

## 多级隔离的网络切片可用性保障方法\*

王颖, 陈可, 喻鹏, 李文璟, 邱雪松, 孟洛明



(网络与交换技术国家重点实验室(北京邮电大学), 北京 100876)

通信作者: 喻鹏, E-mail: [yupeng@bupt.edu.cn](mailto:yupeng@bupt.edu.cn)

**摘要:** 核心网络切片通过虚拟网络功能(VNF)的组合链接实现灵活组网. 软件故障和硬件故障均会导致 VNF 失效, 从而导致切片服务中断. 由于网络切片共享资源, 需要特定的隔离机制以满足切片健壮性需求. 现有的可用性保障机制大多面向随机 VNF 故障, 一些涉及外部攻击的研究很少考虑网络切片特殊的隔离需求. 为了在隔离机制下实现切片可用性保障, 提出一种基于多级隔离的网络切片可用性保障方法. 首先, 建立核心网切片资源感知的可用性保障问题模型, 旨在满足隔离需求的同时, 消耗最少的备份资源来达到可用性目标. 然后, 提出一种隔离级别评估模型对 VNF 的隔离级别进行评估. 最后, 提出一种基于多级隔离的备份算法 MLIBA 解决所提出的可用性保障问题. 此外, 针对共享备份可用性计算这一 PP-complete 问题, 提出一种基于等效备份实例的计算方法. 仿真结果表明, 所提可用性计算方法具有较高的准确性, 引入多级隔离的可用性保障方法可以使切片的健壮性提高一倍. 与现有研究的对比表明, 在相同的隔离约束和可用性目标下, 所提方法可减少 20%–70% 资源消耗, 提高 5%–30% 的有效资源占比.

**关键词:** 网络切片; 网络功能虚拟化; 可用性; 隔离; 备份

**中图法分类号:** TP393

中文引用格式: 王颖, 陈可, 喻鹏, 李文璟, 邱雪松, 孟洛明. 多级隔离的网络切片可用性保障方法. 软件学报, 2023, 34(12): 5757–5772. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/6780.htm>

英文引用格式: Wang Y, Chen K, Yu P, Li WJ, Qiu XS, Meng LM. Network Slice Availability Guarantee Based on Multi-level Isolation. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2023, 34(12): 5757–5772 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/6780.htm>

### Network Slice Availability Guarantee Based on Multi-level Isolation

WANG Ying, CHEN Ke, YU Peng, LI Wen-Jing, QIU Xue-Song, MENG Luo-Ming

(State Key Laboratory of Networking and Switching Technology (Beijing University of Posts and Telecommunications), Beijing 100876, China)

**Abstract:** Core network slicing achieves flexible networking by combining virtualized network functions (VNFs). However, the failure of any VNF due to software and hardware failures will cause an interruption of the slice service. Since network slices share resources, a specific isolation mechanism is required to meet slice robustness demands. Most of the existing availability guarantee mechanisms focus on random VNF failures, and some of them involving external attacks rarely consider special isolation requirements of network slices. To realize slice availability guarantee under isolation mechanisms, this study proposes a method to guarantee network slice availability based on multi-level isolation. First, an availability guarantee model of core network resource awareness is built to meet the isolation requirements with consuming the least number of backup resources. Then, an isolation level assessment model is proposed to evaluate the isolation level of VNFs. Finally, a multi-level isolated backup algorithm (MLIBA) is proposed to solve the availability guarantee problem. In addition, an equivalent backup instance-based calculation method is put forward to address the PP-complete problem of availability calculation for a shared backup. Simulation results show that the proposed availability calculation method has high accuracy, and the introduction of multi-level isolation can double the robustness of slices. The comparison with existing studies shows that under the same

\* 基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFE0205502)

收稿时间: 2021-10-14; 修改时间: 2022-04-14, 2022-07-27; 采用时间: 2022-08-29; jos 在线出版时间: 2023-04-13

CNKI 网络首发时间: 2023-04-13

isolation constraints and availability targets, the proposed method can reduce resource consumption by 20%–70% and increase the proportion of effective resources by 5%–30%.

**Key words:** network slice; network function virtualization; availability; isolation; backup

5G 的发展面临着多样化的业务需求,使移动通信能够服务于自动驾驶、制造业等多种垂直行业<sup>[1]</sup>.遵循传统的网络建设理念来满足这些不同的业务需求将导致较高的成本,网络切片技术可以有效地解决这一问题.5G 网络切片实现了网络资源的灵活分配和网络功能的按需组合,根据不同的业务需求可以虚拟化出多个具有不同特性的逻辑子网,其实现依赖于软件定义网络(SDN)和网络功能虚拟化(NFV)技术<sup>[2]</sup>.运营商可以在共享网络基础设施上为多个行业应用编排独立的 5G 网络切片,通过功能公开、智能调度和资源隔离提供差异化的网络服务<sup>[3,4]</sup>.

在构建网络切片时,通过组合 VNF 提供网络服务,增强了网络的灵活性、可扩展性和可重构性.然而,与高可用性硬件网络设备相比,硬件故障、软件故障和后门等潜在风险都将导致 VNF 失效<sup>[5]</sup>.任一 VNF 的故障都会导致切片服务的中断.确保高可用性的常用方法是为 VNF 提供备份实例,当主 VNF 出现故障时及时替换.还需要指出的是,与传统网络的私密性和封闭性相比,网络切片是建立在标准化基础设施上的虚拟专用网络,虚拟和开放的特点使网络更容易受到攻击,共享部署使网络威胁传播更快、更广.因此,除了提供传统的移动网络健壮性机制,如访问级和非访问级信令和数据的接入认证、加密和完整性保护,5G 还需要在网络切片之间和内部提供隔离<sup>[6]</sup>,一方面可以避免切片之间的资源竞争,保证切片的正常部署和运行;另一方面也可以防止某一个切片或 VNF 异常影响到其他切片或 VNF,有效防止攻击扩散、数据泄漏等问题.

当前 VNF 可用性保障的研究主要采用 3 种策略:专有保护(dedicated protection, DP)、联合保护(joint protection, JP)和共享保护(shared protection, SP).多数研究仅关注系统面临的随机故障,旨在减少备份资源和提高备份效率<sup>[7–18]</sup>.一些面向网络攻击的保障方法通过将 VNF 或备份实例映射到更安全的资源层,从而提高安全防护能力<sup>[19–22]</sup>.然而,这些研究并没有考虑到 5G 切片特有的隔离需求.

针对上述问题,本文研究了面向资源隔离的 5G 核心网切片可用性保障.隔离意味着资源的独立性,它的实现必然依赖于更多的资源消耗,本文提出了一种基于多级隔离的资源感知的可用性保证方案,以平衡隔离与资源节约之间的矛盾.我们首先对 VNF 评估并将其划分为不同的隔离级别,在此基础上提出了一种多级隔离备份算法(MLIBA),以实现经济高效的备份,从而达到隔离和资源利用之间的平衡.本文的主要贡献如下.

- 提出了一种基于多级隔离的资源感知的可用性保障问题模型,在实现可用性目标的同时引入了切片的隔离需求.
- 建立了 VNF 隔离等级评估模型.根据多个与隔离相关的评估参数对每个 VNF 进行评分,并相应地确定每个 VNF 的隔离级别,对于不同级别采用专有备份、片内共享备份或片间共享备份以确保可用性.
- 提出了一种多级隔离备份算法(MLIBA).对于未达到可用性目标的切片,MLIBA 每次选择可用性最低的 VNF 添加一个备份实例,直到每个切片都满足可用性目标,有效提高了备份效率,减少了备份资源的消耗,实现了隔离和资源节约之间的平衡.
- 本文提出了一种基于近似等效备份实例的计算方法,解决了共享备份中可用性计算这一 PP-complete 问题.

本文第 1 节回顾了 5G 核心网切片可用性保障和隔离研究的相关工作.第 2 节介绍切片可用性保障问题模型.第 3 节介绍本文提出的隔离级别评估模型和 MLIBA 算法.第 4 节通过对比实验验证了所提方法的有效性.第 5 节对全文进行了总结.

