

基于瞬时信道状态信息的串行多中继选择方法*

韩维稼, 陈前斌, 唐 伦

(重庆邮电大学 通信与信息工程学院, 重庆 400065)

摘要: 提出了一种分布式串行多中继选择方法。该方法涉及 MAC 层协议, 在 RTS 包中添加一个字段 F , 用于存储选择中继的个数, 并通过广播 RTS 和 CTS 包获得中继节点的前、后向信道质量的瞬时测量值, 再通过定时和广播 flag 包实现在时间上串行选择多个中继。推导了瑞利衰落下串行多中继选择的碰撞概率式, 仿真并对比了最优中继选择和串行双中继选择的碰撞概率。结果表明, 碰撞概率在可容忍的范围内, 该方法切实可行。

关键词: 串行; 多中继选择; MAC 层; 碰撞概率

中图分类号: TP393.03

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2010)06-2211-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2010.06.061

Serial multiple relay selection method based on instantaneous CSI

HAN Wei-jia, CHEN Qian-bin, TANG Lun

(College of Communication & Information Engineering, Chongqing University of Posts & Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: This paper proposed a distributed serial multiple relay selection method based on instantaneous channel state information(CSI). It involved MAC layer's protocols, added field F to RTS package and used to storage the numbers of selected relays, and acquiring the instantaneous measurements of relay's backward, forward channel quality by broadcasting RTS and CTS packages, then exploited timing and broadcasting flag package to achieve time serial multiple relay selection. It derived the collision probability formula of this method with Rayleigh Fading, and conducted computer simulations to show the collision probability of best relay selection and serial two relay selection. Simulations demonstrate that the collision probability is within the range of tolerance and the new method is feasible.

Key words: serial; multiple relay selection; MAC layer; collision probability

0 引言

近年来,协作分集技术因为能够在接收端提供分集增益、抵抗无线信道的多径衰落,已成为研究热点之一。而中继技术更是被视为下一代移动通信网络的关键技术,因为中继站不但能够提高小区的覆盖范围,而且更能提高小区边缘用户的吞吐量和服务质量。在协同网络中,通过恰当的中继选择方法^[1,2],选择多个中继参与协同,形成虚拟 MIMO 以获得空间分集增益,将显著地提高网络容量。而在文献[3]的配置多天线的 MIMO 系统中,中继选择实质上变成了天线的选择。文献[4,5]的中继选择算法选择信道质量好的中继转发数据,将会减少因信道质量较差的中继转发信号所带来的功率浪费,从而节省整个系统的能量。

Laneman 等人^[6]最早研究了分集技术的具体实现问题,提出的分布式空时编码协议实现了协同分集。Hunter 等人^[7,8]提出了协同编码技术,把信道编码技术引入到协同分集技术中。这些技术虽然能够实现协同分集并获得了较好的分集增益效果,但是协议设计较为复杂,给应用带来了难度。Bletsas^[9]等人将机会路由的思想引入协同分集技术中,提出了一种基于网络选择的协同分集技术,在 MAC 层执行机会中继选

择,而在物理层实现协作分集。该方法不但能够获得和复杂空时编码协议一样的分集增益效果,而且更重要的是该方法简单实用,具有分布式特性,更接近于实际应用。但是,上述方法在最优中继选择时会产生碰撞,而处理碰撞的办法是中继节点采用退避机制,即一旦侦听到信道中出现 flag 包冲突,则所有中继定时器清零并启动新一轮的最优中继选择过程,直到没有碰撞为止。退避机制虽然可以有效地减小碰撞概率,但是也会显著地增加选择中继的时延和额外的信令开销。

针对这一问题,文献[10]提出了一种改进中继选择方法,该方法在文献[9]方法的流程中删除了中继退避机制,允许出现碰撞的中继节点广播 flag 包给其他节点。这样,就会有多个中继参与协同通信,提高了网络的吞吐量和传输性能,但是该方法具有明显缺点,即不能控制被选择的中继个数。

