

带有卸载压缩激励的云增强FiWi网络节能机制

彭海英 王泽东* 吴大鹏

(重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065)

(重庆高校市级光通信与网络重点实验室 重庆 400065)

(泛在感知与互联重庆市重点实验室 重庆 400065)

摘要: 针对云增强型光纤-无线(FiWi)网络能耗以及卸载的通信开销过大问题, 该文提出一种自适应卸载压缩节能机制(ESAOC), 针对不同类型的业务属性和最大的容忍时延, 结合光网络单元的负载变化和无线网状网的流量情况, 通过统计的方式获得不同优先级卸载数据的平均到达率, 再结合各个节点的压缩时延, 动态调整业务的卸载压缩比, 以降低卸载的通信开销; 同时, 建立排队模型分析卸载业务在MEC服务器的排队时延, 协同调度无线侧中继节点, 进而对光网络单元和终端设备进行协同休眠调度, 最大化休眠时长, 提高系统能源效率。结果表明, 所提方法在有效降低整个网络能耗的同时能够保证卸载业务的时延性能。

关键词: 光纤-无线网络; 自适应卸载压缩; 协同休眠; 节能

中图分类号: TN926, TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)07-1726-08

DOI: [10.11999/JEIT190405](https://doi.org/10.11999/JEIT190405)

Energy Saving Mechanism with Incentive of Offloading Compression in Cloudlet Enhanced Fiber-Wireless Network

PENG Haiying WANG Zedong WU Dapeng

(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

(Chongqing Key Laboratory of Optical Communication and Networks, Chongqing 400065, China)

(Chongqing Key Laboratory of Ubiquitous Sensing and Networking, Chongqing 400065, China)

Abstract: In cloudlet enhanced Fiber-Wireless (FiWi) network, there is a problem that energy consumption and communication overhead of offloading are too large. An Energy Saving mechanism with Adaptive Offloading Compression (ESAOC) is proposed. According to the different types of service attributes and the maximum tolerant delay, combined with the load changes of the optical network unit and the traffic of the wireless mesh network, the ratio of the offloading compression of service is dynamically adjusted to reduce the communication overhead of the offloading by the average arrival rate of the offloaded data of different priorities obtained by means of statistical methods and combined with the delay of compression of each node. At the same time, a queuing model is established to analyze the delay of the offloading service in the MEC server and cooperatively schedule the relay node in wireless mesh network, thereby performing the schedule of collaborative sleeping on the optical network units and the terminal devices to maximize the duration of sleeping and improving the energy efficiency of system. The results show that the proposed mechanism can effectively reduce the network energy consumption while ensuring the delay performance of offloading service.

Key words: Fiber-Wireless (FiWi) network; Adaptive offloading compression; Collaborative sleep; Energy saving

收稿日期: 2019-06-05; 改回日期: 2020-02-28; 网络出版: 2020-04-09

*通信作者: 王泽东 917251201@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金(61771082, 61871062); 重庆市高校创新团队建设计划(CXTDX201601020)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61771082, 61871062); Chongqing Funded Project of Chongqing University Innovation Team Construction (CXTDX201601020)

1 引言

现如今随着网络的发展越来越多的新兴应用不断涌现,如高速率多媒体服务,交互式游戏,AR/VR^[1,2],这些计算密集和时延敏感的应用使得移动终端(STation, STA)仅仅依靠本身的计算和存储能力很难满足用户需求,与此同时STA的电池容量也相对有限,因此把计算任务卸载到距离用户较近的边缘云服务器成为很有前景的解决方案,移动边缘计算(Mobile Edge Computing, MEC)不仅满足了STA计算能力的扩展需求,提升用户体验质量(Quality of Experience, QoE),而且使STA使用周期延长^[3,4]。虽然MEC本身具备诸多的优势,但仍然需要在合理的网络架构下才能得到充分的发挥。其中,光纤-无线(Fiber-Wireless, FiWi)混合接入网具备无源光网络(Passive Optical Network, PON)的高带宽及高可靠性,同时具备无线网状网络(Wireless Mesh Network, WMN)的灵活性,成为非常有发展前景的MEC实现方案^[5,6]。显然,支持MEC的FiWi网络具备诸多优点,然而过多的计算任务迁移会导致卸载的通信开销过大,STA需要消耗更多的能量来执行卸载任务的上传,同时也需要开启更多的Mesh节点和光网络单元(Optical Network Unit, ONU)来转发卸载数据,从而造成系统能耗过大。MEC卸载的数据量成为了影响系统能耗的关键因素,为了从根本上控制卸载的通信开销,降低卸载处理过程的能耗,如何降低卸载的数据量是需要解决的重要问题。

