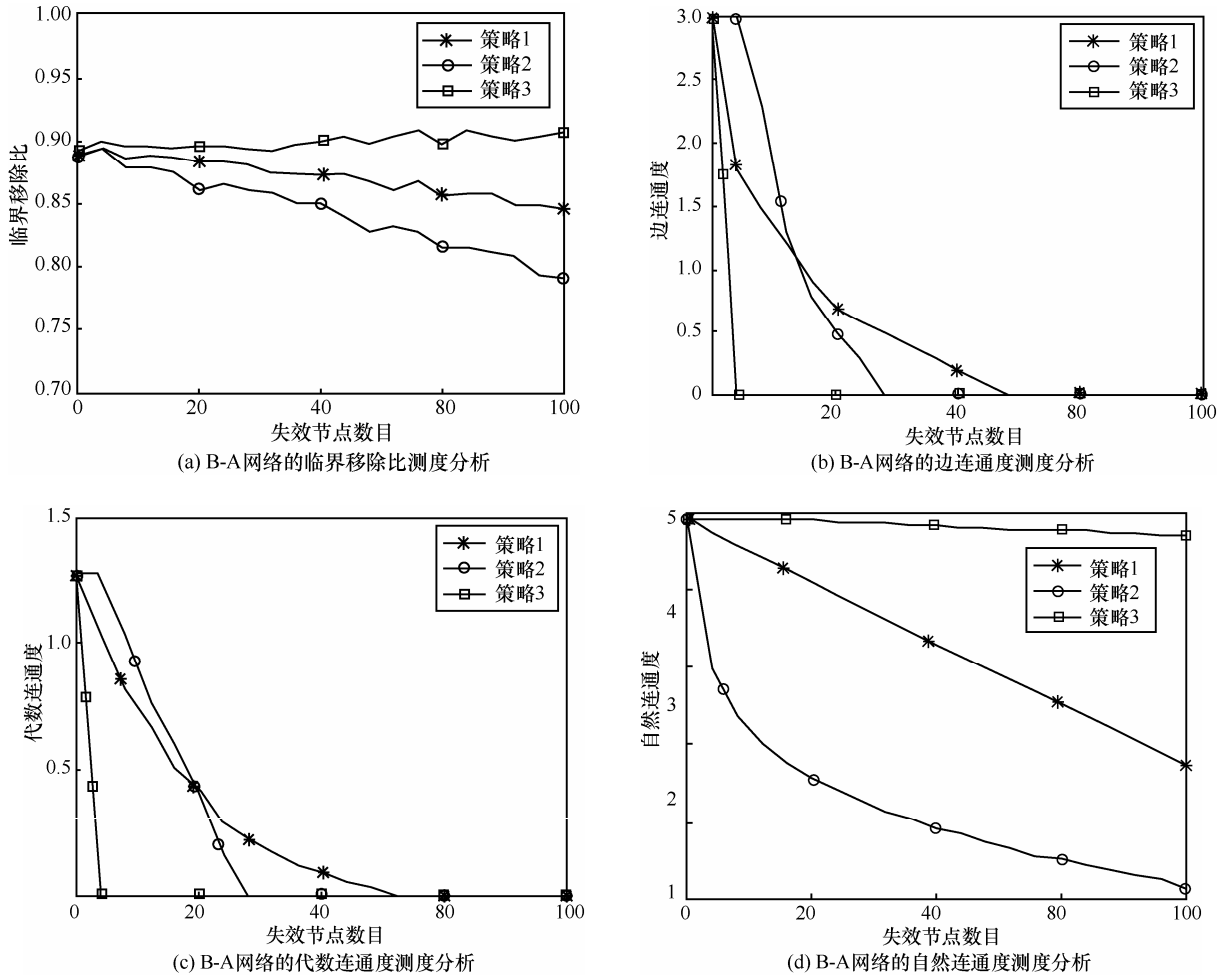


图 1 4 种抗毁性测度性能比较

### 3 网络结构抗毁性组合优化

如果没有度约束，完全图具有最优的网络抗毁性<sup>[4]</sup>。但是作为空间信息网络，由于卫星表面积的限制，节点所携带的天线数目非常有限，链路约束是网络的重要约束条件之一。本文需要研究一定链路约束条件下网络结构抗毁性组合优化问题。

