

基于萤火虫算法的移动边缘计算网络 带宽优化策略

王宏杰, 徐胜超, 陈刚, 杨波, 毛明扬

(广州华商学院 数据科学学院, 广州 511300)

摘要: 由于移动边缘计算网络在边缘位置部署, 在多用户并发的情况下带宽资源优化策略容易出现高计算负荷; 提出基于萤火虫算法的移动边缘计算网络带宽资源优化策略; 在服务器之间数据连续传输的情况下, 确定网络内用户分布情况, 计算网络运行需要消耗的能量, 利用萤火虫算法建立以带宽资源为中心的数学模型, 以移动边缘计算网络的各项参数作为依据, 对数学模型求解, 得到最优解后, 以用户最大收益为目标部署优化策略; 实验结果表明: 提出的基于萤火虫算法中当移动用户数量从 10 个增加到 100 个, 网络平均能耗在 8J 到 13J 之间; 当移动用户数量从 10 个增加到 80 个, 边缘计算能力分别是 4 GHz、8 GHz 两种计算条件下, 平均延迟均在 1 s 以内; 提出的算法在收敛速度和计算性能方面都具有优势, 具有很好的参考价值。

关键词: 萤火虫算法; 边缘计算; 网络带宽; 资源优化; 策略分析

Bandwidth Optimization Strategy of Mobile Edge Computing Network Based on Firefly Algorithm

WANG Hongjie, XU Shengchao, CHEN Gang, YANG Bo, MAO Minyang

(School of Data Science, Guangzhou Huashang College, Guangzhou 511300, China)

Abstract: Because mobile edge computing networks are deployed at the edge, the bandwidth resource optimization strategy is prone to the high computing load in the case of multiple users. In order to solve this problem, a mobile edge computing network bandwidth resource optimization strategy based on Firefly algorithm is proposed. In the case of continuous data transmission between servers, the distribution of users in the network is determined, the energy consumed by the network operation is calculated, the Firefly algorithm is used to establish a mathematical model centered on bandwidth resources, and solve the mathematical model based on various parameters of the mobile edge computing network. After the optimal solution is obtained, the optimization strategy is deployed with the maximum benefit of users as the goal. The experimental results show that when the number of mobile users increases from 10 to 100, the average energy consumption of the Firefly-based algorithm is between 8 J and 13 J. When the number of mobile users increases from 10 to 80, the edge computing capabilities are 4 Ghz and 8 Ghz respectively, the average delay of the edge computing is within 1 s. The proposed algorithm has advantages in the rate of convergence and computational performance. It has a great reference value for mobile edge computation.

Keywords: firefly algorithm; edge calculation; network bandwidth; resource optimization; strategy analysis

0 引言

近些年, 由于逐渐兴起的移动边缘计算模式是发展未来智能网络的关键, 导致网络带宽资源优化问题愈加重要, 大部分优化策略都侧重于满足用户的需求, 但是受到网络资源和计算资源的限制, 在移动边缘计算网络中执行各种任务操作时, 往往需要较长的时间去处理, 这会导致计算任务的延迟^[1-3]。移动边缘计算是一种在边缘侧提供云计算

服务的网络架构, 是应对传统互联网发展瓶颈的解决方案, 它通过在基站侧部署计算节点来实现^[4-5]。然而, 基站侧计算节点数量庞大且部署分散, 同时业务流量呈现出爆发式增长, 导致资源分配问题日益突出。因此, 如何在保证业务质量和用户体验的前提下合理利用边缘计算网络带宽资源成为了关键问题^[6]。

为了解决带宽资源优化问题, 国内外许多学者提出了各种方法来减少数据传输的延迟, 优化移动网络带宽资

收稿日期: 2023-06-29; 修回日期: 2023-08-01。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61772221); 广州华商学院校级导师制科研项目(2023HSDS06)。

作者简介: 王宏杰(1982-), 男, 硕士, 讲师。

徐胜超(1980-), 男, 硕士, 副教授。

陈刚(1973-), 男, 硕士, 副教授。

杨波(1977-), 男, 硕士, 副教授。

引用格式: 王宏杰, 徐胜超, 陈刚, 等. 基于萤火虫算法的移动边缘计算网络带宽优化策略[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(11): 280-285.

