

# RoF-DAS 架构下具有差错重传的预约式 WLAN MAC 协议研究

官铮<sup>1</sup>, 熊磊<sup>1</sup>, 贾猷<sup>1</sup>, 何敏<sup>1</sup>, 杨志军<sup>1,2</sup>

(1. 云南大学信息学院, 云南 昆明 650091; 2. 云南省教育厅教育科学研究院, 云南 昆明 650223)

**摘 要:** 为减少控制帧消耗, 降低系统接入时延, 提出了预约式门限服务轮询接入 (SGPA) 策略, 将站点接入时刻缓存区中的排队数据整合为数据集, 对数据集进行统一发送和确认。针对 RoF-DAS 架构下 WLAN 差错重传机制与网络接入性能的定量关系进行分析, 建立了具有内部数据的门限服务轮询 (IAGP) 排队模型, 利用轮询系统中内部数据的到达和服务过程描述数据差错重传机制, 然后基于马尔可夫链和概率母函数方法推导出站点数据时延性能与重传次数、重传概率等参数的定量关系表达式。仿真实验结果表明, SGPA 与典型 IEEE 802.11 PCF 相比有效降低了接入时延; 采用 IAGP 模型对系统时延性能分析的理论计算值与仿真结果一致。该分析模型为非理想信道环境和差错重传机制下的 RoF-DAS WLAN 网络接入性能分析提供了一种快速评估机制。

**关键词:** 同播分布式天线系统; 媒体接入控制; 差错重传; 性能评估; 数学建模

中图分类号: TP914

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2020056

## Research on scheduled WLAN MAC protocol with failure retries on RoF-DAS architecture

GUAN Zheng<sup>1</sup>, XIONG Lei<sup>1</sup>, JIA Yao<sup>1</sup>, HE Min<sup>1</sup>, YANG Zhijun<sup>1,2</sup>

1. School of Information Science and Engineering, Yunnan University, Kunming 650091, China

2. Institute of Education Sciences, Educational Department of Yunnan Province, Kunming 650223, China

**Abstract:** Aim to reduce control frames consumption and improve the delay performance, a scheduled gated-service polling access (SGPA) mechanism was proposed, in which the total data packets in the buffer at the polling instant were aggregated into a data set, that was transmitted and acknowledged uniformly. Then, an inner-arrival gated-service polling (IAGP) model was proposed to analyze the quantitative relationship between failure retry mechanism and network access performance of the wireless local area network (WLAN) in RoF-DAS. The failure retry mechanism were modeled as the arrival and service process of inner customers in IAGP. Using the Markov chain and generating function method, the closed-form expressions for the quantitative relationship between delay performance and retrieval parameters, such as retry times, and the probability of retransmission, were achieved. The simulation results show that the proposed SGPA can achieve a lower delay than IEEE 802.11, and the theoretical performance evaluation calculated by IAGP are identical with the simulation results, which provides an effective evaluation mechanism for the access performance in RoF-DAS WLAN, with imperfect channel and failure retry mechanism.

**Key words:** simulcast distributed antenna system, media access control, failure retry, performance analysis, mathematical model

收稿日期: 2019-09-11; 修回日期: 2020-02-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61761045); 云南省基础应用研究计划基金资助项目 (No. 2017FB100)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.61761045), Yunnan Applied Basic Research Projects (No.2017FB100)

## 1 引言

光载无线技术和 WLAN 的结合应用可有效改善传统 WLAN 覆盖、干扰和维护问题。如图 1 所示,同播光载无线分布式天线系统 (RoF-DAS, radio over fiber distributed antenna system) 架构下,分布在不同地理位置上的多个远端天线单元 (RAU, remote antenna unit) 以不同长度的光纤为媒介连接到中央控制器 (CO, control office)。一方面,简单化的远端天线单元大大扩展了无线覆盖范围,集中化的基站处理有利于动态资源规划;另一方面,继承了 RoF 高带宽、低功耗等优势。因此, RoF-DAS 被视为一种 RoF 的有效实现方式,在高速移动环境和大规模室内无线覆盖等场景中得到应用<sup>[1]</sup>。

随着新一代 WLAN 物理层传输速率提升至吉比特每秒,媒体接入控制层面对用户吞吐量、时延等性能提出了更高要求。IEEE 802.11b/g 等新一代 WLAN 标准相继展开针对 RoF 系统的研究。传统 WLAN 大多采用基于随机接入的分布式协调功能 (DCF, distributed coordination function) 及其补充模式。文献[2-3]基于 Bianchi 模型建立了同播 RoF-DAS 架构下的 DCF WLAN 系统吞吐量数学模型,提供了一种网络性能快速评估机制;文献[4]通过检测切换机制减少 RAU 间隐藏终端问题。点协调功能 (PCF, point coordination function) 在 IEEE 802.11 中为选用模式,但在 RoF-DAS WLAN 场景下,数据仅在基站/接入点和远程用户之间交换,下行方向基站/接入点采用广播方式向多个 RAU 发送信号,上行方向用户从不同的 RAU 通过 MAC 接入

共享信道资源。由于 PCF 基于预约多址接入方式,远端用户需收到来自 CO 的轮询请求后,才能在预约期内按照指定的站点服务方式顺序发送数据。因此,相对于采用随机接入方式的 DCF,基于预约的 PCF 可有效解决 RAU 间的隐藏终端问题,实现无冲突的数据接入,具有更好的吞吐量和时延性能<sup>[5]</sup>。针对 PCF 机制下的 WLAN 系统,文献[6]在 PCF 帧间隔中加入光纤引入时延,从而提升网络吞吐量和 RAU 间公平性;Panagiotakis 等<sup>[7]</sup>利用中心局存储单元实现节点状态缓存,减少重复资源竞争,实现数据传输中的带宽利用率的提升;刘龙军等<sup>[8]</sup>以现场可编程门阵列 (FPGA, field programmable gate array) 为平台对轮询介入协议进行设计和实现。

另一方面,在针对 MAC 层等上层网络的研究过程中,除协议优化、资源配置方法的设计之外,还应从网络模型建立、网络性能定量评估等理论研究角度出发,展开更深入的分析,从而指导网络的整体设计<sup>[9]</sup>。在理论建模分析方面,文献[10]基于 M/G/1 排队模型提出了一种典型 PCF 接入时延的简化分析模型;从能耗利用率角度出发,文献[11]采用门限服务轮询策略,通过休眠/唤醒和捎带机制降低了数据接入时延,提高了网络接入能效;文献[12]基于轮询控制模型对同播 RoF 架构下基于 PCF 机制的 WLAN 系统进行数学建模,讨论了区分优先级、站点休眠机制与接入时延和吞吐量之间的量化关系;文献[13]建立了半双工通信模式下的双向数据接入性能分析模型。然而,已有分析模型均建立在理想信道环境前提下,对于实际信道环境下,由噪声、衰减等信道质量引起的差错、重传等因素对

