

QoE 感知的 FiWi 视频分发机制

王汝言, 杨衍, 吴大鹏

(重庆邮电大学光通信与网络重点实验室, 重庆 400065)

摘 要: 针对光无线融合网络 (FiWi, fiber-wireless access network) 传输能力不匹配所导致的视频业务传输不连续问题, 提出一种体验质量 (QoE) 感知的视频分发机制。根据光无线融合网络结构特点, 考虑链路状态信息及可扩展视频编码结构, 建立 QoE 评估模型, 使用粒子群算法选择最优视频传输速率; 进而分析节点传输能力及节点匹配度, 为业务选择传输路径, 保证业务的可靠传输。结果表明, 所提机制在增强用户体验质量的同时, 有效地提高了网络资源利用率, 降低了网络拥塞。

关键词: 光无线融合网络; 可扩展视频编码; 体验质量; 粒子群算法

中图分类号: TP393.04

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2018012

QoE-aware video distribution mechanism in FiWi

WANG Ruyan, YANG Yan, WU Dapeng

Key Laboratory of Optical Communication and Networks, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

Abstract: The mismatch of transmission ability causes the discontinuous transmission of video services in fiber-wireless access network, aimed at this problem, an QoE-aware video distribution mechanism was proposed. According to the structural characteristics of fiber-wireless access network, link state information and scalable video coding structure was considered, a QoE evaluation mode was established, and the particle swarm optimization algorithm was used to select optimal video transmission rate. Then the node transmission capacity and the node matching degree was analyzed, transmission path for the services was selected, so as to ensure the reliable transmission of services. The results show that the proposed mechanism can effectively improve the utilization rate of network resources and reduce network congestion while improving the quality of the user experience.

Key words: fiber-wireless access network, scalable video coding, quality of experience, particle swarm algorithm

1 引言

随着智能终端设备的广泛使用, 视频业务数据量呈爆炸式增长, 其高带宽及时延敏感特性对网络承载能力提出了更高的要求; 同时, 为了更加便捷地为用户提供网络接入服务进而获取视频信息, 视频业务的承载也在向移动化方向发展^[1]。视频承载

网络的关键问题在于是否能实时地向用户交付视频数据, 但此种方式会占用较多网络资源, 同时对业务的时延和抖动有很高的要求, 因此, 为了保证视频业务的高效传输, 未来接入网势必会向高带宽、高速率、可移动性方向发展^[2]。光无线融合网络契合未来网络发展需求, 同时具有光网络高带宽、传输稳定、成本低廉的优势和无线网络易部署、

收稿日期: 2017-05-31; 修回日期: 2017-11-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61371097); 重庆高校创新团队计划基金资助项目 (No.CXTDX201601020); 重庆市教委科学技术研究基金资助项目 (No.KJ1401126)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61371097), Chongqing University Innovation Team Construction Project Funded Projects (No.CXTDX201601020), Chongqing Municipal Education Commission Science and Technology Research Project (No.KJ1401126)

支持移动组网的特点^[3,4],经济价值高、应用场景广泛,成为解决未来宽带接入网的重要方法之一。

FiWi 的典型结构如图 1 所示,后端的光网络采用点到多点的树型结构,由光线路终端(OLT, optical line terminal)和多个光网络单元(ONU, optical network unit)组成,前端的无线网络由融合 ONU 和基站功能的网关节点(ONU-BS, optical network units-base station)以及多个无线路由器组成。每个 ONU 可以连接多个基站(BS, base station), BS 与多个无线路由器相连,这些路由器组成前端的无线 mesh 网(WMN, wireless mesh network)。用户通过无线路由器接入网络,再经过光网络进入骨干网^[5]。

研究表明,用户点击视频的次数与视频的流行程度关系紧密。在大型视频网站,位于流行程度排行前 20% 的视频占据了近 80% 的点击率,二者服从 Zipf 分布^[6]。FiWi 体系架构中,ONU-BS 需要为每个需求用户在时域和频域上分配资源,并反复将同一内容发送至不同用户。显然,对于大数据量的多媒体业务,这样的服务模式会对网络资源造成极大浪费,导致用户服务体验迅速下降^[7]。对于 FiWi 架构来说,多播传输机制可以有效缓解这种现象,即充分利用 FiWi 下行传输的广播特性,将同一视频流同时传输至多个用户,但基站与多个用户的差异化信道及链路资源,不能保证所有用户都能成功接收^[8]。因此,为适应不同用户对视频服务的需求以及动态变化的网络环境,可扩展视频编码(SVC, scalable video coding)技术^[9]被广泛应用在视频多播传输中。SVC 将视频内容分成一个基础层(BL, base layer)以及若干个增强层(EL, enhancement layer),

基础层提供最基本的观看质量,接收端只需要接收到基础层码流,就可以得到最低分辨率的视频文件;高层的数据依赖低层的数据,用户要接收高层数据必须正确解码基础层。

FiWi 两端结构和传输能力的不对称性^[10]会使数据在 ONU-BS 处产生不同程度的积压,导致节点队列和传输时延不断增大,并且缓存队列达到最大容量时就会拒绝接收数据,产生不必要的分组丢失。对于视频业务而言,数据分组丢失是影响视频质量的主要因素,将直接影响一个甚至多个视频帧的正确接收,对后端用户的体验质量(QoE, quality of experience)产生极大影响^[11]。因此,如何根据 ONU-BS 的负载状态以及链路资源选择合适的路径对提高用户 QoE 至关重要。文献[12]建立模型分析 FiWi 中的数据时延,计算路径的端到端时延,有效地选择时延较低的路径传输,但没有考虑视频业务的特点。文献[13]提出一种容量和时延感知的路由算法,根据链路分组到达率进行链路容量计算,合理分配资源,能够支持较高的负载且时延较低,但其资源利用率较低。文献[14]将最坏播放时延作为视频传输质量评价指标,针对非热点用户提出一种批量处理广播机制,在节约资源的同时保证了热点用户的需求。文献[15]提出一种 QoS 感知的视频业务传输机制,利用线性预测算法和媒体传输质量评价业务性能,实时地反映当前的网络状况,合理分配资源,保障视频业务的传输。上述机制主要将网络吞吐量、分组丢失率、网络时延作为视频业务传输质量评价标准,然而基于 QoS 的评价参数只反映了网络的传输状况,无法反映用户对视频业务的可接受程度。

