

VLC网络基于鞅论的时延QoS分析及优化研究

于宝珠, 车果果*

沈阳理工大学信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2025年2月5日; 录用日期: 2025年3月7日; 发布日期: 2025年3月14日

摘 要

可见光通信(VLC)技术, 凭借其丰富的带宽资源、高效的传输性能以及节能环保的特性, 已逐渐成为备受瞩目的绿色通信手段。本文依托排队论、有效带宽(EB)与有效容量(EC)理论, 并结合鞅理论, 针对通信网络的特点, 将用户服务质量(QoS)的高效保障问题建模为一个在鞅域时延约束下的服务速率最小化问题。为解决这一问题, 我们采用了蜜獾算法(HBA)进行求解。

关键词

鞅理论, 服务质量, 服务效率优化, 蜜獾算法

Research on Delay QoS Analysis and Optimization Based on Martingale Theory in VLC Heterogeneous Networks

Baozhu Yu, Guoguo Che*

School of Information Science and Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang Liaoning

Received: Feb. 5th, 2025; accepted: Mar. 7th, 2025; published: Mar. 14th, 2025

Abstract

Visible Light Communication (VLC) technology, leveraging its abundant bandwidth resources, high transmission efficiency, and environmentally friendly characteristics, has gradually emerged as a highly regarded green communication method. This paper relies on queueing theory, Effective Bandwidth (EB) and Effective Capacity (EC) theories, and incorporates martingale theory to model the efficient guarantee of User Quality of Service (QoS) as a problem of minimizing service rate under martingale-based delay constraints, tailored to the characteristics of communication networks.

*通讯作者。

文章引用: 于宝珠, 车果果. VLC 网络基于鞅论的时延 QoS 分析及优化研究[J]. 计算机科学与应用, 2025, 15(3): 64-71.
DOI: 10.12677/csa.2025.153058

To address this issue, we employ the Honey Badger Algorithm (HBA) for solving it.

Keywords

Martingale Theory, Quality of Service (QoS), Service Efficiency Optimization, Honey Badger Algorithm

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

可见光通信(VLC)凭借其丰富的频谱资源和绿色环保的节能特性,在智能化时代中崭露头角,为高效通信提供了创新途径。目前关于 VLC 系统的资源分配算法的研究主要集中在 VLC 下行链路。文献[1]中,以最大化下行链路频谱效率为优化目标,提出了一种基于时分多址(Time Division Multiple Access, TDMA)的 VLC 下行链路的资源分配算法。研究通过确定各个用户之间的最佳功率分配系数以及最优的调度时间来实现 VLC 下行链路的资源分配方案。在统计型时延 QoS 要求约束下,为高效分配网络资源,构建一个精确的时延性能分析框架是亟需解决的问题。有效带宽和有效容量理论被视为 QoS 分析与保障的经典理论,有效带宽指的是满足业务 QoS 约束下,系统所需提供的最小带宽[2]。文献[3]利用有效带宽和有效容量理论,确定了满足 QoS 约束的到达速率和所需的服务速率,进一步评估系统的有效能量效率(Effective Energy Efficiency, EEE)。鞅理论的发展为 QoS 分析与保障提供了新的解决方案,鞅的概念首先由法国 Lévy 在 1935 年提出,随后美国的 Doob 进一步发展和推广。F. Ciucu、F. Poloczek 团队将鞅理论应用在网络 QoS 分析与保障的研究中,提出基于到达鞅和服务鞅概念的分析框架[3]。文献[4]中分析了由多个到达流和单个服务器构成的排队系统的缓冲行为,评价不同分布的流量到达总量的缓冲性能。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问题。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。文献[9]基于博弈论提出了一种基于频谱聚类和非合作博弈的通信信道分配方案,使 D2D 通信设备的运行效率达到了最大化。针对复杂的通信场景,设计合理的网络服务效率优化方案是实现高质量 QoS 保障的关键。