文献[11]提出了一种多跳虚拟天线阵列(VAA)网络下的多机会中继选择(M-OR)算法,该算法考虑在多个目的终端的情况下选择多个合适的中继参与协同,并把源终端也视为潜在的中继终端进行终端选择。即在给定的 STBC 编码矩阵条件下,依据信道状况信息选择多个合适的中继终端进行空时分组协作通信。但是文章只分析了单中继选择的碰撞概率、系统的中断概率和误码率,没有分析多中继选择的碰撞概率和性能。

收稿日期: 2009-11-30; 修回日期: 2010-01-04 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60972070); 新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-06-0778)

作者简介: 韩维稼(1985-),男,硕士研究生,主要研究方向为协同通信和中继选择(iamhanweijia@163.com); 陈前斌(1967-),男,教授,博导,博士,主要研究方向为下一代网络、个人通信、多媒体信息处理与传输; 唐伦(1973-),男,讲师,博士研究生,主要研究方向为新一代无线通信系统资源管理,包括动态频谱分配、中继系统资源分配。

文献[12]在机会中继选择算法^[9]的基础上提出了一种基于跨层优化策略的协作路由算法。该算法在先发式路由协议的基础上,利用网络层固有的路由信息来获取中继信道的信息,分布式地选择最佳中继,并利用跨层技术自适应地调整了 MAC 协议以减小端到端的传输时延。文章描述了该方案具体实现过程,并就其中的时间同步和跨层优化问题进行了分析。

此外,文献[9]仅对单个目的节点的最佳中继选择进行了分析,并未对多中继选择进行分析。针对这个问题,本文在其算法基础上提出了一种新的单目的节点情况下的串行多中继选择方法,并从碰撞概率的角度分析了性能。本文最大的贡献在于:实际应用中,很多情况下需要选择多个中继参与协作,串行多中继选择方法有效地解决了这个问题,而且可以根据需要调整选择中继的个数;详细阐述了在 MAC 层如何实现串行多中继选择的具体过程;对算法的碰撞概率公式进行了推导、仿真、比较。

1 系统模型

1.1 单中继选择

单中继选择的基本思想是从 m 个候选中继节点中选择一个信道质量最好的最优中继 R_b , 并让 R_b 参与协同通信, 即最优中继选择。具体过程描述如下:

a) 获取 CSI 阶段。图 1 给出了获取 CSI 的示意图, 在 MAC 层通过广播 RTS 包、CTS 包分别获得中继节点 R_i 的前向、后向信道的瞬时信道质量信息 h_{si} 、 h_{id} 。其中: h_{si} 表示源节点到中继节点 R_i 的信道质量状态信息; h_{id} 表示中继节点 R_i 到目的节点的信道质量状态信息。

b) 最优中继选择阶段。根据获得的瞬时信道质量状态信息 h_{si} 、 h_{id} 和以下准则计算出前向、后向信道的一个综合信道质量系数 h_i 。

a) 调和平均准则

$$h_i = \frac{2}{\frac{1}{|h_{si}|^2} + \frac{1}{|h_{id}|^2}} = \frac{2|h_{si}|^2|h_{id}|^2}{|h_{si}|^2 + |h_{id}|^2}, i \in [1 \dots m] \quad (1)$$

b) 最小准则

$$h_i = \min\{|h_{si}|^2, |h_{id}|^2\}, i \in [1, \dots, m] \quad (2)$$

接着每个 R_i 启动定时器, 且每个定时器的初始值为

$$T_i = \lambda/h_i, i \in [1, \dots, m], \lambda \text{ 为时间常量} \quad (3)$$

不难看出, 前向、后向信道质量较好的 R_i 会获得较大的 h_{si} 、 h_{id} , 从而得到较大的 h_i 。而 λ 为常数, T_i 与 h_i 成反比, R_i 进而获得较小的 T_i 。也就是说, 信道质量最好的中继具有最小的定时器初始值 T_i , 最先超时, 即

$$h_b = \max\{h_i\} \Leftrightarrow T_b = \min\{T_i\}, i \in [1, \dots, m] \quad (4)$$

