

DOI: 10.3969/j.issn.1671-0673. 2026. 04. 005

基于随机有色 Petri 网的 5G 服务功能链 韧性评估方法

吴文昊, 杨 杰, 游 伟, 徐旌宸

(信息工程大学, 河南 郑州 450001)

摘要: 针对 5G 核心网向云化、分层解耦转型过程中出现的网元链路激增、信令规模膨胀、实时状态评估困难等问题, 提出一种基于随机有色 Petri 网的韧性评估方法与建模框架。该模型针对 5G 核心网典型场景, 通过引入有色令牌区分不同业务流, 结合随机变迁模拟网元处理时延与故障恢复过程, 实现攻击与负载下系统动态行为的精细化建模。在此基础上, 构建包括恢复效率、业务完成率、服务功能链(SFC)可用率、抗毁性在内的韧性指标体系, 全面量化系统在扰动下的服务连续性、可靠性与恢复能力。实验结果表明, 该模型能够有效捕获核心网在攻击与负载下的韧性变化, 识别系统瓶颈网元。在瓶颈网元扩容后, 系统请求完成率提升 2.4 个百分点, 可用率提升 5.24 个百分点, 抗毁性与恢复效率均达到最优。该方法为 5G 核心网韧性评估提供了统一的动态建模框架, 拓展了 Petri 网在网络可靠性领域的应用范围, 并为网络规划与资源调度提供了理论依据与实践指导。

关键词: Petri 网; 5G 核心网; 云原生; 韧性; 评估

中图分类号: TN929.5; TP302.7

文献标识码: A

文章编号: 1671-0673(2026)04-0414-08

Resilience Evaluation Method for 5G Service Function Chains Based on Colored Stochastic Petri Nets

WU Wenhao, YANG Jie, YOU Wei, XU Jingchen

(Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Aiming at the problems of network element link surge, signaling scale expansion, and real-time state evaluation difficulties in the process of 5G core network transformation to cloud and hierarchical decoupling, a resilience evaluation method and modeling framework based on stochastic colored Petri nets is proposed. The proposed model targets typical 5G core network scenarios. By introducing colored tokens to distinguish different service flows and incorporating stochastic transitions to simulate network function processing delays and failure-recovery processes, it enables fine-grained modeling of the system's dynamic behavior under attack and load conditions. On this basis, a resilience index system including recovery efficiency, business completion rate, service function chain (SFC) availability and invulnerability is constructed to comprehensively quantify the service continuity, reliability and recovery ability of the system under disturbance. Experimental results show that the model can effectively capture the resilience changes of the core network under attack and load, and identify the bottleneck network elements. After the bottleneck network element is expanded, the system request completion rate is increased by 2.4 percentage points, the availability rate is increased by 5.24 percentage

收稿日期: 2026-01-22; 修回日期: 2026-02-23

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB2902204); 河南省顶尖人才培养计划(244500510012); 河南省重点研发专项(231111211000)

作者简介: 吴文昊(2000—), 男, 博士生, 主要研究方向为 5G 通信安全、容器安全。E-mail: 2490332743@qq.com

points, and the invulnerability and recovery efficiency reach their optimal values. This method provides a unified dynamic modeling framework for the resilience evaluation of 5G core networks, expands the application scope of Petri nets in the field of network reliability, and provides a theoretical basis and practical guidance for network planning and resource scheduling.

Key words: Petri nets; 5G core network; cloud-native; resilience; evaluation

随着云原生架构演进,5G核心网功能从传统单体设备逐步拆解为容器化网元(Containerized Network Function, CNF),控制面和用户面通过基于HTTP/2的服务化接口实现解耦交互。这些网元以服务功能链(Service Function Chain, SFC)动态编排的形式,为用户提供接入鉴权、会话管理、策略控制和数据转发等端到端业务流程。该架构显著提升了网络的灵活性与可扩展性,但同时带来了网元链路激增、信令交互规模膨胀、跨层状态高度动态等问题。在大规模云原生部署中,大量网元之间存在复杂的调用关系,并暴露多种接口,使运维侧难以及时、准确地评估核心网各类SFC的实时状态和可用性。如何在云化5G核心网环境下,定量刻画SFC在攻击和负载作用下的韧性特征,并据此指导网元扩容与资源调度策略优化,已成为5G/6G核心网演进中的关键问题之一。

