

航空自组网节点失效分析方法

谢丽霞¹, 严莉萍¹, 杨宏宇^{1,2}

(1. 中国民航大学计算机科学与技术学院, 天津 300300;

2. 中国民航大学安全科学与工程学院, 天津 300300)

摘要: 为有效分析节点失效波及反应导致航空自组网稳定性的变化, 提出一种航空自组织(AANET)节点失效分析方法。首先, 根据 AANET 特性建立业务-实体非对称依赖网络模型; 其次, 设计改进失效流量重分配算法, 获取受影响节点数据集; 最后, 根据节点权值计算在 AANET 中的波及影响值, 并对波及影响程度定级。实验结果表明所提方法在 AANET 节点失效波及影响分析方面具有更好的准确性。

关键词: 失效模式; 业务流程; 非对称依赖网络; 流量再分配算法; 波及影响

中图分类号: TP309

文献标识码: A

DOI: 10.11959/j.issn.2096-109x.2021084

Aeronautical Ad Hoc network node failure analysis method

XIE Lixia¹, YAN Liping¹, YANG Hongyu^{1,2}

1. College of Computer Science and Technology, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

2. College of Safety Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

Abstract: To analyze the stability changes of aeronautical ad hoc network (AANET) caused by node failure affecting reaction effectively, an AANET node failure analysis method was proposed. Firstly, the model of business-entity asymmetric dependent network was established based on the characteristics of AANET. Secondly, an improved failure traffic redistribution algorithm was designed to obtain the affected node set. Finally, the AANET affecting impact value was calculated according to the node weight, then the affecting impact degree was determined. The experimental results show that the proposed method has better accuracy in the failure affecting impact analysis of AANET.

Keywords: failure mode, business process, asymmetric dependent network, flow redistribution algorithm, affecting impact

收稿日期: 2021-04-01; 修回日期: 2021-05-24

通信作者: 杨宏宇, yhyxlx@hotmail.com

基金项目: 国家自然科学基金(U1833107)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (U1833107)

论文引用格式: 谢丽霞, 严莉萍, 杨宏宇. 航空自组网节点失效分析方法[J]. 网络与信息安全学报, 2021, 7(6): 21-30.

XIE L X, YAN L P, YANG H Y. Aeronautical Ad Hoc network node failure analysis method[J]. Chinese Journal of Network and Information Security, 2021, 7(6): 21-30.

1 引言

随着航空自组网 (AANET, aeronautical Ad Hoc network)^[1-3]在民用航空空中通信领域的广泛应用,其面临的网络安全挑战日益严峻。当发生 AANET 的网络攻击或设备损坏时,易引起节点失效波及反应^[4],从而对 AANET 的网络通信质量造成严重影响。因此,研究 AANET 中节点失效波及反应,对提高 AANET 的应急处理能力和维护网络安全具有重要意义。

面向 AANET 的网络安全研究包括安全路由机制^[5-6]、安全态势预测^[7]、依赖网络建模^[4,8-9]、波及影响分析方法^[10-13]等领域。在依赖网络建模方面, Buldyrev 等^[4]提出一一对应关系的依赖网络模型, Shao 等^[8]提出多重对应关系的依赖网络模型, Ma 等^[9]提出基于网络间逻辑映射关系的复杂网络建模方法。以上依赖网络建模的方法仅关注节点间关联关系,并未考虑节点本身的属性。在波及影响分析方法方面, Li 等^[10]提出具有固定失效概率的经典失效传播模型,但未考虑实际网络节点失效概率的动态变化性。Wang 等^[11]提出传统负载-容量模型并设定失效流量沿最短路径传输,但未考虑 AANET 实际流量传输情况。负载-容量模型在网络失效研究中的应用,为网络信息传输节点失效引起的波及反应分析提供了可行的方法。Shen 等^[12]提出基于可变负载的依赖网络节点失效波及影响分析模型,通过定义流量损失参数来计算与网络现有资源相关的流量损失并分析实际相互依赖系统中失效传播特性。韩丽等^[13]提出基于加权无标度网络的波及影响分析方法,按照节点权值再分配失效流量,但未考虑通信链路对网络波及反应的影响。上述节点失效波及影响分析方法广泛应用于电网、互联网领域的节点失效波及影响分析,但针对不同时刻,节点的失效概率不唯一,且对于节点初始流量和节点业务处理能力不同的 AANET,上述方法的节点失效波及影响分析效果不够理想。

针对上述节点失效分析方法中存在的网络建模不完全,未考虑网络流量重分配对网络波及影响等不足,本文提出一种 AANET 节点失效分析方法。

2 节点失效分析方法

AANET 节点失效分析方法由非对称依赖网络建立模块 (ADNEM, asymmetric dependent network establish module) 和波及影响分析模块 (AIAM, affecting impact analysis module) 组成,该方法流程如图 1 所示。

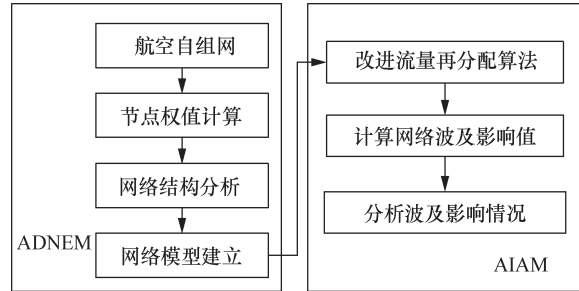


图 1 AANET 节点失效分析方法流程
Figure 1 The process of AANET node failure analysis method

两个模块的处理过程设计如下。

(1) ADNEM

首先,将 AANET 中传输数据的航空器节点作为实体节点,基于节点凝聚度计算节点权值,得到无向加权实体网络。然后,将 AANET 通信系统的业务抽象为业务节点,基于节点影响力计算节点权值,得到有向加权业务网络。最后,根据双层网络节点之间的映射关系,建立节点依赖矩阵,得到非对称依赖网络模型。

