

# 光载无线网络的 MAC 层优化控制及性能分析

官 铮<sup>1</sup> 杨志军<sup>1,2</sup> 钱文华<sup>1</sup>

(云南大学信息学院 昆明 650091)<sup>1</sup> (云南省教育厅教育科学研究院 昆明 650223)<sup>2</sup>

**摘 要** 同播光载无线分布式天线系统(Radio-over-Fiber based Distributed Antenna Systems, RoF-DAS)中,基站在下行链路采用同播方式向多个远程天线单元(Remote Antenna Units, RAUs)传输无线信号,而不同 RAUs 覆盖的用户站点在上行方向通过不同长度的光纤链路接入位于基站的无线网络接入点。文中提出一种并行调度门限服务方式下的 IEEE 802.11 PCF 接入控制策略,通过捎带技术实现数据传输和数据请求过程的并行处理,同时利用门限服务方式进行数据传输,以提高信道资源利用率,减小光纤引入时延对网络性能的影响;建立数学模型,分析得出系统平均排队队长和吞吐量的闭式解析式,弥补了在研究光载无线网络性能时仅依靠实验进行性能分析的不足。通过仿真实验和理论分析验证了所提策略对提高网络吞吐量和缩短数据排队等待长度的有效性。

**关键词** 光载无线,媒体接入控制,IEEE 802.11,平均排队队长,吞吐量

**中图分类号** TP393.1 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.10.017

## Improved MAC Protocol in Radio-over-fiber Networks and Its Performance Analysis

GUAN Zheng<sup>1</sup> YANG Zhi-jun<sup>1,2</sup> QIAN Wen-hua<sup>1</sup>

(School of Information Science and Engineering, Yunnan University, Kunming 650091, China)<sup>1</sup>

(Educational and Scientific Institute, Educational Department of Yunnan Province, Kunming 650223, China)<sup>2</sup>

**Abstract** In simulcast radio-over-fiber based distributed antenna systems (RoF-DAS), a single set of base stations simultaneously broadcast wireless signals to multiple remote antenna units (RAUs) in the downlink, and in the uplink, user stations covered by different RAUs are connected to a wireless local-area network access point with different-length fiber links. To provide a contention-free media access control, this paper presented a parallel gated service IEEE 802.11 point coordination function (PGPCF) with gated service scheme and piggyback technology, improving the throughput of channel resources and reducing the delay deriving from the fiber. This paper also established a Markov chain analysis model to achieve the closed form expression of the mean queue length and the throughput, which overcomes the shortcoming of only employing experiments to analyze the access mechanism of RoF networks. Both the theory analysis and simulation results suggest the validity of improving the network throughput and shortening the mean queue length.

**Keywords** Radio-over-fiber, Medium access control, IEEE 802.11, Mean queue length, Throughput

## 1 引言

融合了光纤高带宽传输和无线灵活接入优势的光载无线 RoF(Radio-over-Fiber)网络,利用光纤链路大幅扩大了无线网络的覆盖区域。基于中心控制单元的同播 RoF 分布式天线系统可实现分布式光载网络的集中控制,因而受到越来越多研究者的关注<sup>[1-3]</sup>。

媒体接入控制层技术是构建 RoF 网络的前提和必要条件,已成为 RoF 网络研究的重点之一。然而,光载无线网络引入的光纤增加了无线传输的额外时延,一定程度上降低了现有网络的吞吐量性能,使得采用现有无线局域网的媒体接

入控制(Media Access Control, MAC)协议对其进行控制时的有效性将降低<sup>[4]</sup>。

针对 RoF 网络对现有无线通信技术 MAC 协议的影响, Pavlos 等提出通过设置循环前缀、响应时间等协议参数来减小光纤引入时延对网络性能的影响<sup>[5]</sup>。Mjeku 等对 IEEE 802.11g-over-fiber 网络架构下 MAC 层协议工作在基本访问模式、RTS/CTS 保护模式和 CTS-to-self 保护模式下的性能进行分析,并根据分布式协调(Distributed Coordination Function, DCF)工作原理计算了光纤长度的上限,但仍然存在隐藏终端的问题<sup>[6]</sup>。一些针对传统 WLAN 的接入控制改进方法可解决某个 RAU(Remote Antenna Unit)内的隐藏终端问