数据压缩是控制数据量的有效方式,各种数据压缩算法应用于文本、图像、视频、音频的压缩^[7],而且随着压缩技术的不断发展,压缩时间和能耗都大幅度降低^[8],使其运用到网络中的数据压缩传输成为可能。通过数据压缩可以减小数据大小,从而节省数据存储空间和减小数据传输时延,由于传输数据通常要比计算消耗更多的能量,因此在能量有限的网络中应用数据压缩可以实现节能。与此同时,由于FiWi网络光域的能耗主要集中在光网络单元,因此在设计整个网络的节能机制时,需要在无线域控制卸载数据量的同时协同考虑ONU的状态和能耗,降低通信开销的同时减少系统能耗。

在现有的MEC卸载压缩的网络节能机制研究中,文献^[9]提出带MEC数据压缩的网络框架,通过收集用户的数据并压缩以提高随机接入的概率和减少传输延迟,但没有提出具体的节能方法,而且也不适用于带有MEC卸载的FiWi网络。文献^[10]研究了MEC系统用户将任务部分卸载到MEC服务器之前对卸载的数据进行压缩,联合优化计算卸载,

数据压缩和资源分配。然而,卸载数据是在压缩完成后才进行传输,增加了队列等待时延,同时在STA进行压缩会增加移动设备的负担产生更多能耗。文献^[11]研究了基于电压缩放和数据压缩的移动云计算的卸载策略,首先根据移动设备的最优CPU频率推导出计算每个任务的最优成本,然后决定是否压缩,最后提出最优的任务卸载和压缩策略。然而,采用中心云计算卸载,卸载时延相对较高,在移动设备进行卸载数据压缩会增大设备计算负担。文献^[12]研究了基于时分多址的多用户MEC视频压缩卸载系统的通信和计算资源分配问题,求出最优视频分割策略的封闭表达式,并对分段凸优化问题用改进型次梯度法求解。然而,卸载数据并未经过处理,直接卸载到云服务器,卸载过程的通行开销没有得到有效控制,而且数据压缩本身并没有随着卸载而优化。

针对上述MEC卸载压缩存在的问题,本文提出一种自适应卸载压缩节能机制(Energy Saving with Adaptive Offloading Compression, ESAOC),针对不同类型的业务属性和最大的容忍时延,结合ONU的负载变化和WMN流量情况,在Mesh节点自适应调整业务的卸载压缩比,以降低卸载的通信开销。同时利用M/M/1排队模型分析卸载业务在MEC服务器的排队时延,协同调度无线侧中继节点,进而对ONU和STA进行休眠调度,最大化休眠时长,提高能源效率。

2 系统模型

2.1 网络模型

带有MEC卸载压缩激励的FiWi网络架构如图1所示。光链路终端(Optical Line Terminal, OLT)负责控制操作并通过光分路器与ONU相连,MEC服务器通过专用的高速光纤链路连接到ONU,FiWi接入网络的WMN由多个集成了数据压缩功能的无线接入点组成,包括Mesh接入点(Mesh Access Point, MAP)和Mesh点(Mesh Point, MP),其中

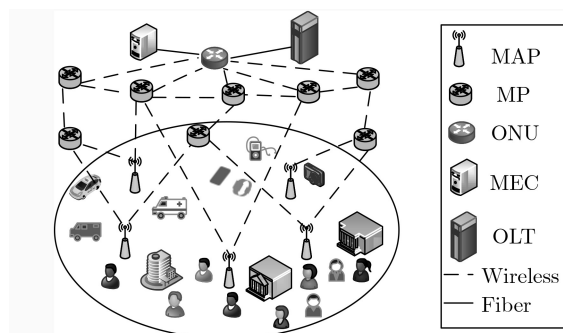


图1 带有MEC卸载压缩激励的FiWi网络架构

MAP为STA在其覆盖范围内提供无线接入,而MP相当于ONU和MAP的中继节点,MAP和MP都集成了数据压缩功能,可对卸载业务数据进行压缩并转发。

2.2 卸载压缩模型

STA产生的卸载业务通过高效快速的压缩算法在Mesh节点根据时延约束进行自适应压缩,压缩比可动态调整,完成压缩的卸载数据再通过ONU传输到MEC服务器进行处理。根据业务的服务优先级和服务质量(Quality of Service, QoS),把业务分为加速转发(Expedited Forwarding, EF),确保转发(Assured Forwarding, AF),尽力而为(Best Effort, BE),用 $k=1,2,3$ 分别代表3种业务。不同类型的业务对时延要求不同,而不同的压缩比代表了不同的压缩程度,相对应的压缩时延和压缩能耗也不同,因此需要针对不同的业务设定不同的卸载数据压缩比。一般地,设原始数据为 Z ,压缩后的数据为 Z_{cp} ,压缩比^[13]表示为

$$\rho = \frac{Z_{cp}}{Z} \times 100\% \quad (1)$$

压缩时间表示为把原始数据 Z 压缩成 Z_{cp} 所需要的时间,且与压缩比的倒数有关

$$T_{cp} = \tau Z \left[\left(\frac{Z}{Z_{cp}} \right)^{\beta} - 1 \right] \quad (2)$$

