

多媒体系统群体行为的雾计算智能激励机制

刘璐^{1,2} 赵国庆²

(西安邮电大学通信与信息工程学院 西安 710071)¹ (西安电子科技大学通信工程学院 西安 710071)²

摘要 为了改善多媒体数据的传输效率和系统执行度,降低多媒体服务的运营成本,从多媒体系统群体行为的分析模型和演化出发,研究了一种基于雾计算的智能激励机制。首先,从单一化、分散部署与冗余健壮特征和自主管理的群体特质出发,为分布式多媒体系统建立群体行为分析演化模型,并给出了多媒体系统进行群体行为分析的演化算法。接着,根据获取的最大化系统效用,通过自组织和主动演化来调度雾服务器节点。以优化个体服务策略为目标,雾计算结合演化进程控制群体行为参与度。在此基础上,雾服务器节点逐步更新个体调度,并实时统计系统拓扑调度效应。仿真实验基于 Matlab 的网络控制系统仿真平台,部署了多媒体系统。通过 Matlab 仿真了分布式多媒体系统的拓扑与无线传输,结合 C 语言实现提出的 EMSSB(Evolution algorithm of Multimedia Systems Swarming Behavior)算法和 IIFS(Intelligent Incentive algorithm with Fog computing and Swarming Behavior)算法。仿真实验的数据均为 100 次重复时延的平均值。每次重复实验中,除了将用户发出多媒体请求的时间和次数设置为随机,其他参数均保持一致。仿真结果表明,所提激励算法在多媒体数据传输的实时性、雾节点激励有效性和用户请求响应等方面表现良好。所提激励算法可以将端到端时延缩短 45%,有效控制参与度,并根据用户请求数控制不同的参与比例,此外可以将用户响应时延和多媒体数据流传输延迟分别缩短 53%和 45%。

关键词 多媒体系统,群体行为,雾计算,智能激励

中图分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/jsjcx.181001975

Intelligent Incentive Mechanism for Fog Computing-based Multimedia Systems with Swarming Behavior

LIU Lu^{1,2} ZHAO Guo-qing²

(School of Communication and Information Engineering, Xi'an Post and Telecommunications University, Xi'an 710071, China)¹

(School of Communication Engineering, Xi'an Electronic and Science University, Xi'an 710071, China)²

Abstract In order to improve the efficiency of multimedia data transmission and system execution and reduce the operating cost of multimedia services, this paper proposed an intelligent incentive mechanism based on fog computing from the analysis model and evolution of group behavior of multimedia systems. Firstly, based on the characteristics of simplification, decentralized deployment, redundancy, robustness and self-management, an evolutionary model of group behavior analysis for distributed multimedia systems is established, and an evolutionary algorithm of group behavior analysis for multimedia systems is presented. Then, in order to maximize the system utility, the fog server nodes are scheduled by self-organization and active evolution. In order to optimize individual service strategy, fog computing combines with evolutionary process to control group behavior participation. On this basis, the fog server nodes update individual scheduling step by step, and real-time statistics the system topology scheduling effect. The simulation experiment is based on the simulation platform of networked control system of Matlab, and the multimedia system is deployed. The topology and wireless transmission of distributed multimedia system are simulated by Matlab. The EMSSB (Evolution algorithm of Multimedia Systems Swarming Behavior) algorithm and IIFS (Intelligent Incentive algorithm with Fog computing and Swarming Behavior) algorithm proposed above are implemented in combination with C language. The data of simulation experiments are the average of 100 repetition delays. In each repetitive experiment, the other parameters are consistent except that the time and number of multimedia requests are set to random. The simulation results show that the proposed incentive algorithm performs well in real-time multimedia data transmission, fog node incentive effectiveness and user request response. The proposed incentive algorithm can shorten the end-to-end delay by 45%, effectively control the participation degree, and control the different participation proportion according to the user's request. In addi-

到稿日期:2018-10-24 返修日期:2019-03-17 本文受陕西省自然科学基金项目(17B520010)资助。

刘璐(1988—),女,博士生,工程师,主要研究方向为通信工程与信息工程等,E-mail:gongongls@163.com(通信作者);赵国庆(1953—),博士,教授,博士生导师,主要研究方向为计算机网络等。

tion, the user response delay and multimedia data stream transmission delay can be reduced by 53% and 45%, respectively.

