

面向信息年龄的车辆状态更新网络采样与功率控制

曾健华¹, 郭重涛¹, 郭成²

(1. 深圳大学电子与信息工程学院, 广东 深圳 518060; 2. 鹏城实验室, 广东 深圳 518055)

摘要: 针对基于广播通信的车辆状态更新网络, 采用最小时间戳优先的 D/Geo/1/1 排队系统模型传输数据包, 利用排队论分析了接收端的信息年龄 (AoI, age-of-information) 中断概率和发送端的平均发送功率, 根据 AoI 中断概率随数据包采样速率和发送功率变化的单调性, 提出了基于迭代的采样速率和发送功率联合优化算法, 通过采样与功率控制在功率受限的条件下最小化所有接收端中的最大 AoI 中断概率, 实现了接收端信息新鲜度的公平提升。仿真结果验证了理论分析的准确性和算法的高效性。

关键词: 车辆状态更新网络; 广播通信; 信息年龄中断概率; 功率控制

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2024.00376

Age of information-oriented sampling and power control in vehicular status update networks

ZENG Jianhua¹, GUO Chongtao¹, GUO Cheng²

1. College of Electronics and Information Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China

2. Peng Cheng Laboratory, Shenzhen 518055, China

Abstract: In a vehicular status update network based on broadcast communication, a D/Geo/1/1 queuing mechanism with minimum timestamp priority was adopted to transmit data packets. The queuing theory was used to analyze the age-of-information (AoI) outage probability of the receivers and the average transmit power of the transmitter. Based on the monotonicity of the AoI outage probability with respect to packet sampling rate and transmit power, an iterative algorithm for jointly optimizing sampling rate and transmit power was proposed to minimize the maximum AoI outage probability of all receivers under power constraint, which fairly improved information freshness of all receivers under sampling and power control. Simulation results verify the accuracy of theoretical analysis and the efficiency of the algorithm.

Key words: vehicular status update network, broadcast communication, age-of-information outage probability, power control

0 引言

车联网技术是未来智能交通系统中的关键技术之一^[1], 其中的车路协同技术能够通过 V2X (vehicle

to everything) 通信方式将自动驾驶车辆感知到的周围环境状态信息进行车辆与车辆之间的交互共享, 从而达到高效利用系统资源、提升行车安全性、缓解交通拥堵等目的^[2-3]。自动驾驶对车辆所收到的周

收稿日期: 2023-09-08; 修回日期: 2023-10-24

通信作者: 郭重涛, ctguo@szu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 62101339); 深圳市自然科学基金项目 (No. JCYJ20190808114213987); 鹏城实验室宽带通信研究部重大关键项目 (No. PCL2023AS1-1)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No. 62101339), The Natural Science Foundation of Shenzhen (No. JCYJ20190808114213987), The Major Key Project of Peng Cheng Laboratory Department of Broadband Communication (No. PCL2023AS1-1)

围环境状态信息有着很高的时效性要求^[4],且运行中的车辆需要通过它收到的最新实时状态信息进行精准的控制^[5]。在一个车辆状态更新网络中,车辆行驶过程中的状态信息能否及时准确地传达给周围车辆十分重要^[6]。为了衡量发送端发出的状态信息能否及时传达至接收端,美国罗格斯大学的 Kaul 等^[7]在 2011 年正式提出了信息年龄 (AoI, age-of-information) 的概念,它用来表示接收端所收到的最新状态信息从产生时刻到当前时刻所经历的时间。

通常,接收端重点关注发送端当前时刻的状态,而接收端所收到的最新状态信息能够在一定程度上反映发送端当前时刻的状态。因此,在实际应用中主要研究的是接收端所收到的最新状态信息的信息年龄。接收端在不断收到最新状态信息的过程中,其获知的关于发送端的状态信息也会不断地更新,这一过程称为接收端的状态更新过程^[8]。在状态更新过程中,随着接收端最新状态信息的更新,其信息年龄也会随之更新而减小,之后信息年龄会随时间增加,直到下一次更新时再次减小。因此,信息年龄变化过程是一个复杂的随机过程。

为了提高车联网的通信系统性能,目前已有多种算法用于降低网络中环境状态信息的 AoI^[9-12]。在广播通信网络中,文献[13]考虑了单个基站向多个用户传输信息的应用场景,研究了基站在单播轮询传输机制下和广播传输机制下系统平均信息年龄的表现,指出了在大部分情况下,广播的信息传输机制更适合单个发送端多个接收端的系统。文献[14]则用了马尔可夫决策过程来降低车辆状态更新网络系统的 AoI。在车联网中,车辆的高速移动使得运算速度更快和计算更准确的算法显得相对重要。这类算法通常需要对信息年龄的变化过程进行一个具体的数学分析,例如,文献[15]是先得到通信网络中峰值 AoI (PAoI, peak AoI) 的表达式,然后在系统总功率消耗的约束下优化系统中的数据包采样速率和发送功率,从而使得网络中总的峰值 AoI 达到最小;文献[16]同样是先通过推导得到峰值 AoI 的表达式,再设计低复杂度的算法优化发送端的数据包采样速率,进而使得整个网络中的峰值 AoI 达到最小。

对 AoI 的变化过程进行数学分析需要用到许多方法。传统的方法主要是基于排队论的内容进行分析和计算^[17-19],如针对一个先到先服务 M/M/1 排队系统模型进行分析,结合排队论中系统时间的表达式,

可以得出平均 AoI 的表达式^[20]。较为新颖的方法是通过变换域的方法来对 AoI 进行分析。如 2019 年 Inoue 等^[21]在总结前人研究的基础上首先用拉氏变换得到了先到先服务 M/G/1、先到先服务 G/M/1 等一些排队系统模型下平均 AoI 的通用表达式;2020 年 Kosta 等^[22]利用 z 变换理论分析 AoI 中断概率得到其 z 变换表达式,从而通过逆变换得到 AoI 中断概率的时域表达式。此外,由 AoI 中断概率还可以得到平均 AoI,因此 AoI 中断概率的研究具有重要的意义。

在车联网中采用不同的数据包采样策略和传输策略对 AoI 的影响不同^[11-12, 23-27]。文献[12]和文献[27]都采用的是每间隔 D 采样一个数据包的数据包采样策略和数据包先到先服务的传输策略。由于从文献[28-29]中可以看出优先传输新数据包的数据包传输策略有助于 AoI 的进一步降低,这激发了本文对文献[12]中的排队系统模型作进一步的改进。文献[12]先通过数学推导得到先到先服务 D/Geo/1 排队系统模型下的 AoI 中断概率表达式,然后再设计一个低复杂度的算法去优化发送端的数据包采样速率和发送功率,从而最大化 V2N (vehicle to network) 链路总的遍历容量。文献[27]考虑了数据包批到达的情况,目的是最小化整个系统的发送功率消耗。