定时器最先超时的中继为最优中继, 超时后的中继节点广播 flag 包标志最优中继的出现, 其余中继节点收到 flag 后把自己的定时器清零并退出竞争。图 2 给出了最优中继广播标志包进行最优中继选择的示意图。

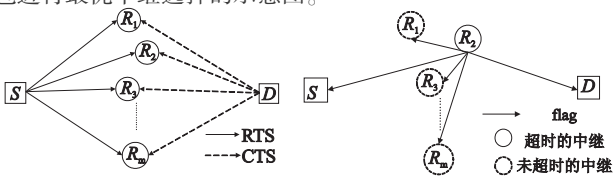


图1 CSI获取阶段示意图 图2 最优中继选择阶段示意图

c) 协同通信阶段。源节点 S 收到 flag 包后广播数据包进

入协同通信阶段, 最优中继 R_b 转发数据包到目的节点, 其余中继节点不作任何处理。而在目的节点 D 处, 由于获得了两个独立的衰落路径数据, 接收端可以通过合并信号获得分集增益。

1.2 串行多中继选择

串行多中继选择基本思想是在 RTS 包中添加一个字段 F , 用于存储需要选择的中继个数, 广播 RTS 和 CTS 包分别获得对中继前向、后向信道质量的一个瞬时测量值。接着, 各个中继再分别启动一个定时器进行中继选择, 超时的各个定时器依次广播 flag 包标志自己的出现, 收到 flag 包的各个网络节点作 $F-1$ 运算直到字段 $F=0$ 为止。协同通信阶段, 选择出来的中继转发源节点数据, 其余中继不作任何处理。

接下来, 以单源节点、单目的节点、四个中继节点的网络模型来描述串行双中继选择 (即 $F=2$) 的具体实现过程。其中, 每个节点均配置单天线, 考虑中继之间可以直接通信, 所有信道属于慢衰落无线信道以保证中继选择能够在信道的相干时间内快速完成。

1) 信道测量阶段 如图 3 所示, 目的节点 D 和所有节点 R_i 处于监听模式, 源节点 S 广播 RTS 包, 其中包括一个添加字段, 用于存储字段 $F=2$ 。

S 广播后进入监听模式, 节点 R_i 在收到 RTS 包后, 保存字段 $F=2$ (S 节点自己也保存), 并获得一个对应的信道质量瞬时测量值 h_{si} , 随即继续监听。

目的节点 D 收到 RTS 包后, 也保存字段 $F=2$, 并广播 CTS 包, 继续监听。 R_i 收到 CTS 包, 获得一个对应的信道质量瞬时测量值 h_{id} 。由于是慢衰落无线信道, 根据信道互易性质, 可以假定 $h_{id} = h_{di}$ 。此时, 源节点 S 处于监听模式, 收到 CTS 包后, 不作任何处理。

2) 定时阶段 在 R_i 接收到 CTS 包后, 根据获得的信道状态信息 h_{si} 、 h_{id} 和式 (1) ~ (3) 计算出前向、后向信道的一个综合信道质量系数 h_i , 并启动定时器, 随机进入监听模式。

3) 标志包广播阶段 根据以上分析, 假设 $T_3 < T_2 < T_4 < T_1$, 即 R_3 最先超时并广播 flag 包, 接着是 R_2 超时。 R_3 超时后, 迅速广播 flag 包标志最优中继的出现, 并进入监听模式, 字段 $F=2$ 不再变化。