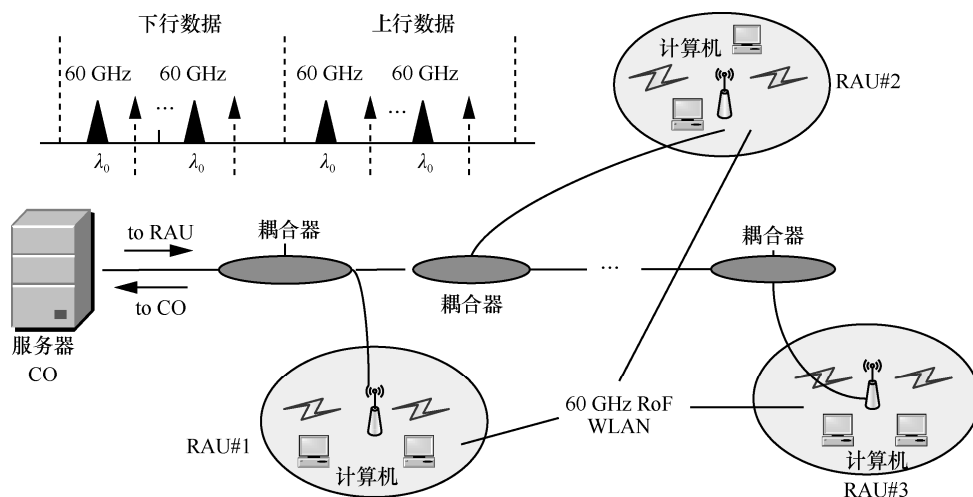


图 1 RoF-DAS 架构

接入性能产生的影响，并未在数学分析模型中体现。

针对预约式 WLAN 接入协议的性能分析大多假设信道处于无差错的理想状态，存在系统性能理论评估普遍正向偏离实际性能水平的情况。为使分析模型更加接近实际网络工作方式，建模分析时应将信道质量对无线网络接入性能的影响考虑在内。与已有研究相比，本文提出的接入策略和分析模型均建立在非理想信道模型之上，即站点接入后在发送过程中存在数据分组出错率，具体包括以下两方面。

1) 通过数据聚合原理，将站点获得信道接入机会时缓冲区中的已有数据视为一个数据集，在当前接入过程中进行发送。数据集作为一个整体，AP (access point) 对数据集中的数据不再单独发送轮询请求和确认帧回复。与典型 PCF 工作模式站点每次接入仅发送一个数据分组相比，新提出的接入方式降低了控制帧信道占用时长，从而达到减小接入时延的目的。

2) 建立具有内部到达的门限服务轮询系统模型，用于对非理想信道环境下预约式门限服务轮询接入系统的接入性能进行量化分析。基于马尔可夫链和概率母函数的方法得出系统平均排队队长、平均等待时延与重传次数、数据出错率等参数之间的定量关系闭式解析式。

## 2 具有差错重传的预约式门限服务轮询接入模型

### 2.1 数据传输及重传机制

本文基于数据聚合原理，在 PCF 模式下提出具有差错重传的预约式门限服务轮询接入 (SGPA, scheduled gated-service polling access) 机制。如图 2 所示，AP 发送信标 beacon 和 CF-End 帧标记 PCF 无竞争接入周期的起始和结束。当 MAC 协议采用基于 PCF

的工作模式时，AP 发送预约请求帧顺序轮询每一个站点，站点收到预约请求后才有权接入信道，随后按照门限服务方式发送数据。

门限服务方式，是指站点缓存中查询时刻之前达到的数据分组均在本次发送周期得到服务。与 PCF 机制中的 Round Robin 算法每次查询站点仅发送一个数据分组不同，门限服务需要站点收到来自 AP 的查询请求后回复待发送的数据长度，AP 将该站点所有排队数据分组视为一个数据集，根据该数据集长度为站点分配信道占用时隙<sup>[14]</sup>，对于发送过程中新产生的数据分组则不再分配信道时隙。

基于轮询方式站点能够实现无冲突的数据接入，但实际信道环境中受信道噪声、设备误差及数据分组长度等因素影响，仍然存在分组出错率。因此，本文在门限服务轮询模型的基础上，加入重传机制。当数据受信道质量影响而出错时，源站点将出错数据重新加至缓存区队列，重传数据来自系统内部被看作内部到达数据加载至缓存区队列尾部，按照门限服务规则在下一个轮询周期中进行重传。若数据在重传次数达到上限后仍出错，则站点丢弃分组放弃重传。

### 2.2 模型描述

为了对实际通信环境下的接入系统进行准确的性能评估，建立分析模型时需要考虑非理想信道的影响。定义  $p_e$  表示非理想信道下的分组错误率，该参数受信道噪声、设备误差和分组大小的影响。假设预约式接入方式下无数据分组碰撞，数据分组受信道质量影响出错后均需进行重传，直至正确发送或重传次数达到上限，则重传概率等于分组错误率。因此，建模过程中将信道错误等价于重传，即分组错误率  $p_e$  等价于重传概率  $p_e$ 。受重传次数阈值  $m$  限制，站点最多可以尝试  $m$  次失败后的重传。

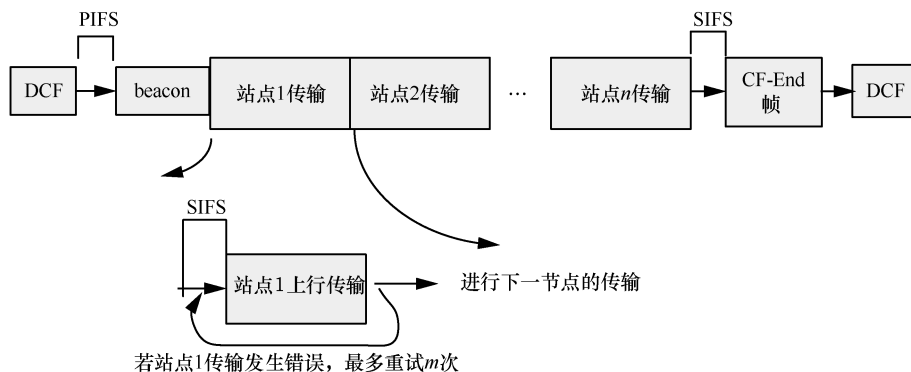


图 2 PCF 重传机制示意

本文建立了具有内部数据的门限服务轮询控制 (IAGP, inner-arrival gated polling) 排队模型, 将站点对信道的预约式接入描述为轮询系统中服务器对各队列的顺序服务过程, 队列中外部到达顾客相当于站点数据, 出错重传数据则为接收服务后再次进入排队队列的内部到达顾客, 重传概率  $p_e$  即为外部顾客向内部顾客的转换概率。