本文主要在文献[12]的基础上,将其排队系统模型改进为一种最小时间戳优先的 D/Geo/1/1 排队系统模型从而有效地降低 AoI 中断概率并改善系统的性能。在文献[12]的基础上改进的系统虽能够有效地降低 AoI,但数据包采样速率、发送端发送功率和平均发送功率等通信资源的限制也是影响 AoI 中断概率大小的一个重要因素^[30]。事实上,在发送端平均发送功率有限时,分别存在一个合适的数据包采样速率和发送功率能够使得 AoI 中断概率达到最小,这一点在许多文献中也有相应的体现^[31-33],因此需要对其进行更深入的研究。本文针对一个广播通信系统进行深入研究。广播通信在车联网中具有广泛的应用^[34-36],如城市多跳广播技术,以及支持高效、及时广播机制的车载通信系统 MAC 协议^[37]。由于车辆间的周围环境状态信息可以通过广播方式在车辆间进行传播,且这些状态信息的新鲜度对车辆的安全至关重要,因此需要对车联网广播通信排队系统模型中的 AoI 进行深入研究。

本文主要工作如下。

1) 本文针对一个基于广播通信的车辆状态更新

网络进行研究,采用最小时间戳优先的D/Geo/1/1排队系统模型,基于排队论进行分析得到该系统中各个接收端AoI中断概率和发送端所需平均发送功率的表达式。

2) 在发送功率和平均发送功率受限条件下优化了发送端数据包采样速率和发送功率,在采样与功率控制下最小化了所有接收端中的最大AoI中断概率。

3) 通过仿真计算验证了所提算法的高效性。

1 系统模型

考虑一个具有 $N + 1$ 辆车的广播通信排队系统模型,基于广播通信的车辆状态更新网络如图1所示,其中车辆 A_0 为发送端,车辆 A_1, A_2, \dots, A_N 为接收端。D2D (device-to-device) 通信是指用户节点之间直接进行通信的一种通信方式,可应用于单播、多播、广播等多种业务,该模型中车辆与车辆之间采用D2D通信。根据第三代合作伙伴计划(3GPP, 3rd Generation Partnership Project)定义的V2X技术^[38],车辆 A_0 以间隔 D 周期性地采样周围环境状态信息,并封装成数据包进行发送。根据5G NR-V2X PC5技术^[39],车辆 A_0 采用广播方式传输数据包。考虑把时间分成许多个时隙,且数据包在每个时隙中只进行一次传输^[12]。车辆 A_0 采用重传机制传输数据包,即在一个时隙中若有一个接收端未收到该数据包,则发送端将在下一个时隙中对该数据包进行重传,直到全部接收端都收到该数据包才停止重传。为了提高接收端所收到信息的新鲜度,考虑将文献[12]中的D/Geo/1排队系统模型改进为最小时间戳优先的D/Geo/1/1排队系统模型,并将改进后的队列模型应用于如图1所示的广播系统以降低AoI。该队列的数据包排队规则如下:在D/Geo/1/1排队系统模型的基础上,允许优先级更高的数据包到达时立即传输;优先级较低的数据包全部丢弃;规定时间戳最小的数据包优先级最高。该系统

中共有 N 条链路,其中发送端 A_0 到接收端 A_j ($0 < j \leq N$)的链路记为链路 j ,且在广播通信中,各链路共用一个频带进行通信。

假设所有信道的大尺度衰落在一个由多个时隙组成的时间段内不变。考虑车辆的高速移动,不同时隙的小尺度衰落可看作独立同分布,并且在一个时隙内保持恒定^[40]。假定系统中发送端在每个时间段可通过反馈信道获取各条通信链路的大尺度分量。车辆的行驶速度各不相同,多径效应和多普勒频移会引起小尺度衰落。假定发送端仅知道它们的分布,且在每个时隙中表现为瑞利衰落^[41]。若分别用 α_j 和 g_j 表示第 j 条链路的大尺度衰落分量和小尺度衰落分量,则第 j 条链路信道功率增益为

$$h_j = \alpha_j g_j \quad (1)$$

其中,假定随机变量 g_j 服从指数分布,且 g_1, g_2, \dots, g_N 独立同分布^[41]。

接收端 A_j 在第 n 个时隙的AoI表示为

$$\Delta_j(n) \triangleq n - u_j(n) \quad (2)$$

其中, $n \in \mathbb{N}^+$, $u_j(n)$ 为接收端 A_j 所收最新数据包的时间戳。AoI中断概率定义为 $\Delta_j(n)$ 大于某一阈值 w_j 的概率 $\Pr\{\Delta_j(n) > w_j\}$ 。发送端在每个时隙最多发送一次数据包,且每次发送所消耗的功率为 P 。每个时隙的平均发送次数为 M ,则发送端平均发送功率为^[27]

$$\bar{P} = PM \quad (3)$$

假设在实际应用中发送端允许的最大发送功率为 P_{\max} ,允许的最大平均发送功率为

$$\bar{P}_{\max} = P_{\max} M \quad (4)$$

对于接收周围环境状态信息的车辆来说,AoI中断概率越大,表明该车辆越不能及时准确地了解周围环境状况,也越容易导致车辆产生误判。从车辆行驶安全的角度来看,AoI中断概率越大的链路越容易产生安全隐患,故希望链路AoI中断概率能取得最小值,上述问题可描述为一个最大最小公平性问题

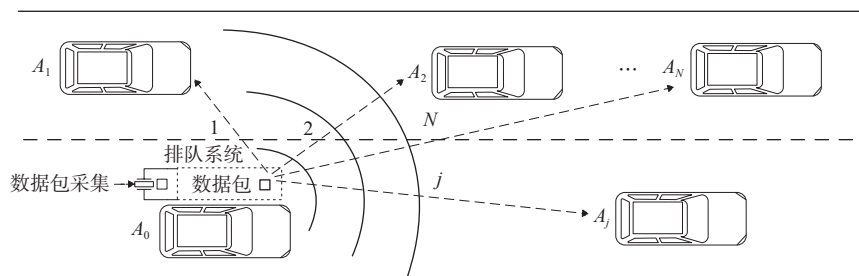


图1 基于广播通信的车辆状态更新网络

知 $D = n_{k,1} - n_{k-1,m_{k-1}}$ ，因此

$$Y_k = n_{k,1} - n_{k-1,m_{k-1}} - (n'_{k-1,m_{k-1}} - n_{k-1,m_{k-1}}) + n'_{k,m_k} - n_{k,1} = D - S_{k-1} + T_k, k \in \mathbf{N}^+ \quad (11)$$

