

引用本文:于阳阳,杜俐洁,何荣希. MEC 增强 FiWi 网络协同卸载感知动态波长带宽分配算法[J]. 光通信技术, 2022, 46(5): 1-10.

MEC 增强 FiWi 网络协同卸载感知动态波长带宽分配算法

于阳阳, 杜俐洁, 何荣希 *

(大连海事大学 信息科学技术学院, 辽宁 大连 116026)

摘要:为满足多接入边缘计算(MEC)增强 FiWi 网络中计算卸载业务和传统宽带业务的差异化需求,基于混合调度和协同卸载机制提出一种协同卸载感知(COA)的动态波长带宽分配(DWBA)算法。该算法利用在线调度回传计算结果,将离线子周期分为计算卸载子周期和宽带业务子周期。光线路终端协同调度波长带宽分配和卸载决策,优先采用水平计算协同卸载方式为超载 MEC 服务器选择卸载目标,将剩余计算需求卸载到远程集中云。仿真结果表明:该算法能显著提高计算业务完成率,减少平均完成时间,降低对传统宽带业务和核心网负载的不利影响。

关键词: 光纤无线接入网; 多接入边缘计算; 动态波长带宽分配; 协同卸载

中图分类号: TN915.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2022)05-0001-10

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.05.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Cooperative offloading-aware dynamic wavelength and bandwidth allocation algorithm for MEC empowered FiWi networks

YU Yangyang, DU Lijie, HE Rongxi*

(College of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian Liaoning 116026, China)

Abstract: To meet the differentiated requirements of computing offloading traffic and traditional broadband traffic in multi-access edge computing (MEC) empowered fiber-wireless access networks, this paper proposes a cooperative offloading-aware (COA) dynamic wavelength and bandwidth allocation (DWBA) algorithm based on hybrid scheduling and cooperative offloading mechanism. The algorithm returns computing results by online scheduling, and divides the offline sub-cycle into the computing offloading sub-cycle and broadband traffic sub-cycle. The optical line terminal collaboratively schedules wavelength and bandwidth allocations and offloading decisions, and selects the offloading target for the overloaded MEC server by horizontal computing cooperative offloading scheme preferentially, and then it offloads the remaining computing requirements to the remote centralized cloud. The simulation results show that the algorithm can improve the completion rate and reduce the completion time of computing tasks, and reduce the adverse impact on traditional broadband traffic and core network load.

Key words: fiber-wireless access networks, multi-access edge computing, dynamic wavelength and bandwidth allocation, cooperative offloading

0 引言

随着增强现实/虚拟现实、物联网等计算密集和时

延敏感型应用的兴起,计算、存储和能效等受限的移动终端越来越无法满足这些应用的需求,为此研究人员提出了移动云计算(MCC)和多接入边缘计算(MEC)^[1-2]方法。MCC可利用远程云数据中心巨大的计算能力来减轻移动终端的计算负担,并降低其能耗。但是,超长的传输距离会大大增加计算时延,同时也会加重核心网络负担。MEC在网络边缘部署服务器以提供计算能力,可为移动终端提供快速、可靠的计算服务,但其计算能力有限^[3]。由于MCC与MEC具有互补性,因此协同计算卸载机制^[4-6]应运而生,以充分利用MEC服务器和远程云数据中心的计算资源来共同

收稿日期:2022-04-24。

基金项目:国家自然科学基金项目(61371091、61801074)资助;大连市科技创新基金项目(2019J11CY015)资助。

作者简介:于阳阳(1996—),男,山东烟台人,硕士研究生,2019年6月获得通信工程专业学士学位,现就读于大连海事大学信息科学技术学院信息与通信工程专业,主要研究方向为光网络技术。

*通信作者:何荣希(1971—),男,博士,教授,主要研究方向为光网络和无线网络技术。



于阳阳,杜俐洁,何荣希:MEC增强FiWi网络协同卸载感知动态波长带宽分配算法

满足移动用户日益增长的计算需求。

光纤无线(FiWi)网络融合了光接入网容量大、可靠性高,无线接入网部署方便、成本低等优势,可以灵活、高效地支持5G网络的新兴应用。文献[7-8]将MEC与FiWi网络有机结合,提出MEC增强FiWi网络架构。这种架构通过在光网络单元-基站(ONU-BS)部署MEC服务器,使计算资源更靠近用户,同时可利用光回程网络来满足移动设备计算卸载业务的高带宽和低时延需求,是一种极具应用前景的支持MCC和MEC方案。

移动用户日益增长的传统宽带业务和计算需求对MEC增强FiWi网络提出更高的带宽要求。时分波分复用无源光网络(TWDM-PON)作为下一代无源光网络(NG-PON2)的一种主要解决方案,结合了时分复用无源光网络(TDM-PON)和波分复用无源光网络(WDM-PON)各自的优势^[9-11]。将TWDM-PON引入MEC增强FiWi网络的后端光回程网络,可采用多波长信道来传输计算卸载业务和传统宽带业务,充足的带宽资源可以减少计算卸载业务的传输时延,使水平计算协同方式更容易为超载计算任务找到满足时延约束的卸载方案。因此,可利用轻载MEC服务器的计算资源满足更多计算需求,相应地可减少采用垂直计算协同方式的计算任务卸载量,既能减少计算任务时延,又能减轻核心网负载压力。

由于TWDM-PON可接入更多的用户,而不同用户的业务需求各异,为此文献[10-11]从带宽资源分配角度讨论了支持区分服务的动态波长带宽分配(DWBA)算法。但是,这些算法只针对网络中仅存的宽带业务进行资源分配,不宜直接用于计算卸载业务与宽带业务共存的MEC增强FiWi网络。文献[12]将资源管理与计算卸载策略相结合,提出一种统一的资源管理与分配架构,但未涉及具体的动态带宽分配(DBA)算法。文献[13]采用DBA算法并利用传输宽带业务后的剩余带宽来传输计算卸载业务,可减少业务冲突,但其仅针对光回程网络为TDM-PON的MEC增强FiWi网络,并不适合需同时考虑波长选择和时隙分配的光回程网络为TWDM-PON的MEC增强FiWi网络。

在MEC增强FiWi网络中,卸载策略与DWBA算法是紧密联系的。在执行卸载决策时,选择不同卸载目标、授权不同计算任务卸载量都会对FiWi网络的上/下行业务带来不同影响,不仅会影响计算任务的时延、完成率等性能,也会对宽带业务和核心网负载造成不同影响。同时,DWBA算法的波长信道和带宽资

源分配结果又会反过来影响卸载目标的选择和计算任务卸载量,因此需要联合考虑卸载策略来设计DWBA算法,以同时支持计算卸载任务和传统宽带业务,满足二者的差异化需求。因此,本文基于在线-离线混合调度与协同计算卸载策略,提出一种协同卸载感知的DWBA(COA-DWBA)算法。