假设时间轴按单位时隙划分。IAGP 系统包含  $N$  个队列  $\{STA_1, STA_2, \dots, STA_i, \dots, STA_N\}$  和一个服务器。顾客接受服务后以概率  $p_e$  成为内部顾客再次进入队列, 以概率  $(1-p_e)$  离开; 对于每一个外部顾客, 转换次数达到  $m$  后以概率 1 离开, 即站点对数据分组在第  $m$  次重传后仍未成功时做丢弃分组处理。

定义随机变量  $\varphi_i$  表示任一时隙内站点  $i$  新产生的数据分组数量,  $b_i$  表示站点  $i$  中任一数据分组的发送时间,  $u_i$  为任意相邻站点的查询转换时间。定义  $\xi_i(n)$  表示基站 AP 在  $t_n$  时刻轮询站点  $i(i=1, 2, \dots, N)$  时, 站点  $i$  缓存中排队的数据分组数, 系统排队长度的状态变量为  $\{\xi_1(n), \dots, \xi_i(n), \dots, \xi_N(n)\}$ 。STA $_i$  按指定服务策略完成数据分组发送后, AP 在  $t_{n+1}$  时刻轮询 STA $_{i+1}$ , 此时系统状态变量为  $\{\xi_1(n+1), \xi_2(n+1), \dots, \xi_i(n+1), \dots, \xi_N(n+1)\}$ 。

不失一般性, 假设系统内任意站点  $i$  满足以下条件。

1) 外部到达过程。任意时隙, 数据由系统外部按照相互独立的泊松过程到达站点, 具有概率母函数  $A_i(z_i) = E(z_i^{\varphi_i})$ , 均值  $E(\varphi_i) = \lambda_i = A_i'(1)$  和方差  $\sigma_{\varphi_i} = A_i''(1) + \lambda_i - \lambda_i^2$ 。

2) 内部到达过程。内部到达数据指站点发送过程中产生的重传数据, 其到达过程相互独立。

3) 数据分组的发送时间。服从独立均匀分布, 概率母函数  $B_i(z_i) = E(z_i^{b_i})$ , 均值  $\beta_i = B_i'(1)$ , 方差  $\sigma_{\beta_i} = B_i''(1) + \beta_i - \beta_i^2$ 。

4) 站点间查询转换时间相互独立, 概率母函数  $R_i(z_i) = E(z_i^{u_i})$ , 均值  $\gamma_i = R_i'(1)$ , 方差  $\sigma_{\gamma_i} = R_i''(1) + \gamma_i - \gamma_i^2$ 。

5) 站点负载  $\rho_i = \lambda_i(\beta_i + \gamma_i)$ , 则系统总负载为  $G = \sum_{i=1}^N \lambda_i(\beta_i + \gamma_i)$ , 当  $\lambda_i = \lambda_j = \lambda$ , 且  $\beta_i = \beta_j = \beta$  时, 系统具有对称性, 即  $G = N\lambda(\beta + \gamma)$ 。

### 2.3 概率母函数

**定理 1** 当系统总负载  $G < 1$  时, 系统具有稳定工作状态<sup>[15]</sup>, 则站点  $i$  查询时刻, 系统中各站点缓

冲区中数据分组数具有稳态概率分布  $\pi_i(x_1, \dots, x_i, \dots, x_N)$ , 如式(1)所示。

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

系统排队状态概率母函数为

$$G_i(z_1, \dots, z_i, \dots, z_N) = \sum_{x_1=0}^{\infty} \dots \sum_{x_N=0}^{\infty} z_1^{x_1} \dots z_i^{x_i} \dots z_N^{x_N} \pi_i(x_1, \dots, x_i, \dots, x_N) \quad (2)$$

其中,  $i = 1, 2, \dots, N$ 。

**引理 1** 当 AP 在  $t_{n+1}$  时刻访问  $i+1$  号站点时, 系统具有排队状态概率母函数, 如式(3)所示。

$$G_{i+1}(z_1, \dots, z_i, \dots, z_N) = \lim_{n \rightarrow \infty} E \left[ \prod_{j=1}^N z_j^{\xi_j(n+1)} \right] = R_i \left( \prod_{j=1}^N A_j(z_j) \right) G_i \left( z_1, \dots, z_{i-1}, z_i^{S_m} B_i \left( \prod_{j=1}^N A_j(z_j) \right), z_{i+1}, \dots, z_N \right) \quad (3)$$

其中,  $S_m = \frac{p_e(1-p_e^m)}{1-p_e}$ 。

**证明** 由定理 1 中对  $t_n$  时刻系统状态概率母函数的定义可知,  $G_{i+1}(z_1, \dots, z_i, \dots, z_N)$  表示  $t_{n+1}$  时刻系统状态概率母函数, 且存在如式(4)所示关系。

$$G_{i+1}(z_1, \dots, z_i, \dots, z_N) = \sum_{x_1=0}^{\infty} \dots \sum_{x_N=0}^{\infty} z_1^{x_1} \dots z_i^{x_i} \dots z_N^{x_N} \pi_{i+1}(x_1, \dots, x_i, \dots, x_N) \quad (4)$$

其中,  $\pi_{i+1}(x_1, \dots, x_i, \dots, x_N)$  表示  $t_{n+1}$  时刻,  $i+1$  号站点接受 AP 查询, 此时系统状态具有稳态分布  $\pi_{i+1}(x_1, \dots, x_i, \dots, x_N) = \lim_{n \rightarrow \infty} P[\xi_j(n+1) = x_j; j = 1, 2, \dots, N]$ 。则有

$$G_{i+1}(z_1, \dots, z_i, \dots, z_N) = \lim_{n \rightarrow \infty} E \left[ \prod_{j=1}^N z_j^{\xi_j(n+1)} \right] \quad (5)$$

