

基于 CHBL 的 P2P 视频监控网络分层管理机制



夏 中 向 敏 黄春梅

重庆邮电大学工业物联网与网络化控制教育部重点实验室 重庆 400065

(cqupt_xz@163.com)

摘 要 网络的负载均衡性和响应时延是视频监控对等网络重点关注的问题。文中提出了一种基于有限负载一致性哈希的 P2P 视频监控网络分层管理机制。首先根据节点地理位置将 P2P 视频监控网络划分为不同的自治域,自治域内分为一层超级节点和多层普通节点,采用节点上行带宽与每条视频传输通道所需带宽的比值作为节点负载上限,当上层节点总负载量到达上限后进行分层,每一层节点均被映射到一个 hash 环上,并使用 CHBL 算法控制层内节点的负载均衡。然后采用独立信息数据波动赋权法计算出节点的各项指标权重,通过线性加权得到节点综合价值,当节点脱离网络时,选择其子节点层中综合价值最高的节点作为脱离节点的替换节点。在长期运行的网络中,综合价值最高的节点将汇聚到上层。仿真结果表明,相比基于 DHT 的 P2P 网络,所提管理机制能有效改善网络的负载均衡性,同时也可降低网络的整体响应时延。

关键词: 有限负载一致性哈希;P2P;视频监控;分层管理;负载均衡;综合价值

中图法分类号 TP393

Hierarchical Management Mechanism of P2P Video Surveillance Network Based on CHBL

XIA Zhong,XIANG Min and HUANG Chun-mei

Key Laboratory of Industrial Internet of Things and Networked Control (Chongqing University of Posts and Telecommunications),Ministry of Education,Chongqing 400065,China

Abstract Load balancing and response time are the key issues in video surveillance peer-to-peer networks. A hierarchical management mechanism of a P2P video surveillance network based on the consistent hash with bounded loads is proposed. According to the geographical location of the nodes,the P2P video surveillance network is divided into the different autonomous region, which is divided into one layer of super nodes and multiple layers of ordinary nodes. The ratio of the upstream bandwidth of the node to the bandwidth required by each video transmission channel is used as the upper limit of the node load. It is stratified when the total load of the upper layer nodes reaches the upper limit. CHBL algorithm is used to control the load balance of each layer nodes,which are mapped to different hash ring. The weight of each index of the node is calculated by the independent information data fluctuation weighting method,and then the comprehensive value of the node is obtained by linear weighting. The node with the highest comprehensive value in the child node layer is selected as a replacement node for the separated node. The node with the highest comprehensive value will converge to the upper layer between long-running P2P networks. Compared with the DHT-based P2P network,the simulation results show that the proposed management mechanism can effectively improve the load balance and reduce the overall response time of the network.

Keywords Consistent hash with bounded loads,Peer-to-Peer,Video surveillance,Hierarchical management,Load balancing,Comprehensive value

1 引言

近年来,人们对安全的需求日益凸显,各式各样的监控摄像头出现在人们的生活和工作中,视频监控覆盖范围越来越广^[1]。传统的 C/S 模式的视频监控方案需要消耗大量带宽资源来支持巨量的摄像头和客户端,不能满足现今的需求^[2]。对等网络(Peer-to-Peer,P2P)架构能够很好地解决 C/S 模式

存在的瓶颈问题,具有良好的可伸缩性^[3]。在这种架构中,每一个对等点既可以作为接收器,也可以作为服务器。当前视频监控中还很少采用 P2P 网络架构,P2P 网络主要应用在流媒体直播、点播等方面,例如 PPLive^[4],IPTV^[5],VoIP^[6]等。如何管理视频监控对等网络,以保证较低的响应时延以及对等网络的负载均衡性是当前的研究重点。

根据网络拓扑结构,传统的 P2P 网络可以分为结构化与

到稿日期:2020-12-04 返修日期:2021-03-26 本文已加入开放科学计划(OSID),请扫描上方二维码获取补充信息。

基金项目:重庆市技术创新与应用发展专项面上项目(cstc2020jsjcx-msxmX0126)

This work was supported by the Chongqing Technology Innovation and Application Development Project (cstc2020jsjcx-msxmX0126).

通信作者:向敏(xiangmin@cqupt.edu.cn)

非结构化两类^[7]。结构化拓扑拥有确定的网络结构,目前基于分布式哈希表(DHT)的 Chord^[8], CAN^[9], Pastry^[10] 和 Tapestry^[11] 等基础架构被广泛应用于 P2P 网络中,拥有良好的负载均衡性。非结构化拓扑没有固定的网络结构,由一群不知道网络结构的地位完全相同的对等点组成,节点之间一般采用洪范的方式获取数据, Gnutella^[12], BitTorrent^[13] 和 KaZaA^[14] 等均是采用非结构化 P2P 网络的例子。

传统的 P2P 网络多为扁平结构,出于提升性能的目的,分层的 P2P 网络成了研究的重点。文献[15]提出了一种混合式数据分发覆盖网 Laurel,该网络将节点根据兴趣分簇,簇间组织成 Chord 环,簇内构建了两层网络,分为骨干节点层和普通节点层,骨干节点层之间也建立 Chord 环,便于资源快速定位。文献[16-17]构建了一个两层 P2P 覆盖网,上层由稳定的对等点组成树形结构,下层节点组成网状结构,结合了树形与网状型拓扑的优点。文献[18]给出了一种基于 Chord 的分层对等网络模型 HPM, HPM 被组织为一组层次环,第一层由 256 个节点组成 Chord 环,第二层根据第一层的每个节点,组织 256 个分别包含 256 个节点的 Chord 环,以此类推,构建 HPM 网络模型,以提高 P2P 网络的性能。文献[19]提出了一种低直径分层 P2P 网络,该网络被分为两层,第一层由第一个加入网络的含有不同资源类型的对等点构成完全图,第一层的所有节点作为第二层的头节点,第二层由含有同类型资源的对等点构成完全图,该结构能够支持高效的数据查找。文献[20]提出了一个基于树型的高度协作和可伸缩的分层 P2P 网络,数据由上层分发到下层,层与层之间为树形拓扑,层内由不同数量的集群构成,集群内构成完全图结构,上层的每个节点作为下层中一个集群的源节点,提高了 P2P 网络的整体性能。