设 L_k 表示时间段 $n'_{k-1,m_{k-1}} \sim n'_{k,m_k}$ 内 $\Delta_j(n)$ 超过 w_j 的时长。在时间区间 $[n'_{k-1,m_{k-1}}, n'_{k,m_k})$ 内， $n'_{k-1,m_{k-1}}$ 时刻 $\Delta_j(n)$ 的取值最小，其最小值为 S_{k-1} ，之后随时间不断递增，在靠近 n'_{k,m_k} 的时候取值最大，最大值为 $D + T_k - 1$ ，若 $S_{k-1} \leq w_j < D + T_k - 1$ ，则经过 $w_j - S_{k-1} + 1$ 时长后 $\Delta(n)$ 将超过 w_j ，因此

$$\begin{aligned} L_k &= Y_k - (w_j - S_{k-1} + 1) = \\ &D - S_{k-1} + T_k - (w_j - S_{k-1} + 1) = \\ &D + T_k - w_j - 1, k \in \mathbf{N}^+ \end{aligned} \quad (12)$$

若 $w_j < S_{k-1}$ ，那么 $\Delta_j(n)$ 在 $n'_{k-1,m_{k-1}}$ 时刻开始就已经超过 w_j ，因此

$$L_k = Y_k = D - S_{k-1} + T_k, k \in \mathbf{N}^+ \quad (13)$$

若 $w_j \geq D + T_k - 1$ ，则 $\Delta_j(n)$ 直到 n'_{k,m_k} 时刻也没有超过 w_j ，因此

$$L_k = 0, k \in \mathbf{N}^+ \quad (14)$$

综合以上3种情形，并考虑当 $w_j = D + T_k - 1$ 时， $L_k = D + T_k - w_j - 1 = 0$ ，可得当 $k \in \mathbf{N}^+$ 时

$$L_k = \begin{cases} D + T_k - w_j - 1, & S_{k-1} \leq w_j \leq D + T_k - 1 \\ D - S_{k-1} + T_k, & w_j < S_{k-1} \\ 0, & w_j > D + T_k - 1 \end{cases} \quad (15)$$

各个数据包被独立发送和接收，因此可知随机变量 S_1, S_2, \dots, S_k 独立同分布。各个时间区间 $[n_{1,1}, n'_{1,m_1}), \dots, [n_{k,1}, n'_{k,m_k})$ 内发送端发送的数据包不同，故 T_1, T_2, \dots, T_k 独立同分布。设 $N(t_0)$ 表示时间段 $0 \sim t_0$ 内 $\Delta_j(n)$ 的更新次数，则

$$\lim_{N(t_0) \rightarrow \infty} \frac{1}{N(t_0)} \sum_{k=1}^{N(t_0)} S_k = \mathbb{E}(S_k), k \in \mathbf{N}^+ \quad (16)$$

$$\lim_{N(t_0) \rightarrow \infty} \frac{1}{N(t_0)} \sum_{k=1}^{N(t_0)} T_k = \mathbb{E}(T_k), k \in \mathbf{N}^+ \quad (17)$$

其中， $\mathbb{E}(S_k)$ 表示 S_k 的数学期望。当 $k \in \mathbf{N}^+$ 时，易知 Y_k, Y_{k+1} 都与 S_k 有关，因此 Y_k 与 Y_{k+1} 不独立。同理 L_k 与 L_{k+1} 也不独立。

定理1 $k \in \mathbf{N}^+$ 时， Y_{k+1} 和 L_{k+1} 满足如下关系

$$\lim_{N(t_0) \rightarrow \infty} \frac{1}{N(t_0)} \sum_{k=1}^{N(t_0)} Y_{k+1} = \mathbb{E}(Y_{k+1}), k \in \mathbf{N}^+ \quad (18)$$

$$\lim_{N(t_0) \rightarrow \infty} \frac{1}{N(t_0)} \sum_{k=1}^{N(t_0)} L_{k+1} = \mathbb{E}(L_{k+1}), k \in \mathbf{N}^+ \quad (19)$$

证明

$$\begin{aligned} \lim_{N(t_0) \rightarrow \infty} \frac{1}{N(t_0)} \sum_{k=1}^{N(t_0)} Y_{k+1} &= \\ \lim_{N(t_0) \rightarrow \infty} \frac{1}{N(t_0)} \sum_{k=1}^{N(t_0)} (D - S_k + T_{k+1}) &= \\ \lim_{N(t_0) \rightarrow \infty} \frac{1}{N(t_0)} \sum_{k=1}^{N(t_0)} D - \lim_{N(t_0) \rightarrow \infty} \frac{1}{N(t_0)} \sum_{k=1}^{N(t_0)} S_k + \\ \lim_{N(t_0) \rightarrow \infty} \frac{1}{N(t_0)} \sum_{k=1}^{N(t_0)} T_{k+1} & \end{aligned} \quad (20)$$

由式(16)和式(17)可得

$$\begin{aligned} \lim_{N(t_0) \rightarrow \infty} \frac{1}{N(t_0)} \sum_{k=1}^{N(t_0)} Y_{k+1} &= \\ D - \mathbb{E}(S_k) + \mathbb{E}(T_{k+1}) &= \mathbb{E}(Y_{k+1}), k \in \mathbf{N}^+ \end{aligned} \quad (21)$$

由式(15)知 L_k 关于 S_{k-1} 和 T_k 为线性函数，因此用类似的方法同样可以证明式(19)成立。证毕。

仅当 $t_0 \rightarrow \infty$ 时， $N(t_0) \rightarrow \infty$ ，由定理1可得

$$\begin{aligned} \Pr \{ \Delta_j(n) > w_j \} &= \lim_{t_0 \rightarrow \infty} \frac{1}{t_0} \sum_{k=1}^{N(t_0)} L_k = \\ \lim_{N(t_0) \rightarrow \infty} \frac{N(t_0)}{\sum_{k=1}^{N(t_0)} Y_{k+1} + Y_1} \frac{\sum_{k=1}^{N(t_0)} L_{k+1} + L_1}{N(t_0)} &= \\ \frac{\mathbb{E}[L_{k+1}]}{\mathbb{E}[Y_{k+1}]}, k \in \mathbf{N}^+ & \end{aligned} \quad (22)$$

定理2 AoI 中断概率 $\Pr \{ \Delta_j(n) > w_j \}$ 。

$\Pr \{ \Delta_j(n) > w_j \} =$

$$\begin{cases} \frac{1}{D} \left[D - w_j - 1 + 2\mu_j^{w_j-1} + \frac{1 - \mu_j^{w_j-1}}{1 - \mu_j} \right], & 1 \leq w_j < D \\ \frac{(1 - \mu_j^D) \mu_j^{w_j-D+1}}{D(1 - \mu_j)}, & w_j \geq D \end{cases} \quad (23)$$

