

Age of Information in Random Access Networks with Stochastic Arrivals

Igor Kadota and Eytan Modiano

Laboratory for Information and Decision Systems, MIT

摘要

We consider a Random Access network with a number of nodes transmitting time-sensitive information to a wireless base station. Packets are generated according to a stochastic process and nodes employ either Slotted-ALOHA or Carrier-Sense Multiple Access (CSMA) to transmit these packets. A packet collision occurs when two or more nodes transmit simultaneously and a successful packet transmission occurs when a node transmits without interference. The goal is to optimize the Random Access mechanism in terms of information freshness, which is captured by the Age of Information (AoI) metric. In this paper, a framework has been proposed to analyze and optimize the average AoI in Random Access networks with stochastic packet generation. In particular, a discrete-time model has been developed, deriving an approximate expression for the average AoI in the network, and then we use this expression to optimize the Random Access mechanism. Furthermore, We simulated and recorded changes in information freshness within the limits of Slotted-ALOHA and CSMA, and compare the AoI measurements with analytical and numerical results in order to validate our framework. Our approach allows us to evaluate the combined impact of the packet generation rate, transmission probability, and size of the network on the AoI performance.

关键词: Age of Information; Random Access; Wireless Networks; Optimization

1 引言

随机接入是一种多元访问技术，该技术包括诸如 Slotted-ALOHA 和载波监听多路访问（CSMA）之类的协议。这两个协议之间的主要区别在于，CSMA 利用载波传感功能避免数据包碰撞，而 Slotted-ALOHA 是一个更简单的协议，不假定节点具有载体传感功能。随机访问网络被广泛采用，使用随机访问网络实施的新兴时间敏感应用程序的示例也很多：例如在 Amazon^{[1][2]}和 Alibaba^[3]的自动履行仓库中监视移动地面机器人；预防碰撞应用^[4]，用于道路上的车辆^[5]；以及使用无人机^[6]和使用接地机器人^[7]的多机器人形成的路径规划，定位和运动控制。随机访问网络，特别是 WiFi 网络是一个有吸引力的选择，因为其低成本，性能良好，并且可以立即为无人机，计算平台和传感器等服务。此外，正如这些各种企业所展示的那样，小规模的低成本的随机访问网络能够支持时间敏感的应用程序。

随机访问网络的两个主要缺点是可伸缩性和拥塞。特别是，随着网络工作或拥塞水平的增加，网络变得过载，新鲜度急剧下降，从而导致目的地过时的信息，从而导致系统故障和安全风险。在本文中，我们在 Slotted-ALOHA 和 CSMA 网络以及有限数量的来源中生成随机数据包限制下优化信息新鲜度。

关于 Slotted-ALOHA 和 CSMA 网络的分析和优化的文献非常广泛，可追溯到近五十年^[8]。有关 CSMA 网络的吞吐量和延迟优化的调查^[9]。信息新鲜度（AoI）是最近提出的^[10]的性能指标，从目的

地的角度捕获了信息的新鲜程度。在包括^[11]在内的许多作品中,已经考虑了根据 AoI 进行集中式多个访问机制的优化。最近在^[12]中考虑了分布式机制,例如 ALOHA 和 CSMA 等分布式机制。在^[13]中考虑了带有随机数据包生成的 Slotted-ALOHA 网络。特别是,^[13]的作者随着源数的数量流向无穷大,分析了 Slotted-ALOHA 网络,并提出了一种机制来动态掉落数据包,以最大程度地减少网络中的平均 AoI。^[14]的作者使用排队理论在无线网络中分析 AoI,其中包括 Bernoulli 数据包到达和几何交换时代,并使用仿真结果来优化在包括 Slotted-ALOHA 在内的三类多个访问机制下的 AoI 性能。

