

## 多速率无线 Mesh 网络环境下功率控制与调度机制——PSMR

李威煌, 吕品, 陈颖文, 徐明

(国防科学技术大学 计算机学院, 长沙 410073)

(weonli@163.com)

**摘要:**传输功率控制(TPC)技术是提高无线网络性能的关键技术之一。针对无线 Mesh 网络(WMN)的特点,提出了一种在多速率 WMN 环境下功率控制与调度机制(PSMR),该机制以系统的吞吐率和公平性为目标,利用冲突图思想对网络进行分析,建立了多目标规划的数学模型,并采用微分进化算法对其进行求解。模拟测试表明,PSMR 能有效提高系统吞吐率,改善系统的公平性。

**关键词:**无线 Mesh 网络;传输功率控制;多速率;吞吐率;公平性;微分进化算法

**中图分类号:** TP393.01 **文献标志码:** A

## PSMR: Power control and scheduling scheme in multi-rate wireless mesh networks

LI Wei-huang, LÜ Pin, CHEN Ying-wen, XU Ming

(School of Computer, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China)

**Abstract:** Transmission Power Control (TPC) is a key technique in wireless networks. In this paper, A Power control and Scheduling scheme in Multi-Rate wireless mesh network (PSMR) was introduced to improve the throughput and the fairness in the context of multi-rate Wireless Mesh Network (WMN). Traffic patterns of the system were analyzed based on a model of conflict graph, and a differential evolution based algorithm was proposed to optimize the time allocation vector. The simulation results demonstrate that PSMR can improve the throughput and also can strike a balance between throughput and fairness.

**Key words:** Wireless Mesh Network (WMN); Transmission Power Control (TPC); multi-rate; throughput; fairness; differential evolution algorithm

### 0 引言

无线 Mesh 网络(Wireless Mesh Network, WMN)是实现多种异构无线网络技术互通互联以提供更好服务的关键技术之一,由于其具有部署快、成本低、覆盖广和带宽高等优点,受到学术和工业领域的广泛关注,在家庭宽带因特网接入、社区网络建设、应急网络搭建等方面都具有巨大的潜力<sup>[1]</sup>。随着 WMN 用户需求的多样化,其对网络性能的要求也越来越高。功率控制技术是提高 WMN 吞吐率性能的重要技术之一,如何选择数据包的发送功率,从而降低节点之间的干扰,提高全网吞吐率在改善系统性能方面起着至关重要的作用<sup>[2-3]</sup>。

目前,在无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)<sup>[3-4]</sup>, MANET<sup>[5-7]</sup>和无线局域网(Wireless Local Area Network, WLAN)<sup>[8]</sup>领域已开展了相当丰富的研究,最初的研究工作是在满足一定条件(如一定的邻居个数、某个角度上的邻居数、全网连通性等)下,以最小的功率进行数据发送。WMN 有其自身的特点,对于有电源供电的 Mesh 路由器节点,能量不再受到限制,如何利用功率控制技术保证网络的服务质量成为了新的研究方向。Ramachandran 等人<sup>[9]</sup>面向高密度的 IEEE802.11 WLAN 提出了 Symphony 协议。节点以贪心的方式选择功率和速率。由于每个节点都试图最大化自己的速率,而忽略了对其他并发传输节点的干扰。因此,该协议对吞吐率的优化不是全网最优的。文献[10]以提高系统吞

吐率为目标,提出了一种新的联合调度和功率控制的技术,定义了需求满足因子(Demand Satisfaction Factor, DSF)来描述吞吐率和公平性之间的关系,并提出了线性规划(Serial Linear Programming Rounding, SLPR)启发式优化方法进行求解。但是,其没有考虑多速率技术的因素,因此,在多速率的环境下,其性能的发挥将受到一定的限制。