#### 3.1 网络模型

空间信息网络的组成主要包含分布式星群、HAP、地面固定卫星站、地面移动卫星站、地面控制中心和地面栅格网等，如图 2 所示。

1) 分布式星群网络：每个分布式小星群可以等效为一颗大卫星，用 3 个分布在静止轨道上的分布式小星群即可实现对地球的覆盖。星群间和星群内部采用高速激光链路。星群间的远距离链路称为弱链接，这样的链路一般是网络信息传输的捷径。星群内部之间的链路称为强链接，所谓“强”体现在

2 个方面，即星群内部连通度较高；卫星节点距离很近，链路代价小。因此，分布式星群网络可表示为  $D = \{SAT\_Cluster_i | i = 1, 2, \dots, n_s\}$ ， $SAT\_Cluster_i$  代表星群网络内的第  $i$  个星群。 $SAT\_Cluster_i = \{s_1, s_2, \dots, s_j | j = 1, 2, \dots, m_s\}$  代表群内卫星的组成，可用  $s_{ij}$  代表第  $i$  个星群的第  $j$  个卫星。卫星  $s_{ij} = \{l, p, \theta_{beam}, A\}$ ， $l$  代表 GEO 卫星的经度， $p$  代表卫星的功率， $\theta_{beam}$  代表卫星的波束角， $A$  代表波束的覆盖面积。分布式星群轨道位置在对地静止轨道上，和一般的 GEO 卫星具有相似的特性，即用经度即可确定卫星位置。功率和波束角作为卫星节点的重要特性指标，通过调整功率和波束角，可以控制整个星群网络拓扑的连通度。

2) HAP：可建立与卫星的通信链路，与地面固定卫星站的链路，与地面移动卫星站的链路。HAP 不仅可以完成用户信号的中继，而且可以在 HAP 之间通过路由和在轨处理转发实现信号的中继。

HAP 可表示为  $H = \{H\_Cluster_i | i = 1, 2, \dots, n_H\}$ ,  $H\_Cluster_i$  代表 HAP 网络的分簇数。 $H\_Cluster_i = \{H_1, H_2, \dots, H_j | j = 1, 2, \dots, m_H\}$ ,  $H_{ij}$  代表第  $i$  个簇的第  $j$  个 HAP。 $H_{ij} = \{x, y, p, A\}$ , 其中  $(x, y)$  代表 HAP 的坐标,  $p$  代表 HAP 的功率,  $A$  代表  $H_{ij}$  的覆盖面积。一般认为 HAP 在临近空间 20 km 高空, 因此  $H_{ij}$  在空间的位置坐标为  $location = (x_i, y_i, 20)$ , 假设 HAP 的发送功率为  $p_i$ , 发射频率为  $f$ , 则 HAPS 之间最大通信距离为  $L_i = \frac{p_i}{2\pi f}$ , 则

HAP 可以互通的其他 HAP 的集合表示为  $N_i = \{j | \|location_i - location_j\| < L_i, \forall j \neq i, j \in M\}$ ,  $\|location_i - location_j\|$  是 HAP 之间的欧式距离。通过控制 HAP 的有效功率, 可以控制 HAP 之间的一跳可达范围, 从而控制整个网络的结构。

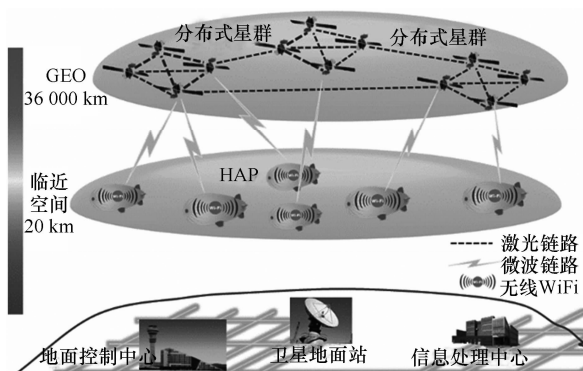


图 2 空间信息网络主要组成

本文着眼研究卫星和 HAP 节点以及链路组成的空间信息网络的抗毁性优化设计问题, 暂不考虑地面固定卫星站、地面移动卫星站、地面控制中心和地面栅格网等对网络结构抗毁性的影响。

