

【工程与技术研究】

基于信任感知的虚拟网络切片 差异化资源分配算法

蔡杰锋

(闽南理工学院 信息管理学院, 福建 泉州 362700)

摘 要:针对虚拟网络切片差异化资源分配不均、资源分配成本较高的问题,引入信任感知安全约束,并结合差异化资源分配业务关键通信约束条件,确定全部业务虚拟网络切片租赁花费最低为目标函数,构建信任感知的虚拟网络切片差异化资源分配算法。通过凸优化理论的子梯度算法求解,获取最终的虚拟网络切片差异化资源分配结果。结果表明,采用该算法获得的虚拟网络请求接收率和物理网络映射收益较高,满足了切片租赁的总花费目标。该算法能够实现虚拟网络切片差异化资源分配。

关键词:虚拟网络;网络切片;信任感知;差异化资源

中图分类号: TP 399

文献标识码: A

DOI:10.13486/j.cnki.1673-2618.2024.02.011

虚拟网络切片作为 5G 网络的重要组成部分,主要包括核心子切片、无线子切片、承载子切片,可在相同硬件基础设施上多个虚拟端与端网络的共享服务。各网络切片作为独立的虚拟网络^[1-3],按照 5G 业务需求配置对应网络服务,可有效提高网络资源的利用率。网络状态具有动态性,在虚拟网络切片内利用静态分配方法,会出现资源分配不均的问题,一旦其中一个网络切片出现资源分配错误^[4-5],将直接影响整个网络运行,因此对虚拟网络切片差异化资源分配至关重要。周兵^[6]研究了概率模型的调度方法,该方法通过模型得出观测变量后,求解资源优先度实现调度。郑远鹏等^[7]研究了 MEC 系统中面向网络切片的 3C 联合资源分配算法,通过构建 MEC 协作资源分配模型,以效用值最大化为目标,采用该模型求解资源分配值,得出资源分配结果。Hossain 等^[8]讨论了在无线电接入网络中采用正交频分多址系统进行下行链路通信的网络切片资源分配问题,为了提高各个切片的吞吐量,同时满足高优先级 5G 切片的约束,提出了一个混合整数非线性规划问题。Vilalta 等^[9]提出了一种协调的网络切片和传输网络虚拟化架构,为未来网络的发展提供了关键的数据和控制平面技术,该架构旨在为传输网络虚拟化提供必要的支持,并研究了网络切片和光传输网络虚拟化架构之间的交互,以实现有效的网络资源编排自动化。以上方法虽然均能实现网络切片资源分配,但未考虑虚拟节点的性能,导致网络执行能力不足,且模型深度大,数据分类效率低,虚拟网络切片资源分配效果一般。对于大规模网络,执行资源分配算法需要大量计算资源,可能导致算法运行时间较长,影响实时性能。在实际应用中,网络切片资源的分配需要在实时环境下进行,而测试数据无法完全反映算法的实时性能表现。因此,本文研究了基于信任感知的虚拟网络切片差异化资源分配算法,旨在解决虚拟网络中资源分配不公平的问题。该算法的优势在于通过对用户的信任度进行感知,可以实现对不同用户的差异化资源分配,从而优化虚拟网络切片实施差异化资源分配效果,提高资源利用率和用户的满意度,优化网络服务质量,并降低资源的浪费和企业的成本。此外,该算法还能够