证明 易知 T_{k+1} 与 S_k 独立，因此当 $k \in \mathbf{N}^+$ 时， T_{k+1} 与 S_k 的联合分布为

$$\begin{aligned} \Pr \{ T_{k+1} = t, S_k = s \} &= \\ \Pr \{ T_{k+1} = t \} \Pr \{ S_k = s \} &= \\ \frac{(1 - \mu_j) \mu_j^{s-1}}{1 - \mu_j^D} (1 - \mu_j) \mu_j^{t-1} & \end{aligned} \quad (24)$$

其中， $t = 1, 2, \dots, \infty$ ， $s = 1, 2, \dots, D$ 。由式(9)和式(10)得

$$\mathbb{E}[Y_{k+1}] = D - \mathbb{E}[S_k] + \mathbb{E}[T_{k+1}] = \frac{D}{1 - \mu_j^D}, k \in \mathbf{N}^+ \quad (25)$$

因为 $1 \leq S_k \leq D$ ，因此当 $w_j \geq D$ 且 $k \in \mathbf{N}^+$ 时，

$$\mathbb{E}[L_{k+1}] = \sum_{s=1}^D \sum_{t=w_j-D+1}^{\infty} (D+t-w_j-1) \Pr \{T_{k+1}=t, S_k=s\} = \frac{\mu_j^{w_j-D+1}}{1-\mu_j} \quad (26)$$

当 $1 \leq w_j < D$ 且 $k \in \mathbf{N}^+$ 时,

$$\mathbb{E}[L_{k+1}] = \sum_{s=1}^{w_j} \sum_{t=w_j-D+1}^{\infty} (D+t-w_j-1) \Pr \{T_{k+1}=t, S_k=s\} + \sum_{s=w_j+1}^D \sum_{t=1}^{\infty} (D-s+t) \Pr \{T_{k+1}=t, S_k=s\} = \frac{D-w_j-1+2\mu_j^{w_j-1}}{1-\mu_j^D} + \frac{1-\mu_j^{w_j-1}}{(1-\mu_j^D)(1-\mu_j)} \quad (27)$$

将式(27)、式(26)、式(25)代入式(22)得式(23)。

证毕。

2.2 平均发送功率

平均发送功率等于平均发送次数 M 与发送功率 P 的乘积。当所有接收端都收到最新数据包时发送端将停止发送。设发送端第 r 次停止发送数据包的时刻为 l_{r,x_r} 。 x_1 表示发送端在 l_{1,x_1} 与原点的时间间隔内产生的数据包个数, 同时发送端在该时间间隔内的 $l_{1,1}, l_{1,2}, \dots, l_{1,x_1}$ 时刻产生了数据包。当 $r > 1$ 时, x_r 表示发送端在 l_{r,x_r} 与 $l_{r-1,x_{r-1}}$ 的时间间隔内产生的数据包个数, 同时发送端在该时间间隔内的 $l_{r,1}, l_{r,2}, \dots, l_{r,x_r}$ 时刻产生了数据包。当 $r \in \mathbf{N}^+$ 时, $l_{r,1}, l_{r,2}, \dots, l_{r,x_r}$ 的大小满足 $l_{r,1} < l_{r,2} < \dots < l_{r,x_r}$, 同时发送端在 $l_{1,x_1}, l_{2,x_2}, \dots, l_{r,x_r}$ 时刻产生的数据包在 $l_{1,x_1}, l_{2,x_2}, \dots, l_{r,x_r}$ 时刻被全部接收端接收。

令 $Q_r = l_{r,x_r} - l_{r,x_r}$, 设 v_r 为不大于 x_r 的任意一个正整数。在随机事件 $\{x_r = v_r\}$ 发生的条件下, 发送端在 l_{r,v_r} 时刻产生的数据包被全部接收端接收所需要的时间为 Q_r 。 Q_r 的可能取值为 $1, 2, \dots, D$ 。设随机变量 $C_k = \max_{j=1, \dots, N} \{\hat{S}_k(j)\}$, 当 $k \in \mathbf{N}^+$ 时, Q_r 概率质量函数为

$$\Pr \{Q_r = q\} = \Pr \{C_k = q | 0 < C_k \leq D\}, k \in \mathbf{N}^+, r \in \mathbf{N}^+ \quad (28)$$

令 $Z_r = l_{r,1} - l_{r-1,1}$, 定义 $l_{0,1} = 0$ 。易知在时间区间 $[l_{r-1,1}, l_{r,1})$ 内, 发送端产生了 Z_r/D 个数据包, 且只有最后一个产生的数据包被全部接收端成功接收。数据包被全部接收端成功接收的概率为

$$P_A = \prod_{j=1}^N \Pr \{1 \leq \hat{S}_k(j) \leq D\} = \prod_{j=1}^N (1 - \mu_j^D) \quad (29)$$

Z_r 的可能取值为 $1, 2, \dots, D$, 其概率质量函数为

$$\Pr \{Z_r = mD\} = P_A (1 - P_A)^{m-1}, m \in \mathbf{N}^+, r \in \mathbf{N}^+ \quad (30)$$

从 $l_{r,1}$ 到 l_{r,x_r} 的这段时间, 每个时隙发送端都在发送数据包。从 l_{r,x_r} 到 $l_{r+1,1}$ 的这段时间, 每个时隙发送端都未发送数据包。设时间段 $0 \sim R_0$ 内发送端停止发送数据包的次数为 $N(R_0)$ 。发送端在各时间区间 $[l_{0,1}, l_{1,1}), \dots, [l_{r-1,1}, l_{r,1})$ 发送的数据包不同, 因此 Z_1, \dots, Z_r 独立同分布。

定理3 发送端平均发送次数 M 的表达式为

$$M = 1 - \frac{\sum_{q=1}^D \prod_{j=1}^N (1 - \mu_j^q - 1)}{D}, r \in \mathbf{N}^+ \quad (31)$$

证明 仅当 $R_0 \rightarrow \infty$ 时, $N(R_0) \rightarrow \infty$, 因此

$$M = \lim_{R_0 \rightarrow \infty} \frac{1}{R_0} \sum_{r=1}^{N(R_0)} (l_{r,x_r} - l_{r,1}) = \lim_{N(R_0) \rightarrow \infty} \frac{N(R_0)}{N(R_0)} \frac{\sum_{r=1}^{N(R_0)} (l_{r,x_r} - l_{r,1})}{\sum_{r=1}^{N(R_0)} (l_{r+1,1} - l_{r,1})} \quad (32)$$