其中 τ 表示每比特数据的处理时间,单位是cycle/bit, β 是压缩算法相关参数,与压缩算法的复杂性成正比,它决定了在确定的硬件环境和压缩比的条件下的压缩时间。数据压缩过程的能耗通常取决于压缩比 ρ 和输入数据 Z ,假定压缩能耗不会随压缩比变化而变化,压缩能耗可表示

$$E_{cp} = \varepsilon \cdot Z \quad (3)$$

其中 ε 是每比特数据的能耗系数,通常将其建模为服从伽马分布的随机变量^[14]。为了简化分析,使用其均值作为 ε 的代表值。

3 自适应卸载压缩机制

3.1 WMN队列时延分析

采用M/G/1排队模型分析数据包在WMN转发过程的时延,由于相邻无线路由器的距离很近,传播时延可以忽略,第 k 类业务在链路u-v的时延 d_{uv}^k 由传输时延,时隙同步时延和队列时延构成,可表示为

$$d_{uv}^k = \frac{1}{\mu_k C_{uv}^k} + \frac{1}{2\mu_k C_{uv}^k} + \frac{\lambda_{uv}^k}{\mu_k C_{uv}^k (\mu_k C_{uv}^k - \lambda_{uv}^k)} \quad (4)$$

其中 $1/\mu_k$ 表示平均数据包长度, C_{uv}^k 表示链路的容

量, λ_{uv}^k 表示在链路的到达率。如果u-v是单跳链路,那么多跳的情况下的时延表示为

$$D_{mes}^k = \sum_{uv=1}^h d_{uv}^k \quad (5)$$

其中 h 表示经历的跳数。

3.2 ONU队列时延分析

经过了WMN多跳传输之后的压缩卸载数据包,会根据ONU的负载情况来选择目标ONU,定义 Q_k 为业务队列优先级为 k 的卸载数据包数量, W_k 为优先级为 k 的数据包的平均队列时延, λ_k 与 η_k 分别为优先级为 k 的数据包的平均到达率和服务率, \bar{X}_i^2 为服务时间的2阶矩,平均残留时延 R_k 可表示为

$$R_k = \sum_{i=1}^k \lambda_i \bar{X}_i^2 / 2 \quad (6)$$

根据M/G/1排队理论的P-K公式,得到优先级 $k=1$ 的数据包平均队列时延 $W_1 = R_1 + Q_1/\eta_1$,结合Little定理,有 $Q_1 = W_1 \lambda_1$,那么优先级 $k=1$ 的数据包平均队列时延为 $W_1 = R_1 + \lambda_1 W/\eta_1$,结合式(6)得出优先级 $k=1$ 的数据包平均队列时延表示为 $W_1 = R_1/(1 - \lambda_1/\eta_1)$,由于采用了优先级调度机制,较高的优先级业务会优先得到服务,因此得出第 k 优先级的数据包平均队列时延表示为

$$W_k = \frac{\sum_{i=1}^k \lambda_i \bar{X}_i^2}{2(1 - \lambda_1/\eta_1 - \lambda_2/\eta_2 - \dots - \lambda_k/\eta_k)} \quad (7)$$

3.3 最佳卸载压缩比分析

卸载业务数据包进入无线域节点之后,根据不同的优先级和时延要求,可在多个节点进行数据压缩,需要结合优先级和时延,在尽可能地降低能耗的前提下进行合理压缩。用 D_k 表示优先级为 k 的业务数据包从用户发出到被MEC处理后返回给用户的最大容忍时延,而在节点的数据压缩时延 T_{cp}^k ,数据传输过程中的队列时延 W_k 和 D_{mes}^k ,数据包从STA到ONU传输时延 $T_{S \rightarrow O}$,ONU到MEC服务器传输时延 $T_{O \rightarrow M}$,MEC服务等待时延 T_{mec}^q ,MEC处理时延 T_{mec}^e ,回传数据传输时延 T_{bac} 需要满足时延约束条件

$$T_{cp}^k + W_k + D_{mes}^k + T_{S \rightarrow O} + T_{O \rightarrow M} + T_{mec}^q + T_{mec}^e + T_{bac} \leq D_k \quad (8)$$