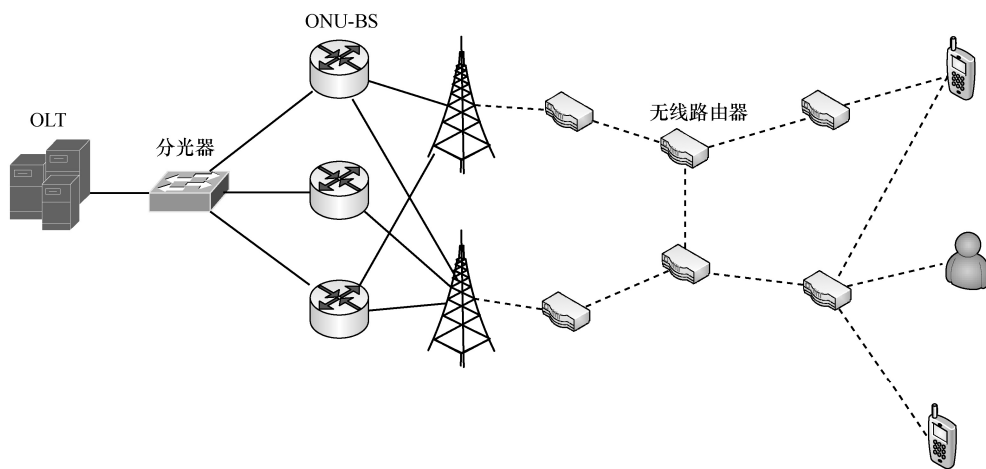


图 1 FiWi 的典型结构

针对上述问题, 本文在 FiWi 架构下提出一种 QoE 感知的视频分发机制 (QAVDM, QoE-aware video distribution mechanism)。根据无线链路状态以及用户请求, 量化业务交互过程中用户的主观体验; 使用向量粒子群算法 (VPSO, vector particle swarm optimization algorithm) 为每层视频业务分配合适的传输速率; 利用光域 ONU 与无线域基站连接状态计算 ONU 的匹配程度, 并获知 ONU 的剩余传输能力; 最后, 选择匹配度高、可用带宽充足的节点传输视频业务。

2 QoE 感知的链路速率自适应控制

QoE 是指用户对应用或业务的质量和性能的综合主观感受, 反映用户对业务的可接受程度^[16]。统计发现, 在不考虑视频内容和长度的情况下, 用户观看视频的持续时间可以间接反映用户对该视频的满意程度。因此, 根据不同的网络状态, 通过持续观看时间自适应地调整链路的传输速率, 可以有效地保证用户 QoE。为了达到这一目的, 首先, 根据链路状态信息及 SVC 视频流的传输特性选取影响持续观看时间的主要因素; 其次, 通过这些因素, 制订以持续观看时间为目标的用户满意度函数, 评估用户 QoE; 最后, 利用向量粒子群算法对函数进行优化以得到当前网络状态下的最佳视频传输速率。

2.1 QoE 参数选取

如前所述, SVC 格式的视频业务分为一个 BL 和 $N-1$ 个 EL, 第 k 层视频所选择的调制编码方式 (MCS, modulation and coding scheme) 用 MCS_k 表示, 不同的调制方式所需带宽及可靠性不同。大量研究表明, 当接收端缓存区存储的数据低于播放门限时, 视频将产生重缓冲事件, 引发播放中断, 严重影响用户 QoE; 网络传输能力的不足, 导致提供的视频质量不能满足用户的期望质量, 也会降低用户的 QoE。因此, 本文使用中断缓存率以及播放质量接受度确定 QoE 值。所用部分参数如表 1 所示。

1) 中断缓存率

FiWi 的后端光域具有传输稳定、带宽资源丰富等特点, 而前端无线域易受环境因素、噪声干扰、传输距离等影响, 无线链路相比于光链路传输性能存在不足, 因此, 无线链路的质量对视频业务的传输起着主导作用, 本文考虑无线链路对于视频传输

表 1 符号定义

符号	意义
$SINR_{i,k}$	链路 i 中第 k 层信噪比
BW_k	第 k 层业务所需带宽
r_k	第 k 层业务发送速率
ζ_k	第 k 层业务分组丢失率
$Data_{avg}$	平均接收速率
TH_{frag}	链路分配阈值
S_k	第 k 层业务成功概率
PL_{avg}	平均播放速率
C	视频播放门限
∂	视频中断门限
$Buff_t$	中断缓存时间
$Play_t$	平均播放时间
BR	中断缓存率
r	用户请求速率

的影响。对于链路 i 中的第 k 层视频内容来说, 由于 SVC 编码方法中不同层可以使用不同的调制编码方式, 因此, 其他层视频的传输会对本层业务产生干扰, 且不同链路的传输对本链路也有影响, 从而对本层视频的干扰噪声主要来自 3 个方面: 链路干扰、层间干扰、高斯白噪声。用 $H_{i,k}$ 表示第 k 层数据在链路 i 中的发射功率, $L_{i,k}$ 表示第 k 层数据在链路 i 中的路径损耗, 则第 k 层数据的信噪比如式(1)所示。

$$SINR_{i,k} = \frac{H_{i,k}}{L_{i,k} + \sum_{j \neq i} \sum_k \frac{H_{j,k}}{L_{j,k}} + \sum_{z \neq k} \frac{H_{i,z}}{L_{i,z}} + N_0} \quad (1)$$

对于链路 i 来说, 可根据香农定理获知第 k 层数据所需要的带宽, 如式(2)所示。

$$BW_k = \frac{r_k}{\text{lb}(1 + SINR_k)} \quad (2)$$

其中, r_k 表示第 k 层视频业务的发送速率, 发送速率大小取决于这层视频业务所选的 MCS。

视频业务的传输需要接收端能够稳定回放所接收的视频内容, 数据分组丢失会导致接收端不断向节点申请重传, 不仅占用额外的网络资源, 也造成了部分数据的冗余传输, 降低有效数据的接收率。令 λ_k 表示第 k 层视频的输入流码率, 由于光域与后端无线域的传输能力有差异, 为使数据转发速

率与前端设备传输能力相匹配,在 ONU-BS 处会缓存超过前端设备处理能力的的数据,直到拥有可用资源时再传输,以避免不必要的分组丢失和网络拥塞。因此,第 k 层业务的分组丢失率为

$$\zeta_k = \frac{\lambda_k t - r_k t - B_k}{\lambda_k t} \quad (3)$$

其中, B_k 表示第 k 层数据在 ONU-BS 处的缓存大小。进而可获知视频的平均接收速率为

$$Data_{avg} = \sum_{k=1}^N r_k (1 - \zeta_k) \quad (4)$$

链路的传输能力有限,当数据分组大于链路的最大传输单元时,系统就会将该数据分组分解为足够小的片段进行传输。链路的分片阈值用 TH_{frag} 表示,由链路连接类型和节点的处理能力确定,为使链路的数据传输效率太低,在无线链路中一般设置为 1 500 B。同时,目前网络多媒体应用大多使用基于 TCP 的 Flash 技术,如 YouTube 和优酷等。TCP 是一种可靠的传输协议,能够有效保证视频业务的可靠传输,因此,为了在动态变化的网络环境下保证用户的 QoE,本文在 TCP 下研究视频的传输问题。考虑视频业务的特殊性,必须在所有分片传输的数据分组都传输成功以后,视频数据才能正确接收。

则在单位时间内第 k 层的数据会分成 $\left\lceil \frac{r_k}{TH_{frag}} \right\rceil$ 个片段,第 k 层数据的传输成功概率为

$$S_k = (1 - \zeta_k)^{\left\lceil \frac{r_k}{TH_{frag}} \right\rceil} \quad (5)$$

采用 SVC 编码的视频质量取决于终端所能解码的视频层数,并且高层数据对低层数据有依赖性,增强层 EL 要想成功解码,则基础层数据必须正确接收。视频的播放速率 PL_{avg} 反映用户所能观看的视频质量,也可以表示从缓存区中消耗视频数据的速率,考虑网络状态对其产生的影响,视频的平均播放速率为

$$\begin{aligned} PL_{avg} &= r_1 (1 - \zeta_1)^{\left\lceil \frac{r_1}{TH_{frag}} \right\rceil} + \\ & r_2 (1 - \zeta_1)^{\left\lceil \frac{r_1}{TH_{frag}} \right\rceil} (1 - \zeta_2)^{\left\lceil \frac{r_2}{TH_{frag}} \right\rceil} + \dots + \\ & r_k (1 - \zeta_1)^{\left\lceil \frac{r_1}{TH_{frag}} \right\rceil} \dots (1 - \zeta_k)^{\left\lceil \frac{r_k}{TH_{frag}} \right\rceil} \\ &= \sum_{k=0}^N r_k \prod_{j=0}^k S_j \end{aligned} \quad (6)$$

