

控制与决策

Control and Decision



基于节点修复的低轨卫星网络动态抗毁性模型

聂媛媛, 方志耕, 刘思峰, 邵瑞瑞, 解士昆

引用本文:

聂媛媛, 方志耕, 刘思峰, 等. 基于节点修复的低轨卫星网络动态抗毁性模型[J]. 控制与决策, 2020, 35(5): 1247–1252.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0954>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于误码率与中断概率约束的femtocell网络分布式功率控制

Distributed power control based on bit error rate and outage probability constraint in two-tier femtocell networks
控制与决策. 2020, 35(4): 916–922 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1262>

能量和带宽受限下的分布式一致性融合估计器

Consensus-based distributed fusion estimator with energy and bandwidth constraints
控制与决策. 2020, 35(1): 16–24 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0492>

基于自适应鲁棒性的入侵检测模型

A new intrusion detection model based on adaptability and robustness
控制与决策. 2019, 34(11): 2330–2336 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0592>

一种无线传感器网络能耗均衡的自适应拓扑博弈算法

Energy balanced and self adaptation topology control game algorithm for wireless sensor networks
控制与决策. 2019, 34(1): 72–80 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0968>

基于LM算法的在线自适应RBF网结构优化算法

Online self-adaptive optimal algorithm for RBF network based on Levenberg–Marquardt algorithm
控制与决策. 2017, 32(7): 1247–1252 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.0887>

具有间歇性观测的无线传感器网络分布式容错目标跟踪

Fault tolerant distributed target tracking with intermittent observations in wireless sensor networks
控制与决策. 2016, 31(6): 1032–1036 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.0733>

基于网络外部性与产品替代的链与链纵向结构选择

Control structure of chain to chain competition under network externality and product substitutability
控制与决策. 2016, 31(5): 863–868 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.0613>

基于库存切换的不确定动态供应链网络系统模糊鲁棒控制

Fuzzy robust control of uncertain dynamic supply chain network system based on switched inventory
控制与决策. 2015, 30(5): 892–898 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2014.0124>

基于节点修复的低轨卫星网络动态抗毁性模型

聂媛媛^{1†}, 方志耕^{1,2}, 刘思峰^{1,2}, 邵瑞瑞¹, 解士昆¹

(1. 南京航空航天大学 经济与管理学院, 南京 211106; 2. 南京航空航天大学 灰色系统研究所, 南京 211106)

摘要: 基于复杂网络理论, 建立基于多智能体的低轨卫星网络动态抗毁性模型. 完成低轨卫星网络的分布式拓扑结构的构建, 将每个网络节点看成是一个具有自修复能力的 agent, 并在不完全信息条件下, 采用一般性攻击策略研究信关站的分布、攻击强度、攻击力度、信息指数、自修复能力对低轨卫星网络抗毁性的影响. 仿真结果表明: 系统存在恢复时滞, 对随机打击具有较强的鲁棒性, 对蓄意打击脆弱性降低、稳定性提高, 自修复性能弱化了网络的无标度特性; 信息指数比攻击强度及攻击力度对网络抗毁性的影响更大; 信关站分布对空间段网络抗毁性的影响较小, 对地面段网络抗毁性影响较大, 表明星际链路使得低轨卫星星座对地面网的依赖性大为降低.

关键词: 低轨卫星网络; 自修复; 不完全信息; 抗毁性

中图分类号: TN391.9

文献标志码: A

Dynamic invulnerability model of LEO satellite network based on node repair

NIE Yuan-yuan^{1†}, FANG Zhi-geng^{1,2}, LIU Si-feng^{1,2}, SHAO Rui-rui¹, XIE Shi-kun¹

(1. College of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China; 2. Institute for Grey Systems, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: Based on the complex network theory, a dynamic invulnerability model of low earth orbit (LEO) satellite network based on multi-agent is established. The distributed topology structure of LEO satellite network is completed, each network node is regarded as a self repairing agent, and under the condition of incomplete information, the general attack strategy is used to study the influence of the gate-station's distribution, attack intensity, attack strength, information index and self repair ability to the survivability of low orbit satellite network. The simulation results show that the system exists recovery lag, it has strong robustness to random strike, and lower vulnerability and better stability for deliberate attack, and self repair performance reduces the network's scale-free characteristics; information index has greater impact on network survivability than attack intensity and attack strength, and the distribution of gate-stations has little effect on network destruction, which shows that the dependence of the low orbit satellite constellations on the ground network is greatly reduced due to the use of interstellar links.