为刻画系统在攻击和故障扰动下维持服务并快速恢复的能力,近年来学界普遍引入韧性(Resilience)概念^[1-2]。现有5G核心网韧性评估与优化研究主要集中在故障自愈、冗余部署和流量调度等方向^[3]。例如,文献[4]在韧性的定义中引入成本效益概念,强调通过资源编排提升服务韧性的必要性;文献[5]在网络编排器中构建基于排队论的部署模型,以服务时延作为优化系统资源的核心指标;文献[6]通过多队列模型刻画VNF(Virtual Network Function)中的数据流时延分布;文献[7]则利用随机奖励网络和可靠性块图,对容器化IMS(IP Multimedia Subsystem)系统在故障与修复场景下的概率行为进行分析。然而,这些工作大多基于解析队列模型或静态可靠性框图,难以刻画云原生5G核心网中多业务SFC、随机攻击与自愈过程交织下的复杂动态行为,并且在韧性指标方面^[8-11],现有研究往往侧重于单一维度,且尚未系统关联“网络可用性”与“业务完成质量”的联动关系,缺乏将“资源投入(如网元扩容规模)”与“韧性提升效果”进行量化挂钩的系统性研究^[12-15],难以同时满足以下需求:1)同时表达SFC路由级行为与网元内部处理级行为;2)统一建模并发请求流转、随机攻击到达、故障/修复随机时序与请求超时失效;3)支持在

统一模型上进行“单网元扩容”“关键节点加固”等资源投入方案对韧性指标的定量对比。

针对上述不足,本文面向云原生5G核心网,提出一种基于随机有色Petri网的韧性评估方法。首先,构建由总体SFC网和网元处理子网组成的双层随机有色Petri网模型,利用有色令牌和随机变迁统一刻画多业务请求流转、网元处理时延以及故障/修复过程,实现对攻击与负载下核心网动态行为的仿真。其次,设计恢复效率、业务完成率、SFC可用率和抗毁性等多维韧性指标,从恢复速度、业务完成质量和链级可用时间等方面评估系统韧性。最后,在统一模型上开展“单网元扩容”对比实验,定量分析不同网元扩容对韧性的影响,结果表明会话管理功能(Session Management Function, SMF)为当前场景下的瓶颈网元,其扩容可使请求完成率和SFC可用率分别提升约2.4和5.24个百分点,抗毁性与恢复效率亦达到最优。

1 问题提出与基本概念

1.1 问题提出

对云原生环境下的5G核心网进行韧性评估,需要同时刻画多业务服务功能链并发请求、容器化网元的排队与处理时延,以及随机攻击与故障自愈过程的耦合演化。本文提出需要解决的韧性评估问题如下。1)统一动态建模问题。需要构建能够同时表达SFC路由级令牌流转(Token Flow)、网元处理/排队时序,以及攻击导致的失效的动态模型。2)韧性指标量化问题。需要在统一模型上定义指标,从恢复速度、业务完成质量与链级可用时间等维度定量刻画韧性。3)扩容策略对比与瓶颈识别问题。比较不同“单网元扩容”方案对上述韧性指标的提升幅度,识别对韧性最敏感的瓶颈网元,为资源投入与调度决策提供依据。

因此,后续从SFC视角将网元交互抽象为“令牌流转”过程,并采用Petri网统一刻画业务并发、排队时延、攻击与自愈的随机动态行为,为多维韧性指标计算与扩容对比实验提供形式化基础。

1.2 SFC模型

本文将5G核心网基于HTTP/2的服务化接口交互形式抽象为“令牌流转”模型,并以SFC模型的形式建模。

本模型中,SFC被抽象为四元组结构 (N, Q, R, C) 。其中: $N=\{n_1, n_2, \dots, n_k\}$,表示组成SFC的网络功能节点类型集合,节点按顺序形成链式依赖,用户请求必须依次经过所有节点才能完成处理; Q 表示SFC的请求频率(单位时间内的业务请求量),反映该链路的业务负载强度; R 表示节点资源约束,即每个节点类型 n_i 需满足的最小可用实例数(本文默认为1); C 表示业务特征标识(如协议类型、服务质量要求),用于区分不同SFC的业务属性。针对5G核心网典型场景,主要SFC业务核心流程见表1。

表1 5G核心网SFC类型说明

SFC业务类型	节点序列 N	请求频率 Q (相对权重)	业务特征 标识 C
用户注册SFC	AMF→AUSF→UDM	0.2	用户注册协议
数据传输SFC	AMF→SMF→UPF	0.7	数据转发协议
策略更新SFC	PCF→UDM→SMF	0.1	策略控制协议

1)用户注册SFC。实现用户终端接入5G网络的身份认证与签约数据校验,节点序列为“接入与移动性管理功能(Access and Mobility Management Function, AMF)→鉴权服务功能(Authentication Server Function, AUSF)→统一数据管理(Unified Data Management, UDM)”。其中,AMF负责接收用户接入请求,并通知AUSF初步验证终端合法性,UDM查询用户签约数据(如服务权限)。由于用户注册是所有后续业务的前提,其请求频率相对较高(相对权重为0.2)。