Keywords Multimedia systems, Swarming behavior, Fog computing, Intelligent incentive

随着分布式多媒体服务器集群架构的实施^[1]以及高性能网络^[2]性能保障技术的发展,多媒体服务的实时性和并发性得到了有效保障^[3]。同时,移动终端用户对多媒体服务的满意度得到了显著改善。然而,随着多媒体系统的不断扩大,如何为大规模节点的多媒体服务提供有效调度^[4],如何满足不同规模的移动终端多媒体服务用户的请求^[5],特别是进一步提高多媒体服务的用户满意度^[6],成为目前研究的主要热点。

一方面,大规模的多媒体系统分布式部署产生了多个独立的自主多媒体服务个体节点。当多个并发个体节点为用户提供多媒体服务时,其具备了群体行为的特征。文献[7]通过建模群体的集体运动,将其作为一个低维线性子空间,研究了合成数据和实际数据,分析了行为表现为低维子空间的高度区分性。文献[8]研究了配电网控制的群行为,给出了实现故障跨越的实践应用。文献[9]对机器人监控的群体行为进行了形式化描述,以最大限度地提高复杂的任务上的性能为目标,研究了自动排序机制。然而,多媒体系统的群体行为的演化,特别是拓扑的变化将对多媒体服务的实时性产生重要影响,上述文献的重点是分析群体行为和多媒体分布式系统,未对该问题进行深入研究。

另一方面,雾节点的协作与计算成为改善系统性能的有效方式。文献[10]通过改进遗传算法,将适应度判断引入到亲代变异操作中,研究了一种可以克服变异操作盲目性的雾计算调度方案。文献[11]通过定义各个组件,分析服务延迟和能量消耗,并与云计算进行比较,提出了适用于雾计算的计算范式。文献[12]研发了基于雾的智能交通系统分布式查询服务。文献[13]研发了基于雾计算的食品冷链物联网智能推理性能评价系统。文献[14]提出了支持迷雾计算的车载网络隐私保护笔名方案。文献[15]引入了分层分布式 Fog 计算体系结构,以支持未来智能城市中大量基础设施组件和服务的集成。文献[16]提出了一种基于区域协同雾计算的智能车载网络体系结构,用于处理智能城市中的大型车联网数据。在分析雾计算网络的效用和成本的基础上,文献[17]提出了基于成本效率的雾计算网络资源分配问题的双匹配策略,可以将延迟接受算法从两侧匹配扩展到三侧匹配。文献[18]通过最小化端到端延迟和响应时间,增强加速器的分析能力,使其接近网络边缘的用户设备,以提高服务质量。然而,对于如何根据多媒体服务需求特别是移动终端用户请求等参数实时调度雾节点,上述文献研究得不够深入。

综上,已有的研究重点在于多媒体系统的调度和雾计算的存储管理与部署,本文将从多媒体系统的群体行为分析与演化出发,结合雾服务器节点的参与和协作,以进一步改善实时性和系统执行效率为目标,研究激励算法。

1 多媒体系统群体行为演化模型

多个独立的个体之间进行协作与自主管理,通过有序的

集体合作和交互行为,来完成复杂环境下的高复杂度任务。这种集体行为称为群体行为,在自然界和人类社会中发挥着重要作用,例如鸟群迁徙、蚁群工作模式、早晚交通高峰等。一般而言,上述群体行为可由如下特征加以描述:

- 1) 单一化的特征表现为系统个体的功能自主性比较单一;
- 2) 分散部署与冗余健壮特征的表现是不采用集中式管理而采用分散部署,个体之间的依赖性较弱且存在具有冗余的个体;
- 3) 自主管理表现在群体特质由个体演化的自主性和分布式管理决定。

分布式多媒体系统完全具备了上述 3 个特征化描述。假设,分布在二维空间中的 n 个静态的多媒体服务器组成了一个多媒体系统。不失一般性,每个多媒体服务器可以被看作一个点或者向量,于是, $s_1, s_2, \dots, s_n \in R$ 。多媒体系统记为 $S := \text{set}\{s_1, s_2, \dots, s_n \in R\}$ 。将多媒体服务器作为个体点,服务器之间的通信路径作为边,则构成一个具有拓扑控制的多媒体系统图 $G = (V, E)$,其中,向量 V 表示分布式的多媒体服务器个体, E 表示服务器之间的通信路径,用于实现个体服务器之间的信息交互。