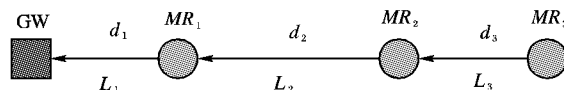


图1 简单的例子

吞吐率和公平性是服务质量中非常重要的衡量参数,功率控制对于提高吞吐率和公平性具有非常重要的意义。图1所示的是 WMN 中常见的数据流模式,三个 mesh 路由器节点(Mesh Router, MR)组成链状的骨干网络,每个 MR 的数据以汇聚的形式多跳转发至网关节点(GateWay, GW)。L<sub>i</sub>(i = 1, 2, 3)表示 MR 之间的链路, d<sub>i</sub>(i = 1, 2, 3)表示对应链路的长度,且有 d<sub>1</sub> = d<sub>3</sub> < d<sub>2</sub>。每个 MR 有两个可选的功率级别 p<sub>1</sub>, p<sub>2</sub>, 和两个速率级别 r<sub>1</sub>, r<sub>2</sub>, 且 p<sub>1</sub> < p<sub>2</sub>, r<sub>1</sub> < r<sub>2</sub>。最靠近 GW 的 MR<sub>1</sub> 的负载最重,包括了自身所收集的数据以及下级 MR 要求转发的数据,因此,应保证链路 L<sub>1</sub> 的吞吐率高于其他链路的吞吐率。如果 L<sub>1</sub> 总是选择最高的功率级别进行数据的发送,固然能提高吞吐率,但 L<sub>3</sub> 会受到干扰而不能并发, MR<sub>3</sub> 将可能饿死。为了保证全网吞吐率与 MR 之间的公平性,需要合

收稿日期:2010-07-01;修回日期:2010-08-31。 基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(09ZZ4034)。

**作者简介:**李威煌(1984-),男,广东韶关人,硕士研究生,主要研究方向:无线网络与移动计算、无线 Mesh 网络;吕品(1983-),男,山东滨州人,博士研究生,主要研究方向:无线网络与移动计算;陈颖文(1979-),男,湖南株洲人,讲师,博士,主要研究方向:无线网络与移动计算、车辆自组网;徐明(1964-),男,湖南长沙人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向:计算机体系结构、无线网络与移动计算。

适的功率控制技术来平衡两者之间的关系。

本文针对 WMN 的特点,以吞吐率和公平性为目标,利用冲突图思想对网络进行分析,建立多目标规划数学模型,通过微分进化算法求模型的最优解,在多速率环境下,提出了一种新的功率控制和调度机制 (Power control and Scheduling scheme in Multi-Rate, PSMR)。

## 1 网络模型分析与建模

### 1.1 系统模型

本文考虑具有 1 个 GW 和  $N$  ( $N \geq 1$ ) 个 MR 的 WMN,如图 2 所示。需要指出,本文讨论的方法适用于任何网络拓扑结构,考虑以下链状拓扑是为了方便距离的设置和模拟的测试。

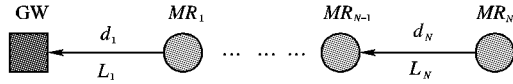


图2 链状网络拓扑结构

假设 1 每个 MR 配备了两块网卡,并工作在两个不相交的信道上。其中,一块网卡用于与其他 MR 相互通信以组成该 WMN 的骨干网络,具有两个可选的功率级别  $p_1$ ,  $p_2$  和两个速率级别  $r_1$ ,  $r_2$ ,且  $p_1 < p_2$ ,  $r_1 < r_2$ ,另一块用于与本地的客户节点进行通信以收集数据。

假设 2 MR 节点本身并不产生数据,只转发来自本地客户节点和下级 MR 的数据,每个 MR 所覆盖的客户节点始终有数据需要骨干网络进行转发,且目的地址均指向 GW,另外,MR 有足够的缓冲存储器容量。

假设 3 信道状态稳定,节点发送的速率取决于接收端的信号干扰噪声比 (Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR) 的大小,即当 SINR 处于不同的区间时,采用不同的速率  $r$  进行发送。

### 1.2 模型分析

本文利用冲突图理论<sup>[3]</sup>对网络各链路之间的冲突关系进行了分析,同时定义了传输模式等概念。

定义 1 假设网络中有  $N$  条链路,每条链路所使用的功率级别数相同且为  $K$ ,如果用  $K$  条虚拟链路表示一条链路,则全网共有虚拟链路  $N \times K$  条。将链路  $L_i$  的第  $k$  条虚拟链路表示为顶点  $v_{ik}'$ ,当两条虚拟链路  $v_{ik}'$  与  $v_{jk}'$  不能并发而相互冲突时,则相应顶点之间存在一条边  $e'_{ij}$ 。则冲突图定义为  $G'(V', E')$ ,  $V'$  为所有  $v_{ij}'$ ,  $E'$  为所有  $e'_{ij}$  的集合。