因此, 空间信息网络模型可以表示为

$$G = \{D, H, L, E\} \quad (7)$$

其中,  $D$  代表星群网络中卫星节点的集合;  $H$  代表网络中 HAP 节点的集合;  $L = \{l_1, l_2, \dots, l_W\} \subseteq [D:H] \times [D:H]$  表示网络中链路的集合,  $W$  代表链路数目;  $E$  代表网络中节点之间邻接矩阵。

### 3.2 组合优化数学模型建立与求解

本文使用自然连通度作为空间信息网络的抗毁性测度, 结合空间信息网络的网络模型, 网络结构抗毁性组合优化模型可建立如式(8)所示。

$$\begin{aligned} \max \quad & \bar{\lambda}(G) = \ln \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e^{\lambda_i} \right) \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} |E| = \sum_i \sum_j a_{ij} \leq 2W \\ a_{ij} = a_{ji} \\ a_{ii} = 0 \\ \mu_{N-1} > 0 \\ |S| \leq N_1 \\ |H| \leq N_2 \\ N = N_1 + N_2 \\ l_{\text{sat}} \leq L_{\text{max}} \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

其中,  $\mu_{N-1}$  为网络拉普拉斯矩阵的最小特征根,  $\mu_{N-1} > 0$  以保证网络是连通的。卫星和 HAP 的数目分别为  $N_1$ 、 $N_2$ , 网络的节点数  $N = N_1 + N_2$ , 单个卫星节点可以建立与卫星的最大链路数为  $L_{\text{max}}$ 。需要求解最大网络抗毁性对应的目标函数  $\bar{\lambda}(G)$  的值和最优解  $E$ 。

直接求解式(8)是非常困难的, 甚至是不可行的。例如, 对于规模为  $N = 50$ ,  $W = 200$  的网络而言, 其所有可行解的数目为

$$C_{N(N-1)/2}^W = \frac{(N(N-1)/2)!}{W!(N(N-1)/2 - W)!} = \frac{1\ 225!}{200!1\ 025!} \rightarrow \infty \quad (9)$$

这是一个趋向于无穷大的数字, 因此, 需要寻找更有效的方法来求解优化模型。在最优化问题中, 进化算法以其低的运算复杂度和快速收敛的特点, 其求解速度和质量上远超过常规方法, 是一种较好的选择。进化算法已被成功应用于越来越多的优化领域, 发展为一个相对较为成熟的研究方向——进化优化理论(evolutionary optimization theory)。但是, 进化算法本身存在难以解决的问题, 例如局部收敛和全局收敛之间的矛盾, 以及造成的早熟收敛问题。人工免疫算法(artificial immune algorithm)结合了分类器、神经网络、机器推理等算法的优点, 模仿生物免疫系统的工作机理, 有效地避免了传统进化算法的不足, 是进化优化理论最新研究成果之一<sup>[20,21]</sup>。但是, 直接应用该算法求解式(8)是不合适的。因为优化得到的网络抗毁性即使很强, 在空间信息系统中也不一定能够实现。需要对解的实际可行性进行分析, 称之为免疫审查。因此, 本文提出一种基于免疫审查改进的人工免疫算法。

### 1) 抗体编码

在免疫算法中，把目标函数定义为抗原，把目标函数的候选解定义为抗体。在本文中，抗原即为自然连通度，抗体即为网络的邻接矩阵  $\mathbf{E}$  的候选解集。本文抗体编码的方法为：选择需要优化的网络邻接矩阵  $\mathbf{E}$  的对角线以上的  $N(N-1)/2$  个元素  $a_{ij}$  ( $i < j$ ) 为编码对象。把这些元素重新排列，记为  $X = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_{N(N-1)/2})$ ，其中  $x_i = 0$  或 1， $\sum_{i=1}^{N(N-1)/2} x_i \leq W$ 。把  $X$  称为抗体编码。