源。如文献 [7] 提出空地综合网络中移动边缘计算的部分计算卸载方法, 该方法通过将计算任务卸载到边缘设备上, 减少数据在网络中的传输量, 但需要依赖于边缘设备的可靠性和可用性。文献 [8] 提出基于多用户协同的网络带宽优化策略, 可以根据用户的需求和网络状况, 动态地分配网络带宽, 提高网络的利用率和性能, 但需要进行复杂的网络带宽管理和调度, 增加了系统的复杂度和开销。文献 [9] 提出的在资源受限的移动边缘计算中的动态服务部署策略, 该策略可以利用边缘设备的计算和存储资源, 降低了网络延迟和能耗, 并提高服务的可靠性和安全性。但需要进行复杂的服务管理和调度, 需要实时监测边缘设备的状态和服务请求的需求, 增加了系统的复杂度和开销^[10-12]。

为解决上述方法中存在的问题, 本文提出了一种基于萤火虫算法的带宽资源优化策略来提高系统性能。萤火虫算法是一种基于群聚原理的仿生智能算法, 其基本思想是: 在一群萤火虫中, 每只萤火虫都是个体中的佼佼者, 在群体中发出的信息可以传递给其他的萤火虫, 其他萤火虫也会根据其位置信息做出相应的动作^[13]。每只萤火虫通过这样的方式来使自己不断地积累信息、提高位置^[14]。这样的方式能够有效地提高了优化算法的性能, 将这种技术应用于网络带宽资源优化中, 有利于解决常见的资源优化策略中存在的问题。

1 移动边缘计算网络带宽资源优化

1.1 移动边缘计算的工作机制

移动计算可以更好地满足智能终端设备的计算需求。移动边缘计算是一种新型的计算模式, 它将计算和存储资源从云端转移到了网络边缘节点中, 网络带宽资源优化是至关重要的一个问题, 它可以通过流量分析、数据压缩、数据缓存和流量控制等技术手段, 来减少网络拥塞和阻塞, 提高网络吞吐量和响应速度, 从而提高网络资源利用率和服务质量, 保证用户体验。其具体工作机制如图 1 所示。

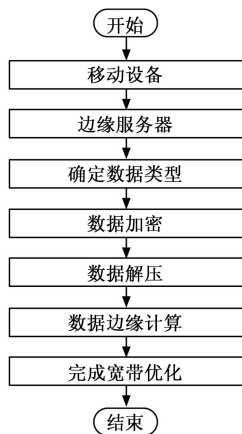


图 1 移动边缘计算的带宽资源优化机制

移动边缘计算相对于传统的非边缘计算具有更多的优势。它可以将数据处理和存储的任务从云端转移到边缘设

备中进行, 减少了数据在网络中的传输量和传输距离, 降低了网络延迟和能耗。同时, 由于边缘设备通常具有更多的计算和存储资源, 可以更好地满足移动设备的计算需求, 提高了数据处理和存储的效率。此外, 移动边缘计算还可以提高移动应用的性能和用户体验, 提高了用户对移动应用的满意度和忠诚度, 并提高了数据的安全性。因此, 在实际应用中, 移动边缘计算可能会更适合那些需要快速、高效、安全和可靠的数据处理和存储的场景。

1.2 移动边缘网络能量消耗模型

移动边缘计算网络具有一定的缓存能力, 在网络带宽资源优化策略研究中, 需要了解总体网络的能耗情况。能耗指的是移动边缘服务器在工作时消耗的能量, 主要包括 CPU、内存和硬盘访问等资源的能量消耗, 这些资源往往可以通过在服务器之间进行数据传输来完成^[15-17]。假设服务器之间的数据传输是连续的, 并且不会随着网络中其他服务器的迁移而发生变化。然后, 将移动边缘计算网络的能耗分为三类: 第一类是基站的能耗消耗, 主要包括静态能耗和数据发送能耗; 第二类是缓存能耗, 网络中缓存内容越多需要消耗的能量越多; 第三类是回传链路数据传输需要消耗的能量, 此类能耗主要针对远程用户, 在满足此类用户需求时, 需要调用远端服务器的数据, 由此会产生大量能耗^[18-20]。