到稿日期:2017-09-05 返修日期:2018-01-13 本文受国家自然科学基金(61463051,61761045,61461054),云南省应用基础研究计划项目(2017FB100)资助。

**官 铮**(1982—),女,博士,副教授,CCF 会员,主要研究方向为无线网络接入技术、系统性能分析和优化等,E-mail:gz\_627@sina.com; **杨志军**(1968—),男,博士,高级研究员,主要研究方向为计算机通信与网络、无线通信和教育信息化等,E-mail:yzj@ynjy.cn(通信作者); **钱文华**(1980—),男,博士,副教授,主要研究方向为计算机图形图像处理及智能计算。

题,但在 RoF 网络中 AP(Access Point)需要接入位于多个 RAU 区域中的站点,而用户站点获取 RAU 外的信息的难度较大<sup>[7-8]</sup>。文献[9]通过比较光纤引入对蜂窝移动技术、无线局域网(Wireless Local Area Network, WLAN)等技术 MAC 协议的影响得出,相对于基于 DCF 的分布式 MAC 协议,基于中心控制的 MAC 层协议更适合于 RoF 网络。研究者们相继提出了基于轮询控制的 RoF MAC 协议<sup>[10-11]</sup>。其中,文献[12]指出采用点协调功能(Point Coordination Function, PCF)方式能有效避免隐藏终端问题,同时还提出根据光纤距离增加点协调帧间间隔(PCF Interframe Space, PIFS)时间可提高 PCF 接入方式下数据请求的成功率,从而减弱由光纤引入时延造成的吞吐量下降问题。然而,随着光纤距离的增加,过大的 PIFS 时间会加大 AP 轮询站点时的请求时间,继而使吞吐量降低。因此,为保证系统吞吐量,除了确保数据传输成功率之外,信道占用时间的动态分配和传输效率的提升等也十分必要<sup>[13]</sup>。本文主要针对基于 PCF 接入原理的高效网络接入控制策略及其性能展开分析讨论。

传统 PCF 中无竞争期(Contention Free Period, CFP)长度固定,且轮询表中所有站点接受位于接入点(Access Point, AP)处点协调器的中心调度。AP 根据轮询表顺序向终端站点发送数据请求,站点正确接收后予以回复;AP 发送数据请求后,若在规定时间内超时,未收到来自请求对象的数据,则向下一个站点发出请求。该控制方式在轮询请求阶段不能进行数据的有效传输,站点间的频繁切换和对空闲站点的请求等待都将造成网络吞吐量的降低。光载无线网络引入的光纤增加了无线传输的额外时延,文献[11]通过根据光纤长度增加 PIFS 等待时间来提高 AP 对站点信息的正确接收。随着 PIFS 时间的增加,站点查询的耗时也将增加,从而降低网络资源利用率。课题组通过对站点请求和数据的发送过程进行并行处理,来减少站点查询时间;并对限定  $k=1$  ( $k$  表示站点在每次轮询中能够发送的数据分组数)数据服务下的网络性能进行了分析<sup>[13]</sup>,然而限定  $k=1$  时服务中每次轮询 AP 仅允许当前站点发送一个数据分组,仍然存在接入效率低的问题。

针对此类问题,本文采用并行门限服务方式下的 PCF 接入控制策略,通过捎带技术实现数据传输和轮询请求的并行处理,采用门限服务方式进行数据传输以提高信道资源利用率。此外,鉴于现有研究方法普遍采用仿真实验评估接入策略对吞吐量、排队长度或时延等性能指标的影响<sup>[6,11]</sup>,本文通过建立数学模型,从理论上得出了站点平均排队队长及系统吞吐量的理论计算解析式,定量分析了网络负载、数据请求间隙等参数对系统性能的影响,弥补了在分析光载无线网络性能时仅依靠实验进行性能分析的不足。通过仿真实验和理论分析验证了所提策略对提高网络吞吐量、缩短数据排队等待长度的有效性。