2. 系统模型分析

可见光通信(VLC)信道主要依赖视距(Line of Sight, LOS)链路和非视距(Non-Line of Sight, NLOS)链路来传输数据。研究可见光通信系统必须以可见光信道建模为基础,这包括室内和室外传输信道两类。鉴于室外信道存在更多不确定因素,本文重点研究室内可见光通信。根据发射端与接收端之间是否存在障碍物,室内 VLC 信道可分为 LOS 部分和 NLOS 部分;图 1 展示了室内 VLC 系统中 LOS 链路和 NLOS 链路的结构。在可见光通信系统的研究中,大多采用定向 LOS 链路。本文主要针对 VLC 系统中的 LOS 链路部分进行探讨。

如图 2 所示,我们假设系统中的天花板材料具有完全反射光信号的能力,确保光信号在传输过程中不被吸收。终端设备配备了信号发射装置,负责信号的发送任务。在无障碍物的条件下,信号发射装置能够通过视距(Line-Of-Sight, LOS)链路直接将信号传输至位于天花板中央的协调器,该协调器装备了 L

个光电探测元件。系统内, 每个终端的位置固定且与协调器保持对齐, 同时每个终端所承载的业务都各自具有特定的时延服务质量(QoS)要求。一旦传输链路被遮挡, 通信将立即中断。此外, 每个终端都拥有独立的发送概率 $p_i (i=1,2,\dots,N)$ 。系统的服务速率为 R_s 。VLC 网络的瞬时服务过程 $s(n)$ 可表示为

$$s(n) = \begin{cases} R_s, & p_i \\ 0, & 1-p_i \end{cases} \quad (1)$$

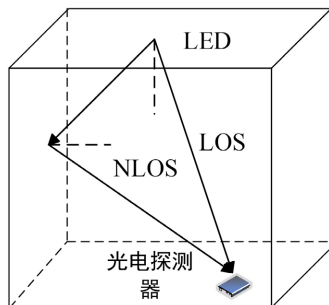


Figure 1. Indoor VLC system

图 1. 室内 VLC 系统

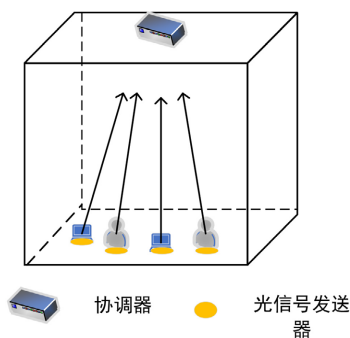


Figure 2. Diagram of VLC uplink transmission scenario

图 2. VLC 上行传输场景图

3. 服务效率优化算法

3.1. 鞅域构建 VLC 系统

每个终端设备与协调器的通信过程均可构建成 MMOO (马尔可夫调制)到达和 ALOHA 服务的网络队列系统。MMOO 到达的马尔可夫链如图 3 所示。

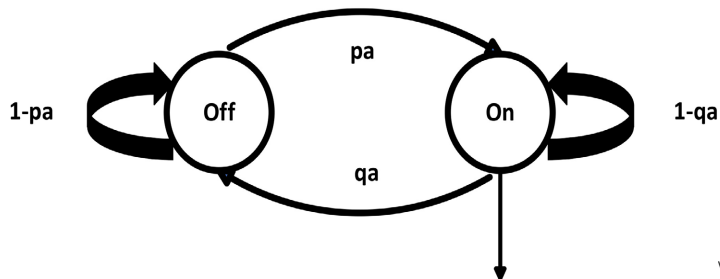


Figure 3. MMOO model

图 3. MMOO 模型

当系统为 ON 状态时到达速率为 R , Off 状态时无数据到达。 pa 表示 Off 到 On 转变概率, qa 表示 On 状态到 Off 状态的转变概率。此马尔科夫链状态空间。其对应的概率转移矩阵 T 与对角速率矩阵 Δ 为:

$$T = \begin{bmatrix} 1-pa & pa \\ qa & 1-qa \end{bmatrix}, \Delta = \begin{bmatrix} 0 & \\ & R \end{bmatrix} \quad (2)$$