## 1 相关工作

目前对 VNF 备份的研究主要基于 3 种策略:专有保护(DP)、联合保护(JP)和共享保护(SP).专有保护即一对一备份,有研究指出了该方法的效率较低<sup>[14]</sup>.为了提高资源效率,Li 等人提出了一种利用共享冗余的部署和备份方案,该方案中一个物理节点可以作为多个 VNF 的备份节点,该物理节点所需要的资源数量为被保护的 VNF 中资源的最大值<sup>[13]</sup>.一些研究应用共享保护来实现可用性保证<sup>[8–11]</sup>,Zhang 等人考虑不同 VNF 对资源需求的差异

建立资源感知备份模型,目标是消耗最少的备份资源满足总体可用性目标<sup>[8]</sup>。Ding等人提出了一种成本感知的重要性度量(CIM)备份方案,作者根据VNF转发图进行备份选择,将备份实例映射到高可用性的物理节点上<sup>[9]</sup>。Li等人采用“重要节点更新”技术来满足用户服务可用性需求<sup>[10]</sup>。Wang等人提出了一种新的联合路径(JPV)备份模型,该模型将路径备份和VNF备份联合起来<sup>[11]</sup>。Fan等人在共享保护的基础上提出了联合保护的方法<sup>[7]</sup>。与共享保护不同的是,联合保护中备份节点拥有被保护的所有VNF所需资源的总和,这进一步促进了在有限资源下的可用性提升,他们的后续工作<sup>[12]</sup>提出了一个可用性感知的在线算法以最小化物理资源的消耗,同时显著提高了服务请求的接受率。汤红波等人应用联合备份方法调整相邻备份实例的放置策略,来降低带宽资源开销,并提出了基于最短路径的启发式算法在满足可用性需求的同时优化资源配置,提高请求接受率<sup>[17]</sup>。与上述提供备份实例的方法不同,Thiruvasagam等人提出了eRESEVR解决方案,将5G通信业务建立为排队论模型,通过在网络业务中添加服务子链来提高5G通信业务的可用性<sup>[15]</sup>。赵国繁等人通过对5G切片进行重构来提高切片可靠性,同样以最小化资源开销为目标,对关键VNF进行备份和重构映射满足可靠性需求<sup>[18]</sup>。与主动式备份的方式不同,也有研究采用VNF迁移的方式,通过将VNF迁移到正常底层物理节点来提高可用性,但该种方式带来了迁移开销的问题,除了物理静态资源的消耗外,还增加了迁移带来的动态开销<sup>[19]</sup>。以上研究均不考虑外部攻击带来的安全问题,仅为通用架构下VNF的随机故障提供可用性保障。

文献[20,21]将网络攻击和防御过程建模成博弈论模型,并假设网络攻击者会快速攻破“已知”实例,通过建立异构备份池提高了VNF安全防御能力。龚水清等人将信任关系和信任级别引入到虚拟网络资源分配中,定量分析了NFV环境下的安全问题,通过将VNF映射到具有一定数据加密级别和防火墙级别的物理节点上来避免潜在的网络攻击<sup>[22]</sup>。孙志勇等人提出了一种节点安全参数评估模型来建立虚拟实例与物理节点之间的安全约束关系,并在此基础上,选择物理节点设计备份映射方法<sup>[21]</sup>。5G将软件和硬件解耦,提高了网络的灵活性、可扩展性和可重构性,同时也带来了切片数据泄露、资源竞争等安全威胁,因此安全隔离是必须的<sup>[23-25]</sup>。Yang等人提出了一种基于遗传算法的片间资源分配机制<sup>[26]</sup>,考虑了QoS和切片间无线电资源隔离,但是没有考虑不同切片和网络功能隔离需求的差异。有些网络功能是某些切片特有的,而有些则是多个切片共享的,片间隔离能确保一个切片的异常不会影响到其他切片,但还需要根据不同网络功能的安全级别要求,将其划分到不同的安全域以实现网络功能之间的隔离<sup>[23]</sup>。总之,在为切片提供可用性保证时,需要根据切片和VNF的特性提供多级隔离。Yu等人研究了切片隔离对资源利用率的影响,结果表明隔离等级越高,带来的网络成本越高<sup>[27]</sup>。

本文提出了一种基于多级隔离的资源感知切片可用性保证方法。一方面,通过分配备份实例来保证切片的高可用性;另一方面,通过评估每个VNF的隔离级别,对不同隔离级别采用不同的备份方法满足差异化隔离需求,以节约资源的方式提高网络切片的安全稳定性。

## 2 问题建模

本节给出了切片可用性保障问题的系统模型。对于给定的可用性目标,我们的目标是找到一个备份方案,以最小化资源消耗并满足隔离需求。

### 2.1 问题分析

在信息通信环境中,通常采用冗余备份的方式来提供可用性保障。备份过程包括两个重要方面:1)选择备份实例。在资源容量约束下,选择不低于主VNF可用性的备份实例可以有效提高备份效率。2)选择备份策略。图1表示了两种不同的备份策略,图1(a)为专有保护,VNF1和VNF3有各自一对一备份实例A和B,仅当对应的主VNF发生故障时使用。图1(b)为共享保护,由于备份实例A的资源容量和可用性不低于VNF3,因此该备份实例可以同时保护VNF1和VNF3,当VNF1或VNF3出现故障时,切片仍然可以正常工作。因此,采用共享备份策略是提高资源利用率的有效途径。

但是,使用简单的共享备份与切片隔离要求之间存在一定的矛盾。一方面,从提高资源利用率的角度来看,备份实例能够保护的VNF数量越多,实现可用性目标所需的资源数量就越少。因此,在最大范围内共享备份资源可



以达到最小化资源消耗的目的. 另一方面, 网络切片是建立在共享基础设施上的虚拟专用网络, 面临着更高的攻击扩散和数据泄露风险. 共享范围越大, 健壮性风险越大, 这也反映了隔离的必要性. 5G 核心网支持实现多重隔离, 基于共享资源池可以在网络层为多个网络切片建立逻辑隔离, 分为片间隔离和片内隔离. 首先, 不同切片中的 VNF 可以基于虚拟机或容器进行隔离, 其次, 在不同逻辑域中使用不同的共享策略进一步隔离同一片中的 VNF<sup>[28]</sup>. 如图 2(a) 所示, 所有切片共享备份资源, 虽然占用的备份资源较少, 但当一个共享备份实例或一个切片受到攻击时, 其他切片也会面临攻击扩散的风险. 隔离的引入可以有效地解决这一问题. 图 2(b) 表示切片之间的隔离, 不同切片的 VNF 不共享备份实例, 当切片 1 中的 VNF 备份实例遭受网络攻击时, 切片 2 不受影响. 类似地, 在一个片内隔离 VNFs 意味着更小的可共享范围, 也意味着进一步增加资源消耗.

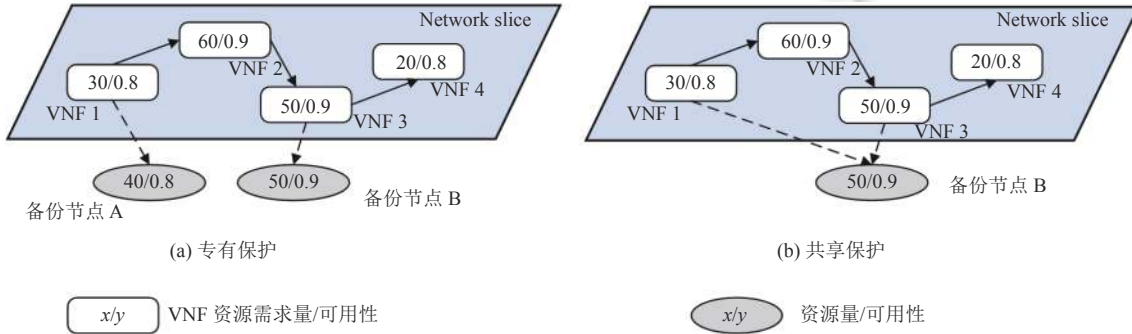


图 1 不同的备份策略

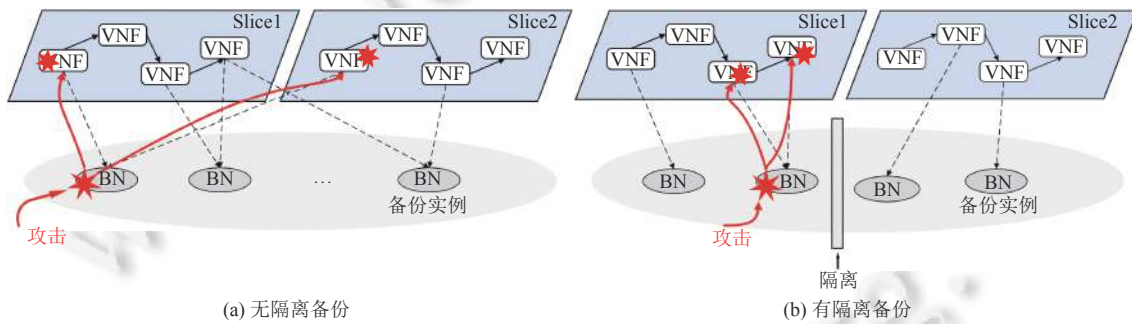


图 2 切片隔离示意图

因此, 我们的目标是提出一种平衡的可用性保障方案, 既能满足 5G 切片的隔离需求, 又能最大限度地降低备份成本, 提高资源利用率.