根据 2.2 节模型描述, 系统各工作时刻状态变量满足式(6)所示的关系。

$$\xi_j(n+1) = \begin{cases} \xi_j(n) + \eta_j(v_i) + \mu_j(u_i), & j \neq i \\ \xi_i^*(n) + \eta_i(v_i) + \mu_i(u_i), & j = i \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $\eta_j(v_i)$  表示站点  $i$  服务过程中到达站点  $j$  的外部信息分组数;  $\mu_j(u_i)$  为 AP 从站点  $i$  转向站点  $i+1$  的过程中到达站点  $j$  的信息分组数;  $\xi_j^*(n)$  为站点  $i$  中重传信息分组数,  $\xi_i^*(n) = \sum_{k=1}^m \xi_{i,k}^*(n)$ 。

将式(6)代入式(5), 则有

$$\begin{aligned}
 G_{i+1}(z_1, \dots, z_i, \dots, z_N) &= \\
 \lim_{n \rightarrow \infty} E \left[ \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N z_j^{\xi_j(n) + \eta_j(v_i) + \mu_j(u_i)} z_i^{\eta_i(v_i) + \mu_i(u_i) + \xi_i^*(n)} \right] &= \\
 \lim_{n \rightarrow \infty} E \left[ \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N z_j^{\xi_j(n) + \eta_j(v_i) + \mu_j(u_i)} z_i^{\eta_i(v_i) + \mu_i(u_i) + \sum_{k=1}^m \xi_{i,k}^*(n)} \right] &= \\
 \lim_{n \rightarrow \infty} E \left[ \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N z_j^{\xi_j(n)} \cdot z_i^{\sum_{k=1}^m \xi_{i,k}^*(n)} \prod_{j=1}^N z_j^{\eta_j(v_i)} \right] E \left[ \prod_{j=1}^N z_j^{\mu_j(u_i)} \right] & \quad (7)
 \end{aligned}$$

以事件  $X_k=1$  表示任意数据分组进行第  $k$  次重传,  $X_k=0$  则表示未进行第  $k$  次重传。由数据分组发送过程相互独立, 可得任意数据发生第  $k$  次重传的概率为

$$\begin{cases} P_r(X_k = 1) = p_e^k, & k \leq m \\ P_r(X_k = 1) = 0, & k > m \end{cases}$$

随机变量  $\xi_i^*(n)$  表示本轮服务周期中站点  $i$  的内部数据分组总数, 随机变量  $\xi_{i,k}^*(n)$  表示第  $k$  次重传的分组数, 则有  $\xi_i^*(n) = \sum_{k=1}^m \xi_{i,k}^*(n)$ 。

事件  $Y_k=1$  表示当前站点有数据进行第  $k$  次重传,  $Y_k=0$  表示当前站点无数据进行第  $k$  次重传, 随机变量  $l_k$  表示进行第  $k$  次重传轮次的重传分组数。由于重传数据均来自查询时刻缓存中排队的外部数据分组  $\xi_i(n)$ , 因此存在如下关系。

1)  $k=0$ , 即重传次数为 0, 表示所有数据成功接入, 则有

$$P_r(Y_1 = 0) = (1 - p_e)^{\xi_i(n)}$$

2)  $k=1$ , 即站点发起一次重传, 则有

$$P_r(Y_1 = 1) = 1 - (1 - p_e)^{\xi_i(n)}$$

$$P_r(\xi_{i,1}^*(n) = l_1) = \binom{l_1}{\xi_i(n)} p_e^{l_1} (1 - p_e)^{\xi_i(n) - l_1}$$

$$E[\xi_{i,1}^*(n)] = E[\xi_i(n)] p_e$$

3)  $2 \leq k \leq m$ , 即上一轮的重传中仍有数据出错, 需要继续重传, 则有

$$P_r(Y_k = 1) = P_r(Y_{k-1} = 1) (1 - (1 - p_e)^{\xi_{i,k-1}^*(n)})$$

$$P_r(\xi_{i,k}^*(n) = l_k) = P_r(L = l_k | P_r(\xi_{i,k-1}^*(n) = l_{k-1}))$$

$$P_r(\xi_{i,k}^*(n) = l_k) = P_r(\xi_{i,k-1}^*(n) = l_{k-1}) \binom{l_k}{l_{k-1}} p_e^{l_k} (1 - p_e)^{l_{k-1} - l_k}$$

此时,  $\xi_{i,k}^*(n)$  服从二项分布, 即  $\xi_{i,k}^*(n) \sim B(\xi_{i,k-1}^*(n), p_e)$ , 具有均值  $E[\xi_{i,k}^*(n)] = E[\xi_{i,k-1}^*(n)] p_e$ 。

4)  $k > m$ , 即重传次数达到阈值, 放弃重传, 则有

$$P_r(Y_k = 1) = 0$$

综上所述, 可得

$$E\left(\sum_{k=1}^m \xi_{i,k}^*(n)\right) = E(\xi_i(n)) \frac{p_e(1 - p_e^m)}{1 - p_e} \quad (8)$$

其中,  $\eta_j(v_i)$  表示站点  $i$  服务过程中新到达的数据分组,  $\varphi_j(b_{i,1})$  表示站点  $i$  缓存中第一个数据服务发送期间进入站点  $j$  的分组数, 则

$$\begin{aligned}
 \lim_{n \rightarrow \infty} E \left[ \prod_{j=1}^N z_j^{\eta_j(v_i)} \right] &= \lim_{n \rightarrow \infty} E \left[ \prod_{j=1}^N z_j^{\varphi_j(b_{i,1}) + \varphi_j(b_{i,2}) + \dots + \varphi_j(b_{i,\xi_i(n)})} \right] = \\
 \lim_{n \rightarrow \infty} E \left[ \left( \prod_{j=1}^N z_j^{\varphi_j} \right)^{\xi_i(n)} \right] &= \lim_{n \rightarrow \infty} E \left[ \left( B_i \left( \prod_{j=1}^N A_j(z_j) \right) \right)^{\xi_i(n)} \right] \quad (9)
 \end{aligned}$$

将式(8)和式(9)代入式(7), 由于各站点数据达到过程相互独立, 计算可得

$$\begin{aligned}
 G_{i+1}(z_1, \dots, z_i, \dots, z_N) &= \lim_{n \rightarrow \infty} E \left[ \left( \prod_{j=1}^N A_j(z_j) \right)^{\xi_i(n)} \right] \cdot \\
 \left[ z_1^{\xi_i(n)} \dots z_{i-1}^{\xi_{i-1}^*(n)} \left( z_i^{S_m} B_i \left( \prod_{j=1}^N A_j(z_j) \right) \right)^{\xi_i(n)} z_{i+1}^{\xi_{i+1}^*(n)} \dots z_N^{\xi_N^*(n)} \right] &= \\
 R_i \left( \prod_{j=1}^N A_j(z_j) \right) G_i \left( z_1, \dots, z_{i-1}, z_i^{S_m} B_i \left( \prod_{j=1}^N A_j(z_j) \right), z_{i+1}, \dots, z_N \right) &
 \end{aligned}$$