2)数据传输SFC。承担用户数据的端到端转发,节点序列为“AMF→SMF→用户面功能(User Plane Function, UPF)”。AMF确认用户连接状态,SMF创建并管理数据会话,UPF负责实际数据转发与流量调度。作为5G网络的核心承载业务,其请求频率最高(相对权重为0.7)。

3)策略更新SFC。用于动态调整用户服务策略(如带宽调整、计费规则更新),节点序列为“策略控制功能(Policy Control Function, PCF)→UDM→SMF”。PCF发起策略变更指令,UDM更新用户签约数据中的策略参数,SMF将新策略应用于用户会话。由于策略更新属于周期性低频次操作,请求频率最低(相对权重为0.1)。

图1展示了5G核心业务流程并揭示了网络功能虚拟化(Network Function Virtualization, NFV)的演进方向——即5G核心网不再部署在专用硬件上,而是以微服务(Pod)的形式运行在Kubernetes容器云之上,并借助服务网格实现灵活的业务链编排,从而实现弹性扩缩容和敏捷运维。

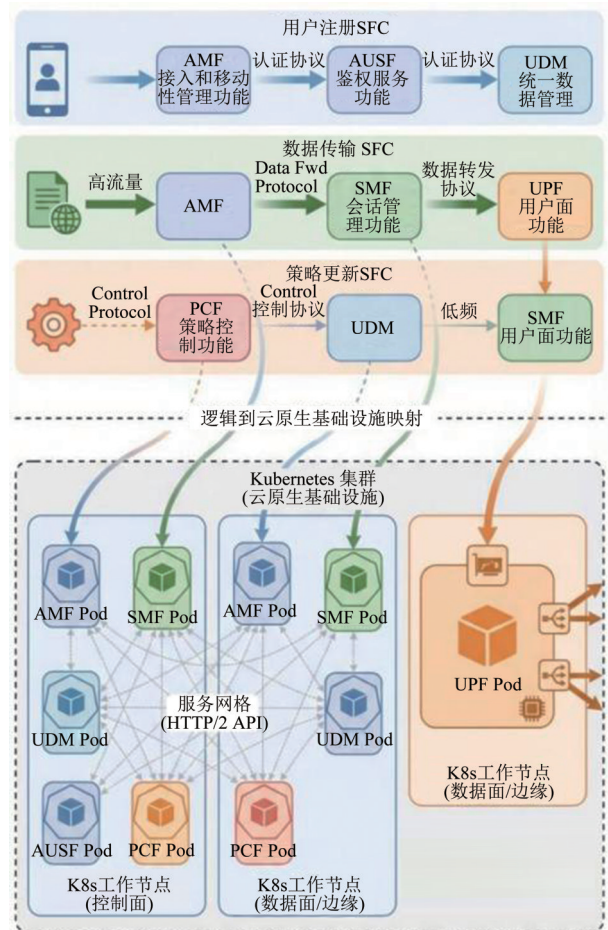


图1 SFC业务请求与NFV

1.3 Petri网

彩色随机广义Petri网(Colored Stochastic Generalized Petri Net, CSGPN)是在传统Petri网的基础上,融合“有色”和“随机”两种核心扩展,使其在建模复杂系统时具备更强的描述能力和实用性^[7-8],具体定义为九元组 $\langle P, T, F, I, K, \alpha, \beta, \eta, M \rangle$ 。其中: P 表示库所(Place); T 表示转移集合,分为瞬时转移 T_i 与延迟转移 T_d ,其中 T_d 具有令牌颜色转换功能; $M(P_i)$ 表示库所 P_i 的初始令牌数,满足 $M(P_i) \rightarrow Z, Z$ 为自然数; F 为弧权函数; I 表示关联函数(Incidence Function),代表了Petri网中库所与变迁(Transition)之间的有向弧(Flow Arcs)关系, $I: \{I_{in}/I_{out}\}$,其中 I_{in} 和 I_{out} 表示用于确定令牌 t 从变迁到库所变化的方向,并以有向箭头表示; K 为库所 P 的容量

函数,任意库所 P_i 满足条件 $M(P_i) \leq K(P_i)$; α 表示位置或过渡允许的颜色映射,例如, $\alpha(P_i)$ 映射到(R,B,Y),表示该位置 P_i 可容纳的R、B、Y这3种颜色令牌;同时,对于令牌 t , $\alpha(t)$ 表示令牌 t 的具体颜色; β 表示延迟转换的映射关系, $\beta\{T_d\}$ 描述延迟转换的分布类型与函数特性,例如威布尔分布、均匀分布等; $\eta\{T_d\}$ 表示延迟转换的映射。

系统状态 $M(P_i) \rightarrow M'(P_i)$ 转换触发的规则与 F 的关系如下:

$$M'(P_i) = \begin{cases} M(P_i) + F(P_i, t), & P_i \in T^*; \\ M(P_i) - F(P_i, t), & P_i \in {}^*T; \\ M(P_i), & \text{其他.} \end{cases} \quad (1)$$