(2) AIAM

按照 AANET 特性分析受到波及影响的节点状态,根据实时 AANET 数据计算链路生存性,并将链路生存性用于改进失效流量再分配算法,在所建非对称依赖网络模型上应用该算法,获取失效节点集合和业务降级节点集合并用于网络波及影响分析。

3 非对称依赖网络模型构建

本文以 AANET 为研究对象,将 AANET 抽象为实体网络,将该网络的通信系统业务流程抽象为业务网络,根据网络间映射关系建立一个非对称依赖模型。网络模型的构建过程如下。

(1) 实体网络构建

首先,构建实体网络。实体网络为无向带权网络,用 $G_E=(V_E,E_E,W_E)$ 表示。 V_E 表示实体节点集

合，节点为各类民用航空器，共 n_E 个节点； E_E 表示边的集合，即实体节点之间存在的通信链路； W_E 表示实体节点权值的集合，节点权值由节点凝聚度决定。

然后，计算节点权值 W_E 。权值 W 的计算方法设计如下。

设 G_E 存在节点 i ，将 i 凝聚后的网络表示为 G_E^i 。凝聚指用一个新节点表征节点和其所有邻居节点^[14]。因此， G_E 的凝聚度 Φ 用总节点数 n_E 的倒数和网络平均最短路径长度 $\bar{d}_E$ 乘积表示。

$$\Phi = \frac{1}{n_E} \bar{d}_E = \frac{n_E - 1}{\sum_{i \neq j \in V_E} d_{i,j}} \quad (1)$$

其中， $n_E \geq 2$ ，节点 i 和 j 间最短距离为 $d_{i,j}$ 。节点凝聚度越大，失效后对网络正常业务运行影响越大。由此，求得实体节点 i 的权值为

$$W_E^i = 1 - \Phi(G_E) / \Phi(G_E^i) \quad (2)$$

最后，用矩阵表示实体网络。实体网络由矩阵 $A_E = [a_{ij}]_{n_E \times n_E}$ 表示，对角线元素 a_{ii} 为实体节点权值，非对角线元素 a_{ij} 表示节点间的通信链路。若实体节点间存在通信链路， $a_{ij}=1$ ，否则， $a_{ij}=0$ 。

(2) 业务网络构建

首先，将业务流程抽象为业务网络。在 AANET 中，实时通信系统运行的业务环节通过确定的执行顺序关联生成 AANET 业务流程，因此关联的业务环节之间存在严格前后关系。将业务流程抽象为业务网络，该网络为有向带权网络，用 $G_B = (V_B, E_B, W_B)$ 表示。 V_B 表示业务节点集合，节点为通信系统业务，共 n_B 个节点； E_B 表示边的集合，即业务节点之间的有向关联关系； W_B 表示业务节点权值的集合。

然后，计算业务节点权值 W_B 。权值 W_B 的计算方法如下。

AANET 业务包括空中交通管制、飞行数据传输、航空器位置追踪和机内娱乐。根据对网络服务质量要求不同，可依次将业务优先级 (BP, business priority) 划分为 1、2、3、4，其中 1 为最高级。AANET 用户包括管制人员、飞行人员、服务人员和乘坐人员，根据用户身份不同，可依次将用户影响力等级 (UI, user impact) 划分为 1、2、3、4。综合考虑 BP 和 UI 因素，本文设计的

节点固有影响力 θ_i 如表 1 所示。

表 1 节点固有影响力
Table 1 Node inherent impact

UI	BP			
	1	2	3	4
1	16	15	13	10
2	14	12	9	6
3	11	8	5	3
4	7	4	2	1

对节点固有影响力进行归一化，得到节点对 AANET 网络的固有影响力 Inh_i 。 Inh_i 可表示为

$$\text{Inh}_i = \frac{\theta_i}{\sum_{i=1}^{n_B} \theta_i} \quad (3)$$

在 AANET 中，不同时刻节点的流量不同，因此，量化节点动态影响力时应考虑不同时刻节点实时流量。节点动态影响力 Dyn_i 由单位时间内节点业务流量占网络业务总流量的比例表示，即

$$\text{Dyn}_i = \frac{F_i}{F_B} = \frac{F_i}{\sum_{i=1}^{n_B} F_i} \quad (4)$$

其中， F_B 表示单位时间内网络处理业务流量， F_i 表示节点 i 的业务流量，根据节点固有和动态影响力，业务节点权值由式(5)计算得到。

$$W_B^i = \text{Inh}_i + \text{Dyn}_i \quad (5)$$

最后，用矩阵表示业务网络。

AANET 中的业务网络由矩阵 $B_B = [b_{ij}]_{n_B \times n_B}$ 表示，AANET 业务节点权值即为 b_{ii} ， $i=1,2,\dots,n$ ，AANET 业务节点间有向关联关系即为 b_{ij} ， $i=1,2,\dots,n_B$ ， $j=1,2,\dots,n_B$ ，若业务节点间存在关联关系， $b_{ij}=1$ ，否则， $b_{ij}=0$ 。

(3) 非对称依赖模型构建

在 AANET 中，不同类型节点之间具有不同的关联关系，因此，可将 AANET 抽象为业务—实体非对称依赖网络模型（如图 2 所示）。

AANET 中通信业务依靠航空器搭载的网络设备实现功能，航空器为业务的实现提供实体基础，一旦航空器搭载的网络设备失效，则相应通信业务也将失效。因此，必须明确业务节点和实体节点间的逻辑映射关系。将节点间映射关系表示为 $C_R = [c_{ij}]_{n_E \times n_B}$ ，若 AANET 中的实体节点和业