当接收端缓存区数据量低于播放门限时,视频会中断播放进入重缓存状态,直到数据缓存到视频播放条件后重新播放。研究表明,发生视频中断时缓存区的数据量并不是完全等于 0,而是约为 0.5 s 视频数据量(用 ϑ 表示,则 $\vartheta = 0.5 PL_{avg}$);当缓存区数据量累积到 1.9 s 的视频数据量(用 C 表示,则 $C = 1.9 PL_{avg}$)时,视频可以再次恢复播放^[17]。令 $Buff_T$ 表示一次中断到重新播放的中断缓存时间,如式(7)所示。

$$Buff_T = \frac{C - \vartheta}{Data_{avg}} = \frac{1.4 PL_{avg}}{Data_{avg}} \quad (7)$$

视频播放开始时,用户首先对视频数据进行缓存,直到缓存容量达到播放所需的播放门限 C 后,视频播放过程启动。在播放过程中,接收端以 $Data_{avg}$ 的速率从网络接收数据,以 PL_{avg} 的速率向用户提供视频业务,如果视频的接收速率小于平均播放速率,则随着视频的播放,缓存区的数据会一直减小,当缓存区容量达到中断门限 ϑ 时,中断播放进入重新缓存,即出现视频“卡顿”。若播放速率远大于接收率,则会不断进入播放—中断的过程,势必会增加视频的中断缓存时间;反之,若网络所提供的传输速率比播放速率大,则不会因缓存容量不足而发生重缓冲,用户就能持续观看视频业务,则相应的中断缓存时间就会减小。因此,在一次播放到中断的周期内,视频业务的平均播放时间 $Play_T$ 可以表示为缓存容量从 C 消耗到中断门限 ϑ 的时间,如式(8)所示。

$$Play_T = \begin{cases} \frac{C - \vartheta}{PL_{avg} - Data_{avg}}, & Data_{avg} \leq PL_{avg} \\ \infty, & Data_{avg} > PL_{avg} \end{cases} \quad (8)$$

视频业务需要持续地占用较大的网络带宽,在多业务共同传输的 FiWi 中,很难保证给予满足视频业务需求的资源,若接收端的播放速率大于网络提供的传输速率,就会消耗缓存区数据,达到中断条件后中断播放。令中断缓存率 BR 表示视频持续播放时间与中断缓存时间的比值,可以反映用户在观看过程中产生中断的时间比例,如式(9)所示。

$$\begin{aligned} BR &= \frac{Buff_T}{Play_T + Buff_T} \\ &= \begin{cases} 1 - \frac{Data_{avg}}{PL}, & Data_{avg} \leq PL_{avg} \\ 0, & Data_{avg} > PL_{avg} \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

2) 视频质量接受度

网络可提供的播放速率与当前网络负载、链路质量等物理因素有关, 如果网络所提供的播放速率与用户期望的播放速率差异过大, 也会对用户体验产生较大的影响。令 r 表示用户的请求速率, 一般地, 请求速率 r 可以利用特定的概率密度函数 $f(r)$ 表示, 其中 $r \in [r_0, r_{\max}]$, r_0 、 r_{\max} 分别表示请求速率的最小值和最大值。用户的请求速率反映用户主观的期望视频质量, 不受其他用户及网络因素的影响, 并且在区间内的取值概率均相等, 所以请求速率服从均匀分布^[18], 则 $f(r)$ 满足式(10)所示概率密度函数。

$$f(r) = \frac{1}{r_{\max} - r_0}, r \in [r_0, r_{\max}] \quad (10)$$

韦伯费克内定律指出用户对外界环境的评价是主观期望的对数函数^[19], 普遍适用于视觉、听觉、触觉等领域。本文将这一定律引用到用户对视频质量的评价中来, 由于用户的感受是非线性的, 难以从数量上进行测定, 但是通过用户请求速率定量地测定用户的接受程度是可行的。为使播放速率与请求速率满足一个近似的单调变化关系, 同时缩小两者间的绝对值差异, 建立一个对数函数 $Q(PL_{\text{avg}}, r)$, 表示视频质量的接受度, 如式(11)所示。

$$Q(PL_{\text{avg}}, r) = \alpha \ln \frac{\beta PL_{\text{avg}}}{r} \quad (11)$$

其中, α 、 β 是调节因子, α 取值范围为 0.5~1, 与所选择视频的类型有关, β 表示单位帧的平均数据量, 如式(12)所示。

$$\beta = \frac{\sum_{k=1}^N r_k}{FPS} \quad (12)$$

2.2 用户满意度评估

ONU-BS 作为前端无线网络的接入点, 完成无线域与光域的数据承载, OLT 根据 ONU-BS 申请状态为每个 ONU-BS 分配相应的链路资源。令 BW_j 表示 OLT 为 ONU-BS_{*j*} 分配的总链路带宽, 根据式(2)可知在不同 MCS 下第 k 层视频流传输所需链路带宽。根据网络实际情况, 该业务所需要的带宽应该小于或等于 ONU-BS 所分配的总带宽。为了尽可能地节约网络资源, 可以利用 SVC 视频不同层的重要性, 为不同层的视频流选择恰当的 MCS, 例如, 为基本层选择一个传输较慢的 MCS 以保证视频的

可靠传输; 为增强层选择一个传输较快的 MCS 以节约网络资源。

用户在观看视频的过程中, 若视频的中断缓存率较高, 则视频产生中断的时间较长, 从而会影响用户对于视频观看的体验; 用户的请求速率反映用户所期望的视频质量, 若网络所提供的播放速率不能满足用户的期望质量, 也会对用户的 QoE 产生影响。由于用户的体验度是用户对业务的主观评价, 难以确定, 但是用户观看的持续时间可以间接反映用户对该业务的满意度。因此, 本文建立用户满意度函数 U_i , 定义为用户 i 观看视频的持续时间, 即用户平均观看时间越长, 表明用户对这个视频的满意度越高, U_i 如式(13)所示。

$$U_i = T_{\text{full}} e^{-BR} \alpha \ln \frac{\beta PL_{\text{avg}}}{r} \\ \text{s.t. } \sum_{k=1}^N BW_{ik} \leq BW_{ji} \quad (13)$$

约束函数表示视频业务的总带宽应该小于或等于 ONU-BS_{*j*} 为用户分配的带宽。 T_{full} 表示视频的总播放时间, 与用户申请的视频内容有关。

3 链路速率自适应算法

为使播放速率尽可能地满足用户需求, 除了提高每层业务的可靠性外, 还应选择更合理的 MCS, 但根据香农定理, 传输速率越快, 消耗的带宽资源越多。在资源有限的情况下, 不同视频层的传输速率是相互制约、相互冲突的, 即一个增大另一个会减小, 从而对满意度产生极大的影响。SVC 视频的每一层资源部署是一个离散解集。由于粒子群算法具有计算速率快、便于移植等优点, 能够避免局部最优解, 用于产生高性能的解决方法。本文利用基于向量粒子群算法, 在网络资源有限的情况下选择最优 MCS, 使用户的 QoE 性能达到最优状态。

