

基于超鞅理论的 VLC 系统服务效率优化算法

孙洪亮¹, 王超¹, 胡雪¹, 钱磊²

(1. 吉林化工学院 信息与控制工程学院, 吉林 吉林 132022; 2. 天津工业大学 电子与信息工程学院, 天津 300387)

摘要: 为提高通信网络带宽资源的利用率, 针对可见光通信(VLC)上行系统, 设计了一种基于超鞅理论的服务效率优化算法, 以应对终端业务对网络服务质量(QoS)的差异化需求。该算法首先通过构建基于马尔可夫调制的 On-Off(MMOO)过程与 ALOHA 随机接入过程的网络队列系统模型, 推导了各终端设备成功接入协调器的概率。接着, 利用超鞅理论评估了系统的时延性能, 并将多用户 QoS 高效保障问题转化为一个受鞅域时延界约束的服务速率最小化问题。最终, 采用蜜獾算法(HBA)来求解该问题。仿真结果表明, 该算法能满足终端业务的不同 QoS 要求, 并优化了网络服务效率。

关键词: 可见光通信网络; 超鞅理论; 服务质量保障; 蜜獾算法; 服务效率优化

中图分类号: TN92 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2024)05-0035-06

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.05.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Optimization algorithm of service efficiency for VLC system based on supermartingale theory

SUN Hongliang¹, WANG Chao¹, HU Xue¹, QIAN Lei²

(1. College of Information and Control Engineering, Jilin Institute of Chemical Technology, Jilin Jilin 132022, China;

2. School of Electronic and Information Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

Abstract: In order to enhance the bandwidth utilization of the communication network, a service efficiency optimization algorithm founded on supermartingale theory is devised for the visible light communication (VLC) uplink system to fulfill the differentiated demands of terminal services regarding the network quality of service (QoS). Firstly, the network queue system model based on the Markov modulated on-off (MMOO) process and the ALOHA random access process is established, and the probability of each terminal device accessing the coordinator is derived. Then, the supermartingale theory is employed to assess the delay performance of the system, and the multi-user QoS efficient guarantee issue is transformed into a service rate minimization problem constrained by the martingale domain delay bound. Finally, the honey badger algorithm (HBA) is utilized to solve the problem. The simulation results demonstrate that the algorithm can satisfy the diverse QoS requirements of terminal services and optimize service efficiency of the network.

Key words: visible light communication network, supermartingale theory, quality of service guarantee, honey badger algorithm, service efficiency optimization

0 引言

可见光通信(VLC)技术因其具有丰富的频谱资源

收稿日期: 2024-02-21。

基金项目: 国家自然科学基金项目(批准号: 62301359)资助; 吉林省教育厅科学研究项目(批准号: JJKH20220243KJ)资助。

作者简介: 孙洪亮(1986—), 男, 吉林九台人, 博士, 副教授, 硕士生导师。现任职于吉林化工学院信息与控制工程学院, 主要研究方向为通信网络服务质量评估与保障、鞅理论在通信系统中的应用。



和节能环保的优点而成为一种极具前景的通信技术^[1]。目前, 越来越多的学者关注 VLC 网络上行通信方面的应用。文献[2]设计了一个多通道上行可见光通信系统, 将开关键控(OOK)调制和时分多址(TDMA)技术相结合, 为 3 个用户提供可靠的上行链路传输。文献[3]提出了一种基于红外链路的室内上行 VLC 系统设计方案, 提升了高数据速率时的上行链路性能。文献[4]提出了一种基于双向 VLC 信道的动态切换方案, 在降低终端切换速率的同时, 提高了网络的吞吐量。针对 VLC 上行通信系统, 研究如何提高网络服务效率是值