实际工作中, 基站在静态运行状态下能耗非常低, 对网络整体影响较小, 因此可以忽略, 在计算时, 只需要考虑基站发送时产生的能耗^[21]。设移动边缘计算网络发送 1bit 数据的能耗为 W_q (J/bit), 缓存成本为 W_c (J/bit), 在一个缓存周期内网络整体缓存能耗为 NW_c , N 表示文件个数; 移动边缘网络获取远程服务器内容时的能耗为 W_r (J/bit)。考虑理想情况下每个用户每次只发送一个请求, 计算移动边缘计算网络为用户满足一个服务请求时的能耗。当计算每个用户请求时, 将消耗其中一个服务器上所有用户请求所需的功耗 \bar{W}_m 。公式如下:

$$\bar{W}_m = N(P_m W_c + (1 - P_m)(W_q + W_r)) \quad (1)$$

式中, P_m 表示网络内边缘用户的中断概率, 由文件传输的信道增益和信噪比确定^[22]。

在完成网络能耗计算后, 利用萤火虫算法建立移动边缘网络带宽资源优化模型, 确定各项参数, 对其求解得到相应的优化策略。

1.3 带宽资源优化的目标函数的建立

在移动边缘计算网络中, 边缘服务器负载一般较高。因此需要对边缘服务器进行优化管理, 使其负载均衡。在此应用场景下, 可以利用萤火虫算法快速搜索全局最优解的能力来解决负载均衡问题。另一方面, 边缘服务器负载均衡策略需要满足移动用户和边缘计算网络对网络资源的要求。因此, 可以利用萤火虫算法的快速收敛、全局搜索能力强的特点来解决移动边缘计算网络中资源分配的问题。

首先分析移动边缘计算系统的整体架构, 然后通过数学模型建立以带宽资源为中心的优化模型。该模型的数学

表达式如下：

$$f(S) = \min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (c_{ij}x_{ij} + p_{ij}y_{ij}) \bar{W}_m \quad (2)$$

其中： n 表示边缘设备的数量， m 表示任务的数量； c_{ij} 表示将任务 j 分配给边缘设备 i 所需要的计算开销； p_{ij} 表示将任务 j 从边缘设备 i 传输到云端所需要的能耗； x_{ij} 表示任务 j 是否分配给边缘设备 i ，取值为 0 或 1； y_{ij} 表示任务 j 是否从边缘设备 i 传输到云端，取值为 0 或 1。

通过求解该线性规划模型，可以得到最优的带宽资源分配和调度方案，从而实现边缘计算网络的带宽优化。

在上述模型中，网络带宽资源的分配由网络资源的可用性、传输能力和可用带宽决定。在具体问题中，每个边缘服务器有一个最小化平均延迟时间和最大化 QoE (quality of experience) 的目标。基于以上分析，建立基于萤火虫算法的带宽资源优化模型。

为了使算法的寻优效果更好，首先应该选择合适的参数，在对参数进行设置时，应根据问题的特点选择最优参数，具体参数设置如表 1 所示。

表 1 萤火虫群算法的参数设置

参数	参数值
萤火虫群体大小	10~20
步长	[0.9, 1.5]
萤火虫个数	[50, 100]

因为萤火虫的群体大小和步长会影响到算法的搜索效率和寻优精度，而萤火虫的个数和步长则直接影响到算法的全局搜索能力。通过设置不同参数来寻找最优解，可以从一定程度上提高算法的搜索能力，但是这也会使算法的全局寻优能力下降。所以在选择合适的参数后，还应根据问题特性选择适当的参数组合。