此时,多点之间的交互通信权重由矩阵 $Q = [q_{ij}] \in R$ 表示。为了便于分析,给出如下几种特殊情况的描述:

- 1) 第 j 个服务器与自己的通信是没有意义的,即 $q_{jj} = 0$, $i \in \{1, 2, \dots, n\}$,该描述用于避免自身闭环的无效通信。
- 2) 第 i 个服务器与第 j 个服务器的通信信道不存在,即 $q_{ij} = 0$,该描述是为了避免个体间的无效通信。
- 3) 第 i 个服务器个体与第 j 个服务器个体间的通信是有效的,即 $q_{ij} > 0$ 。在对多媒体系统的群体行为进行分析与演化的过程中主要以这种情况为主。

综上所述,一个具有群体行为的多媒体系统的演化特征如式(1)所示:

$$\begin{cases} S' = \bigcup_{\substack{i=1, j=1 \\ i \neq j}}^n f_{i,j}(S) \| s_i - s_j \| \\ f_{i,j}(S) = \frac{q_{ij}}{n^2} \sum_{\substack{i=1, j=1 \\ i \neq j}}^n l_{i,j}(d_v) \\ l_{i,j}(d_v) = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{\substack{i=1, j=1 \\ i \neq j}}^n |d_{v1} - d_{v2}|} \end{cases} \quad (1)$$

其中, S' 表示多媒体系统的群体行为特征从 S 演化而来的结果。函数 $f_{i,j}(S)$ 表示演化之前的多媒体系统的群体行为中每个个体之间的信息交互的权重与从发送端到接收端之间传输的多媒体数据之间的一致性关系。函数 $l_{i,j}(d_v)$ 表示不同服务器个体上的多媒体数据之间的依赖性关系。向量 d_v 表示在节点 V 上的多媒体数据。

图 1 给出了多媒体系统演化模型,包括若干个含有多媒

体服务器和无线接入点的通信子网,这些子网以星型拓扑连接到多媒体数据源服务器群。图2给出了多媒体系统群体行为的拓扑演化。

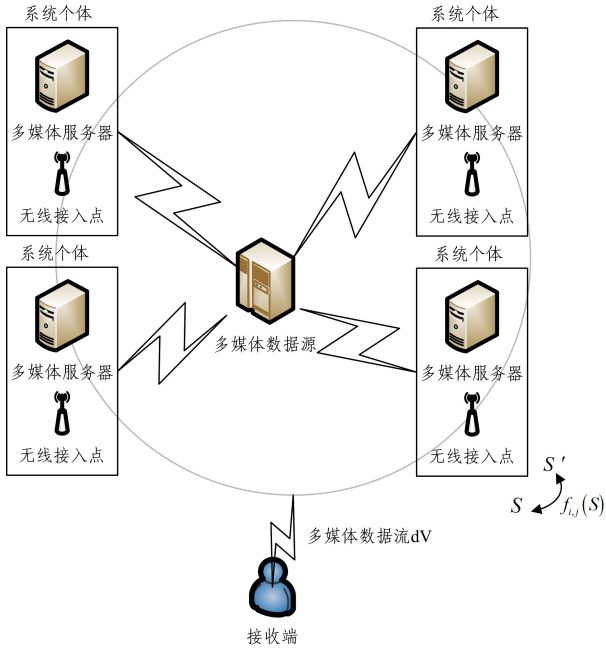


图1 多媒体系统演化模型

Fig. 1 Multimedia system evolution model

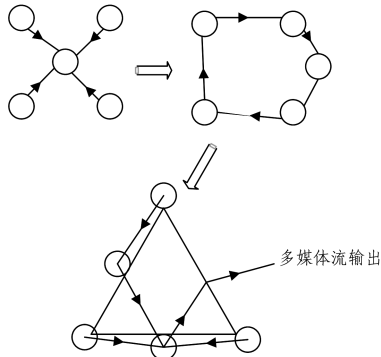


图2 多媒体系统群体行为拓扑演化

Fig. 2 Topological evolution of group behavior in multimedia systems

在图2给出的拓扑演化的基础上,以个体个数 n 和多媒体数据流 d_v 为输入,通过调用和更新 $f_{i,j}(S)$ 函数,针对图1所示的多媒体系统进行群体行为分析,输出更新后的群体特征 S' ,其复杂度为 $O(n)$ 。EMSSB(Evolution algorithm of Multimedia Systems Swarming Behavior)算法的描述如算法1所示。