Keywords: LEO satellite network; self repair; incomplete information; invulnerability

0 引言

低轨通信卫星 (LEO) 星座实质上是一个由多颗功能相同或相似的卫星, 在空间中遵循一定的组织结构分布, 并由星间链路负责将卫星节点连接起来的、对地具有有效通信覆盖的空间网络通信系统. 低轨卫星轨道高度低, 传输时延小, 能够对地形成多重覆盖, 如何评估低轨卫星网络在天战环境下的抗毁性成为亟待研究的课题. 复杂网络抗毁性研究始于 Albert 等^[1] 对不同度分布网络在随机失效和故意攻击两种模式下抗毁性的研究, 在此基础上又有众多学者对

ER 随机网络、WS 小世界网络以及无标度网络等复杂网络抗毁性^[2-5] 进行了考察, 但大都是研究随机失效或蓄意攻击下的抗毁性. 随后, 文献 [6-7] 提出了不完全信息条件下复杂网络的一般性攻击策略, 文献 [8] 在随机、故意和不完全信息 3 种条件下建立了复杂网络的修复模型.

目前, 能够有效度量低轨卫星网络动态抗毁性的模型还很缺乏, 大多数都是关于卫星或卫星系统可靠性的建模方法^[9-11]. 随着各国军事武器愈发先进, 单纯只考虑对空间网络或地面网络的随机性和智能打

收稿日期: 2018-07-11; 修回日期: 2018-11-14.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (71671091).

责任编辑: 程龙.

[†]通讯作者. E-mail: yynnuaa@163.com.

击都是极端和不合现实的. 为此, 基于 mobile agents 的自修复性能, 研究不完全信息条件及一般性攻击策略下的低轨卫星网络抗毁性, 对地面段网络和空间段网络进行双重打击, 并考察攻击力度、攻击强度、信息指数等多重因素对星座抗毁性的影响, 更真实地反映低轨卫星网络在实战环境下的抗打击能力.

1 低轨卫星网络的复杂网络描述

1.1 基于多智能体的低轨卫星网络模型

低轨道卫星网络拓扑结构如图1所示, 以图的形式表示为

$$G = (V, E). \quad (1)$$

其中: $V = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}$ 为网络节点集合, $E = \{e_1, e_2, \dots, e_M\}$ 为链路集合.

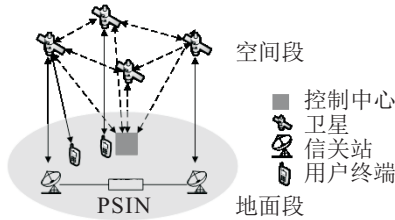


图1 多智能体低轨卫星网络结构

从业务的角度将节点 agent 划分为3类: 地面控制中心 H 、信关站 X 和被控卫星 A , 有

$$V = H \cup X \cup A. \quad (2)$$

将网络进一步分解成彼此依存的控制网络 G_H 、映射网络 G_X 、空间卫星网络 G_A 三层结构, 分别采用控制链路、馈送链路及星际链路进行通信. 表述如下:

1) 控制网络 $G_H = (V_H, E_H)$, 包括网络控制中心、卫星控制中心、信息管理系统, 完成对卫星工作状态的监测、跟踪、控制以及对故障的排查、诊断与修复等. 该指挥中心是整个网络的指挥控制节点和中枢单元, 可提供星座所必需的控制指令和相关状态的信息传送^[12].

2) 映射网络 $G_X = (V_X, E_X)$, 负责呼叫建立、连接到地面 PSTN (公用电话网) 和卫星星座的信关站, 是融合星地网络的桥梁, 采用馈送链路连接卫星.

3) 空间卫星网络 $G_A = (V_A, E_A)$, 包括在轨卫星及备份卫星, 在不同轨道平面内均匀分布相同数量的卫星, 星际链路的使用使得卫星之间的连接对地面的依赖程度大大降低, 提高了星座完成任务的独立性, 利用很少的地面站便可以完成通信任务.