1 网络模型

MEC增强FiWi网络由后端光回程网络和无线前端网络组成^[13],如图1所示。后端回程网络中的光线路终端(OLT)通过分光器与多个光网络单元(ONU)相连。ONU可通过光纤到户为固定(有线)用户提供服务,也可配备蜂窝基站(BS)构成ONU-BS,或配备网络接入点(MPP)构成光网络单元-网络接入点(ONU-MPP)。为了使计算资源更靠近用户,ONU-BS/MPP通过光纤与MEC服务器相连,或者在ONU-BS/MPP配置计算模块行使MEC服务器的计算功能^[13]。为了便于描述,本文将ONU-BS/MPP与MEC服务器的集成体统称为ONU。在无线前端网络,移动用户将宽带业务和需卸载的计算任务上传到其邻近ONU-BS/MPP,无线信道带宽被划分成多个大小相等的正交子信道,每个移动用户分配一个子信道。

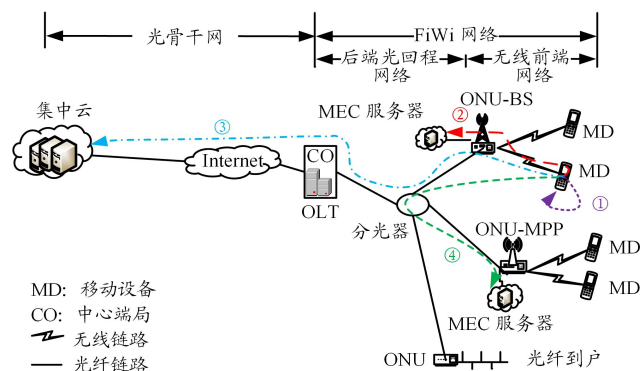


图1 MEC增强FiWi网络架构

为了尽可能满足日趋增长的用户计算需求,改善计算卸载任务的时延性能,COA-DWBA算法采用计算协同卸载策略,即采用移动用户本地、MEC服务器和远程集中云之间的垂直计算协同方式时,还采用多个MEC服务器之间的水平计算协同卸载方式。

在采用计算协同卸载策略的MEC增强FiWi网络中,与 ONU_k 关联的MD的计算任务 A_q 可表示为 $A_q = \{b_q, c_q, T_q^{\max}\}$,其中, q 为任务编号, b_q 为输入数据大小, c_q 为计算该任务所需的CPU数, $T_q^{\max}$ 为该任务最大允

许时延。当移动用户有计算需求时, 将按最大允许时延升序的顺序在处理队列中排序, 并按顺序依次处理计算任务(本地计算)。如果计算任务在本设备的计算处理时间超过其最大允许时延要求, MD 会将该计算任务请求与传统宽带业务请求传输到其关联的 ONU。在每个轮询周期内, ONU 负责收集其所关联的移动用户的计算任务 and 传统宽带业务请求, 并优先利用自身 MEC 模块的计算资源依次处理计算任务(卸载到本地 ONU 计算); 当卸载到该 ONU 的计算任务量超出其计算模块的计算能力时(该 ONU 处于超载情况), ONU 会将超载信息报告给 OLT, OLT 首先通过水平计算协同卸载方式, 为超载 ONU 选择合适的有计算资源剩余的 ONU(该 ONU 处于轻载情况)作为卸载目标(卸载到目标 ONU 计算); 若所有轻载 ONU 均无法完全满足超载 ONU 的计算卸载任务需求, 则 OLT 将尝试利用远程集中云来完成超载 ONU 剩余的计算卸载任务。

综上, MD、本地 ONU_k、远程集中云和目标 ONU_m 均可进行 A_q 计算(如图 1 中①、②、③、④所示), 但 4 种方式时延大不相同。A_q 在本地计算的时延包括等待时延和计算时延两部分。当 A_q 被卸载到本地 ONU_k 计算处理时, 其总时延包括从 MD 到 ONU_k 的传输时延、传播时延, 在本地 MEC 服务器的排队等待时延、计算时延。当 ONU_k 超载时, 需将计算任务 A_q 上传 OLT, 由 OLT 下发到目标 ONU_m 进行计算处理并返回计算结果, 总时延包括 A_q 从 MD 到 ONU_m 的时延, 在 ONU_m 的排队和计算时延以及计算结果回传到 MD 的时延。当所有轻载 ONU 的剩余计算资源无法满足超载 ONU_k 的计算需求时, 需将 A_q 卸载到远程集中云处理, 其总时延包括 A_q 从 MD 经 OLT 到远程集中云的时延、在远程云的排队和计算时延以及计算结果回传到 MD 的时延。

2 算法描述

COA-DWBA 算法采用在线-离线混合调度方式尽可能地减少计算业务时延、提高计算任务完成率, 同时降低对传统宽带业务的吞吐量和时延性能的不利影响。首先, 利用在线调度方式轮询周期开始时的信道空隙回传计算结果, 既可以减少计算结果的回传时延, 又能提高信道利用率; 然后, 将离线子周期分为计算卸载子周期和宽带业务子周期, 优先计算卸载子周期, 使用最早可用波长信道上传计算卸载任务; 最后, 在宽带业务子周期利用剩余带宽资源传输传统宽带业务。

为保证每个计算任务的时延要求, 本文根据超载 ONU_k 所有待卸载计算任务中最大允许时延的最小值, 计算出 ONU_k 将该任务卸载到轻载 ONU 或远程集中云进行计算处理到收到回传计算结果的最大允许时延, 将其作为 ONU_k 中所有待卸载计算任务的最大允许时延 T_{k,max} (ONU_k 上传计算卸载任务到收到回传计算结果的最大允许时间)。

COA-DWBA 算法结合了垂直计算协同和水平计算协同 2 种方式, 充分利用 MEC 服务器和远程集中云的计算资源。首先, 在卸载决策阶段, OLT 按各个超载 ONU_k 的 T_{k,max} 从小到大的顺序进行卸载决策, 并优先采用水平计算协同卸载方式, 按轻载 ONU 集合 C_j 中各个 ONU 到 OLT 的往返时延(RTT)从小到大的顺序依次选择目标 ONU。然后, 通过卸载决策和 DWBA 算法协同调度, 选择满足时延需求下允许卸载任务量最大的轻载 ONU 作为卸载目标。最后, 在满足时延约束条件下, OLT 将超载 ONU_k 剩余的待卸载计算任务上传远程集中云处理。在上述卸载决策基础上, OLT 为每个 ONU 的计算任务和传统宽带业务授权带宽, ONU 个数为 N, ONU 编号为 1, 2, ..., N。