其中,  $S_m = \frac{p_e(1 - p_e^m)}{1 - p_e}$ 。

证毕。

### 3 性能评估

#### 3.1 平均排队队长

定义  $g_i(j)$  为站点  $i$  查询时刻系统排队状态概率母函数一阶偏导。

$$g_i(j) = \lim_{z_1, \dots, z_i, \dots, z_N \rightarrow 1} \frac{\partial G_i(z_1, \dots, z_i, \dots, z_N)}{\partial z_j} \quad (10)$$

其中,  $i, j = 1, 2, \dots, N$ 。

以此类推, 定义站点  $i+1$  查询时刻系统排队状态概率母函数一阶偏导为

$$g_{i+1}(j) = \lim_{z_1, \dots, z_i, z_{i+1}, \dots, z_N \rightarrow 1} \frac{\partial G_{i+1}(z_1, \dots, z_i, z_{i+1}, \dots, z_N)}{\partial z_j} \quad (11)$$

其中,  $i, j=1, 2, \dots, N$ ,  $G_i(z_1, \dots, z_i, \dots, z_N)$  为站点  $i$  查询时刻各站点排队数据分组数量概率母函数, 如式(2)所示, 代入式(10)和式(11)可得

$$g_i(j) = \lim_{z_1, \dots, z_i, z_{i+1}, \dots, z_N \rightarrow 1} \frac{\partial E \lim_{n \rightarrow \infty} [\prod_{j=1}^N z_j^{\xi_j(n)}]}{\partial z_j} = E \lim_{n \rightarrow \infty} [\xi_j(n)]$$

$$g_i(i) = \lim_{z_1, \dots, z_i, z_{i+1}, \dots, z_N \rightarrow 1} \frac{\partial E \lim_{n \rightarrow \infty} [\prod_{j=1}^N z_j^{\xi_j(n)}]}{\partial z_i} = E \lim_{n \rightarrow \infty} [\xi_i(n)]$$

其中,  $g_i(j)$  表示站点  $i$  查询时刻, 站点  $j$  内排队数据分组数均值;  $g_i(i)$  表示查询时刻当前站点排队的的数据分组数均值。

定义站点在查询时刻的平均排队队长  $E[L_i]$  为查询时刻当前站点缓冲区内排队数据分组的数量均值, 如式(12)所示。

$$E[L_i] = g_i(i), \quad i=1, 2, \dots, N \quad (12)$$

将式(3)代入式(11) 求解  $E[L_i]$  闭式表达式, 可得

$$g_{i+1}(j) = \gamma_i \lambda_j + g_i(j) + \beta_i \lambda_j g_i(i) \quad (13)$$

$$g_{i+1}(j) = \gamma_i \lambda_i + S_m g_i(i) + \beta_i \lambda_i g_i(i) \quad (14)$$

式(13)和式(14)累计求和, 得

$$\sum_{i=1}^N g_{i+1}(j) = \lambda_j \sum_{i=1}^N \gamma_i + \sum_{i \neq j} g_i(j) + S_m g_j(j) + \lambda_j \sum_{i=1}^N \beta_i g_i(i) \quad (15)$$

化简可得

$$E[L_i] = g_i(i) = \frac{\sum_{j=1}^N \lambda_j \gamma_j}{1 - \sum_{j=1}^N \lambda_j \beta_j - S_m} \quad (16)$$

当网络为对称系统时, 即满足  $\lambda_i = \lambda_j = \lambda$  且  $\beta_i = \beta_j = \beta$  时, 可得  $g_i(i) = g_j(j)$ , 式(16)可简化表示为

$$E[L] = \frac{N \lambda \gamma}{1 - N \rho - S_m} \quad (17)$$

### 3.2 平均等待时延

定义平均等待时延  $E[W_i]$  表示站点  $i$  中的数据分组从到达缓冲区到成功发送所需等待的平均

时间。

$t_n$  时刻系统排队状态概率母函数二阶偏导为

$$g_i(i, i) = \lim_{z_1, \dots, z_i, z_{i+1}, \dots, z_N \rightarrow 1} \frac{\partial^2 G_i(z_1, \dots, z_i, \dots, z_N)}{\partial z_i \partial z_i} \quad (18)$$

同理,  $t_{n+1}$  时刻概率母函数二阶偏导为

$$g_{i+1}(i, j) = \lim_{z_1, \dots, z_i, z_{i+1}, \dots, z_N \rightarrow 1} \frac{\partial^2 G_{i+1}(z_1, \dots, z_i, \dots, z_N)}{\partial z_i \partial z_j} \quad (19)$$

$$i \neq j, i, j=1, 2, \dots, N$$

$$g_{i+1}(i, i) = \lim_{z_1, \dots, z_i, z_{i+1}, \dots, z_N \rightarrow 1} \frac{\partial^2 G_{i+1}(z_1, \dots, z_i, \dots, z_N)}{\partial z_i \partial z_i} \quad (20)$$

$$i=1, 2, \dots, N$$

$$g_{i+1}(j, k) = \lim_{z_1, \dots, z_i, z_{i+1}, \dots, z_N \rightarrow 1} \frac{\partial^2 G_{i+1}(z_1, \dots, z_i, \dots, z_N)}{\partial z_j \partial z_k} \quad (21)$$

$$i \neq j \neq k, j, k=1, 2, \dots, N$$

将式(3)代入式(19)~式(21)可得

$$g_{i+1}(j, k) = \lambda^2 R''(1) + \lambda^2 + \lambda \gamma [g_i(j) + g_i(k)] + [\lambda \rho + 2 \lambda \rho \gamma + \lambda^2 B''(1)] g_i(i) + g_i(j, k) + \rho [g_i(i, i) + g_i(i, k)] + \rho^2 g_i(i, i), \quad i, j, k=1, \dots, N, \quad i \neq j \neq k \quad (22)$$

$$g_{i+1}(j, i) = \lambda^2 R''(1) + \lambda^2 \gamma + \lambda \gamma g_i(j) + [\lambda \rho + 2 \lambda \rho \gamma + \lambda^2 B''(1) + S_m \lambda \gamma + S_m \rho] g_i(i) + [S_m + \rho] g_i(j, i) + [S_m \rho + \rho^2] g_i(i, i), \quad i=1, 2, \dots, N \quad (23)$$

$$g_{i+1}(j, j) = \lambda^2 R''(1) + \gamma A''(1) + [2 \lambda \rho \gamma + \lambda^2 B''(1) + \beta A''(1)] g_i(i) + 2 \lambda \gamma g_i(j) + 2 \rho g_i(j, i) + g_i(j, j) + \rho^2 g_i(i, i), \quad i, j=1, 2, \dots, N, \quad i \neq j \quad (24)$$

$$g_{i+1}(i, i) = \lambda^2 R''(1) + \gamma A''(1) + [2 \lambda \rho \gamma + B''(1) + \beta A''(1)] g_i(i) + \rho^2 g_i(i, i) + S_m [2 \lambda \gamma + S_m - 1 + 2 \rho] g_i(i) + S_m [S_m + 2 \rho] g_i(i, i), \quad i=1, 2, \dots, N \quad (25)$$