收稿日期:2023-06-06

作者简介:蔡杰锋(1989—),男,福建晋江人,讲师,主要从事数学与应用数学研究。E-mail:tonguexue@yeah.net

提高网络的安全性,避免恶意用户的入侵和攻击,保护虚拟网络的稳定和安全,为虚拟网络技术的进一步发展提供了理论和实践支持。

1 虚拟网络切片差异化资源分配

1.1 虚拟网络切片差异化资源分配算法结构

虚拟网络切片由租户控制器、网络服务编排器、运营支撑系统组成,其能够提供多个虚拟端与端网络的共享服务。在服务提供过程中,服务的需求存在一定差异,在资源分配时需满足差异化的用户需求,并保证差异化资源分配的可靠性^[10-12]。基于此,本文将信任感知应用在虚拟网络切片的差异化资源分配中,构建虚拟网络切片差异化资源分配算法,算法结构如图 1 所示。业务请求负责传输各虚拟网络切片用户需求,经负载分析评估虚拟网络切片的缓存数据后得出评估结果,虚拟网络调度器依据该结果,通过构建基于信任感知的虚拟网络切片差异化资源分配算法,对虚拟网络切片各实体实施资源差异化调度。

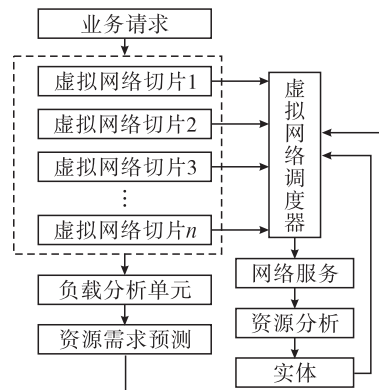


图 1 算法结构图

1.2 差异化资源分配的信任感知安全约束

将信任感知用于虚拟网络切片差异化资源分配,设置某个时间段虚拟节点、物理节点是安全、可信的,将节点间信任度作为安全约束条件,构建信任感知虚拟网络切片差异化资源分配的算法。为满足网络业务需求,提高网络安全性,降低网络安全成本,通过该算法可实现节点映射,完成虚拟网络切片差异化资源分配。将信任度等级和信任需求作为判断资源通信节点间信任关系标准^[13-14],通过信任度估算得出某节点信用度值,当信任度值等级越大、节点之间的信任度越高时,将该节点作为映射节点,这样可提高差异化资源分配效率^[15]。虚拟网络切片差异化资源分配过程需满足以下 2 个信任度安全约束:(1)虚拟节点信任度需低于对应物理节点上其他节点的信任度等级;(2)虚拟节点信任度等级需高于对应物理节点和其他虚拟节点的信任度需求。

基于信任感知的虚拟网络切片差异化资源分配算法,通过节点资源能力指标评价节点重要程度,该指标定义如下。

定义 1 节点 CPU 资源 $RA(q) = cpu(q)$ 。其中,当 $q = q_i$ 时, q 为物理节点;当 $q = q_j$ 时, q 为虚拟节点。 $cpu(q_i)$ 为物理节点 q_i 可用的 CPU 资源; $cpu(q_j)$ 为虚拟节点 q_j 的 CPU 资源。物理节点和虚拟节点的资源能力值中,物理节点的资源能力值越大,说明物理节点越重要,表示该节点切片可用资源较多,可提高资源分配效率^[16];虚拟节点资源能力值越大,表示切片资源分配越复杂,需优先分配。

定义 2 度中心性 $DC(q_i)$ 表示与节点衔接链路宽带的总和, $DC(q_i) = \sum_{l \in L(q_i)} b(l) + b'(l)$ 。其中, $b(l)$ 描述虚拟链路 l 的可用宽带, $L(q_i)$ 为物理节点 q_i 的邻接链路集合, $b'(l)$ 为物理链路 l 的可用宽带。度中心性越大,表明该节点通信能力高^[17],在虚拟网络切片差异化资源分配中占重要位置。

定义 3 接近度中心性为 $\frac{CC(q)}{\sum_{q \in \Psi(q)} d_{ij}}$ 。其中:当 q 是虚拟节点时,则 $\Psi(q) = Q_v$ 为虚拟节点;当 q 是物理节点时, $\Psi(q) = Q_s$ 为物理节点。 d_{ij} 为节点 q_i 、 q_j 间的最短路径跳数,当 $i = j$ 时, $d_{ij} = 0$,节点重要程度与接近度中心性成正比。当节点的接近度中心性越大时,代表该节点在网络中越重要。