1.2 低轨卫星网络的抗毁性描述

低轨卫星网络抗毁性是指网络中系统控制中心、信关站、卫星在遭受到意外事故、故障或者攻击时,

网络维持其功能的能力. 不同的业务需要不同的传输方式. 对于一些手持终端业务, 卫星网络会自动选择最便宜也是最近的路径传送信号. 如果用户是在一个人烟稀少的地区, 电话将直接由卫星层层转达到目的地; 如果用户是在一个地面移动电话系统 (GSM 或 CDMA 移动通信系统) 的邻近区域, 则控制系统会使用地面移动通信系统的网络传送电话讯号, 这意味着地面站给空间卫星网络提供了更多的选择路径; 若任务是面向地面网的 PSTN 业务, 则需要经过信关站进行连接. 令 G_C 为信关站构成的映射网络及空间卫星网络合并后的骨干网络, 记为

$$G_C = G_X \cup G_A. \quad (3)$$

此外, 在系统控制中心处于可用状态的情况下, 在卫星遭到人为攻击或故障时, 可启动卫星的自修复功能, 从而提高卫星网络的抗毁性. 应用全概率分析法, 低轨卫星网络的抗毁性可以表示为

$$R_G = R_{G_C} = R(H)R_G(C|H) + R(\bar{H})R_G(C|\bar{H}). \quad (4)$$

其中: H 、 $\bar{H}$ 表示系统控制中心分别处于可用状态和不可用状态, $R(H)$ 为系统控制中心的可用度, $R_G(C|H)$ 、 $R_G(C|\bar{H})$ 分别为 G_C 在系统控制中心可用及不可用状态下的网络抗毁度.

2 攻击策略

2.1 节点重要度

节点重要度用相对节点度与相对节点介数^[13]的乘积进行衡量, 有

$$W_{vi} = D_{vi}C_{vi} = \frac{d_{vi}}{N-1} \cdot \frac{\sum_{\omega \neq \omega' \in V} \frac{\sigma_{\omega\omega'}(v_i)}{\sigma_{\omega\omega'}}}{N(N-1)}. \quad (5)$$

其中: D_{vi} 为相对节点度; C_{vi} 为相对节点介数; d_{vi} 为节点度, 即可达1-跳邻居节点数; $\sigma_{\omega\omega'}$ 为 ω 与 ω' 之间的最短路径数, $\sigma_{\omega\omega'}(v_i)$ 为经过 ω 和 ω' 之间的所有最短路径的个数.

2.2 基于多智能体的低轨卫星网络模型

在复杂网络抗毁性研究中, 被广泛应用的攻击策略为 Albert 等提出的随机攻击和蓄意攻击. 通常, 敌方对网络信息处于部分信息已知部分信息未知的灰色状态下, 因此采用文献 [6-7] 的不完全信息条件下的攻击策略. 按照节点的重要性 $W_{vi}(t)$ 从高到低进行排序, 并将序号记为 l_{vi} . 引入信息指数 (γ, k) , 以概率 Δ_{vi} 对网络中的节点进行不等概率不放回抽样, 对抽中的 γN 个节点和剩下的 $(1 - \gamma N)$ 个节点分别按服从后文给出的式 (10) 的泊松分布依次进行重点打

击和随机打击. 其中: $\gamma \in [0, 1]$ 为情报广度参数, 代表攻击方对卫星网络的整体了解程度; $k \in [0, +\infty)$ 为情报精度参数, 精度越高、节点重要度越大越容易被选中. 不等抽样概率为

$$\Delta_{vi} = \frac{l_{vi}^{-k}}{\sum_{i \in V} l_{vi}^{-k}}. \quad (6)$$

2.3 攻击力度函数

V' 表示具有网络中的 γN 个节点的节点集合, 对于 $vi \in V'$ 中的已知信息节点, 攻击力度函数为初始节点重要性 W_{vi} 的函数, 不考虑网络节点或边的变化对节点重要性的影响, 有

$$\delta_{vi} = \alpha(1 + W_{vi}). \quad (7)$$

对于 $vi \in (V - V')$ 的未知信息节点, 攻击力度函数为

$$\delta_{vi} = \theta, \quad vi \in (V - V') \quad (8)$$

其中 α, θ 为攻击力度指数.

3 低轨卫星网络的动态抗毁性建模

3.1 节点的agent模型

智能体 (agent) 是一个可以感知外部环境并依赖自己的“经验”自主地作出相应响应的软件实体^[14]. 节点 agent 可以用一个三元组描述为 $A ::= \langle \text{位置}(P), \text{自修复率}(\mu), \text{状态}(S) \rangle$.