式中: T^* 与 ${}^*T$ 分别表示与库所 P_i 相连的入度变迁集和出度变迁集。

2 模型建立

2.1 基于Petri网的5G SFC业务刻画逻辑

本节具体介绍如何基于Petri网对5G的SFC业务进行刻画。

1) Petri网元素。库所(Place类),每个库所对应一类5G核心网元(如AMF、UDM)的集群,负责承载SFC中该类型网元的处理功能。此外,有的库所还表示当前服务处理的状态。

2) 有色令牌(Token类)。代表SFC的用户请求,其“颜色”通过protocol_type属性标识所属SFC类型(如“用户注册SFC”),实现不同业务流的隔离与区分。库所通过Network_element属性管理同类型网元,模拟实际网络中网元的冗余部署。网元状态对应库所中令牌的“可用/不可用”状态,令牌根据SFC的频率属性模拟不同业务的请求频率差异,并能记录已流经的网元及时间,对应Petri网中

令牌在库所间的流转轨迹。

3) 变迁(Transition类)。对应SFC中请求在网元间的“转发行为”,遵循预定义的网元执行序列,实现请求按链式顺序处理。令牌在当前网元处理完成后,自动进入下一个网元类型的库所队列。若某网元故障或者检测到令牌超时,令牌处理被中断,对应变迁触发失败,模拟SFC因节点故障导致的业务中断。

2.2 基于分层Petri网的5G模型

面对5G核心网的大规模节点与复杂交互特性,传统的扁平式单层Petri网模型面临着状态空间急剧膨胀和模型结构不可读的挑战。为此,本文引入分层Petri网(Hierarchical Petri Nets, HPN)框架,旨在解决以下两个问题。1)降低系统复杂度,便于扩展管理,将5G网络抽象为“网络级”与“网元级”两个层次。顶层网仅描述SFC的路由跳转与拓扑连接,屏蔽了网元内部细节;底层网专注于描述单个网元内的排队、处理与故障恢复机制,使得模型在保持精度的同时,显著降低构建与维护的复杂度。2)支持模块化与动态扩容,当评估网元扩容场景时,模型仅需在顶层增加模块实例,而无需重构底层逻辑。

总体Petri网模型如图2所示,当有用户请求从图中的Request出发时,会进入Packet_queue队列,根据业务类型和当前的状态选择相对应的网元进行处理。经过若干协议规定好的网元流程后,最后根据用户请求是否超时,以及在被处理的途中网元自身异常是否导致流程失败来判断整个业务流程是否完成。总体Petri网模型从请求的产生、调度、多网元处理,到最终结果的成功或失败反馈,完整覆盖了5G业务的全生命周期,可用于分析业务在各阶段的性能与可靠性。

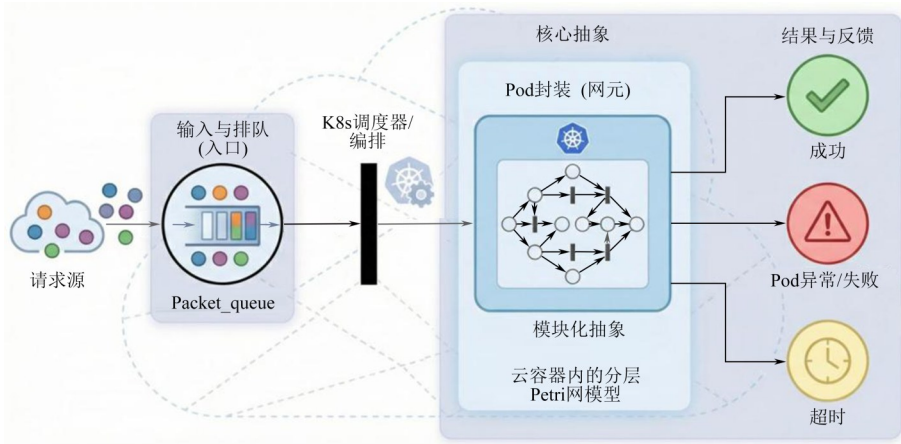


图2 总体Petri网模型

为细致描述请求在网元内的处理流程、延时等待,以及网元故障、请求超时导致的失败,网元处理 Petri 网如图 3 所示。红色令牌表示当前正在进行会话注册流程,该流程被分配给相应网元进行延时处理。这里的变迁表示请求处理需要进入处理队列延时等待。若网元自身由于故障进入失败状态,或请求超时失效进入失败状态,则令牌标记由红色变为蓝色。如果成功则可以进入下一网元处理 Petri 网,直到流程结束。