联立方程求解  $\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N g_{i+1}(j, k)$  和  $\sum_{j=1}^N g_{i+1}(j, j)$ ,

可得对称系统概率母函数二阶特性  $g_i(i, i)$ , 如(26)所示。

$$g_i(i, i) = \frac{N}{(1 - \rho N - S_m)(1 + \rho + S_m)} \left\{ \lambda^2 R''(1) + \frac{1}{1 - \rho N - S_m} [N \lambda^3 \gamma B''(1) + (N + 2 \rho N - 1) \lambda^2 \gamma^2 + (N - 1) \rho \lambda^2 \gamma + S_m \lambda \gamma (2 \lambda \gamma + \rho)] \right\} \quad (26)$$

系统中各队列按照门限服务，因此平均等待时延存在如式(27)所示关系<sup>[12]</sup>。

$$E[W_i] = \frac{(1 + \rho_i)g_i(i, i)}{2\lambda_i g_i(i)} - \frac{A_i'(1)}{2\lambda_i^2} \quad (27)$$

将式(17)和式(26)代入式(27)，即可得到信息分组平均等待时延闭式表达式。

#### 4 性能评估和仿真分析

基于上述理论分析结果，对具有差错重传机制的门限服务 PCF 接入控制系统进行计算机模拟实验，重点针对重传概率、重传次数与平均排队队长、平均等待时延等系统性能间的关系进行数值分析，并与理论计算结果进行比较，从而验证理论分析模型的正确性。

##### 4.1 仿真机理

仿真过程基于 Matlab 伪随机数，生成均值为  $\lambda$  的泊松分布二维序列数组，模拟系统中各队列中单位时间内到达的排队数据分组数。仿真系统采用服务时间变量记录系统中数据服务消耗的时间累计，数据序列中每减少一个单位数据，对应服务时间变量累计一个服务时间。而队列中数据的接入等待时延则对应为数据生成时刻与服务时刻间之差。仿真结果为相同参数下 1 000 次蒙特卡洛实验统计，选取 95%置信空间作为结果。

##### 4.2 仿真结果分析

假设 RoF-DAS 系统中，最远 RAU 光纤长度为 2 km；时间轴按时隙划分，即 1 slot=200  $\mu$ s。站点中的各数据分组发送过程相互独立，每个数据分组以概率  $p_e$  出错重传，最大重传次数为  $m$ 。各站点到达率为  $\lambda$ ，单位为 packet/slot；平均服务时间为  $\beta$ ，单位为 slot；平均查询转换时间为  $\gamma$ ，单位为 slot。相关参数设置参照 IEEE802.11n 标准，如表 1 所示。参照 IEEE802.11n 假设数据分组长为 1 500 B，服务时间  $T_{service}$  即为数据分组发送时长  $T_{DATA}+T_{ACK}$ ，假设光信号在光纤中的传播速度为 5  $\mu$ s/km，考虑光纤引入时延后，查询转换时间  $T_{switch}=T_{PIFS\_IEEE802.11n}+2 \text{ fiberlength} \times 5 \mu\text{s/km}$ ，实验中根据时隙长度进行归一化。

站点数量是影响轮询接入机制的主要因素，首先对负载随站点数量和时延性能的关系进行讨论。仿真实验中，假设重传概率  $p_e=0.1$ 。归一化后标定参数如下， $\lambda=0.017$  packet/slot， $\beta=2$  slot， $\gamma=1$  slot。表 2 和表 3 为最大重传次数  $m=1$  时，各队列查询时刻平均排队队长  $E[L_i]$  和平均等待时延  $E[W_i]$  的仿真统计结果

与理论计算值的对比。从表 2 和表 3 可以看出，随着站点数由 5 增加到 50，系统负载  $G$  在稳定条件 ( $0 < G < 1$ ) 下由 0.085 增加至 0.85；计算机仿真结果和理论计算值吻合，最大相对误差小于  $\pm 5\%$ 。

表 1 参数设置

| 参数                           | 取值    |
|------------------------------|-------|
| 调制方式                         | 16QAM |
| 信道速率/(Mbit·s <sup>-1</sup> ) | 36    |
| 编码率                          | 3/4   |
| 数据分组长/B                      | 1 500 |
| $T_{DATA}/\mu\text{s}$       | 370   |
| $T_{ACK}/\mu\text{s}$        | 34    |
| $T_{CE}/\mu\text{s}$         | 58    |
| $T_{Beacon}/\mu\text{s}$     | 58    |
| $T_{POLL}/\mu\text{s}$       | 34    |
| $T_{PIFS}/\mu\text{s}$       | 19    |
| $T_{SIFS}/\mu\text{s}$       | 10    |

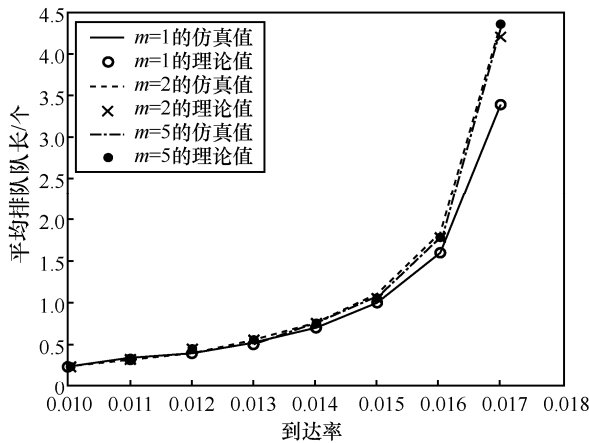
表 2 平均排队队长

| 站点数/个 | 理论值/个     | 仿真值/个              |
|-------|-----------|--------------------|
| 5     | 0.104 29  | 0.101 32±0.033 24  |
| 10    | 0.232 87  | 0.231 46±0.078 95  |
| 15    | 0.395 34  | 0.383 62±0.099 31  |
| 20    | 0.607 14  | 0.615 42±0.112 43  |
| 25    | 0.894 73  | 0.903 61±0.132 57  |
| 30    | 1.307 69  | 1.321 87±0.155 64  |
| 35    | 1.950 81  | 1.959 41±0.235 12  |
| 40    | 3.090 91  | 3.010 91±0.301 26  |
| 45    | 5.666 67  | 5.541 82±0.468 57  |
| 50    | 17.000 00 | 16.832 96±0.783 53 |