得关注的问题。

随着物联网(IoT)技术的发展,VLC 系统终端业务的种类越来越多样化,对服务质量(QoS)提出了越来越高的要求,准确评估网络 QoS 要求是提升系统服务效率的关键。鞅理论的发展为 QoS 分析与保障提供了新的思路。文献[5]引入了到达鞅和服务鞅的概念,推导了更严格的 QoS 性能界。文献[6]将超鞅模型应用于短包接入的时延分析中,设计了满足 QoS 要求的节能 D-ALOHA 算法。文献[7]基于超鞅推导的时延界,设计了包含多种计算资源的异构车联网中的任务分配方案。针对差异化的 QoS 需求,将超鞅理论应用于设计异质 QoS 保障方案,可以实现网络的高效服务。文献[8]研究了随机到达数据和 QoS 约束下的能量效率和吞吐量优化问题,设计了最优功率控制策略。在优化问题的求解过程中,群智能优化算法起着重要的作用。2021 年,HASHIM F A 等人^[9]提出了一种新型智能优化算法——蜜獾算法(HBA),该算法主要通过模拟蜜獾觅食行为来进行寻优,具有寻优强、收敛速度快等优点。

鉴于超鞅理论的优势,为了满足 VLC 上行系统中终端业务对网络服务质量(QoS)的差异化需求,本文提出一种基于超鞅理论的服务效率优化算法,高效地保障业务的 QoS 要求。

1 系统模型分析

VLC 信道主要依靠视距 (LOS) 链路和非视距 (NLOS)链路进行数据传输。在典型的室内环境中,由于光电探测器仅能接收到来自 NLOS 分量的微小能量^[10],因此本文仅针对 VLC 系统的 LOS 链路展开研究,研究场景如图 1 所示。VLC 上行通信网络是由 N 个终端和一个协调器组成的场景。

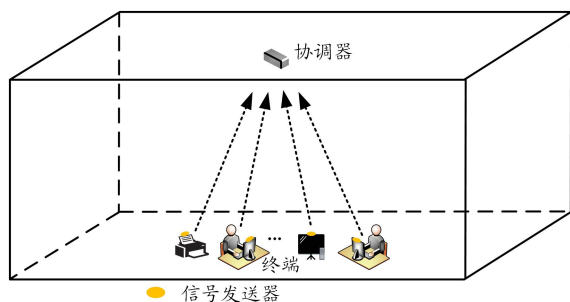


图 1 VLC 上行传输场景图

本文建模的通信场景适用于室内环境,假设系统中的天花板材料具有不吸收光信号的特性。终端设备上配备有信号发送器用于发送信号,在无遮挡的情况

下,信号发送器能够通过 LOS 链路直接传输信号到协调器。协调器上配备 M 个光电探测器位于天花板中心位置,具有多包接收能力(MPR),可以同时处理来自 N 个终端的数据业务。系统内每个终端位置固定且与协调器位置正对,终端负载的业务具有各自的时延 QoS 要求。当传输链路被遮挡时,通信立即终止。每个终端具有各自的发送概率 $p_i(i=1,2,\dots,N)$ 。终端成功接入协调器的概率为 $p_{v,i}$,系统的服务速率为 R 。VLC 网络的瞬时服务过程 $s_i(n)$ 可表示为

$$s_i(n)=\begin{cases} R, p_{v,i} \\ 0, 1-p_{v,i} \end{cases} \quad (1)$$

每个终端设备与协调器之间的通信过程,均可以建模为一个网络队列系统,该系统由马尔可夫调制调制的 On-Off(MMOO)到达和 ALOHA 服务构成。VLC 网络的队列模型如图 2 所示。在该模型中,MMOO 到达过程呈现二态性:当系统处于“On”状态时,数据包以速率 R_i 进行传输;而当系统切换至“Off”状态时,则停止数据包的传输。 $p_{a,i}, p_{b,i}$ 分别对应从“Off”状态到“On”状态以及从“On”状态到“Off”状态的数据包转移概率。

本文提出的异质服务质量(QoS)保障方案,具备广泛适用性。为了更直观地阐述服务效率优化算法,本文采用一个示例场景,其中包含 3 个终端($N=3$),且每个终端具有接收 2 个数据包的能力。基于此设置,本文计算了各终端成功接入协调器的概率,其表达式由式(2)给出。

$$p_{v,i}=p_i\beta\times\left[1-\sum_{k=1,k\neq i}^N p_k(1-\beta)+\prod_{k=1,k\neq i}^N p_k\left(1-C_{N-1}^1\beta^{N-1}\right)\right] \quad (2)$$