## 2 并行门限服务 PCF 接入机制

针对 IEEE 802.11 中 PCF 控制机制在数据请求和确认等待期间无有效数据传输而造成吞吐量下降的问题,本文提出并行服务 PCF 接入机制,采用捎带技术实现数据传输和站点请求的并行处理,AP 采用 ACK+CF\_Poll 帧在对当前站

点的数据确认帧中捎带对下一站点的请求信息。另一方面,现有关于 RoF PCF 的研究中没有涉及站点接入信道后数据服务方式对网络吞吐量的影响,本文采用门限服务方式,规定当站点获得信道使用权后,以 AP 对站点的访问时刻为查询门限,在本轮访问中对访问时刻之前到达站点的所有数据分组进行传输。

图 1 给出了一个 RoF 网络的实例。STA1 和 STA2 位于 RAUA 中,STA3 位于 RAUB 中,RAUA 与 AP 的光纤连接距离远大于 RAUB。AP 在 PCF 并行门限服务 PCF 控制机制下按照 STA1→STA2→STA3 的轮询顺序实现中心控制调度。

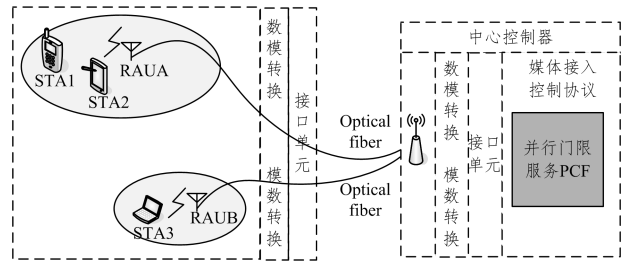


图 1 RoF 网络实例

Fig. 1 Example of RoF network

### 2.1 并行调度策略

在数据传输过程中,基站发送 CF\_Poll,其中的 *Serv\_type* 字段用于标明站点发送数据采用的服务方式,本文选用门限服务。站点接收 CF\_Poll/ACK+CF\_Poll 消息,如果有数据,则立即开始发送 Data+ACK,否则不予以回应;基站等待 PIFS 时间后,若未收到 Data+ACK 信息,则向轮询表中的下一个站点发送 CF\_Poll 请求;Data+ACK 中 *Dsn* 字段为数据序列号,站点接受轮询后将 *Dsn* 设置为缓冲区中已有数据的总数,每成功发送一个数据包后 *Dsn* 减一。基站接收 Data+ACK 消息后,通过发送 ACK+CF\_Poll 信息,在对当前用户进行数据接收确认中捎带公告下一个获得信道使用权的站点;*Dsn* 字段是下一个期望接收的数据序列号,其值在正确接收 Data 后 *Dsn* 减一;当 *Dsn*=0 时,该确认帧就表示对  $S_{Next}$  字段中站点的轮询请求。各类帧结构如图 2 所示。

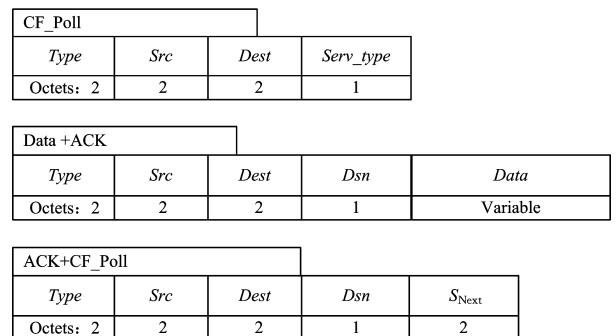


图 2 信息帧结构

Fig. 2 Frame structure

由于 PIFS 时间是一个全局参数,本文参照文献[11],将考虑光纤传输引入时延后的 PIFS 时间按照最远端的 RAU 进行设置,  $T_{PIFS} = T_{PIFS\_IEEE\ 802.11} + 2 \times fiber\ length \times 5\ \mu s/km$ 。

因此,当系统中存在多个 RUA 且与 AP 的距离相差较大时,PIFS 时间对近距离站点的影响将更加明显。该调度方式针对忙站点,使数据传输和站点轮询请求过程并行执行,可以提高信道利用率,有利于减小等待时延。