1) agent 位置.

令整个系统区域 S 是一个半径为 $R = (R_e + h)$ 的球有界区域, R_e 为地球半径, h 为卫星轨道高度, agent 初始位置是在轨均匀地分布在 S 的球面上, 系统控制中心为地球表面.

2) agent 自修复率.

自修复性是表征在一定的攻击强度下节点能恢复到完成规定通信功能的能力. 对于每个 agent, 在受到打击时, 系统控制中心启动自修复机制, 重建与其他 agent 连接的能力. 考虑修复资源的优化分配, 系统采用自适应修复策略, agent 的自修复率为节点度 d_{vi} 的函数^[15]. 同时, agent 的自修复率还与 t 时刻遭受的攻击力度 $\delta(t)$ 相关, 攻击力度越大, 节点度越小, 自修复率越低, 所需的修复时间越长. 假设攻击强度对自修复率的影响为一般性比例关系, 则 agent 自修复率为

$$\mu_{vi} = \frac{\beta}{\delta_{vi}(t)} \rho^{\frac{1}{d_{vi}}}, \quad \beta \in [0, 1], \quad \rho \in (0, 1]. \quad (9)$$

其中: β 为调节参数, ρ 为修复基数.

3) agent 的状态 S .

节点 vi 在任意时刻处于存活可用 ($S = 1$) 或不

可用 ($S = 0$) 两种状态. 当节点遭受攻击时, 该节点处于自修复状态, 工作效率将降低, 并进一步影响网络的整体状态. 不管是边受到干扰还是节点受到破坏, 只要破坏强度 δ 不超过一定的阈值系数, 均能自我恢复成可用状态. 因此, 对节点进行攻击不一定导致节点失效.

敌方的分波攻击服从泊松分布, 每个 Δ_t 内发生 0 次攻击或 1 次攻击, 若各 Δ_t 发生攻击相互独立, 则发生于长度为 t 的时间区间内的攻击数为一随机量 $x(t)$, λ 为单位时间内发生的平均次数. 当 $x(t) = n$ 时概率服从泊松分布

$$P(x(t) = n) = \frac{(\lambda t)^n e^{-\lambda t}}{n!}, \quad \lambda, t > 0, n = 0, 1, \dots \quad (10)$$

定义 T_i 为该泊松过程的到达时间, 初始攻击时刻 $T_1 = 0$. 由于泊松过程的到达时间间隔是相互独立且服从参数为 λ 的指数分布, 即 agent 在两次攻击之间的自修复间隔时间 τ_n 服从指数分布, 在每个间隔时间 τ_n 内自修复率为常数, $\mu_{vi}(\tau_n) = \mu_{vi}$, agent 在两次攻击到来时刻之间的自修复概率密度函数为

$$m_{vi}(\tau_n) = \mu_{vi} e^{-\mu_{vi} \tau_n}. \quad (11)$$

自修复概率密度函数

$$m_{vi}(t) = \mu_{vi} e^{-\mu_{vi} t}. \quad (12)$$

设系统控制中心在 T_s 时刻修复完成, T_k 表示 agent 被攻击的时刻, 在第 n 次攻击到来时刻 T_n , 其自修复度即存活度为

$$R_{vi}(t) = \int_{\max(T_s, T_k)}^{T_n} m_{vi}(t) dt = \int_{\max(T_s, T_k)}^{T_n} \mu_{vi} e^{-\mu_{vi} t} dt; \quad (13)$$

$$R_{vi}(t) = \begin{cases} 1 - e^{-\frac{\beta}{\delta_{vi}}(T_n - T_k) \rho^{\frac{1}{d_{vi}}}}, & T_k > T_s; \\ 1 - e^{-\frac{\beta}{\delta_{vi}}(T_n - T_s) \rho^{\frac{1}{d_{vi}}}}, & T_k \leq T_s. \end{cases} \quad (14)$$

令 θ 为 $(0, 1)$ 之间的随机数, 若 $R_{vi}(t) > \theta$, 则故障 agent 恢复正常状态^[16], 否则仍处于修复状态, 表示为

$$S_{vi}(t) = \begin{cases} 1, & R_{vi}(t) > \theta; \\ 0, & R_{vi}(t) \leq \theta. \end{cases} \quad (15)$$