务流程中的业务节点存在逻辑映射关系, 则 $c_{ij}=1$, 否则 $c_{ij}=0$ 。

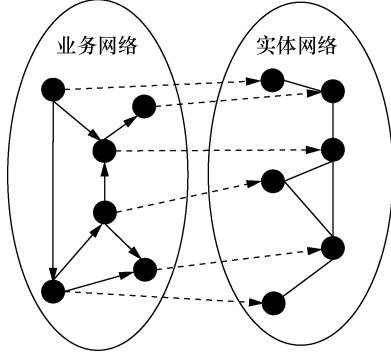


图 2 业务—实体非对称依赖网络模型
Figure 2 Business-physical interdependent network model

通过实体网络构建、业务网络构建和非对称依赖网络模型构建 3 个过程, 即可建立面向 AANET 的业务—实体非对称依赖网络模型, 该模型用多元组 $EB=(G_E, G_B, C_R)$ 表示, 其中, C_R 表示业务—实体网络映射关系。

4 波及影响分析

4.1 相关定义

本文研究做出以下定义。

- 1) 正常节点 W : 符合系统要求并能正常完成相应功能的节点。
- 2) 业务降级节点 D : 不符合系统要求且仅能完成部分功能的节点, 如带宽降低、时延增大的节点。
- 3) 失效节点 F : 无法正常完成相应功能且会引起波及反应的节点。
- 4) 节点波及影响概率 ρ : 正常节点受到波及影响转变为业务降级节点或失效节点的概率, 转换关系为

$$W(t_1) + F(t_1) \xrightarrow{\rho} F(t_2) + D(t_2) \quad (6)$$

其中, $W(t_i)$ 表示 t_i 时刻正常节点集合, $F(t_i)$ 表示失效节点集合, $D(t_i)$ 表示业务降级节点集合。

4.2 节点失效影响分析

在 AANET 中, 部分关键节点和骨干链路具有故障应急或灾备能力。因此, 当 AANET 中的关键节点或骨干链路发生故障或失效时, 由冗余备份组件或灾备组件接管节点或链路的核心业务

功能。对于没有配置冗余备份组件或灾备组件的节点和链路, 需要对各节点和链路上的业务流量进行重新分配, 这样易引起节点失效波及反应。因此, 对 AANET 中节点初始流量、节点业务处理能力和失效流量再分配方式进行特性分析, 可有效提高 AANET 节点失效波及影响分析的准确性。具体分析方法及其过程设计如下。

(1) 节点初始流量和业务处理能力计算

AANET 中, 节点 i 在网络中的位置不同, 初始流量则不同, 处于中心位置的节点一般具有较高流量。节点初始流量 ξ_i 由式 (7) 计算

$$\xi_i = \alpha k_i^\varepsilon + (1 - \alpha) \sum_{j \in \Gamma_i} k_j^\varepsilon \quad (7)$$

其中, α 为可调参数, 可调整节点度与邻居节点度对波及效应的影响程度 ($\alpha=0.5^{[15]}$), i 的度由 k_i 表示, 邻居节点 j 的度由 k_j 表示, i 的邻居节点集合由 Γ_i 表示, ε 用于控制节点度对初始流量的影响 ($\varepsilon=1$)^[16-17]。节点业务处理能力 cap_i 表示节点可处理业务量的最大值, 可由式 (8) 计算得到。

$$\text{cap}_i = (1 + \gamma) \xi_i \quad (8)$$

其中, γ 为容错系数 ($\gamma=0.06$)^[16], 表示节点流量过载后的容错能力。

(2) 改进流量再分配算法

AANET 中不同通信链路在发生网络安全事件后, 对失效流量的容错能力不同, 故本文提出使用链路生存性^[18]量化网络链路的生存能力。根据链路生存性改进失效流量再分配算法, 该算法设计如下。

- 1) 在集合 $N = \{n_i | n_1, n_2, \dots, n_n\}$ 中存储所有邻居节点。

- 2) 计算 AANET 中的链路持续时间。节点 i 坐标 (x, y, z) 表示为

$$\text{Loc}_i = \begin{cases} x = R \cdot \cos(N_{\text{lon},i}) \cos(N_{\text{lat},i}) \\ y = R \cdot \sin(N_{\text{lon},i}) \cos(N_{\text{lat},i}) \\ z = R + N_{\text{alt},i} \end{cases} \quad (9)$$

其中, N_{lon} 表示节点经度, N_{lat} 表示节点纬度, N_{alt} 表示节点高度, R 表示地球半径 ($R=6\,371\text{ km}$)。在 Δt 时间后, 节点 i 的坐标表示为

$$\Delta \text{Loc}_i = (x + \Delta t \cdot v \cos \psi, y + \Delta t \cdot v \sin \psi, z) \quad (10)$$

其中, v 表示节点速度, ψ 表示航迹角。同理可得邻居节点 j 的坐标, 则 t_0 时刻节点 i, j 之间的

距离为

$$d_{i,j} = R \cdot \arccos(\cos(N_{\text{lat},i})\cos(N_{\text{lat},j}) \cdot \cos(N_{\text{lon},j} - N_{\text{lon},i}) + \sin(N_{\text{lat},i})\sin(N_{\text{lat},j})) \quad (11)$$