以约束条件中深度感知节点中心性的 3 个指标为重要性评价属性,依据重要度利用多属性决策分析方法对节点实施排序后,再依据排序结果对网络节点实施节点映射,以提高虚拟网络切片差异化资源分配

效率。综上所述,物理节点信任度与资源分配成本之间呈现正比例关系。

1.3 虚拟网络切片差异化资源分配方法

信任感知虚拟网络切片差异化资源分配算法是在满足深度信任安全约束条件和业务关键通信指标情况下,以最小化全部业务虚拟网络切片租赁费用为目标,实现虚拟网络切片资源差异化分配。

设 $k = 1, 2, \dots, K$ 为不同数量的资源块; $m = 1, 2, \dots, M$ 为需要分配业务类型的索引变量;业务 $g_{m,k}$ 为 m 在 k 上信道增益用; $p_{m,k}$ 为 k 对业务 m 进行发送时的发送功率(包含电压、电流等信息); β_m^c 为单位计算资源租赁价格;对业务 n 实行处理时, C_m 为所需的虚拟化资源; $x_{m,k}$ 为 k 分配至 m 的指示变量; f 为频率; β_k^f 为资源块频率。虚拟网络业务 m 的虚拟网络切片租赁费用为 $\sum_{k=1}^m \beta_m^c C_m + \beta_k^f x_{m,k}$ 。

按照节点信任度等级和信任需求以及差异化资源分配业务通信约束条件,确定全部业务虚拟网络切片租赁花费最小为差异化资源分配的目标函数 $\min_{x_{m,k}, p_{m,k}, C_m} \cos t = \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \beta_k^f x_{m,k} + C_m \times \beta_m^c$ 的约束条件为

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^K x_{m,k} \log_2(1 + g_{m,k} \times p_{m,k}) \leq C_m \times \Delta t_m, \\ \sum_{m=1}^M C_m \leq C, \\ \sum_{k=1}^K p_{m,k} \leq P_m. \end{cases} \quad (1)$$

式中: $x_{m,k}$ 为离散变量,且 $x_{m,k} \in \{0, 1\}$; Δt_m 为时延指标值; C 为服务器总资源量; P_m 为端口总功率。

为了保证信任度,对 CPU 资源进行约束,约束条件为

$$\begin{cases} x_j^i \text{cpu}(q_i) \leq \text{cpu}(q_j), \\ x_j^i \text{dis}(\text{loc}(q_i), \text{loc}(q_j)) \leq D(q_i). \end{cases}$$

式中: $\text{cpu}(q_i)$ 为物理节点的 CPU 资源, $\text{cpu}(q_j)$ 为虚拟节点的 CPU 资源; $\text{dis}(\text{loc}(q_i), \text{loc}(q_j))$ 为 q_i 到 q_j 的欧式距离。

节点信任度安全约束条件为

$$\begin{cases} x_j^i \text{trd}(q_i) \leq \min_{q_h \in \Omega(q_j)} \text{trl}(q_h), \\ x_j^i \text{trd}(q_j) \leq \text{trl}(q_i), \\ x_j^i \text{trd}(q_i) \leq \text{trl}(q_j). \end{cases}$$

式中, $\text{trd}(q_i)$ 、 $\text{trl}(q_i)$ 分别为底层物理节点信任度需求和等级, $\text{trl}(q_h)$ 为其他节点信任度等级, $\text{trd}(q_j)$ 、 $\text{trl}(q_j)$ 分别为底层虚拟节点信任度需求和等级, $\Omega(q_j)$ 为 q_j 节点集合, q_h 为 $\Omega(q_j)$ 的其他节点。

为求解目标函数最优值,令 $w_{m,k} = p_{m,k} x_{m,k}$ 资源最优值表达式为

$$C_m^* = \frac{\sum_{k=1}^K x_{m,k}^* \log_2(1 + g_{m,k} p_{m,k}^*)}{\Delta t_m}. \quad (2)$$