用 R_{mes} 表示无线链路的传输速率,压缩的卸载数据包从STA到ONU的传输时延表示为

$$T_{S \rightarrow O} = \sum_{i=1}^h Z_{cp}^{k,i} / R_{mes} \quad (9)$$

其中 h 表示数据包经历的节点数, $Z_{cp}^{k,i}$ 表示优先级为 k 的卸载业务在节点 i 的数据包大小。

压缩后的数据包到达ONU后, 需要把压缩数据传输到MEC进行解压缩并处理, 压缩数据从ONU到MEC的传输时延为 $T_{O \rightarrow M} = Z_{cp}^k/R_O$, 其中 R_O 表示ONU到MEC的专用光链路速率。MEC队列时延表示卸载的业务到达MEC服务器, 直到被处理的服务等待时延, 采用M/M/1排队模型对时延进行分析, 设每个服务器的服务率是 μ_{mec} , 卸载业务平均到达率是 λ_{mec} , 服务时间服从指数分布, 平均服务时间为 $1/\mu_{mec}$, 卸载业务在MEC中的等待时延由排队时延和服务时延组成, 那么服务等待时延可表示为

$$T_{mec}^q = \frac{1}{\mu_{mec}} + \frac{E_c(c, \varphi_{mec}) \cdot T_s}{c \cdot (1 - \varphi_{mec})} \quad (10)$$

其中, φ_{mec} 表示MEC服务器的负载, 可表示为 $\varphi_{mec} = \lambda_{mec}/\mu_{mec}$, T_s 为 c 个服务器的平均服务时间, 可表示为 $T_s = c \cdot \varphi_{mec}/\lambda_{mec} = c/\mu_{mec}$, $E_c(c, \varphi_{mec})$ 可用Erlang-C公式^[15]计算。

通过以上分析, 结合式(8)可知, 在保证业务时延的前提下, 各优先级卸载数据在节点上的总压缩时间 T_{cp}^k 不能超过业务的最大容忍时延与数据包传输时延的差值, 如式(11)所示

$$T_{cp}^k \leq D_k - (W_k + D_{WMN}^k + T_{S \rightarrow O} + T_{O \rightarrow M} + T_{mec}^q + T_{mec}^e + T_{bac}) \quad (11)$$

令 $t_{k,j}$ 表示第 k 优先级的数据包在第 j 个无线节点上的压缩时间, $\rho_{k,j}$ 表示第 k 优先级的数据包在第 j 个无线节点上的压缩比, 数据包在某个节点上达到了压缩时延的上限, 在剩下的节点上不会再进行数据压缩, 可以得到各节点压缩时间的上限值如式(12)所示

$$t_{k,j} \leq D_k - (W_k + D_{WMN}^k + T_{S \rightarrow O} + T_{O \rightarrow M} + T_{mec}^q + T_{mec}^e + T_{bac}) - \sum_{w=1}^{j-1} t_{k,w} \quad (12)$$

这样卸载数据包在无线节点上的总压缩时间为

$$T_{cp}^k = \sum_{j=1}^h t_{k,j} \quad (13)$$

数据包进入无线域队列时, 通过统计的方式获得第 k 优先级的卸载数据的平均到达率 λ_k , 再结合无线域的各个节点的压缩时延, 确定对应优先级数据在无线域的最佳压缩比

$$\rho_{k,j}^* = \frac{t_{k,j} \cdot \lambda_k}{Z_{k,j}} \times 100\% \quad (14)$$

4 卸载回传ONU休眠

为了合理调度ONU休眠, 提出如图2所示的卸载数据回传时延感知的ONU休眠机制。ONU通过发送确认数据帧到MEC服务器, 确认是否有回传数据到达, 如果有回传数据要发给ONU, MEC服务器通过发送SR0帧, 让ONU保持活跃状态并接收回传数据, 接收完数据再发送SR帧, 使ONU进入休眠。这一过程的时延可用表示为 $T_{ONU} = RTT + Z_{ret}/R_O$, 其中RTT表示往返时间, Z_{ret} 表示卸载回传数据大小。根据前述ONU到MEC服务器传输时延 $T_{O \rightarrow M}$, MEC服务等待时延 T_{mec}^q , MEC处理时延 T_{mec}^e 可知回传数据到达ONU的时刻为 t_{ret} , 将其与信标数据帧的发送时刻 t_{bec} 进行比较, 信标数据帧作用是ONU通知STA是否有回传数据要发送给STA, 当 $t_{bec} - t_{ret} > T_{ONU}$, 表明信标数据帧发送时刻是在回传数据达到ONU之后, 且ONU在 $t_{bec} - T_{ONU} + RTT/2$ 时刻唤醒并发送确认消息, ONU活跃时长为 T_{ONU} , 其余时间处于休眠状态。当 $t_{bec} - t_{ret} < T_{ONU}$, 表明在当前信标数据帧周期内MEC没有处理完卸载业务并回传给ONU。如果ONU在当前信标数据帧周期发送确认帧, 不仅无法完成回传数据的接收, 而且会产生额外能耗, 因此延长ONU休眠时长到下一个信标数据帧周期再发送控制帧。