2.1 在线调度

在轮询周期 j(本文算法设定周期)中, 若 ONU_k 为轻载 ONU, OLT 收到 ONU_k 的 Report 帧后, 则将它放入轻载 ONU 集合 C_j 中, 记作 ONU_k^{C_j}, 作为候选卸载目标; 若 ONU_k 需要上传计算结果, 则立即在线授权其计算结果上传所需带宽, 并利用轮询周期开始时的信道空隙开始上传。ONU_k 授权带宽为

$$B_{k,j}^{\text{result}} = R_{k,j}^{\text{result}} \quad (1)$$

其中, R_{k,j}^{result} 为 ONU_k 用于计算结果回传的请求带宽。为了尽可能减少传统宽带业务和计算业务的传输时延, 应充分利用所有波长信道的上行带宽资源。当 ONU_k 在可用波长集合 L (波长总数为 I, 波长编号为 λ₁, λ₂, ..., λ_I) 中任一波长 λ_ω 上传计算结果时, 波长 λ_ω 的最早可用时间为

$$t_{k,j,\omega}^{\text{result}} = t_{j,\text{start}} + \sum_{x=1}^{k-1} \left(\frac{B_{x,j}^{\text{result}}}{R_{\text{up}}} + T_g \right) - \frac{T_{r,k}}{2} + \frac{\min \{ T_{r,y}, \forall \text{ONU}_k \in C_j \}}{2} \quad (2)$$

其中, B_{x,j}^{result} 表示 ONU_x 的授权带宽, T_g 表示相邻 2 个发送时隙之间的保护间隔长度, R_{up} 表示 ONU 与 OLT 之间光纤信道上传传输速率, T_{r,k}、T_{r,y} 分别表示 ONU_k 到 OLT、ONU_y 的往返时延, x 和 y 表示 ONU 编号 (1 ≤ x < k,

于阳阳,杜俐洁,何荣希:MEC 增强 FiWi 网络协同卸载感知动态波长带宽分配算法

$1 \leq y \leq N, \lambda_\omega \in L$), $t_{j,\text{start}}$ 表示轮询周期 j 的开始时间。其中, $t_{j,\text{start}}$ 的计算式如下:

$$t_{j,\text{start}} = \max \left\{ t_{y,j-1,\omega}^{\text{broad}} + \frac{B_{y,j-1}^{\text{broad}} + B_{\text{Report}}}{R_{\text{up}}} + T_g, \forall \text{ ONU}_y \right\} \quad (3)$$

其中, $t_{y,j-1,\omega}^{\text{broad}}$ 表示轮询周期 $j-1$ 中 ONU_y 在波长 λ_ω 上传传统宽带业务的最早可用时间, $B_{y,j-1}^{\text{broad}}$ 表示轮询周期 $j-1$ 中 ONU_y 用于传统宽带业务上传的授权带宽, B_{Report} 表示 R_{Report} 帧大小。

综合考虑 ONU_k 在所有波长上的可用时间, 选择满足 $t_{k,j,\omega}^{\text{result}} = \min \{ t_{k,j,v}^{\text{result}} \}$ 的最早可用波长进行上传, 可求出 ONU_k 计算结果实际上传所用波长为

$$\lambda_{k,j}^{\text{result}} = \lambda_\omega \quad (4)$$

ONU_k 的计算结果实际上传时间 $t_{k,j}^{\text{result}} = t_{k,j,\omega}^{\text{result}}, t_{k,j,\omega}^{\text{result}}$ 表示波长 λ_ω 的最早可用时间。

完成 ONU_k 计算结果的授传带宽、传输波长和时间窗口分配后, OLT 立即向 ONU_k 发送在线 Gate 帧, 进行带宽和传输窗口授权。所有 ONU 的计算结果上传授权结束后, 可以计算出波长集合 L 中任一波长 λ_ω 的在线子周期传输结束时间为

$$t_{j,\omega}^{\text{result}} = t_{m_\omega,j}^{\text{result}} + \frac{B_{w_\omega,j}^{\text{result}}}{R_{\text{up}}} + \delta_{w_\omega,j} \times T_g \quad (5)$$

其中, w_ω 为在线子周期内波长 λ_ω 上最后一个上传计算结果的 ONU 编号, $B_{w_\omega,j}^{\text{result}}$ 表示 ONU_{w_ω} 用于计算结果回传的授权带宽, $\delta_{w_\omega,j}$ 表示轮询周期 j 中 ONU_{w_ω} 是否需回传计算结果的二值变量(其值为 1 时, 表示需上传计算结果; 否则, 不需回传)。

2.2 离线调度

OLT 收到所有 ONU 的 Report 帧后, 将离线子周期分成 2 个子周期分别上传计算卸载任务和传统宽带业务。为保证每个轮询周期带宽分配的公平性, 防止某些重负载 ONU 独占上行信道资源, 在计算结果回传带宽授权结束后, 将轮询周期内每个 ONU 可获得的最大授权带宽限制为

$$B_{k,j} = \frac{\left\{ T_{\text{cycle}} \times l - \sum_{i=1}^N [(\varphi_{i,j} + \delta_{i,j} + 1) \times T_g] \right\} \times R_{\text{up}} - B_j^{\text{result}}}{N} \quad (6)$$

其中, $\delta_{i,j}, \varphi_{i,j}$ 为二值变量, 分别表示轮询周期 j 中 ONU_k 是否需回传计算结果、是否有计算任务卸载, $\delta_{k,j}=1$, 表示需要上传计算结果, $\delta_{k,j}=0$, 则不需回

传; $\varphi_{k,j}=1$, 表示需要上传计算任务, 反之, 则不需要。

T_{cycle} 表示轮询周期长度。 B_j^{result} 表示 OLT 为所有 ONU 的计算结果授权的带宽总量, 其计算式为

$$B_j^{\text{result}} = \sum_{i=1}^N (B_{i,j}^{\text{result}} + \delta_{i,j} \times T_g \times R_{\text{up}}) \quad (7)$$

为保证计算任务和传统宽带业务带宽分配的公平性, ONU_k 的待卸载部分计算任务预授权的上传带宽为

$$B_{k,j}^{\text{task}} = \min \left\{ \frac{R_{k,j}^{\text{task}} \times B_{k,j}^{\text{task}}}{R_{k,j}^{\text{task}} + R_{k,j}^{\text{broad}}}, R_{k,j}^{\text{task}} \right\} \quad (8)$$

其中, $R_{k,j}^{\text{task}}$ 表示 ONU_k 用于待卸载计算任务上传的请求带宽, $B_{k,j}$ 表示 ONU_k 可获得的最大授权带宽, $R_{k,j}^{\text{broad}}$ 表示 ONU_k 用于传统宽带业务上传的请求带宽。

根据式(8)可得出预授权卸载的部分计算任务所需的计算资源为

$$C_{k,j}^{\text{task}} = B_{k,j}^{\text{task}} \times \beta \quad (9)$$

其中, β 为计算处理单位 bit 计算任务所需中央处理单元(CPU)周期数。

完成计算任务预授权后, OLT 利用剩余带宽为传统宽带业务预分配上行传输带宽, 可求出 ONU_k 预授权的传统业务上行传输带宽为

$$B_{k,j}^{\text{broad}} = \min \{ R_{k,j}^{\text{broad}}, B_{k,j} - B_{k,j}^{\text{task}} \} \quad (10)$$