## 2.2 门限服务方式

由于 RoF 网络中的光纤引入时延增加了接入过程中的数据请求耗时,当请求站点为空时,AP 须等待更长的 PIFS 时间后才能向下一站点发送请求,通过降低站点切换频率可提高站点接入信道后的数据发送效率。通过分组聚合,可有效提高接入效率,而门限服务方式规定,在 AP 访问时刻之前

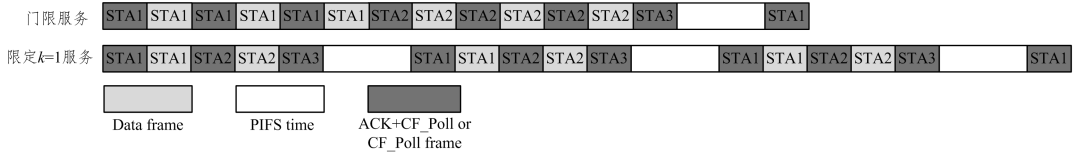


图 3 门限和限定  $k=1$  服务方式下接入过程的比较

Fig. 3 Comparison between gated and limited-1 service schemes

## 3 数学模型

在基于预约的轮询控制方式下,PCF 及其改进接入控制系统中的站点可以实现无冲突的数据传输,但并不排除由于信道质量等因素带来的数据传输失败现象。本节通过建立数学模型,对理想信道下本文所提策略可达到的最优性能进行评估,即假设基站和终端站点均能正确接收信息分组;各站点及基站间通信正常,数据交换成功;终端站点缓冲区没有数据溢出,且信道纠错由物理层差错检测机制处理。

### 3.1 假设条件

站点数据到达过程符合相互独立的泊松分布,其概率母函数、均值和二阶特性分别为  $A_i(z_i)$ ,  $\lambda_i = A_i'(1)$  和  $\sigma_{\lambda_i}^2 = A_i''(1) + \lambda_i - \lambda_i^2$ 。数据发送时间为独立同分布的均匀分布,其概率母函数、均值和方差分别为  $B_i(z_i)$ ,  $\beta_i = B_i'(1)$  和  $\sigma_{\beta_i}^2 = B_i''(1) + \beta_i - \beta_i^2$ 。基站发送 ACK 帧用于确认站点数据是否成功接收,并在最后一个数据的确认信息中捎带对轮询表中下一站点的请求;若 AP 经过 PIFS 时间仍未收到确认信息或数据,则向轮询表中下一站点发送 CF\_Poll 信息,此过程被视为查询转换过程。查询转换时间为独立同分布的均匀分布,其概率母函数、均值和方差分别为  $R_i(z_i)$ ,  $\gamma_i = R_i'(1)$  和  $\sigma_{\gamma_i}^2 = R_i''(1) + \gamma_i - \gamma_i^2$ 。时间轴以用户发送一个数据包的平均时间为时隙单位进行划分,用户仅在时隙开始时进行数据传输。

基于上述条件,可采用嵌入式马尔可夫链和概率母函数的方法对并行门限服务 PCF 接入机制建立数学模型,并对网络吞吐量、站点数据平均排队队长等关键参数进行解析。

### 3.2 并行门限服务轮询模型

假设 RoF 网络系统中包含  $N$  个站点  $\{STA_1, STA_2, \dots, STA_i, \dots, STA_N\}$ 。定义随机变量  $\xi_i(n)$  表示基站 AP 在  $t_n$  时刻轮询站点  $i$  ( $i=1, 2, \dots, N$ ) 时站点  $i$  缓存中等待的信息分组数,系统排队长度的状态变量为  $\{\xi_1(n), \dots, \xi_i(n), \dots, \xi_N(n)\}$ 。AP 完成  $STA_i$  的数据服务后在  $t_{n+1}$  时刻轮询  $STA_{i+1}$ , 此时系统的状态变量为  $\{\xi_1(n+1), \xi_2(n+1), \dots, \xi_i(n+1), \dots, \xi_N(n+1)\}$ 。