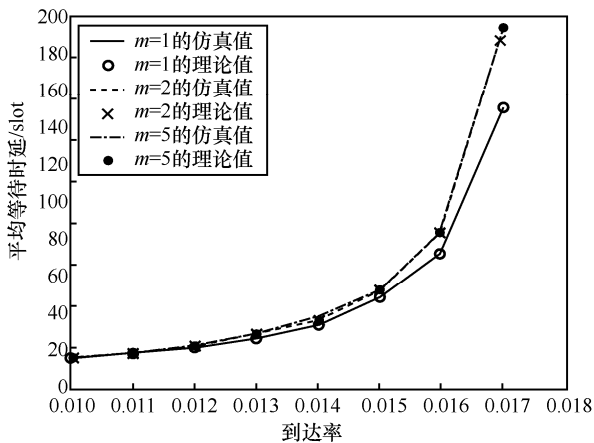
表 3 平均等待时延

| 站点数/个 | 理论值/slot   | 仿真值/slot            |
|-------|------------|---------------------|
| 5     | 3.110 42   | 3.132 51±0.074 13   |
| 10    | 7.013 69   | 7.046 75±0.196 46   |
| 15    | 11.945 73  | 11.845 74±0.243 62  |
| 20    | 18.375 04  | 18.675 38±0.421 36  |
| 25    | 27.105 26  | 27.406 18±0.610 43  |
| 30    | 39.641 02  | 39.141 03±0.851 31  |
| 35    | 59.163 93  | 58.303 93±1.265 74  |
| 40    | 93.772 73  | 92.172 73±1.631 22  |
| 45    | 171.962 96 | 170.563 24±1.819 64 |
| 50    | 516.000 00 | 514.03265±2.899 73  |

图 3 为  $p_e=0.1$ ,  $\beta=5$  slot,  $\gamma=1$  slot,  $N=10$ ,  $m$  分别为 1、2、5 时, 轮询时刻站点缓冲区平均排队队长  $E[L_i]$  和数据接入平均等待时延  $E[W_i]$  随数据到达率变化的曲线。如图 3 所示, 仿真结果与理论计算值一致。相同重传概率下, 负载随到达率增加而增大, 平均等待时延和平均排队队长随之上升; 相对于重传次数  $m$  从 1 增加至 2 时,  $E[L_i]$  及  $E[W_i]$  最大增加率为 10%, 当  $m$  从 2 增加至 5 时,  $E[L_i]$  及  $E[W_i]$  增加率小于 1%, 原因在于, 数据达到最大重传次数的概率  $S_m=p_e^m$ , 当  $p_e<1$  时, 随  $m$  增加  $S_m$  呈指数减小。



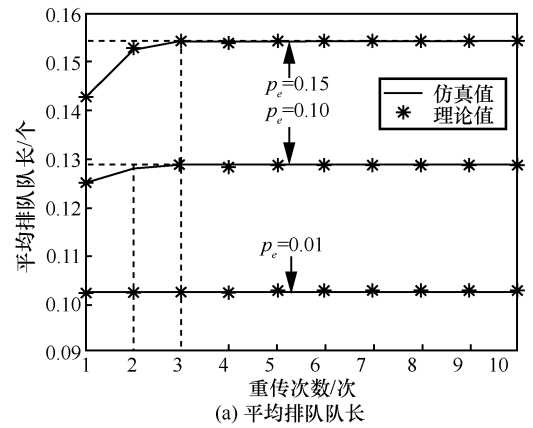
(a) 平均排队队长



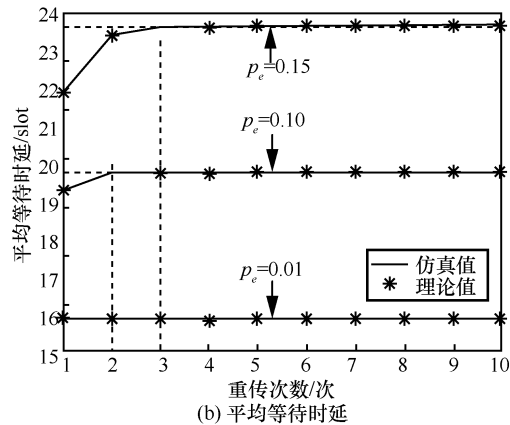
(b) 平均等待时延

图 3 数据到达率与时延性能关系曲线

图 4 所示为相同负载下, 当  $p_e=0.10$ ,  $m \geq 2$  时, 重传次数对系统时延性能的影响。  $m$  对时延性能的影响范围随着  $p_e$  的增大而增加, 当  $p_e=0.15, m \geq 3$  时, 平均排队队长和平均等待时延受重传次数影响较小。由此可见, 系统时延性能受信道质量即分组出错率影响较大, 当信道质量一定时, 接入时延可收敛于重传次数。



(a) 平均排队队长



(b) 平均等待时延

图 4 时延性能与重传次数关系

图 5 给出了非理想差错信道场景下, 同参系统采用 SGPA 策略和典型 IEEE 802.11 PCF 接入时平均等待时延的对比。如图 5 所示, 随着数据到达率的增加, 典型 PCF 和门限服务模式下的数据接入平均等待时延均有增加。对比 IEEE 802.11 PCF 工作模式, 本文所述门限服务接入系统的平均等待时延增长平缓, 且低于典型 PCF 工作模式。随着系统负载的增加, SGPA 与典型 PCF 系统的平均等待时间差距明显增加。当到达率增加至 0.001 5, 即系统总负载  $G=0.75$  时, 门限服务接入系统平均等待时延下降至典型 PCF 工作模式的 43%。对比结果表明, 通过数据聚合技术, 系统在高负载情况下的时延特性得到明显改善。