以图 1 中的网络为例,其可以表示为如图 3 所示的冲突图。从图中可以看出,链路  $L_2$  的长度较大,只有在使用高功率级别  $p_2$  时才能建立连接,所以只有对应的一条虚拟链路,表示为顶点  $v_{22}'$ ;还可以看到,只有链路  $L_1$  和  $L_3$  分别使用低功率级别  $p_1$  时才存在并发的情况。

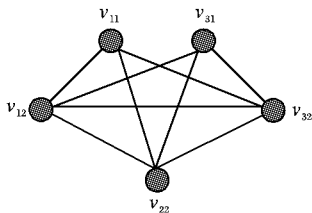


图3 冲突图

为了更好地反映网络的冲突或并发的情况,引入了传输模式的概念。

定义 2 假设冲突图  $G'(V', E')$  所有极大独立集的集合

为  $IS'$ ,且  $M' = |IS'|$ ,在多速率环境下,建立映射:

$$f: IS' \rightarrow R$$

$R$  表示  $N$  条链路的速率分布状态的集合,  $M = |R|$  且  $M \leq M'$ ,向量  $R^{(m)} = [r_1^{(m)}, r_2^{(m)}, \dots, r_N^{(m)}]$  表示第  $m$  种状态,这里不同的速率分配状态即为不同的传输模式。

以图 3 为例,该冲突图的极大独立集为  $IS' = \{\{v_{11}\}, \{v_{12}\}, \{v_{22}\}, \{v_{31}\}, \{v_{32}\}\}$ ,其对应的传输模式的集合为  $R = \{[r_1, 0, r_1], [r_2, 0, 0], [0, r_2, 0], [0, 0, r_2]\}$ 。其中  $[r_1, 0, r_1]$ ,  $[r_2, 0, 0]$  等均表示不同的传输模式。

### 1.3 多目标规划问题

#### 1.3.1 吞吐率和公平性的计算

研究是基于时分多路复用机制开展的。以下给出了图 2 所示系统的全网吞吐率与衡量公平性的函数表达式。

在单位时间内,为传输模式  $R^{(m)} = [r_1^{(m)}, r_2^{(m)}, \dots, r_N^{(m)}]$

分配的时间比例为  $t^{(m)}$ ,且满足  $\sum_{m=1}^M t^{(m)} = 1$ ,即在某一特定的时间段内,各传输模式处于激活状态的时间越小,控制的粒度越细,反之则越粗略,可根据具体的问题场景进行设置。全网的吞吐率  $TH$  可以表示为:

$$TH = \sum_{i=1}^N TH_i \quad (1)$$

其中,  $TH_i$  为链路  $L_i$  的吞吐率,可用时间比例  $t^{(m)}$  和对应的速率表示:

$$TH_i = \sum_{m=1}^M t^{(m)} r_i^{(m)} \quad (2)$$

除了全网吞吐率,还有一个重要的指标是公平性。考虑公平性的原因是为了避免片面追求全网速率的最大化而使得某些节点出现饿死现象。在给出公平性的表达式之前,首先需引入本地吞吐率和转发吞吐率的概念。

定义 3 在单位时间内,MR 向上级 MR 发送数据的吞吐率  $TH_i$  包括两部分:转发本地客户节点数据产生的吞吐率,即本地吞吐率 (Local Throughput),用  $THL_i$  表示;转发下级路由节点产生的数据,即外部吞吐率 (Foreign Throughput),用  $THF_i$  表示,且有:

$$THL_i = \begin{cases} TH_i - TH_{i+1}, & 0 < i < N \\ TH_N, & i = N \end{cases} \quad (3)$$

$$THF_i = \begin{cases} TH_{i+1}, & 0 < i < N \\ 0, & i = N \end{cases} \quad (4)$$

要使链状结构中的节点不被饿死,则其除了为下级节点提供转发服务外,还需满足自身一定的数据发送需求。公平性参数的定义需要正确地反映节点间对自身数据服务的差别性,这样,有利于算法更好地对传输模式进行调节。

这里,公平性用  $FAI$  表示,为网络中 MR 本地吞吐率的最大值和最小值之差,如式(5)所示:

$$FAI = \max_{i=1}^N (THL_i) - \min_{i=1}^N (THL_i) \quad (5)$$

#### 1.3.2 优化目标

系统的优化问题可以表示为吞吐率最大,衡量公平性的最大和最小的本地吞吐率之差最小的多目标规划的数学模型,如下所示:

$$\max \quad TH \quad (6)$$

$$\min \quad FAI \quad (7)$$

$$\text{s. t. } -THL_i \leq 0; i = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

$$\sum_{m=1}^M t^{(m)} = 1; 0 \leq t^{(m)} \leq 1 \quad (9)$$

优化结果为  $M$  个不同传输模式对应的运行时间所组成的时间分配向量  $\mathbf{T} = [t^{(1)}, t^{(2)}, t^{(3)}, \dots, t^{(M)}]$ 。