2.2 5G 核心网切片模型

5G 核心网切片是多个 VNF 的序列, 可以表示为  $S_i = \{v_j | j = 1, \dots, N_i\}$ , 其中  $N = |S_i|$  表示切片  $S_i$  中 VNF 数量. 对任一 VNF  $v_j \in S_i$ , 可以表示为一个六元组  $v_j = (c_j^i, a_j^i, g_j^i, f_j^i, d_j^i, t_j^i)$ .  $c_j^i$  和  $a_j^i$  分别表示实例的资源需求量和节点可用性,  $g_j^i$  表示  $v_j^i$  所在切片类型,  $f_j^i$  是功能参量, 表示  $v_j^i$  是在用户面还是控制面,  $d_j^i$  表示  $v_j^i$  信息处理量,  $t_j^i$  表示其中心度. 本文假设每个切片中的 VNF 类型是不重复的, 下标  $j$  表示其类型.  $S = \{S_i | i = 1, \dots, N_s\}$  表示切片集合,  $N_s = |S|$  为切片数量.

2.3 可用性模型

2.3.1 单个 VNF 的可用性

可用性反映了 VNF 能够正常工作的概率, VNF 的状态可以分为正常运行时间 (Uptime) 和停机时间 (Downtime). VNF 的可用性可以表示为整个时间内正常运行时间的百分比. 正常运行时间和停机时间通常用平均

故障间隔时间 (*MTBF*) 和平均修复时间 (*MTTR*) 表示<sup>[29]</sup>. 因此, VNF 的可用性可以表示为:

$$a = \frac{Uptime}{Uptime + Downtime} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (1)$$

### 2.3.2 VNF 组合的可用性

VNF 有串联和并联两种基本的组合方式, 如图 3 所示. 一个复杂系统的可用性可以用公式 (2) 表示. 在本文中, 我们假设每个 VNF 或每个 VNF 所在的物理设备的故障是相互独立的, 任何一个 VNF 的故障都会导致业务中断. 因此, 图 3(a) 中的串联可用性可以用公式 (3) 表示.

$$A_{system} = \prod A_{series}^m \cdot \prod A_{parallel}^n \quad (2)$$

$$A_{series} = \prod_{v_j \in S_{series}} a_j^i \quad (3)$$

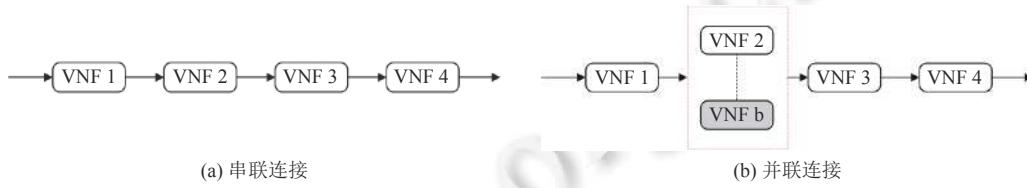


图 3 VNF 的串联与并联

在图 3(b) 中, VNF 2 和 VNF b 并联, 然后与 VNF 1、VNF 3、VNF 4 串联. 可用性可以通过公式 (4) 计算, 其中  $a'_2$  表示红色方块的可用性. 当 VNF 2 和 VNF b 同时失效时, 这部分失效, 可表示为公式 (5). 本文假设备份实例和受保护实例是并行连接的, VNF b 可以看作是 VNF 2 的一个备份实例, 增加备份实例 VNF b 后, VNF 2 的可用性为  $a'_2$ .

$$A_{parallel} = a_1 \cdot a'_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \quad (4)$$

$$a'_2 = 1 - (1 - a_2)(1 - a_b) = a_b + a_2 - a_2 a_b \quad (5)$$

### 2.4 隔离等级评估模型

为了确定 VNF 隔离级别, 我们提出了一种基于 5G 核心网特性的 VNF 隔离评估模型.  $v_j^i$  的隔离参数用  $D(v_j^i)$  表示, 取值范围为 0–1, 由  $g_j^i, f_j^i, d_j^i, t_j^i$  决定, VNF 的隔离参数为上述评价参数的加权和:

$$D(v_j^i) = \alpha g_j^i + \beta f_j^i + \gamma d_j^i + \delta t_j^i \quad (6)$$

$$0 \leq g_j^i, f_j^i, d_j^i, t_j^i \leq 1 \quad (7)$$

$$\alpha + \beta + \gamma + \delta = 1 \quad (8)$$

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$  为上述参数的权重, 可以根据不同的应用场景灵活调整, 其和为 1. 根据上述隔离级别评估结果, 可以设置两个参考值  $D_L$  和  $D_H$ , 将 VNF 切片划分为不同的虚拟域, 并采取不同的备份策略, 具体将在第 3.3 节中介绍.

$$l_j^i = \begin{cases} 0, & D(v_j^i) \leq D_L \\ 1, & D_L < D(v_j^i) \leq D_H \\ 2, & D(v_j^i) \geq D_H \end{cases} \quad (9)$$

### 2.5 问题模型

对于不满足可用性目标的网络切片, 将基于隔离为 VNF 提供备份实例, 直到所有切片都达到可用性目标. 优化目标是减少备份带来的资源消耗, 表 1 为相关变量.

网络切片是通过连接 VNF 来提供服务的, 可以将其视为串联的 VNF, 在提供备份实例前该切片的可用性可以用公式 (10) 表示:

$$A_i^B = \prod_{v_j \in S_i} a_j^i \quad (10)$$

表 1 变量表

变量	描述
$S = \{S_i   i = 1, \dots, N_S\}$	切片集合
$S_i = \{v_j^i   j = 1, \dots, N_i\}$	切片
$v_j^i = (c_j^i, a_j^i, g_j^i, f_j^i, d_j^i, t_j^i)$	切片 $S_i$ 中第 $j$ 个 VNF
$A_i$	切片 $S_i$ 可用性
$c_j^i$	$v_j^i$ 的资源需求量
$a_j^i$	$v_j^i$ 的可用性
$g_j^i$	$v_j^i$ 所在切片类型
$f_j^i$	$v_j^i$ 的功能参量
$d_j^i$	$v_j^i$ 的信息处理量
$t_j^i$	$v_j^i$ 中心度
$A_R$	切片可用性目标
$B_i = \{b_j^i   j = 1, \dots, N_i^B\}$	$S_i$ 对应的备份集合
$b_j^i = (\bar{c}_j^i, \bar{a}_j^i)$	$v_j^i$ 对应的备份实例
$\bar{c}_j^i$	$b_j^i$ 能提供的资源量
$\bar{a}_j^i$	$b_j^i$ 可用性
$l_j^i \in \{0, 1, 2\}$	$v_j^i$ 的隔离等级
$k_j^i$	$b_j^i$ 数量
$x_{pq}^i \in \{0, 1\}$	表示 $b_q^i$ 是否为 $v_p^i$ 提供备份的二进制变量

切片可用性需求是  $A_R$ . 当切片  $S_i$  的可用性  $A_i$  低于  $A_R$  时, 需要为  $S_i$  分配备份实例. 考虑到不同 VNF 的不同特性, 我们使用  $l_j^i$  表示  $v_j^i$  的隔离级别, 并对其采取相应的备份策略. 备份实例类型的集合表示为  $B_i = \{b_j^i | j = 1, \dots, N_i^B\}$ . 每个备份实例可以用一个二元组  $b_j^i = (\bar{c}_j^i, \bar{a}_j^i)$  表示,  $\bar{c}_j^i$  和  $\bar{a}_j^i$  分别表示  $b_j^i$  可以提供的资源及其可用性. 在本文中, 我们假设备份实例类型和 VNF 类型之间存在一一对应关系, 即  $\bar{a}_j^i = a_j^i$  和  $\bar{c}_j^i = c_j^i$ . 此外, 我们使用  $k_j^i$  表示这种类型的备份实例的数量.

备份关系如图 4 所示. 我们的目标是确定每个切片中每种类型的备份实例的数量, 以确保所有片的可用性满足需求, 并尽量减少备份资源的消耗. 为了完成备份过程, 需要确定以下 3 个决策变量.

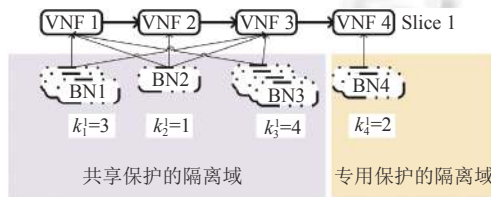


图 4 备份关系示意图

$k_j^i \geq 0$ :  $b_j^i$  的数量,  $k_j^i = 0$  表示不提供该类备份节点.

$l_j^i \in \{0, 1, 2\}$ :  $v_j^i$  的隔离等级,  $l_j^i = 0, 1, 2$  分别表示片间共享、片内共享和片内不共享.

$x_{pq}^i \in \{0, 1\}$ : 备份实例与原 VNF 的对应关系,  $x_{pq}^i = 1$  表示  $b_q^i$  为  $v_p^i$  提供保护.