其中, p_k 表示第 k 个终端的发送概率, C 为组合元算符号, β 为未被遮挡概率。

2 服务效率优化算法

2.1 VLC 系统鞅域优化问题构建

本文借鉴服务鞅和到达鞅的概念^[11],通过指数变换来构建服务过程和到达过程的超鞅。对于 ALOHA 随机接入服务过程,当衰减指数 $\theta_i>0$ 时,存在服务过程的超鞅修正函数 $K_{v,i}\geq 0$ 和函数 $h_{v,i};\text{rng}(v)\rightarrow R^+$,可构建服务过程的超鞅 $M_{v,i}(n)$ 为

$$M_{v,i}(n)=h_{v,i}(s_i(n))e^{\theta_i(nK_{v,i}-S_i(n))} \quad (3)$$

其中, $S_i(n)$ 为前 n 时隙累计服务的数据包量, $S_i(n)=$

$\sum_{t=1}^n s_i(t)$ 。 $K_{v,i}$ 的具体表达形式如式(4)所示。

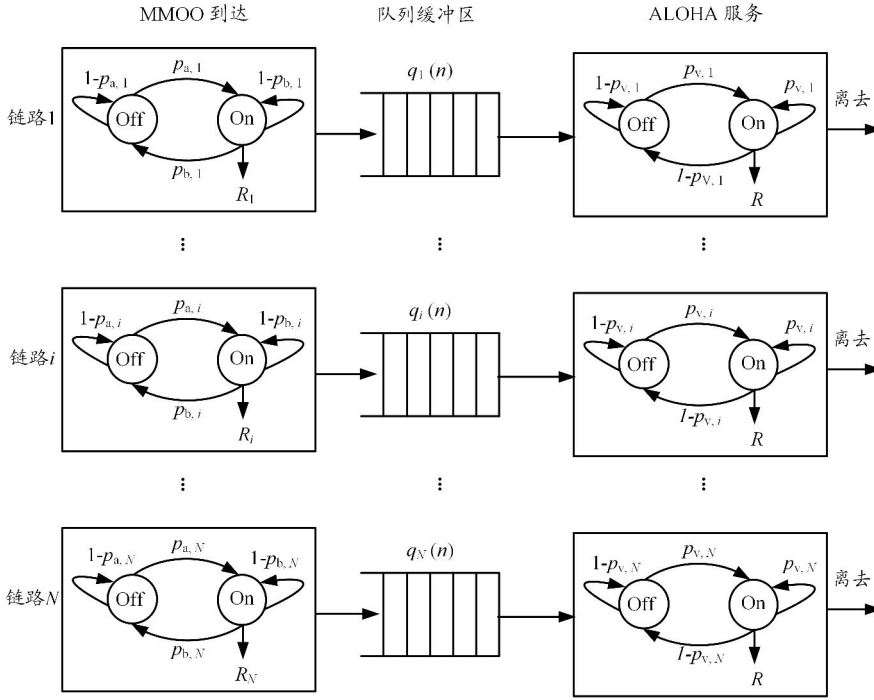


图2 VLC网络队列模型图

$$K_{v,i} = -\frac{\ln(p_{v,i}e^{-\theta_i R} + 1 - p_{v,i})}{\theta_i} \quad (4)$$