在^{[12][15][16][17]}中考虑了 CSMA 网络。特别是,^[12]的作者使用模拟和实验结果来评估 CSMA 网络中的平均 AoI。^[15]的作者提出了受集中式 Whittle 索引调度策略启发的 CSMA 机制的修改,并使用数值结果评估了 CSMA 网络。^[16]的作者为 CSMA 网络开发了一个离散时间模型,该网络的来源可以按需生成数据包,得出平均 AoI 的表达式,然后使用游戏理论分析 WiFi 和专用的短距离通信的共存 (DSRC) 在吞吐量和 AoI 方面。^[17]的作者开发了一个连续的时间模型,用于无碰撞的 CSMA 网络具有随机数据包生成,派生了平均 AoI 的表达式,然后使用此表达式找到最佳的后退速率。请注意,^[17]不考虑数据包碰撞的影响,如我们在本文中所见,在随机访问网络的 AoI 优化中起着重要作用。

在本文中,提出了一种分析并优化随机数据包生成的随机访问网络中的平均 AoI 的框架。特别地,开发了一个离散的时间网络模型,该模型解释了数据包碰撞的效果,并得出网络中平均 AoI 的准确近似值,并与理论框架相比较验证了理论正确性。然后便可使用分析模型来优化 AoI 的随机访问机制,该方法使我们能够评估数据包生成率,传输概率和网络大小对 AoI 性能的综合影响。

2 相关工作

本节的部分安排如下。首先我们提出本次实验的系统模型,之后我们得出互递间隔,数据包延迟和 AoI 的表达式,其次我们根据 AoI 优化随机访问网络,最后我们在 CSMA 和 Slotted-ALOHA 的限制下验证理论框架的实验正确性并讨论实验结果。

2.1 系统模型

队列规则为,数据源在其传输队列中仅保留最近生成的数据包,即最新鲜的数据包。当数据源 i 在最小时间片 k 的开头生成一个新数据包时,旧数据包便从其传输队列中被丢弃。已知该队列规则可以在各种情况下优化 AoI^[18]。需要注意的是,交付最近生成的数据包为基站 BS 提供了最新鲜的信息,但此外,当包含较旧信息的数据包在包含新鲜信息的数据包后传递时,BS 的信息新鲜度不会受到影响。

随机接入机制。当在某个时间槽中有传输机会,并且数据源 i 有一个未递送的数据包时,源 i 开始以概率 μ_i 开始传输,而差异为 $1 - \mu_i$ 。时间槽 δ 被设置为在任何源检测到来自其他来源的传输所需的时间,因此,如果源 i 是时间槽 k 在开始时唯一发送信息的,则所有其他数据源只能在时间槽 $k + 1$ 的开始时检测到传输并将新的传输推迟到源 i 停止传输。结果是,如果源 i 是开始在时间槽 k 中传输的唯一数据源,则此传输成功。否则,如果两个或更多数据源开始在相同的时间槽传输,则会发生数据包碰撞,BS 将无法接收这些数据包。碰撞后,消息来源继续使用随机访问来重新启动其未交付的数据包,碰撞或成功的数据包传输的持续时间是 L 个时间分槽,如图 1 所示:

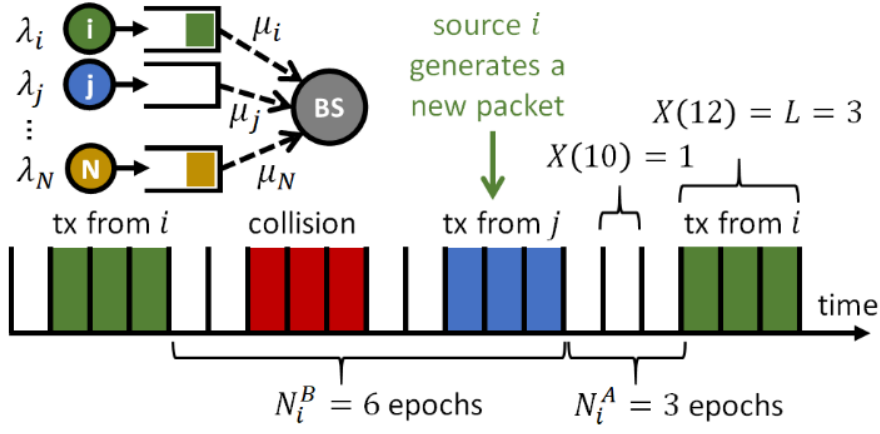


图 1: 随机访问网络和关联的时间表以及数据包生成图

2.2 关于信息新鲜度的分析

考虑图 2 中的交换间隔，并假设数据包在到达时是被标明了时间戳的。那么显然，数据包的时间戳记录的数据越大，该数据包中包含的信息就更加新鲜。令 $\tau_i(k)$ 为时间片 k 开头时的 BS 收到的最新鲜数据包的时间戳记。然后，AoI 定义为 $\Delta i(k) := k - \tau_i(k)$ 。AoI 从 BS 的角度立场捕获了信息的新鲜程度。 $\Delta i(k)$ 的值随着时间的推移线性增加，而如果未收到数据包，代表 BS 的信息将变得越来越不新鲜。

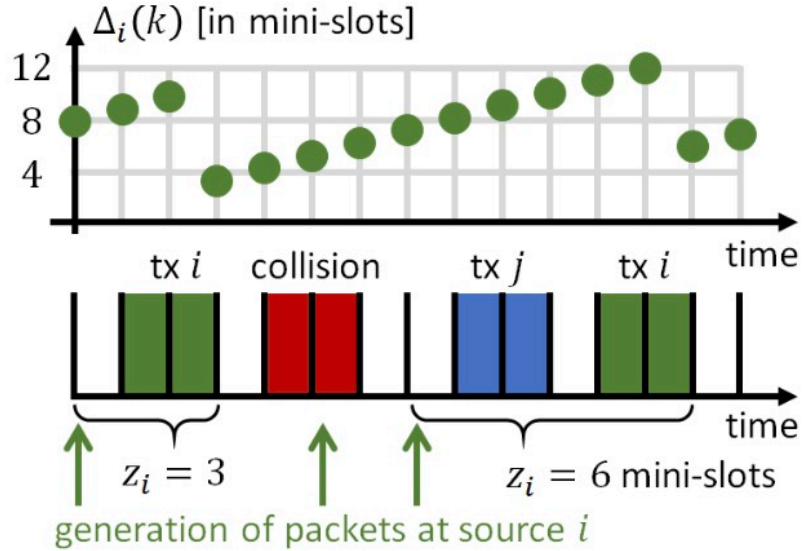


图 2: 随机访问网络和关联的时间表以及数据包生成图

在时间片最开始时，紧接着一个来自数据源 i 的信息传递， $\tau_i(k)$ 的值被更新为这个新的数据包的时间戳，同时 AoI 被减少至这个新数据包的时延，记作： $\Delta i(k) = z_i = k - \tau_i(k)$ 。其中 z_i 是与从源 i 传递的最新鲜数据包相关的延迟，AoI 的演变及其与数据包延迟的关系如图 2 所示。为了得到整个网络中的信息新鲜度，我们将无限范围中的预期网络 AoI ($NAoI$) 定义为以下式子，并可根据之后的实验判断各个变量的影响从而进行优化。

2.3 数据结果

在本节中，我们考虑具有 $N = 10$ 个源的对称随机访问网络，数据包生成概率 $\lambda_i = \lambda$ ， $\forall i$ 和条件传输概率 $\mu_i = \mu$ ， $\forall i$ ，在四种不同的设置中： $L = 1$ 和两个 $\lambda \in \{0.05, 0.5\}$ 的值； $L = 50$ 和两个值为 $\lambda \in \{0.05, 0.5\}$ 的 CSMA 网络。

3 本文方法

3.1 本文复现内容概述

在本章中我们介绍模拟第一章中描述的随机访问网络，并将模拟结果与理论分析中的传输概率 q 以及网络平均 AoI 的分析表达式进行比较。在图 3、4、5和 6中，我们模拟了具有增加条件传输概率 $\mu \in (0, 1]$ 的网络。在图 3和 4中，我们模拟了带有数据包传输持续时间 $L = 1 \text{ mini-slot}$ 的 Slotted-ALOHA 网络，在图 5和 6中，我们模拟了 $L = 50$ 的 CSMA 网络。在图 3和 5中，我们绘制了网络 AoI ，在图 4和 6中，我们绘制了传输概率 q ，模拟具有 $k = 20 \times 10^6$ 个时间片的时间范围，每个时间片均具有归一化持续时间 $\delta = 1$ ，从而与分析结果进行比较。