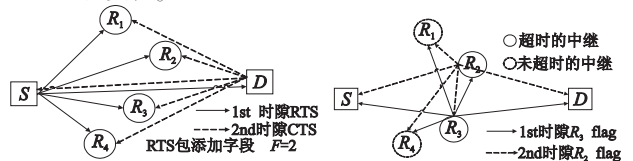


图3 信道测量阶段示意图 图4 标志包广播阶段示意图

图 4 给出了 flag 包广播的示意图, S 、 D 、其余 R_i 节点接收到 flag 包后, 进行 $F = F - 1$ 运算, 并检查自己的字段 F 是否为 0。如果 R_i 的字段 F 为 0, 则定时器清零, 并退出竞争; 如果不为 0, 则继续计时。如果 S 的字段 F 为 0, 表示多中继选择结束, 则发送数据包进入协同通信阶段; 如果不为 0, 则继续监听。 D 的字段 F 为 0, 则表示即将进入协同通信阶段, 继续监听; 不为 0, 则定时阶段还未结束, 也继续监听。 R_3 广播标志包后, 各节点字段 F 的值如表 1 所示。

表 1 最优中继广播后各节点的 F 字段值

F 字段的值	0	1	2
节点	无	S, D, R_1, R_2, R_4	R_3

接着, R_2 超时并迅速广播 flag 包标志次优中继的出现, 继

即进入监听模式,字段 $F = 1$ 不再变化。最优中继 R_3 收到 flag 包不作任何处理,继续监听。

其余节点接收到 flag 包后,继续作 $F = F - 1$ 运算,并检查自己的字段 F 是否为 0。很显然,运算后 S, D, R_1, R_4 的字段 F 已经为 0。 R_1, R_4 则退出竞争, D 继续监听, S 检查到自己字段 $F = 0$ 后,表明定时过程结束,参与协同的中继已经被选择出,于是发送数据包进入协同通信阶段。各节点字段 F 的值如表 2 所示。

可见定时结束后,被选择出的最优中继字段 $F = 2$,次优中继字段 $F = 1$,其余节点字段 $F = 0$ 。这样,该方法就在时间上串行选择出了两个中继。那么,串行双中继选择方法推广到一般情况下,就可以根据需求调整字段 F 的初始值,完成选择 F 个中继的目的。

4) 协同通信阶段 图 5 给出了协同通信阶段的数据传输示意图。源节点 S 以固定功率广播数据到所有节点,被选择出的双中继 R_3, R_2 参与协同通信,转发 S 节点的数据包到节点 D ,其余 R_1 不作任何处理。目的节点接收到中继转发的数据包后,进行多路合并获得分集增益,完成整个协同通信。

表2 次优中继广播后各节点的F字段值

F字段的值	0	1	2
节点	S D R_1 R_4	R_2	R_3

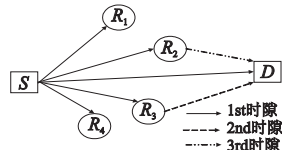


图5 协同通信阶段示意图

5) 同步问题 关于同步问题:信道测量阶段,考虑 S 和 D 之前存在直连链路,粗同步即可;中继选择阶段,选择出的多个中继与目的节点间的传输时延不会相差太大,在可以容忍的范围内,也不需要精确同步;而在协同通信阶段,如果不采用正交传输,也不考虑精确同步的问题。

2 数学分析

以上描述了理想状况下,分布式串行双中继选择的具体实现过程。但一般情况下,从最优中继的定时器超时一直到其他中继节点收到广播的 flag 包需要一定的时间间隔 c ,而在这段时间内其余的定时器也有可能超时并广播 flag 包,这样就会产生标志包冲突,使得各节点字段 F 不能得到理想状况下的变化,并且选择的中继个数不止两个,最终导致多中继选择失败。接下来,具体分析串行多中继选择的碰撞概率。