### 2) 终止准则

进化算法一般选择预定的最大进化代数(迭代次数)为终止准则，这种方法不足之处在于：1)进化代数一般根据经验选定，如果问题的计算规模较大，而选择的代数较小，算法还没有达到最优解就过早地退出了优化过程；2)如果问题的计算规模不大，选择的进化代数较大，已达到最优解却不会退出，产生不必要的计算。为克服以上不足，本文设定了一种新的终止准则，即最优解连续保持不变，超过一定迭代次数  $n_{\max}$  为终止准则。

### 3) 免疫审查

卫星作为网络节点具有特殊性，一般认为星间链路是通过高速光链路实现的。由于卫星载荷和表面积的限制，一般难以搭载过多天线，例如铱星具有 4 副星间链路天线。所以网络中单个卫星可建立的星间链路数目是有限制的，这里记为  $L_{\max}$ 。另一方面，作为通信网络，连通性是对网络的一个基本要求，而满足网络  $\mathbf{G}$  拉普拉斯矩阵的次小特征根  $\mu_{N-1} > 0$  的网络才是连通的。

算法得到的解要判断其是否满足空间信息网络的这 2 个基本要求，本文提出在算法实现中加入免疫审查步骤。引入免疫审查可以只在可行解中进行搜索，可以进一步提高算法的运行效率。

### 4) 算法流程框架

**步骤 1 初始化：**根据式(8)中的约束关系，随机产生网络节点的邻接矩阵，并重新排列，形成抗体编码；设定算法的参数，具体包含抗体种群  $A$  的规模  $N_A$ 、选择克隆(或称活化)细胞数量  $N_S$ ，克隆倍数  $N_C$ 、免疫补充数量  $N_r$  和变异率  $p_m$  等。

**步骤 2 抗原载入：**设置抗原为最大化空间信息网络的自然连通度  $\bar{\lambda}(\mathbf{G}) = \ln\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e^{\lambda_i}\right)$ 。

**步骤 3 产生初始抗体种群  $A(t)$ ：**先令  $X(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_i(t), \dots, x_{N(N-1)/2}(t)) = 0$ ；然后随机选择小于等于  $W$  个元素取值为 1，并进行免疫审查。重复产生  $N_A$  个初始抗体形成抗体种群  $A(t) = (X_1, X_2, \dots, X_{N_A})$ ，进化代数  $t = 0$ 。

**步骤 4 评估群体  $A(t)$  中每个抗体与抗原的亲合力，并按照抗体亲和力对  $A(t)$  中抗体降序排序。选择  $A(t)$  中最佳亲和力抗体置为最优解  $X^* = X_{\text{opt}}(t)$ 。**

**步骤 5 活化细胞的克隆选择过程，可分为以下 5 步。**

**选择克隆：**选择亲和力最大的  $N_S$  个细胞，形成活化细胞群体  $B_S(t)$ 。

**克隆扩增：**对活化细胞群体  $B_S(t)$  进行克隆扩增；克隆就是对细胞的复制，即每个细胞按照一定的倍数  $N_C$  复制。

**高频变异：**对克隆细胞以变异率  $p_m$  进行变异，形成变异种群  $C_m(t)$ 。

**免疫审查：**审查变异种群  $C_m(t)$  的抗体是否满足网络的连通性要求及卫星的最大链路数  $L_{\max}$  约束，去除没有通过免疫审查的变异抗体，并从新进行变异，直至产生足量的  $C_m(t)$  抗体。

**再次选择：**把种群  $A(t)$  的集合中包含了最优个体的集合  $A'(t)$  与变异种群  $C_m(t)$  组成新种群  $A'(t) \cup C_m(t)$ ，按亲和力降序排列，选取前  $N/(N-1)/2$  个抗体作为下一代的父代  $A(t+1)$ 。

**步骤 6 终止检验：**如果  $A(t+1)$  已满足预设的进化终止准则，则停止，否则置  $t = t + 1$  并继续下一步骤。本文预设的终止准则为：最优解  $X^*$  连续保持不变超过一定迭代次数  $n_{\max}$ 。