目标函数为:

$$\min \sum_{i=0}^{N_s} \left( \sum_{j=0}^{N_i} k_j^i \cdot \bar{c}_j^i \right) \quad (11)$$

约束条件如下:

$$\forall i, A_i^F = \prod_{v_j^i \in S_i} a_j^i \geq A_R \quad (12)$$

$$\forall i, j, a_j^i = g(v_j^i, \{k_j^i\}, x_j^i) \quad (13)$$

$$\forall i, j, k_j^i = h(\{h_j^i\}, v_j^i) \quad (14)$$

$$x_{pq}^i = \begin{cases} 1, & \text{if } (\bar{a}_q^i \geq a_p^i \text{ and } \bar{c}_q^i \geq c_p^i \text{ and } l_p^i = l_q^i \neq 2) \text{ or } (\bar{a}_q^i = a_p^i \text{ and } \bar{c}_q^i = c_p^i \text{ and } l_p^i = l_q^i = 2) \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (15)$$

公式(11)是目标函数,即最小化备份实例所消耗的资源.公式(12)给出了可用性约束,备份后所有切片都必须满足可用性要求. $a_j^i$ 是备份后 $v_j^i$ 的可用性,由受保护的VNF、备份实例的数量以及VNF和备份实例之间的保护关系决定. $a_j^i$ 由算法1计算,用公式(13)表示.备份实例的数量由受保护实例及其隔离级别决定,隔离级别用公式(14)表示,由算法2计算.公式(15)描述了备份关系的约束条件,对 $x_{pq}^i = 1$ 在两种情况下进行了讨论,情况1为隔离级别为0或1时共享备份的两个约束( $l_p^i = l_q^i \neq 2$ ).首先,备份实例的可用性不能低于VNF的可用性,以保证较高的备份效率;第二,备份实例的资源容量不能低于VNF对资源的要求;情况2是指在专有备份中( $l_p^i = l_q^i = 2$ ),备份实例只保护其对应类型的VNF.

### 3 可用性保障方法

本节介绍了基于多级隔离的资源感知的切片可用性保障方法,旨在满足可用性目标并在隔离和资源保护之间取得平衡.

#### 3.1 方法概述

如前文所述,5G核心网采用NFV/SDN构建网络切片,满足各种业务需求.在虚拟化环境中,网络服务通过VNF的有序组合实现,VNF故障将导致业务中断.因此,需要为VNF备份来保证切片可用性,当VNF出现故障时,可以快速切换到指定的备份实例,避免网络业务中断.本文提出的5G核心网络切片可用性保障方法如图5所示.

在虚拟化层,切片编排器根据服务需求组合VNF,形成多个网络切片.5G核心网络中的VNF主要包括AMF(支持不同移动管理需求的终端)、SMF(与AMF一起支持定制的移动性管理方案)、UPF(用户平面功能)、NRF(网络存储库功能,提供对NF服务管理的支持,包括注册、注销、授权和发现)、NEF(网络暴露功能)、UDM(支持计算与存储分离的数据存储体系结构)等<sup>[15]</sup>.在这些VNF中,有些为切片内专有,有些在多个切片之间共享,每个VNF有不同的可用性和资源需求.

首先,我们根据公式(10)来评估所有切片是否满足可用性目标,然后,对不满足可用性目标的切片执行以下3个步骤进行备份.

步骤1. VNF管理器对切片中的所有VNF进行隔离级别评估,确定其隔离级别.然后据此将VNF划分到不同的逻辑隔离域.片间共享的VNF在隔离域中采用共享备份,将每个切片内独占的VNF划分为两种隔离域,分别提供共享备份和专有备份.

步骤2. 确定每种类型的备份实例的数量.不同的隔离级别(从高到低)对应着专有备份、片内共享备份和片间共享备份的策略.为了提高备份效率,同时尽可能减少备份资源的消耗,在本文的算法中,每次选取对切片可用性提高贡献最大的VNF增加备份,直到切片可用性满足目标.

步骤3. 确定备份节点的数量和类型后,使用合适的映射算法将备份实例映射到物理网络.本文采用了Bari等人提出的基于ILP的映射算法<sup>[30]</sup>.本文只考虑VNF级别的隔离,不涉及物理隔离,对于需要物理隔离的场景,可以在当前的部署算法中增加物理隔离的限制.

以上3个步骤考虑了5G核心网片的隔离要求,并在满足可用性的过程中达到了提高资源利用率的目标.

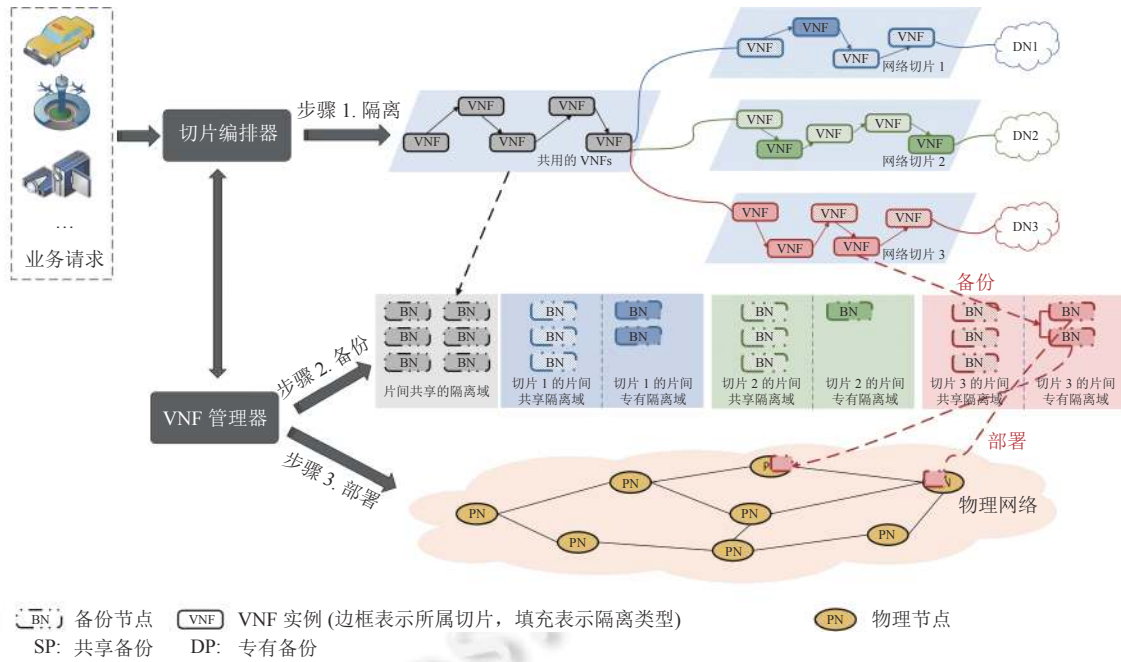


图 5 可用性保障方法示意图

### 3.2 步骤 1. 隔离等级评估

为了有效划分 VNF 隔离级别, 本文提出了一种基于 5G 核心网特性的 VNF 隔离级别评估模型.  $v_j^i$  的隔离参数由  $D(v_j^i)$  表示, 取值范围为 0-1, 由以下计算参数确定.

- (1)  $g_j^i$ : 应用类型参数. 核心网支持多种共享类型, 组网灵活, 不同的切片类型对隔离有不同的要求.
- (2)  $f_j^i$ : 用户面功能网元和控制面功能网元对隔离的要求不同.
- (3)  $d_j^i$ : 信息处理参数, 根据 VNF 处理的信息量, 可以设置高、中、低等多个评分标准.
- (4)  $t_j^i$ : 中心度参数. 它由  $v_j^i$  和其他 VNF 之间的连接数决定.

我们参考切片隔离相关文献 [1-4] 提炼出上述影响切片隔离需求的 4 个参数, 旨在提出一种可以量化隔离需求的评估方法. 并根据参考文献 [22] 中信任度评估模型的定量方法设置权重. 本文着重考虑了切片应用类型对隔离需求的影响, 其他 3 个因素的影响是平均分布的. 本文给出了以下评估方案供参考: 各参数的权重分别为 0.4、0.2、0.2、0.2.

(1)  $g_j^i$ : 将核心网切片分为 3 种类型: A 组隔离要求最高, 成本不敏感, 适用于远程医疗、工业自动化等场景; B 组隔离要求较低, 适用于辅助驾驶、汽车娱乐等场景; C 组隔离要求最低, 成本敏感, 适用于手机视频、智能抄表等场景. 如果  $v_j^i$  属于 A 组, 则  $g_j^i = 1$ ; 如果属于 B 组, 则  $g_j^i = 0.5$ ; 如果它属于 C 组, 则  $g_j^i = 0$ .

(2)  $f_j^i$ : 如果  $v_j^i$  属于用户平面, 则  $f_j^i = 1$ ; 如果它属于控制平面, 则  $f_j^i = 0$ .