3.1 单用户链路自适应控制

VPSO 中每一个可用方案用一个粒子表示, 每个粒子是 N 维向量, 具有位置和速度 2 个特征, 粒子当前位置所对应的目标函数值, 即该粒子的适应度值。一个 SVC 视频业务一共有 N 层数据, 则第 i 个粒子的当前位置 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iN})$ 表示一种视频分配方案, 其中的每一个元素 x_{ik} 表示第 k 层视频业务所选的 MCS; 第 i 个粒子当前搜索的最优位置用

$PB_i = (pb_{i1}, pb_{i2}, \dots, pb_{iN})$ 表示, 整个粒子群搜索出的最优位置用 $GB = (gb_1, gb_2, \dots, gb_N)$ 表示。在迭代过程中, 下一时刻的粒子速度受到粒子当前位置、该粒子所搜索到的最优位置以及粒子群搜索到的最优位置影响。粒子更新速度与下一时刻位置的计算方法如式(14)和式(15)所示。

$$v_{ik}(t+1) = \mu v_{ik}(t) + \tau_1 rand \cdot (pb_{ik}(t) - x_{ik}(t)) + \tau_2 rand \cdot (gb_{ik} - x_{ik}(t)) \quad (14)$$

$$x_{ik}(t+1) = x_{ik}(t) + v_{ik}(t+1) \quad (15)$$

其中, μ 表示该粒子的惯性常数, τ_1 、 τ_2 是权重参数, 用以调节自身所搜索的最佳位置与全局最佳位置的权重关系, $rand$ 是取值范围在[0,1]的随机常数。

在调度过程中, 由于用户间的链路质量、请求状态的不同, 同时考虑多个用户请求会使计算复杂度呈指数级增长。因此, 本文先考虑单用户的视频调度策略, 使用式(13)作为适应度函数评价粒子群中的每个粒子, 通过迭代方式选择最优的分配组合, 对函数进行优化。然而适应度函数受到链路带宽的限制, 直接使用式(13)会产生许多粒子适应度高但不满足约束条件的情况。因此, 需要对适应度函数进行松弛。考虑限制条件的影响, 本文设计了动态变化的惩罚函数 P , 当粒子为每一层视频选择好 MCS 后, 计算传输所有视频层消耗的带宽 BW_1 , 若其大于该用户的链路带宽, 则在适应度函数后减去非负的惩罚函数项 $P(BW_1 - BW_{ji})$, 当 $BW_1 - BW_{ji} < 0$ 时, 惩罚函数为 0, 即不惩罚; 消耗的网络带宽幅度比链路带宽越大, 惩罚函数也会按比例增大。本文所设计的惩罚函数如式(16)所示, 适应度函数如式(17)所示。

$$P(BW_1 - BW_{ji}) = \begin{cases} 0, & BW_1 - BW_{ji} < 0 \\ e^{(BW_1 - BW_{ji})}, & BW_1 - BW_{ji} \geq 0 \end{cases} \quad (16)$$

$$C_i = T_{full} e^{-BR} \alpha \ln \frac{\beta PL_{avg}}{r} - P(BW_1 - BW_{ji}) \quad (17)$$

根据上述算法和适应度函数选择, 部署步骤如下。

步骤 1 部署策略初始化。确定所选的 MCS, 本文一共选择 4 种不同的 MCS: BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM。对应的编号分别为 1~4。假设不传输也是一种调制策略, 编号为 0, 则一层数据可选择 5 种调制方式。每种调制方式代表不同的传输速率以及可靠性。然后, 随机产生 O 个

粒子, 每个粒子是一个 N 维的向量, 限制迭代次数为 L 。

步骤 2 粒子序列更新。利用生成的适应度函数(17)对种群中的粒子进行评价, 适应度值越大的粒子表示在这种部署方案下用户的 QoE 性能越好。根据 SVC 视频业务的层间依赖关系, 若某一增强层成功解码, 则比这一层低的视频层数据必须成功接收; 若低层没有传输(即策略编号为 0), 那么比这一层高的其他层数据即使接收也不能成功解码, 本文假设这种情况与没有传输性质相同, 例如, 迭代过程中某粒子序列为 (1,0,2,...,4), 由于第一增强层没有发送, 因此, 后续层即使数据接收也不能解码, 所以调整该粒子序列为 (1,0,0,...,0)。然后, 对该粒子重新计算适应度。

步骤 3 实现粒子群的优化。本文使用式(14)和式(15)对粒子的位置和速度进行更迭, 获得更优的视频调度策略。在迭代过程中用个体极值 PB_i 表示粒子 i 当前迭代下的最优位置, 若本次迭代后的粒子适应度值比个体极值的适应度值大, 则用这次迭代的位置代替个体极值, 否则, 个体极值不更新。同理, 整个粒子群的全体极值 GB 表示截至当前迭代下的最佳位置, 若本次迭代第 i 个粒子的个体极值大于全体极值, 则用该粒子的位置代替全体极值, 否则, 全体极值不更新。

步骤 4 最优解选取。随着粒子速度和位置的不断变化, 粒子的速度和移动轨迹受到自身个体极值和整个粒子群的全局极值的影响, 使所有粒子朝着目标函数的方向趋近, 若经过第 k 次迭代后粒子的全局极值适应度 $U_i(GB_k)$ 相对于迭代之前的全局极值变化幅度小于某个既定范围 Δ , 则表示该极值已经十分接近最优极值, 停止迭代, 其停止计算式为

$$GB^* = GB_k, \frac{U_i(GB_k)}{U_i(GB)} \leq \Delta \quad (18)$$

若迭代过程满足上述过程则停止迭代, GB^* 为停止迭代时刻粒子最优位置, 即本文所选择的最佳视频分层调度方案, 若没有出现上述情况, 则重复以上步骤, 直到达到最大的迭代次数。

所提出的 SVC 视频部署策略如算法 1 所示。

算法 1 SLAC 算法

- 1) 初始化: O 、 N 、 L
- 2) for($i=1; i \leq M; i++$)
- 3) {
- 4) for($j=1; j \leq N; j++$)

```

5) {
6) 生成初始种群
7) }
8) }
9) while(iteration<=L; iteration++)
10) {
11) 计算

$$C_i = T_{full} e^{-BR} \alpha \ln \frac{\beta PL_{avg}}{r} - P(BW_1 - BW_{ji})$$

//计算粒子适应度
12) 更新粒子序列
13) 计算种群个体极值与全局极值 (PB, CB)
14) 更新粒子速度(vik)
15) 更新粒子位置(xik)
16) 更新粒子适应度
17) if( $\frac{U_i(GB_k)}{U_i(GB)} \leq \Delta$ )
//判断极值变化
18) GB* = GBk
19) end
20) else
21) 更新 C, 重复步骤 12)
22) end
23) }
    
```

3.2 多播组用户链路自适应控制

视频传输示意如图 2 所示。对于多播 SVC 视频业务来说, 需要保证组内每个用户能够从业务中得到较好的 QoE。由于用户间的链路质量以及请求状态不同, 为了满足多播组用户需求, 传统方法是选取该组中链路质量最差的用户作为这一多播组的传输标准, 这种方法可以保证每个用户都能成功接收业务, 但是对于链路质量较好的用户而言, 不能充分利用链路资源, 会造成部分资源的浪费。由图 2(a)可以看出, 若考虑该组中链路质量最差的用户, 虽然可以保证这组所有用户都能接收 3 层视频业务, 但是对于链路质量较好的用户 2, 由于其传输速率较快, 在成功接收数据后需等待用户 1 接收完成后才能进行后续业务的传输, 资源浪费严重, 同时会降低本用户可接收的视频质量。因此, 用户可以根据自身的网络环境选择接收最佳的视频层数, 可以保证视频的传输质量, 从而提高组内用户的 QoE。