**步骤 7 免疫补充：**随机产生  $N_r$  个新抗体并计算其亲和力，替换群体中亲和力最小的抗体，种群按亲和力大小重新降序排列，并转步骤 4。

**步骤 7 模拟了免疫系统新陈代谢，骨髓每天产生新抗体来补充免疫系统。特异性和多样性是免疫算法的 2 个核心要点。特异性为算法保证了局部搜索的能力，多样性保证了全局搜索的能力。通过免疫审查，进一步缩小了搜索空间，提高了搜索速度。在图 3 中通过与遗传算法的比较，可以看到本文所提算法相对于遗传算法具有较大的优势。**

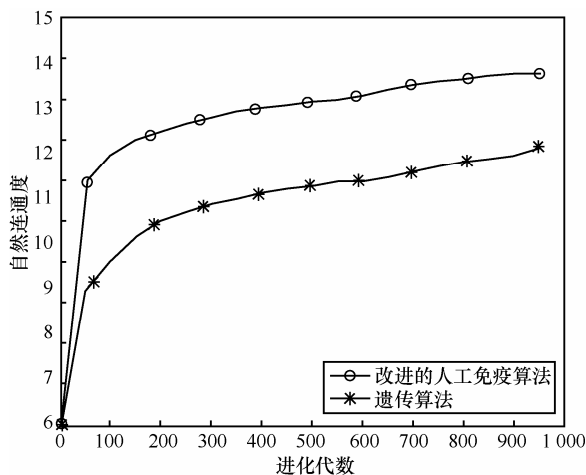


图 3 自然连通度随进化代数的变化

## 4 仿真与比较分析

本节首先分析了空间信息网络所面临的失效模式，然后通过具体实验仿真，验证了基于改进的人工免疫算法的有效性，为了说明算法的优越性，本文还进一步把该算法的优化结果与经典的遗传算法进行比较。

### 4.1 网络的失效模式分析

由于空间信息网固有的开放空间环境，卫星载荷与 HAP 设备天然具有暴露性，网络节点可能面临宇宙空间辐射干扰、信号被非法截获与干扰、动能武器和激光武器摧毁或致盲、太空碎片撞击、赛博攻击等威胁<sup>[22]</sup>。

从面临的威胁类型出发，网络的失效类型可以分为随机失效和故意攻击。随机失效是指网络要素受到外部和内部不可预测因素的威胁，具有随机概率失效的情况。由于影响到在轨卫星和 HAP 失效的因素很多，很多情况下是不可预测的。因此，每颗卫星都有失效的可能。而故意攻击是指在受到敌方攻击或干扰时，一般具有枢纽功能的核心节点和骨干链路通常会以更大的概率遭受攻击。

一种强健壮性的网络，需要能够经受得起随机失效和故意攻击。本文从空间信息网络组成本身出发，认为网络的失效模式本质上可以分为链路失效模式和节点失效模式 2 种。链路失效模式是指网络中链路随机故障或受到攻击，导致网络节点之间的通信链路失去正常连通能力。而节点失效模式是指网络中节点随机故障或受到攻击，导致节点失去正常工作的能力。随机失效和故意

攻击最终都会以链路失效模式或节点失效模式来体现。研究空间信息网络结构抗毁性本质上是建立一种对链路失效和节点失效不敏感的空间信息网络。

### 4.2 仿真与分析

仿真参数设置如表 1 所示，通过仿真得到了自然连通度随进化代数的变化，如图 3 所示。

从图 3 可以看出，改进的人工免疫算法相比于遗传算法具有更快的搜索速度和更好的优化结果。改进的人工免疫算法和遗传算法在进化的 0~200 代，自然连通度测度增长特别快，而在进化 200~900 代，自然连通度进入慢速增长长期并逐步趋于稳定。在第 948~957 代，改进的人工免疫算法由于达到了终止条件而退出，但遗传算法的值还在慢慢增加，而且遗传算法在第 957 代得到的最优目标只相当于人工免疫算法第 104 代的结果。因此，改进的人工免疫算法具有较好的搜索效率和搜索结果。