(3)  $d_j^i$ : 本文为信息处理量设定了低、中、高的标准, 分别为 0、0.5、1 分.

(4)  $t_j^i$ : 中心度参数. 如果  $v_j^i$  与  $n$  个其他 VNF 相连, 则:

$$t_j^i \begin{cases} \frac{n-1}{2}, & 1 \leq n \leq 3 \\ 1, & n \geq 4 \end{cases} \quad (16)$$

### 3.3 步骤 2. 基于多级隔离的备份算法

本节介绍提出的基于多级隔离的备份算法, 对逻辑域内的 VNF 进行保护. 备份实例逐渐增加, 直到切片满足



可用性目标. 算法的目标是用最少数量的所需资源实现目标可用性, 由于每次备份完成后都需要判断目标是否达到, 因此本算法依赖于备份后可用性的计算结果. 首先给出可用性的计算方法.

### 3.3.1 可用性计算方法

在专有备份中, 每个备份实例只保护一个主 VNF, 即  $k_j^i$  个备份实例与  $v_j^i$  并联. 在第 2 节中, 我们假设备份实例与原 VNF 的类型相同, 因此,  $k_j^i$  个备份实例满足公式 (15) 中的约束, 备份后的  $a_j^i$  可以用公式 (17) 表示:

$$a_j^i = 1 - (1 - a_j^i)^{k_j^i+1} \quad (17)$$

对于在逻辑域中采用共享备份策略的 VNF, 每个备份实例为所有满足资源和可用性约束的 VNF 提供备份, 这样可以最大限度地提高总体可用性. 文献 [12] 证明了在共享备份中计算精确的整体可用性是一个 PP-complete 问题, 没有多项式时间解来解决这个问题, 计算确切的可用性需要指数级的复杂度. 曾有研究使用蒙特卡罗相关方法进行计算, 但是很难在可接受的误差范围内达到收敛. 本文提出了算法 1 来近似计算, 输入为  $T = \{v_i\}$ , 表示一个逻辑域中的 VNF 集合,  $\{k_i\}$  表示每种备份实例的数量; 输出为备份后的  $\{v_i\}$  中每个 VNF 的可用性, 用  $\{a_i\}$  表示.

---

#### 算法 1. 共享备份可用性计算.

---

输入:  $T = \{v_i\}, \{k_i\}$ ;

输出:  $\{a_i\}$ .

---

1. 初始化  $A_T = \prod_{v_m \in T} a_m$ ;
  2. 将  $T$  按可用性升序排序;
  3. 以资源为第 2 排序标准对  $T$  升序排序;
  4. for each  $v_i \in T$  do
  5. 计算等效备份节点可用性:  $a_i' = 1 - (1 - a_i)^{k_i}$
  6. end for
  7.  $A_T = 1 - (1 - a_0)^{k_0+1}$
  8. for each  $1 < i \leq |T|$  do
  9. if  $c_i \geq c_{i-1}$  then
  10.  $A_T \leftarrow A_T \times a_i + (A_T \times (1 - a_i) + (1 - A_T) \times a_i) \times a_i'$
  11. else
  12.  $A_T \leftarrow A_T \times (a_i + (1 - a_i) \times a_i')$
  13. end if
  14. end for
  15. 计算提升率  $\gamma = A_T / (\prod_{v_m \in T} a_m)$
  16. for each  $v_i \in T$  do
  17.  $a_i = \sqrt{\gamma} \times a_i$
  18. end for
  19. return  $\{a_i\}$
- 

具体计算过程如下.

步骤 1. 为了简化计算, 我们首先对 VNF 集合以可用性为第一标准进行排序 (第 1-2 行). 这样, 在备份时只需要考虑资源约束, 排名靠后的备份实例一定可以满足前一个 VNF 的可用性约束.

步骤 2. 将多个相同类型的备份实例等效为一个具有相同功能的备份实例 (第 4-6 行), 将同一类型的多个备份实例视为并联组合, 只要有一个备份实例有效, 就可以实现备份.

步骤 3. 第 1 类备份实例只能保护第 1 个主 VNF (第 7 行). 对于  $1 < t \leq |T|$ , 第  $t$  个等效备份实例可以保护第  $t$  个以及之前所有满足资源约束的 VNF (第 8–14 行). 由于在步骤 1 中使用资源作为排序的第 2 个标准, 所以可以近似地只与  $v_{t-1}$  比较, 如果  $c_t \geq c_{t-1}$ , 可用性更新为:

$$A_T = A_T \times a_t + (A_T \times (1 - a_t) + (1 - A_T) \times a_t) \times a'_t \quad (18)$$

否则只有  $v_t$  被备份, 可用性更新为:

$$A_T = A_T \times (a_t + (1 - a_t) \times a'_t) \quad (19)$$

步骤 4.  $A_T$  是计算所有备份类型后逻辑域的可用性, 据此计算可用性提升率和各 VNF 备份后可用性.

### 3.3.2 多级隔离备份算法

本文提出的多级隔离备份算法 (MLIBA) 如算法 2 所示, 基本思想是每次增加一个备份实例, 用最少的资源最大限度地提高整体可用性的提高率, 直到切片达到可用性目标.

#### 算法 2. 多级隔离备份算法.

输入:  $S_i, T_h^i, T_m^i, T_l, A_R$ ;

输出:  $\{k_j^i\}$ .

1. 初始化  $k_j^i = 0$ ;
2. 用公式 (10) 初始化  $A_i$ ;
3. 初始化  $T_h^i, T_m^i, T_l$  为空;
4. for each  $j$  do
5. 根据公式 (9) 评估隔离等级  $l_j^i$ ;
6. if  $l_j^i = 0$  then
7.  $v_j^i$  划分到  $T_l$ ;
8. else if  $l_j^i = 1$  then
9.  $v_j^i$  划分到  $T_m^i$ ;
10. else
11.  $v_j^i$  划分到  $T_h^i$ ;
12. end if
13. end for
14. while  $|A_i - A_R| < \delta$  do
15. for each  $j < N_i$  do
16. 计算备份实例数量为  $\{k_1^i, \dots, k_j^i + 1, \dots\}$  时每个 VNF 可用性//算法 1;
17. 根据公式 (10) 计算  $S_i$  可用性记作  $A_i^*$ ;
18. 根据公式 (20) 计算提升率单位资源可用性提升率  $\rho_j$ ;
19. end for
20. 选择使  $\rho_j$  最大的  $j$ ;
21.  $k_j^i = k_j^i + 1$
22.  $A_i = A_i^*$
23. end while
19. return  $\{k_j^i\}$

算法 2 的输入为  $S_i, T_h^i, T_m^i, T_l$  和  $A_R$ , 其中  $T_h^i, T_m^i$  和  $T_l$  分别表示从高到低隔离级别的 3 个逻辑域, 分别应用不同的备份策略. 输出是每个备份类型的数量  $k_j^i$ . 备份开始前, 所有备份类型的数量均设置为 0, 总体可用性为  $A_i$ . 我们使用算法 1 来判断添加每个备份实例后是否达到目标. 当  $A_i$  不满足可用性需求  $A_R$  时, 将选择一种备份类型来

分配一个实例. 在选择要添加的备份类型时, 我们引入了单位资源可用性提升率  $\rho_j$  来描述添加备份实例对整体可用性的提高效果. 每次都会添加一个使  $\rho_j$  最大化的备份实例. 第  $m$  次备份前的  $S_i$  可用性为  $A_{m-1}^i$ , 第  $m$  次备份后的系统可用性为  $A_m^i$ ,  $\rho_j$  可由公式 (20) 定义:

$$\rho_j = \frac{A_m^i - A_{m-1}^i}{A_{m-1}^i \times c_j^i} \quad (20)$$

### 3.4 算法收敛性证明

本文所设计的算法为启发式离线算法, 下面对算法的收敛性加以证明, 即每次备份资源的增加均会带来可用性的提高. 假设切片  $\{v_i\}$  第  $n$  次备份后切片可用性为  $A_N$ , 第  $n+1$  次备份时对可用性为  $a_i$  的 VNF  $v_i$  增加  $k$  个备份节点, 若采用专有备份, 则此次备份之后切片可用性  $A_{N+1}$  为:

$$A_{N+1} = \frac{A_N}{a_i} \cdot (1 - (a_i)^k) = A_N \cdot \frac{(1 - (a_i)^k)}{a_i}, \quad 0 < a_i < 1, k \geq 1 \quad (21)$$

求导可证得  $\frac{(1 - (a_i)^k)}{a_i} > 1$ , 即  $A_{N+1} > A_N$ .