基于萤火虫算法的带宽资源优化模型可以用以下公式表示：

$$W = \min f(S) \quad (3)$$

其中： $f(S)$ 表示带宽资源分配的目标函数， S 表示带宽资源分配方案。在完成带宽资源优化模型构建后，对萤火虫在寻优过程中的行为过程进行模拟，萤火虫通过光脉冲寻找目标点，并根据光脉冲释放的信息素强度改变自身的运动行为，从而获取当前位置和目标点之间的最优路径，依据此原理求出带宽资源优化模型的最优解并确定优化策略。

1.4 基于萤火虫算法的模型求解及优化策略

萤火虫算法是一种群体智能算法，是一种模拟萤火虫行为的自然启发算法。萤火虫算法是以萤火虫的光吸引行为为基础产生的，算法中的萤火虫个体表示可行解，萤火虫的亮度则表示目标函数的值，萤火虫个体利用自身的亮度吸引其他萤火虫，亮度低的萤火虫会向亮度高的萤火虫方向移动，并且萤火虫之间的吸引力与距离是一种反比例关系。利用萤火虫算法优化带宽资源分配的过程可以如下描述。

1) 初始化：随机初始化一组萤火虫代表节点，每个节点代表一个网络设备或节点。

2) 亮度计算：根据节点之间的距离和带宽需求等因素计算每个节点的亮度值。亮度值表示节点的吸引力或优势，可以用来评估节点之间的带宽分配效果。

3) 移动和交互：根据亮度值和距离，萤火虫节点会向亮度更高的节点移动，以实现带宽资源的更优分配。节点之间的移动和交互模拟了萤火虫相互吸引的行为。

4) 更新亮度：节点移动后，根据新的带宽分配情况重新计算节点的亮度值，并更新亮度。

5) 迭代优化：重复步骤 3) 和 4)，直到达到停止条件，如达到最大迭代次数或达到带宽分配的收敛条件。

通过使用萤火虫算法优化带宽资源分配，可以实现以下优势。

1) 全局搜索能力：萤火虫算法具有较强的全局搜索能力，能够搜索带宽分配空间中的各种可能解。这有助于找到更优的带宽分配方案，以提高带宽利用效率和网络性能。

2) 自适应性和鲁棒性：萤火虫算法通过模拟萤火虫的行为，具有自适应性和鲁棒性。它可以根据节点之间的亮度值和距离进行调整和优化，适应网络拓扑变化和带宽需求的变化。

3) 并行性：萤火虫算法可以并行处理多个节点的移动和交互行为，从而加快优化过程的速度。这使得它在大规模网络中的带宽资源分配问题上具有较好的可扩展性。

综上所述，利用萤火虫算法优化带宽资源分配可以实现全局搜索、自适应性和并行性等优势，从而提高带宽利用效率和网络性能。

萤火虫个体在位置 r 处的亮度可以表示为：

$$I(r) = I_0 e^{-\gamma r_{ij}} \quad (4)$$

式中， I_0 表示萤火虫自身的初始亮度， γ 表示光吸收率， r_{ij} 表示欧式距离。

两只不同亮度萤火虫之间的吸引力为：

$$\beta_{ij} = \beta_0 e^{-\lambda r_{ij}} \quad (5)$$

式中， β_0 表示两只萤火虫距离为 0 二者之间的吸引力。

萤火虫会向亮度比自己高的萤火虫移动，因此构建萤火虫位置更新公式：

$$u_i = u_i + \beta_{ij}(u_j - u_i) + \alpha \times (rand - 0.5) \quad (6)$$

式中， u_i, u_j 表示萤火虫个体的位置， $\alpha \times (rand - 0.5)$ 表示扰动项， α 表示随机参数。

在寻找网络带宽资源最优解过程如图 2 所示。

萤火虫算法的搜索空间为多维，随机初始化种群后，在每个迭代周期内将随机产生的萤火虫个体加入到种群中。根据移动边缘计算网络内用户的分布情况对萤火虫个体进行编码，完成后在萤火虫个体中随机选择 2 个不同的萤火虫个体并进行二次编码。在每一次迭代过程中，通过两个步骤找到最佳值：第一，根据给定的目标函数；第二，分析移动边缘计算网络中，用户请求的业务类型，以此选择合适的服务类型从而实现带宽资源利用最优。