实际应用中时间间隔 c 应该包括中继节点无线设备的收发状态的切换时间 d_s 、中继节点间的信号传输时延 r 、中继 R_i 与目的节点间的信号传输时延 t_i 等,即

$$c \approx d_s + |t_b - t_i|_{\max} + r_{\max} \quad (5)$$

其中:传输时延均考虑最大值。定时器集合 $\{T_i\}, i \in [1, m], m$ 为候选中继个数,排序后有 $Y_1 < Y_2 < \dots < Y_m$,即 Y_1 是初始值最小的定时器, Y_2 是初始值次小的定时器。文献[9]给出了选择最优中继的碰撞概率公式:

$$Pr(\text{collision}) = Pr(Y_2 < Y_1 + c) = 1 - I_c$$

$$I_c = m(m-1) \int_{c_1}^{+\infty} f(y) [1 - F(y)]^{m-2} F(y-c) dy \quad (6)$$

其中: $f(y), F(y)$ 分别为 T_i 的 PDF 和 CDF 函数。

接下来,根据式(1)~(3)推导瑞利衰落下,定时器 T_i 的

PDF 和 CDF 函数。假设信道系数 h_{si}, h_{id} 是相互独立的随机变量且服从瑞利分布,那么信道增益 $|h_{si}|^2, |h_{id}|^2$ 也是相互独立的随机变量且服从参数分别为 β_1, β_2 的指数分布。

计算 h_i 时,如果采用最小准则,则 h_i 是服从参数为 $\beta_1 + \beta_2$ 的指数分布的随机变量;采用调和平均准则的情况,文献[13]已经作了相应的分析。于是有:

a) 调和平均准则

$$F(t) = \frac{\lambda \sqrt{\beta_1 \beta_2}}{t} e^{-\lambda(\beta_1 + \beta_2)/(2t)} K_1 \left(\frac{\lambda \sqrt{\beta_1 \beta_2}}{t} \right)$$

$$f(t) = \frac{\lambda^2}{2t^3} \beta_1 \beta_2 e^{-\lambda(\beta_1 + \beta_2)/(2t)} \times$$

$$\left[\frac{\beta_1 + \beta_2}{\sqrt{\beta_1 \beta_2}} K_1 \left(\frac{\lambda \sqrt{\beta_1 \beta_2}}{t} \right) + 2K_0 \left(\frac{\lambda \sqrt{\beta_1 \beta_2}}{t} \right) \right] \quad (7)$$

其中: $K_i(x)$ 是第二类修正贝塞尔函数, i 为阶数。

b) 最小准则

$$F(t) = e^{-\lambda(\beta_1 + \beta_2)/t}$$

$$f(t) = \frac{\lambda(\beta_1 + \beta_2)}{t^2} e^{-\lambda(\beta_1 + \beta_2)/t} \quad (8)$$

串行多中继选择方法是在时间上先后选择多个中继,那么可以依次计算出每次选择中继的碰撞概率:

$$Pr_{-1} = Pr(Y_2 < Y_1 + c_1) = 1 - I_{c_1}$$

$$I_{c_1} = m(m-1) \times \int_{c_1}^{+\infty} f(y) [1 - F(y)]^{m-2} F(y - c_1) dy$$

$$Pr_{-2} = Pr(Y_3 < Y_2 + c_2) = 1 - I_{c_2}$$

$$I_{c_2} = (m-1)(m-2) \times \int_{c_2}^{+\infty} f(y) [1 - F(y)]^{m-3} F(y - c_2) dy \quad (9)$$

$$\dots$$

$$Pr_{-F} = Pr(Y_{F+1} < Y_F + c_F) = 1 - I_{c_F}$$

$$I_{c_F} = (m - F + 1)(m - F) \times \int_{c_F}^{+\infty} f(y) [1 - F(y)]^{m-F-1} F(y - c_F) dy$$