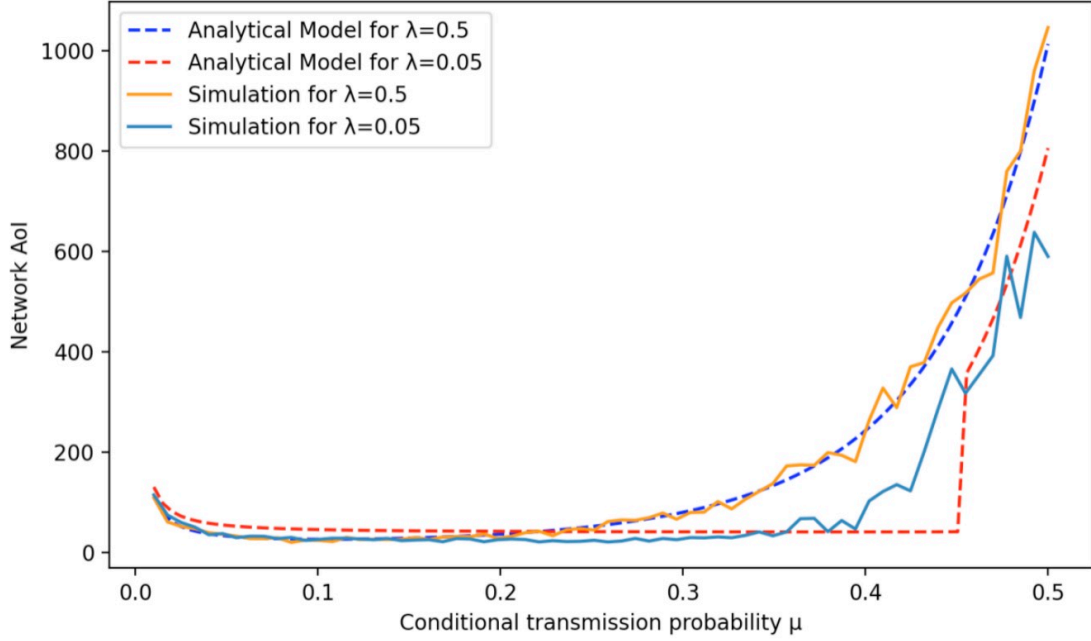


图 3: $L = 1$ 的对称 Slotted-ALOHA 网络仿真数据

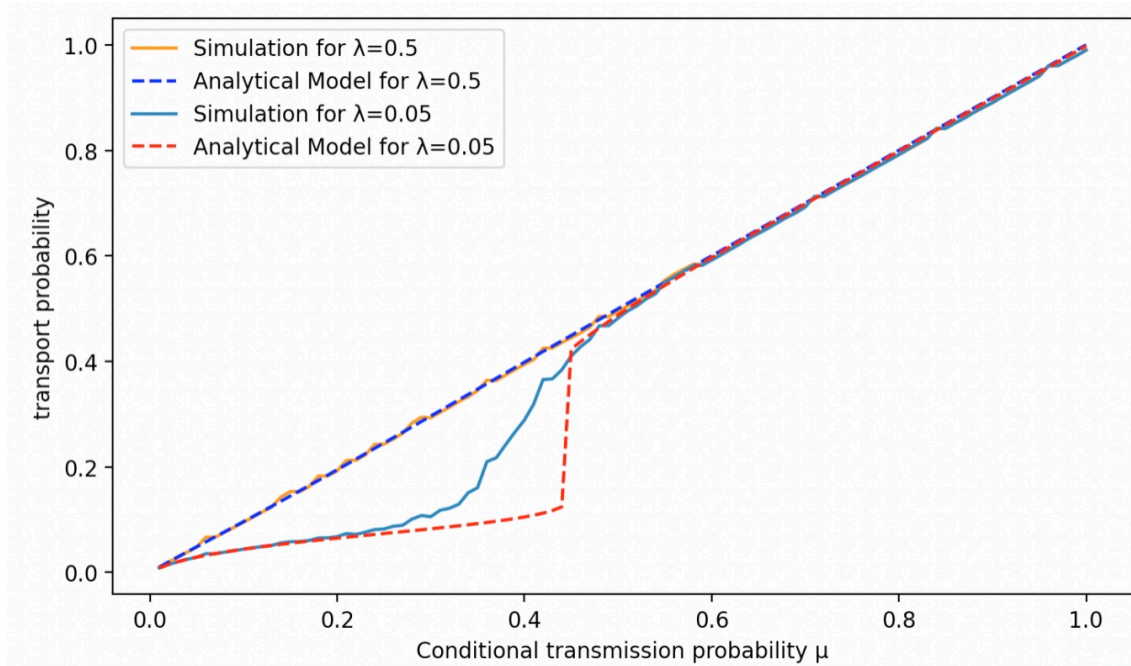


图 4: $L = 1$ 的对称 Slotted-ALOHA 网络仿真数据

3.2 本文方法

本文模拟实验部分是分别在 Slotted-ALOHA 和 CSMA 的限制下对数据传输率以及网络平均 AoI 的变化进行模拟，主要由 python 模拟实现，平台为 PyCharm。

4 复现细节

4.1 与已有开源代码对比

本次复现并没有参考任何相关源代码，由于本文内容较新，来自于 2021 年的 INFOCOM，相关内容都比较少。包括对于文章中的网络算法细节作者都没有进行介绍，复现时很多情况下都需要根据原文的结果来猜测一些算法细节，本文一共有 20 个数据结果的实现，包含在 5 个图中。

实验部分伪代码如下, 仅展示一个为例

Procedure 1 Simulation of symmetric Slotted-ALOHA networks with $L = 1$.

Input: packet generation probabilities λ

Output: Transmission probability q

```
for  $j$  in  $\mu$  do
    count = 0
    transwait = []
    transd = 0
    for time in TSLOTS do
        for  $i$  in  $N$  do
            |
            ▷ 各个数据源如果没有要传输的数据队列，则按照概率  $\lambda$  生成数据包
        end
        for  $i$  in transwait do