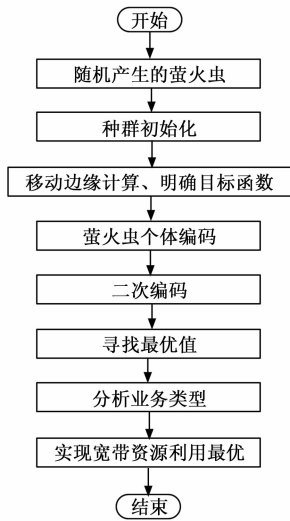


图 2 寻找网络带宽资源最优解过程

设定移动边缘计算系统利益最大化作为网络带宽资源优化策略的核心, 在确定用户的服务类型后, 确定系统的总收益。对于给定的移动边缘计算网络, 用户收益最大时所需带宽资源最小, 优化最佳。

运营商在移动终端业务中, 可以针对不同类型服务类型, 所需带宽资源也不一样。例如, 对于直播业务, 由于用户需要在特定时间内观看直播内容, 故该服务对带宽要求较高; 而对于游戏业务, 由于用户需在特定时间内玩游戏, 因此该服务对带宽要求较低。通过对以上不同业务类型进行分析, 定义业务类型和用户收益之间的关系, 才能更好的实施网络带宽资源优化策略。

2 仿真实验与性能分析

2.1 实验环境及参数设置

在进行边缘计算任务卸载优化的研究中, 通常会使用相关的仿真软件和仿真硬件来进行实验和评估。

1) 仿真软件: 边缘计算任务卸载优化仿真软件包括 NS-3 (network simulator 3)、OMNeT++、MATLAB/Simulink 等这些软件提供了丰富的网络模型、通信协议以及性能评估工具, 可以进行边缘计算任务卸载方案的仿真和性能分析。

2) 仿真硬件: 在边缘计算任务卸载优化的研究中, 可以使用基于容器虚拟化技术的仿真环境, Docker、Kubernetes, 搭建虚拟的边缘计算节点和设备, 模拟真实的边缘计算场景。此外, 还可以使用模拟器或实验室设备来进行仿真实验, 如使用 Mininet 搭建虚拟网络环境、使用 OpenStack 搭建边缘计算环境等。

3) 仿真范围: 边缘计算的仿真范围可以根据研究的具体需求和目标来确定。它可以涵盖边缘节点、移动设备、网络通信、任务卸载策略等方面的仿真。

根据现阶段移动边缘计算网络的应用情况, 使用 MATLAB 软件对移动边缘网络进行仿真, 为了保持其稳定

性, 其网络拓扑结构采用 Noel Communication 拓扑。具体拓扑结构如图 3 所示。

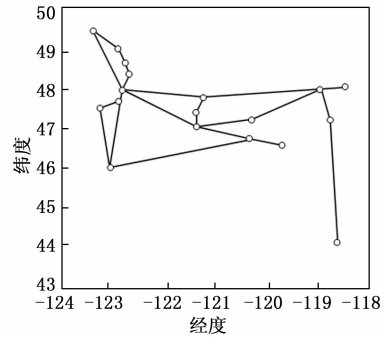


图 3 Noel Communication 拓扑结构

设定整个移动边缘网络内, 用户随机分布, 按照距离将用户分为边缘用户和中心用户, 比例为 2: 1。其他参数设置如表 2 所示。

表 2 移动边缘计算网络实验参数设置

参数	参数值	参数	参数值
带宽	20 MHz	分配给用户的计算能力	10 GHz
传输功率	100 m Watts	CPU 频率总数	1 GHz
背景噪声	-100 dBm	路径损耗因子	4
决策权重	0.5	PRB 复用系数	3
任务数据大小	1 000 kB	无线资源块总个数	100