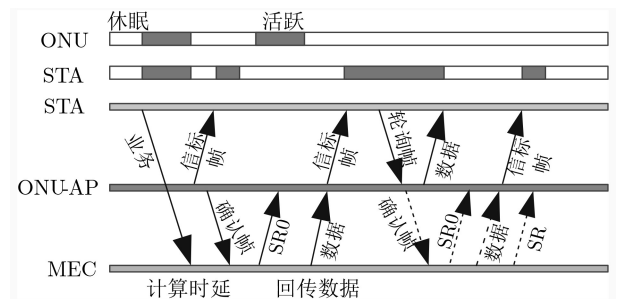


图2 回传时延感知ONU休眠

5 性能分析

5.1 MEC响应时延分析

时延是衡量网络的重要QoS性能指标, 令 T_{res} 表示卸载业务在STA产生, 经过压缩, 再到MEC开始处理卸载业务的时延, 可由式(15)表示

$$T_{res} = \bar{D}_1 + \bar{D}_2 + \bar{D}_3 + \bar{D}_4 + T_{cp}^k + T_{mec}^q + T_{mec}^e \quad (15)$$

其中, $\bar{D}_1 = T_c/2$ 表示卸载数据包到达与STA发送轮询帧PS-Poll的时间间隔, 轮询帧PS-Poll是STA向ONU发送的请求带宽的控制帧。 $\bar{D}_2 = T_c/2N$ 表示轮询帧PS-Poll和接收到信标数据帧的时间间隔。 $\bar{D}_3 = T_c$ 表示接收到信标数据帧后, 到接收到下一个周期的信标数据帧的时间间隔。 $\bar{D}_4 = T_c \varphi_{mec}/2N$

表示下一个信标数据帧和数据包实际传输完成的时间间隔。令 D_{tra}^{bac} 表示MEC服务器产生回传数据到STA接收到数据的时延,表示为 $D_{tra}^{bac} = Z_{ret}/R_O + Z_{ret}/R_{mes}$,总的响应时延为

$$D_{tot} = T_{res} + D_{tra}^{bac} \quad (16)$$

5.2 ONU能耗分析

MEC卸载压缩激励的FiWi网络的能耗主要包括ONU传输卸载业务和接收回传结果的能耗,无线节点的压缩能耗。ONU的能耗包括传输业务和接收回传结果的能耗,其中ONU处于活跃状态的时间为 $T_{onu}^{ac} = RTT + 2T_{O \rightarrow M}$,而ONU处于休眠状态的时间可表示为 $T_c - T_{onu}^{ac} - T_{onu}^{non}$,ONU总能耗为

$$E_{onu} = (T_{onu}^{ac} + T_{onu}^{non})p_{onu}^{ac} + (T_c - T_{onu}^{ac} - T_{onu}^{non})p_{onu}^{sl} \quad (17)$$

其中, T_{onu}^{non} 表示ONU为非卸载业务分配的时隙, p_{onu}^{ac} , p_{onu}^{sl} 表示处于活跃和休眠状态下的ONU功率。

无线节点卸载压缩的能耗主要取决于卸载压缩过程经历的无线节点数和在各个节点的不同优先级卸载数据的大小。压缩能耗可表示为

$$E_{cp} = \sum_{i=1}^h \varepsilon \cdot Z_i^k \quad (18)$$

其中, h 表示节点数, Z_i^k 表示优先级为 k 的卸载业务在节点 i 上的数据大小。

6 数值分析

本文采用NS2仿真平台对所提出的ESAOC算法进行验证,其对比算法包括文献[16]提出的WOES算法,文献[17]提出的MCCO算法,文献[18]提出的CMRCO算法,主要的仿真参数如表1所示。

6.1 不同负载下的时延对比

图3描述了所提的ESAOC算法在不同业务等级下的负载和时延关系,其中横坐标网络负载描述当前网络的负荷状态,定义为当前网络的数据量或流量与额定容量之比。纵坐标的端到端时延表示从STA发出卸载业务请求到MEC服务器处理完成的总时延,包括传输时延,压缩时延和处理时延。统计数据表明,FiWi网络中 $k=2$ 的次优先级数据占整个网络负载的比例较高,三者比例约为2:5:3^[16]。当网络负载较小时,端到端时延呈缓慢上升趋势,这是因为在初始阶段,业务流量较小,数据压缩的程度相对较低,各优先级业务时延变化不大。当网络负载大于0.4时,随着网络负载的增加,各优先级的业务的平均端到端时延逐渐上升,因为随着业务负载的增加,队列时延会增加,同时数据压缩程度较高。引入卸载压缩,会增加一定的处理时延,但通过分析发现对优先级较低的业务,压缩时延对

整体的时延影响较小,因为业务本身对时延的并不敏感,而对于优先级较高的业务,额外增加的压缩时延在可容忍的范围内,结合图6的压缩时延,额外增加的毫秒级的压缩时延相对于整个端到端时延影响并不大。