当前对分层 P2P 网络的研究较好地提升了资源查找效率,改善了网络的可伸缩性,却没有考虑如何降低网络整体端到端的时延,在考虑对等点之间的负载均衡时,忽略了节点存在负载上限,容易出现热节点问题。针对视频监控中对实时性和稳定性的严苛要求,本文提出了一种基于 CHBL(有限负载一致性哈希)的 P2P 视频监控网络分层管理机制。该机制首先根据地理位置将网络划分为不同的自治域,自治域内分为超级节点和普通节点,超级节点组成超级节点层,视频源直接与超级节点相连,所有普通节点的视频源均来自超级节点。通过节点上行带宽除以每条视频传输通道所需带宽来设定节点负载上限,当超级节点层总负载到达上限后,其将不再能够承载额外的客户端节点,此时 P2P 网络将进行分层,并将超级节点的直系客户端负载层作为新的视频源节点层,当再有客户端节点请求访问视频源时,将其作为新的视频源节点层的客户端负载。每一层的节点都将分别被映射到一个 hash 环中,并采用有限负载一致性哈希算法为每一层均衡分配负载,以保证网络整体达到负载均衡。同时,根据影响节点综合价值的各个因素,采用一种客观赋权法计算影响节点的各指标权值,通过线性加权的方式得到节点的综合价值。当有节点从网络中脱离时,将其子节点层中综合价值最大的节点作为脱离节点的替换节点。在长期运行的网络中,综合价值最好的节点将汇聚到上层,充分利用综合价值高的节点,

来改善网络的整体响应时延。

2 基于 CHBL 的 P2P 网络分层设计

现有的基于 DHT 的 P2P 网络^[21]多采用一致性哈希算法控制网络负载均衡,忽略了节点存在负载上限、容易出现热节点的问题,而 CHBL 算法的出现很好地解决了这一问题。该算法根据每个负载量变化时刻给节点设置负载上限,在通过一致性哈希算法进行负载分配时,会跳过负载已达上限的节点,将负载分配到下一个负载未达上限的节点,以此控制网络中节点的负载均衡。因此,将 CHBL 算法应用到 P2P 分层网络的每一层中,能够较好地保证 P2P 网络整体的负载均衡。基于 CHBL 的 P2P 网络分层设计的步骤如下:

(1)首先选择出超级节点组成超级节点层,数据源节点直接与超级节点层相连,超级节点层成为新的数据源节点层。

(2)新数据源节点层的所有节点根据节点 IP 映射到 hash 环上。

(3)设置数据源节点层中每个节点的最大负载上限 LM_n ,如式(1)所示:

$$LM_n = \frac{B_n}{b} \quad (1)$$

其中, LM_n 为第 n 个节点的最大负载上限, B_n 为第 n 个节点的上行带宽大小, b 为每一个客户端获取数据时所需带宽的大小。

(4)当某一时刻 t_k 有节点加入网络时,计算此时数据源节点层的总负载量 $L_{total}(t_k)$ ^[22],如式(2)所示。

$$L_{total}(t_k) = \sum_{n=1}^s L_n(t_k) + L_{new} \quad (2)$$

其中, $L_n(t_k)$ 表示第 n 个节点在 t_k 时刻的负载量, s 表示层内节点的个数, L_{new} 表示新增的负载量。

(5)计算数据源节点层的平均负载量 $L_{avg}(t_k)$ 和层内节点的平均最大负载上限 LM_{avg} ,如式(3)所示:

$$\begin{cases} L_{avg}(t_k) = \frac{L_{total}(t_k)}{s} \\ LM_{avg} = \frac{\sum_{n=1}^s LM_n}{s} \end{cases} \quad (3)$$

(6)为了保证每个节点都能够有裕量,将各节点的最大负载上限与平均最大负载上限的比值乘以平均负载量的 1.2 倍作为该节点在 t_k 时刻的负载上限 $L_{m(n)}(t_k)$ ^[23]。

$$L_{m(n)}(t_k) = 1.2 \times L_{avg}(t_k) \times \frac{LM_n}{LM_{avg}} \quad (4)$$

在一致性哈希中进行节点查找时,首先检查顺时针方向第一个匹配的数据源节点负载是否已达上限,若已达上限,将跳过当前节点,继续向后查找,直到匹配到下一个负载未达上限的节点,以便将负载均衡地分布到数据源节点层上。同时还需要保证节点 n 在 t_k 时刻的负载上限不超过该节点的最大负载上限。

$$L_{m(n)}(t_k) \leq LM_n \quad (5)$$

(7)当某时刻数据源节点层内每一个节点增加一个新的负载节点后,对应节点的负载上限均超过其最大负载上限,此时 P2P 网络将进行分层,数据源节点层的客户端负载层将成为新的数据源节点层,新来的节点将进入下一层,与新数据源