萤火虫群算法的相关参数设置如表 3 所示。

表 3 萤火虫群算法的相关参数设置

参数	参数值
萤火虫群体大小	10~20
步长	[0.9, 1.5]
萤火虫个数	[50, 100]
衰减系数	[0.5, 0.9]
最大吸引度	[0.1, 1.0]
光强衰减系数	[0.05, 0.1]
火星距离	[0.01, 0.1]
最大迭代次数	[500, 1000]

以上内容为实验研究的一般条件, 根据移动边缘计算网络带宽资源的实际使用情况和优化目的, 从网络带宽资源优化效能和计算延迟两个方面展开实验研究, 并引入两种常见的优化策略作对比, 通过大量对比实验验证本文提出的优化策略的计算性能。

2.2 网络带宽资源优化能耗对比分析

实验中, 引入的优化策略分别是基于简单博弈的带宽资源优化策略和基于多用户协同的带宽资源优化策略, 在准备好的实验环境中, 设置不同的总用户数, 作为实验条件, 增加实验多样性, 利用计算机软件分析各个优化策略下的移动边缘计算网络的效用, 衡量效用的实验指标为网络能耗的平均值。具体实验结果如表 4 所示。

表 4 不同资源优化方法效用实验结果

总用户数	基于简单博弈的带宽资源优化策略	基于多用户协同的带宽资源优化策略	萤火虫群优化策略
10	29J	21J	9J
20	30J	23J	8I
30	33J	28J	9J
40	31J	31J	10J
50	30J	29J	13J
60	29J	22J	12J
70	33J	23J	11J
80	30J	21J	12J
90	32J	34J	17J
100	31J	22J	8J

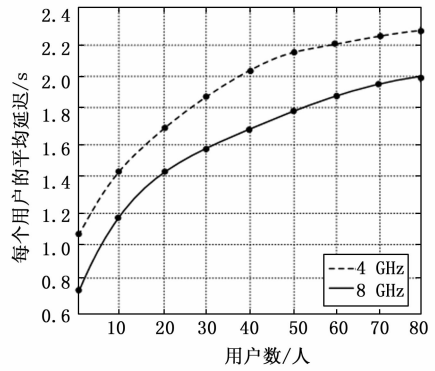
表 4 中显示了在总用户数不同的情况下，各个优化策略下移动边缘计算网络的平均能耗，平均能耗越小说明优化策略效用越好。从表 4 中的实验结果可以看出，移动边缘计算网络内用户数量的增加与平均能耗之间没有明显的线性关系，对比各组数据的大小可知，萤火虫群优化策略可以根据网络状况和用户需求，动态地调整网络带宽资源的分配，使得数据传输更加高效和快速，从而减少了数据在网络中的传输时间，降低了能耗。其次，萤火虫群优化策略可以合理地分配网络带宽资源，避免网络拥塞和资源浪费，提高了网络的利用率和性能，从而降低了网络的延迟和能耗。最后，萤火虫群优化策略可以将计算和存储任务卸载到边缘设备上，充分利用边缘设备的计算和存储资源，减少了云端数据处理的负担，降低了能耗。提出的移动边缘计算网络带宽资源优化策略下平均能耗更低，说明该优化策略效用更好。

2.3 资源优化计算延迟分析

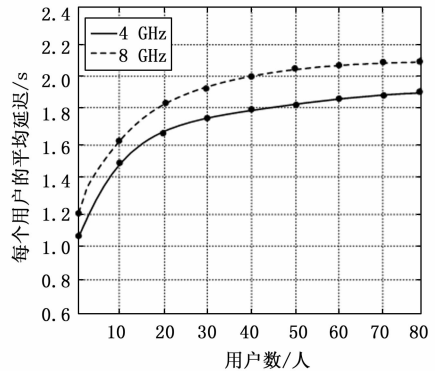
通过上述实验可知，资源优化策略在实际应用上具有良好的效用，考虑到资源优化策略的计算性能涉及的内容比较多，因此还需要从计算延迟角度衡量资源优化策略的实际应用能力。实验前，设置每个用户有 4 个待计算的任务，每个任务之间具有关联性，执行不同的网络带宽资源优化策略，同时设置两种网络边缘计算能力，分别是 4 GHz、8 GHz，利用第三方软件统计每个用户的平均计算延迟。实验结果如图 4 所示。