由式(4), 打击结束后, 判断各节点的存活状态, 网络抗毁度为

$$\begin{aligned} R_G = & P(S_H = 1)R_G(C|H) + P(S_H = 0)R_G(C|\bar{H}) = \\ & [\Delta_H R_H + (1 - \Delta_H)]R_G(C|H) + \\ & \Delta_H(1 - R_H)R_G(C|\bar{H}). \end{aligned} \quad (16)$$

3.2 低轨卫星网络的抗毁度测度

一个抗毁性较高的网络应能经受较多次数的外界打击,将全网效能下降到初始值的比值 F 作为抗毁性的指标,定义抗毁性测度值

$$F = \frac{R_G}{R_G^0} = \frac{\sum_{i \neq j \in G} \varepsilon_{ij}(t)}{N(N-1)} = \frac{\sum_{i \neq j \in G} \varepsilon_{ij}(t)}{\sum_{i \neq j \in G} \varepsilon_{ij}(t_0)} = \frac{\sum_{i \neq j \in G} t_{ij}(t)}{\sum_{i \neq j \in G} t_{ij}(t_0)}. \quad (17)$$

其中: R_G 、 R_G^0 分别为初始时刻和攻击后的抗毁度; $t_{ij}(t)$ 为任意两节点 i 与 j 之间通信所用的最短时间,当2个节点之间不连通即任一节点处于失效或修复状态, $t_{ij} \rightarrow \infty$,两节点之间的效率 $\varepsilon_{ij} = 0$.按照不同的攻击强度 δ ,可得到低轨卫星网络全网效能下降至原来一半时点攻击的临界移除阈值,阈值越大表明攻击成本越高,抗毁性越高,以此评价卫星对人为攻击的耐受情况.

3.3 节点修复模型计算及仿真步骤

step 1: 初始化网络中的节点负载矩阵 L 、邻接矩阵 A 、计算节点重要度和初始抗毁度.

step 2: 按照节点重要度排序,以概率 Δ_{vi} 抽取一个节点,更新剩余节点的 Δ_{vi} ,作不放回抽样,直到抽出的节点数为 γN ,将这 γN 个节点纳入蓄意打击集合 A_S ,剩余的 $(1-\gamma N)$ 个节点纳入随机打击集合 A_R .

step 3: 根据式(10)的到达时刻,依次对 A_S 和 A_R 中的节点分别按照式(7)和(8)的攻击力度进行打击,被打击的节点失效,处于不可用状态.

step 4: 在每次打击到来的时刻,结合各节点被攻击的时刻计算修复时间,根据式(14)计算修复度,产生随机数,判断系统控制中心是否处于可用状态,若可用,则按照以上方法判断各个卫星节点的存活度及是否恢复正常,否则仍处于失效不可用状态.

step 5: 根据每个攻击到来时刻的节点存活度计算抗毁度 F .

4 仿真分析

按照最佳卫星星座设计原则,利用 N 个卫星数量相同、具有特定空间关系的极轨道平面,构成全球覆盖的低轨道星座系统.以低轨卫星网络铱系统为研究对象,对所提出的算法进行模拟仿真.该星座轨道不需要专门的地面接收站,每部卫星移动终端都可以与卫星连接.该星座的66颗卫星分布在6个圆形的、轨道倾角为 $i = 86.4^\circ$ 的近极轨道平面上,每颗卫星节点度因顺行轨道、逆行轨道和高纬地区都有所

不同.地面站包含12个信关站和1个系统控制中心,地面段系统控制中心与空间段每颗卫星都可以建立传输链路.如图2所示,铱系统的12个信关站分别位于坦佩、东京、莫斯科、曼谷、首尔、北京、台北、罗马、里约热内卢、孟买、吉达和夏威夷.每个信关站的第一根副天线与过顶卫星进行通信,另一根副天线与下一卫星保持联系.设初始时刻节点 $v_{1,1}$ 初始相位为0,根据信关站的地理位置确定其当前距离最近的可见卫星 $v_{i,j}$ 和下一卫星 $v_{i,j+1}$.