节点层建立数据传输通道。

将 CHBL 算法应用到 P2P 分层网络的每一层中,既保证了每一层所有节点负载到达上限后进行分层,同时也保证了每一层节点的负载均衡增长。分层设计示意图如图 1 所示,层 M 拥有 4 个节点,直接从数据源接收数据,同时作为新的数据源节点层为下层节点提供数据,层内节点被映射到一个哈希环上,每个节点的最大负载上限分别为 2,3,4,3 个客户端节点,该层总的负载上限为 12 个客户端负载。当有客户端加入网络访问数据源时,其将作为层 M 的客户端负载进入层 $M+1$ 中,并通过 CHBL 算法给每一层 M 的节点均衡分配负载,同时层 $M+1$ 中新加入的节点将被映射到一个 hash 环上。当有 12 个节点加入后,层 M 的负载量达到上限,将不能继续承载客户端节点,此时层 $M+1$ 将作为新的数据源节点层,为新来的客户端节点提供源数据。若再有节点加入,将进入到层 $M+2$,与新的数据源节点层 $M+1$ 中的节点建立数据传输通道,以此类推,实现基于 CHBL 的 P2P 网络分层设计。

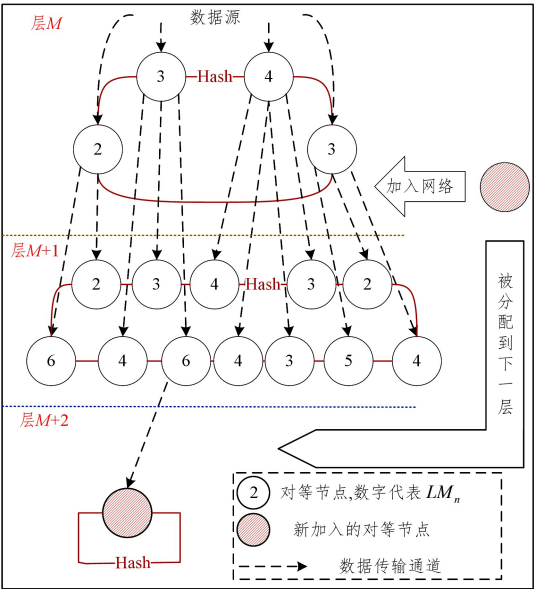


图 1 分层示意图

Fig. 1 Sketch map of hierarchy

3 P2P 视频监控网络分层管理机制

本文采用上节所提分层设计方案来保证视频监控网络的负载均衡性,降低网络的整体端到端时延。同时选取节点内核数、磁盘大小、内存大小、最大负载上限和在线时间,作为节点综合评价指标,采用独立信息数据波动赋权法计算各指标的权重,并通过线性加权得到各节点的综合价值。在超级节点层内,选取综合价值排名靠前的两个节点作为头节点进行自治域之间的通信,当普通节点层节点脱离时,选取其子节点层中综合价值最高的节点作为脱离节点的替换节点,以期将综合价值高的节点替换到上层,从而降低网络的整体响应时延。

3.1 节点综合价值计算

项目组在前期的研究工作中提出了基于虚拟节点的有限负载一致性哈希策略^[23],该策略采用独立信息数据波动赋权

法 (Independent Information Data Fluctuation Weighting Method, IIDFW) 计算各代理节点的性能量化值,本文将其用来计算节点的综合价值。IIDFW 是一种将数据信息和信息独立程度进行适当组合的客观赋权法。在每个节点中,数据信息采用离差系数 V_j 表示,如式(6)所示:

$$V_j = \frac{\delta_j}{\bar{X}_j} \tag{6}$$

其中, δ_j 为指标 j 的标准差, $\bar{X}_j$ 为指标 j 的均值, $j \in [1, i]$, i 表示指标的个数。

信息独立程度 D_j 由改进后的复相关系数 $1 - R_j^2$ 表示,其中 R_j 表示指标 j 的复相关系数,复相关系数的平方即为指标 j 的决定系数 R_j^2 。每个节点的决定系数矩阵 $\mathbf{R}^2$ 和信息独立程度矩阵 $\mathbf{D}$ 如式(7)所示:

$$\begin{cases} \mathbf{R}^2 = (R_1^2 & R_2^2 & \cdots & R_i^2) \\ \mathbf{D} = (D_1 & D_2 & \cdots & D_i) \end{cases} \tag{7}$$

其中, i 表示指标个数, R_i^2 表示第 i 个指标的决定系数, D_i 表示第 i 个指标的信息独立程度。

将各指标的数据信息和信息独立程度标准化后相乘,就可以得到各指标的纯量信息,进而求得各指标权重。

独立信息波动赋权法计算节点综合价值的步骤如下:

(1) 通过式(6)计算指标 j 的离差系数 V_j , 将其作为指标 j 的数据信息。

(2) 遍历所有 $[1, i]$ 个指标, 依次将各指标作为因变量, 其余指标作为自变量进行回归运算, 得到该指标的复相关系数 R_j , 进而得到该指标的信息独立程度 D_j 。

(3) 将离差系数 V_j 和信息独立程度 D_j 标准化后得到 V_j', D_j' , 如式(8)所示:

$$\begin{cases} V_j' = \frac{V_j}{\max(V_j)} \\ D_j' = \frac{D_j}{\max(D_j)} \end{cases} \tag{8}$$