对于 MMOO 到达过程,当 $\theta_i > 0$ 时,存在到达过程的超鞅修正函数 $K_{a,i} \geq 0$ 和 $h_{a,i}: \text{rng}(a) \rightarrow R^+$,可构建到达过程的超鞅 $M_{a,i}(n)$ 为

$$M_{a,i}(n) = h_{a,i}(B_i(n)) e^{\theta_i [A_i(n) - nK_{a,i}]} \quad (5)$$

其中, $B_i(n)$ 表示第 n 时隙到达的数据包量, $A_i(n)$ 表示前 n 时隙数据包的累计到达量, $A_i(n) = \sum_{t=1}^n B_i(t)$ 。 $K_{a,i}$ 表示的表达形式如式(6)所示。

$$K_{a,i} = \frac{\ln(r(T^{\theta_i}))}{\theta_i} \quad (6)$$

其中, $r(T^{\theta_i})$ 为谱半径,转移矩阵 $T = \begin{pmatrix} 1-p_{a,i} & p_{a,i} \\ p_{b,i} & 1-p_{b,i} \end{pmatrix}$ 。

T^{θ_i} 为 T 的指数列变换矩阵,其具体表达式为

$$T^{\theta_i} = \begin{pmatrix} 1-p_{a,i} & p_{a,i} e^{\theta_i R_i} \\ p_{b,i} & (1-p_{b,i}) e^{\theta_i R_i} \end{pmatrix} \quad (7)$$

本文通过计算系统队长的超鞅形式来分析 VLC 系统的队列演化过程。队长鞅 $M_{q,i}(n)$ 可以表示为

$$M_{q,i}(n) = h_{a,i}(B_i(n)) h_{v,i}(s_i(n)) \times e^{\theta_i [A_i(n) - nK_{a,i} + nK_{v,i} - S_i(n)]} \quad (8)$$

基于超鞅停时理论,队列的溢出概率界由式(9)确定。

$$P_i \{d_i(n) \geq D_i\} \leq \frac{E[h_{a,i}(B_i(0))] E[h_{v,i}(s_i(0))]}{H_i} e^{-\theta_i^* \sigma_i} \quad (9)$$

其中, σ_i 是系统队长的阈值, D_i 是给定的目标时延, $d_i(n)$ 是系统时延。 H_i 的表达式如式(10)所示。

$$H_i = \min \{h_{a,i}(B_i(n)) h_{v,i}(s_i(n))\}; \quad B_i(n) - s_i(n) > 0 \quad (10)$$

其中, $E[h_{v,i}(s_i(0))]$ 、 $E[h_{a,i}(B_i(0))]$ 分别表示第 i 条链路服务过程、到达过程相关特性函数的初值期望。若是独立同分布增量,则满足以下条件: $E[h_{v,i}(s_i(0))] = 1$, $E[h_{a,i}(B_i(0))] =$

$$A \frac{p_{b,i}}{p_{a,i} + p_{b,i}} + B \frac{p_{a,i}}{p_{a,i} + p_{b,i}}, \text{ 其中, } \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} \text{ 为}$$

其特征向量。

θ_i^* 的表达式分别如式(11)所示。

$$\theta_i^* = \sup \{ \theta_i > 0: K_{a,i} = K_{v,i} \} \quad (11)$$

时延违反概率界由式(12)确定。

$$P_i \{d_i(n) \geq D_i\} \leq \frac{E[h_{a,i}(B_i(0))] E[h_{v,i}(s_i(0))]}{H_i} e^{-\theta_i^* E[B_i(n)] D_i} \quad (12)$$

其中, $E[B_i(n)]$ 为 MMOO 天达过程的平均到达强度,

$$E[B_i(n)] = \frac{p_{a,i} R_i}{p_{a,i} + p_{b,i}}。$$

为了保障 VLC 系统各终端的时延 QoS 要求,需要保证如下不等式成立。

$$P_i \{d_i(n) \geq D_i\} \leq \varepsilon_i \quad (13)$$

其中, ε_i 为时延违反概率阈值。

通过比较式(12)与式(13),可得出系统的时延 QoS 约束条件为

$$\frac{E[h_{a,i}(B_i(0))] E[h_{v,i}(s_i(0))]}{H_i} e^{-\theta_i^* E[B_i(n)] D_i} \leq \varepsilon_i \quad (14)$$