            |
            ▷ 有概率发送的数据，按照概率  $j$  发送
            if 有概率发送 then
                transmitted.append(1)
                 $k = k + 1$ 
                transd = transd + 1
            end
            else
                | transmitted.append(0)
            end
        end
        if  $k > 0$  then
            | count = count + 1
            ▷ 代表该结点发送成功，可重新产生新数据
        end
    end
    计算该轮 transmission probability  $tp$ 
    success.append(tp)
end
return success
```

5 实验结果分析

从图 3、4、5 和 6 可以看出，很明显，在文章之前部分推断出的 q 和 $NAoI$ 的分析表达式非常接近模拟网络配置的结果，包括数据包传输持续时间 $L \in \{1, 50\}$ 的低和高值，也符合较低和较高情况下的数据包生成概率 $\lambda \in \{0.05, 0.5\}$ 和条件传输概率 μ 在间隔 $(0, 1]$ 的情况。通过比较图 3 和 5，我们可

以观察到，有较大的数据包传输持续时间 L 的网络对数据包生成概率 λ 的变化不太敏感。回想一下， λ 直接影响数字传输队列为空 N_i^B 和数据包延迟 z_i 时期的 $epoch$ 数量。较大的 L 显著降低了 N_i^B 并增加了传输间隔 I_i ，从而降低了 N_i^B 和 z_i 对 NAOI 性能的影响从而降低对 λ 的变化敏感度。