式中, $p_{m,k}^*$ 为功率最优值, $x_{m,k}^*$ 为频率资源块分配最优值。

由于差异化资源分配目标函数属于组合优化目标,为实现虚拟网络切片差异化资源最优分配,采用能够描述差异化资源需求变化的拉格朗日算子^[18]表示资源分配的目标函数:

$$L = \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K (\beta_k^f x_{m,k} + \frac{\beta_m^c}{\Delta t_m} x_{m,k} \log_2(1 + g_{m,k} \frac{w_{m,k}}{x_{m,k}})) + \lambda (C - \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K x_{m,k} \log_2(1 + g_{m,k} \frac{w_{m,k}}{x_{m,k}})) + \sum_{m=1}^M \mu_m (P_m - \sum_{k=1}^K w_{m,k}) + \sum_{k=1}^K \varphi_k (1 - \sum_{m=1}^M x_{m,k}).$$

式中, $\lambda \geq 0$, $\mu_m \geq 0$, $\varphi_k \geq 0$ 均为式(1)的拉格朗日乘子。按照最优解的节点信任度安全约束条件得出

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial w_{m,k}} = 0, \\ \frac{\partial L}{\partial x_{m,k}} \begin{cases} > 0, x_{m,k}^* = 0, \\ = 0, x_{m,k}^* \in (0, 1), \\ < 0, x_{m,k}^* = 1. \end{cases} \end{cases}$$

计算上式可获得 $p_{m,k}^*$ 最优解:

$$p_{m,k}^* = \left[\frac{1}{\ln 2 \mu_m} \left(\frac{\beta_m^c}{\Delta t_m} + \varphi_k - \frac{\lambda}{\Delta t} \right) - \frac{1}{g_{m,k}} \right]^+ \quad (3)$$

其中,算子 $[\cdot]^+ = \max(\cdot, 0)$ 。计算式(3) 得出最优资源块分配结果:

$$m^* = \arg \min_{1 \leq m \leq M} F(p_{m,k}^*), x_{m,k}^* = 1, x_{m,k} = 0, \forall m \neq m^* \quad (4)$$

$$S_{m,k} = \left(\frac{\beta_m^c - \lambda}{\Delta t_m} + \varphi_k \right) \log_2(1 + g_{m,k} p_{m,k}^*) + \beta_k^f - \frac{g_{m,k} p_{m,k}^*}{\ln 2(1 + g_{m,k} p_{m,k}^*)} \quad (5)$$

其中,配置频率资源块 k 将最小业务分配给 $F(p_{m,k}^*)$, m^* 为业务 m 的最优分配方式, $S_{m,k}$ 为不同业务类型的最优分配方式。

通过式(4)(5) 得出频率资源块和功率通信资源的最优解 $(x_{m,k}^*, p_{m,k}^*)$, 并依据该结果计算出式(2) 的结果, 即可得出差异化资源分配结果。虚拟网络切片的差异化资源分配整体流程分为 5 步: 第 1 步, 对 $\varphi_k^{(0)}$ 、 $\lambda^{(0)}$ 、 $\mu_m^{(0)}$ 实施初始化处理, 同时设置 $i = 0$, 为迭代循环变量。第 2 步, 按照式(4)(5) 求解出 $(x_{m,k}^*, p_{m,k}^*)$ 。第 3 步, 按照第 2 步结果和

$$\lambda^{(i+1)} = \left[\lambda^{(i)} - \phi_\lambda \left(C - \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^M x_{m,k} \log_2(1 + g_{m,k} p_{m,k}) \right) \right]^+, \mu_m^{(i+1)} = \left[\mu_m^{(i)} - \phi_\mu \left(p_m - \sum_{k=1}^K x_{m,k} p_{m,k} \right) \right]^+,$$