其中, $\max(V_j)$ 和 $\max(D_j)$ 分别表示指标 j 的最大离差系数值和最大信息独立程度值。

(4) 计算指标 j 所能提供的纯量信息 I_j , 如式(9)所示:

$$I_j = V_j' \times D_j' \tag{9}$$

(5) 将指标 j 的纯量信息 I_j 与所有指标的纯量信息之和的比值作为指标 j 的权重 W_j , 如式(10)所示:

$$W_j = \frac{I_j}{\sum_{j=1}^i I_j} \tag{10}$$

(6) 计算指标 j 的归一化值 Q_j , 将其与指标 j 的权重 W_j 线性加权, 得到对等节点 n 的综合价值 CV_n , 如式(11)所示:

$$CV_n = \sum_{j=1}^i Q_j \times W_j \tag{11}$$

综上所述, IIDFW 从数据本身的变化程度和数据能够提供提供的独立信息两个角度进行评价, 综合了线性赋权法的优点, 一定程度上解决了熵权法难以解耦指标间相关性的问题, 提高了对等节点综合价值计算的准确性, 是一种较为科学的评价方法。

3.2 分层管理机制

构建的 P2P 视频监控网络中包含 4 类节点: 授权服务器

(Authorization Server, AS)、网络摄像头(或视频服务器)C、超级节点 SN、普通节点 ON。授权服务器 AS 维护一个字典,由键值对组成,用于存储各自治域及其所对应的超级节点列表,字典的键为不同自治域的地理位置,值为对应自治域内的超级节点列表。AS 给每个加入网络的节点提供授权服务,并根据节点地理位置将其定位到对应的自治域中,同时针对每个自治域分别运行一个基于 CHBL 的负载均衡器,将每个加入自治域的 C 和 ON 均衡地分配到超级节点层中,同时为了避免因 AS 出现故障而导致数据丢失,AS 将存在一个备份节点。网络摄像头(或视频服务器)C 为视频数据源节点,为保证 C 数据不会丢失,当 C 加入网络时,其会同时与至少两个超级节点建立连接,一条为直系连接,其余为备份连接。超级节点 SN 维护 3 个列表和 1 个变量,3 个列表为视频源节点列表、客户端节点列表和邻居节点列表,分别用于存储 C, ON 和 SN,变量 $C_l(t_k)$ 为运算负载量,表示 SN 在 t_k 时刻运算的新进来的客户端节点的数量。同时,每个超级节点还要为运行在其下面的每一层 ON 运行一个基于 CHBL 的负载均衡器,以保证每一层 ON 节点间的负载均衡。普通节点 ON 维护一个列表,其中包含父节点、邻居节点和子节点。

3.2.1 超级节点之间的网络管理

本文根据不同城市划分自治域,自治域之间要相互通信,选择前期已经建好的 C/S 模式视频监控系统中的监控中心作为自治域内的超级节点,通过超级节点进行域间和域内通信,超级节点之间的网络如图 2 所示。

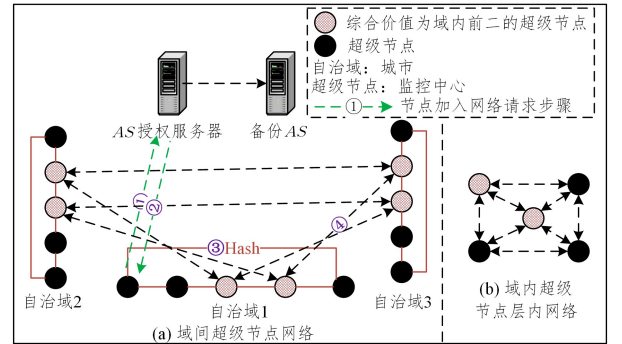


图 2 超级节点之间的网络示意图
Fig. 2 Network sketch map between super nodes

构建超级节点之间的网络步骤如下：

(1) SN 首先向 AS 发送请求,申请加入对应自治域内的超级节点层；

(2) AS 为新加入的 SN 分配层内邻居节点,并将其存入 SN 的邻居节点列表中,使层内节点构成网状拓扑,如图 2(b) 所示,以便进行超级节点层内通信,同时将 SN 加入 AS 维护的字典中。

(3) 每个自治域内的所有 SN 均分别被映射到一个 hash 环上。

(4) 选择每个自治域内综合价值最高的两个超级节点作为头节点,与其他自治域内的头节点构成网状拓扑,如图 2(a) 所示,以便进行域间通信。这样避免了选举一个节点作为头节点进行域间通信时出现单节点失效的问题,同时也避免了

所有超级节点参与域间通信所带来的巨大网络开销。

3.2.2 超级节点和视频源节点之间的网络管理

为了使 C 的视频数据不丢失,同时确保超级节点层能够承载足够多的视频源节点,每个 C 节点与自治域内两个超级节点建立视频传输通道,避免了因单通道发生故障而导致摄像头视频数据丢失,以及传输通道过多时超级节点层所能承载的摄像头负载数量过少的问题。其组网示意图如图 3 所示。

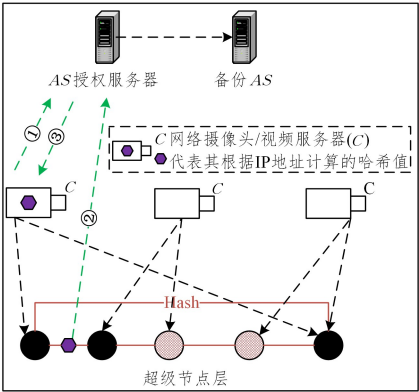


图 3 超级节点与视频源节点之间的组网示意图
Fig. 3 Network sketch map between SN and C

超级节点与视频源节点的组网步骤如下：

- (1) 网络摄像头(或视频服务器)C 向 AS 发送请求,申请加入平台。
- (2) AS 根据 C 的地理位置将其定位到对应的自治域中,并通过哈希算法将其映射到超级节点层的 hash 环上。
- (3) AS 将 hash 环上顺时针方向负载未达上限的前两个超级节点的 IP 地址返回给 C, C 与这两个超级节点建立视频传输通道,并将 C 加入对应超级节点的视频源节点列表中。