本文以系统所需提供的最小服务资源 R 为目标建立如下优化问题 Q_1 ,并通过 HBA 进行求解。

$$Q_1: \min R \quad p_1, p_2, p_3 \quad (15a)$$

孙洪亮,王超,胡雪,等: 基于超鞅理论的 VLC 系统服务效率优化算法

$$\text{s.t. } C_1: \begin{cases} \frac{E[h_{a,1}(B_1(0))]E[h_{v,1}(s_1(0))]}{H_1} e^{-\hat{\theta}_1 E[B_1(n)]D_1} \leq \varepsilon_1 \\ \frac{E[h_{a,2}(B_2(0))]E[h_{v,2}(s_2(0))]}{H_2} e^{-\hat{\theta}_2 E[B_2(n)]D_2} \leq \varepsilon_2 \\ \frac{E[h_{a,3}(B_3(0))]E[h_{v,3}(s_3(0))]}{H_3} e^{-\hat{\theta}_3 E[B_3(n)]D_3} \leq \varepsilon_3 \end{cases} \quad (15b)$$

$$C_2: 0 < p_1, p_2, p_3 \leq 1 \quad (15c)$$

其中, p_1, p_2, p_3 分别表示第 1、2、3 个终端的发送概率。

2.2 HBA 原理

2.2.1 挖掘阶段

在挖掘阶段,蜜獾向蜂蜜位置前进的路线可以描述为

$$X_{\text{new}} = X_{\text{prey}} + FQI_i X_{\text{prey}} + F(\gamma_i) \alpha X_{J,i} \times |\cos(2\pi\gamma_2) [1 - \cos(2\pi\gamma_3)]| \quad (16)$$

其中, X_{new} 为更新位置后的蜜獾位置, X_{prey} 为全局最优的蜂蜜位置。 Q 表示蜜獾获取蜂蜜的能力, I_i 表示蜂蜜香气强度, α 表示密度因子, $X_{J,i}$ 表示蜂蜜与蜜獾的距离。 $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ 在 $[0, 1]$ 范围内随机取值。 F 为蜜獾改变搜索方向的标志,具体表达式如下:

$$F = \begin{cases} 1, \gamma_4 < 0.5 \\ -1, \gamma_4 \geq 0.5 \end{cases} \quad (17)$$

其中, γ_4 为 $[0, 1]$ 内的随机数。

2.2.2 采蜜阶段

向导鸟引领蜜獾找到蜂蜜位置的过程可以表示为

$$X_{\text{new}} = X_{\text{prey}} + F(\gamma_5) \alpha X_{J,i} \quad (18)$$

其中, γ_5 为 $[0, 1]$ 内的随机数。

2.3 HBA 求解优化问题

本文采用 HBA 求解满足各链路 QoS 约束的最小服务资源,具体的求解步骤如算法 1 所示。

算法 1 异质 QoS 保障算法

输入: 种群数量 P , 最大迭代次数 G

输出: $R^*, w_o^*(p_1, p_2, p_3)$

- 1) 初始化蜜獾种群位置 $w_o(p_1, p_2, p_3)$, 其中 $\alpha = 1, 2, \dots, P$
- 2) $E[B(n)] = \max(E[B_1(n)], E[B_2(n)], E[B_3(n)])$
- 3) $\Delta = 1$
- 4) $\text{Low} = \Delta E[B(n)]$ // 顺序搜索算法下界
- 5) $\text{Upper} = (\Delta + 1) E[B(n)]$ // 顺序搜索算法上界
- 6) $\text{Flag}_1, \text{Flag}_2, \text{Flag}_3$ // 以 Upper 作为服务速率分别判断 3 条链路是否满足时延 QoS 要求

7) IF ($\text{Flag}_1 \&\& \text{Flag}_2 \&\& \text{Flag}_3 = 0$) // 3 条链路均满足时延 QoS 要求

8) 计算适应度值 R_o (通过顺序搜索算法)

9) ELSE

10) $\Delta = 2\Delta$, 跳转第 4 行

11) END

12) 输出此时最优适应度值 (R_o 最小值)