算法1 EMSSB

输入:个体个数 n ,多媒体数据流 d_v

输出:更新后的群体特征 S'

1. $S \leftarrow \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$;
2. while $i < n \ \& \ j < n \ \& \ i \neq j$ do
3. $Q \leftarrow q_{ij}$;
4. end while
5. while $i < n \ \& \ j < n \ \& \ i \neq j$ do
6. $f_{i,j}(S) \leftarrow \frac{q_{ij}}{n} (l_{i,j}(d_v) + l_{i-1,j-1}(d_v))$;

7. end while
8. while $i < n \ \& \ j < n \ \& \ i \neq j$ do
9. $S' \leftarrow f_{i,j}(S)$;
10. end while
11. return S' .

2 雾计算智能激励算法

随着分布式多媒体服务的广泛推广和深入应用,其可用的领域越来越多,然而分散部署且无核心控制的多媒体网络和未知的系统群体行为,使得多媒体系统面临着个体多媒体节点的工作效率低、参与群体行为的积极性差和群体行为难控制等问题,进而多媒体服务系统的执行效率和用户满意度面临各种考验。因此,在多媒体系统的运营模式和管理方面需要更好的多媒体数据分布式存储与查询方案,以及个体节点激励算法的支撑,以保障多媒体网络的实时性、可信性和可靠性。

为了提高多媒体系统应对各种规模的用户的多言行应用需求,在图1的多媒体系统的基础上增加雾服务器节点(增加雾服务器的系统开销忽略不计),如图3所示。当多媒体服务以及系统的群体行为发生变化时,将雾服务器节点序列 $O := \{o_1, o_2, \dots, o_m\}$ 加入图2所示的拓扑演化进程。在演化过程中,新的雾服务器节点不断加入,它们通过自组织的方式进行组网。于是, m 个雾服务器节点加入演化并积极参与群体行为的概率密度函数如式(2)所示:

$$\begin{cases} f(x) = \frac{\sum_{j=1}^m xP(O_j)}{n+m} \\ \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1 \end{cases} \quad (2)$$

那么,当第 j 个雾服务器节点的多媒体数据规模随着时间不断变化时,该雾服务器节点的多媒体数据的最大发送效用可表示为:

$$\begin{cases} \text{Max} \sum_{j=1}^m U(O_j), j=1, 2, \dots, m \\ \text{s. t.} \sum_{j=1}^m d_{vj} \leq d_v - \sum_{i=1}^n d_{vi} \end{cases} \quad (3)$$

其中,函数 $U(\cdot)$ 用于计算单个雾服务器节点的多媒体数据发送效用。此处的最大化约束条件是为了均衡多媒体系统的分布式节点的群体效用与总效用。

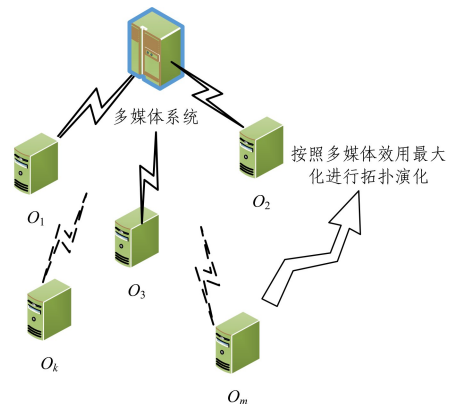


图3 雾节点的加入与自组网

Fig. 3 Addition of fog nodes and ad hoc networks

通过图 3 和图 4 对雾计算演化的分析与建模可以发现 $\sum_{j=1}^m p(O_j) = 1$ 。因此,可得到雾服务器节点的自适应调度方程, $f(j, t)$ 分析了第 j 个无服务器节点随着时间变化的调度变化情况,其中使用了线性的效用函数 $U(t)$ 。

$$\begin{cases} f(j, t) = \sum_{j=1}^m p(O_j) \frac{j}{\sqrt{nm}} \int_{t=0}^{\infty} U(t) dt \\ U(t) = \| O_j \| \prod_t d_{v_j} \end{cases} \quad (4)$$