3.2.3 超级节点与普通节点之间的网络管理

考虑到节点存在负载上限,为了最大化利用节点的性能,降低节点之间的通信时延,超级节点与普通节点之间建立分层的网络,网络拓扑如图 4 所示。

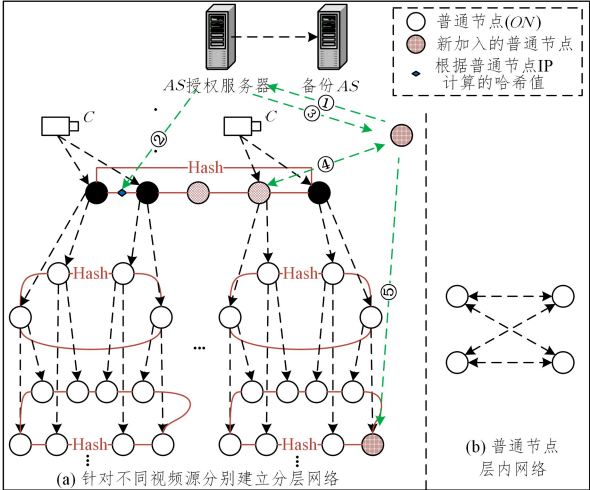


图 4 超级节点与普通节点之间的网络示意图
Fig. 4 Network sketch map between SN and ON

构建超级节点与普通节点之间的网络步骤如下：

(1)普通节点 ON 向 AS 发送请求,申请加入平台。

(2)AS 根据 ON 的地理位置将其定位到对应的自治域中。通过 hash 算法将其映射到超级节点层的 hash 环上,同时将超级节点的内核数、内存大小、磁盘大小以及上行带宽大小等 4 个指标作为独立信息数据波动赋权法的输入,得到的各指标权重如式(10)所示,通过线性加权,结合式(11)得到超级节点的性能量化值 $P_{(n)}$,如式(12)所示:

$$P_{(n)} = \sum_{j=1}^i Q_j \times W_j$$

(12)

结合式(4),计算出超级节点 n 在 t_k 时刻的运算负载上限 $C_{m(n)}(t_k)$,如式(13)所示:

$$C_{m(n)}(t_k) = 1.2 \times \sum_{n=1}^s C_{l(n)}(t_k) \times \frac{P_{(n)}}{\sum_{n=1}^s P_{(n)}}$$

(13)

其中, $C_{l(n)}(t_k)$ 为第 n 个节点在 t_k 时刻的运算负载量,获取此刻 hash 环上顺时针方向第一个运算负载量未超过运算负载上限 $C_{m(n)}(t_k)$ 的超级节点 IP。

(3)AS 将超级节点 IP 返回给 ON。

(4)ON 与 SN 建立通信,并向 SN 请求访问指定的视频源,SN 在自治域内或自治域间查询到视频源所归属的第一个负载量小于等于 $L_{m(n)}(t_k)$ 的超级节点 IP。将查询到的超级节点 IP 返回给 ON。

(5)ON 与查询到的 SN 建立通信,结合第二节的分层设计方案,ON 与客户端未达上限的视频源节点建立视频传输通道,同时将 ON 加入 SN 的客户端节点列表中,与 ON 有联系的同层节点也将更新自身维护列表中的邻居节点,使层内构成网状拓扑,以便进行层内通信。

3.2.4 节点脱离自治域时的网络管理

视频监控 P2P 网络中的节点是自由加入或退出的。因此,当有节点脱离自治域时,将从其客户端负载节点层中选择综合价值最高的节点作为脱离节点的替换节点。节点脱离时网络的变化情况如图 5 所示。

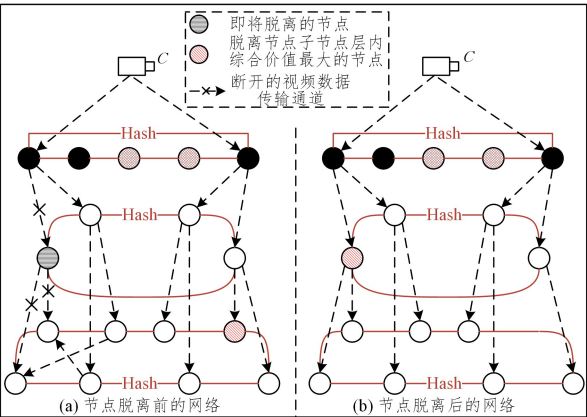


图 5 节点脱离时网络变化示意图

Fig. 5 Network change sketch map of the node detached

图 5 中,当节点脱离自治域时,其负载节点将无法从父节点获取视频源数据。此时,脱离节点的客户端节点将从其层内邻居节点获取视频源数据。脱离节点对应的超级节点发现其客户端节点中存在节点脱离,超级节点将计算出脱离节点

的子节点层中综合价值最高的节点,并将其作为脱离节点的替换节点。当替换成功后,脱离节点的子节点将与替换后的节点建立父子关系。在长期运行的视频监控 P2P 网络中,综合价值最高的节点将汇聚到上层。

通过构建上述 P2P 视频监控网络分层管理机制,采用 CHBL 算法解决了现有基于 DHT 的分层 P2P 网络负载均衡算法没有考虑节点存在负载上限的问题。当有节点脱离网络时,通过独立信息数据波动赋权法计算出脱离节点的客户端负载节点层中综合价值最高的节点,将其作为脱离节点的替换节点,在长期运行的网络中,综合价值高的节点将汇聚到上层节点,由综合价值高的节点为价值低的节点提供服务,改善了基于 DHT 的 P2P 网络中普通节点层中节点的随机性,能够较好地降低网络的整体响应时延。