其中: $F \leq m, F$ 为字段的初始值。

那么,只要其中有任何一次选择发生碰撞,就会导致整个多中继选择的失败。所以根据串联准则,整个多中继选择方法的总碰撞概率为

$$Pr(\text{collision}) = 1 - (1 - Pr_{-1})(1 - Pr_{-2}) \dots (1 - Pr_{-F}) =$$

$$1 - I_{c_1} \times I_{c_2} \times \dots \times I_{c_F} \quad (10)$$

3 仿真实证

本文仿真并对比了瑞利衰落环境下串行双中继选择和 1.1 节的最优中继选择的碰撞概率。为了简化运算,假设 $\beta_1 = \beta_2 = 1, c_1 = c_2 = c$ 。从图 6 中可以看出,最优中继选择和串行双中继选择的碰撞概率与 λ/c 之间的关系。不管是最优中继选择还是串行双中继选择,碰撞概率随着 λ/c 的增大而减小,而且选择两个中继的碰撞概率明显高于选择最优中继的情况。当 $\lambda/c = 200$ 时,最优中继选择的碰撞概率都在 1% 以下;而串行双中继选择的碰撞概率小于 1% 时,要求 $\lambda/c \geq 350$ 。

此外,计算综合信道质量系数 h_i 时采用最小准则明显要优于调和平均准则,这是因为调和平均准则使前、后向信道的信噪比更平衡,从而使得由于传播阴影产生的随机化影响在中继定时器之间变得不是很突出。

同样,假设 $\lambda/c = 400$,图 7 得到了串行双中继选择的碰撞概率和候选中继个数 m 的关系。碰撞概率随着 m 的增大而增大, $m = 6$ 时,碰撞概率都在 1% 以下,在可以容忍的范围

内;而当 m 超过 16 以后,碰撞概率均大于 1.5% 甚至达到了 2.5%,这将导致多中继选择更多的失败。如果采用文献[9]的退避机制来减小碰撞概率,将会导致系统更大的时延和信令开销,无法满足实时业务的需求。在这种情况下,采用文献[10]提出的碰撞处理的改进方法会更接近实际应用。

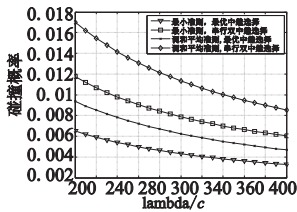


图6 最优中继选择和串行双中继选择的碰撞概率

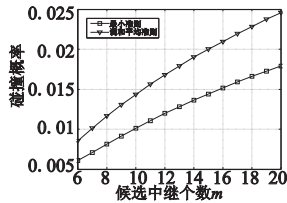


图7 串行双中继选择的碰撞概率与候选中继个数 m 之间的关系

4 结束语

本文分析了多种中继选择方法的原理和问题,提出了一种新的基于瞬时信道状态信息的串行多中继选择方法。该方法具有分布式特性,无须网络拓扑信息和集中控制单元,能够在时间上先后串行选择出最优、次优等多个中继,并且能够根据实际需要调整被选择中继的个数。详细阐述了该方法的具体实现流程,并推导了多中继选择的碰撞概率公式,且仿真并对比了瑞利衰落下的碰撞概率。采取适当机制来减小碰撞概率和进一步的性能分析、仿真将成为未来深入研究的方向。

参考文献:

[1] LEE Ki-dong, LEUNG V C M. Evaluations of achievable rate and power consumption in cooperative cellular networks with two classes of nodes[J]. *IEEE Trans on Vehicular Technology*, 2008, 57(2): 1166-1175.

[2] CAI J, SHEN X, MARK J W, et al. Semidistributed user relaying algorithm for amplify-and-forward wireless relay networks [J]. *IEEE*

Trans on Wireless Communications, 2008, 7(4): 1348-1358.

[3] MUHAIDAT S, CAVERS J K, HO P. Selection cooperation with transparent amplify-and-forward relaying in MIMO relay channels [C]//Proc of IEEE International Conference on Communications. Dresden: [s. n.], 2009:1-5.

[4] MADAN R, MEHTA N B, MOLICH A F, et al. Energy-efficient cooperative relaying over fading channels with simple relay selection [J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2008, 7(8): 3013-3025.

[5] BERES E, ADVE R. Selection cooperation in multi-source cooperative networks [J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2008, 7(1):118-127.