鉴于上述问题, 本文提出组用户链路控制方法, 平均考虑整个组用户的满意度。ONU-BS 首先搜集组用户的请求及链路状态信息, 根据链路的 SINR 将用户降序排列。然后对质量最差的用户 i 使用 SLAC 算法, 获知该用户的最优解集及其所传输的视频层数 K 。计算该状态下所用的带宽, 用 $\sum_{k=1}^K BW_k$ 表示:

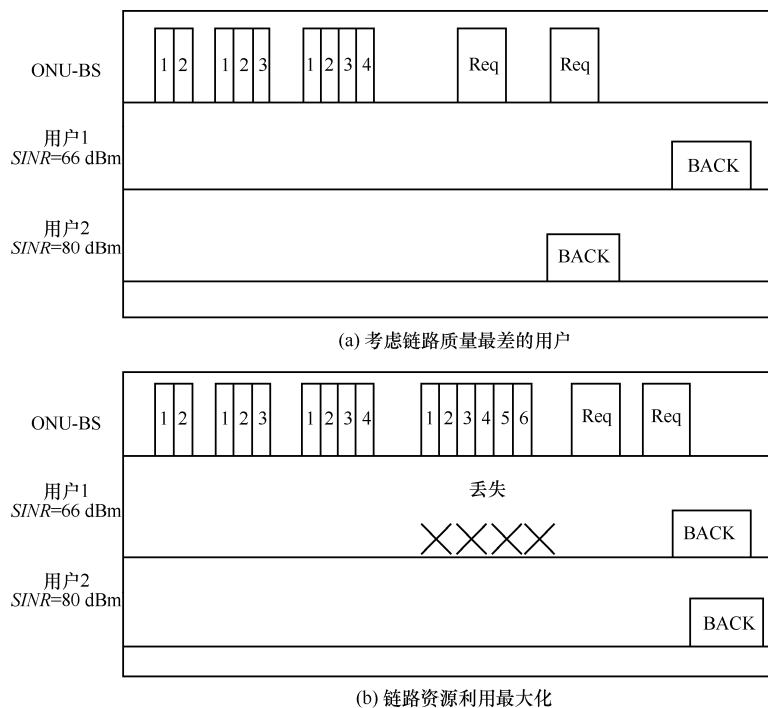


图 2 视频传输示意

计算传输下一层视频数据所需带宽, 用 BW_{K+1} 表示。考虑下一个用户 $i+1$, 若该用户的剩余链路带宽 $BW_{ji+1} - \sum_{k=1}^K BW_k > BW_{K+1}$, 则链路可以传输更高层的数据, 因此, 在保证前 K 层数据传输方式不变的情况下, 对该用户使用 SLAC 算法分配剩余的链路带宽。直到所有视频层都分配了传输方式或者考虑完整个组用户为止。在图 2(b)中, 当用户 2 的剩余带宽可以满足第 4 层数据的传输时, ONU-BS 会为该多播组传输 4 层数据, 虽然用户 1 由于传输能力受限不能接收该层数据, 但用户 2 可以成功接收, 提高了用户 2 的 QoE。部署策略如算法 2 所示。

算法 2 MULC 算法

- 1) 初始化: grp_size、max_layer
- 2) $K=0$
- 3) 记录每个用户的 SINR 值
- 4) 根据 SINR 对用户排序
- 5) for ($r=\text{SINR}$ 值最低的用户; ($r < \text{grp_size}$ && $K < \text{max_layer}$); $r++$)
 - 6) {
 - 7) 为第 r 个用户运行 SLAC 算法
 - 8) K =第 r 个用户的最优分配
 - 9) 计算 $\sum_{k=1}^K BW_k$ 、 BW_{K+1}

//计算所需带宽和更高层带宽
 - 10) if($BW_{r+1} - \sum_{k=1}^K BW_k > BW_{K+1}$)

//判断剩余带宽是否满足传输需求
 - 11) {
 - 12) 重复步骤 6)
 - 13) else
 - 14) end
 - 15) }
 - 16) service_layer[r]= K

//整个多播组传输的视频层数
 - 17) }

4 基于节点传输能力的视频带宽分配

由于光网络与无线网络的传输能力差异较大, FiWi 的大量数据在 ONU 处积压, 将使 ONU 处负

载不断增大, 导致部分 ONU 因负载过大而发生网络拥塞产生负载失衡, 最终增大数据传输时延以及分组丢失率。因此, 为保证视频业务的可靠传输, 需要根据节点传输能力为其进行业务分配。本文首先利用 ONU 的连接状态计算 ONU 节点的匹配度, 进而根据 ONU 当前负载状态记录每个节点的剩余传输能力, 最后通过递归选取方法, 选择满足要求的 ONU 传输该视频业务。

4.1 节点匹配度

光域 ONU 与无线域 BS 通过无线网关节点连接, 若 ONU 分配多个网关节点便可以与多个 BS 连接, 同理 BS 也可以与多个 ONU 相连。对于多播视频业务, 若多个 BS 同时申请相同的视频业务, 则在网络中会生成相应的多播路由表, 不同的视频业务对应不同的多播路由表。节点匹配度 R_j 反映在视频业务 q 中 ONU $_j$ 与多播组 BS 的关联程度, 计算式为

$$R_j = \frac{N_j}{N_q} \quad (19)$$

其中, N_q 表示申请业务 q 的 BS 总数, N_j 表示 ONU $_j$ 所连接的 BS 数量。 R_j 越大, 表示 ONU $_j$ 的匹配程度越高, 使用该 ONU 传输可以使多个 BS 同时接收业务, 可以提高网络带宽利用率, 同时减少数据的冗余传输。

4.2 节点传输性能

ONU 节点的传输能力与设备的处理能力以及当前负载有关, ONU 负载越高, 排队时延越大, 对实时类业务的影响越严重。定义 ONU 的最大传输容量为 M , 则在任意时间间隔 $(t_0, t_0 + \tau)$ 内的传输数据量为 $Mu(t_0, t_0 + \tau)$, $u(t_0, t_0 + \tau)$ 表示在时间 τ 内的带宽平均使用率, 则在时间 t_0 的节点可用容量 $A(t_0)$ 定义为节点未使用的带宽, 如式(20)所示。

$$A(t_0) = M(1 - u(t_0, t_0 + \tau)) \quad (20)$$

由于视频传输持续时间较长, 若某时刻的可用带宽不能满足需求, 则会对业务产生一个较大的时延抖动, 影响用户的观看体验。因此, 为了保证整个过程中的可用带宽均满足业务需求, 选取 H 个时刻采样, 取其中最小的可用容量作为该节点的节点可用容量 A , 如式(21)所示。

$$A = \min_{1, \dots, H}(A(t_0)) \quad (21)$$

数据分组传输到 ONU 节点时,由于 ONU 的负载状态不同,发送数据分组的时延也不同,数据转发过程中的时延主要包括以下 3 个方面。

1) 传播时延

传播时延 (PD, propagation delay) 是指从源节点发送数据开始,到目的节点收到数据之间的时间间隔,由于 ONU 节点与 BS 之间的距离较近,因此, PD 很小,可以忽略不计。