4 测试与分析

4.1 测试环境

每个自治域内的网络和管理机制均相同,因此比较其中一个自治域的负载均衡性和域内响应时延即可。在实验环境下搭建的测试 P2P 视频监控网络中包含 1 个授权服务器 (Authorization Server, AS)、1 个视频源节点 (C)、4 个超级节点 (SN) 和 16 个普通节点 (ON),设定普通节点中 8 个位于重庆,8 个位于成都。除了 AS 授权服务器,其余所有节点位于同一个局域网中。考虑到不同地理位置之间的数据传输时延差异较大,性能好的节点的传输时延低于性能差的节点,本文所有测试将在如下设定下进行。

设定 1 当视频数据从一个节点转发到另一个节点时,如果两个节点处于相同的地理位置,则发送端延时 3 ms 再发送,否则延时 20 ms 再发送。

设定 2 每个节点在转发数据时都加上 $1/P_{(n)}$ ms 的延时,其中 $P_{(n)}$ 为节点 n 的性能量化值。

测试所设计的 4 类节点如图 6 所示。

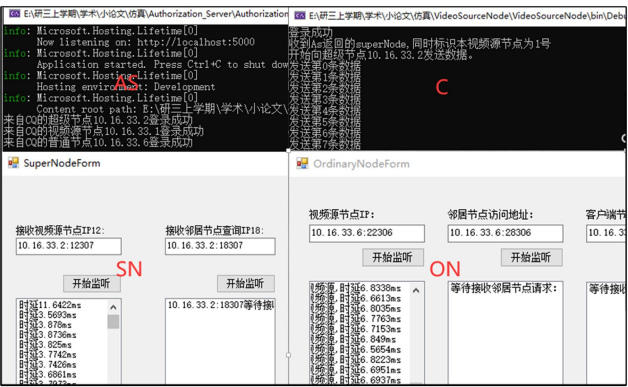


图 6 4 类测试节点

Fig. 6 Four types of test nodes

源节点 C 模拟摄像头在采集视频数据的同时进行 H.265 编码,其能够在 384 K 带宽下向超级节点 SN 传输 720P 30 帧每秒的视频数据^[24],因此设置每一个客户端获取视频数据时所需带宽大小 b 为 384K。

仿真测试中,各节点硬件参数的配置如表 1 所列。

表 1 节点硬件参数配置

Table 1 Node hardware parameter configuration

节点名称	操作系统	内存/GB	内核数	硬盘/GB	上行带宽/M	节点 IP
AS	CentOS 7	2	4	50	30	45.40.192.118
C	Linux	1	2	30	30	10.16.33.1
SN1	Windows 10	2	2	25	20	10.16.33.2
SN2	Windows 10	1.5	2	27	15	10.16.33.3
SN3	Windows 10	2	4	23	20	10.16.33.4
SN4	Windows 10	1	2	23	25	10.16.33.5
ON1	Windows 10	1	2	30	20	10.16.33.6
ON2	Windows 10	1	2	20	10	10.16.33.7
ON3	Windows 10	2	2	25	20	10.16.33.8
ON4	Windows 10	2	4	30	10	10.16.33.9
ON5	Windows 10	1	2	10	10	10.16.33.10
ON6	Windows 10	2	2	20	20	10.16.33.11
ON7	Windows 10	1	4	30	20	10.16.33.12
ON8	Windows 10	2	2	10	10	10.16.33.13
ON9	Windows 10	1	2	25	20	10.16.33.14
ON10	Windows 10	1	2	20	10	10.16.33.15
ON11	Windows 10	2	2	25	20	10.16.33.16
ON12	Windows 10	2	4	30	10	10.16.33.17
ON13	Windows 10	1	2	10	10	10.16.33.18
ON14	Windows 10	2	2	20	20	10.16.33.19
ON15	Windows 10	1	4	30	20	10.16.33.20
ON16	Windows 10	2	2	10	10	10.16.33.21

4.2 仿真结果分析

目前常用的基于 DHT 的 P2P 网络中,上层超级节点组成 hash 环,并采用一致性哈希算法控制其负载均衡性,下层普通节点构成网状拓扑,普通节点随意地加入或退出网络。为比较所提机制的有效性,将基于 DHT 的 P2P 网络应用到本文设定的视频监控环境中,并与本文所提机制的网络负载均衡性和响应时延进行比较。

4.2.1 负载均衡性

测试网络中所有 16 个普通节点请求访问同一视频源,同时设定超级节点层负载上限为 6 个普通节点。当超级节点层直系客户端负载量超过 6 时,本文所提机制将进行分层,而基于 DHT 的 P2P 网络的所有普通节点将在同一层内构成网状拓扑。经过一段时间,节点自由加入和退出网络。假定网络趋于稳定,此时所有客户端节点的最大负载上限、性能量化值和综合价值 3 个属性如表 2 所列。

表 2 客户端节点属性

Table 2 Client node attribute

节点名称	LM_n	P	CV
SN1	6.67	0.5764	0.6638
SN2	5	0.4964	0.6324
ON1	6.67	0.3170	0.3160
ON2	3.33	0.0911	0.0724
ON3	6.67	0.5764	0.5018
ON4	3.33	0.7304	0.6790
ON5	3.33	0.0911	0.0940
ON6	6.67	0.5308	0.4440
ON7	6.67	0.5603	0.5419
ON8	3.33	0.3049	0.2220
ON9	6.67	0.2714	0.2367
ON10	3.33	0.0911	0.1156
ON11	6.67	0.5764	0.4478
ON12	3.33	0.7304	0.6035
ON13	3.33	0.1348	0.1065
ON14	6.67	0.5308	0.4980
ON15	6.67	0.5603	0.5095
ON16	3.33	0.3049	0.2328