当 $\Delta t=1$ 时, AANET 中的节点 i 和节点 j 的相离速度 $v_{i,j} = d_{i,j}^{t_0+1} - d_{i,j}^{t_0}$, 则 AANET 中节点间的相离距离 $\Delta d_{i,j}$ 为

$$\Delta d_{i,j} = \begin{cases} r - \Delta d_{i,j}^{t_0}, & v_{i,j} > 0 \\ r + \Delta d_{i,j}^{t_0}, & v_{i,j} \leq 0 \end{cases} \quad (12)$$

其中, r 表示通信半径, 因此, 节点 i, j 之间的链路持续时为

$$\text{LDT} = \frac{\Delta d_{i,j}}{|v_{i,j}|} \quad (13)$$

3) 计算 AANET 中的链路剩余容量。用链路剩余容量表示 AANET 中邻居节点 i 的剩余业务处理能力。

$$\text{LRC} = \text{cap}_j - \xi_j \quad (14)$$

4) 计算 AANET 中的链路生存性 $\mathfrak{R}_i$ 。

$$\mathfrak{R}_i = \frac{\text{LDT}_i}{\sum_{i=0}^n \text{LDT}_i} + \frac{\text{LRC}_i}{\sum_{i=0}^n \text{LRC}_i} \quad (15)$$

5) 计算 AANET 中可用链路的平均链路生存性 $\bar{\mathfrak{R}}$ 。

$$\bar{\mathfrak{R}} = \frac{\sum_{n_i \in N} \mathfrak{R}_i}{n} \quad (16)$$

6) 根据 AANET 的链路生存性 $\mathfrak{R}$, 在 AANET 中选择最优的备用链路。若 $\mathfrak{R}_i > \bar{\mathfrak{R}}$, 则认为该链路的生存性较高, 为其分配流量; 反之, 则不分配流量。

7) 根据式(17)的计算结果, 将 AANET 中的失效流量 ξ 分配到 AANET 中的各可用节点^[19]

$$\Delta \xi_i = \xi \cdot \frac{\text{cap}_i}{\sum_{n_i \in N} \text{cap}_i} \quad (17)$$

其中, $\Delta \xi_i$ 表示邻居节点 i 的增加流量。

8) 若因波及反应导致某个节点失效, 则将新生成的失效节点加入失效节点集合 F 并转至 1), 直至 AANET 中没有新失效节点的增加, 停止循环。若因波及反应导致 AANET 中某个节点的业

务降级, 则将此节点加入降级节点集合 D 。

(3) 节点波及影响分析

当 AANET 中某个节点流量不超过该节点的业务处理能力时, 由式(17)推理可得其邻居节点 i 可能接连失效的波及影响概率 ρ 为

$$\rho = \begin{cases} \xi \cdot \frac{\text{cap}_i}{\sum_{n_i \in N} \text{cap}_i}, & 0 \leq \xi_i + \Delta \xi_i \leq \text{cap}_i \\ 1, & \text{cap}_i \leq \xi_i + \Delta \xi_i \end{cases} \quad (18)$$

AANET 节点失效形式的不同, 其对 AANET 的波及影响不同。根据失效模型与影响分析方法^[20]和节点波及影响概率, 本文确定了 AANET 节点波及影响等级 (如表 2 所示)。

表 2 AANET 节点波及影响等级
Table 2 AANET node impact degree

ρ	影响等级	造成结果
0	正常/N	正常工作
(0,0.2]	极低/E	正常工作
(0.2,0.4]	低/L	正常工作
(0.4,0.6]	中/M	正常工作
(0.6,0.8]	高/H	业务处理能力降级
(0.8,1)	严重/S	业务处理能力降级
1	失效/F	不能工作

依据表 2 中的量化指标 ρ 和对应的影响等级判断 AANET 节点的状态, 当等级为“严重/S”或“高/H”, 即 $0.6 < \rho < 1$ 时, AANET 节点为业务降级节点; 当等级为“失效/F”, 即 $\rho = 1$ 时, AANET 节点为失效节点; 其余等级, 即 $\rho \leq 0.6$ 时, AANET 节点均为正常节点。

(4) 波及影响分析

AANET 节点失效并产生波及反应后, 受到影响的 AANET 其他节点的权值越高, 则对 AANET 的波及影响越大, 故 AANET 的网络波及影响值为

$$f = \frac{\sum F_B W_B + \sum F_E W_E + \sum D_B W_B \rho + \sum D_E W_E \rho}{\sum N_B W_B + \sum N_E W_E} \quad (19)$$

其中, N_B 代表全部业务节点, N_E 代表全部实体节点。 f 值越高, 表示 AANET 的网络安全状况越差。

之后, 确定 f 值与 AANET 的波及影响对应

关系(如表 3 所示),依据表 3 判定 AANET 节点失效对 AANET 的波及影响程度。

表 3 AANET 波及影响关系
Table 3 AANET impact relationship

值	影响等级
(0.8, 1]	严重/S
(0.6, 0.8]	高/H
(0.4, 0.6]	中/M
(0.2, 0.4]	低/L
[0, 0.2]	极低/E

5 实验与分析

5.1 实验数据来源

为验证本文方法的有效性,利用网络仿真工具 NS2 进行仿真实验获取实验数据^[21],仿真实验中设置的关键参数如表 4 所示,仿真实验过程如下。

1) 编写 Otcl 脚本,生成网络初始场景并设置 trace 文件保持网络数据信息。

2) 分别使用 AODV (Ad Hoc on-demand distance vector routing) 和 SMURF (stochastic multipath UAV routing for FANET)^[5]协议作为仿真网络路由协议。