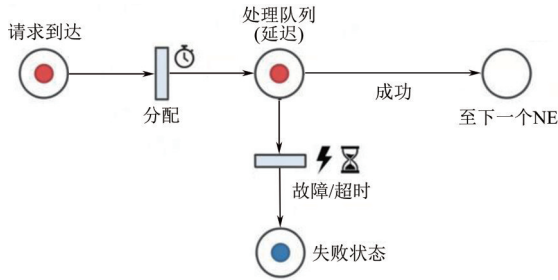


图3 网元处理 Petri 网

3 评估方法

在第2节给出的分层模型基础上,本文进一步提出一种基于该模型的5G SFC 韧性评估方法。该方法以分层 Petri 网为统一动态仿真平台,通过设定攻击与负载场景、定义多维韧性指标,并在模型上运行离散事件仿真,计算恢复效率、业务完成率、SFC 可用率和抗毁性等指标,进而对不同网元扩容策略的韧性效果进行定量对比。

3.1 指标定义

韧性指标^[16]定义具体如下。

1)恢复效率。网元从故障到恢复正常状态的平均时间,反映系统的快速恢复能力,用于衡量故障

障后 SFC 的恢复速度。

$$V_R = \frac{R_{\text{sum}}}{R_{\text{count}}} \quad (2)$$

式中: R_{sum} 表示所有网元因受到攻击导致故障进行重启恢复的总时间; $R_{\text{count}}(R_{\text{count}} \neq 0)$ 表示所有网元因受到攻击导致故障进行重启的总次数。

2)SFC 完成率。成功完成全流程处理的请求占总请求的比例,反映 SFC 核心功能的连续性,用于衡量扰动下 SFC 的业务可靠性。

$$R_c = \frac{T_{\text{comp}}}{T_{\text{gen}}} \quad (3)$$

式中: T_{comp} 表示业务流程完成的令牌数; $T_{\text{gen}}(T_{\text{gen}} \neq 0)$ 表示因用户请求生成的令牌数。

3)SFC 可用率。即“链级可用性的时间占比”,通过每秒监控 SFC 包含的所有网元是否可用,累计可用时长 T_a 后,与“所有 SFC 的理论总运行时长”(SFC 数 $D_{\text{SFC}} \times$ 模拟时长 $T_{\text{sum}}, T_{\text{sum}} \neq 0, D_{\text{SFC}} \neq 0$) 作比,最终得到反映系统整体服务连续性的平均可用率。该指标用于衡量扰动下 SFC 的业务交付效率。

$$A_{\text{sum}} = \frac{T_a}{T_{\text{sum}} \times D_{\text{SFC}}} \quad (4)$$

4)抗毁性。反映系统在遭受攻击时维持服务功能链可用的能力。

$$A_D = \frac{D_{\text{SFC}}}{T_{\text{sum}}^A} \quad (5)$$

式中: $D_{\text{SFC}}(D_{\text{SFC}} \neq 0)$ 反映在遭受攻击期间 SFC 可继续完成的数量总和; $T_{\text{sum}}^A(T_{\text{sum}}^A \neq 0)$ 反映攻击发生的总时长。

3.2 基于分层 Petri 网的 5G 韧性评估方法

本文主要参考文献[11]中描述的 5G 系统,评估方法流程参考图 4。

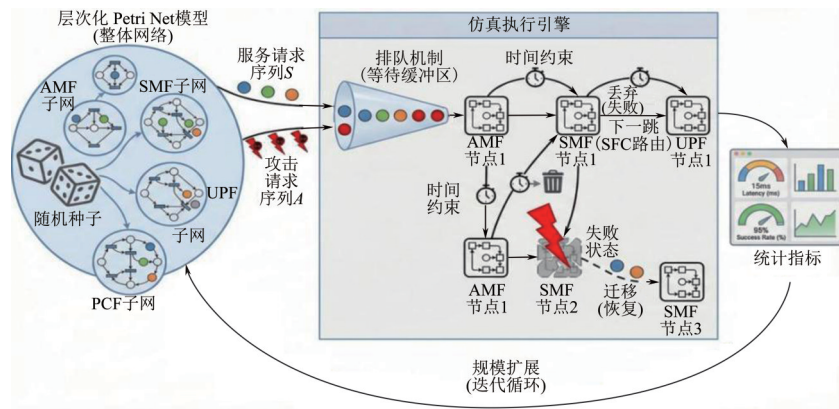


图4 评估方法流程示意

评估韧性的具体步骤如下。

1)基于分层 Petri 网中的总体 Petri 网进行业务

流程建模。

2)对于用户信令,基于图 3 所示 Petri 网,对其

具体处理流程进行形式化表达,每一个子Petri网代表一个具体服务网元的处理流程(如AMF)。

3)在网络层面,确定网元数量规模、令牌处理时限限制、网元恢复时间以及需要模拟的时间。

4)用户层面需确定服务请求到达的速率,各类SFC请求的占比,另外给出攻击频率以及攻击不同网元类型的概率。

5)利用随机数种子,生成用户服务请求到达序列 $S=\{s_1, s_2, \dots, s_n\}$,攻击请求到达序列 $A=\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ 。