易知

$$l_{r,x_r} - l_{r,1} = l_{r+1,1} - l_{r,1} - (l_{r+1,1} - l_{r,x_r}) + l_{r,x_r} - l_{r,x_r} = Z_{r+1} - D + Q_r, r \in \mathbf{N}^+ \quad (33)$$

Z_1, \dots, Z_r 独立同分布, 故

$$\lim_{N(R_0) \rightarrow \infty} \frac{N(R_0)}{\sum_{r=1}^{N(R_0)} (l_{r+1,1} - l_{r,1})} = \frac{1}{\mathbb{E}[Z_r]}, r \in \mathbf{N}^+ \quad (34)$$

Q_1, \dots, Q_r 独立同分布, 由式(33)可知

$$\lim_{N(R_0) \rightarrow \infty} \frac{\sum_{r=1}^{N(R_0)} (l_{r,x_r} - l_{r,1})}{N(R_0)} = \lim_{N(R_0) \rightarrow \infty} \frac{\sum_{r=1}^{N(R_0)} Z_{r+1} - D + Q_r}{N(R_0)} = \mathbb{E}[Z_{r+1}] + \mathbb{E}[Q_r] - D, r \in \mathbf{N}^+ \quad (35)$$

由 Z_{r+1} 的概率质量函数知

$$\mathbb{E}[Z_{r+1}] = \sum_{m=1}^{\infty} mD \Pr \{Z_r = mD\} = \frac{D}{\prod_{j=1}^N (1 - \mu_j^D)}, r \in \mathbf{N}^+ \quad (36)$$

当 $q = 1$ 时,

$$\Pr \{Q_r = 1\} = \Pr \{Q_r \leq 1\} = \prod_{j=1}^N \frac{1 - \mu_j}{1 - \mu_j^D}, r \in \mathbf{N}^+ \quad (37)$$

当 $1 < q \leq D$ 时,

$$\begin{aligned} & \Pr \{Q_r \leq q\} = \\ & \Pr \{C_k \leq q | 0 < C_k \leq D\} = \\ & \frac{\Pr \{C_k \leq q, 0 < C_k \leq D\}}{\Pr \{0 < C_k \leq D\}} = \\ & \frac{\Pr \{ \max_{j=1, \dots, N} \{\hat{S}_k(j)\} \leq q \}}{\Pr \{0 < \max_{j=1, \dots, N} \{\hat{S}_k(j)\} \leq D\}} = \end{aligned} \quad (38)$$

$$\prod_{j=1}^N \frac{1 - \mu_j^q}{1 - \mu_j^D}, r \in \mathbf{N}^+$$

可得

$$\begin{aligned} & \Pr \{Q_r = q\} = \\ & \Pr \{Q_r \leq q\} - \Pr \{Q_r \leq q - 1\} = \\ & \prod_{j=1}^N \frac{1 - \mu_j^q}{1 - \mu_j^D} - \prod_{j=1}^N \frac{1 - \mu_j^{q-1}}{1 - \mu_j^D}, r \in \mathbf{N}^+ \end{aligned} \quad (39)$$

因此

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[Q_r] &= \sum_{q=1}^D q \Pr \{Q_r = q\} = \\ & D - \frac{\sum_{q=1}^D \prod_{j=1}^N (1 - \mu_j^{q-1})}{\prod_{j=1}^N (1 - \mu_j^D)}, r \in \mathbf{N}^+ \end{aligned} \quad (40)$$

把式(40)和式(36)代入式(35)中, 再把式(36)代入式(34)中, 最后把式(35)和式(34)代入式(32), 即可得式(31)。证毕。

3 算法设计

由式(31)可得 \bar{P} , 令

$$f_1(D, P) = \max_{1 \leq j \leq N} \Pr \{ \Delta(n) > w_j \} \quad (41)$$

$$f_2(D, P) = \bar{P} = P - \frac{P \sum_{q=1}^D \prod_{j=1}^N (1 - \mu_j^{q-1})}{D} \quad (42)$$

则问题式(5)可等价于

$$\min_{D, P, \mu_1, \dots, \mu_N} f_1(D, P) \quad (43)$$

$$\text{s.t.} \quad 0 < f_2(D, P) \leq \bar{P}_{\max} \quad (43a)$$

$$0 < P \leq P_{\max} \quad (43b)$$

$$\mu_j = 1 - e^{-\frac{\gamma_0 \sigma^2}{P \alpha_j}} \quad (43c)$$

设问题式(43)的最优数据包采样间隔和最优发送功率分别为 D^* 和 P^* , 最优值为 \Pr^* 。

定理4 $D^* \in [1, \max_{1 \leq j \leq N} \{w_j, D_{\max}\}]$, 其中,

$$D_{\max} = \left\lfloor \frac{\min_{1 \leq j \leq N} \{w_j\}}{1 - \max_{1 \leq j \leq N} \left\{ \left(1 - e^{-\frac{\gamma_0 \sigma^2}{\min\{P_{\max}, \bar{P}_{\max}\} \alpha_j}}\right)^{w_j} \right\}} \right\rfloor + 1$$

其中, $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整。

证明 发送功率越大, μ_j 就越小, 因此 AoI 中断概率就越小。 $(D, P) = (1, \min\{P_{\max}, \bar{P}_{\max}\})$ 是问题式(43)的一个可行点。当 $D > \max_{1 \leq j \leq N} \{w_j\}$ 且 $D > D_{\max}$ 时, 则有

$$D > \frac{\min_{1 \leq j \leq N} \{w_j\}}{1 - \max_{1 \leq j \leq N} \left\{ \left(1 - e^{-\frac{\gamma_0 \sigma^2}{\min\{P_{\max}, \bar{P}_{\max}\} \alpha_j}}\right)^{w_j} \right\}}$$

即 $f_1(D, +\infty) > f_1(1, \min\{P_{\max}, \bar{P}_{\max}\})$, 此时 D 不会是问题式(43)的最优采样间隔。因此只有当 $D \leq \max_{1 \leq j \leq N} \{w_j\}$ 或者 $D \leq D_{\max}$ 时, 采样间隔 D 才可能成为最优解, 故 $D^* \in [1, \max_{1 \leq j \leq N} \{w_j, D_{\max}\}]$ 。证毕。

为了设计算法求解上述问题式(43), 先把 D 看作一个定值, 然后再求解在定值下最优的发送功率。设 D 取某个固定值 D_1 , 得到

$$\min_{P, \mu_1, \dots, \mu_N} f_1(D_1, P) \quad (44)$$

$$\text{s.t.} \quad 0 < f_2(D_1, P) \leq \bar{P}_{\max} \quad (44a)$$

$$0 < P \leq P_{\max} \quad (44b)$$

$$\mu_j = 1 - e^{-\frac{\gamma_0 \sigma^2}{P \alpha_j}} \quad (44c)$$

设问题式(44)最优发送功率为 P_1^* 。 $f_1(D_1, P)$ 随 P 增大而减小, 故 P_1^* 是满足 $0 < f_2(D_1, P) \leq \bar{P}_{\max}$ 和 $0 < P \leq P_{\max}$ 条件下 P 的最大值。