3) 根据攻击方式设置初始失效节点。在随机攻击场景下,使用 random 函数选择节点;在蓄意攻击场景下,选择权值最大的节点。

4) 利用 gawk 分析 trace 文件并统计仿真实验中各时刻节点失效流量。

表 4 参数设置
Table 4 Parameter settings

参数	赋值
仿真 AANET 区域的大小	5 000 m×5 000 m
AANET 节点数	20
数据流数目	25
路由协议	AODV/SMURF
节点移动速度	0~300 m/s
实验时间	300 s
节点通信范围	1 390 km ^[22]

5.2 网络模型建立

以基于 AODV 协议的仿真场景为例,建立非

对称依赖网络模型。

(1) 实体网络构建

依据表 4 可知,此时 AANET 中共有 20 个实体节点和 25 条数据流,计算实体节点权值,结果如表 5 所示。

表 5 实体节点权值
Table 5 Physical node weight

编号	权值	编号	权值
1	0.955	11	0.897
2	0.865	12	0.864
3	0.861	13	0.923
4	0.930	14	0.952
5	0.855	15	0.862
6	0.862	16	0.878
7	0.820	17	0.896
8	0.879	18	0.870
9	0.859	19	0.862
10	0.894	20	0.920

构建 20×20 实体网络邻接矩阵 A_E 为

$$A_E = \begin{bmatrix} 0.955 & 0 & 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ 0 & 0.865 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ 0 & 0 & 0.861 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.930 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0.855 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0.920 \end{bmatrix}$$

(2) 业务网络构建

由于每条通信链路传输一个业务,数据流传输信息具有固定方向,故可抽象出 25 个业务节点和 24 条有向关联边,计算得到业务节点权值如表 6 所示。

构建 25×25 的业务网络邻接矩阵 B_B 为

$$B_B = \begin{bmatrix} 0.075 & 1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0.063 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0.037 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.025 & 1 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.057 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0.085 \end{bmatrix}$$

表 6 业务节点权值
Table 6 Business node weight

编号	权值	编号	权值
1	0.075	14	0.107
2	0.063	15	0.076
3	0.037	16	0.106
4	0.025	17	0.127
5	0.057	18	0.104
6	0.097	19	0.068
7	0.076	20	0.046
8	0.055	21	0.106
9	0.077	22	0.097
10	0.087	23	0.065
11	0.114	24	0.034
12	0.088	25	0.085
13	0.128		

(3) 非对称依赖网络构建

根据双层网络节点间的映射关系，建立初始非对称依赖网络模型。构建 20×25 的业务—实体节点依赖矩阵 C_R 为

$$C_R = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

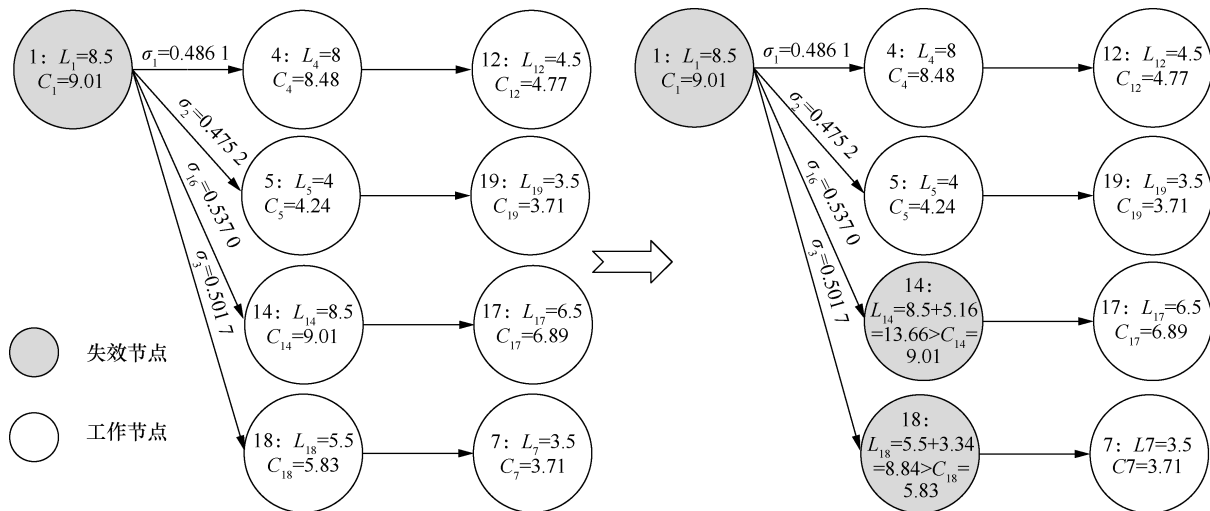


Figure 3 Algorithm example

5.3 AANET 节点失效波及影响分析

以针对实体网络的蓄意攻击为例，在 5.2 节构建的网络模型上对本文方法进行验证。实验场景为：当蓄意攻击发生后，AANET 中的节点 1 失效，并对节点 1 的失效流量进行再分配（如图 3 所示）。

由图 3 可见，节点 1 失效后，计算所有邻居节点链路生存性，其中节点 14 和节点 18 链路生存性大于平均链路生存性 0.5，因此节点 14 和节点 18 按照规则分配失效流量。

此时，节点 14 和节点 18 的流量超过自身业务处理能力，引起自身失效，故开始新一轮失效流量再分配，继续执行本文所提的改进流量再分配算法。在该实验中，算法总迭代次数为 6 次，具体波及影响情况如图 4 所示。

由于 AANET 面临多种安全威胁，从实体层面分析，节点失效按故障原因可分为过应力性失效和耗损性失效。从网络层面分析，攻击者的恶意行为可能导致业务降级或节点失效。为提高波及影响分析的全面性，本文分别从两个层面对网络进行攻击，在基于 AODV 协议和 SMURF 协议 2 种仿真实验场景下，使用本文方法、WR 模型^[9]、FP 模型^[7]、ML 模型^[8]对不同攻击方式下的 NS2 仿真网络进行分析，得到节点失效波及影响结果，结果如图 4~图 8 所示。