此时两种网络中所有节点的负载情况如图 7 所示。

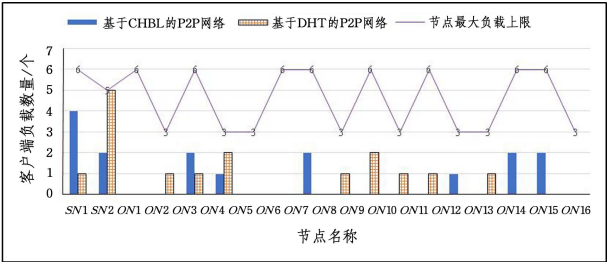


图 7 两种网络中各节点的负载分配情况

Fig. 7 Load distribution of each node in two kinds of networks

图 7 中,随着网络趋于稳定,本文所提机制中,综合价值高的 ON3,ON4,ON7,ON12,ON14,ON15 这 6 个节点稳定位于超级节点层的第一层,而综合价值低的节点将位于第二层,同时超级节点层和第一层节点根据节点权重对负载进行了均衡分配;对于基于 DHT 的 P2P 网络负载分配情况,其超级节点层的 6 个负载没有得到均衡分配,因为 DHT 架构是基于一致性哈希算法的,而该算法没有为每一个负载变化时刻设置节点负载上限,因此节点负载不会均衡增长,在其普通节点层中,因为所有普通节点构成网状拓扑,获取视频源节点存在随机性,普通节点负载也是随机分配的。

为了更直观地展示两种网络的负载均衡情况,引入负载均衡度 LB ,其值为所有节点负载偏差之和与总负载的比值,值越小,证明负载均衡的效果越好^[25]。 LB 的计算式如式(14)所示:

$$LB = \frac{\sum_{n=1}^s \sigma(n)}{\sum_{n=1}^s L_n} \tag{14}$$

其中, $\sigma(n)$ 表示节点 n 的负载偏差, L_n 表示节点 n 的负载量, s 表示节点的个数。

两种网络的超级节点层与承载了负载的普通节点的负载均衡度的比较结果如表 3 所列。

表 3 负载均衡度比较

Table 3 Comparison of load balancing degree

网络类型	节点所在层级	
	SN 层	ON 层
基于 CHBL 的 P2P 网络	0.039	0.050
基于 DHT 的 P2P 网络	0.073	0.065

由表 3 可知,本文提出的基于 CHBL 的 P2P 网络在超级节点层以及普通节点层中的负载均衡度均小于基于 DHT 的 P2P 网络,有效改善了基于 DHT 的 P2P 网络的负载均衡性。

4.2.2 网络整体响应时延

为了测试网络的整体响应时延,设定普通节点中 ON1—ON8 和 ON9—ON16 位于不同的地理位置,比较本文所提机制与基于 DHT 的 P2P 网络中所有节点的平均响应时延。将每个节点最新收到的 100 条数据(不满 100 条的取最新收到的所有数据)的响应时延的平均值作为每个节点的平均响应时延,如表 4 所列。由表 4 可计算得到本文所提机制的节点平均响应时延为 22.0775 ms,低于基于 DHT 的 P2P 网络 30.3093 ms,这主要是因为通过一段时间的稳定运行,本文所提机制中综合价值高的节点稳定于上层,由综合价值高的节

点向综合价值低的节点转发数据,较好地发挥了综合价值高的节点性能。而基于 DHT 的 P2P 网络中,因为普通节点层组成网状拓扑,组网存在随机性,存在由综合价值低的节点向综合价值高的节点转发数据的可能。同时,在本测试环境下,本文所提机制中节点最多通过两次转发即可获得视频源数据,而基于 DHT 的 P2P 网络由于普通节点层为网状拓扑,获取的数据存在随机性,节点在获取视频源数据时,可能因该数据已被转发超过两次,传输时延增加,网络整体响应时延增加,因此本文所提机制与基于 DHT 的 P2P 网络相比,较好地降低了网络的整体响应时延。

表 4 节点平均响应时延
Table 4 Average response delay of nodes

(单位:ms)		
节点名称	基于 CHBL 的 P2P 网络	基于 DHT 的 P2P 网络
SN1	3.8354	3.8423
SN2	3.8863	3.8859
ON1	13.2388	66.2653
ON2	13.2865	47.6185
ON3	8.5763	8.8895
ON4	8.5895	8.5433
ON5	13.2879	61.5935
ON6	46.8633	12.9305
ON7	8.5023	60.8865
ON8	47.6905	8.8813
ON9	30.7065	42.5806
ON10	30.6896	29.9653
ON11	30.6866	25.8876
ON12	25.5562	25.8906
ON13	30.2855	32.1626
ON14	25.8973	25.8876
ON15	25.9505	30.5898
ON16	29.8654	49.2673

结束语 本文提出了一种基于 CHBL 的 P2P 视频监控网络分层管理机制,该机制主要根据节点负载上限对 P2P 网络进行分层,并使用有限负载一致性哈希算法控制每一层节点的负载均衡,同时采用独立信息数据波动赋权法计算出节点的各指标权重,通过线性加权得到节点综合价值。当网络中的节点脱离时,选取脱离节点的子节点层中综合价值最高的节点作为脱离的替换节点,在长期运行的网络中,综合价值高的节点将稳定于上层,由综合价值高的节点向综合价值低的节点转发数据。最后,本文所提机制与基于 DHT 的 P2P 网络在相同的测试环境下进行对比,结果显示,本文所提机制相比基于 DHT 的 P2P 网络有效地改善了网络的负载均衡性,较好地降低了网络的整体响应时延。

参 考 文 献

[1] HUANG K Q, CHEN X T, KANG Y F, et al. Overview of Intelligent Video Surveillance Technology[J]. Chinese Journal of Computers, 2015, 38(6): 1093-1118.