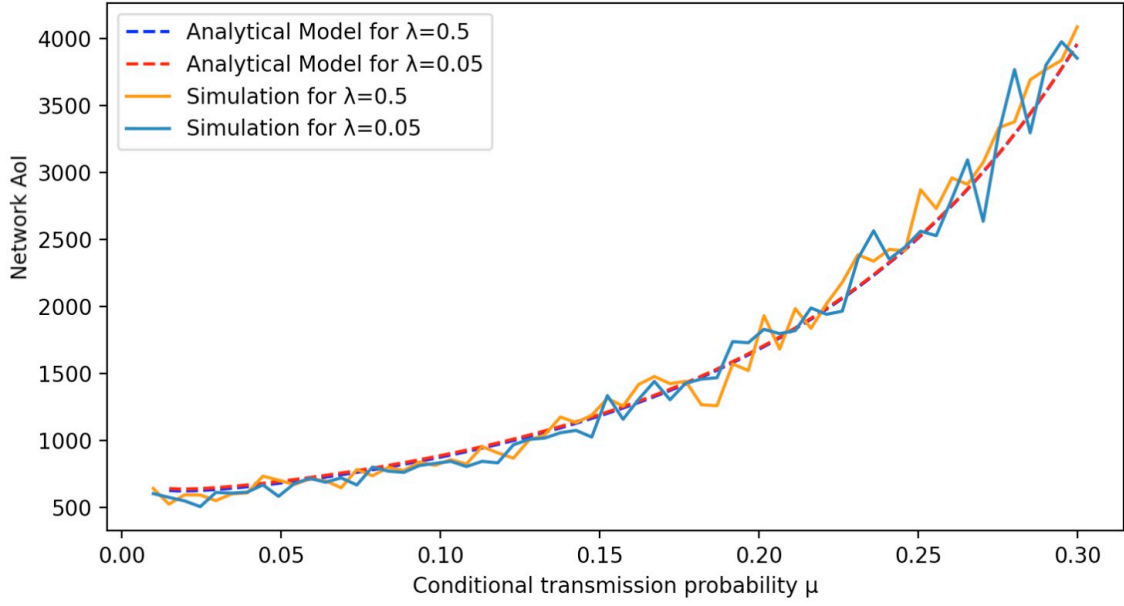


图 5: $L = 50$ 的对称 CSMA 网络的模拟数据结果

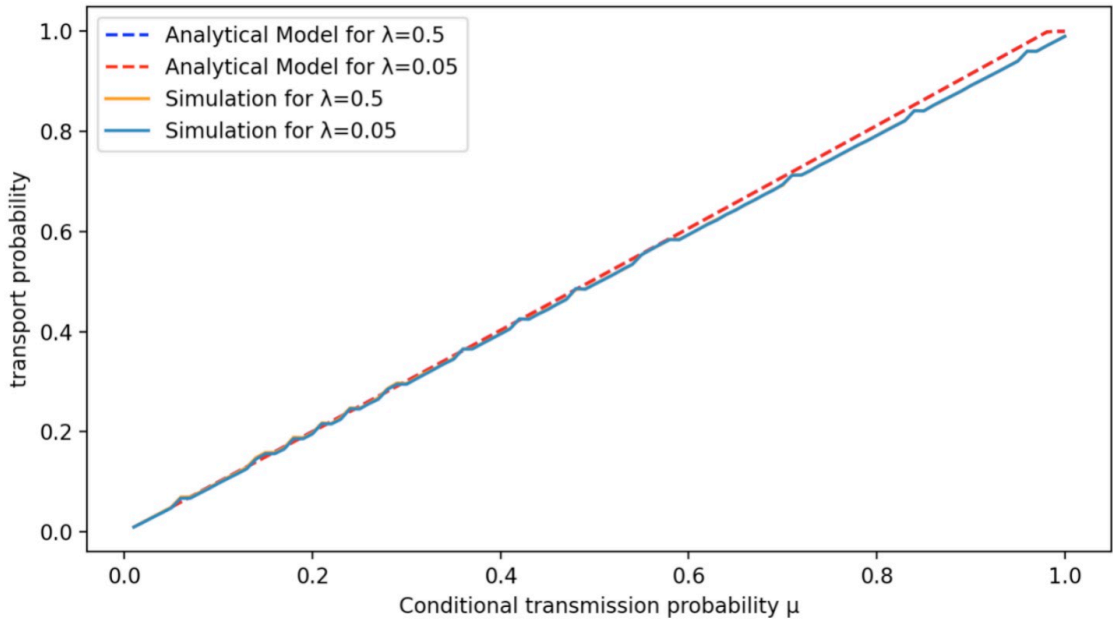


图 6: $L = 50$ 的对称 CSMA 网络的模拟数据结果

图 3 和图 5 还表明：1) 亚最佳点 μ 会严重降低净工作的 NAOI 性能；2) 最小 NAOI 的点在不同的网络设置中发生了显著变化。这两种观察都强调了解决随机访问网络中优化 NAOI 的重要点。图 4 和 6 显示，对于高 L 和/或高 λ ，传输概率 q 与条件传输概率 μ 相当，即 $q \approx \mu$ 。相反，当 λ 较低时， q 和 μ 之间的关系迭代函数 $q = g(q, \mu, \lambda)$ 的控制。注意，当 $\lambda = 0.05$ 时，图 4 中显示了 $\mu = 0.4$ 时的不连续性。相反，对于具有 $L = 50$ 的网络，此不连续性出现在 $\lambda \leq 0.002$ 中。图 7 显示了 $\lambda \in \{0.0013, 0.0019\}$ 的不连续性，正如文章讨论的那样，这种不连续性在 NAOI 的优化中起着重要作用。