若采用共享备份, 切片  $\{v_i\}$  中的 VNF 可以分为“可被新增备份节点备份”和“不可被新增备份节点备份”两个集合, 其备份前可用性分别用  $A^+$  和  $A^-$  表示, 则有:

$$A_N = A^- \cdot A^+ \quad (22)$$

根据算法 1, “可被新增备份节点备份”又可拆分为可用性为  $a_i$  和  $\frac{A^+}{a_i}$  两部分, 则有:

$$\begin{aligned} A_{N+1} &= A^- \times \left\{ \frac{A^+}{a_i} \times a_i + \left[ \frac{A^+}{a_i} \times (1 - a_i) + \left( 1 - \frac{A^+}{a_i} \right) \times a_i \right] \times (1 - (a_i)^k) \right\} \\ &= A^- \cdot A^+ + A^- \times \left[ \frac{A^+}{a_i} \times (1 - a_i) + \left( 1 - \frac{A^+}{a_i} \right) \times a_i \right] \times (1 - (a_i)^k) > A_N \end{aligned} \quad (23)$$

综上所述,  $A_{N+1} > A_N$  在任一情况均成立, 即每增加一次备份节点, 切片的可用性总是提升的, 算法收敛.

### 3.5 算法复杂度分析

MLIBA 的算法复杂度为可以用迭代次数与切片数量相乘得到. 我们用  $A_R$  表示切片可用性目标, 实际应用中取值在 0.95 到 0.999 之间<sup>[22]</sup>,  $A_B$  表示备份前可用性,  $N$  表示切片数量, 通常为有限常数,  $c_{\min}$  表示每次增加的备份节点的最小资源量,  $\rho_{\max}$  表示增加一个备份实例获得的最大单位资源可用性提升率, 根据第 3.4 节的收敛性证明可知,  $\rho_{\max} > 0$ . 那么每次备份提升后的可用性可以表示为  $A_B \cdot \rho_{\max} \cdot c_{\min}$ , 达到可用性目标所需的迭代次数就可以用  $A_R / (A_B \cdot \rho_{\max} \cdot c_{\min})$  表示, 因此, MLIBA 的算法复杂度可以表示为  $O((A_R / (A_B \cdot \rho_{\max} \cdot c_{\min})) \cdot N)$ .

## 4 实验分析

### 4.1 实验环境与对比方法

实验运行在 Intel 4 核, 1.80 GHz, 16 GB 的服务器, MLIBA 算法是在 JDK 1.8.0 实现的. 本文参考文献 [31] 设置了典型参数的取值如下: 切片数量为 100, 每个切片的 VNF 数量为 5–10 个, 每个 VNF 请求的单位资源数量为 10–90, 每个 VNF 的可用性范围为 0.95–0.999. 每个切片的可用性需求为 {0.95, 0.98, 0.99, 0.995, 0.999}. 此外, 设置共享次数上限为 3 次, 以减少处理延迟<sup>[32]</sup>. 本文首先应用蒙特卡罗模拟, 对所提出的基于等效备份节点的可用性计算方法做了准确性验证, 以证明提出的近似算法的可行性. 然后, 将 MLIBA 与表 2 中所示的其他 3 种算法进行了比较, 分别是基于差分进化的算法 (CDDE)、基于联合备份的算法 (Picker) 和基于共享备份的随机算法 (Random). 本文选择 SNDlib 的 GIUL 39 拓扑作为物理网络结构<sup>[33]</sup>, 每个节点可提供 500 单位的资源用于部署备份实例.

首先比较了这些算法在相同隔离策略下的性能, 然后评估了隔离带来的影响, 最后对算法的运行时间进行了比较. 我们从以下 5 个方面对算法进行评估.

- (1) 收敛性: 可用性提高的速度和趋势.
- (2) 备份资源消耗: 备份实例占用的单位资源数量.
- (3) 健壮性: 备份实例失败时对切片可用性的影响, 表示为可用性下降的百分比. 健壮性评估切片在面对各种攻击时的稳定性, 它是 5G 中的一个关键性能指标<sup>[34]</sup>.
- (4) 有效备份资源比例: 可用性提升率大于 1% 的备份资源所占百分比.
- (5) 算法运行时间.

表 2 对比算法

算法	描述
MLIBA	本文提出的分级隔离备份算法
CDDE	基于差分进化的备份算法 <sup>[8]</sup>
Picker	基于联合备份的备份算法, 每次选取可用性最低的两个 VNF 提供联合备份 <sup>[7]</sup>
Random	基于共享备份, 每次随机增加备份实例

## 4.2 仿真结果与分析

### 4.2.1 可用性计算方法误差

本节将蒙特卡罗模拟作为基准, 与本文提出的基于等效节点的可用性计算方法进行误差比较, 得到累计误差 (cumulative distribution function, CDF) 结果如后文图 6 所示, 可以看到有超过 90% 的误差是小于 0.006 的, 证明了该算法的准确性.

### 4.2.2 收敛性

本节比较了可用性提高趋势以判断算法是否收敛以及收敛速度. 从图 7 可以看出, 随着备份次数的增加, 切片可用性逐渐趋近于 1. 本文提出的 MLIBA 是收敛的且收敛速度最快.

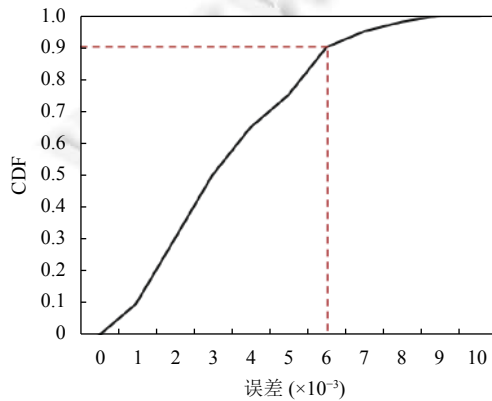


图 6 可用性计算误差函数

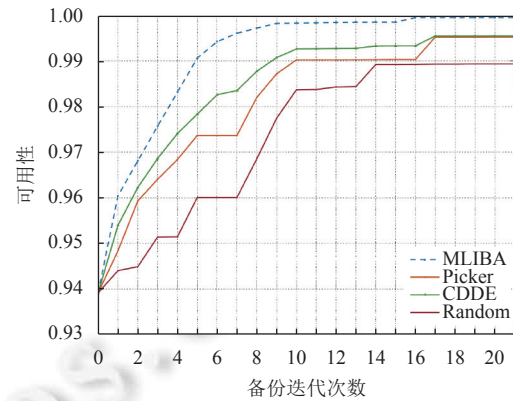


图 7 算法收敛性

### 4.2.3 资源成本

图 8 和图 9 给出了不同可用性需求下不同算法的平均备份实例数和平均备份资源消耗. 随着可用性需求的增加, 备份资源的数量逐渐增加. 可以发现, 随机分配所需的备份资源数量最大, 其次是 Picker, 在对比算法中表现最好的是基于共享备份的 CDDE 算法. 与 CDDE 相比, 本文提出的 MLIBA 消耗的备份资源更少, 满足 0.95、0.98、0.99、0.995、0.999 的可用性目标资源消耗分别减少了 78.0%、70.0%、70.6%、57.8% 和 28.8%. 这是因为 Picker 基于联合备份, 每个备份实例最多为 2 个 VNF 提供备份, 每个备份实例占用的资源是备份 VNF 资源需求的总和. MLIBA 在两个较低级别的隔离域中采用共享备份策略, 备份实例可以备份其逻辑域中所有符合条件的 VNF, 备份实例能够备份的 VNF 数量越多, 网络切片的可用性提升就越大.



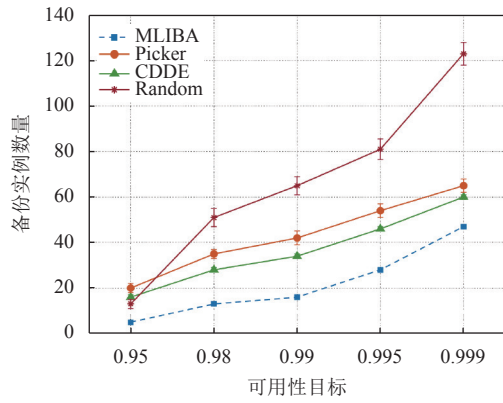


图 8 备份实例数量

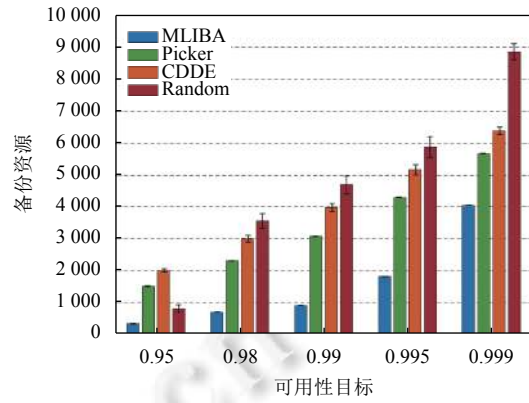


图 9 备份资源消耗

4.2.4 健壮性

备份实例可能因外部攻击而失效. 我们比较了不同算法中备份实例故障对总体可用性的影响, 如图 10 所示. MLIAB 采用隔离策略而其他算法没有, 从实验结果可以看出, MLIAB 中某一备份实例失效后对整体可用性的影响相对较小, 这是因为隔离降低了故障的影响, 提高了切片的健壮性. Picker 占用的备份资源较多, 每个备份实例所备份保护的 VNF 就更少, 因此, 与 CDDE 和 Random 相比, 备份节点故障的影响相对较小. 为了更直观地比较多级隔离带来的影响, 我们将多级隔离部分从 MLIAB 方案中去除进行比较, 结果如图 11 所示, 柱状图表示消耗的备份资源数量, 折线图表示切片的健壮性. 可以看到, 多级隔离的引入在一定程度上减少了共享的范围, 增加了健壮性, 但同时也消耗了一些备份资源, 以 0.99 的可用性目标为例, 与不引入隔离的方法相比, 我们增加了 21.7% 的备份资源数量, 健壮性大约提升了一倍.