定理5 若 $0 < P_1^* < P_{\max}$, 那么 P_1^* 为一元方程 $f_2(D_1, P) - \bar{P}_{\max} = 0$ 在区间 $(0, P_{\max})$ 上的最大根。

证明 假设 $\exists P \in (P_1^*, P_{\max}]$ 使问题式(44)的约束式(44b)成立, 那么 P_1^* 不再是最优解。由于 P_1^* 为最优解, 因此当 $P \in (P_1^*, P_{\max}]$ 时, $f_2(D_1, P) > \bar{P}_{\max}$ 。若 $f_2(D_1, P_1^*) - \bar{P}_{\max} < 0$, 因 $f_2(D_1, P_{\max}) - \bar{P}_{\max} > 0$, 且发送功率 P 是一个连续变量, 因此由零点定理可知存在 $P_o \in (P_1^*, P_{\max})$, 使 $f_2(D_1, P_o) - \bar{P}_{\max} = 0$ 成立, 这与 $P_o \in (P_1^*, P_{\max})$ 时, $f_2(D_1, P_o) > \bar{P}_{\max}$ 矛盾, 故 $f_2(D_1, P_1^*) - \bar{P}_{\max} \geq 0$ 。又因 P_1^* 需满足约束条件 $f_2(D_1, P_1^*) - \bar{P}_{\max} \leq 0$, 故 $f_2(D_1, P_1^*) - \bar{P}_{\max} = 0$ 。又由于 $f_1(D_1, P)$ 随发送功率 P 的增大而减小, 因此可知 P_1^* 是 $(0, P_{\max})$ 内满足 $f_2(D_1, P) - \bar{P}_{\max} = 0$ 条件下 P 的最大值。证毕。

令

$$f_3(P,D) = \frac{P\bar{P}_{\max}}{f_2(D,P)} = \frac{D\bar{P}_{\max}}{D - \sum_{q=1}^D \prod_{j=1}^N \left[1 - \left(1 - e^{-\frac{\gamma_0 \sigma^2}{P\alpha_j}} \right)^{q-1} \right]} \quad (45)$$

由复合函数的单调性可知 $f_3(P,D)$ 随 P 单调递增。令 $P_1(1) = P_{\max}$, $P_1(y+1) = f_3[P_1(y), D_1]$, $y \in \mathbf{N}^+$ 。若 $P_1(1) \leq f_3[P_1(1), D_1]$, 即 $f_2[D_1, P_1(1)] \leq \bar{P}_{\max}$, 则 $P_1(1)$ 满足问题式(44)的约束, 且为该问题的最优发送功率。若 $P_1(1) > f_3[P_1(1), D_1]$, 即 $P_1(1) > P_1(2)$, 则 $f_3[P_1(1), D_1] > f_3[P_1(2), D_1]$ 。

定理6 若 $P_1(1) = P_{\max}$ 且 $P_1(1) > f_3[P_1(1), D_1]$, 则 $P_1(y+1)$ 随 y 单调递减且有下界 P_1^* 。

证明 下面使用数学归纳法证明 $P_1(y+1)$ 随 y 单调递减。已知 $y=1$ 时, $P_1(1) > P_1(2)$, 设 $y=m$ 时, $P_1(m) > P_1(m+1)$ 。 $f_3(P,D)$ 随 P 单调递增, 因此可得 $f_3[P_1(m), D_1] > f_3[P_1(m+1), D_1]$, 即当 $y=m+1$ 时, $P_1(m+1) > P_1(m+2)$, 故 $P_1(y+1)$ 随 y 单调递减。当 $D=1$ 时,

$$\left. \frac{D\bar{P}_{\max}}{D - \sum_{q=1}^D \prod_{j=1}^N \left[1 - \left(1 - e^{-\frac{\gamma_0 \sigma^2}{P\alpha_j}} \right)^{q-1} \right]} \right|_{D=1} = \bar{P}_{\max} \quad (46)$$

当 $D > 1$ 时,

$$\lim_{P \rightarrow 0} \frac{D\bar{P}_{\max}}{D - \sum_{q=1}^D \prod_{j=1}^N \left[1 - \left(1 - e^{-\frac{\gamma_0 \sigma^2}{P\alpha_j}} \right)^{q-1} \right]} = \bar{P}_{\max} \quad (47)$$

假设 $P_1(y) > 0$, 则有 $f_3[P_1(y), D_1] > \bar{P}_{\max} > 0$, 即 $P_1(y+1) > 0$, 又 $P_1(1) > 0$, 故归纳可得 $P_1(y) > 0$ 。综上所述, $P_1(y)$ 随 y 单调递减且有下界, 又因为 $P \in [P_1(y+1), P_1(y)]$ 时, $P > f_3[P_1(y)] > f_3(P)$, 故下界为 P_1^* 。证毕。

由定理6可知, 若 $P_{\max} > f_3[P_{\max}, D_1]$, 则可以利用迭代计算式 $P_1(y+1) = f_3[P_1(y), D_1]$ 求解 P_1^* 。求解算法见算法1。

算法1 问题式(40)的最优发送功率求解算法

输入: 初始值 $P_1(1)$ 和 D_1

初始化容错 ϵ ;

设置 $y = 1$;

if $P_1(1) \leq f_3[P_1(1), D_1]$ **then**

$P_1^* = P_1(1)$;

else while True do

$P_1(y+1) = f_3[P_1(y), D_1]$;

$y = y + 1$;

if $|P_1(y+1) - P_1(y)| < \epsilon$ **then**

$P_1^* = P_1(y)$;

break;

end while

输出: 问题式(40)的最优发送率 P_1^*

为了继续求解问题式(43), 假设 D 取另外一个定值 D_2 , 且 $D_2 < D_1$ 。得到

$$\min_{P_{\mu_1}, \dots, \mu_N} f_1(D_2, P) \quad (48)$$

$$\text{s.t.} \quad 0 < f_2(D_2, P) \leq \bar{P}_{\max} \quad (48a)$$

$$0 < P \leq P_{\max} \quad (48b)$$

$$\mu_j = 1 - e^{-\frac{\gamma_0 \sigma^2}{P\alpha_j}} \quad (48c)$$

设问题式(48)的最优发送功率为 P_2^* 。

定理7 $P_2^* \leq P_1^*$ 。

证明 先证 $f_2(D,P)$ 关于 D 单调递减。由于

$$\frac{D \sum_{q=1}^{D+1} \prod_{j=1}^N (1 - \mu_j^{q-1})}{D(D+1)} - \frac{(D+1) \sum_{q=1}^D \prod_{j=1}^N (1 - \mu_j^{q-1})}{D(D+1)} = \frac{\sum_{q=1}^D \left[\prod_{j=1}^N (1 - \mu_j^D) - \prod_{j=1}^N (1 - \mu_j^{q-1}) \right]}{D(D+1)} > 0$$