2) 传输时延

传输时延 (TD, transmission delay) 是指将数据发送到信道中传输所需的时间,主要与数据分组大小以及节点的传输容量有关,如式(22)所示。

$$TD = \frac{1}{\omega M} \quad (22)$$

其中, $\frac{1}{\omega}$ 表示数据分组的平均长度。

3) 排队时延

排队时延 (QD, queuing delay) 即数据分组在节点内部等待发送时的排队时延,可通过式(23)计算。

$$QD = \frac{\rho}{\omega M(\omega M - \rho)} \quad (23)$$

其中, ρ 表示数据分组的平均大小。

因此,数据分组的单链路时延 D 可由式(24)计算。

$$D = PD + TD + QD = \frac{1}{\omega M - \rho} \quad (24)$$

4.3 节点带宽分配机制

根据接收端设备的性能以及用户的请求,需要确定初始传输的视频层数,用户开始接收数据,BS 就会对视频业务的 QoE 进行评估并反馈给 ONU,从而 ONU 根据反馈信息对视频的传输做出调整。但在这个过程中存在以下 2 个问题。

1) 多个满足条件的 ONU 同时传输相同的视频业务,会导致网络中的数据冗余传输,从而降低网络的带宽利用率。

2) 视频业务带宽需求大,若 ONU 可用带宽不足,则会缓存部分数据,数据分组的排队时延 QD 将明显增大,进而使链路时延 D 增加,甚至产生数据分组丢失。

为避免时延性能的恶化,同时考虑冗余传输带来的网络拥塞,需要根据节点能力对业务带宽进行合理分配。本文首先利用 ONU 与后端基站连接情况计算出 ONU 的匹配程度,然后,对节点进行降

序排列,选取匹配度更高的 ONU;计算节点的传输能力以及后端用户的业务申请状态,使用递归选取的方式为该节点分配满足节点传输能力的传输带宽,解决因带宽资源限制对视频质量造成的影响,提高视频传输质量。

首先,根据节点匹配度选取匹配度最高的 ONU,如果存在多个 ONU 匹配度相同的情况,则随机选取,并计算该 ONU 的可用带宽。紧接着,BS 根据用户的请求信息以及链路状态信息,得到满足用户 QoE 的传输状态,不同 BS 的链路质量存在差异,因此,对于同一层的视频业务来说,不同 BS 会根据自身的链路信息以及用户请求选取不同的 MCS,根据香农定理可计算出不同 MCS 下的业务带宽需求,并且报告给与之相连的 ONU。为了满足整个多播组的带宽需求,定义函数 MB_k ,表示对第 k 层视频来说满足多播组用户的最大带宽,如式(25)所示。

$$MB_k = \max_{1, \dots, N_j} (BW_k) \quad (25)$$

再对比 ONU 的可用带宽与该业务所需要的最大带宽,若 $A_j \geq \sum_{k=1}^N MB_k$,则该节点的可用带宽可

以满足整个多播用户的带宽需求,使用该节点向所连接的 BS 传输整个完整的视频业务,同时计算该链路的链路时延 D ;反之,则不能满足整个视频的传输,然后计算传输 $N-1$ 层视频所需带宽,若满足 $\sum_{k=1}^N MB_k \leq A_j \leq \sum_{k=1}^{N-1} MB_k$,则该 ONU 可以有效满足传输 $N-1$ 层的视频数据,该 ONU 为下行 BS 传输 $N-1$ 层的视频数据,如不满足,则继续通过上述算法迭代,直到计算出满足要求的视频层数 Z 且剩余带宽不能传输 $Z+1$ 为止。

对于该视频业务而言,仍剩下 $\sum_{k=Z+1}^N MB_k$ 没有传输,根据节点匹配度选择次优一级的 ONU 分配带宽,重复以上过程,直到为该视频业务找到最合适的视频传输策略或遍历该多播组 BS 中的所有 ONU。

5 数值结果分析

本文使用 NS2 仿真平台对所提 QAVDM 算法进行验证,并与文献[16]提出的 ILA 算法以及文献[20]提出的 DSS 算法对比。ILA 算法利用业务公平性约束以及链路使用情况对视频传输速率进行调整,在

链路状态变化时保证视频业务的传输性能。DSS 算法采用节点传输能力控制，根据节点所服务的用户数量动态地分配节点容量，以保证多用户的可靠传输。仿真参数如表 2 所示。

表 2 仿真参数设置

参数设定	参数值
网络区域	500 m×500 m
OLT 数量/个	1
ONU-BS 数量/个	8
种群规模/个	20
迭代次数	40
惯性权重 μ	0.5
加速因子 τ_1 、 τ_2	2、2
调节因子 α 、 β	0.8、400

使用一个 4 层速率 10 Mbit/s 总播放时间为 60 s 的 SVC 视频为例，考虑单用户以及多用户情况，利用所提机制对用户满意度以及业务 PSNR 值的性能分析，PSNR 值是一个客观评价图像质量的标准，是原图像与被处理图像的均方误差，PSNR 值能反映所接收的视频质量。本文假设用户请求速率分别对应视频层的传输速率，用户期望观看 2 层的视频内容，则该用户的请求速率为 2 656 kbit/s。所选视频参数如表 3 所示。

表 3 SVC 视频参数

层数	分辨率	帧速率/(fbit·s ⁻¹)	比特率/(kbit·s ⁻¹)
0	700×500	30	1 177
1	700×500	30	1 479
2	700×500	30	2 845
3	700×500	30	5 103

5.1 不同链路质量下的业务性能

图 3 表示不同链路质量与用户满意度的关系。由图 3 可以看出，随着链路质量的提升，用户满意度整体呈上升趋势，在 SINR 较差时，提升链路质量会使满意度明显增加。同时本文所提 QAVDM 算法相比其他算法性能提高 22%左右，这主要是因为 QAVDM 根据 SVC 业务特性以及链路质量动态地调节不同层业务的传输速率，可以更合理地分配带宽资源，提高业务的缓存效率，降低因缓存不足所带来的中断播放的影响。

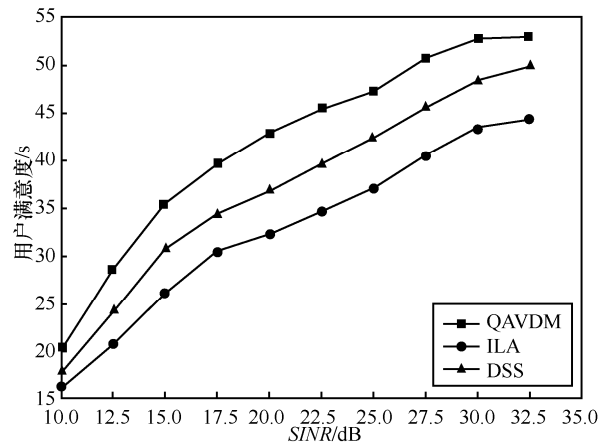


图 3 链路质量与用户满意度

图 4 反映了链路质量与视频质量的关系。由图 4 可以看出，在 SINR<17.5 dB 时，提高链路质量会对视频业务有明显的提升，原因是在 SINR 较低时，链路分组丢失率会大幅度增加，而数据分组丢失是影响视频性能的主要因素，因此，在这一阶段提高 SINR 视频质量上升明显，而在 SINR>30 dB 时，视频质量的增加趋于平稳。并且 QAVDM 算法的视频质量最优，原因是 QAVDM 可以在链路质量较差时降低视频的发送速率，以达到减小因链路质量对业务性能造成的影响，从而提高了用户接收的视频质量。