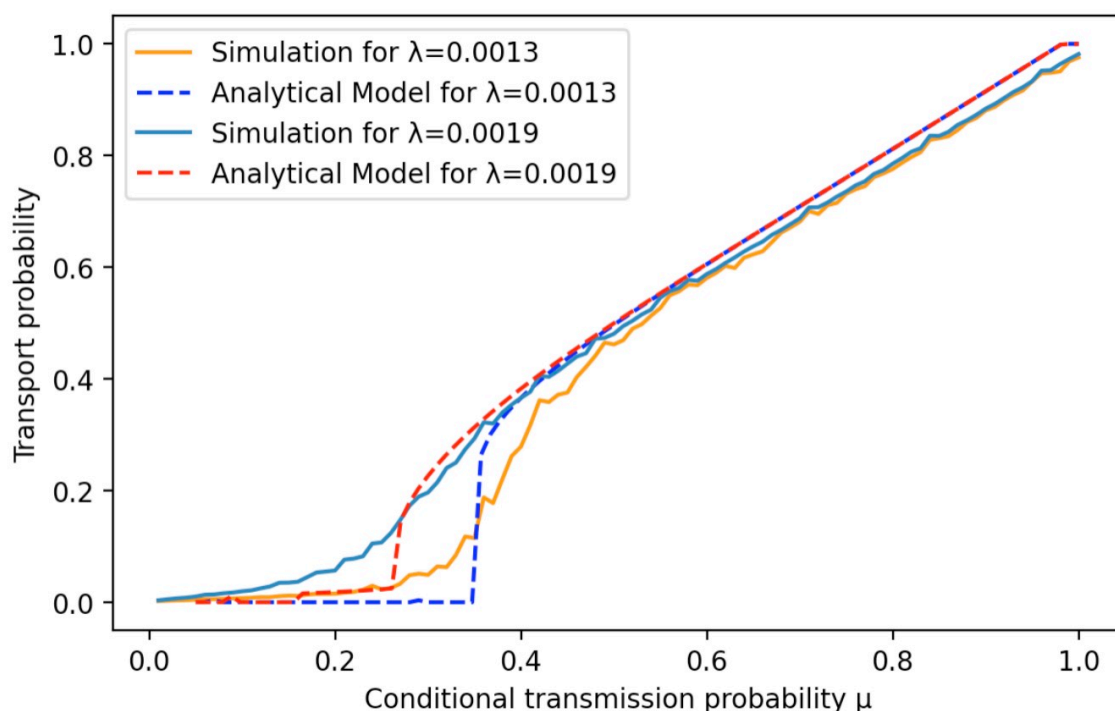


图 7: $L = 50$ 的对称 CSMA 网络的模拟数据结果

6 总结与展望

在本文中，我们研究了采用随机访问机制的网络中的 AoI。在文章中我们考虑了一个无线网络，该网络具有许多结点按照 Bernoulli 过程生成数据包，并采用 Slotted-ALOHA 或 CSMA 将这些数据包传输到一个基站 (BS)。文章中提出了一个框架，用以分析和优化无线网络中的平均 AoI。特别地，在文章中我们开发了一个离散的时间模型和派生的表达式，包含：时间平均传输概率，互向间隔的下限，数据包延迟上的上限以及在网络中平均 AoI 的（准确）近似值，然后，我们使用分析表达式来优化 AoI 的随机访问机制。此外，文章在软件定义的无线电测试台中实现了优化的 CSMA 网络，并将 AoI 测量结果与分析数值结果进行了比较，以验证我们的框架，表明分析结果准确地符合模拟和实验结果。我们的方法使我们能够评估数据包生成率，传输概率和网络大小对 AoI 性能的综合影响。

参考文献

- [1] WURMAN P R, D'ANDREA R, MOUNTZ M. Coordinating hundreds of cooperative, autonomous vehicles in warehouses[J]. AI magazine, 2008, 29(1): 9-9.
- [2] VALERIO P. Amazon robotics: IoT in the warehouse[J]. InformationWeek, 2015, 28.
- [3] PICKERING J. Take a look inside Alibaba's smart warehouse where robots do 70% of the work[J]. online: <https://www.businessinsider.com/inside-alibaba-smart-warehouse-robots-70-per-cent-work-technologylogistics-2017-9>, 2017.
- [4] KENNEY J B. Dedicated short-range communications (DSRC) standards in the United States[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(7): 1162-1182.
- [5] BLOESSL B, SEGATA M, SOMMER C, et al. Performance assessment of IEEE 802.11 p with an open source SDR-based prototype[J]. IEEE transactions on mobile computing, 2017, 17(5): 1162-1175.

- [6] ACKERMAN E. This autonomous quadrotor swarm doesn' t need GPS[J]. IEEE Spectrum, 2017.
- [7] URCOLA P, LÁZARO M T, CASTELLANOS J A, et al. Cooperative minimum expected length planning for robot formations in stochastic maps[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2017, 87: 38-50.
- [8] ABRAMSON N. The ALOHA system: Another alternative for computer communications[C]// Proceedings of the November 17-19, 1970, fall joint computer conference. 1970: 281-285.