到达缓存的信息分组均可以在本轮服务过程中被发送。相对于传统 PCF 中限定  $k=1$  服务方式下站点每轮仅允许发送一个信息分组,门限服务起到了分组聚合的作用,因此,发送相同数量的数据包(数量大于 1)时,门限服务需要的站点轮询请求次数少于限定  $k=1$  的服务方式,从而消耗的 PIFS 等待时间较少。图 3 给出了限定  $k=1$  服务和门限服务方式下接入过程的比较,STA1 和 STA2 在 AP 访问时刻缓存中等待发送的数据分组数等于 3, STA3 缓存区为空。如图 3 所示,完成系统中相同数量的数据发送,门限服务方式比限定  $k=1$  服务方式消耗的 PIFS 空闲等待时间和 CFP\_Poll 请求时间更少。

为建立系统数学模型,定义如下变量。

$v_i(n)$ :  $STA_i$  的数据服务时间;

$\eta_j(v_i)$ : 在  $v_i(n)$  期间到达  $STA_j$  ( $j=1, 2, \dots, N$ ) 的数据分组数;

$u_i(n)$ : 当  $STA_i$  为空时, AP 向  $STA_{i+1}$  发送 CF\_Poll 所消耗的查询转换时间;

$\mu_j(u_i)$ : 在  $u_i(n)$  期间到达  $STA_j$  ( $j=1, 2, \dots, N$ ) 的数据分组数。

根据并行门限服务 PCF 机制的工作原理,在不考虑差错重传时,相同数据不被重复传输,系统中的数据均从系统外部到达。AP 在  $t_{n+1}$  时刻查询  $STA_{i+1}$  时,系统状态变量存在如下状态转移关系式:

$$\xi_j(n+1) = \begin{cases} \xi_j(n) + \eta_j(v_i), & j \neq i \\ \eta_j(v_i), & j = i \end{cases}; \xi_i(n) \neq 0 \quad (1)$$

$$\xi_j(n+1) = \begin{cases} \xi_j(n) + \mu_j(u_i), & j \neq i \\ \mu_j(u_i), & j = i \end{cases}; \xi_i(n) = 0 \quad (2)$$

由式(1)和式(2)可知,  $t_{n+1}$  时刻的系统状态变量仅与  $t_n$  时刻的系统状态有关,具有无后效性质,且轮询系统内的站点数量相对确定,因此服务开始时刻系统的状态是可数的,构成嵌入式 Markov 链。当系统满足稳定条件  $\sum \lambda \beta < 1$  时,该 Markov 过程是齐次、非周期、不可约和各态历经的,并且有唯一的稳态分布。

稳态下的概率母函数定义为:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P[\xi_j(n) = x_j; j = 1, 2, \dots, N] = \pi_i(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_N) \quad (3)$$

则 AP 在  $t_n$  时刻查询站点  $STA_i$  时系统中各站点数据排队数量的概率母函数为<sup>[14]</sup>:

$$\begin{aligned} & G_{i+1}(z_1, \dots, z_i, \dots, z_N) \\ &= G_i(z_1, \dots, z_{i-1}, B_i(\prod_{j=1}^N A_j(z_j)), z_{i+1}, \dots, z_N) - \\ & G_i(z_1, \dots, z_i, \dots, z_N) |_{z_i=0} + R_i(\prod_{j=1}^N A_j(z_j)) G_i(z_1, \dots, \\ & z_i, \dots, z_N) |_{z_i=0} \end{aligned} \quad (4)$$

## 4 性能分析

### 4.1 站点空闲概率

根据 3.2 节中对系统概率母函数的定义,即  $G_i(z_1, \dots, z_N) |_{z_i=0} = \sum_{x_1=0}^{\infty} \dots \sum_{x_N=0}^{\infty} z_1^{x_1} \dots z_N^{x_N} \pi_i(x_1, \dots, x_N) |_{x_i=0}$ , 存在如下关系:

$$\lim_{z_1, \dots, z_N \rightarrow 1} G_i(z_1, \dots, z_N) |_{z_i=0} = \sum_{x_1=0}^{\infty} \dots \sum_{x_{i-1}=0}^{\infty} \sum_{x_{i+1}=0}^{\infty} \dots \sum_{x_N=0}^{\infty} P[\xi_i(n)=0, \xi_j(n)=x_j; j \neq i]$$