根据到达鞅定义, 可将 MMOO 过程的鞅构造为:

$$M_a(n) = h_a(a(n))e^{\mathcal{G}(A(n)-nK_{ai})} \quad (3)$$

其中 h_a 表示对应的右特征向量, $sp(T^{\mathcal{G}})$ 表示谱半径。

当 MMOO 过程建模为到达鞅时, 系统的累计到达。为了保证到达鞅满足指数上鞅的要求, 需确保下式成立:

$$E[h_{ai}(x_{n+1})e^{\mathcal{G}(A_i(n+1)-(n+1)K_{ai})} | x_1, \dots, x_n] = h_{ai}(x_n)e^{\mathcal{G}(A_i(n)-nK_{ai})} \quad (4)$$

指数列变换矩阵 $T^{\mathcal{G}}$ 可表示为:

$$T^{\mathcal{G}} = \begin{bmatrix} 1-pa & pa e^{\mathcal{G}R} \\ qa & (1-qa)e^{\mathcal{G}R} \end{bmatrix} \quad (5)$$

则 MMOO 的到达鞅参数 K_{ai} 的定义为:

$$K_{ai} = \frac{\log sp(T^{\mathcal{G}})}{\mathcal{G}} \quad (6)$$

若服务是 MMOO 过程, 根据服务鞅定义为:

$$M_s(n) = h_s(s(n))e^{\mathcal{G}(nK_s-S(n))} \quad (7)$$

为保证服务鞅满足指数上鞅要求, 服务鞅也需满足下式定义:

$$E[h_s(x_{n+1})e^{\mathcal{G}((n+1)K_s-S(n+1))} | x_1, \dots, x_n] = h_s(x_n)e^{\mathcal{G}(nK_s-S(n))} \quad (8)$$

与到达鞅同理, 此时的指数列变换矩阵 T^{θ} 为

$$T^{\theta} = \begin{bmatrix} 1-pa & pa e^{-\mathcal{G}R} \\ qa & (1-qa)e^{-\mathcal{G}R} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\text{则服务鞅参数 } K_s = \frac{\log sp(T^{\theta})}{\mathcal{G}}$$

根据上鞅的性质, 两个上鞅过程的乘积还是上鞅过程。因为服务鞅和到达鞅均是上鞅结构, 已知队长为 $Q(n) = \sup_{n \geq 0} \{A_i(n) - S(n)\}$, 所以构造出队列长度的鞅:

$$M^L(n) = h_{ai}(a_i(n))h_s(s(n))e^{\mathcal{G}^*(A_i(n)-S(n)+nK_s-nK_{ai})} \quad (10)$$

其中

$$\mathcal{G}^* = \sup \{\mathcal{G} > 0 : K_{ai} \leq K_s\} \quad (11)$$

当 $\mathcal{G}^*$ 取极值时有 $K_{ai} = K_s$, 则队长 $M^L(n)$ 化简为:

$$M^L(n) = h_{ai}(a_i(n))h_{si}(s_i(n))e^{\mathcal{G}^*(A_i(n)-S(n))} \quad (12)$$

根据鞅的停时理论：在鞅过程中，在停时时刻的期望小于或等于其初值的期望，由此可得时延违反概率界：

概率界：

$$P_i\{d_i(n) \geq D_i\} \leq \frac{E[h_{ai}(a_i(0))]E[h_{si}s_i(0)]}{H} e^{-g_i^* \sigma} \quad (12)$$

其中 σ 为系统队长的阈值， H 是阈值， D_i 是给定的目标时延，由下式确定：

$$\sigma = E[a_i(n)]D_i \quad (14)$$

$$H = \min[h_{ai}(x)h_{si}(y) : x - y > 0] \quad (13)$$

当 $N = \infty$ 时，有 $P(N < \infty) = P(Q > \sigma)$ 。停止时间 N 第一次超过 σ 表示为：

$$N = \min[n : A_i(n) - S(n) \geq \sigma] \quad (14)$$

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：

$$P_i\{d_i(n) \geq D_i\} \leq \varepsilon_i \quad (15)$$

其中 ε_i 为时延违反概率阈值。根据式 13 和 17 可得系统的 QoS 约束：

$$\frac{E[h_{ai}(ai(0))]E[h_{si}s_i(0)]}{H} e^{-g_i^* \sigma} \leq \varepsilon_i \quad (16)$$