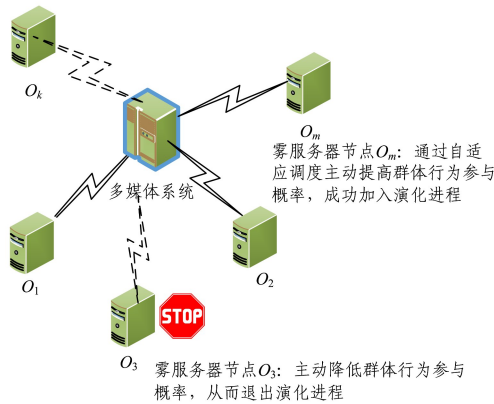


图 4 雾节点的自适应调度

Fig. 4 Adaptive scheduling of fog nodes

上述雾计算模型中,雾节点通过自组织和主动演化获取最大化的系统效用,通过演化进程对群体行为参与度的控制来优化个体服务策略。在时间序列上,以群体行为效用和个体最大化效用的均衡为依据,雾服务器节点逐步更新个体调度,并实时统计系统拓扑调度效应,根据式(5)计算多媒体系统的执行效率。

$$\begin{cases} W(j \rightarrow m)_{j \neq m} = \frac{\lambda}{m} \sum_{j=1}^{m-1} U_j(t) \\ U_j(t) = S'(t) + \sum_{\substack{i=1, j=1 \\ i \neq j}}^{n, m} l_{i,j}(d_{v_j}) \end{cases} \quad (5)$$

本文将效用函数 $U(t)$ 分布到每个雾节点来计算节点个体行为的效用,同时考虑了已有多媒体系统的群体行为的线性表示 $S'(t)$ 。

针对分布式多媒体服务器集群架构,结合群体行为演化,以雾服务器节点个数 m 、多媒体服务起始时间 t_s 、多媒体服务截止时间 t_f 为输入,计算系统整体效用 U ,进而,本文提出了雾计算自适应调度的智能激励算法(Intelligent Incentive algorithm with Fog computing and Swarming Behavior),记为 IIFS,其复杂度为 $O(m)$ 。IIFS 算法的描述如算法 2 所示。

算法 2 IIFS

输入:雾服务器节点个数 m ,多媒体服务起始时间 t_s ,多媒体服务截止时间 t_f

输出:系统整体效用 U

1. $S' \leftarrow \text{EMSSB}(n, d_v)$;
2. while $j \leq m$ do
3. $f(x) \leftarrow x * P(O_j)$;
4. end while
5. while $j < m$ do
6. $U(O_j) \leftarrow U(O_{j-1}) + U(t)$;
7. end while

8. $U \leftarrow S' + U(O_m)$;

9. return U .

综上所述,雾计算智能激励算法(Multimedia intelligent incentive FOG computing,记为 MFOG)的复杂度为 $O(n + m)$,该算法的描述如算法 3 所示。

算法 3 MFOG

输入:个体个数 n ,雾服务器节点个数 m

输出:系统整体效用 U

1. for $i = 1; i \leq n; i++$
2. invoking EMSSB;
3. end for
4. for $j = 1; j \leq m; j++$
5. invoking IIFS;
6. end for
7. return U .

3 实验分析

鉴于雾服务器节点的性能对多媒体服务的性能有直接的影响,在文献[19]所建立的基于 Matlab 的网络控制系统仿真平台的基础上,参照表 1 所列的多媒体系统的组成情况和表 2 所列的仿真参数,通过 Matlab 仿真分布式多媒体系统的拓扑与无线传输,结合 C 语言实现本文提出的 EMSSB 算法和 IIFS 算法,从而实现将多媒体系统群体行为演化与雾计算相结合的智能激励机制。

表 1 多媒体系统的组成

Table 1 Composition of multimedia system

| 参数 | 值 |
|-----------|----|
| 服务器节点个数 | 10 |
| 多媒体源数据个数 | 5 |
| 并发可调度节点个数 | 2 |

表 2 雾服务器性能参数

Table 2 Performance parameters of fog server

| 参数 | 值 |
|-------|------------|
| 雾节点个数 | 10 |
| CPU | 4 核 |
| 内存 | 8GB |
| 数据库 | POSTGRESQL |