由于站点状态相互独立,由此得出:

$$\lim_{z_1, \dots, z_N \rightarrow 1} G_i(z_1, \dots, z_N) |_{z_i=0} = P[\xi_i(n)=0] \quad (5)$$

因此,记  $\lim_{z_1, \dots, z_N \rightarrow 1} G_i(z_1, \dots, z_N) |_{z_i=0}$  为  $G_{i0}$  代表  $STA_i$  的空闲概率。根据门限服务规则,有:

$$G_{i0} = P(\xi_i(n)=0) = \exp(-\lambda_i T_s) \quad (6)$$

其中,  $T_s$  是系统的平均查询周期。

求解式(6),得到:

$$G_{i0} = \frac{\text{lambertw}\left(\frac{\lambda_i \sum_{j=1}^N \gamma_j}{1 - \sum_{j=1}^N \rho}\right) (1 - \sum_{j=1}^N \rho)}{\lambda_i \sum_{j=1}^N \gamma_j} \quad (7)$$

其中,  $\text{lambertw}(\cdot)$  表示朗伯 W 函数。

### 4.2 站点的平均排队队长

定义在  $t_n$  时刻  $STA_i$  开始传输数据,此时该站点存储器中平均存储的信息分组数为站点的平均排队队长,记为  $g_i(i)$ 。根据概率母函数的性质,  $g_i(i)$  可根据式(8)计算:

$$g_i(i) = \lim_{z_1, \dots, z_i, \dots, z_N \rightarrow 1} \frac{\partial G_i(z_1, \dots, z_i, \dots, z_N)}{\partial z_i} \quad (8)$$

将式(4)代入式(8)计算得出:

$$g_i(i) = \frac{\lambda_i \sum_{j=1}^N \gamma_j G_{j0}}{1 - \sum_{j=1}^N \rho} \quad (9)$$

将式(7)代入得出站点平均排队队长为:

$$g_i(i) = \frac{\lambda_i \sum_{j=1}^N \gamma_j G_{j0}}{1 - \sum_{j=1}^N \rho} = \text{lambertw}\left(\frac{\lambda_i \sum_{j=1}^N \gamma_j}{1 - \sum_{j=1}^N \rho}\right) \quad (10)$$

### 4.3 系统吞吐量

定义系统吞吐量为:

$$L = \frac{\text{总服务时间}}{\text{系统运行时间}} \quad (11)$$

根据门限服务规则,有:

$$L = \frac{\sum_{i=1}^N g_i(i) \beta_i}{T_s}, T_s = \frac{g_i(j)}{\lambda_j}$$

$$L = \sum_{i=1}^N \lambda_i \beta_i \quad (12)$$

由式(11)和式(12)可知,系统吞吐量随负载增加,但同时造成站点平均排队队长的增长。因此,若要兼顾系统利用率和服务质量,则需要提高网络吞吐量的同时保证较低的站点信息分组平均排队队长。

## 5 仿真实验和数值分析

根据并行调度门限服务控制模型,在 MATLAB 2012b

平台上完成仿真实验。图 4—图 7 中的仿真值为分析对象进行 1000 次蒙特卡洛实验的统计平均值。仿真环境包含 1 个基站和 3 个站点,参照 IEEE 802.11n 标准采用 64-QAM 调制数据传输速率为 54Mbps,数据分组长度为 5400 字节,时间轴按时隙划分 1slot=100 us,则平均服务时间  $\beta=1\text{slot}$ 。