表1 仿真参数设置

参数设定	参数数值
网络区域(m ²)	500×500
ONU数目 N (个)	8
Mesh节点数目 N_w (个)	20
STA数目 W (个)	50
ONU活跃状态能耗(W)	5.05
ONU休眠状态能耗(W)	0.75
平均卸载分组大小(kb)	128.5
节点处理能力 τ (ns/b)	0.35
压缩参数 β	5
压缩能耗系数 ε (nJ/b)	8
R_{mes} (Mbit/s)	6900
R_O (Gbit/s)	1
$T_{O \rightarrow M}$ (μ s)	50
ONU保护时隙(μ s)	40
控制帧时隙(μ s)	0.5
ξ_0 (cycles/bit)	500
f_0 (cycles/s)	3.2×10^9

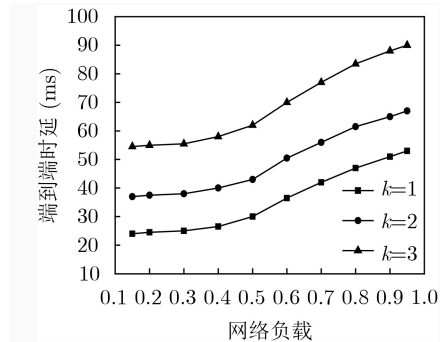


图3 不同优先级业务的端到端时延

图4描述了所提的ESAOC算法与对比算法的业务响应时延的对比情况,其中业务响应时延定义为STA发出卸载业务请求到STA获得业务请求结果的响应时延,随着网络业务负载的增加,4种方案的业务响应时延都逐渐增加。主要原因是随着业务负载增加,网络中大量的数据包增加了队列时延,其中WOES相比其它3种方案时延较大,因为其采用传统处理方式,PON侧的ONU通过负载转移,判断并选取目标ONU以及负载的转移本身都会带来额外时延,无线路由器休眠时间会随着网络负载的

增加而减少,使得无线链路队列时延明显增大,其它3种算法采用MEC卸载机制,减少STA处理的负担,卸载业务在边缘云处理的传输时延会降低。当负载小于0.4时,CMRCO算法和MCCO算法的业务响应时延差距很小,因为两者采用的都是边缘卸载和集中云卸载结合的方式,区别在于前者采用部分卸载,所提算法由于网络负载较小,数据压缩的程度不高,性能有少量提升,没有体现出卸载压缩的优势。当网络负载大于0.4时,网络负载逐渐增加,CMRCO算法会根据业务流量情况增加协作计算节点,相比于MCCO算法,业务响应时延有所降低,但是由于大量的卸载业务在网络中等待处理,未经处理的原始数据包传输的通信开销很大,造成时延较高,所提出的ESAOC算法随着业务负载的增加,对卸载业务数据在无线节点逐渐压缩,降低通信开销,业务响应时延得到明显下降。

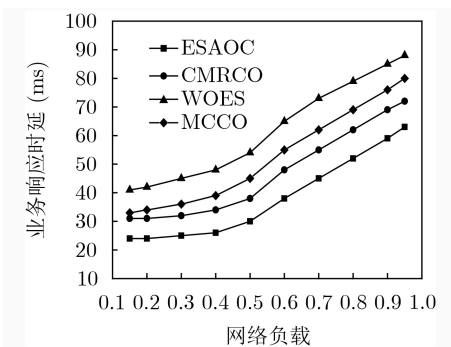


图4 不同算法对应的业务响应时延

6.2 网络能耗与压缩开销

不同网络负载下ONU的总能耗变化情况如图5所示。随着MEC业务负载增加,4种算法中的ONU总能耗呈现上升趋势,因为更多的ONU将从休眠状态转变为活跃状态。当网络的业务负载小于0.45时,WOES算法对应的能耗相比MCCO算法要低,而且接近CMRCO算法,这是因为WOES算法利用负载转移机制将低负载ONU上的业务进行转移,从而能够使更多ONU进入休眠状态,而WOES

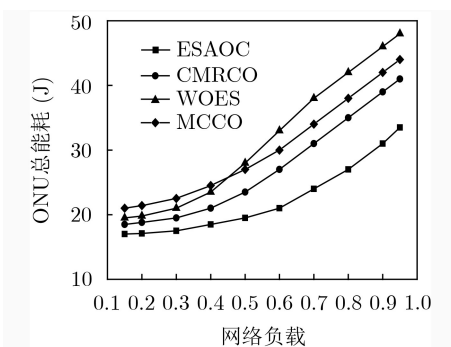


图5 不同负载下的ONU总能耗

算法和MCCO算法虽然采用卸载机制,但由于业务负载较小,不能体现出卸载的优势,同时,由于MCCO算法采用完全卸载的方式,所有的卸载数据都需要在网络中传输到ONU,相反CMRCO算法采用部分卸载方式,STA能够处理部分业务数据,ONU需要处理的业务数据会减小。同理,所提算法由于卸载业务负载较低导致卸载数据压缩程度不高,卸载数据量相对较大,ONU需要开启的时间相对较长。