13) FOR $g = 1:G$

14) FOR $\alpha = 1:P$

15) IF $y < 0.5$ // 进入开发阶段, y 表示 $[0, 1]$ 内的随机数

16) 通过式 (16) 更新蜜獾位置

17) ELSE

18) 通过式 (18) 更新蜜獾位置

19) END

20) 计算更新后种群个体对应的适应度值 (通过顺序搜索算法)

21) 如果更新后的适应度值更小, 则更新; 否则保持不变

22) END

23) END

24) RETURN $[R^*, w_o^*(p_1, p_2, p_3)]$

3 仿真结果分析

本文采用 Matlab 软件进行仿真, 仿真参数设置如表 1 所示。首先, 对基于超鞅理论的服务优化算法的可靠性进行验证; 然后, 将 HBA 与粒子群优化 (PSO) 算法求解的最小化服务速率进行对比; 最后, 研究未被遮挡概率、平均到达速率、时延违反概率阈值参数改变对服务速率的影响。

为了验证基于超鞅理论的 VLC 系统服务效率优化算法的可靠性, 本文分别对 3 条上行链路的排队系统进行仿真, 设定链路 2 和链路 3 目标时延均为 100 个时隙, 得到仿真结果如图 3 所示。箱图的上边缘线表示系统时延违反概率的最大值, 而下边缘线表示最小值; “+” 符号代表时延违反概率中的离群值, 这些值对总体结果影响不大, 可以忽略。箱图内部的线表示中位数, 箱体部分涵盖了系统时延违反概率的主要分布区间。从图 3 可以看出, 3 条链路的时延违反概率均小于给定的时延违反概率阈值 10^{-2} , 这表明本文所设计的算法能够满足每个终端业务的不同 QoS 要求。

接下来, 比较基于 HBA 求解的服务速率与基于

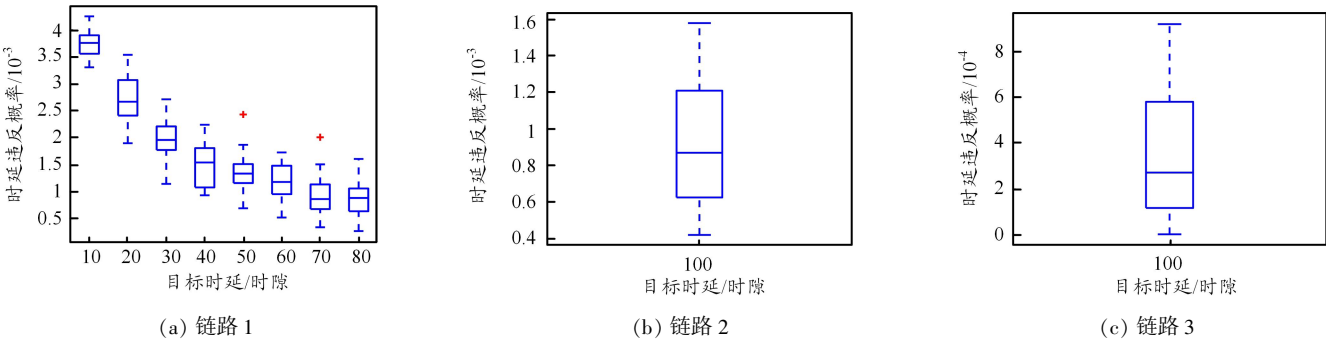


图 3 时延违反概率实验结果图

表 1 仿真实验参数

参数	数值		
	链路 1	链路 2	链路 3
时延违反概率阈值 ε	10^{-2}	10^{-2}	10^{-2}
终端数量 N	3	3	3
多包接收能力 M	2	2	2
未被遮挡概率 β	0.8	0.8	0.8
关闭态 Off 到传输态 On 的转移概率 $p_{o,i}$	0.2	0.1	0.4
传输态 On 到关闭态 Off 的转移概率 $p_{h,i}$	0.5	0.4	0.7
传输态 On 的传输速率 R_i /(包/时隙)	1	1	1