图 4 和图 5 给出了站点空闲率与查询转换时间和信息分组到达率的关系。图 6 和图 7 给出了站点平均排队队长与查询转换时间和信息分组到达率的关系。

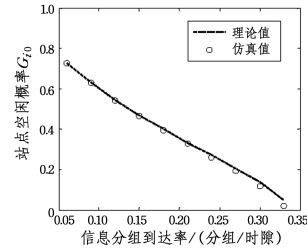


图 4 空闲率与信息分组到达率的关系

Fig. 4 Relation between arrival rate and idle probability

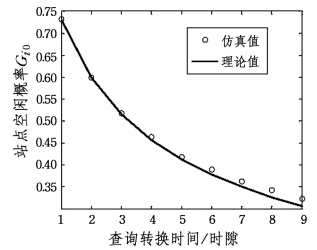


图 5 空闲率与查询转换时间的关系

Fig. 5 Relation between switchover time and idle probability

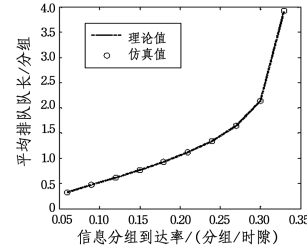


图 6 平均排队队长和数据分组到达率的关系

Fig. 6 Relation between arrival rate and mean queue length

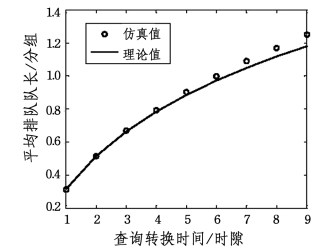


图 7 平均排队队长和查询转换时间的关系

Fig. 7 Relation between switchover time and mean queue length

如图 4 和图 6 所示,随着信息分组到达率的增加,站点空闲率和平均排队队长的理论计算值和仿真结果能较好地拟合;图 7 所示的站点空闲率和平均排队队长的理论分析值与仿真结果之间的误差随查询转换时间的增加而加大,但误差范围小于  $\pm 5\%$ ,从而证明了理论分析模型的有效性。此外,站点空闲的概率随着查询转换时间和信息分组到达率的增加而减小;站点平均排队队长随着信息分组到达率和系统查询转换时间的增加而延长。

图 8、图 9 展示了经典 Round-Robin 限定  $k=1$  服务、并行限定  $k=1$  服务和本文提出的并行门限服务控制方式的理论分析结果比较。如图 8 所示,3 种服务方式下的平均排队队长均随着查询转换时间的增加而增加,但并行门限服务系统的平均排队队长相对较低。在本文所述的接入策略中,将光纤长度因素引入 PIFS 时间的设定,因此查询转换时间会随着光纤距离的增加而加大,尽管增加的查询转换时间会降低信道利用率。另一方面,站点空闲率随查询转换时间的增加而减小,AP 通过对忙站点数据传输和轮询请求的并行处理

可减少查询转换时间的消耗。因此,在光纤引入时延的情况下,并行门限服务系统将获得更小的平均排队队长,从而提供更好的时延性能。

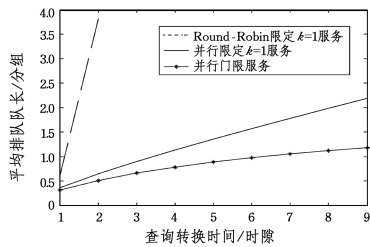


图 8 平均排队队长的比较

Fig. 8 Comparison of mean queue length

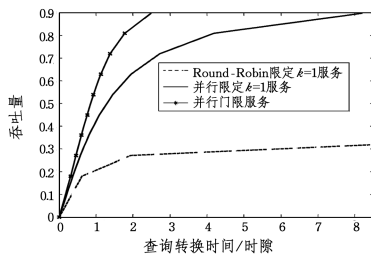


图 9 吞吐量-平均排队队长的比较

Fig. 9 Comparison of throughput and mean queue length

图 9 反映出在相同系统吞吐量的情况下,并行门限服务系统的平均排队队长要短于限定  $k=1$  和并行限定  $k=1$  服务系统,从而充分说明了本文提出的并行门限服务系统在保证系统效率的同时能够提供更好的服务质量。

**结束语** PCF 控制方式能够实现无冲突的数据接入。本文针对光载无线网络中光纤引入时延对系统吞吐量等性能的影响,采用并行门限服务方式下的 PCF 接入控制方式,通过捎带技术实现数据传输和轮询请求的并行处理,采用门限服务方式进行数据传输以提高信道资源的利用率。通过建立数学模型对上述控制方式进行性能评估,弥补了在分析光载无线网络性能时仅依靠实验进行性能分析的不足。通过仿真实现和理论分析,验证了所提策略对提高网络吞吐量、缩短数据排队等待长度的有效性。