在预授权的基础上, 将进行卸载决策与 DWBA 算法协同调度。由于远程集中云计算资源充足但时延较大, MEC 服务器时延较小但剩余计算资源有限, 因此为了尽可能满足超载 ONU_k 的计算卸载业务的时延需求, 对所有 $R_{k,j}^{\text{task}} > 0$ 的超载 ONU , 按照其 $T_{k,\text{max}}$ 从小到大的顺序进行卸载决策。另外, 为了更好利用轻载 ONU 的剩余计算资源, 减少业务往返传输时延影响导致的资源浪费, 将 C_j 中轻载 ONU 按其 RTT 从小到大顺序排序, 然后为超载 ONU_k 依次选出所有满足其卸载时延要求的目标 ONU 。若不存在, 则将满足时延需求的计算任务卸载到远程集中云; 如果存在多个可用的目标 ONU , 则挑选能使 ONU_k 可卸载的计算任务量最大的轻载 ONU 作为最终的卸载目标, 并将 ONU_k 剩余的待卸载计算任务中满足时延需求的部分卸载到远程集中云, 利用远程集中云巨大的计算能力充分满足超载 ONU_k 的计算需求。本文以超载 ONU_k 为例介绍卸载决策过程。

2.2.1 水平计算协同卸载

当 OLT 为 ONU_k 的计算任务尝试选择 C_j 中轻载 $ONU_m^{C_j}$ 后,由于卸载决策和业务往返传输的时延影响,卸载任务实际到达 $ONU_m^{C_j}$ 的最早时间为

$$t_{k,j,m} = \min\{t_{j,w}\} + \frac{\sum_{s=1}^{k-1} \left(\frac{B_{x,j}^{\text{task}} + T_g \times \varphi_{x,j}}{R_{\text{up}}} \right)}{l} + \frac{B_{k,j}^{\text{task}}}{R_{\text{up}}} + \frac{B_{k,j}^{\text{task}}}{R_{\text{down}}} + \frac{\varphi_{w_o,j} \times T_{r,w_o} + T_{r,m}}{2} \quad (11)$$

其中, $B_{x,j}^{\text{task}}$ 表示轮询周期 j 中 ONU_x 用于待卸载计算任务上传的授权带宽; $\varphi_{w_o,j}$ 表示表示轮询周期 j 中 ONU_{w_o} 是否有计算任务卸载的二值变量,若 $\varphi_{w_o,j}=1$,表示需要上传计算任务,反之,则不需要上传计算任务; T_{r,w_o} 和 $T_{r,m}$ 分别表示 ONU_{w_o} 和 ONU_m 到 OLT 的 RTT 值。

根据 ONU_k 的计算任务到达轻载 $ONU_m^{C_j}$ 的时间,可计算出轻载 $ONU_m^{C_j}$ 实际可用于 ONU_k 卸载计算任务的计算资源为

$$C_{m,j,k} = \begin{cases} C_{m,j} - (t_{k,j,m}^{\text{end}} - t_{m,j}^{\text{end}}) \times f_{\text{MEC}}, & t_{m,j}^{\text{end}} < t_{k,j,m} \\ C_{m,j}, & t_{m,j}^{\text{end}} \geq t_{k,j,m} \end{cases} \quad (12)$$

其中, $t_{m,j}^{\text{end}}$ 表示 ONU_k 的计算模块计算结束时间, f_{MEC} 表示 ONU 计算模块的计算能力。

根据轻载 $ONU_m^{C_j}$ 的实际资源可用情况,可得出 ONU_k 可以卸载到轻载 $ONU_m^{C_j}$ 的计算任务带宽为

$$B_{k,j,m}^{\text{task}} = \min\left\{B_{k,j}^{\text{task}}, \frac{C_{m,j,k}}{\beta}\right\} \quad (13)$$

超载 ONU_k 卸载到轻载 $ONU_m^{C_j}$ 的计算任务的总时延为

$$T_{k,j,m}^{\text{task}} = \frac{\sum_{s=k}^N \left(\frac{B_{x,j}^{\text{task}}}{R_{\text{up}}} + T_g \times \varphi_{x,j} \right)}{l} + \frac{\sum_{s=1}^N \left(\frac{B_{x,j}^{\text{broad}} + B_{\text{Report}}}{R_{\text{up}}} + T_g \right)}{l} + \frac{T_{r,k}}{2} + T_{k,j,m}^{\text{result}} \quad (14)$$

其中, $T_{k,j,m}^{\text{result}}$ 表示卸载到轻载 $ONU_m^{C_j}$ 的部分计算任务的计算结果回传时延最大值,其计算式为

$$T_{k,j,m}^{\text{result}} = \frac{\sum_{s=1}^{k-1} \left(\frac{C_{x,j}}{\beta \times R_{\text{up}}} + \delta_{x,j} \times T_g \right)}{l} + \frac{B_{k,j,m}^{\text{task}} \times \alpha}{R_{\text{up}}} + \frac{B_{k,j,m}^{\text{task}} \times \alpha}{R_{\text{down}}} + \frac{T_{r,k}}{2} + \frac{\min\{T_{r,y}, \forall ONU_m^{C_j} \in C_j\}}{2} \quad (15)$$

其中, α 为计算结果和计算任务的数据长度之比。根据式(11)~式(13)计算超载 ONU_k 的卸载任务到达轻载 $ONU_m^{C_j}$ 的时间和轻载 $ONU_m^{C_j}$ 本地任务队列计算结束时间,可计算出轻载 $ONU_m^{C_j}$ 的剩余可用计算资源。利用该部分计算资源可在本轮询周期完成计算卸载任务的处理,并在下一轮询周期回传计算结果,因此式(15)所得总时延包括了超载 ONU_k 卸载到轻载 $ONU_m^{C_j}$ 的计算任务的传输时延、传播时延、等待时延、计算时延和计算结果的回传时延。

若 $T_{k,j,m}^{\text{task}} \leq T_{k,\max}$, 则将轻载 $ONU_m^{C_j}$ 放入 ONU_k 的卸载目标集合 $D_{k,j}$ 中, 然后从集合 C_j 中继续为超载 ONU_k 选择下一个轻载 ONU 。重复上述过程,直到尝试完集合 C_j 的所有轻载 ONU 。若 $T_{k,j,m}^{\text{task}} > T_{k,\max}$, 则集合 C_j 中所有轻载 ONU 都不能作为 ONU_k 的卸载目标。

若 $D_{k,j} \neq \emptyset$, 则从中选择允许 ONU_k 卸载计算任务带宽最大的轻载 $ONU_m^{C_j}$, 作为 ONU_k 在轮询周期 j 中的卸载目标。于是,可求出 ONU_k 采用水平计算协同卸载方式卸载到轻载 ONU 的计算任务实际带宽为

$$B_{k,j,\text{MEC}}^{\text{task}} = \max\{B_{k,j,m}^{\text{task}}\}, ONU_m^{C_j} \in D_{k,j} \quad (16)$$

若 $D_{k,j} = \emptyset$, 则 C_j 中所有轻载 ONU 均无法满足超载 ONU_k 的计算卸载需求,此时 ONU_k 采用水平计算协同卸载方式卸载到轻载 ONU 的计算任务实际带宽 $B_{k,j,\text{MEC}}^{\text{task}} = 0$ 。