PSO 求解的服务速率。PSO 是经典的群智能优化算法,在求解优化问题中被广泛使用。然而,PSO 在处理带有约束条件的优化任务时存在收敛速度慢、容易陷入局部最优等问题。相比之下,HBA 在充分考虑约束条件的同时,能够更为迅速地寻找到全局最优解。本文对 2 种算法均设置了相同的种群数量 $P=9$ 和最大迭代次数 $G=100$,得到的 5 次实验结果经过均值化处理后的曲线对比图如图 4 所示。可以看出,在达到最小的服务速率所需的迭代次数方面,HBA 显著少于 PSO 算法,收敛速度相较于 PSO 算法提高了 66%,能更快地迭代到服务速率最小值。

本文通过改变未被遮挡概率 β 、时延违反概率阈值 ε 、平均到达速率 $E[B(n)]$ 等参数进一步探索其对服务速率的影响。

首先,当 $\beta=0.5$ 、 $\beta=0.8$ 时分别对最优服务速率进行仿真,得到 VLC 网络服务参数未被遮挡概率改变对服务速率变化的影响如图 5 所示。可以看出,目标时延

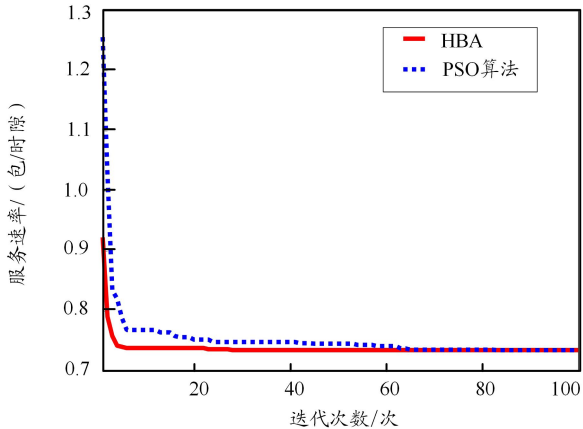


图 4 基于 HBA 与 PSO 算法的服务速率对比图

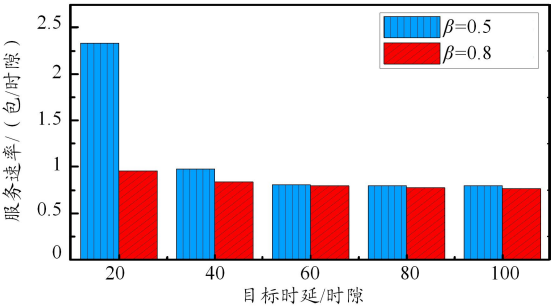


图 5 未被遮挡概率改变对服务速率的影响图

D 的减小会导致所需服务速率的增加。这是因为 D 值越小,系统的时延 QoS 要求越严格,所需要的服务速率就越大。当 β 值较小时,所需的服务速率会相应增大。而 β 的取值增大则意味着系统能够提供更高效的服务,从而减少队列积压,使得较少的服务资源即可满足链路的时延 QoS 要求。

然后,观察 $E[B(n)]$ 改变对 VLC 系统服务速率的影响,结果如图 6 所示。可以看出,服务速率随着目标时延的减小而增加,表明系统需要提供更多的服务来满足系统的时延 QoS 要求; $E[B(n)]$ 与服务速率之间存在正相关关系,即 $E[B(n)]$ 的增大表明排队系统中到达的数据包数量增加,所需服务速率增大。

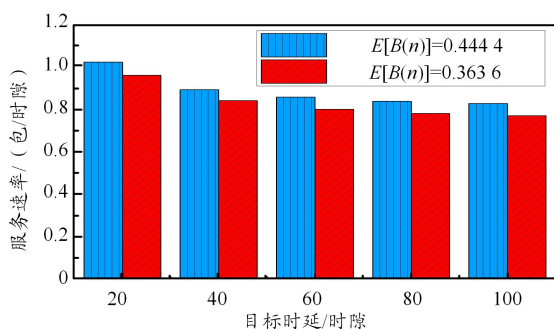


图 6 平均到达速率改变对服务速率的影响图

最后,仿真设置了 $\varepsilon=10^{-2}$ 、 $\varepsilon=10^{-3}$ 这 2 组时延违反概率阈值,得到时延违反概率阈值 ε 改变对服务速率的影响图如图 7 所示。可以看出,当目标时延相同时,较大的 ε 值对应于较小的服务速率。因为 ε 取值变大时,表示系统对时延违反的容忍性变大,因此较少的带宽就能满足链路的时延 QoS 要求。