图 4 中显示了各个资源优化策略在计算条件下的平均延迟，其中图 4 (a) 结果显示，随着用户数的增加，用户的平均延迟不断增加，最高达到了 2.3 s，在 8 GHz 的计算能力下，延迟虽然有所减少，但是依然比较高；图 4 (b) 中显示的实验结果与图 4 (a) 结果类似，平均延迟在两种计算条件下都比较高，相比之下，图 4 (c) 中显示的实验结果平均延迟比较低，在两种计算条件下，平均延迟均在 1 s 以内，说明萤火虫群网络带宽资源优化策略计算更快更稳定。

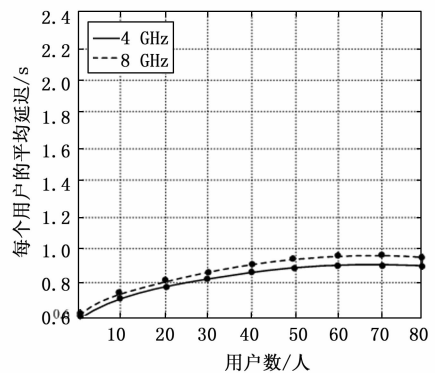
结合网络带宽资源优化效用实验结果综合分析可知，提出的基于萤火虫算法的移动边缘计算网络带宽资源优化



(a) 基于简单博弈的带宽资源优化策略实验结果



(b) 基于多用户协同的带宽资源优化策略实验结果



(c) 萤火虫群网络带宽资源优化策略

图 4 不同优化策略下的资源优化计算延迟结果

策略能耗低、延迟小，整体计算性能优于其他优化策略。该策略可以根据网络状况和用户需求，动态地调整网络带宽资源的分配，提高数据传输效率，降低能耗。其次，该策略可以避免网络拥塞和资源浪费，提高网络利用率和性能，从而降低了网络延迟和能耗。最后，该策略可以充分利用边缘设备的计算和存储资源，减少云端数据处理的负担，进一步降低了能耗。

3 结束语

本文提出了一种基于萤火虫算法的带宽资源优化策略，通过将网络带宽分配给用户并确定用户最大延迟时间，计算网络能耗，然后使用萤火虫算法优化带宽。该方法不仅能够解决多用户系统中的资源分配问题，还可以有效地降

低网络延迟和提高用户满意度。此外, 通过与其他优化策略进行对比, 可以发现本文提出的算法在收敛速度和计算性能方面都具有优势, 本文的研究工作对移动边缘计算系统的性能分析和优化具有一定的指导意义。但是, 随着网络环境的不断变化, 本文提出的策略还有进步的空间, 未来的研究工作可以考虑以下两点:

1) 在未来的研究中, 我们将考虑更多的因素, 例如基于移动边缘计算的物联网服务、基于边缘计算的远程医疗、智能交通和工业物联网等应用场景。同时, 还可以研究基于移动边缘计算系统的边缘云计算服务模式和服务质量保证机制。

2) 在优化过程中如何分析边缘网络中设备对用户响应时间的影响; 如何通过改进萤火虫算法来提高算法在多用户系统中的计算性能; 以及如何提高系统性能以适应用户动态变化时对带宽资源的需求。

参考文献:

[1] YU X Y, QIU L X, SONG J N, et al. Security communication and energy efficiency optimization strategy in UAV-aided edge computing [J]. *Journal on Communications*, 2023, 44 (3): 45-54.

[2] WANG Y G, XI J Q. Privacy preserving resource allocation strategy for edge computing task offloading in internet of vehicles [J]. *Computer Engineering and Design*, 2023, 44 (2): 372-378.