接下来，我们以系统所需的最小服务资源量 R_s 作为优化目标，构建相应的优化问题，并用蜜獾优化算法来求解该问题。

$$\begin{aligned} \min_{p_{1s}, p_{2s}, p_{3s}} R_s, C1: & \begin{cases} \frac{E[h_{a1}(a_1(0))]E[h_{s1}s_1(0)]}{H_1} e^{-g_1^* \sigma_1} \leq \varepsilon_1 \\ \frac{E[h_{a2}(a_2(0))]E[h_{s2}s_2(0)]}{H_2} e^{-g_2^* \sigma_2} \leq \varepsilon_2 \\ \frac{E[h_{a3}(a_3(0))]E[h_{s3}s_3(0)]}{H_3} e^{-g_3^* \sigma_3} \leq \varepsilon_3 \end{cases} \\ C2: & 0 < p_{1s}, p_{2s}, p_{3s} \leq 1 \end{aligned} \quad (17)$$

3.2. 蜜獾算法求解

蜜獾求解过程如下

1) 挖掘阶段

在挖掘阶段，蜜獾向目标前进的路线可以描述为：

$$X_{\text{new}} = X_{\text{prey}} + FQI_i X_{\text{prey}} + F(\text{rand}_1) \alpha X_{di} \left[\cos(2\pi(\text{rand}_2)) [1 - \cos(2\pi(\text{rand}_3))] \right] \quad (18)$$

其中， X_{new} 、 X_{prey} 分别为更新位置后的蜜獾位置和全局最优的目标位置。 Q 、 I_i 、 α 、 X_{di} 的含义见参考文献[10]。 rand_1 ， rand_2 ， rand_3 在 $[0, 1]$ 范围内随机取值。 F 具体如下，表蜜獾改变搜索方向：

$$F = \begin{cases} 1, & \text{rand}_4 \leq 0.5 \\ -1, & \text{rand}_4 > 0.5 \end{cases} \quad (19)$$

2) 采蜜阶段

向导鸟引领蜜獾找到目标位置的过程可以表示为:

$$X_{\text{new}} = X_{\text{prey}} + F(\text{rand}_s) \alpha X_{di} \quad (20)$$

rand_s 在 $[0, 1]$ 内随机取值。

采用 HBA 求解满足链路 QoS 约束的最小服务资源, 具体的求解步骤如下。首先初始化蜜獾种群位置, 通过 $E[a_i(n)] = \frac{p_{ai} R_i}{p_{ai} + p_{bi}}$ 计算链路到达速率的期望值。以顺序搜索算法上界得 Upper 作为服务速率, 由公式(18)分别判断链路是否满足时延 QoS 要求。如果链路均满足 QoS 要求, 得清楚。

FlagT1 & FlagT2 & FlagT3 = 0, 输出此时服务速率 $R_{\text{so_min}}$; 若不满足则需根据顺序搜索算法下界重新计算 Upper。

然后, 更新蜜獾种群位置、计算新的目标位置。蜜獾在挖掘阶段根据公式(18~19)更新蜜獾位置; 采蜜阶段根据公式(20)更新蜜獾位置。更新数据包向上传输概率, 计算对应的服务速率。最后对比更新后的适应度值和初始化位置后得到的适应度值。若更新后的适应度值更小, 则取值更新适应度函数; 反之不变。输出服务速率最小值 R_s^* 和链路所对应的传输数据包的概率 p_o^* , 为终端设计服务优化方案, 可满足终端 QoS 的高效保障。

4. 仿真结果分析

粒子群优化算法(PSO)作为一种经典的群智能优化手段, 在优化问题求解中得到了广泛应用。然而, 在处理带有约束条件的优化问题时, PSO 算法面临着收敛速度缓慢和易于陷入局部最优解的难题。为了对比, 本文将基于 HBA 算法求得的服务速率与基于 PSO 算法的结果进行了比较。在实验中, 我们设定了相同的种群规模 P 为 9, 以及最大迭代次数 V 为 100。如图 4 所示, 相较于 PSO 算法, HBA 算法展现出了更快的收敛速度, 能够更迅速地迭代至服务速率的最小值。