实验结果为 100 次重复实验的结果的平均值。每次重复实验,除了将用户发出多媒体请求的时间和次数设置为随机,其他参数均保持一致。

为了验证所提出的智能激励机制对多媒体服务的实时性的改善情况,对比分析了文献[20]的分布式多媒体系统(记为 MMS)与 MFOG 算法在端到端时延方面的表现情况。可结合式(1)和式(6)得到上述两种算法的端到端时延的结果,其变化趋势如图 5 和表 3 所示。

$$t_{i,j}(S') = \frac{|d_v|}{n^2} \sum_{\substack{i=1, j=1 \\ i \neq j}}^n l_{i,j}(d_v) \quad (6)$$

图 5 中,横坐标表示用户请求个数,纵坐标表示多媒体数据从发送端到接收端的可正确解码视频帧接收的时延。从整体情况来看,无服务器节点的参与将端到端时延缩短了 45%。

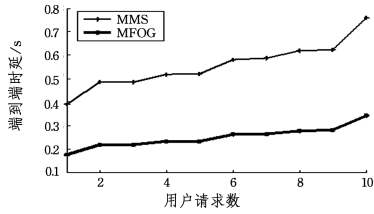


图5 端到端时延

Fig. 5 End to end delay

表3 端到端时延对比

Table 3 Comparison end to end delay (单位:ms)

| 用户请求数 | MMS | MFOG |
|-------|-------|-------|
| 1 | 0.395 | 0.193 |
| 3 | 0.494 | 0.202 |
| 6 | 0.587 | 0.267 |
| 9 | 0.601 | 0.276 |
| 10 | 0.787 | 0.387 |

为了分析雾服务器节点与分布式多媒体系统的协作表现,特别是在多媒体系统群体行为演化过程中无服务器节点的参与情况,统计对比了固定雾服务器节点规模时多媒体系统服务器节点个数对参与度 C_w 的影响(由式(2)和式(7)计算得到,具体如图6和表4所示),以及固定多媒体系统服务器节点规模时雾服务器节点的增加对参与度 C_w 的影响(由式(3)和式(8)计算得到,具体如图7和表5所示)。

$$C_w = \frac{xP(O_j)}{\sum_{k=1}^j l_{i,k}(d_v)} \quad (7)$$

$$C_w = \frac{xP(O_j)}{(l_{i,j}(d_v) + l_{i-1,j-1}(d_v))} \quad (8)$$

通过分析图6可以看出,所提出的智能激励机制根据分布式多媒体系统的激活节点规模和用户请求数,自适应激励雾服务器节点参与群体行为演化进程,具体表现为当 n 小于4时,雾服务器节点自适应调度并组网,参与比例达到75%以上,并在用户请求增大后同时提高参与度,例如用户请求数从5增加到7后,参与比例调整为84%。反之,当 n 大于4时,利用所提出的雾计算智能激励机制进行演化调度,降低参与度,但用户请求数是5和7时的参与比例仍然保持在70%和80%,并同时监听分布式多媒体系统的效用。同理,图7也验证了上述结论。

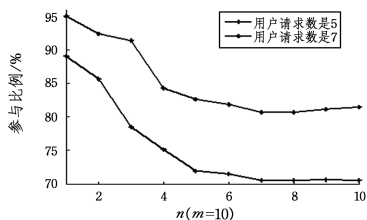


图6 随着 n 值增加 $m=10$ 时雾服务器节点参与多媒体系统群体行为的协作节点比例

Fig. 6 Proportion of collaborative nodes participating in group behavior of multimedia system in fog server nodes with n increasing when $m=10$

表4 协作节点比例对比($n, m=10$)

Table 4 Cooperative nodes ratio ($n, m=10$)

| N | 用户请求数为5 | 用户请求数为7 |
|-----|---------|---------|
| 1 | 87.3 | 94.93 |
| 3 | 85.8 | 92.22 |
| 6 | 73.7 | 84.26 |
| 9 | 70.6 | 82.76 |
| 10 | 70.7 | 82.87 |