[2] ZHU X, DENG H T, CHEN Z, et al. Design of Large-Scale Video Surveillance System Based on P2P Streaming[C]// 2011 3rd International Workshop on Intelligent Systems and Applications. Wuhan: IEEE, 2011: 1-4.

[3] KUNWAR P, MAHESH C G, MUSHTAQ A. Priority-based

scheduling scheme for live video streaming in peer-to-peer network[J]. Multimedia Tools and Applications, 2018, 77(18): 24427-24457.

[4] RUSSO A, LO C R. Delay-aware push/pull protocols for live video streaming in p2p systems[C]// IEEE International Conference on Communications. Cape Town: IEEE, 2010: 3-7.

[5] LI M F. Queueing Analysis of Unicast IPTV With Adaptive Modulation and Coding in Wireless Cellular Networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(10): 9241-9253.

[6] LIANG C, TAN Y, ZHANG X S, et al. Building packet length convert channel over mobile VoIP traffics[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2018, 118(15): 144-153.

[7] LI L F, ZHANG J Z, WANG P D, et al. P2P network search mechanism based on node interest and Q-learning[J]. Computer Science, 2020, 47(2): 221-226.

[8] LI W X, XIONG Q G, YANG L T. A DHT overlay network that realizes efficient copy publishing and query[J]. Computer Science, 2010, 37(7): 87-90.

[9] ZENG B, WANG R. A novel lookup and routing protocol based on CAN for structured P2P network[C]// 1st IEEE International Conference on Computer Communication and the Internet (ICCCD). Wuhan: IEEE, 2016: 6-9.

[10] AZMY N, MERZ S, WEIDENBACH C. A machine-checked correctness proof for Pastry[J]. Science of Computer Programming, 2018, 158: 64-80.

[11] CHERBAL S, BOUKERRAM A, BOUBETRA A. A survey of DHT solutions in fixed and mobile networks[J]. International Journal of Communication Networks and Distributed Systems, 2016, 17(1): 14-42.

[12] SAH A, HWANG I S, RIANTO A, et al. Gnutella-Based P2P Applications for SDN over TWDM-PON Architecture[J]. International Journal of Computer Theory and Engineering, 2020, 12(2): 32-39.

[13] YAN Y, TANG H. Data collection and analysis of traffic between nodes in BitTorrent network[J]. Computer Science, 2014, 41(6): 75-78.

[14] KISEMBE P, JEBERSON W. Future of Peer-To-Peer Technology with the Rise of Cloud Computing[J]. International Journal of Peer to Peer Networks (IJP2P), 2017, 8(2/3): 45-54.

[15] ZHENG Z, WANG Y J, MA X K. Laurel: A Hybrid Data Distribution Coverage Network[J]. Journal of Software, 2011, 22(4): 722-735.

[16] MAHESWARI B U, SUDARSHAN T S B. Reputation based mesh-tree-mesh cluster hybrid architecture for P2P live streaming[C]// Proceedings of the 3rd International Conference on Devices, Circuits and Systems. Coimbatore: IEEE, 2016: 240-243.

[17] JAHROMI N T, AKBARI B, MOVAGHAR A. A hybrid mesh-tree peer-to-peer overlay structure for layered video streaming[C]// 2010 5th International Symposium on Telecommunications. Tehran: IEEE, 2010: 706-709.

[18] AMAD M, MEDDAHI A, AISSANI D, et al. HPM: A novel hierarchical Peer-to-Peer model for lookup acceleration with

provision of physical proximity[J]. Journal of Network and Computer Applications,2012,35(6):1818-1830.

[19] GUPTA B,RAHIMI N,HEXMOOR H. Design of Very Efficient Lookup Algorithms for a Low Diameter Hierarchical Structured Peer-to-Peer Network[C]//16th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN). Porto: IEEE, 2018:861-868.

[20] HASIMOTO-BELTRAN R,LOPEZ-FUENTES F D A,VERA-LOPEZ M. Hierarchical P2P architecture for efficient content distribution[J]. Peer-to-Peer Networking and Applications, 2019,12(4):724-739.

[21] LI J,LI C,FANG Z,et al. Optimal layer division for low latency in DHT-based hierarchical P2P network[J]. International Journal of Network Management,2016,26(2):95-110.

[22] MIRROKNI V,THORUP M,ZADIMOGHADDAM M. Consistent Hashing with Bounded Loads[C]//29th Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms (SODA). New Orleans:Society for Industrial and Applied Mathematics, 2018: 587-604.

[23] XIANG M,JIANG Y Z,XIA Z,et al. Consistent hashing with bounded loads and virtual nodes-based load balancing strategy

for proxy cache cluster[J]. Cluster Computing, 2020, 23(4): 3139-3155.

[24] CHEN Y,ZHAO E D,GAO G,et al. Multi-view video wireless resource optimization[J]. Chinese Journal of Computers,2020, 43(3):492-511.

[25] YU A J,YANG S M. Research on web server cluster load balancing algorithm in web education system[J]. Journal of Supercomputing,2020,76(5):3364-3373.



XIA Zhong, born in 1995,postgraduates. His main research interests include P2P and video surveillance.



XIANG Min, born in 1974, Ph.D, professor. His main research interests include smart grid, industrial Internet of things and automation control.