表 1 仿真参数

参数	符号	值
分布式星群数目	$N_{cluster}$	3
卫星数目	$N_1$	10
飞艇数目	$N_2$	40
单个卫星星间链路数目	$L_{max}$	5
链路数目	$W$	$\leq 400$
终止准则	$N_{max}$	10
抗体编码长度	$L_c$	$N(N-1)/2$
抗体种群规模	$N_A$	60
活化细胞规模	$N_S$	20
克隆倍数	$N_C$	8
变异率	$P_m$	0.1
免疫补充规模	$N_r$	10

### 4.3 与其他系统的比较

在第 4.2 节构造出了一种具有强网络结构抗毁性的空间信息网络，并得到了最优解  $E$ 。为了说明本文研究的有效性，现选择 LEO 轨道的“铱”系统、MEO 轨道的 ICO<sup>[23]</sup>，Gregory A 教授提出的 GEO 轨道的快速响应系统<sup>[24]</sup>，以及 Akyildiz 教授提出的由 GEO/MEO/LEO 轨道的多层卫星空间信息网络<sup>[25]</sup>进行抗毁性分析，并与本文网络结构进行比较。这 4 个系统的参数如表 2 所示。

表 2 相关空间信息系统参数

名称	“铱”系统	ICO	Gregory 模型	Akyildiz 模型
节点数目	LEO:66	MEO:10	GEO:24	GEO:3; MEO:12;LEO:72 LEO→LEO:4; LEO→LEO:1
星间链路	2 轨道内; 2 轨道间	2 轨道内; 2 轨道间	星群内星状; 星群间无链路	LEO→LEO:1; MEO→MEO:4 MEO→GEO:1; GEO→GEO:2
轨道面数目	6	2	1	LEO:12; MEO:6;GEO:1

在 4.1 节中研究了空间信息网络的失效模式，本节根据提出的 2 种失效模式，分析仿真了系统的网络抗毁性能，结果如图 4 和图 5 所示。

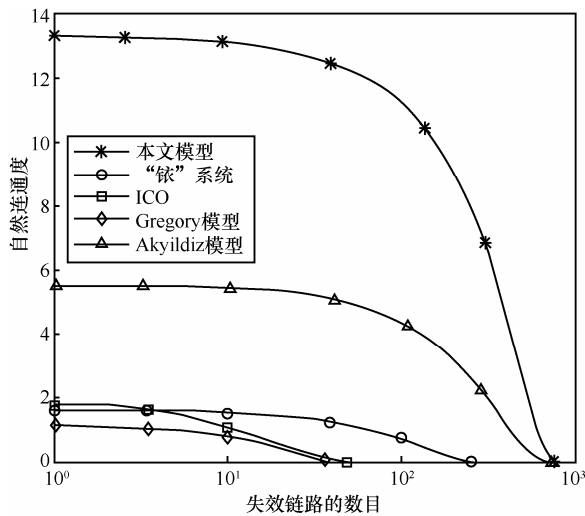


图 4 空间信息网络抗毁性比较（链路失效）

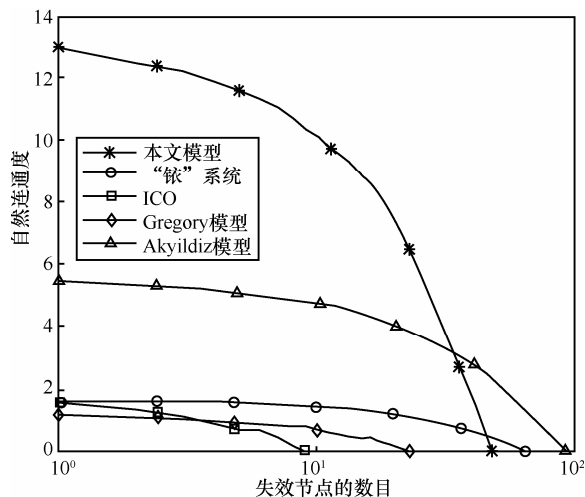


图 5 空间信息网络抗毁性比较（节点失效）

综合分析图 4 和图 5，可以得到以下 4 个重要结论。

1) 无论是在链路失效模式还是在节点失效模式下，本文设计的网络模型的抗毁性都优于其他 4 个系统。

2) 相比于链路失效，节点失效对网络造成的损害更为严重。比如当失效链路数目=节点失效数目=10 时，图 4 中自然连通度几乎没有变化，但图 5 中自然连通度已经大幅下降。因此分别研究这 2 种模式下的网络抗毁性是必要的。