本文所建立的数学分析模型中并未考虑数据重传机制对系统性能的影响,而真实应用场景中,受信道质量等因素的影响,数据接入存在差错重传,重传的数据也将占用信道资源,随着数据差错概率和重传次数的增加,系统性能将难以达到理论最优值。目前,仍然鲜有关于信道质量与接入控制性能之间的定量关系的分析成果。因此,下一步将针对非理想信道环境下具有数据重传机制的 PCF 系统性能评估及接入控制策略优化展开研究。

## 参考文献

[1] JI Y F, XU K, TIAN H P, et al. Large dynamic, reconfigurable, distributed intelligent radio-over-fiber (I-ROF) system[J]. *Scientia Sinica Informations*, 2012, 42(10): 1204-1216. (in Chinese)  
纪越峰,徐坤,田慧平等.大动态、可重构、分布式的智能光载无线(I-ROF)系统[J]. *中国科学:信息科学*, 2012, 42(10): 1204-1216.

[2] GHASSEMI A, GULLIVER T A, CIOFFI J M, et al. Radio over fiber based networks for the smart grid[C]// *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 2014. Austin, USA, 2014: 2605-2611.

[3] ZHENG M A, ZHANG Z Q, DING Z G, et al. Key techniques for 5G wireless communications: network architecture, physical layer, and MAC layer perspectives [J]. *Science China Information Sciences*, 2015, 58(4): 1-20.

[4] CHEN C W, FENG Z Y. Video over IEEE 802.11 wireless LAN: A brief survey [J]. *China Communication*, 2013, 10(5): 1-19.

[5] SKLIKAS P, MJEKU M, GOMES N J. Protocol parameter selection for fiber-supported IEEE 802.16m networks [C]// *IEEE International Conference on Communications (ICC 2014)*. Sydney, Australia, 2014: 4173-4178.

[6] SHEN X, XU K, WU J, et al. Performance Analysis of Medium Access Control Protocol for IEEE 802.11g-over-Fiber Networks [J]. *China Communications*, 2013, 10(1): 81-92.

[7] FAN Y T, LI J Q, XU K. Performance analysis for IEEE 802.11 distributed coordination function in radio-over-fiber-based distributed antenna systems [J]. *Optics Express*, 2013, 21(18): 20529-20543.

[8] LI R F, LIU Q, LI R F. Spectrum access scheme of MAC layer for real-time traffic in cognitive radio network [J]. *Journal of Communications*, 2014, 35(4): 35-43. (in Chinese)  
李瑞芳,刘泉,李仁发.面向实时业务的认知无线网络 MAC 层频谱接入方案[J]. *通信学报*, 2014, 35(4): 35-43.

[9] LI J Q, FAN Y T, CHEN H, et al. Performance analysis for WLAN medium access control protocol in simulcast radio-over-fiber-based distributed antenna systems [J]. *China Communications*, 2014, 11(5): 37-48.

[10] PANAGIOTAKIS A, NICOPOLITIDIS P, PAPADIMITRIOU G I, et al. Performance increase for highly-loaded RoF access networks [J]. *IEEE Communications Letters*, 2015, 19(9): 1628-1631.

[11] FAN Y T, LI J Q, XU K, et al. Improved IEEE 802.11 point coordination function considering fiber-delay difference in distributed antenna systems [C]// *2014 IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW 2014)*. Sydney, Australia, 2014: 407-411.

[12] NITSCHKE T, CORDEIRO C, FLORES A B, et al. IEEE 802.11 ad: directional 60 GHz communication for multi-Gigabit-per-second Wi-Fi [J]. *Communications Magazine, IEEE*, 2014, 52(12): 132-141.

[13] GUAN Z, HE M. State-dependent polling system with an application on M2M network [C]// *10th EAI international Conference on Communications and Networking in China*. IEEE, 2016: 782-786.

[14] GUAN Z, QIAN W H, HE M, et al. Energy efficiency analysis of access control protocol for radio on fiber network based on IEEE 802.11 PCF [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2017, 47(3): 444-449. (in Chinese)  
官铮,钱文华,何敏,等.基于 IEEE802.11 PCF 的光载无线网络接入控制协议能效分析[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2017, 47(3): 444-449.