## 2 基于微分进化的优化算法

要求出 1.3.2 节中多目标规划问题的最优解非常复杂,采用启发式算法能有效地提高运算效率。微分进化算法是一种高效的优化迭代算法,首先将该多目标规划问题按照微分进化(Differential Evolution, DE)算法的相关概念建立模型,然后根据问题的特点选择合适的优化参数,通过种群中个体间的相互扰动实现进化,最终求出最优解。建模的具体细节如下。

**个体(染色体)格式**  $M$  个不同传输模式的时间分配向量  $\mathbf{T} = [t^{(1)}, t^{(2)}, t^{(3)}, \dots, t^{(M)}]$ , 定义为 DE 算法中的个体(形象的也称为染色体),该个体中的基因就是各传输模式的运行时间值,遗传个体的格式如图 4 所示。

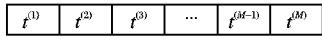


图4 个体(染色体)格式

**种群** 多个个体组成一个种群,种群根据规则一代代进化,得出最优的时间分配向量。设种群规模为  $H$ , 则第  $g$  代种群表示为  $T(g) = [T_1(g), T_2(g), \dots, T_H(g)]$ , 其中,  $T_h(g) = [t_h^{(1)}(g), t_h^{(2)}(g), \dots, t_h^{(M)}(g)]$ 。

**个体目标值评价函数** 个体目标值评价函数也叫做代价函数,用来评价个体之间优劣,目标函数值越小个体越优。目标值函数由吞吐率和公平性函数组合而成,如式(10)所示:

$$f(\mathbf{T}) = \alpha \cdot \text{FAI} - \beta \cdot \text{TH} \quad (10)$$

其中,  $\alpha$  和  $\beta$  为权重因子,且满足  $\alpha + \beta = 1$ 。另外,对于其他约束条件做以下处理:

**边界处理** 根据文献[12],为了使自变量满足  $t^{(m)} \geq 0$ , 且  $\sum_{m=1}^M t^{(m)} = 1$ , 需对每代的进化结果做如式(11)和(12)的变换:

$$t^{(m)'} = \begin{cases} \text{random}(0,1), & t^{(m)} < 0 \text{ 或 } t^{(m)} > 1 \\ t^{(m)}, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

$$t^{(m)''} = \frac{t^{(m)'}}{\sum_{m=1}^M t^{(m)'}} \quad (12)$$

**约束函数处理** 代价函数必须满足  $-\text{THL}_i \leq 0$  的约束条件,根据文献[12],引入乘积罚函数对其进行变换,如式(13)所示:

$$f_{\text{cost}}(t) = (f(t) + a) \prod_{i=1}^N c_i^{b_i} \quad (13)$$

其中,

$$c_i = \begin{cases} 1.0 + s_i g_i(t), & g_i(t) > 0 \\ 1, & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

$$s_i \geq 1 \quad (15)$$

$$b_i \geq 1 \quad (16)$$

$$g_i(t) = -\text{THL}_i \quad (17)$$

$$\min f(t) + a > 0 \quad (18)$$

根据文献[12],当  $s_i = 1$ ,  $b_i = 1$  时有比较好的效果。

基于上述建立的模型,按照微分进化算法初始化,个体评价、繁殖变异、选择和终止等若干步骤,可求得最优的时间分

配方案,具体过程可参考文献[11]。

## 3 模拟仿真与分析

### 3.1 模型建立

为了简化问题而又不失普遍性,假设每个 MR 节点有两个速率级别:12 Mbps 和 18 Mbps,和两个不同的功率级别:20 dBm 和 13 dBm。信道清空接入(Clear-Channel-Assessment, CCA)敏感度设置为 -82 dBm,即当节点接收到强度为 -82 dBm 的干扰信号时,将保持静默。