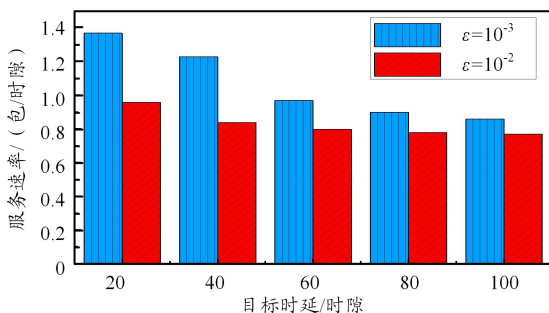


图 7 时延违反概率阈值改变对服务速率的影响图

4 结束语

针对 VLC 上行通信网络的多用户 QoS 保障问题,本文设计了一种基于超鞅理论的服务效率优化算法。首先,考虑采用 MPR 技术以缓解终端数据包碰撞问题,并深入分析了各终端成功接入的概率。利用超鞅停时理论,推导了各终端的鞅域时延违反概率界。然后,以最小化系统服务速率为目标,以鞅时延界为约束条件,构造了相应的优化问题,并采用了 HBA 算法进行求解。最后,分析了系统参数时延要求改变对

服务速率的影响。本文所提算法能够在保障业务异质 QoS 的同时,提高 VLC 通信系统服务效率。

参考文献:

- [1] ZHANG W, ZHAO X, ZHAO Y Q, et al. On security performance analysis of IRS-aided VLC/RF hybrid system[J]. Physical Communication, 2023, 61: 102176-1-102176-12.
- [2] LI X J, MIN C Y, GAO S S, et al. Experimental demonstration of a real-time multi-channel uplink VLC system[J]. Optics Communications, 2019, 453: 124420-1-124420-6.
- [3] ALRESHEEDI M T, HUSSEIN A T, ELMIRGHANI J M H. Uplink design in VLC systems with IR sources and beam steering[J]. IET Communications, 2016, 11(3): 1-20.
- [4] WANG L Q, HAN D H, ZHANG M, et al. A dynamic handover scheme based on bidirectional VLC channel in multi-user attocell networks[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2022, 2022(1): 1-15.
- [5] POLOCZEK F, CIUCU F. Scheduling analysis with martingales[J]. Performance Evaluation, 2014, 79: 56-72.
- [6] ZHAO L L, CHI X F, ZHU Y H. Martingales-based energy-efficient D-ALOHA algorithms for MTC networks with delay-insensitive/URLLC terminals co-existence[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(2): 1285-1298.
- [7] LIU T T, SUN L, CHEN R Q, et al. Martingale theory based optimal task allocation in heterogeneous vehicular networks[J]. IEEE Access, 2019, 7: 122354-122366.
- [8] OZCAN G, OZMEN M, GURSOY M C. QoS-driven energy-efficient power control with random arrivals and arbitrary input distributions[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 16(1): 376-388.
- [9] HASHIM F A, HOUSSEIN E H, HUSSAIN K, et al. Honey badger algorithm: new metaheuristic algorithm for solving optimization problems[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2021, 192: 84-110.
- [10] MARWAN H, JRGEN P. VLC systems with fixed-rate transmissions under statistical queueing constraints[C]//11th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing, Budapest, Hungary. Piscataway: IEEE, 2018: 1-6.
- [11] POLOCZEK F, CIUCU F. Service- martingales; theory and applications to the delay analysis of random access protocols[C]//IEEE Conference on Computer Communications(INFOCOM2015), April 26-May 1, 2015, Hong Kong, China. New York: IEEE, 2015: 945-953.