更新拉格朗日算子, 使 $i = i + 1$ 。其中, ϕ_λ 为 λ 中拉格朗日函数的步长, ϕ_μ 为 μ 中拉格朗日函数的步长。第 4 步, 对 $\varphi_k^{(i)}$ 、 $\lambda^{(i)}$ 、 $\mu_m^{(i)}$ 实施判断收敛, 如果收敛进行下步, 如果未收敛需返回第 2 步继续训练。第 5 步, 将 $(x_{m,k}^*, p_{m,k}^*)$ 导入式(3), 本文通过凸优化理论的子梯度算法求解最优差异化资源分配目标函数 C_m^* , 获取虚拟网络切片差异化资源分配结果。

2 实验分析

2.1 实验设置

为验证本文算法应用性能, 选取某地电力 5G 网络运营商虚拟网络作为实验对象。实验参数见表 1。

表 1 实验参数

参数	参数取值	参数	参数取值
单位计算资源租赁价格/元	2	信息采集类业务最低时延/s	2
基站计算资源总数/MIPS	1600	移动应用类业务最低传输速率/Mbps	15
频率资源块总数	60	移动应用类业务最低时延/ms	55
电网控制类业务最低传输速率/Mbps	3	通信终端发送总功率/dBm	25
电网控制类业务最低时延/ms	20	频率资源块租赁价格/(元·频率资源块 ⁻¹)	15
信息采集类业务最低传输速率/kbps	150		

该运营商的业务有 3 种类型, 运营商期望全部业务的虚拟网络切片总花费低于 200 万元。其中电网控制类业务电力通信接入系统网络的母线电压为 300 kV, 电流 600 A。该运营商共建设 8 个虚拟网络切片, 虚拟网络切片用户数为 30 个, 待分配资源数量 6.5 GB。实验中利用 GT-ITM 拓扑生成器生成网络请求, 物理节点数量为 100 个, 虚拟节点数量为 30 个, 物理节点位置坐标服从 $[0, 100]$ 分布, 虚拟位置坐标服

从[3,30]分布。节点的信任度等级取值 0~1,指标权重为 1/3,位置距离约束量为 50。

2.2 实验结果分析

在信任度等级分别为 0.1 级、0.5 级、1.0 级时,统计采用本文算法后的虚拟网络请求接收率和物理网络映射收益,如图 2、图 3 所示。由图 2 可知,随着时间增长,虚拟网络请求接收率总体均呈现下降趋势,且波动幅度较小,当信任度等级为 1.0 级时,在 300 个时间单元虚拟网络请求接收率开始下降,接收率比其他两个信任度等级接收率高。说明信任度等级越高,协调节点映射协调能力越强,虚拟网络切片分配的效率越高。由图 3 可知,在信任度等级为 1.0 时,物理网络映射收益比较高,平均收益约为 4.5 万元,分别比其他两个信任度等级高出 1 万元~2 万元,说明信任度等级越高,总映射收益也越高。