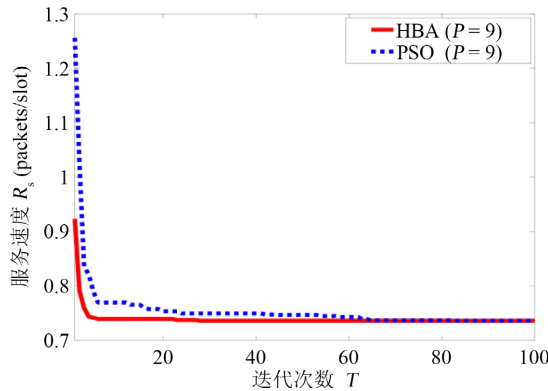


Figure 4. Comparison chart of service rates based on the honey badger algorithm and particle swarm optimization algorithm

图 4. 基于蜜獾算法与粒子群算法的服务速率对比图

论本文通过调整未被遮挡概率及时延违反概率阈值等关键参数, 深入分析了这些参数对服务速率的具体影响机制。设定了 $\beta = 0.5$ 和 $\beta = 0.8$ 两种不同的情境进行仿真分析, 旨在观察 VLC 网络服务参数中未被遮挡概率的变动如何对服务速率的调整产生影响。如图 5 所示的仿真结果清晰地揭示了目标时延 D 的缩减会直接导致所需服务速率的上升。这是因为 D 值的降低意味着系统对时延的 QoS 要求愈发严苛, 因此必须相应提升服务速率以满足这些更为严格的 QoS 要求。另一方面, 未被遮挡概率值的提升也会促

使所需服务速率的降低。这是因为较高的未被遮挡概率意味着系统能够更有效地提供服务, 减少了队列积压的风险, 从而使得较低的服务速率就能满足链路的时延 QoS 要求。相反, 当未被遮挡概率值较低时, 系统提供的有效服务减少, 为满足相同的 QoS 要求, 就必须增加服务速率。

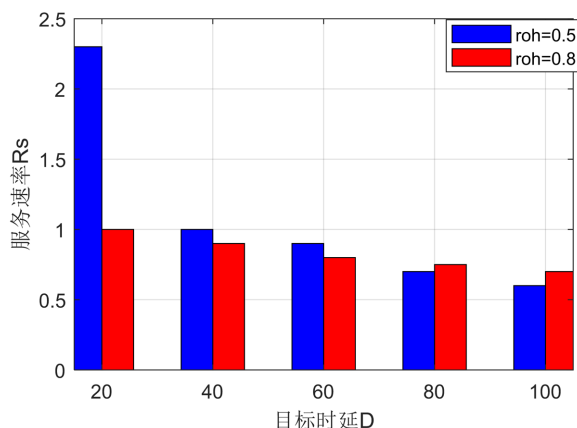


Figure 5. Impact diagram of changes in unobstructed probability on service rate

图 5. 未被遮挡概率改变对服务速率的影响图

最后, 仿真实验设定了 $\varepsilon = 10^{-2}$, $\varepsilon = 10^{-5}$ 两组时延违反概率的阈值, 以此来探究 ε 的变化对 VLC 系统服务速率的影响。如图 6 所示, 在 D 值相同的情况下, ε 值越大, 所需的带宽就越小。这是因为 ε 值增大意味着系统对时延违反的容忍度提高, 因此较少的带宽就能满足异质化的时延 QoS 需求。