故 $f_2(D+1, P) < f_2(D, P)$, 即 $f_2(D, P)$ 随 D 单调递减。 P_2^* 为最优解, 若 $P_2^* = P_{\max}$, 那么 P_2^* 需满足约束 $f_2(D_2, P_2^*) - \bar{P}_{\max} \leq 0$, 又因为 $D_2 < D_1$, 因此可得 $f_2(D_1, P_2^*) - \bar{P}_{\max} < f_2(D_2, P_2^*) - \bar{P}_{\max} \leq 0$, 也即 P_{\max} 满足问题式(44)的约束条件式(44a), 因此可得 $P_1^* = P_{\max} = P_2^*$ 。若 $P_2^* < P_{\max}$, 则由定理5可知 $f_2(D_2, P_2^*) - \bar{P}_{\max} = 0$, 故 $f_2(D_1, P_2^*) - \bar{P}_{\max} < 0$, 因此存在 $P \in (P_2^*, P_{\max}]$, 使 $f_2(D_1, P) - \bar{P}_{\max} \leq 0$ 成立, 即 $P_2^* < P_1^*$ 。综上所述, 可得 $P_2^* \leq P_1^*$ 。证毕。

当 $P_1^* = P_{\max}$ 时, 可取迭代初值 $P_2(1) = P_{\max}$, 参照算法1和迭代计算式 $P_2(y+1) = f_3[P_2(y), D_2]$ 求解 P_2^* 。当 $P_1^* < P_{\max}$ 时, 由定理5可知 P_1^* 需满足 $f_2(D_1, P_1^*) - \bar{P}_{\max} = 0$, 故 $f_2(D_2, P_1^*) - \bar{P}_{\max} > 0$, 即 $P_1^* > f_3[P_1^*, D_2]$, 此时取 $P_2(1) = P_1^*$, 则由定理6可知 $f_3[P_2(y), D_2]$ 随 y 单调递减有下界, 又由定理7可知 $P_2^* \leq P_1^*$, 因此可知该下界为 P_2^* 。

因此, 求解问题式(48)可利用问题式(44)的最

优解降低算法的复杂度。再结合定理4的结论，可以利用算法1搜索所有定值 D 情形下问题式(48)的最优发送功率，最后再通过比较确定问题式(43)的最优解，求解算法见算法2。

算法2 问题式(43)的最优发送功率求解算法

输入：初始值 $P_0 = P_{\max}$, $y_0 = 0$, $\Pr^* = 0$, $D = \max_{1 \leq j \leq N} \{w_j, D_{\max}\}$, $P^* = 0$ 和 $D^* = 0$

while True do

输入 $P_1(1) = P_0$, $D_1 = D$, 通过算法得到问题式(40)的最优发送功率 P_1^* ;

算法1;

if $y_0 > f_1(D_1, P_1^*)$ **then**

$\Pr^* = f_1(D_1, P_1^*), P^* = P_1^*, D^* = D_1;$

end if

$D = D - 1, P_0 = P_1^*, y_0 = f_1(D_1, P_1^*);$

if $D \leq 0$ **then**

break;

$\mu_1^* = 1 - e^{-\frac{\gamma_0 \sigma^2}{P^* a_1}}, \dots, \mu_N^* = 1 - e^{-\frac{\gamma_0 \sigma^2}{P^* a_N}};$

输出：最优目标值 \Pr^* 和问题式(39)的最优解决方案

4 理论验证与性能评估

下面通过MATLAB对理论分析进行仿真验证和对算法进行性能评估。考虑大尺度衰落由路径损耗和阴影衰落构成，小尺度衰落为瑞利衰落。部分相关参数设定为 $B = 0.5$ MHz、 $\tau = 1$ ms、 $\epsilon = 1.0 \times 10^{-7}$ 、 $Q = 5.0 \times 10^3$ bits、 $\sigma^2 = -114$ dBm，其他的相关参数设置、信道仿真和车辆场景模拟和文献[12]中的一致， μ_j 可由式(7)得到。

4.1 理论验证

为了验证AoI中断概率理论分析的正确性，需要对系统进行仿真和分析。由于各个接收端AoI中断概率的分析计算是类似的，因此只需要考虑对系统中某一条链路的排队过程进行仿真即可。故考虑 $N = 1$ ，即系统中只有一个发送端和一个接收端的情况。然后在接收端未成功接收数据包的概率分别取 $\mu_1 = 0.8$ 、 $\mu_1 = 0.7$ 、 $\mu_1 = 0.4$ 的情况下对系统在 1.0×10^3 s内的状态变化过程进行仿真，得到接收端 A_1 的AoI中断概率随 D 的变化如图3所示，可以发现仿真结果和理论分析一致。由于最新产生的数据包可以优先传输，因此当接收端 A_1 未成功接收数据包的概率

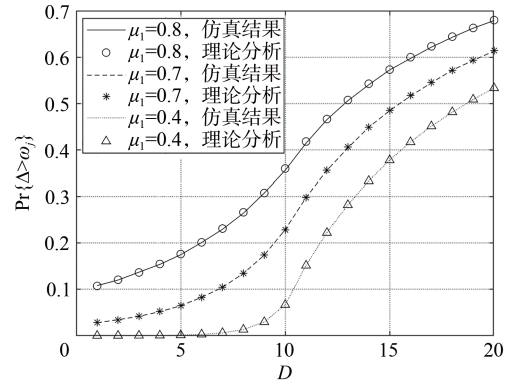


图3 接收端 A_1 的AoI中断概率随 D 的变化

μ_1 为定值时，发送端的数据包采样间隔 D 越小，则发送端当前正在传输的数据包就越新鲜，故 D 越小，接收端收到的数据包也越新鲜，因此图3中的AoI中断概率随着 D 的增加而减小。当 D 取某一个定值时，若 μ_1 增大，则接收端成功接收数据包所需要的重传次数会增加，从而导致接收端所收数据包的AoI增大。从图3中可以发现， μ_1 越大，AoI中断概率也越大。综上，理论分析与仿真结果是一致的。