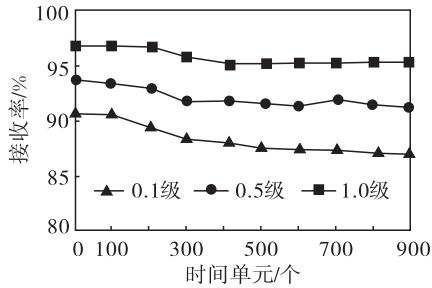


图 2 虚拟网络请求接收率

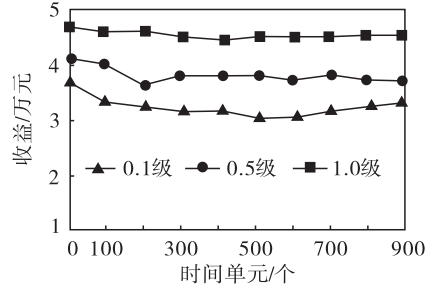


图 3 物理网络映射收益

采用本文算法在不同业务类型下,统计虚拟网络切片总租赁成本情况,结果如图 4 所示。由图 4 可知:当配电网控制类和信息采集类两种业务时,虚拟网络切片租赁总花费随着业务数量增加而降低。而移动应用类业务,当业务数量小于 70 个时,虚拟网络切片租赁的总花费呈下降趋势,当任务数量为 80 时,虚拟网络切片租赁的总花费又开始增加,因该类业务带宽需求增加,需要基站为其分配更多虚拟网络切片资源,实现差异化分配,满足运营商全部业务的虚拟网络切片总花费低于 200 万元期望目标。

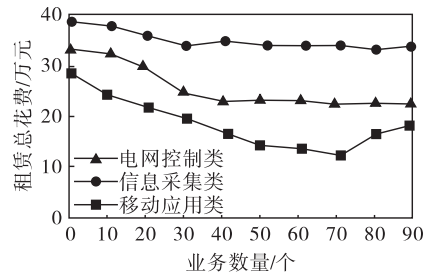
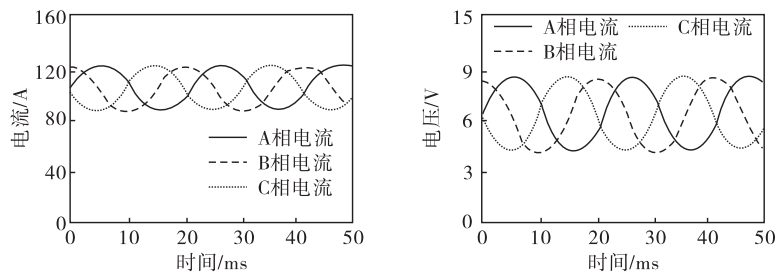


图 4 虚拟网络切片总租赁成本

采用本文算法对电网控制类业务电力通信接入系统网络节点实施虚拟网络切片差异化资源分配结果如图 5 所示。由图 5 可知,随着时间增长,电压、电流曲线趋于稳定,说明采用本文算法的虚拟网络切片差异化分配的自适应性较强。通过曲线形状可以判断出电压、电流曲线的特征,提高虚拟网络切片的差异化资源调度能力,满足电网控制类业务需求。



(a) 电流资源分配结果

(b) 电压资源分配结果

图 5 电力系统虚拟网络切片资源分配

3 结论

研究了基于信任感知的虚拟网络切片差异化资源分配算法,以提高虚拟网络切片资源利用率。结果

表明,算法以节点间信任关系为约束条件,在两种评价指标下均具有较好的映射效率,能够节省切片总租赁成本。本算法能有效地提高网络资源利用率和用户满意度,并取得了较好的效果。然而,在某些特定网络环境下,本算法可能无法有效地分配资源,导致资源利用率和用户满意度下降,但与先前发表过的研究工作相比,本算法具有更高的效率和更好的性能,具有较大的理论和实用价值。

参考文献:

- [1] 王威丽,陈前斌,唐伦.虚拟网络切片中的在线异常检测算法研究[J].电子与信息学报,2020,42(6):1460-1467.
- [2] 孙茜,田霖,周一青,等.面向 B5G 和 6G 的边缘计算与网络切片资源管理[J].电信科学,2021,37(6):55-65.
- [3] 赵季红,乔琳琳,曲桦,等.基于业务类型的网络切片可靠性映射算法[J].计算机工程,2021,47(7):140-145.
- [4] 赵国繁,唐伦,胡彦娟,等.面向可靠性的 5G 网络切片重构及映射算法[J].电子与信息学报,2020,42(6):1478-1485.
- [5] 周楠,张平,郑征,等.基于机器学习的电力通信网带宽分配算法[J].电网与清洁能源,2021,37(5):67-73.
- [6] 周兵.基于概率模型的网络切片资源优先度调度仿真[J].计算机仿真,2019,36(9):479-482.
- [7] 郑远鹏,张天魁,朱光宇,等.MEC 系统中面向网络切片的 3C 联合资源分配算法[J].北京邮电大学学报,2021,44(5):41-47.
- [8] HOSSAIN A R, ANSARI N. Priority-based downlink wireless resource provisioning for radio access network slicing[J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2021, 70(9): 9273-9281.
- [9] VILALTA R, MUOZ R, CASELLAS R, et al. Experimental validation of resource allocation in transport network slicing using the ADRENALINE testbed[J]. Photonic network communications, 2020, 40(2): 82-93.
- [10] 唐伦,魏延南,马润琳,等.虚拟化云无线接入网络下基于在线学习的网络切片虚拟资源分配算法[J].电子与信息学报,2019,41(7):1533-1539.
- [11] 尚芳剑,李信,翟迪,等.智能电网中两阶段网络切片资源分配技术[J].计算机应用,2021,41(7):2033-2038.
- [12] 于浩,汪筱巍,王韬,等.基于 SDN 与 NFV 的电力 5G 网络切片差异化资源分配方案[J].电测与表,2021,58(9):89-95.
- [13] 刘议聪,楚俊峰,王燕燕.基于信任关系的 TODIM 群体多属性决策方法[J].计算机工程与应用,2022,58(3):187-194.
- [14] 虞胜杰,熊丽荣,王玲燕.一种融合用户偏好和信任-不信任关系的社会化推荐方法[J].小型微型计算机系统,2020,41(12):2529-2535.
- [15] 唐伦,杨希希,施颖洁,等.无线虚拟网络中基于自回归滑动平均预测的在线自适应虚拟资源分配算法[J].电子与信息学报,2019,41(1):16-23.
- [16] 王晓雷,陈强,刘彩霞.5G 网络切片中基于离散粒子群和 Kruskal 算法的跨域虚拟网络映射[J].计算机应用研究,2019,36(4):1169-1173.
- [17] MURATKAR T S, BHURANE A, SHARMA P K, et al. Physical layer security analysis in ambient backscatter communication with node mobility and imperfect channel estimation[J]. IEEE communications letters: A publication of the IEEE communications society, 2022, 26(1): 27-30.

- [18] 李波, 聂增丽, 畅君元. 嵌入式异构物联网密文数据动态捕获方法[J]. 计算机仿真, 2021, 38(2): 282-286.

Mathematical Model of Differentiated Resource Allocation for Virtual Network Slicing Based on Trust Perception

CAI Jiefeng

(School of Information Management,
Minnan University of Science and Technology, Quanzhou 362700, China)

Abstract: In response to the problems of uneven resource allocation and high resource allocation costs in virtual network slicing, a mathematical model of differentiated resource allocation for virtual network slicing, based on trust perception, is constructed by introducing trust perception security constraints and combining critical communication constraints for differentiated resource allocation business. The objective function is to determine the minimum cost of leasing all business virtual network slices, and this is used to construct a trust perception-based mathematical model for differentiated resource allocation in virtual network slicing. The subgradient algorithm of convex optimization theory is used to solve the construction model, and the final virtual network slice differentiated resource allocation result is obtained. The experimental results show that the virtual network request receiving rate and the physical network mapping income obtained by the mathematical model are high, and meet the total cost target of slice lease. It is proved that the mathematical model can realize the differentiated resource allocation of virtual network slices.

Keywords: virtual network; network slicing; trust perception; differentiated resources

(责任编辑:王新亮)

本 刊 声 明

本刊已许可中国知网(中国学术期刊(光盘版)电子杂志社)、北京万方数据股份有限公司(万方数据电子出版社)、重庆维普资讯有限公司、超星期刊域出版平台等在其各自的系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行及在信息网络传播本刊全文。作者著作权使用费和稿酬(即包括印刷版、光盘版和网络版等各种使用方式的报酬)一并支付。如作者对本声明持有异议,请在投稿时说明。