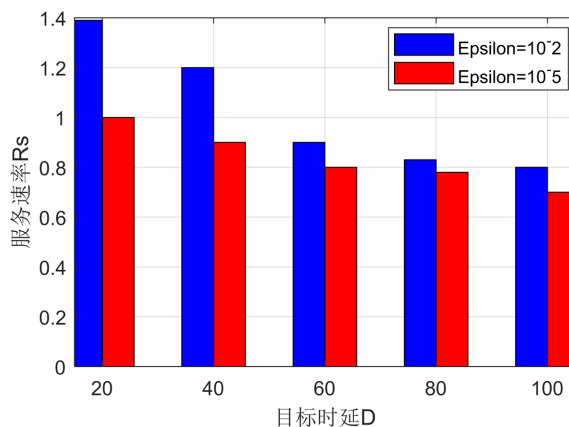


Figure 6. Impact diagram of changes in delay violation probability threshold on service rate

图 6. 时延违反概率阈值改变对服务速率的影响图

5. 结论

针对 VLC 网络, 我们采用排队论方法构建了包含 MMOO 到达模型和 ALOHA 随机接入机制的网络队列系统模型。为了评估异构网络的 QoS (服务质量) 性能, 我们运用了鞅理论。具体而言, 我们构建了系统的到达鞅、服务鞅以及队长鞅, 并据此进一步推导出了每个终端用户的鞅域时延违反概率界。通过仿真实验, 我们发现利用鞅理论所得出的时延违反概率界相较于大偏差理论更为严格, 从而能够更有效地保障系统的异质 QoS 要求。这一发现为 VLC 网络的服务优化提供了有力的理论支撑。

参考文献

- [1] Yeh, C., Chow, C. and Wei, L. (2019) 1250 Mbit/s OOK Wireless White-Light VLC Transmission Based on Phosphor Laser Diode. *IEEE Photonics Journal*, **11**, 1-5. <https://doi.org/10.1109/jphot.2019.2911411>
- [2] Qasmi, F., Shehab, M., Alves, H. and Latva-Aho, M. (2022) Effective Energy Efficiency and Statistical QoS Provisioning under Markovian Arrivals and Finite Blocklength Regime. *IEEE Internet of Things Journal*, **9**, 17741-17755. <https://doi.org/10.1109/jiot.2022.3157956>
- [3] Poloczek, F. and Ciucu, F. (2014) A Martingale-Envelope and Applications. *ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review*, **41**, 43-45. <https://doi.org/10.1145/2567529.2567543>
- [4] Sun, H., Chi, X. and Nan, Z. (2018) Router Buffer Behavior Analysis for Aggregate Traffic Based on Martingale Method. *IEEE Communications Letters*, **22**, 2040-2043. <https://doi.org/10.1109/lcomm.2018.2859397>
- [5] Poloczek, F. and Ciucu, F. (2014) Scheduling Analysis with Martingales. *Performance Evaluation*, **79**, 56-72. <https://doi.org/10.1016/j.peva.2014.07.004>
- [6] Zhao, L., Chi, X. and Zhu, Y. (2018) Martingales-based Energy-Efficient D-ALOHA Algorithms for MTC Networks with Delay-Insensitive/URLLC Terminals Co-Existence. *IEEE Internet of Things Journal*, **5**, 1285-1298. <https://doi.org/10.1109/jiot.2018.2794614>
- [7] Liu, T., Sun, L., Chen, R., Shu, F., Zhou, X. and Han, Z. (2019) Martingale Theory-Based Optimal Task Allocation in Heterogeneous Vehicular Networks. *IEEE Access*, **7**, 122354-122366. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2914942>
- [8] Ozcan, G., Ozmen, M. and Gursoy, M.C. (2017) QoS-Driven Energy-Efficient Power Control with Random Arrivals and Arbitrary Input Distributions. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, **16**, 376-388. <https://doi.org/10.1109/twc.2016.2623620>
- [9] Zhao, S., Feng, Y. and Yu, G. (2021) D2D Communication Channel Allocation and Resource Optimization in 5G Network Based on Game Theory. *Computer Communications*, **169**, 26-32. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2021.01.016>
- [10] Hashim, F.A., Houssein, E.H., Hussain, K., Mabrouk, M.S. and Al-Atabany, W. (2022) Honey Badger Algorithm: New Metaheuristic Algorithm for Solving Optimization Problems. *Mathematics and Computers in Simulation*, **192**, 84-110. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2021.08.013>