图 6 为重传概率  $p_e$ 、最大重传次数  $m$  与数据分组丢失率之间的关系。如图 6 所示, 当重传概率  $p_e=0.10$  时,  $m=9$  相对  $m=3$  分组丢失率下降小于 5%; 当重传概率  $p_e=0.45$  时,  $m=9$  相对  $m=3$  时分组丢失率降低 97%。由图 6 可知, 重传次数在较大重传概率时对数据分组丢失率影响明显, 多次重传能够有效提升数据发送成功率, 但也会造成数据平均等待时延和平均排队队长的增加。因

此, 实际网络配置过程中需综合考虑数据分组丢失率和时延需求。

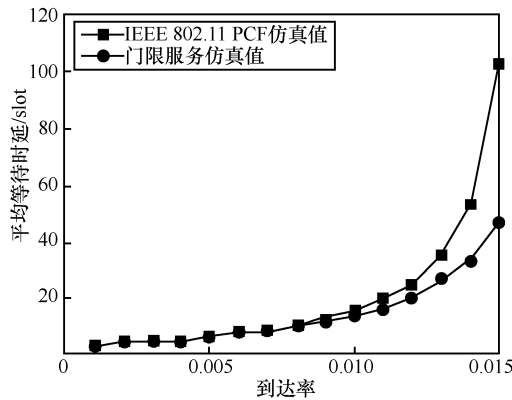


图 5 数据服务方式比较 ( $p_e=0.10, m=2, \beta=10, \gamma=1, N=5$ )

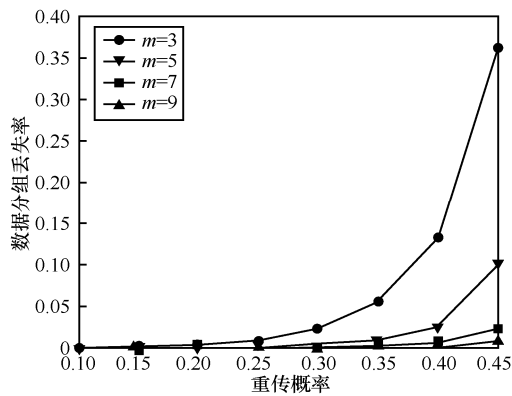


图 6 数据分组丢失率分析 ( $\lambda=0.01, \beta=1, \gamma=1, N=10$ )

## 5 结束语

本文针 RoF-DAS WLAN 接入系统, 建立了具有差错重传机制的门限服务轮询接入模型。基于概率母函数和马尔可夫链分析方法, 获得差错重传机制下站点查询时刻系统排队状态概率母函数, 以及查询时刻站点平均排队队长和数据接入平均等待时延的精确解析; 实现了重传概率和重传次数与等待时延、排队队长之间的定量关系分析。仿真结果表明, 针对非理想信号下高负载应用场景, SGPA 接入策略较 IEEE 802.11 PCF 接入系统时延性能明显改善。此外, 仿真实验数据与理论计算结果一致, 验证了 IAGP 分析模型用于实际非理想信道下接入系统性能量化评估的有效性。本文主要针对数据分组差错重传与系统时延性能得定量关系进行分析, 考虑分析模型普适性, 在下一步工作中将针对动态重传概率, 以及请求、确认帧出现差错情况下重传机制与系统性能之间的关系分析展开研究。

## 参考文献:

- [1] 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.  
JI Y F, XU K, TIAN H P, et al. Large dynamic, reconfigurable, distributed intelligent radio-over-fiber (I-ROF) system[J]. Scientia Sinica Informationis, 2012, 42(10): 1204-1216.
- [2] LI J Q, FAN Y T, CHEN H, et al. Performance analysis of WLAN media access control protocol in simulcast radio-over-fiber-based distributed antenna systems[J]. China Communications, 2014, 11(5): 37-48.
- [3] FAN Y T, LI J Q, XU K, et al. 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.
- [4] FAN Y T, LI J Q, XU K, et al. A detection-switching-assisted DCF mechanism for simulcast WLAN-over-fiber based distributed antenna systems[J]. China Journal of Electronics, 2017, 26(4): 837-841.
- [5] 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.
- [6] 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. Piscataway: IEEE Press, 2014: 407-411.
- [7] 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.
- [8] 刘龙军,丁洪伟,柳度林,等.基于 FPGA WSN 轮询接入控制协议的研究[J]. 通信学报, 2016, 37(10): 181-187.  
LIU L J, DING H W, LIU Q L, et al. Design of polling protocol in WSN based on FPGA[J]. Journal on Communications, 2016, 37(10):181-187.
- [9] 文少杰,黄传河. FANET 中时延感知的跨层优化方法[J]. 通信学报, 2018, 39(4): 1-12.  
WEN S J, HUANG C H. Delay-aware cross-layer optimization method for FANET[J]. Journal on Communications, 2018, 39(4): 1-12.
- [10] LI F, LI J Q. A new delay analysis for IEEE 802.11 PCF[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(8): 4046-4069.
- [11] 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.  
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.
- [12] 官铮,杨志军,何敏,等.依托站点状态的两级轮询控制系统时延特征分析[J]. 自动化学报, 2016, 42(8): 1207-1214.  
GUAN Z, YANG Z J, HE M, et al. Study on the delay performance of station dependent two-level polling systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(8): 1207-1214.
- [13] GUAN Z, JIA Y, HE M. A bidirectional polling MAC mechanism for

IoT[J]. Electronics, 2019(8): 715.

[14] ZHAO D F, LI B H, ZHENG S M. Study of a polling systems with limited service[J]. Journal of Electronics, 1997, 19(1): 44-49.

[15] AVRACHENKOV K, MOROZOV E, STEYAERT B. Sufficient stability conditions for multi-class constant retrial rate systems[J]. Queueing Systems, 2016, 82 (1-2): 149-171.

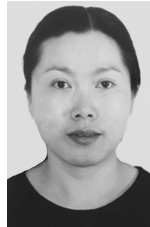
#### [作者简介]



官铮 (1982- ), 女, 云南普洱人, 博士, 云南大学副教授, 主要研究方向为通信网络性能优化、轮询控制系统分析与应用。



贾徭 (1995- ), 女, 云南曲靖人, 云南大学硕士生, 主要研究方向为轮询系统与无线网络。



何敏 (1975- ), 女, 四川宜宾人, 博士, 云南大学副教授, 主要研究方向为轮询控制理论、计算机网络 (移动 ad hoc 网络、无线传感器网络、移动互联网)、物联网、嵌入式系统等。



熊磊 (1992- ), 男, 四川广元人, 云南大学博士生, 主要研究方向为轮询系统、无线通信网络、光通信网络技术等。



杨志军 (1986- ), 男, 云南保山人, 博士, 云南省教育厅研究员, 主要研究方向为计算机通信网络、无线通信和轮询系统。