当网络负载大于0.45时,采用负载转移机制已不能应对能耗的增长,越来越多的数据需要通过ONU,采用传统的无卸载模式,ONU需要向OLT申请更长的带宽,减少了ONU休眠时间,相比于带有卸载机制的另外3种方案,能耗相对更高。MCCO算法和CMRCO算法虽然采用了卸载机制,但并没有考虑卸载过程的通信开销,过多的卸载业务使得ONU负载过重,休眠时间减少,能耗增加。所提ESAOC算法对卸载数据在不同节点进行快速压缩,降低了ONU的数据传输时延,而且协同考虑MEC和无线节点为ONU匹配最佳休眠时间,从而使ONU休眠时间更长。在下行方向,当负载增大到一定数值,唤醒的ONU个数逐渐趋近于最大值,但是在不增大下行缓存时延的情况下,ESAOC算法通过卸载协同机制,为ONU选取最佳唤醒时刻和休眠时长,可在保证MEC业务时延性能的同时,使FiWi网络有效地节能。

图6描述了不同优先级业务的压缩时延随压缩比变化的情况,压缩时延定义为卸载业务在Mesh中继节点进行压缩处理的时延,压缩时延主要取决于压缩数据量的大小以及所采用的压缩算法,可根据式(2)得出。从图中可知,压缩时延随着压缩比的增大而减少,因为压缩比定义为压缩后的数据与原数据之比,压缩比越小则压缩程度越高,相应的压缩时延较高。同时,由于优先级高的业务的QoS要求相对较高,需要对相应的卸载数据进行较高级别的压缩,对应的压缩时延也相对较高。

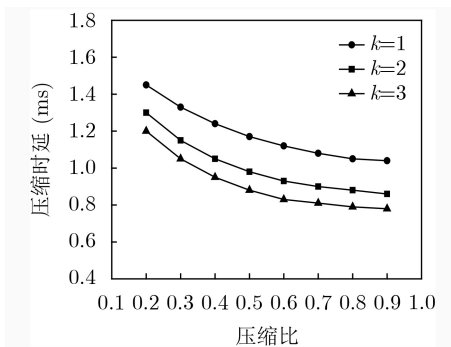


图6 不同压缩比下的压缩时延

引入卸载压缩机制能够降低卸载过程中的能耗,这是采用该机制的主要目的,但不可避免地会给系统带来额外的压缩开销,其中压缩能耗可根据式(3)和式(18)得出,结合压缩能耗与网络负载的关系可知,卸载压缩在单个中继节点带来的毫焦耳级的能耗相对于系统的能耗影响不大。考虑最大范围的压缩情况,即所有的中继节点都参与了卸载压缩,假设网络仿真中Mesh中继节点个数范围是60~220,那么压缩能耗也不会超过总能耗的5%。从图7中可以看出压缩能耗所占比例不大,相比较于采用卸载压缩后系统所节省的能耗,压缩的能耗开销在合理范围内。

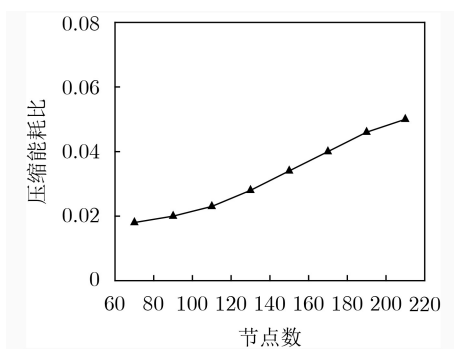


图7 节点数与压缩能耗关系

7 结束语

针对FiWi网络的能耗和MEC卸载的通信开销问题,本文提出一种自适应卸载压缩节能机制,针对不同类型的业务属性和最大的容忍时延,结合ONU的负载变化和WMN流量情况,自适应调整业务的卸载压缩比,以降低卸载的通信开销。同时利用M/M/1排队模型分析卸载业务在MEC服务器的排队时延,协同调度无线侧中继节点,进而对ONU和STA进行休眠调度,最大化休眠时长,提高系统能源效率。