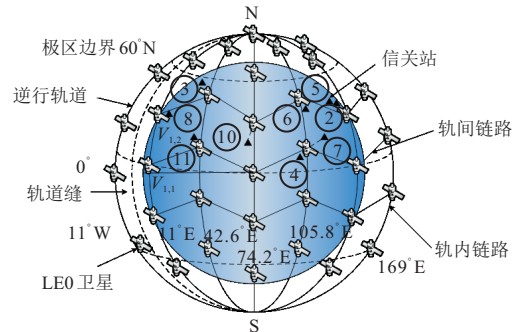
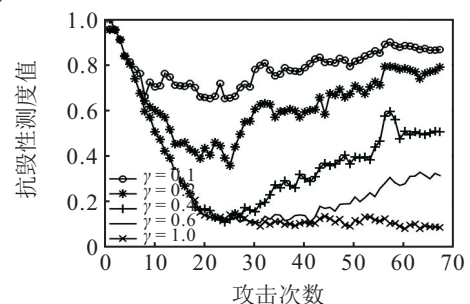


图2 铱系统网络

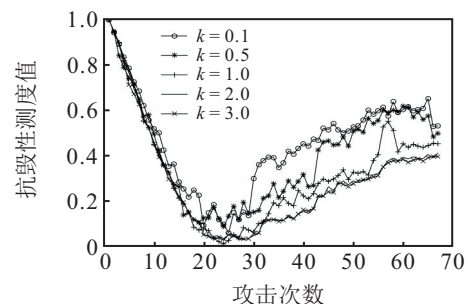
在初始时刻,仿真参数设置为: $\beta = 0.1, \alpha = 4, \theta = 0.001, \lambda = 1, \gamma = 0.5, k = 1, \rho = 0.75$.

4.1 信息指数对抗毁性的影响

图3为信息指数对抗毁性的影响.由图3可见:1)当 $k = 1$ 时, γ 从0.1逐渐增加至1,随着 γ 的增加,抗毁性下降加快,初期agent存活率下降至14%即可使网络抗毁性下降至初始值的一半.2)第11次攻击后,网络抗毁性会出现阶跃性回升,阶跃性回升到来的时刻随 γ 的增加变晚,这是由于攻击到来时,系统控制



(a) F 随 γ 数值变化



(b) F 随 k 数值变化

图3 信息指数对抗毁性的影响

中心和被攻击卫星逐渐进入故障状态,随着时间的推移,系统控制中心自修复一段时间后处于可用状态,并逐渐完成对被攻击的重要性较高卫星的修复,因此抗毁性在下降一段时间后产生回升现象,表明在信息精度指数一定时,信息广度指数越高,系统控制中心在初始时刻被攻击的概率越大,启动自适应修复机制的时间越早。3)当 $\gamma = 0.4$ 时, k 从0.1增加到2,随着情报精度指数的增加,系统的抗毁性下降变快。4)当 k 从2增加到3时,抗毁性下降程度差别不大,表明在信息精度指数达到2时,能够完全掌握 γ 范围内的节点信息,并按照重要度的大小由高到低依次打击。

4.2 打击强度、打击力度对抗毁性的影响

图4为打击强度、打击力度对抗毁性的影响。由图4可见:1)攻击频率越高,强度越大,自修复成功可能性越低,网络抗毁性下降得越快。在攻击强度与攻击力度较弱时,网络能够快速恢复至较高的抗毁水平。2)当 $\lambda = 2$ 时,打击到第12次,全网效能下降至初始值的0.5倍以下,其中攻击频率比攻击力度对系统抗毁度的影响更为明显,能够使系统更快地处于瘫痪状态。

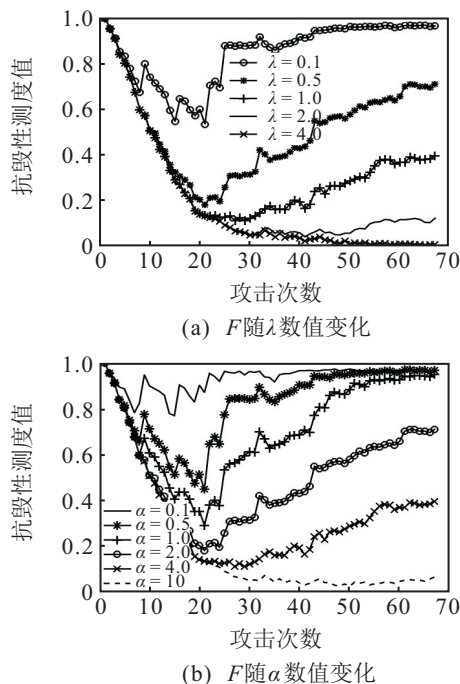


图4 打击强度、打击力度对抗毁性的影响

4.3 自修复基数对抗毁性的影响

图5为一般性攻击方式下不同自修复基数的全网效能变化曲线。由图5可见:1)在打击的初始阶段, ρ 处于0.1、0.5、0.98三个不同值时,网络抗毁性持续下降, ρ 的变化对网络抗毁性不产生影响;打击一段时间后,抗毁性逐渐提高,表明自修复性能使得网络对蓄意攻击的抗毁性提高,网络的无标度特性在