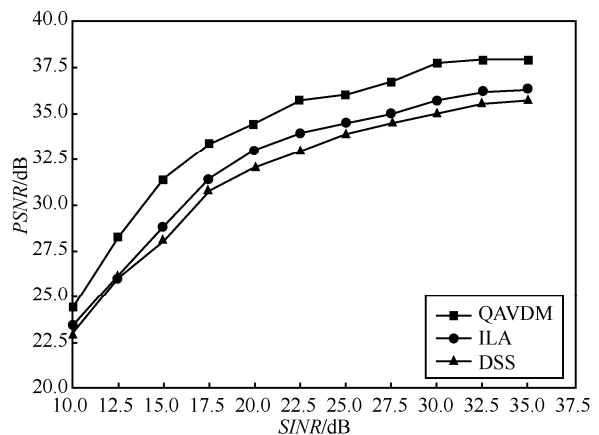


图 4 链路质量与视频质量

5.2 不同负载下的性能

业务时延也是衡量用户 QoE 的重要指标，图 5 表示不同负载下的网络时延。结果表明，在网络负载较低时，网络时延随着负载呈上升趋势，但并不明显，主要是在负载较低时，节点的可用带宽相对充足，增加负载对于网络的时延影响较小，因此 3 种机制在低负载情况下

性能大体相同。但在节点负载较大时, QAVDM 可以根据节点的剩余带宽, 选择节点匹配度更大的节点传输, 可以有效地减小网关和链路的拥塞, 从而减小了数据时延。从图 5 可以看出, 在负载较大时, QAVDM 机制时延性能一直优于另外 2 种算法, 且较另 2 种机制分别降低 25.7% 和 33.1%。

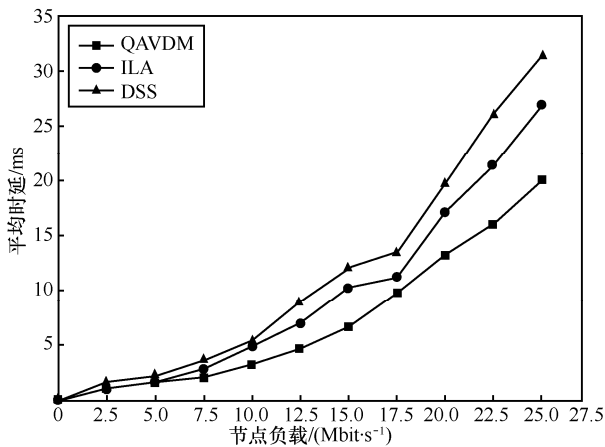


图 5 不同网络负载下业务平均时延

节点负载越高, 则相应的网络时延越大。图 6 表示平均业务时延与用户满意度的关系。结果表明, 随着网络时延的增大, 用户满意度呈下降趋势, 主要是因为视频的持续播放需要接收端能够稳定回放所接收的视频内容, 业务时延过大导致接收端不能及时解码, 从而影响视频的正常播放, 因此, 在平均时延较大时, 用户满意度下降程度明显。但在相同平均时延条件下, 本文所提机制的用户满意度相对较好, 主要是因为所提机制根据 SVC 视频层的结构特点及传输特性, 为较低层数据分配更合理的带宽, 降低了碰撞竞争产生的时延, 从而减少这部分数据的网络时延, 提高了视频连续播放的性能, 进而得到了一个较好的用户满意度。

对于视频业务而言, 时延抖动也是影响其播放质量的重要参数。图 7 反映了平均时延抖动与用户满意度的关系。由图 7 可知, 随着业务的平均时延抖动增加, 3 种机制的用户满意度均逐渐下降, 原因是在视频业务传输过程中, 由于网络干扰、网络设备性等物理因素变化导致相邻数据分组的到达时间间隔不同而发生抖动, 而抖动过大将影响视频的正常解码, 造成画面失真, 进而导致视频播放效果下降, 降低用户的满意程度。

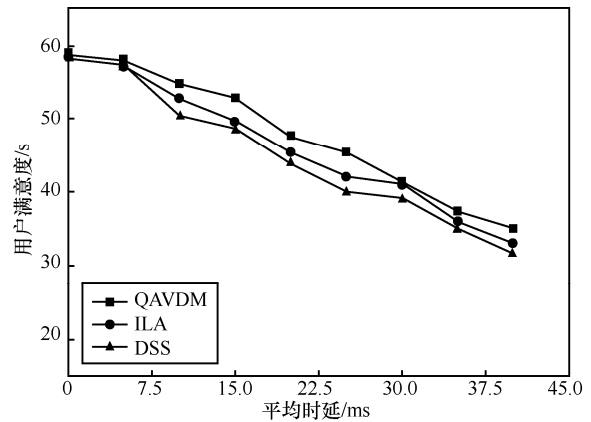


图 6 平均时延与用户满意度

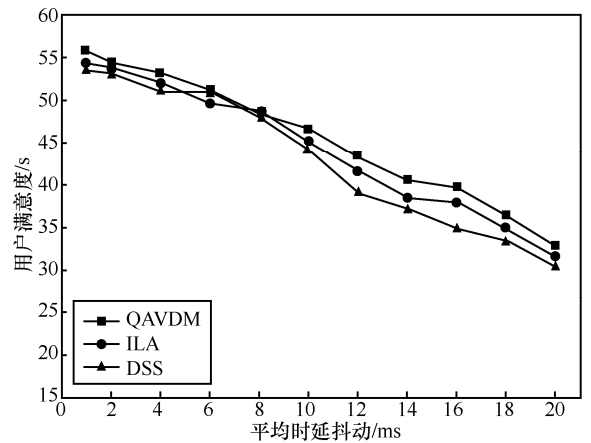


图 7 平均时延抖动与用户满意度

5.3 不同用户规模下的业务性能

仿真多播组用户规模从 2 到 10 个的业务性能, 图 8 表示了用户数量与平均用户满意度的关系。由图 8 可以看出, 随着用户数量的增多, 平均满意度呈下降的趋势, 主要原因是用户数量增大会使多个用户共同占用网络带宽, 从而对于单个用户而言, 其可用资源是相对减小的, 视频业务会因资源不足

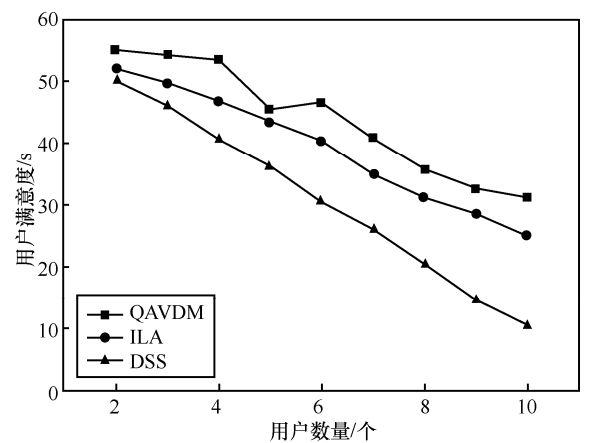


图 8 不同用户数量下的平均满意度

影响其传输性能,因此,用户对该业务的满意程度会降低。由于 QAVDM 算法不仅保证链路质量较差的用户的满意度,还能根据该用户的剩余链路资源为其分配更高层的视频数据,从而在一定程度上提高了这些用户的视频质量,因此也使整体用户的平均满意度增加。