3) 空间信息网络的抗毁性与网络的规模是正相关的。也就是说，具有较多节点和链路的网络更容易经受链路和节点失效所造成的损失，具有更好的抗毁性。因此，无论从容量角度还是抗毁性角度考虑，建设具有多节点和链路的空间信息网络是必要的。

4) 节点多的网络抗毁性不一定比节点少的网络抗毁性好。例如 Akyildiz 模型的网络节点数目为 93，本文设计的网络结构的节点数目为 50，但由于本文设计的网络抗毁性远远大于 Akyildiz 模型的抗毁性。而且过多的节点会增加网络的建设成本和运行维护成本，例如从网络建设角度计算，本文的空间信息网络成本不到前者的 1/6(以 HAP 成本为卫星的 1/10 计算<sup>[26]</sup>)，因此，在网络结构设计中考虑抗毁性十分必要。

### 5 结束语

本文提出在空间信息网络顶层设计中，应该深入考虑网络结构的抗毁性。认为空间信息网络面临链路失效和节点失效 2 种主要失效模式。研究了适用于空间信息网络的抗毁性测度——自然连通度，提出了一种基于改进的人工免疫算法的网络结构抗毁性优化设计方法，并进行了仿真验证，仿真结果表明：与其他现有的空间信息系统相比，本文优化设计的网络结构极大地提高了空间信息网络的抗毁性和顽健性。该方法也可以作为空间信息传输网络效能与抗毁性评估的重要手段。

### 参考文献：

[1] MILLER L, GORLICK M, WANGERIN D, *et al.* What's coming on spacecraft: next-generation distributed satellite bus information sys-