6)对于每一个请求 s_i ,代表其相应颜色的服务令牌,为其选择一个当前服务队列为空的网元,若此时所有网元都有正在处理的令牌,当前用户请求 s_i 需要进行等待。

7)请求 s_i 进入相应网元处理流程Petri网进行处理,如果当前时间未达到最长业务处理时间,视为处理成功,否则视为令牌处理失败。

8)对于已被处理的请求 s_i ,依据其所在SFC业务流程类型判断是否已经处理完毕,如果处理完

毕,则转入流程10),否则回到流程6)继续选择相应的网元进行业务流程处理。

9)对于攻击请求 a_i ,选择相应被攻击类型的网元 P ,此时网元 P 直接进入失败状态,等候被修复,对于被攻击网元,正在处理的令牌会被其他网元托管处理。

10)根据式(2)~式(4)实时统计相应指标。

11)依次选择不同网元类型扩展其规模,进入步骤5)重新生成服务请求,再次执行评估。

4 实验分析

4.1 实验参数说明

依据3GPP(3rd Generation Partnership Project)对于时延的相关标准^[17-18],本文实验相关参数具体如表2所示。其中,模拟时长1 h。结合指数分布的请求到达间隔(平均每秒50个)生成总请求量,并以100 ms限制请求超时。相较于ms级别的处理时延,本文在仿真时忽略了传输时延(μ s级)。

表2 实验参数设计

参数说明	取值
SFC 请求平均速率	用户注册SFC:10;数据传输SFC:35;策略更新SFC:5
请求到达间隔分布	请求到达时间间隔遵循泊松分布, $\lambda = 50$
令牌最大处理超时时间	100 ms
网元恢复平均时间/s	服从对数正态分布:AMF(1.2,0.4)、UDM(1.8,1.5)、PCF(1.6,0.45)、SMF(1.5,0.5)、UPF(2.0,0.6)、AUSF(1.4,0.4)
故障接管时间/s	均匀分布(0.05 s,0.2 s)
攻击频率	每秒以40%的概率攻击1~4次
网元攻击概率分布	AMF:25%;UDM:20%;PCF:15%;SMF:18%;UPF:12%;AUSF:10%
网元初始数量	3
模拟时间/h	1
处理时延/ms	服从均匀分布:AMF(5,15)、UDM(10,30)、PCF(15,40)、SMF(8,25)、UPF(2,8)、AUSF(20,50)

网元恢复机制中,根据网元的恢复难易程度采用不同的对数正态分布参数定义不同网元(如AMF、UDM等)的故障恢复时间供参考。此外,本文假设冗余网元接管业务的时间为均匀分布,主要用于网元发生故障时,将中断的任务自动转移到同类型的冗余网元。

在攻击模拟参数中,参考文献[19],采用伯努利随机攻击模型,将每秒发生的攻击概率设置为40%,发送攻击时的攻击次数设置为1~4次。依据网元重要性设定网元被攻击的概率分布,以此生成动态攻击压力,当遭遇攻击时网元发生故障。网元数量配置以3为初始规模,通过控制每轮扩容幅度,支撑不同网元扩容方案的对比。

本文通过固定请求、攻击、随机种子,确保仅

“网元数量”为变量,其他条件一致。并且所有参数和随机过程可复现,多次运行相同配置会得到一致结果,重点聚焦业务恢复效率和抗毁性。

4.2 结果分析阶段

依据第3.2节描述的评估方法进行相关的实验,将各扩容轮的指标与基准轮对比。图5给出了实验过程中各个SFC请求令牌的完成平均时延。图中的P95和P99分别表示第95百分位和第99百分位时延,用于衡量极端场景下的业务延迟表现。不难发现,在服务注册上,策略更新所需的时延相较于数据传输所需要的时间更长,符合5G标准对于用户面需要低时延的要求。

表3给出了两种规模条件下,服务的扩容对整体性能的影响。实验数据揭示了网元扩容的效果

取决于该网元与“系统当前瓶颈”的匹配度。在小网元规模下(每类网元为3),通过对比“新增网元轮”与“基准轮”的指标差异,各网元扩容的收益呈现极强的分化性。实验结果表明,在5G核心网SFC扩容策略中,SMF被证明是最优选择。