完成超载 ONU_k 的水平计算协同卸载决策后,分别根据式(17)~式(18)更新 C_j 中轻载 $ONU_m^{C_j}$ 的剩余计算资源和计算模块的计算处理结束时间。

$$C_{m,j} = C_{m,j} - B_{k,j,\text{MEC}}^{\text{task}} \times \beta \quad (17)$$

$$t_{m,j}^{\text{end}} = \max\{t_{k,j,m}^{\text{end}}, t_{m,j}^{\text{end}}\} + \frac{B_{k,j,\text{MEC}}^{\text{task}} \times \beta}{f_{\text{MEC}}} \quad (18)$$

2.2.2 垂直计算协同卸载

OLT 为超载 ONU_k 采用水平计算协同卸载决策后,如果 $B_{k,j,\text{MEC}}^{\text{task}} < B_{k,j}^{\text{task}}$, 则表示 C_j 中所有轻载 ONU 未能完全满足超载 ONU_k 的计算需求, ONU_k 仍有部分授权传输的待卸载计算任务需要选择卸载目标进行计算处理,此时 OLT 为 ONU_k 的剩余卸载计算任务尝试选择远程集中云作为卸载目标。 ONU_k 剩余卸载计算任务的带宽为

$$B_{k,j}^{\text{task}} = B_{k,j}^{\text{task}} - B_{k,j,\text{MEC}}^{\text{task}} \quad (19)$$

于阳阳, 杜俐洁, 何荣希: MEC 增强 FiWi 网络协同卸载感知动态波长带宽分配算法

ONU_k 将计算任务卸载到远程集中云的总时延为

$$T_{k,j,RC}^{\text{task}} = \frac{B_{k,j}^{\text{task}}}{R_{\text{up}}} + \frac{B_{k,j}^{\text{task}}}{R_{\text{RC}}} + \frac{B_{k,j}^{\text{task}} \times \alpha}{R_{\text{down}}} + \frac{B_{k,j}^{\text{task}} \times \alpha}{R_{\text{down}}} + \frac{\sum_{i=1}^{Q_k} (c_i) + B_{k,j}^{\text{task}} \times \beta}{f_{\text{RC}}} + T_{r,k} + T_{r,RC} \quad (20)$$

其中, $R_{\text{up}}^{\text{RC}}$ 、 $R_{\text{down}}^{\text{RC}}$ 分别为 OLT 到远程集中云的上行、下行光纤信道速率, Q_k 为 ONU_k 的计算任务到达远程集中云时远程集中云队列中计算任务数量, c_i 为计算任务 A_i 所需的 CPU 数, f_{RC} 表示 ONU 远程集中云的计算能力, $T_{r,RC}$ 表示远程集中云到 OLT 的往返时延。

更新最大允许时延 $T_{k,\max}$ 为 ONU_k 剩余部分待卸载计算任务的 T_i^{task} 最小值。若 $T_{k,j,RC}^{\text{task}} \leq T_{k,\max}$, 则 OLT 可将超载 ONU_k 剩余的卸载计算任务卸载到远程集中云处理, 卸载到远程集中云的计算任务带宽 $B_{k,j,RC}^{\text{task}} = B_{k,j}^{\text{task}}$ 。

若 $T_{k,j,RC}^{\text{task}} > T_{k,\max}$, 则无法通过远程集中云满足超载 ONU_k 的剩余计算需求, 此时 OLT 授权超载 ONU_k 卸载到远程集中云的计算任务带宽 $B_{k,j,RC}^{\text{task}} = 0$ 。

完成 ONU_k 的卸载决策过程之后, 可以计算出超载 ONU_k 待卸载计算任务总的授权带宽为

$$B_{k,j}^{\text{task}} = B_{k,j,MEC}^{\text{task}} + B_{k,j,RC}^{\text{task}} \quad (21)$$

完成超载 ONU_k 的卸载策略制定和上传带宽授权后, OLT 重复上述过程, 继续为超载 ONU_{k+1} 制定卸载决策, 直到轮询周期 j 中所有超载 ONU 的卸载决策过程结束, 然后 OLT 利用剩余带宽为所有 ONU 的传统宽带业务进行带宽授权。

由于网络流量的突发性, 每个轮询周期中往往存在重负载 ONU 和轻负载 ONU。为了充分利用轻负载 ONU 的剩余带宽资源, 提高信道带宽利用率, 可将轻负载 ONU 的剩余带宽重新分配给重负载 ONU, 计算出所有轻负载 ONU 总的剩余带宽为

$$B_j^{\text{excess}} = \sum_{k=1}^N \max \left\{ \left(B_{k,j}^{\text{broad}} - R_{k,j}^{\text{broad}} \right), 0 \right\} \quad (22)$$

所有重负载 ONU 的传统宽带业务总的额外带宽请求为

$$R_j^{\text{total}} = \sum_{k=1}^N \max \left\{ \left(R_{k,j}^{\text{broad}} - B_{k,j}^{\text{broad}} \right), 0 \right\} \quad (23)$$

根据轻负载 ONU 的剩余带宽总量和重负载 ONU 的额外带宽请求总量, 可计算出 ONU_k 的传统宽带业务实际授权上传带宽为

$$B_{k,j}^{\text{broad}} = \begin{cases} R_{k,j}^{\text{broad}}, B_{k,j}^{\text{broad}} \geq R_{k,j}^{\text{broad}} \\ \min \left\{ B_{k,j}^{\text{broad}} + \frac{B_j^{\text{excess}} \times (R_{k,j}^{\text{broad}} - B_{k,j}^{\text{broad}})}{R_j^{\text{total}}}, B_{k,j}^{\text{broad}} \right\}, B_{k,j}^{\text{broad}} < R_{k,j}^{\text{broad}} \end{cases} \quad (24)$$

完成带宽授权过程后, OLT 为所有超载 ONU 的计算任务分别分配上行传输波长和窗口, 计算 ONU_k 在波长集合 L 中任一波长 λ_ω 传输计算任务时波长 λ_ω 的最早可用时间为

$$t_{k,j,\omega}^{\text{task}'} = t_{j,\omega} + \sum_{x=1}^{k-1} \left(\frac{B_{x,j}^{\text{task}}}{R_{\text{up}}} + T_g \right) + \frac{\delta_{w_\omega,j} \times T_{r,w_\omega} - T_{r,k}}{2} \quad (25)$$

根据离线 Gate 帧的发送时间可以计算出 ONU_k 的计算任务最早可上传时间为

$$t_{k,j,\omega}^{\text{task}''} = t_{j,\text{start}} + \frac{B_{\text{Gate}}}{R_{\text{down}}} + \frac{T_{r,k}}{2} \quad (26)$$