一定程度上被弱化。2) ρ 提高后,网络抗毁性回升的时刻提前,表明被打击节点所需修复的时间减小。3)打击结束时刻,网络抗毁性测度值 F 随着 ρ 的增加而增加,这是由于系统控制中心的期望恢复时间减小,其他被打击节点开始恢复时间提前,导致打击结束时刻节点生存率提高。

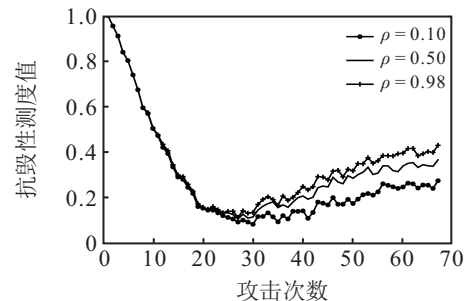


图5 不同自修复基数的全网效能变化曲线

4.4 信关站位置分布对抗毁性的影响

图6为信关站对抗毁度的影响。由图6可见,信关站对处于完成不同任务的网络影响不一,对于涉及到地面段的业务,6号信关站对抗毁性影响最大,重要度最高。对于一些手持终端业务,只需通过空间段的星际链路独立转发完成,信关站的位置分布对抗毁性未产生显著性影响;对于一些手持终端业务,只需通过空间段的星际链路独立转发完成,信关站的位置分布对抗毁性未产生显著性影响;对于面向地面网的PSTN业务,将每个地面段的PSTN业务收缩为信关站连接的一个虚拟节点,该虚拟节点之间通信需要经过信关站进行连接,信关站对其产生的影响最大;而该系统覆盖的每个移动用户终端与地面段PSTN之间的全网效能受信关站的位置影响较小,这间接验证了铱星空间卫星网络对于地面通信网络依赖性不高的特性。

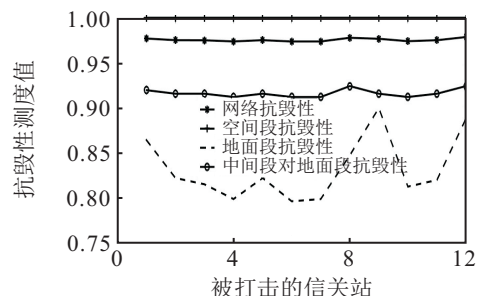


图6 信关站对抗毁度的影响

5 结论

本文提出了一种具有节点修复能力的LEO星座抗毁性测度模型,在构建网络抗毁性模型的基础上,在不完全信息条件及一般性攻击策略下对网络失效和恢复过程进行分析。通过抗毁性测度模型,分别分

析了信息指数、自修复基数、攻击力度、攻击强度及信关站与网络抗毁性之间的关系. 仿真结果表明: 具有节点修复性能的低轨卫星通信网络对蓄意攻击表现的脆弱性降低, 自修复性能和信息指数将显著影响网络的抗毁性, 攻击强度略大于攻击力度对网络抗毁性的影响. 此外, 网络抗毁性在一定程度上也会受到信关站的影响, 但是依赖性不高. 其中, 面向地面段的任务受信关站影响显著, 且6号信关站在所有信关站中重要度最高, 为关键节点. 仿真结果对实战可提供以下意见: 对于敌方, 在采用具体性的攻击策略时, 一是要尽可能提高情报的广度和精度, 以利于进行针对性的有效打击; 二是在提高攻击强度或攻击力度之间作决策时, 可结合不同攻击方式的武器成本进行权衡. 对于守方, 要尽可能提高网络的故障排查和自修复能力, 做好系统的拓扑结构信息保密工作, 在成本冗余的情况下, 适当增加系统控制中心, 加强对关键节点的维护.