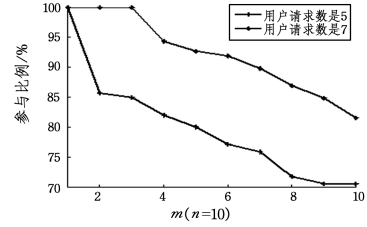


图7 随着 m 值增加, $n=10$ 时雾服务器节点参与多媒体系统群体行为的协作节点比例

Fig. 7 Proportion of collaborative nodes participating in group behavior of multimedia system in fog server nodes with m increasing when $n=10$

表5 协作节点比例对比($n=10$)

Table 5 Cooperative nodes ratio ($n=10$)

| m | 用户请求数是5 | 用户请求数是7 |
|-----|---------|---------|
| 1 | 97.3 | 98.3 |
| 3 | 84.8 | 85.52 |
| 6 | 76.7 | 93.32 |
| 9 | 70.3 | 86.65 |
| 10 | 70.5 | 84.77 |

图8和表6给出了分布式多媒体系统(MMS)与所提出的智能激励算法 IIFS 面对不断增加的终端用户请求规模时,响应延迟 D_R 的情况,其可由式(4)和式(9)计算得到。

$$D_R = \frac{1}{\sqrt{nm}} \int_{t=0}^{\infty} U(t) dt \quad (9)$$

由图7和表6发现,随着终端用户多媒体请求的增加, MMS 系统的响应均发生在多媒体系统的个体服务器节点上,延迟较大,平均值大于 0.9 ms。然而, IIFS 中有 70% 的用户请求的响应发生在雾服务器节点上,并可以通过雾计算获取所需要的多媒体缓存数据,响应时延和多媒体数据流传输延迟显著降低,比 MMS 分别缩短了 53% 和 45%。

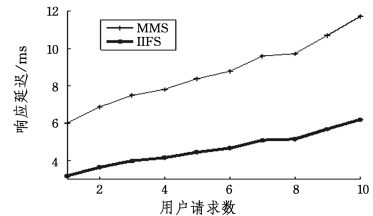


图8 终端用户多媒体请求的响应时延

Fig. 8 Response delay of end user multimedia request

表6 响应时延对比

Table 6 Comparison respond delays (单位:ms)

| 用户请求数 | MMS | MFOG |
|-------|-------|------|
| 1 | 6.35 | 2.93 |
| 3 | 7.94 | 3.72 |
| 6 | 8.87 | 4.67 |
| 9 | 11.61 | 5.76 |
| 10 | 11.87 | 6.13 |

结束语 在大规模通信过程中,多媒体数据的传输效率和系统执行度较低,增加了多媒体服务的运营成本,为了解决该问题,本文基于多媒体系统群体行为的分析演化结果,提出了基于雾计算的智能激励机制。一方面,将多媒体系统的群体行为分为单一化、分散部署与冗余健壮特征、自主管理的群体特质等维度,接着建立了分布式多媒体系统群体行为的分析与演化模型,设计了多媒体系统进行群体行为分析的演化算法。另一方面,为了最大化系统效用和优化个体服务策略,通过雾服务器节点控制参与群体行为演化进程的比例,并通过自组织和主动演化实现群体行为参与度的自适应控制和雾服务器节点的实时调度。综上,本文提出了智能激励机制,实时更新雾服务器节点的个体调度策略并实时统计系统拓扑调度效用。最后,仿真分析结果表明,所提激励算法可以将端到端时延缩短 45%,有效控制参与度,并根据用户请求数控制不同的参与比例,此外可以将用户响应时延和多媒体数据流传输延迟分别缩短 53% 和 45%。

本文研究工作还存在一些不足,例如多媒体数据传输的可靠性保障以及雾服务器节点与多媒体系统群体行为之间的优化调度等问题。针对上述不足,未来将基于算法博弈论和动态规划来解决可靠性保障和优化调度问题。

参 考 文 献

[1] JIANG D, YUAN Z, ZHANG P, et al. A traffic anomaly detection approach in communication networks for applications of multimedia medical devices[J]. *Multimedia Tools & Applications*, 2016, 75(22): 1-25.

[2] ZORBA N, VERIKOUKIS C. Energy Optimization for Bidirectional Multimedia Communication in Unsynchronized TDD Systems[J]. *IEEE Systems Journal*, 2016, 10(2): 797-804.