(1) 业务网络攻击

由图 5~8 可知，实际波及影响等级为“严重”

/S”，只有本文方法与WR模型的定性分析结果与实际情况一致。在业务网络蓄意攻击场景下，实际网络节点全部失效造成网络瘫痪，故实际波及影响等级为“严重/S”，且具有最大波及影响值。同时无论采用何种攻击方式，本文方法得到的AANET波及影响定量分析结果和NS2仿真实验结果最为相近。原因分析如下。

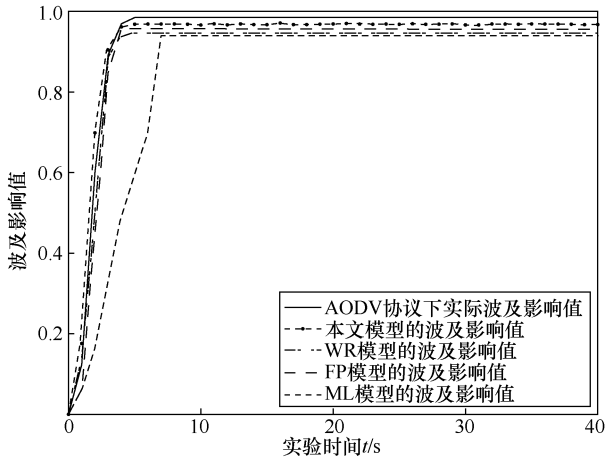


图4 AODV协议场景下蓄意攻击网络波及影响情况
Figure 4 The impact of deliberate attack networks in AODV scenario

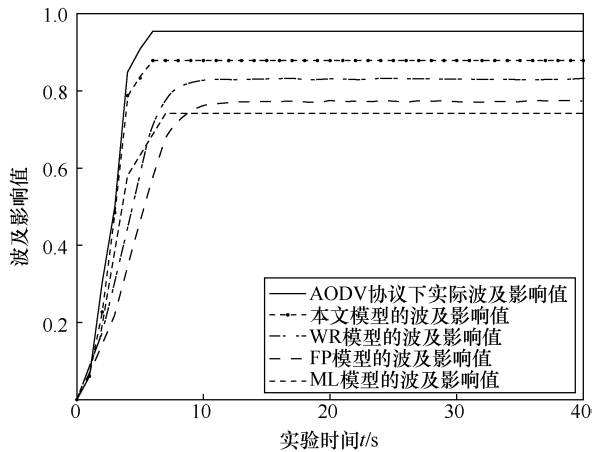


图5 AODV协议场景下随机攻击网络波及影响情况
Figure 5 The impact of random attack networks in AODV scenario

1) 失效传播模型各节点失效概率固定不变，但AANET具有高动态的特性，各时刻节点失效概率不同，故模型分析准确性低。

2) 负载-容量模型优先沿最短路径传输失效流量，但实际AANET传输流量时根据路由规则不同，择优选择路径，故模型分析效果不佳。

3) WR模型优先考虑节点权值对失效流量进行再分配，欠缺链路对实际流量影响方面的考量，

造成分析结果与实际情况有所偏离，分析效果不够理想。

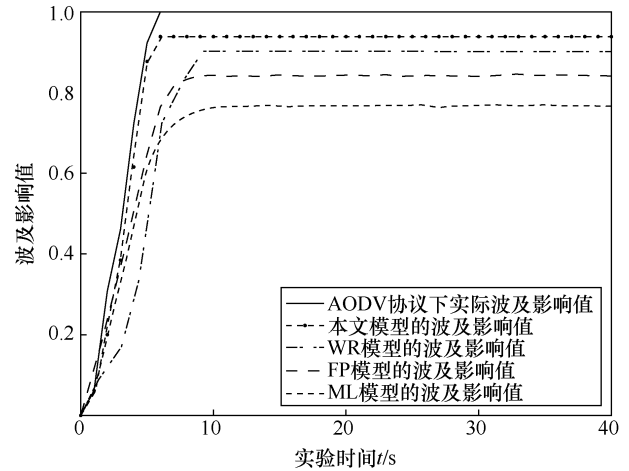


图6 AODV协议场景下蓄意攻击网络波及影响情况
Figure 6 The impact of deliberate attack networks in AODV scenario

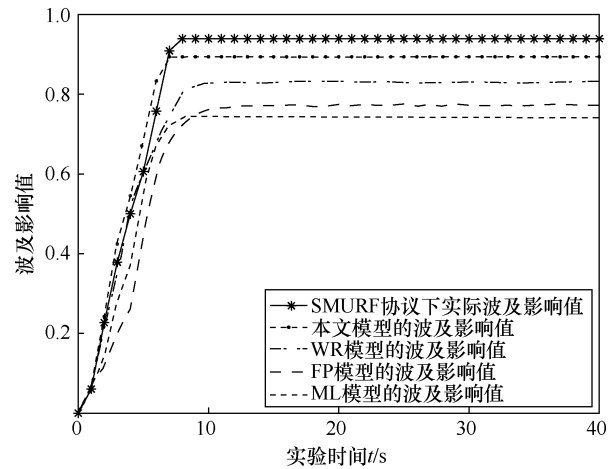


图7 SMURF协议场景下随机攻击网络波及影响情况
Figure 7 The impact of random attack networks in SMURF scenario