- tems[A]. Aerospace Corporation[C]. 2012. 22-27.
- [2] DONG F H, WANG J C, YANG J, *et al.* Overview of distributed satellite cluster network[A]. 2014 IEEE International Conference on Progress in Informatics and Computing (PIC)[C]. Shanghai, China, 2014. 116-120.
- [3] 胡兴雨, 张学义, 吴俊等. Ad hoc 网络结构抗毁性研究[J]. 计算机技术与发展, 2010, 20(1):185-189.  
HU X Y, ZHANG X Y, WU J, *et al.* Research for invulnerability of Ad hoc network topologies[J]. Computer Technology and Development, 2010, 20(1):185-189.
- [4] 吴俊. 复杂网络拓扑结构抗毁性研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2008.  
WU J. Research on Invulnerability of Complex Network[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008.
- [5] 饶育萍, 林竞羽, 侯德亭. 基于最短路径数的网络抗毁评价方法[J]. 通信学报, 2009, 30(4):113-117.  
RAO Y P, LIN J Y, HOU D T. Evaluation method for network invulnerability based on shortest route number[J]. Journal on Communications, 2009, 30(4):113-117.
- [6] ALBERT R, JEONG H, BARABASI A L. Error and attack tolerance of complex networks[J]. Nature, 2000, 406(6794): 378-382.
- [7] LEWIS T G. Network Science Theory and Applications[M]. In John Wiley & Sons, 2011.
- [8] TAFAZOLI M. A study of on-orbit spacecraft failures[J]. Acta Astronautica, 2009, 64(3):195-205.
- [9] GPS Experts Call for Safeguards After GLONASS Outage[EB/OL]. <http://www.gislounge.com/gps-experts-call-safeguards-glonass-outage/>, 2014.
- [10] HILLAND D H, PHIPPS G S, JINGLE C M, *et al.* Satellite threat warning and attack reporting[A]. IEEE Aerospace Conference[C]. 1998. 207-213.
- [11] LIN W, VARSHNEY P K. On survivability measures for military networks [A]. Proceedings of the IEEE Military Communications Conference[C]. US, IEEE Press, 1990.1120-1124.
- [12] 张慧鹏. 空间信息网中骨干网拓扑重构算法研究与仿真[D]. 沈阳: 东北大学, 2010.  
ZHANG H P. Research and Simulation of Topology Reconfiguration Algorithm for Backbone Networks in Space Information Networks[D]. Shenyang: Northeastern University, 2010.
- [13] 汤绍勋. GEO/LEO 双层组网结构的星座网络抗毁路由算法及仿真研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2006.  
TANG S X. Research on GEO/LEO-based Double Layer Satellite Network Routing Algorithm[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006.
- [14] 郝选文. 空间信息网络抗毁路由及网络防攻击技术[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.  
HAO X W. Research on Survivability Routing and Anti-attack Technology in Space Information Networks[D]. Xi'an: Xidian University, 2013.
- [15] 易先清, 罗雪山, 李健杰等. 导航星座抗毁路由方法与技术研究 [A]. 第一届中国卫星导航学术年会[C], 北京, 2010. 1-8.  
YI X Q, LUO X S, LI J J, *et al.* Research on destruction-resistant routing method and technique of navigation system based on GEO/MEO constellation[A]. Proceedings of the 1th China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2010[C]. Beijing, China, 2010.1-8.
- [16] CHVATAL V. Tough graphs and hamiltonian circuits[J]. Discrete Mathematics, 2006, 306(10): 910-917.
- [17] BAUER D, HAKIMI S L, EDWARD F S. Recognizing tough graphs is NP-hard[J]. Discrete Applied Mathematics, 1990, 28(3): 191-195.
- [18] BAREFOOT C A, ENTRINGER R, SWART H. Vulnerability in graphs-a comparative survey[J]. Journal of Combinatorial Mathematics and Combinatorial Computing, 1987, 11(6): 13-22.
- [19] SERGEY N D, JOS E F. Mendes. Scaling properties of scale-free evolving networks: continuous approach[J]. Physical Review, 2001, 63(5): 223-238.
- [20] DIPANKAR D. Advances in artificial immune systems[J]. IEEE Computational Intelligence Magazine, 2006, 1(4): 40-49.
- [21] 朱思峰, 刘芳, 柴争义. 基于免疫计算的 TD-SCDMA 网络基站选址优化[J]. 通信学报, 2011, 32(1): 106-110.  
ZHU S F, LIU F, CHAI Z Y. Immune computing-based base station location planning in the TD-SCDMA network[J]. Journal on Communications, 2011, 32(1): 106-110.
- [22] CCSDS. CCSDS350.1-G-1. Security Threats Against Space Mission[S]. Washington, Office of Space Communication, National Aeronautics and Space Administration, 2006:3-5.
- [23] MARKUS W, AXEL J, ERICH L, *et al.* Analysis of system parameters for LEO/ICO-satellite communication networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1995, 13(2): 371-381.
- [24] GREGORY A, ORNDORFF, BURUCE F, *et al.* Clustered architecture for responsive space[A]. AIAA Reinventing Space Conference[C]. 2007. 1-14.
- [25] AKYILDIZ I F, EYLEM E, MICHAEL D B. MLRS: a novel routing algorithm for multilayered satellite IP networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2002, 10(3): 411-424.
- [26] LUGLIO M, THEODORIDIS G, ROSETI C, *et al.* A TCP driven CAC scheme: efficient resource utilization in a leaky HAP-satellite integrated scenario[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009, 45(3): 885-898.

#### 作者简介:



董飞鸿 (1987-), 男, 陕西西安人, 解放军理工大学博士生, 主要研究方向为空间信息网络体系结构、卫星通信、计算智能、网络抗毁性等。

吕晶 (1965-), 男, 江苏南京人, 解放军理工大学教授, 主要研究方向为卫星通信、卫星导航等。

巩向武 (1986-), 男, 山东莱芜人, 解放军理工大学博士生, 主要研究方向为空间通信、网络安全、现代优化算法等。

李超 (1987-), 男, 辽宁大连人, 总参通信工程设计研究院助理工程师, 主要研究方向为卫星通信、认知无线电、现代优化算法等。