[3] BÉLANGER-GRAVEL A, CUTUMISU N, LAGARDE F, et al. Short-Term Impact of a Multimedia Communication Campaign on Children's Physical Activity Beliefs and Behavior[J]. *Journal of Health Commun*, 2017, 22(1): 1-9.

[4] YE C, XIONG Z, DING Y, et al. Secure Multimedia Content Distribution for M2M Communication[J]. *International Journal of Security & Its Applications*, 2016, 10(4): 279-288.

[5] KANELLOPOULOS D N, LI M. QoS Routing for Multimedia Communication over Wireless Mobile Ad Hoc Networks: A Survey[J]. *International Journal of Multimedia Data Engineering & Management*, 2017, 8(1): 42-71.

[6] GAN Q, WANG J X. Multimedia communication and cooperative system based on hardware encryption technology[J]. *Automation & Instrumentation*, 2015, 4(5): 46-48. (in Chinese)
甘泉, 王建玺. 基于硬件加密技术的企业多媒体通信协作系统[J]. *自动化与仪器仪表*, 2015, 4(5): 46-48.

[7] BERGER M, SEVERSKY L M, BROWN D S. Classifying swarm behavior via compressive subspace learning[C]// *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 2016: 5328-5335.

[8] KOLEN S, ISERMANN T, DAHLING S, et al. Swarm behavior

for distribution grid control[C]// *IEEE Pes Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe*. IEEE, 2017: 1-6.

[9] NAGAVALLI S, CHAKRABORTY N, SYCARA K. Automated sequencing of swarm behaviors for supervisory control of robotic swarms[C]// *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 2017.

[10] HAN K K, XIE Z P, LV X. Fog Computing Task Scheduling Strategy Based on Improved Genetic Algorithm[J]. *Computer science*, 2018, 45(4): 137-142. (in Chinese)
韩奎奎, 谢在鹏, 吕鑫. 一种基于改进遗传算法的雾计算任务调度策略[J]. *计算机科学*, 2018, 45(4): 137-142.

[11] SARKAR S, MISRA S. Theoretical modelling of fog computing: a green computing paradigm to support IoT applications[J]. *Iet Networks*, 2016, 5(2): 23-29.

[12] TANGANELLI G, VALLATI C, MINGOZZI E. A fog-based distributed look-up service for intelligent transportation systems [C]// *IEEE, International Symposium on A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks*. IEEE, 2017: 1-6.

[13] CHEN R Y. Fog computing-based intelligent inference performance evaluation system integrated internet of thing in food cold chain[C]// *International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*. IEEE, 2016: 879-886.

[14] WANG J, YU R, HUANG X, et al. Privacy-Preserved Pseudonym Scheme for Fog Computing Supported Internet of Vehicles [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018, 19(8): 2627-2637.

[15] BO T, ZHEN C, HEFFERMAN G, et al. Incorporating Intelligence in Fog Computing for Big Data Analysis in Smart Cities [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, 13(5): 2140-2150.

[16] ZHANG W, ZHANG Z, CHAO H C. Cooperative Fog Computing for Dealing with Big Data in the Internet of Vehicles: Architecture and Hierarchical Resource Management[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(12): 60-67.

[17] JIA B, HU H, ZENG Y, et al. Double-matching resource allocation strategy in fog computing networks based on cost efficiency [J]. *Journal of Communications and Networks*, 2018, 20(3): 237-246.

[18] VARGHESE B, REAÑO C, SILLA F. Accelerator Virtualization in Fog Computing: Moving from the Cloud to the Edge[J]. *IEEE Cloud Computing*, 2018, 5(6): 28-37.

[19] SUN J M, DENG W, LI L P, et al. Matlab-based Simulation Platform for Networked Control System[J]. *Process Automation Instrumentation*, 2010, 31(3): 19-22. (in Chinese)
孙君曼, 邓玮, 李莉萍, 等. 基于 Matlab 的网络控制系统仿真平台[J]. *自动化仪表*, 2010, 31(3): 19-22.

[20] JIN L, QIAN Z J. Dynamic multimedia transmission scheme based on GOP frames cooperation [J]. *Application of Electronic Technique*, 2017, 43(6): 110-112. (in Chinese)
靳勇, 钱振江. 基于 GOP 分帧协作的多媒体多流并行传输机制[J]. *电子技术应用*, 2017, 43(6): 110-112.