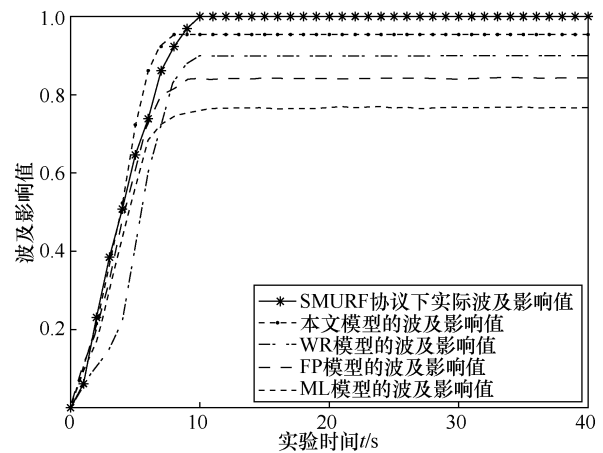


图8 SMURF协议场景下蓄意攻击网络波及影响情况
Figure 8 The impact of deliberate attack networks in SMURF scenario

4) 本文方法在分析 AANET 特性的基础上, 建立 AANET 非对称依赖网络模型, 在考虑网络各时刻节点波及影响概率不同的前提下, 对负载-容量模型进行改进, 采用链路生存性作为选择分配路径的依据, 符合网络实际情况, 从而提高网络波及影响分析的准确性。

(2) 实体网络攻击

由图 4 和图 9~图 11 可知, 仿真 AANET 由于蓄意攻击导致的网络波及影响等级已达“严重/S”, 在 5 个分析方法中, 本文方法的分析结果与实际情况更为接近, 表明本文方法具有更好的有效性与准确性, 其原因分析如下。

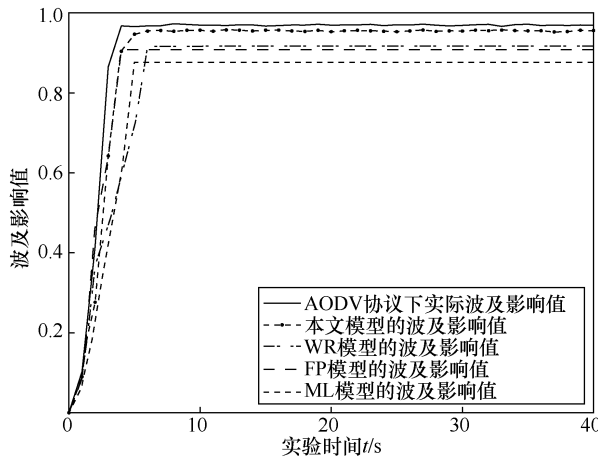


图 9 AODV 协议场景下随机攻击网络波及影响情况
Figure 9 The impact of random attack networks in AODV scenario

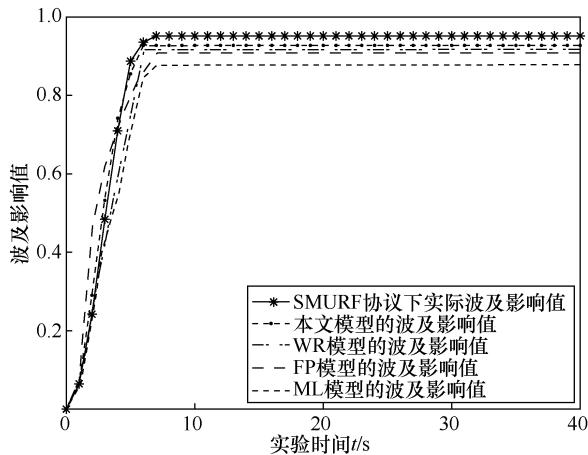


图 10 SMURF 协议场景下随机攻击网络波及影响情况
Figure 10 The impact of random attack networks in SMURF scenario

1) 本文使用 NS2 网络仿真平台模拟 AANET, 网络优先将失效流量分配至链路质量优的路径。以运行 SMURF 路由协议的网络为例, 该协议为

AANET 专有协议, 根据民用航空飞行器位置信息计算链路存在概率, 并将此作为路由选择指标。本文方法采用基于节点空间位置与链路剩余容量的链路生存性作为分析方法中失效流量分配路径的依据, 符合实际情况, 因此分析结果更加准确。

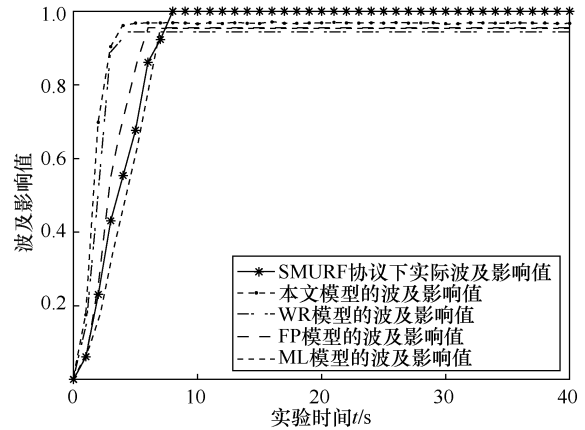


图 11 SMURF 协议场景下蓄意攻击网络波及影响情况
Figure 11 The impact of deliberate attack networks in SMURF scenario

2) 在不同场景下, 蓄意攻击对网络造成的波及影响均大于随机攻击。在通常情况下, AANET 中的关键节点是蓄意攻击方式的首要攻击对象, 而此类节点通常承担较大的网络流量, 其失效后会产生令邻居节点难以负荷的失效流量, 从而对 AANET 造成更为严重的波及影响。