其中, B_{Gate} 表示 Gate 帧的大小, R_{down} 表示 ONU 与 OLT 之间光纤信道下行传输速率。

综合考虑波长最早可用时间、最早可上传时间, 可计算出 ONU_k 的计算任务在波长 λ_ω 的最早可上传时间为

$$t_{k,j,\omega}^{\text{task}} = \max \left\{ t_{k,j,\omega}^{\text{task}'}, t_{k,j,\omega}^{\text{task}''} \right\} \quad (27)$$

从波长集合 L 中选择满足 $t_{k,j,\omega}^{\text{task}} = \min \left\{ t_{k,j,v}^{\text{task}} \right\}$ 的最早可用波长进行计算任务的上传, 即 ONU_k 的计算任务上传实际所用波长为

$$\lambda_{k,j}^{\text{task}} = \lambda_\omega \quad (28)$$

用于 ONU_k 计算任务上传的实际时间 $t_{k,j}^{\text{task}} = t_{k,j,\omega}^{\text{task}}$ 。

完成所有超载 ONU 的计算任务上传窗口分配后, OLT 为所有 ONU 的传统宽带业务分配上行传输波长和窗口, 求出轮询周期 j 中 ONU_k 选择波长 λ_ω 上传传统宽带业务时波长 λ_ω 的最早可用时间为

$$t_{k,j,\omega}^{\text{task}} = t_{j,\omega} + \sum_{x=1}^N \left(\frac{B_{x,j}^{\text{task}}}{R_{\text{up}}} + \varphi_{x,j} \times T_g \right) + \sum_{x=1}^{k-1} \left(\frac{B_{x,j}^{\text{broad}} + B_{\text{Report}}}{R_{\text{up}}} + T_g \right) + \frac{\varphi_{n_\omega,j} \times T_{r,n_\omega} - T_{r,k}}{2} \quad (29)$$

其中, $B_{x,j}^{\text{broad}}$ 表示轮询周期 j 中 ONU_x 用于传统宽带业务上传的授权带宽, n_ω 为离线计算卸载子周期最后一个在波长 λ_ω 上传计算任务的 ONU 编号, $\varphi_{n_\omega,j}$ 表示表示轮询周期 j 中 ONU_{n_ω} 是否有计算任务卸载的二值变量 ($\varphi_{n_\omega,j}=1$, 表示需要上传计算任务; 反之, 则不需要上传计算任务)。

OLT 从波长集合 L 中选择满足 $t_{k,j,\omega}^{\text{broad}} = \min \left\{ t_{k,j,v}^{\text{broad}} \right\}$ 的

最早可用波长为传统宽带业务授权上传带宽,即 ONU_k 传统宽带业务上传实际所用波长为

$$\lambda_{k,j}^{\text{broad}} = \lambda_{\omega} \quad (30)$$

ONU_k 传统宽带业务的实际上传时间 $t_{k,j}^{\text{broad}} = t_{k,j,\omega}^{\text{broad}}$ 。

完成轮询周期 j 中卸载策略制定、计算卸载任务和传统宽带业务的传输波长、带宽以及窗口分配后,OLT 向 ONU 发送离线 Gate 帧进行带宽授权, ONU 收到 Gate 帧后依据授权分别在计算卸载子周期和宽带业务子周期上传计算卸载业务和传统宽带业务,传输完毕则进入下一轮询周期 $j+1$ 。

3 仿真及数据分析

3.1 仿真环境及参数设置

本文利用 OPNET 仿真软件搭建 MEC 增强 FiWi 网络平台,对 COA-DWBA 算法进行仿真评测,并与集中云感知 DBA(C-DBA)^[12]、计算任务优先 DBA(CTP-DBA) 及集中卸载 DBA(OWC-DBA)^[13] 3 种基准算法进行对比。仿真时将 C-DBA、CTP-DBA 及 OWC-DBA 3 种基准算法扩展为支持多波长信道,分别用 C-DWBA、CTP-DWBA 及 OWC-DWBA 3 种算法表示,其波长调度遵循最早可用准则。其中,C-DWBA 算法仅利用集中云完成卸载的计算任务,而且 OLT 不区分计算卸载业务和传统宽带业务,统一进行带宽授权。OWC-DWBA 算法仅将计算任务卸载到 MEC 服务器处理,该算法优先为传统宽带业务授权带宽,然后利用上传宽带业务后的剩余带宽传输卸载的计算任务。CTP-DBA 算法仅考虑将计算任务卸载到 MEC 服务器,为了与 COA-DBA 算法进

行公平对比,仿真中将远程集中云卸载策略也引入 CTP-DWBA 算法。具体而言,CTP-DWBA 算法将每个超载 ONU_k 的待卸载计算任务作为一个整体,根据所有计算任务的最小 T_i^{max} 得出该超载 ONU_k 的最大允许时延 $T_{k,\text{max}}$,为每个超载 ONU 从轻载 MEC 服务器和远程集中云中选择满足时延约束下计算卸载量最大的轻载 MEC 服务器作为卸载目标,而且 OLT 在分配带宽时优先满足计算任务的带宽需求,然后利用剩余带宽传输宽带业务。仿真参数设置如表 1 所示。

3.2 仿真内容与数据分析

仿真评测指标包括计算任务完成率、计算任务平均完成时间、宽带业务吞吐量、宽带业务端到端平均时延以及远程集中云计算任务吞吐量。计算任务完成率定义为所有已完成计算处理的计算任务数据总比特数与所有用户产生的计算任务总比特数的比值。计算任务平均完成时间定义为所有已完成计算任务(通

表 1 仿真参数值

仿真参数	值
仿真拓扑组成	1 个 OLT、1 个光分路/合路器和 64 个 ONU-BS/MPP
OLT 和 ONU 之间上/下行采用 10 Gb/s 波长信道/对	4
ONU 与 OLT 间的距离/km	在 30~50 随机分布
集中云服务器与 OLT 的距离/km	1000
集中云服务器与 OLT 之间上/下行采用 10 Gb/s 的波长信道/对	1
每个 ONU-BS/MPP 的覆盖范围/m	100
每个 ONU-BS/MPP 可提供服务的用户设备数/个	200
最大轮询周期 $T_{\text{cycle}}/\text{ms}$	2
保护时隙 $T_g/\mu\text{s}$	5
无线信道最大带宽 $B/(\text{Mb}\cdot\text{s}^{-1})$	20
用户设备发射功率/mW	100
ONU-BS/MPP 发射功率/W	80
噪声功率/dBm	-100
路径损耗/dB	$140.7+36.7\lg d$
阴影衰落标准差/dB	8
传统宽带业务数据分组长度/bytes	在 64~1518 均匀分布
传统宽带业务的相对网络负载	1
用户设备计算任务的产生	服从平均生成率为 λ 的泊松过程
每个用户设备平均每秒钟产生的计算任务数/个	λ
计算任务的数据分组长度/bytes	在 2000~18 000 均匀分布
最大允许时延/s	在 0.1~1 均匀分布
计算结果与计算任务的数据长度比率 α	100
集中云服务器计算速率/ $(\text{Gcycles}\cdot\text{s}^{-1})$	1000
MEC 服务器的计算速率/ $(\text{Gcycles}\cdot\text{s}^{-1})$	10
移动设备的计算速率/ $(\text{Gcycles}\cdot\text{s}^{-1})$	在集合 {0.2, 0.32, 0.4} 中随机分配
计算任务所需的计算资源 $c/(\text{cycles}\cdot\text{bit}^{-1})$	$c=\beta m_i$