参考文献(References)

- [1] Albert R, Jeong H, Barabasi A L. Error and attack tolerance of complex networks[J]. *Nature*, 2000, 406: 378-382.
- [2] Crucitti P, Latora V, Marchiori M, et al. Efficiency of scale-free networks: Error and attack tolerance[J]. *Physica A*, 2003, 320(C): 622-642.
- [3] Crucitti P, Latora V, Marchiori M, et al. Error and attack tolerance of complex networks[J]. *Physica A*, 2004, 340(3): 388-394.
- [4] Gallaway D S, Newman M E J, Strogatz S H, et al. Network robustness and fragility: Percolation on random graphs[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(25): 5468-5471.
- [5] Gallos L K, Cohen R. Stability and topology of scale-free networks under attack and defense strategies[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(18): 18870(1-4).
- [6] Wu J, Deng H Z, Tan Y J. Attack vulnerability of complex networks based on local information[J]. *Modern Physics Letters B*, 2007, 21(16): 1007-1014.
- [7] 田旭光, 张成名. 不完全信息条件下的装备保障网络抗毁性模型[J]. *系统工程理论与实践*, 2017, 37(3): 790-798.
(Tian X G, Zhang C M. Survivability model of equipment support network based on incomplete information[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2017, 37(3): 790-798.)
- [8] 胡斌, 黎放. 多种攻击策略下无标度网络修复策略[J]. *系统工程与电子技术*, 2010, 32(1): 86-89.
(Hu B, Li F. Repair strategies of scale-free networks under multifold attack strategies[J]. *Systems Engineering and Electronic*, 2010, 32(1): 86-89.)
- [9] Castet J F, Saleh J H. Beyond reliability, multi-state failure analysis of satellite subsystems: A statistical approach[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2009, 95(4): 311-322.
- [10] Jian Guo, Liora Monas, Eberhard Gill. Statistical analysis and modelling of small satellite reliability[J]. *Acta Astronautica*, 2014, 98: 97-110.
- [11] Erlank A O, Bridges C P. Reliability analysis of multicellular system architectures for low-cost satellites[J]. *Acta Astronautica*, 2018, 147: 183-194.
- [12] 朱立东, 吴廷勇, 卓永宁. 卫星通信导论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015: 142-143.
(Zhu L D, Wu T Y, Zhuo Y N. *Introduction to satellite communications*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015: 142-143.)
- [13] 杨孝平, 尹春华. 复杂网络可靠性评价指标[J]. *北京信息大学学报*, 2010, 25(3): 92-96.
(Yang X P, Yin C H. Research of reliability indexes of complex network[J]. *Journal of Beijing Information Science and Technology University*, 2010, 25(3): 92-96.)
- [14] 王金伟, 孙华志, 孙德兵. 基于能耗的无线传感器网络最优簇首数研究[J]. *传感器与微系统*, 2011, 30(7): 45-50.
(Wang J W, Sun H Z, Sun D B. Research on the number of optimal cluster heads of wireless sensor networks based on energy consumption[J]. *Sensors and Microsystem Technologies*, 2011, 30(7): 45-50.)
- [15] 田旭光, 朱元昌, 邸彦强. 指挥控制系统网络动态抗毁性[J]. *火力与指挥控制*, 2012, 37(6): 88-91.
(Tian X G, Zhu Y C, Di Y Q. Study on dynamic invulnerability of command and control network[J]. *Fire Control & Command Control*, 2012, 37(6): 88-91.)
- [16] 崔琼, 李建华, 王宏, 等. 基于节点修复的网络化指挥信息系统弹性分析模型[J]. *计算机科学*, 2018, 45(4): 117-121.
(Cui Q, Li J H, Wang H, et al. Resilience analysis model of networked command information system based on node reparability[J]. *Computer Science*, 2018, 45(4): 117-121.)

作者简介

聂媛媛(1989—), 女, 博士生, 从事复杂装备可靠性、卫星网络抗毁性的研究, E-mail: yynnuuaa@163.com;
方志耕(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 从事质量管理与控制、复杂装备研制管理等研究, E-mail: zhigengfang@163.com;
刘思峰(1955—), 男, 教授, 博士生导师, 从事灰色理论、数量经济学等研究, E-mail: sfliu@nuaa.edu.cn;
邵瑞瑞(1991—), 女, 博士生, 从事卫星网络效能的研究, E-mail: 15252477151@163.com;
解士昆(1974—), 男, 硕士, 从事体系和系统的架构设计与分析优化等研究, E-mail: kxie2004@163.com.

(责任编辑: 郑晓蕾)