6 结束语

本文提出一种 AANET 节点失效分析方法, 通过构建 AANET 非对称依赖网络模型和改进流量再分配算法获取受影响节点集合, 通过计算网络波及影响值, 得到 AANET 节点失效导致的波及影响。实验结果表明, 本文方法能有效地分析 AANET 的节点失效对网络造成的波及影响。

随着 AANET 的应用普及和系统复杂性的提高, 需要考虑对数据通信业务的重要性和连续性的影响因素变化情况。为了实现对 AANET 节点失效波及影响的分析结果更为客观、准确的目标, 未来应在建立业务重要性和业务连续性评价指标体系的基础上, 对 AANET 的节点失效波及影响分析方法进行改进和完善。

参考文献:

- [1] RANA A, KUMAR V. Aircraft ad-hoc network (AANET)[J]. In-

- ternational Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering, 2019, 3(5): 6679-6684.
- [2] ZHANG J K, CHEN T H, ZHONG S D, et al. Aeronautical networking for the Internet above the clouds[J]. Proceedings of the IEEE, 2019, 107(5): 868-911.
 - [3] VEY Q, PIROVANO A, RADZIK J, et al. Aeronautical ad hoc network for civil aviation[M]//Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer, 2014: 81-93.
 - [4] BULDYREV S V, PARSHANI R, PAUL G, et al. Catastrophic cascade of failures in interdependent networks[J]. Nature, 2010, 464(7291): 1025-1028.
 - [5] DESHPANDE A A, CHIARIOTTI F, ZANELLA A. SMURF: reliable multipath routing in flying Ad-Hoc networks[C]//Proceedings of 2020 Mediterranean Communication and Computer Networking Conference (MedComNet). 2020: 1-8.
 - [6] GUILLEN-PEREZ A, MONTOYA A M, SANCHEZ-AAR-NOUTSE J C, et al. A comparative performance evaluation of routing protocols for flying Ad-Hoc networks in real conditions[J]. Applied Sciences, 2021, 11(10): 4363.
 - [7] MIRZAEINIA A, MIRZAEINIA M, SHEKARAMIZ M, et al. Adaptive retransmission time out in flying Ad-Hoc network by LSTM machine learning: round trip time prediction[C]//Proceedings of AIAA Scitech 2020 Forum. 2020: 53.
 - [8] SHAO J, BULDYREV S V, HAVLIN S, et al. Cascade of failures in coupled network systems with multiple support-dependence relations[J]. Physical Review E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics 2011, 83(3): 36116.
 - [9] MA L, WANG Z L, YANG F, et al. Robust state of charge estimation based on a sequence-to-sequence mapping model with process information[J]. Journal of Power Sources, 2020, 474: 228691.
 - [10] LI Y M, ZHAO L M, YU Z Y, et al. Traffic flow prediction with big data: a learning approach based on SIS-complex networks[C]//Proceedings of 2017 IEEE 2nd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC). 2017: 550-554.
 - [11] WANG Z Y, CHEN G, LIU L, et al. Cascading risk assessment in power communication interdependent networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2020, 540: 120496.
 - [12] SHEN Y, REN G, ZHANG N, et al. Effects of mutual traffic redistribution on robustness of interdependent networks to cascading failures under fluctuant load[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2020, 560: 125138.
 - [13] 韩丽, 刘彬, 邓玉静, 等. 加权无标度网络的级联失效模型[J]. 软件学报, 2017, 28(10): 2769-2781.
HAN L, LIU B, DENG Y J, et al. Cascading failure model of weighted scale-free networks[J]. Journal of Software, 2017, 28(10): 2769-2781.
 - [14] 谭跃进, 吴俊, 邓宏钟. 复杂网络中节点重要度评估的节点收缩方法[J]. 系统工程理论与实践, 2006, 26(11): 79-83, 102.
TAN Y J, WU J, DENG H Z. Evaluation method for node importance based on node contraction in complex networks[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2006, 26(11): 79-83, 102.
 - [15] ZHANG G D, LI Z, ZHANG B, et al. Understanding the cascading failures in Indian power grids with complex networks theory[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2013, 392(15): 3273-3280.
 - [16] 李树栋. 复杂网络级联动力学行为机制研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2012.
LI S D. Research on the mechanism of cascading dynamics and behaviors of complex networks[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2012.
 - [17] FU X W, YANG Y S, POSTOLACHE O. Invulnerability of clustering wireless sensor networks against cascading failures[J]. IEEE Systems Journal, 2019, 13(2): 1431-1442.
 - [18] LUO Q, WANG J F. Multiple QoS parameters-based routing for civil aeronautical Ad Hoc networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2017, 4(3): 804-814.
 - [19] WANG N, JIN Z Y, ZHAO J. Cascading failures of overload behaviors on interdependent networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2021, 574: 125989.
 - [20] LIU B Y, DENG Y. Risk evaluation in failure mode and effects analysis based on D numbers theory[J]. International Journal of Computers Communications & Control, 2019, 14(5): 672-691.
 - [21] LUO Q, WANG J, WANG X, et al. Aero-Sim: an NS-2 based simulator for aeronautical Ad Hoc networks[J]. KSII Transactions on Internet and Information Systems (TIIS), 2015, 9(7): 2548-2567.
 - [22] 陈高平, 邓勇. 航空无线电导航原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
CHEN G P, DENG Y. Principle of aeronautical radio navigation [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.

[作者简介]



谢丽霞(1974—), 女, 重庆人, 博士, 中国民航大学教授, 主要研究方向为网络与系统安全。



严莉萍(1995—), 女, 四川成都人, 中国民航大学硕士生, 主要研究方向为网络与系统安全。



杨宏宇(1969—), 男, 吉林长春人, 博士, 中国民航大学教授, 主要研究方向为网络与系统安全。