注: d 为用户设备与 ONU-BS/MPP 之间的实际距离, β 在 {1000, 3000, 5000} cycles/bit 中随机分配, 传统宽带业务数据分组产生服从 H 参数为 0.8 的 Pareto 分布。

于阳阳,杜俐洁,何荣希:MEC增强FiWi网络协同卸载感知动态波长带宽分配算法

过本地计算或卸载计算完成)从其产生到计算结果返回用户所需时间的平均值。宽带业务吞吐量定义为OLT每秒收到所有ONU上传的传统宽带业务数据总比特数。宽带业务端到端平均时延是指传统宽带业务数据分组从到达ONU开始直至被OLT接收所经历时间的平均值。集中云计算任务吞吐量定义为远程集中云每秒收到所有ONU上传的计算任务数据总比特数。

4种算法在不同计算任务平均生成率下的计算任务完成率性能如图2所示。可以看出,4种算法的计算任务完成率随着计算任务平均生成率增加而下降。这是因为随着计算任务增多,网络中的计算资源越来越少,无法满足所有计算任务的计算需求,因此4种算法的计算任务完成率逐渐降低。COA-DWBA算法优先选择时延约束下卸载计算任务量最多的轻载ONU作为卸载目标,然后将超载ONU剩余的计算卸载需求中满足时延约束的部分卸载到远程集中云处理,充分利用了MEC服务器和远程集中云的计算资源,因此计算任务完成率性能最好。CTP-DWBA算法将每个超载ONU_k的待卸载计算任务作为一个整体,根据所有计算任务的最小 $T_i^{\max}$ 得出超载ONU_k的最大允许时延 $T_{k,\max}$ 。由于到远程集中云的传播时延较大,容易导致超载计算任务从ONU_k卸载到远程集中云的总时延大于 $T_{k,\max}$,致使较多超载ONU的计算卸载任务只能选择轻载ONU作为卸载目标,而MEC服务器的计算资源有限,能满足的计算需求较少,因此其计算任务完成率性能不及COA-DWBA算法。OWC-DWBA算法使用传输传统宽带业务后的剩余带宽传输卸载计算任务,超载ONU可上传的卸载计算任务量较少,因此其计算任务完成率较低,且随计算任务平均生成率上升而下降很快,性能不及前2种算法。C-DWBA算法将全部超载的计算任务卸载到远程集中云,超长的

传输距离和传统宽带业务的存在,使得可卸载计算任务量有限,因此其计算任务完成率性能最差。

4种算法在不同计算任务平均生成率下的计算任务平均完成时间性能如图3所示。可以看出,4种算法的计算任务平均完成时间随计算任务平均生成率的增加而增加。这是因为随着计算任务增加,本地ONU的计算资源消耗越来越多,导致更多的计算任务需卸载到轻载ONU及远程集中云中心,额外增加了卸载任务传输时延和排队等待处理时延,增加了任务平均完成时间。COA-DWBA算法基于水平计算协同卸载和垂直计算协同卸载机制,将卸载决策与波长选择及带宽分配有机结合,能充分利用MEC服务器和远程集中云的计算资源,可以更多地满足用户的计算需求,有利于减少超载ONU队列中计算任务的堆积,减少了计算任务的等待时延,因此计算任务平均完成时间最短。由于CTP-DWBA算法的计算任务完成率不及COA-DWBA算法,将导致更多计算任务得不到及时处理,增加了排队时延,因此其计算任务平均完成时间性能不及COA-DWBA算法。OWC-DWBA算法可卸载的任务量很少,使得超载ONU队列中计算任务大量堆积,产生很长的等待时延,因此计算任务平均完成时间性能不及CTP-DWBA算法,而且随计算任务的增加下降很快。C-DWBA算法将全部计算任务卸载到远程集中云中心,超长的传输距离和传统宽带业务的存在,使得传输和等待时延增加,因此其计算任务平均完成时间性能最差。

4种算法在不同计算任务平均生成率下的宽带业务吞吐量和端到端时延性能对比情况分别如图4和图5所示。由于OWC-DWBA算法优先满足传统宽带业务的带宽需求,然后利用剩余的带宽和窗口传输计算卸载任务,计算任务平均生成率的增加对宽带业务