- [9] YUN S Y, YI Y, SHIN J, et al. Optimal csma: A survey[C]//2012 IEEE international conference on communication systems (ICCS). 2012: 199-204.
- [10] KAUL S, YATES R, GRUTESER M. Real-time status: How often should one update?[C]//2012 Proceedings IEEE INFOCOM. 2012: 2731-2735.
- [11] HE Q, YUAN D, EPHREMIDES A. Optimizing freshness of information: On minimum age link scheduling in wireless systems[C]//2016 14th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOpt). 2016: 1-8.
- [12] KAUL S, GRUTESER M, RAI V, et al. Minimizing age of information in vehicular networks[C]//2011 8th Annual IEEE communications society conference on sensor, mesh and ad hoc communications and networks. 2011: 350-358.
- [13] CHEN X, GATSIS K, HASSANI H, et al. Age of information in random access channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2022, 68(10): 6548-6568.
- [14] KOSTA A, PAPPAS N, EPHREMIDES A, et al. Age of information performance of multiaccess strategies with packet management[J]. Journal of Communications and Networks, 2019, 21(3): 244-255.
- [15] JIANG Z, KRISHNAMACHARI B, ZHOU S, et al. Can decentralized status update achieve universally near-optimal age-of-information in wireless multiaccess channels?[C]//2018 30th International Teletraffic Congress (ITC 30): vol. 1. 2018: 144-152.
- [16] GOPAL S, KAUL S K. A game theoretic approach to DSRC and WiFi coexistence[C]//IEEE INFOCOM 2018-IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). 2018: 565-570.
- [17] MAATOUK A, ASSAAD M, EPHREMIDES A. On the age of information in a CSMA environment[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2020, 28(2): 818-831.
- [18] COSTA M, CODREANU M, EPHREMIDES A. On the age of information in status update systems with packet management[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2016, 62(4): 1897-1910.