使用  $p_r = p_t - L_p$  作为信道衰减模型,  $p_r$  为接收功率,  $p_t$  为发送功率,  $L_p$  为路径损耗值,且  $L_p = 46 + 10 \lg r^3$ 。假设网络的负载很高,MR 在任何时刻都有数据需要发送。在仿真中,MR 成图 2 所示的链状排列,组成骨干网络,且是静止的,而每个 MR 的数据传输路径是事先确定的,相邻 MR 之间的距离均等于 30 m。

### 3.2 仿真结果

本文对 PSMR 与单一速率调度机制(Single Rate Scheduling Scheme, SRSS)的全网吞吐率大小进行了比较。综合考虑吞吐率与公平性之间的平衡,设置  $\alpha = \beta = 0.5$ , PSMR 与 SRSS 的吞吐率比较如图 5 所示。可以看到,当只有三条链路时,两种机制的吞吐率大小是相同的,因为此时不存在并发的传输。但是随着 MR 数量的增加,并发传输也增加了,而 PSMR 可以在较低的功率和速率发起更多的并发传输,其优势也越来越明显。两者之间的差距随着 MR 数量的增加变得越来越大。

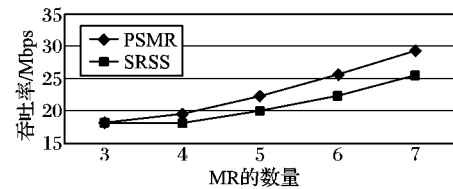


图5 全网吞吐率比较

图 6 和图 7 反映了权重因子对全网吞吐率与 MR 之间公平性的影响。

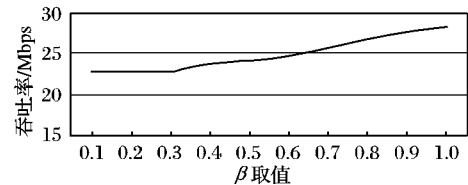


图6  $\beta$  取值与吞吐率的关系

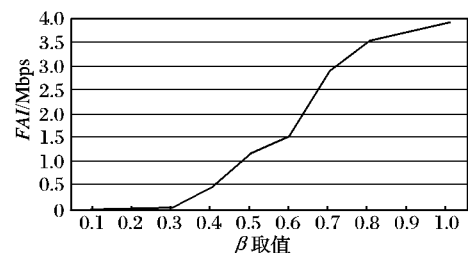


图7  $\beta$  取值与公平性 FAI 的关系

基于对模拟仿真结果的观察,对 PSMR 总结如下:当 MR 的数量大到足够允许并发传输时,PSMR 比 SRSS 的吞吐率提高了 10%。 $\beta$  的值越大,全局的吞吐率越大,但是 MR 之间的公平性会受到严重的影响。 $\alpha, \beta$  的值可以根据具体场景的吞吐率与公平性需求做出适当的调整。

以上结果说明,通过控制 MR 的传输功率和调度不同传输模式的运行时间,PSMR 较好地改善了 WMN 的全网吞吐率和公平性等性能。

#### 4 结语

传输功率控制技术是无线网络中非常重要的技术之一。尽管许多面向 WSN、MANET 和 WLAN 的工作已开展,但在多速率环境下面向 WMN,以吞吐率和公平性等性能作为改进目标的 TPC 技术的研究工作还相当有限。该文利用冲突图对系统进行建模,将问题转化为多目标规划问题,提出了一种基于微分进化算法的 PSMR 机制,模拟仿真证明了其有效性。未来的工作主要是对 PSMR 做进一步改进,研究自适应的分布式算法以达到吞吐率和公平性优化的目标。