[3] LONG L, LIU Z C, LU Z W, et al. Joint optimization strategy of service cache and resource allocation in mobile edge network [J]. *Journal on Communications*, 2023, 44 (1): 64-74.

[4] ZHANG X J, WU W G, ZHANG C, et al. Energy-efficient Computing Offloading Algorithm for Mobile Edge Computing Network [J]. *Journal of Software*, 2023, 34 (2): 849-867.

[5] YANG T, YANG J. Offloading Decision and Resource Allocation Strategy in Mobile Edge Computing [J]. *Computer Engineering*, 2021, 47 (2): 19-25.

[6] ZHANG X C, REN T S, ZHAO Y, et al. Joint Optimization Method of Energy Consumption and Time Delay for Mobile Edge Computing [J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2022, 51 (5): 737-742.

[7] LI B, LIU W S, FEI Z S. Partial Computation Offloading for Mobile Edge Computing in Space-Air-Ground Integrated Network [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2022, 44 (9): 3091-3098.

[8] ZHANG W Z, YU J H. Task Offloading Strategy in Mobile Edge Computing Based on Cloud-Edge-End Cooperation [J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2023, 60 (2): 371-385.

[9] YUAN J L, MAO H H, WANG N N, et al. Dynamic service deployment strategy in resource constrained mobile edge computing [J]. *Journal of Computer Applications*, 2022, 42 (6):

1662-1667.

- [10] CHEN H W, DENG S G, ZHAO H L, et al. Composite Service Selection and Optimization for Mobile Edge Systems [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2022, 45 (1): 82-97.
- [11] GOU P Z, SUN X C. A Coverage Optimization Method Based on Improved Firefly Algorithm [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2021, 34 (12): 1676-1683.
- [12] HUANG D Q, YU L Y, CHEN J, et al. Research on joint computation offloading and resource allocation strategy for mobile edge computing [J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2021 (6): 88-99.
- [13] LI A, DAI L B, YU L S, et al. Resource Allocation for Unmanned Aerial Vehicle-assisted Mobile Edge Computing to Minimize Weighted Energy Consumption [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2022, 44 (11): 3858-3865.
- [14] LI C Y, LI J B, XU X, et al. Research on Mobile Edge Computing Resource Allocation with Energy Harvesting Device [J]. *Journal of System Simulation*, 2022, 34 (11): 2313-2322.
- [15] LI Q, YUAN F S, CHEN J, et al. Computing offloading mechanism in energy Internet [J]. *Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science)*, 2021, 41 (3): 85-92.
- [16] CHEN Q L, KUANG Z F. Task Offloading and Service Caching Algorithm Based on DDPG in Edge Computing [J]. *Computer Engineering*, 2021, 47 (10): 26-33.
- [17] ZHU L H, ZHU L L. Cloud Computing Task Scheduling Strategy Based on Improved Firefly Algorithm [J]. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition)*, 2021, 46 (3): 7-12.
- [18] CHEN J F, ZHAO Y S, GAO J C, et al. Resource allocation strategy for mobile edge computing system based on hybrid energy harvesting [J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition)*, 2021, 33 (2): 193-201.
- [19] SHU J, LI R R, XIONG T, et al. Link Prediction Based on Learning Automaton and Firefly Algorithm [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2021, 53 (2): 133-140.
- [20] SUN H, CHEN H B. Node redeployment strategy based on firefly algorithm for wireless sensor network [J]. *Journal of Computer Applications*, 2021, 41 (2): 492-497.
- [21] LIU J J, ZOU S H, LU X L. Joint Optimization Scheme of Resource Allocation and Offloading Decision in Mobile Edge Computing [J]. *Journal of Frontiers of Computer Science & Technology*, 2021, 15 (5): 848-858.
- [22] ZHANG H, YANG J B, ZHANG J Y, et al. Multiple-population Firefly Algorithm-based Energy Management Strategy for Vehicle-mounted Fuel Cell DC Microgrid [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41 (3): 833-846.