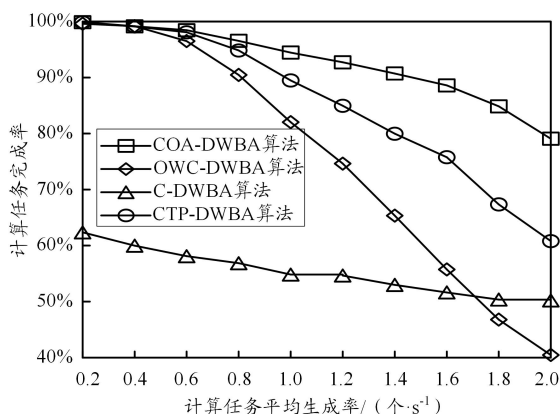


图2 不同算法的计算任务完成率

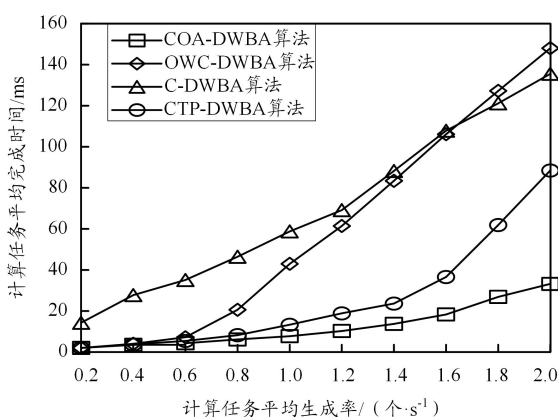


图3 不同算法的计算任务平均完成时间

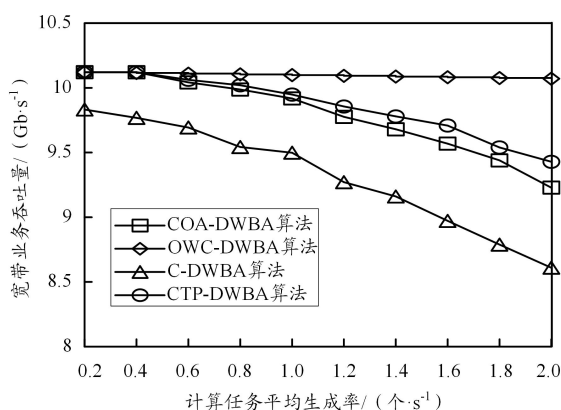


图4 不同算法的宽带业务吞吐量

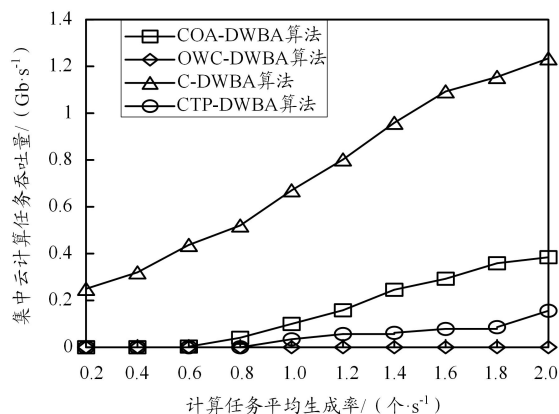


图6 不同算法的集中云计算任务吞吐量

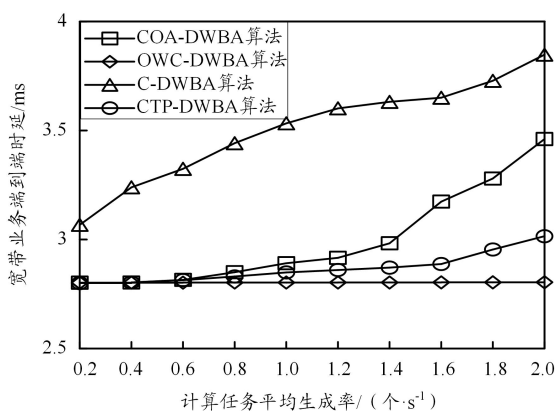


图5 不同算法的宽带业务端到端时延

的吞吐量和端到端时延影响不大。而随着计算任务平均生成率增加,其它3种算法的宽带业务吞吐量和端到端时延性能均有不同程度下降。CTP-DWBA算法和COA-DWBA算法为满足计算任务的时延需求,优先为计算任务分配带宽,随着计算任务的增加计算卸载量随着增加,因此2种算法的宽带业务吞吐量和端到端时延性能随着下降。但是,前者的计算任务卸载量相对较少,因此对传统宽带业务的影响较小,而后者在优先利用水平计算协同方式的同时,将剩余部分计算任务卸载到远程集中云,因此计算任务卸载量更大,对传统宽带业务的影响也较大,其宽带业务吞吐量和端到端时延性能不如CTP-DWBA算法。C-DWBA算法将全部计算任务卸载到远程集中云,且优先满足计算任务的传输,因此对传统宽带业务影响最大,宽带业务吞吐量和端到端时延性能最差。

4种算法在不同计算任务平均生成率下的集中云计算任务吞吐量性能对比情况如图6所示。可以看出,由于OWC-DWBA算法仅将计算任务卸载到MEC服务器处理,因此其集中云计算任务吞吐量始终为0。

而随着计算任务平均生成率增加,其它3种算法的集中云计算任务吞吐量均有不同程度增加。C-DWBA算法将全部计算任务卸载到远程集中云中心处理,因此其集中云计算任务吞吐量最大。由于时延约束限制,CTP-DWBA算法中较多超载ONU的计算卸载任务只能选择轻载ONU作为卸载目标,因此集中云计算任务吞吐量较低。COA-DWBA算法优先选择水平计算协同方式进行卸载处理,然后采用垂直计算协同方式处理剩余的满足时延约束的计算任务,可以大大增加计算任务完成率,因此其集中云计算任务吞吐量略高于CTP-DWBA算法。

4 结束语

本文针对MEC增强FiWi网络提出COA-DWBA算法,该算法采用混合调度方式,分别通过在线调度回传计算结果,离线调度优先在计算卸载子周期传输计算卸载任务,有利于降低计算卸载业务的时延。在卸载决策阶段,OLT按超载ONU计算任务的最大允许时延从小到大的顺序进行卸载决策。为了减轻核心网的负载压力,本文优先考虑水平计算协同方式完成计算卸载业务,并按轻载ONU集合中各ONU的RTT从小到大顺序选择目标ONU,以充分利用MEC服务器的计算资源。通过卸载决策和DWBA算法的协同调度,选择满足时延约束下允许超载ONU卸载任务量最大的轻载ONU作为卸载目标,然后将超载ONU剩余的待卸载计算任务中满足时延需求的部分卸载到远程集中云处理,最后基于卸载策略进行带宽授权。仿真结果表明:COA-DWBA算法能显著提升计算任务的计算完成率、减少完成时延,同时有利于减少对传统宽带业务和核心网负载的不利影响。

于阳阳, 杜俐洁, 何荣希: MEC 增强 FiWi 网络协同卸载感知动态波长带宽分配算法

参考文献:

- [1] 张依琳, 梁玉珠, 尹沐君, 等. 移动边缘计算中计算卸载方案研究综述[J]. 计算机学报, 2021, 44(12): 2406–2430.
- [2] MACH P, BECVAR Z. Mobile edge computing: A survey on architecture and computation offloading [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(3): 1628–1656.
- [3] MAO Y, YOU C, ZHANG J, et al. A survey on mobile edge computing: The communication perspective[J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2017, 19(4): 2322–2358.
- [4] GUO H, LIU J, QIN H. Collaborative mobile edge computation offloading for IoT over fiber-wireless networks [J]. IEEE Network, 2018, 32(1): 66–71.
- [5] CAO X, WANG F, XU J, et al. Joint computation and communication cooperation for energy-efficient mobile edge computing [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 6(3): 4188–4200.
- [6] KUANG Z, MA Z, LI Z, et al. Cooperative computation offloading and resource allocation for delay minimization in mobile edge computing [J]. Journal of Systems Architecture, 2021, 118: 102167–1–102167–9.
- [7] MAIER M, EBRAHIMZADEH A. Towards immersive tactile internet experiences: low-latency FiWi enhanced mobile networks with edge intelligence [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2019, 11(4): B10–B25.
- [8] RIMAL B P, VAN D P, MAIER M. Cloudlet enhanced fiber-wireless access networks for mobile-edge computing[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(6): 3601–3618.
- [9] LUO Y, GAO J, EFFENBERGER F. Next generation hybrid wireless-optical access with TWDM-PON [C]// IEEE. Proceedings of 23rd Wireless and Optical Communication Conference (WOCC). Newark: IEEE, 2014: 1–5.
- [10] ZHANG L, QI J, WEI K, et al. High-priority first dynamic wavelength and bandwidth allocation algorithm in TWDM-PON[J]. Optical Fiber Technology, 2019, 48(3): 165–172.
- [11] 熊余, 蒋婧, 张振振, 等. TWDM-PON 中带有业务区分的混合资源调度算法[J]. 电子学报, 2017, 45(6): 1490–1497.
- [12] RIMAL B P, VAN D P, MAIER M. Cloudlet enhanced fiber-wireless access networks for mobile-edge computing[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(6): 3601–3618.
- [13] HELMY A H, NAYAK A. Integrating fog with long-reach PONs from a dynamic bandwidth allocation perspective[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(22): 5276–5284.