图 9 表示不同多播组用户数量下业务的平均 PSNR 值。由图 9 可以看出,在用户数量较大时,虽然整体的性能均有下降,但是 QAVDM 机制相比其他 2 种机制能维持在较好的情况。原因是,在 DSS 机制中没有考虑视频结构的特点,仅依赖网络负载状态动态分配链路资源,因此,基础层业务会因分配资源不足,导致较大程度的时延以及分组丢失,所以该业务质量会急剧下降;而 ILA 机制虽然可以根据视频的层间重要性,为不同层的视频业务分配相应的带宽,在一定程度上可以保证用户的视频质量,但是由于用户间的链路状态的差异性,链路质量较差的用户有可能不能成功接收,所以会影响这部分用户的观看体验。QAVDM 机制综合考虑了不同用户的物理条件,利用 SVC 视频结构的优势,优先保证了物理条件差的用户的观看体验,然后,利用可用的剩余带宽,逐步地提高视频质量,因此, QAVDM 机制在用户数量较大时可以维持较好的视频质量。

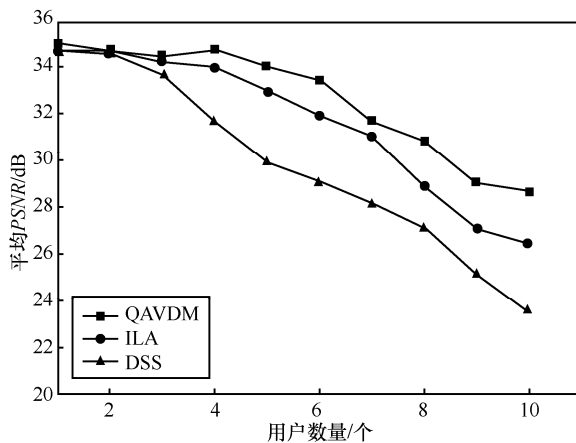


图 9 不同用户数量下平均视频质量

6 结束语

为充分利用光无线融合网络的资源,提高多媒体业务传输的性能,本文提出了一种 QoE 感知的视频分发机制。首先,利用链路状态、用户请求速率等建立合适的 QoE 量化模型;其次,利用

向量粒子群算法,以链路带宽为限制,以提高用户 QoE 为目的完成部署;最后,根据 ONU 节点的处理能力和节点匹配度,选择满足要求的路径传输,以提高网络资源利用率,进一步提高用户 QoE。仿真结果表明,本文所提方法相比于传统的视频调度策略,可以有效提高视频质量并增强用户的观看体验。

参考文献:

- [1] WU D P, HE J, WANG H G, et al. A hierarchical packet forwarding mechanism for energy harvesting wireless sensor networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(8): 92-98.
- [2] WANG R Y, LIANG A L, ZHOU C, et al. QoS-aware energy-saving mechanism for hybrid optical-wireless broadband access networks[J]. Photonic Network Communications, 2017: 1-11.
- [3] MAIER M, RIMAL B P. Invited paper: the audacity of fiber-wireless (FiWi) networks: revisited for clouds and cloudlets[J]. China Communications, 2015, 12(8):33-45.
- [4] WU D P, LIU Z Q, WANG R Y, et al. Dynamic bandwidth allocation mechanism in EPON with idle time eliminated[J]. Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 2013, 124(23): 6372-6376.
- [5] BEYRANVAND H, LEVESQUE M, MAIER M, et al. Toward 5G: FiWi enhanced LTE-A HetNets with reliable low-latency fiber backhaul sharing and WiFi offloading[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2016, PP(99): 1-18.
- [6] WU D P, YAN J J, WANG H G, et al. Social attribute aware incentive mechanisms for video distribution in device-to-device communications[J]. IEEE Transaction on Multimedia, 2017, PP(99): 1.
- [7] TU W. Efficient wireless multimedia multicast in multi-rate multi-channel mesh networks[J]. IEEE Transactions on Signal & Information Processing Over Networks, 2016, 2(3):376-390.
- [8] WANG S, CHEN S, GE L, et al. Distributed generation hosting capacity evaluation for distribution systems considering the robust optimal operation of OLTC and SVC[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(3):1111-1123.
- [9] CHUANG C C, YU Y J, PANG A C, et al. Efficient multicast delivery for data redundancy minimization over wireless data centers[J]. IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing, 2016, 4(2):225-241.
- [10] KUO W H, KALISKI R, WEI H Y. A QoE-based link adaptation scheme for H.264/SVC video multicast over IEEE 802.11[J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems for Video Technology, 2015, 25(5): 812-826.
- [11] VAN D P, RIMAL B.P, MAIER M, et al. ECO-FiWi: an energy conservation scheme for integrated fiber-wireless access networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(6): 3979-3994.

- [12] AURZADA F, VESQUE M, MAIER M, et al. FiWi access networks based on next-generation PON and gigabit-class WLAN technologies: a capacity and delay analysis[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2013, 22(4): 1176-1189.
- [13] REAZ A, RAMAMURTHI V, SARKAR S, et al. CaDAR: an efficient routing algorithm for a wireless-optical broadband access network (WOBAN)[J]. Journal of Optical Communications & Networking, 2009, 1(5): 392-403.
- [14] LI Y, DAI S F, CHANG X M. Delay guaranteed VoD services over group-based integrated fiber-wireless (FiWi) access networks with energy efficiency[J]. Optical Fiber Technology, 2015(24): 100-105.
- [15] REN D P, LL H, JI Y F. Demonstration of QoS-aware wireless protection scheme for video service in fiber-wireless access network[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2013, 124(14): 1827-1831.
- [16] FALLAH Y P, MANSOUR H, KHAN S, et al. A link adaptation scheme for efficient transmission of H.264 scalable video over multi-rate WLANs[J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems for Video Technology, 2008, 18(7): 875-887.
- [17] STAEHLE B, HIRTH M, PRIES R, et al. YoMo: a YouTube application comfort monitoring tool[C]//New Dimensions in the Assessment and Support of Quality of Experience for Multimedia Applications. 2010: 467.
- [18] ZHANG W, WEN Y, CHEN Z, et al. QoE-driven cache management for HTTP adaptive bit rate streaming over wireless networks[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2013, 15(6):1431-1445.
- [19] REICHL P, TUFFIN B, SCHATZ R. Logarithmic laws in service quality perception: where microeconomics meets psychophysics and quality of experience[J]. Telecommunication Systems, 2013, 52(2): 587-600.
- [20] KUO W H, LEE J F. Multicast recipient maximization in IEEE 802.16j WiMax relay networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(1):335-343.

[作者简介]



王汝言(1969-),男,湖北浠水人,博士,重庆邮电大学教授、博士生导师,主要研究方向为泛在网络、多媒体信息处理等。



杨衍(1992-),男,重庆人,重庆邮电大学硕士生,主要研究方向为光无线融合网络。



吴大鹏(1979-),男,黑龙江大庆人,博士,重庆邮电大学教授、博士生导师,主要研究方向为泛在网络、互联网服务质量控制等。