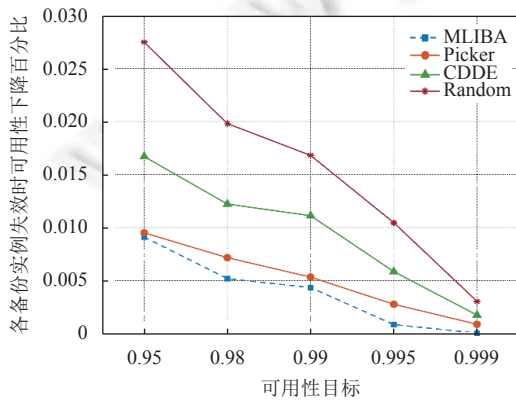


图 10 健壮性

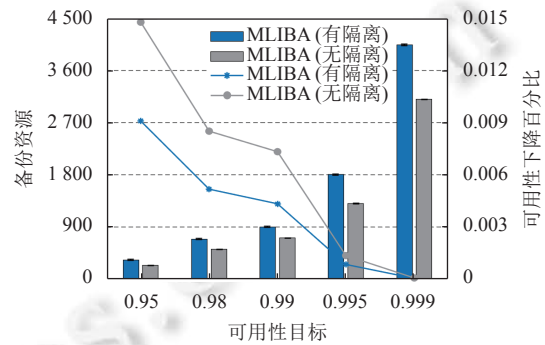


图 11 隔离的影响

4.2.5 有效备份资源占比

我们将单位资源提升率超过 1% 的备份实例视为有效备份实例. 如后文图 12 所示, MLIAB 算法的有效资源百分比最高, Random 算法的有效资源百分比最低, CDDE 算法和 Picker 算法在不同的可用性目标下的排名不同, CDDE 在目标为 0.95 到 0.99 时性能较好, 在目标为 0.995 和 0.999 时性能较差. CDDE 基于差分进化的思想, 随着进化代数的增加, 种族的多样性变小, 算法会较早地收敛到局部最优, 这意味着在之后增加相同数量的资源, 可用性改善的程度越低, 有效备份资源所占比例越低. 当可用性目标为 0.95 和 0.98 时, MLIAB 可以达到 100% 的有效备份资源占比; 在可用性目标为 0.99、0.995 和 0.999 时, 有效备份资源占比比 CDDE 高了 22.4%、19.1% 和 4%, 比 Picker 算法高 33.4%、30.6% 和 6%. 实验结果表明, 本文的 MLIAB 算法可以有效减少冗余资源占比.

#### 4.2.6 运行时间

4 种算法的运行时间如图 13 所示. Random 算法的运行时间最短, MLIBA 仅次于 Random 算法. 以 0.99 的可用性目标为例, Random 算法比 MLIBA 快 56.9%, 但图 8 显示其消耗的备份资源是 MLIBA 的 5.21 倍.

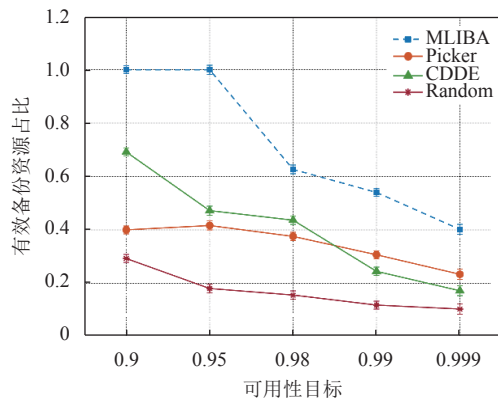


图 12 有效备份资源占比

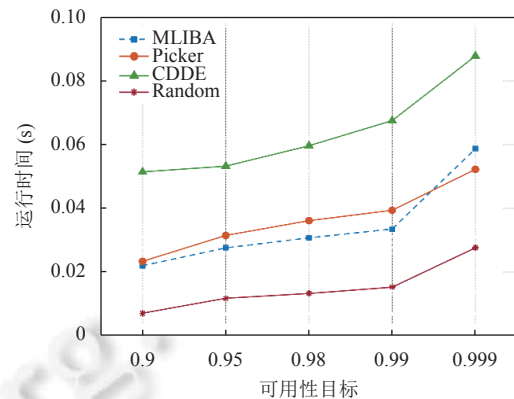


图 13 运行时间

上述实验结果表明, 本文提出的 MLIBA 实现了隔离和资源节约之间的平衡. 多级隔离的引入虽然在一定程度上增加了备份资源的数量, 但有效满足了 5G 网络切片的隔离需求. 并且, 在相同的隔离策略下, 本文提出的算法可以达到最少的备份资源消耗和最高的有效备份资源比率.

## 5 总结

5G 核心网切片是构建在通用基础设施上的虚拟专用网络, 除了通过备份提供可用性保障外, 还需要提供多重隔离以防止数据泄露和攻击扩散. 在本文中, 我们通过部署备份实例来保证核心网络切片的可用性, 提出了一种 VNF 隔离级别评估模型, 实现了多层隔离, 既满足了切片的隔离要求, 又提高了切片健壮性; 在此基础上, 提出了一种基于多级隔离的资源感知备份算法, 以达到资源消耗最少的目的. 实验结果证明, 我们的解决方案在达到可用性目标的同时, 实现了资源节约和隔离需求之间的平衡.

## References:

- [1] Raza MR, Natalino C, Öhlen P, Wosinska L, Monti P. Reinforcement learning for slicing in a 5G flexible RAN. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(20): 5161–5169. [doi: [10.1109/JLT.2019.2924345](https://doi.org/10.1109/JLT.2019.2924345)]
- [2] Ghosh A, Maeder A, Baker M, Chandramouli D. 5G evolution: A view on 5G cellular technology beyond 3GPP release 15. *IEEE Access*, 2019, 7: 127639–127651. [doi: [10.1109/ACCESS.2019.2939938](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2939938)]
- [3] Sattar D, Matrawy A. Optimal slice allocation in 5G core networks. *IEEE Networking Letters*, 2019, 1(2): 48–51. [doi: [10.1109/LNET.2019.2908351](https://doi.org/10.1109/LNET.2019.2908351)]
- [4] Raza MR, Fiorani M, Rostami A, Öhlen P, Wosinska L, Monti P. Dynamic slicing approach for multi-tenant 5G transport networks. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2018, 10(1): A77–A90. [doi: [10.1364/JOCN.10.000A77](https://doi.org/10.1364/JOCN.10.000A77)]
- [5] Nguyen VG, Brunstrom A, Grinnemo KJ, Taheri J. SDN/NFV-based mobile packet core network architectures: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 19(3): 1567–1602. [doi: [10.1109/COMST.2017.2690823](https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2690823)]
- [6] Popovski P, Trillingsgaard KF, Simeone O, Durisi G. 5G wireless network slicing for eMBB, URLLC, and mMTC: A communication-theoretic view. *IEEE Access*, 2018, 6: 55765–55779. [doi: [10.1109/ACCESS.2018.2872781](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2872781)]
- [7] Fan JY, Ye ZL, Guan CW, Gao XJ, Ren K, Qiao CM. GREP: Guaranteeing reliability with enhanced protection in NFV. In: *Proc. of the 2015 ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Middleboxes and Network Function Virtualization*. London: Association for Computing Machinery, 2015. 13–18. [doi: [10.1145/2785989.2786000](https://doi.org/10.1145/2785989.2786000)]
- [8] Zhang J, Wang ZN, Peng CY, Zhang LQ, Huang T, Liu YJ. RABA: Resource-aware backup allocation for a chain of virtual network functions. In: *Proc. of the 2019 IEEE INFOCOM Conf. on Computer Communications*. Paris: IEEE, 2019. 1918–1926. [doi: [10.1109/INFOCOM.2019.8737565](https://doi.org/10.1109/INFOCOM.2019.8737565)]