##### 参考文献:

- [1] AKYILDIZ I F, WANG XUNDONG, WANG WELIN. Wireless mesh networks: A survey[J]. *Computer Networks*, 2005, 47(4): 445–487.
- [2] GUPTA P, KUMAR P R. The capacity of wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2000, 46(2): 388–404.
- [3] YAN GAO, ZHENG ZENG, KUMAR P R. Joint random access and power selection for maximal throughput in wireless networks[C]// *Proceedings of 29th Annual Conference on Computer Communications*. New York: IEEE, 2010: 11–15.
- [4] MONKS J P, BHARGHAVAN V, HWU W. A power controlled multiple access protocol for wireless packet networks[C]// *Proceedings of 20th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*. New York: IEEE, 2001: 219–221.
- [5] JUNG E S, VAIDYA N H. A power control MAC protocol for Ad Hoc networks[J]. *Wireless Networks*, 2005, 11(1): 55–66.
- [6] MUQATTASH A, KRUNZ M. Power controlled dual channel (PC-DC) medium access protocol for wireless Ad Hoc networks[C]// *Proceedings of 22nd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*. New York: IEEE, 2003: 470–480.
- [7] GOMEZ J, CAMPBELL A T. Conserving transmission power in wireless Ad Hoc networks[C]// *Proceedings of 9th International Conference on Network Protocols*. New York: IEEE, 2001: 11–14.
- [8] RASTI M, SHARAFAT A R, SEYFE B. Pareto-efficient and goal-driven power control in wireless networks: A game-theoretic approach with a novel pricing scheme[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2009, 17(2): 556–569.
- [9] RAMACHANDRAN K, KOKKU R, ZHANG H, *et al.* Symphony: Synchronous two-phase rate and power control in 802.11 w lans [C]// *Proceedings of the 6th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*. New York: ACM, 2008: 132–145.
- [10] TANG J, XUE G, CHANDLER C, *et al.* Link scheduling with power control for throughput enhancement in multihop wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2006, 55(3): 733–742.
- [11] STORN R, PRICE K. Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces[J]. *Journal of Global Optimization*, 1997, 11(4): 341–359.
- [12] LAMPINEN J, ZELINKA I. Mixed integer-discrete-continuous optimization by differential evolution[EB/OL]. [2010–02–15]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.35.9662>.

(上接第189页)

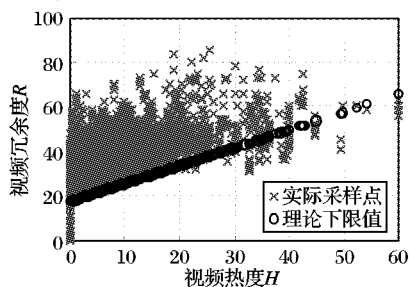


图4 Novasky 中视频冗余度与热度的关系

#### 4 结语

本文结合真实系统 Novasky 的部署与实践经验,对基于 P2P 的视频点播系统的存储进行了广泛深入的研究。本文提出的存储模块划分、数据冗余算法和存储调度原理,可以为新系统新算法的设计与实现提供一个重要的参考。

##### 参考文献:

- [1] HUANG YAN, FU T Z J, CHIU D M, *et al.* Challenges, design and analysis of a large-scale P2P-VoD system[J]. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2008, 38(4): 375–388.
- [2] VLAVIANOS A, ILIOFOTOU M, FALOUTSOS M. BitTos: Enhancing bittorrent for supporting streaming applications[C]// *25th IEEE International Conference on Computer Communications*. New York: IEEE, 2006: 1–6.
- [3] PLANK J S. A tutorial on reed-solomon coding for fault-tolerance in raid like systems[J]. *Software Practice and Experience*, 1997, 27(9): 995–1012.
- [4] GUO Y, SUH K, KUROSE J, *et al.* P2Cast: Peer-to-Peer patching for video on demand service[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2007, 33(2): 109–129.
- [5] LIU ZIMU, WU CHUAN, LI BOCHUN, *et al.* UUSee: Large-scale operational on-demand streaming with random network coding[C]// *Proceedings of IEEE INFOCOM*. New York: IEEE, 2010: 219.
- [6] SUH K, DIOT C, KUROSE J F, *et al.* Push-to-peer video-on-demand system: Design and evaluation[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2007, 25(9): 1706–1716.
- [7] CHEN Y F R, JANA R, STERN D, *et al.* Zebroid: Using IPTV data to support peer-assisted VoD content delivery[C]// *Proceedings of the 18th International Workshop on Network and Operating Systems Support for Digital Audio and Video*. New York: ACM, 2009: 115–120.
- [8] LUO D, TET H Y. Resilient Video-on-Demand streaming over P2P networks[EB/OL]. [2010–02–20]. <http://www.aqualab.cs.northwestern.edu/HotWeb08/papers/Lou-RVD-Slides.pdf>.
- [9] HUANG C, LI J, ROSS K W. Can internet Video-on-Demand be profitable?[C]// *Proceedings of the Conference on Applications, Technologies, Architectures and Protocols for Computer Communications*. New York: ACM, 2007: 144–155.
- [10] YU HONGLIANG, ZHENG DONGONG, ZHAO B, *et al.* Understanding user behavior in large-scale video-on-demand systems[C]// *Proceedings of the 1st ACM SIGOPS/EuroSys Conference*. New York: ACM, 2006: 333–344.