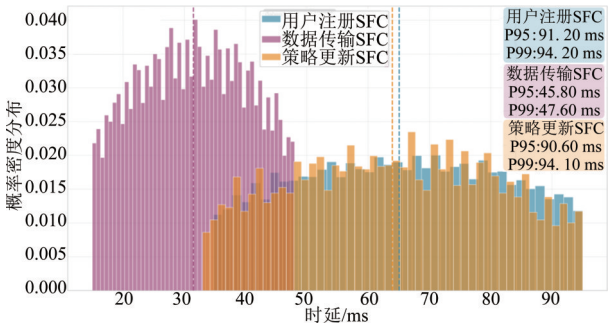


图5 攻击故障场景下各SFC时延分布

表3 新增网元后的指标对比(攻击概率 $p=0.4$)					
新增网元类型	恢复效率/s	SFC完成率/%	SFC可用率/%	抗毁性	平均时延/ms
无	0.124 3	89.60	81.05	0.751 4	42.5
AMF	0.124 7	91.67	84.50	0.802 0	42.4
SMF	0.123 5	92.00	86.29	0.807 9	42.5
UPF	0.123 5	90.53	81.94	0.761 5	42.5
UDM	0.123 9	90.55	84.90	0.804 3	42.5
PCF	0.124 4	89.69	81.73	0.759 5	42.5
AUSF	0.124 7	89.67	81.48	0.755 8	42.5

实验结果表明,在5G核心网SFC扩容策略中,SMF(会话管理功能)被证明是最优的扩容选择,其能显著提升系统关键性能指标——将SFC完成率从基准的89.60%提升至92.00%,SFC可用率从81.05%提升至86.29%,抗毁性从0.751 4提升至0.807 9,同时保持了最佳的恢复效率0.123 5 s。相比之下,AMF和UDM扩容也表现出色,而PCF和AUSF扩容效果相对有限,这为网络规划提供了明确的优先级指导:在资源受限时应优先扩容SMF,以最大化提升系统整体的业务连续性、服务质量和抗毁能力。

另外,通过改变攻击发生概率(p 取0.8和0),来证明结论的一致性,实验结论如表4和表5所示。实验结果表明,在高攻击强度(攻击概率0.8)的验证实验中,SMF扩容后,平均恢复时延仅为0.125 3 s,为所有方案中最低(恢复速度最快),同时SFC完成率与可用率均达到最优。这一结果与正常攻击强度下的结论完全一致,充分证明了SMF作为最优扩容网元的稳健性和可靠性,即使在极端攻击环境下,SMF扩容仍能最大程度地保障系统业务连续

性和服务韧性。

此外,当攻击概率为0时,发现所有的指标与基准轮无差别,增加网元数量并没有带来性能提升。因为原有的网元数量已经能够处理所有请求,没有发生故障,所以冗余网元没有发挥作用。当前系统在无攻击场景下已经处于饱和状态,增加网元并没有提高性能。说明在无攻击的情况下,系统的瓶颈不在网元数量上,而是其他因素,如请求的到达率和服务速率。

表4 新增网元后的指标对比(攻击概率 $p=0.8$)					
新增网元类型	恢复效率/s	SFC完成率/%	SFC可用率/%	抗毁性	平均时延/ms
无	0.127 3	75.94	63.23	0.610 7	42.5
AMF	0.126 2	80.45	68.47	0.663 9	42.4
SMF	0.125 3	80.96	69.63	0.677 8	42.4
UPF	0.126 9	79.49	65.33	0.632 3	42.5
UDM	0.128 2	77.51	68.36	0.665 4	42.6
PCF	0.127 2	76.13	64.47	0.624 1	42.5
AUSF	0.126 1	76.07	64.17	0.620 5	42.4

表5 新增网元后的指标对比(攻击概率 $p=0$)					
新增网元类型	恢复效率/s	SFC完成率/%	SFC可用率	抗毁性	平均时延/ms
无	0	98.06	1	0	42.3
AMF	0	98.06	1	0	42.3
SMF	0	98.06	1	0	42.3
UPF	0	98.06	1	0	42.3
UDM	0	98.06	1	0	42.3
PCF	0	98.06	1	0	42.3
AUSF	0	98.06	1	0	42.3

5 结束语

本文的核心价值在于,一方面,为5G SFC韧性评估提供了统一的动态建模框架,通过随机有色Petri网的“有色+随机”特性与分层设计,解决了容器化网元动态扩缩、随机故障与多业务流共存场景下的建模难题。另一方面,通过网元扩容与韧性指标的关联分析,揭示了“核心网元功能定位—韧性需求”的匹配规律。实验验证表明,该模型可有效捕获SFC在攻击与负载下的韧性变化,且所提评估方法能准确识别瓶颈网元(如SMF)。该方法为5G SFC韧性评估提供了统一建模框架,丰富了Petri网在网络可靠性领域的应用。下一步将结合负载均衡以及底层资源调度,对Petri网在5G中的应用进一步展开研究。

参考文献:

- [1] GB/T 44862—2024 网络安全技术 网络弹性评价准则[S].
- [2] 紫金山实验室. 基于系统架构评估的网络弹性度量技术白皮书[R/OL]. 南京:紫金山实验室, 2023.
- [3] 中国联通研究院. 6G核心网系统架构及关键技术展望白皮书[R]. 北京:中国联通研究院, 2024.
- [4] Bauer A, Herbst N, Spinner S, et al. Chameleon: a hybrid, proactive auto-scaling mechanism on a level-playing field[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2019, 30(4): 800-813.
- [5] Hutchison D, Sterbenz J P G. Architecture and design for resilient networked systems[J]. *Computer Communications*, 2018, 131: 13-21.
- [6] Sterbenz J P G, Hutchison D, Çetinkaya E K, et al. Resilience and survivability in communication networks: strategies, principles, and survey of disciplines[J]. *Computer Networks*, 2010, 54(8): 1245-1265.
- [7] Wu W H, Ji X S, Yang J, et al. 5G network resilience evaluation mechanism based on Petri Nets[J]. *Computer Networks*, 2025, 257: 110950.
- [8] Li Y R, Li L, Bai J, et al. Availability and reliability of service function chain: a quantitative evaluation view[J]. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 2023, 16(1): 52.
- [9] De Simone L, Di Mauro M, Natella R, et al. A latency-driven availability assessment for multi-tenant service chains[J]. *IEEE Transactions on Services Computing*, 2023, 16(2): 815-829.
- [10] Bai J, Chang X L, Machida F, et al. Impact of service function aging on the dependability for MEC service function chain[J]. *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, 2023, 20(4): 2811-2824.
- [11] Li R, Decocq B, Barros A, et al. Estimating 5G network service resilience against short timescale traffic variation[J]. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 2023, 20(3): 2230-2243.
- [12] Li R, Decocq B, Barros A, et al. Petri net-based model for 5G and beyond networks resilience evaluation[C]// *Proceedings of the 25th conference on innovation in clouds, internet and networks*. Piscataway, USA: IEEE, 2022: 131-135.
- [13] LI R, DECOCQ B, FANG Y P, et al. A petri net-based model to study the impact of traffic changes on 5G network resilience[C]// *Proceedings of the 32nd european safety and reliability conference*. Kallang, Singapore: Research Publishing, 2022: 3016-3023.
- [14] Kong Y, Mu C, Chen X Y, et al. Petri net-aided iterative trajectory optimization for multi-CAV coordination at unsignalized intersections[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2025, 26(7): 10220-10235.
- [15] Li C Z, Chen Y F, Mostafa A M, et al. Supervisory control of discrete event systems modeled with labeled petri nets for diagnosability enforcement[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2025, 22: 13855-13870.
- [16] Duan R X, Zou Z K, Lin Y H, et al. Reliability analysis of phased mission systems based on generalized stochastic petri nets under mixed uncertainty[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2025, 239(7): 2608-2625.
- [17] 3GPP. Service requirements for the 5G system; stage 1: 3GPP TS 22.261 V18.18.0[EB/OL]. [2026-02-22]. https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/122200_122299/122261/18.18.00/ts_122261v181800p.pdf.
- [18] 3GPP. System architecture for the 5G system (5GS); stage 2: 3GPP TS 23.501 V18.11.0[EB/OL]. [2026-02-22]. https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/123500_123599/123501/18.11.00/ts_123_501v181100p.pdf.
- [19] Hou N, Zhang D, Yang F, et al. Security-guaranteed PID control for discrete-time systems subject to periodic Dos attacks[J]. *Processes*, 2023, 11(5): 1375.

(编辑: 邵 华)

(上接第405页)

- [14] Jiang W W, Luo J Y. Graph neural network for traffic forecasting: a survey[J]. *Expert Systems with Applications*, 2022, 207: 117921.
- [15] 罗良翌, 马宁丽. 基于混合模拟退火算法的民航运输路径优化[J]. *电子设计工程*, 2020, 28(20): 44-47.
- [16] Zhao H Y, Dong C C, Cao J, et al. A survey on deep reinforcement learning approaches for traffic signal control[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2024, 133: 108100.
- [17] Lowe R, Wu Y, Tamar A, et al. Multi-agent actor-critic for mixed cooperative-competitive environments[C]// *Proceedings of the 31st international conference on neural information processing systems*. New York, USA: ACM, 2017: 6382-6393.
- [18] Parmaksizoglou I A, Bombelli A, Sharpanskykh A. A multi-agent optimization approach for multimodal collaboration in marine terminals[J]. *Logistics*, 2025, 9(3): 110.
- [19] Schelling T C. The strategy of conflict[M]. Cambridge, USA: Harvard University Press, 1960: 1-309.
- [20] Runge J, Nowack P, Kretschmer M, et al. Detecting and quantifying causal associations in large nonlinear time series datasets[J]. *Science Advances*, 2019. DOI: 10.1126/sciadv.aau4996.

(编辑: 邵 华)