- [9] Ding WR, Yu HF, Luo SX. Enhancing the reliability of services in NFV with the cost-efficient redundancy scheme. In: Proc. of the 2017 IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC). Paris: IEEE, 2017. 1–6. [doi: 10.1109/ICC.2017.7996840]
- [10] Li J, Liang WF, Huang MT, Jia XH. Reliability-aware network service provisioning in mobile edge-cloud networks. IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems, 2020, 31(7): 1545–1558. [doi: 10.1109/TPDS.2020.2970048]
- [11] Wang M, Cheng B, Chen JL. Joint availability guarantee and resource optimization of virtual network function placement in data center networks. IEEE Trans. on Network and Service Management, 2020, 17(2): 821–834. [doi: 10.1109/TNSM.2020.2978910]
- [12] Fan JY, Guan CW, Zhao YM, Qiao CM. Availability-aware mapping of service function chains. In: Proc. of the 2017 IEEE INFOCOM Conf. on Computer Communications. Atlanta: IEEE, 2017. 1–9. [doi: 10.1109/INFOCOM.2017.8057153]
- [13] Li DF, Hong PL, Xue KP, Pei JN. Availability aware VNF deployment in datacenter through shared redundancy and multi-tenancy. IEEE Trans. on Network and Service Management, 2019, 16(4): 1651–1664. [doi: 10.1109/TNSM.2019.2936505]
- [14] Potharaju R, Jain N. Demystifying the dark side of the middle: A field study of middlebox failures in datacenters. In: Proc. of the 2013 Conf. on Internet Measurement. Barcelona: Association for Computing Machinery, 2013. 9–22. [doi: 10.1145/2504730.2504737]
- [15] Thiruvassagam PK, Kotagi VJ, Murthy CSR. The more the merrier: Enhancing reliability of 5G communication services with guaranteed delay. IEEE Networking Letters, 2019, 1(2): 52–55. [doi: 10.1109/LNET.2019.2902720]
- [16] Xie JC, Yi P, Zhang Z, Zhang CH, Gu YJ. A service function chain deployment scheme based on heterogeneous backup. In: Proc. of the 18th IEEE Int'l Conf. on Communication Technology (ICCT). Chongqing: IEEE, 2018. 1096–1103. [doi: 10.1109/ICCT.2018.8600187]
- [17] Yang HB, Qiu H, You W, Ji XS. A reliability-guarantee method for service function chain deployment based on joint backup. Journal of Electronics & Information Technology, 2019, 41(12): 3006–3013 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.11999/JEIT190013]
- [18] Zhao GF, Tang L, Hu YJ, Zhao PP, Chen QB. A reliability-aware 5G network slice reconfiguration and embedding algorithm. Journal of Electronics & Information Technology, 2020, 42(6): 1478–1485 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.11999/JEIT190500]
- [19] Wang ZK. Anomaly detection and service function chain healing techniques in network slicing [MS. Thesis]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2020 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.27675/d.cnki.gcydx.2020.000009]
- [20] Xu SL, Ji XS, Liu WY. Enhancing the reliability of NFV with heterogeneous backup. In: Proc. of the 3rd IEEE Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conf. (ITNEC). Chengdu: IEEE, 2019. 923–927. [doi: 10.1109/ITNEC.2019.8729059]
- [21] Sun ZY, Ji XS, You W, Yuan Q. Research on backup and remapping of network slice based on security classification. Chinese Journal of Network and Information Security, 2018, 4(11): 49–57 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.11959/j.issn.2096-109x.2018088]
- [22] Gong SQ, Chen J, Huang CH, Zhu QC. Trust-aware secure virtual network embedding algorithm. Journal on Communications, 2015, 36(11): 180–189 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2015272]
- [23] Kazmi SMA, Khan LU, Tran NH, Hong CS. Network slicing for 5G and Beyond Networks. Cham: Springer, 2019. [doi: 10.1007/978-3-030-16170-5]
- [24] 3GPP. 3GPP TS 33.501 Security architecture and procedures for 5G system. 2019. [https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/33\\_series/33.501/](https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/33_series/33.501/)
- [25] Sattar D, Matrawy A. Towards secure slicing: Using slice isolation to mitigate DDoS attacks on 5G core network slices. In: Proc. of the 2019 IEEE Conf. on Communications and Network Security (CNS). Washington: IEEE, 2019. 82–90. [doi: 10.1109/CNS.2019.8802852]
- [26] Yang X, Liu Y, Wong IC, Wang YP, Cuthbert L. Genetic algorithm for inter-slice resource management in 5G network with isolation. In: Proc. of the 2020 Int'l Conf. on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM). Split: IEEE, 2020. 1–6. [doi: 10.23919/SoftCOM50211.2020.9238298]
- [27] Yu H, Musumeci F, Zhang JW, Tornatore M, Ji YF. Isolation-aware 5G RAN slice mapping over WDM metro-aggregation networks. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(6): 1125–1137. [doi: 10.1109/JLT.2020.2973311]
- [28] Mao YX, Chen L, You SL, Yan XC, Wu Q. 5G network slicing security isolation mechanism and application. Mobile Communications, 2019, 43(10): 31–37 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.3969/j.issn.1006-1010.2019.10.006]
- [29] Gill P, Jain N, Nagappan N. Understanding network failures in data centers: Measurement, analysis, and implications. In: Proc. of the 2011 ACM SIGCOMM Conf. Toronto: ACM, 2011. 350–361. [doi: 10.1145/2018436.2018477]
- [30] Bari F, Chowdhury SR, Ahmed R, Boutaba R, Duarte OCMB. Orchestrating virtualized network functions. IEEE Trans. on Network and Service Management, 2016, 13(4): 725–739. [doi: 10.1109/TNSM.2016.2569020]
- [31] Google APPs service level agreement. 2021. <https://workspace.google.com/intl/en/terms/sla.html>
- [32] Wang Y, Zhang LY, Yu P, Chen K, Qiu XS, Meng LM, Kadoch M, Cheriet M. Reliability-oriented and resource-efficient service function chain construction and backup. IEEE Trans. on Network and Service Management, 2021, 18(1): 240–257. [doi: 10.1109/TNSM.2020.3045174]
- [33] Orłowski S, Wessälly R, Pióro M, Tomaszewski A. SNDlib 1.0-survivable network design library. Networks, 2010, 55(3): 276–286. [doi:

[10.1002/net.20371](https://doi.org/10.1002/net.20371)]

- [34] Fang DF, Qian Y, Hu RQ. Security for 5G mobile wireless networks. IEEE Access, 2018, 6: 4850–4874. [doi: [10.1109/ACCESS.2017.2779146](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2779146)]

#### 附中文参考文献:

- [17] 汤红波, 邱航, 游伟, 季新生. 基于联合备份的服务功能链可靠性保障的部署方法. 电子与信息学报, 2019, 41(12): 3006–3013. [doi: [10.11999/JEIT190013](https://doi.org/10.11999/JEIT190013)]
- [18] 赵国繁, 唐伦, 胡彦娟, 赵培培, 陈前斌. 面向可靠性的5G网络切片重构及映射算法. 电子与信息学报, 2020, 42(6): 1478–1485. [doi: [10.11999/JEIT190500](https://doi.org/10.11999/JEIT190500)]
- [19] 王兆堃. 网络切片场景下的异常检测与服务功能链愈合技术研究 [硕士学位论文]. 重庆: 重庆邮电大学, 2020. [doi: [10.27675/d.cnki.gcydx.2020.000009](https://doi.org/10.27675/d.cnki.gcydx.2020.000009)]
- [21] 孙志勇, 季新生, 游伟, 袁泉. 基于安全分级的网络切片备份与重映射方法研究. 网络与信息安全学报, 2018, 4(11): 49–57. [doi: [10.11959/j.issn.2096-109x.2018088](https://doi.org/10.11959/j.issn.2096-109x.2018088)]
- [22] 龚水清, 陈靖, 黄聪会, 朱清超. 信任感知的安全虚拟网络映射算法. 通信学报, 2015, 36(11): 180–189. [doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2015272](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2015272)]
- [28] 毛玉欣, 陈林, 游世林, 闫新成, 吴强. 5G网络切片安全隔离机制与应用. 移动通信, 2019, 43(10): 31–37. [doi: [10.3969/j.issn.1006-1010.2019.10.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-1010.2019.10.006)]



王颖(1976—), 女, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要研究领域为网络管理与通信软件, 软件化网络, 算力网络.



李文璟(1973—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, CCF 专业会员, 主要研究领域为无线网络管理, 自组织网络.



陈可(1997—), 女, 硕士, 主要研究领域为网络功能虚拟化.



邱雪松(1973—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为网络管理, 通信软件.



喻鹏(1986—), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, CCF 专业会员, 主要研究领域为 5G/6G 网络智能管控.



孟洛明(1955—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, CCF 高级会员, 主要研究领域为通信网, 网络管理.