[6] LANEMAN J N, WORNELL G W. Distributed space-time coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks [J]. *IEEE Trans on Information Theory*, 2003, 49(10): 2415-2525.

[7] HUNTER T, NOSRATINIA A. Diversity through coded cooperation [J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2006, 5(2): 283-289.

[8] HUNTER T, NOSRATINIA A. Outage analysis of coded cooperation [J]. *IEEE Trans on Information Theory*, 2006, 52(2): 375-391.

[9] BLETSAS A, KHISTI A, REED P, et al. A simple cooperative diversity method based on network path selection [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*, 2006, 24(3): 659-672.

[10] 闻鹏举, 易辉跃, 赵晓群, 等. 一种改进的协同中继节点选择算法 [J]. *计算机应用研究*, 2008, 25(12): 3816-3818.

[11] 刘义凤, 邱育军, 隆克平. 一种基于多中继选择的分布式空时分组编码方案 [J]. *重庆邮电大学学报: 自然科学版*, 2009, 21(1): 39-44.

[12] 陈超, 郑宝玉, 赵贤敬. 一种利用跨层优化策略选择中继的协作路由算法 [J]. *电子与信息学报*, 2007, 29(12): 2981-2985.

[13] HASNA M O, ALOUINI M S. End-to-end performance of transmission systems with relays over Rayleigh-Fading channels [J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2003, 2(6): 1126-1131.

(上接第 2210 页)

4 结束语

针对大规模流媒体分发过程中流媒体服务器和主干网络负载过大的问题,本文在综合比较了 CDN 和 P2P 两种当前主流的流媒体分发技术后,提出了一种综合 CDN 和 P2P 优势的混合流媒体分发模型,并对此模型下的服务器负载和网络流量状况进行了仿真和分析。试验结果表明,在混合模式下,由于是 CDN 提供最初的流媒体分发,故可以得到比传统 P2P 更快的启动速度,与传统的 CDN 模式相比,又可以有效降低 CDN 服务器和主干网络的负载,减少响应时间,充分利用自治域内的网络带宽,加快了流媒体分发。

参考文献:

[1] 陈海涛,徐传福,黄遵国,等. 基于对等网络的广域网内容发布系统 [J]. *计算机应用研究*, 2004, 21(9): 250-252.

[2] 蒋海,李军,李忠诚. 混合内容分发网络及其性能分析模型 [J]. *计算机学报*, 2009, 32(3): 473-482.

[3] SHAIKH A, TEWARI R, AGRAWAL M. On the effectiveness of DNS-based server selection [C]//Proc of IEEE INFOCOM. Ancho-

rage, AK: [s. n.], 2001: 1801-1810.

[4] ANCEAUME E, GRADINARIU M, RAVOAJA A. Incentive for P2P fair resource sharing [C]//Proc of the 5th IEEE International Conference on Peer-to-Peer Computing. Washington DC: IEEE Computer Society, 2005: 253-260.

[5] MUSHTAQ M, AHMED T. QoS provisioning for video streaming over SP-Driven P2P networks using admission control [C]//Proc of the 6th IEEE Conference on CCNC. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2009: 978-979.

[6] 闫正航, 杨宇航, 王晖, 等. 基于 P2P 的 CDN 网络中紧急消息广播技术 [J]. *计算机应用研究*, 2007, 24(5): 287-292.

[7] THRKMEN F, MAZZOLENI P, CRISPO B. P-CDN: Extending access control capabilities of P2P systems to provide CDN services [C]//Proc of the 15th IEEE SCC. 2008: 480-486.

[8] ZHANG Guo-min, XING Chang-you, CHEN Ming. A distributed multimedia CDN model with P2P architecture [C]//Proc of IEEE ISCIT. 2006: 152-156.

[9] XU Dong-yan, KULKARNI S S, ROSENBERG C, et al. Analysis of a CDN-P2P hybrid architecture for cost-effective streaming media distribution [J]. *Multimedia Systems*, 2006, 11(4): 383-399.