参考文献

- [1] 吴大鹏,李雪,李红霞.基于TWDM-PON与C-RAN的QoE感知视频协作缓存与传输机制[J].通信学报,2019,40(3):80-91. doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2019066.
WU Dapeng, LI Xue, and LI Hongxia. QoE-aware video cooperative caching and transmission mechanism based on TWDM-PON and C-RAN[J]. *Journal on Communications*, 2019, 40(3): 80-91. doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2019066.
- [2] 王汝言,徐宁宁,吴大鹏.能耗和时延感知的虚拟化云无线接入网络资源分配机制[J].电子与信息学报,2019,41(1):83-90. doi: 10.11999/JEIT180063.
WANG Ruyan, XU Ningning, and WU Dapeng. Energy consumption and delay-aware resource allocation mechanism for virtualization cloud radio access network[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(1): 83-90. doi: 10.11999/JEIT180063.
- [3] AGIWAL M, ROY A, and SAXENA N. Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, 18(3): 1617-1655. doi: 10.1109/COMST.2016.2532458.
- [4] XU Yi and MAO Shiwen. A survey of mobile cloud computing for rich media applications[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2013, 20(3): 46-53. doi: 10.1109/MWC.2013.6549282.
- [5] 吴大鹏,吴光锴,王汝言.带有上行数据帧聚合的光无线融合接入网络节能机制[J].电子与信息学报,2018,40(3):690-696. doi: 10.11999/JEIT170508.
WU Dapeng, WU Guangkai, and WANG Ruyan. Energy-saving mechanism of integrated fiber-wireless access network with uplink data frame aggregation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(3): 690-696. doi: 10.11999/JEIT170508.
- [6] RIMAL B P, VAN D P, and MAIER M. Mobile edge computing empowered fiber-wireless access networks in the 5G era[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(2): 192-200. doi: 10.1109/MCOM.2017.1600156CM.
- [7] LI Xiaoyang, YOU Changsheng, ANDREEV S, et al. Wirelessly powered crowd sensing: Joint power transfer, sensing, compression, and transmission[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2019, 37(2): 391-406. doi: 10.1109/JSAC.2018.2872379.
- [8] KOLO J G, SHANMUGAM S A, LIM D W G, et al. Fast and efficient lossless adaptive compression scheme for wireless sensor networks[J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2015, 41: 275-287. doi: 10.1016/j.compeleceng.2014.06.008.
- [9] LIU Luning, CHEN Xin, LU Zhaoming, et al. Mobile-edge computing framework with data compression for wireless network in energy internet[J]. *Tsinghua Science and Technology*, 2019, 24(3): 271-280. doi: 10.26599/TST.2018.9010124.
- [10] XU Ding, LI Qun, and ZHU Hongbo. Energy-saving computation offloading by joint data compression and resource allocation for mobile-edge computing[J]. *IEEE Communications Letters*, 2019, 23(4): 704-707. doi: 10.1109/LCOMM.2019.2897630.
- [11] ZHANG Wei, WEN Yonggang, ZHANG Yingjun, et al. Mobile cloud computing with voltage scaling and data compression[C]. The 18th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications, Sapporo, Japan, 2017: 1-5. doi: 10.1109/SPAWC.2017.8227788.
- [12] REN Jinke, YU Guanding, CAI Yunlong, et al. Latency optimization for resource allocation in mobile-edge computation offloading[J]. *IEEE Transactions on Wireless*

- Communications*, 2018, 17(8): 5506–5519. doi: [10.1109/TWC.2018.2845360](https://doi.org/10.1109/TWC.2018.2845360).
- [13] ALVI S A, ZHOU Xiangyun, and DURRANI S. Optimal compression and transmission rate control for node-lifetime maximization[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(11): 7774–7788. doi: [10.1109/TWC.2018.2870870](https://doi.org/10.1109/TWC.2018.2870870).
- [14] HU Weizheng, ZHANG Wei, HU Han, *et al.* Toward joint compression-transmission optimization for green wearable devices: An energy-delay tradeoff[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2017, 4(4): 1006–1018. doi: [10.1109/JIOT.2017.2704605](https://doi.org/10.1109/JIOT.2017.2704605).
- [15] ZHAO Tianchu, ZHOU Sheng, GUO Xueying, *et al.* A cooperative scheduling scheme of local cloud and internet cloud for delay-aware mobile cloud computing[C]. 2015 IEEE Globecom Workshops, San Diego, USA, 2015: 1–6. doi: [10.1109/GLOCOMW.2015.7414063](https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2015.7414063).
- [16] LIU Yejun, GUO Lei, ZHANG Lincong, *et al.* A new integrated energy-saving scheme in green Fiber-Wireless (FiWi) access network[J]. *Science China Information Sciences*, 2014, 57(6): 1–15. doi: [10.1007/s11432-013-4958-7](https://doi.org/10.1007/s11432-013-4958-7).
- [17] RIMAL B P, VAN D P, and MAIER M. Mobile-edge computing vs. centralized cloud computing in fiber-wireless access networks[C]. 2016 IEEE Conference on Computer Communications Workshops, San Francisco, USA, 2016: 1–6. doi: [10.1109/INFCOMW.2016.7562226](https://doi.org/10.1109/INFCOMW.2016.7562226).
- [18] CHOWDHURY M and MAIER M. Collaborative computing for advanced tactile internet human-to-robot (H2R) communications in integrated FiWi multirobot infrastructures[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2017, 4(6): 2142–2158. doi: [10.1109/JIOT.2017.2761599](https://doi.org/10.1109/JIOT.2017.2761599).
- 彭海英：女，1973年生，副教授，研究方向为光无线融合网络。
王泽东：男，1993年生，硕士生，研究方向为光无线融合网络。
吴大鹏：男，1979年生，教授，博士，研究方向为泛在无线网络、社会计算、互联网服务质量控制等。

责任编辑：余蓉