同样，为了验证发送端平均发送次数理论分析的正确性，需要对一个系统进行仿真。考虑 $N = 3$ ， $w_1 = 10$ 、 $w_2 = 11$ 、 $w_3 = 12$ 的一个系统，然后在 $\mu_1 = 0.6$ 、 $\mu_2 = 0.5$ 、 $\mu_3 = 0.4$ 以及 $\mu_1 = 0.6$ 、 $\mu_2 = 0.5$ 、 $\mu_3 = 0.3$ 这两种取值情形下分别对排队系统模型在 1.0×10^3 s内的状态变化过程进行仿真，得到发送端平均发送次数 M 的仿真结果如图4所示，可见仿真结果和理论分析一致，当 μ_1 、 μ_2 、 μ_3 取某一组定值时， D 越大，整体上来说发送端空闲的时间就越长，从而 M 就越小；当 D 取某一个定值时，在 μ_1 、 μ_2 相同的情况下， μ_3 越大意味着发送端所需的重传次数越多，从而 M 越大。

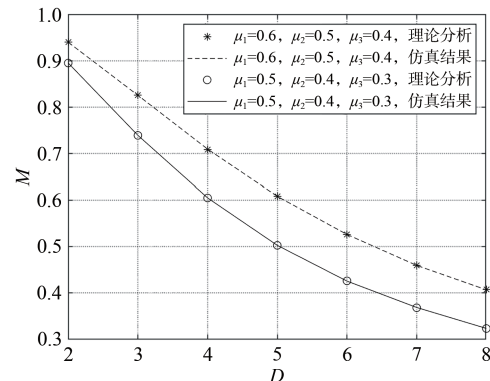


图4 发送端平均发送次数 M 的仿真结果

4.2 性能评估

为了比较数据包排队系统模型对AoI中断概率的影响,考虑 $N = 1$,并分别在 $\mu_1 = 0.8$ 、 $\mu_1 = 0.7$ 、 $\mu_1 = 0.4$ 的情形对排队系统模型在 1.0×10^3 s内的状态变化过程进行仿真。当发送端分别采用本文所提的排队系统模型和数据包先到先服务的D/Geo/1排队系统模型^[12]时,AoI中断概率在两种数据包传输机制下的变化如图5所示。当 D 较小时,若采用数据包先到先服务的排队系统模型,则排队队列会积累大量需要等待传输的数据包,从而导致AoI变大,且 D 越小,队列积累的数据包就越多,AoI也越大。而采用数据包最小时间戳优先的排队系统模型时,最新产生的数据包可以优先传输,因此能有效地降低AoI中断概率。当 D 较大时,系统较为空闲,因此这种情形下两种排队系统模型下AoI中断概率很相近。

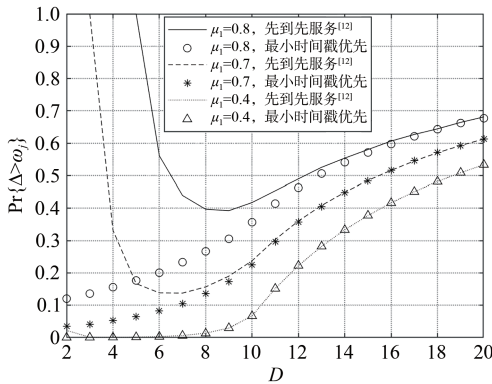


图5 AoI中断概率在两种数据包传输机制下的变化

为了验证算法2能否取得全局最优解,下面考虑 $N = 3$ 、 $w_2 = 13$ 、 $w_3 = 14$ 、 $P_{\max} = 1$ mW时的情形。参考文献^[12],假定车辆的位置分布服从空间泊松点过程,通过对一个车辆场景下的信道模型进行仿真,得到一组大尺度衰落分量。当 $D > w_j$ 时,由AoI中断概率表达式易知接收端 A_j 的AoI中断概率大于 $1/(w_j + 1)$ 。若 $w_j = 9$,则当 $D > w_j$ 时,接收端 A_j 的AoI中断概率大于0.1,该数值对车联网来说太大,较难满足实际的应用需求^[12]。另外,在实际的求解中, $D > w_j$ 时,问题通常不能取得最优解,下面将结合具体例子分析。考虑 $D \leq \min_{j=1,2,3} \{w_j\}$ 情况下问题式(5)的求解。对于 $\bar{P}_{\max} = 4.0 \times 10^{-6}$ mW和 $\bar{P}_{\max} = 8.0 \times 10^{-6}$ mW两种情况,分别用算法2和穷举法对问题式(5)进行求解,得到 Pr^* 随AoI阈值 w_1 的变化如图6所示,可以看出两种算法求解的结

果一致,这说明了算法2能够取得全局最优解。当 \bar{P}_{\max} 取定值时, w_1 越大,AoI超过阈值 w_1 的概率就越小,因此从图6中可看到 Pr^* 随 w_1 的增大而减小。当 w_1 取定值时, \bar{P}_{\max} 越大,发送端可消耗的功率就越多,AoI也越小,这一点从图6中也有所体现。此外,可以发现图6中的 $\text{Pr}^* < 1.0 \times 10^{-2}$,而当 $D > w_j$ 且 $5 < w_j < 14$ 时,问题式(5)的目标函数大于 $1/(w_j + 1)$,也即大于 1.0×10^{-2} ,因此此时当 $D > w_j$ 时 D 不可能是最优解,这说明 $D^* \leq \min_{j=1,2,3} \{w_j\}$,即此时算法2求解问题式(5)只考虑 $D \leq \min_{j=1,2,3} \{w_j\}$ 能够取得最优解。

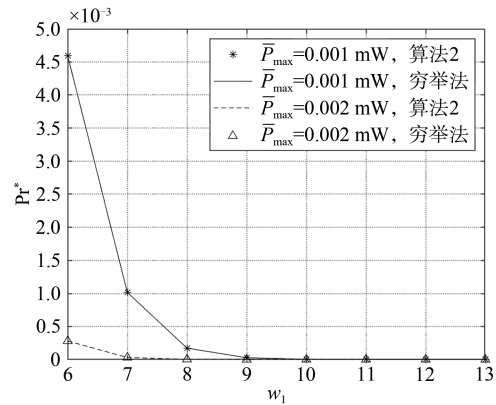


图6 Pr^* 随AoI阈值 w_1 的变化

为了研究接收端个数对系统性能的影响,下面将考虑 $w_2 = 11$ 、 $w_3 = 12$ 、 \dots 、 $w_N = N + 9$ 、 $\bar{P}_{\max} = 1.0 \times 10^{-6}$ mW和 $D \leq \min_{j=1,2,\dots,N} \{w_j\}$ 时的情形。根据 w_1 的两种取值情况,分别用算法2和穷举法对问题式(5)进行求解,得到最优值 Pr^* 随接收端个数 N 的变化如图7所示。可见两种算法求解结果一致。在 \bar{P}_{\max} 和 w_1 一定时,随着接收端个数 N 增加,全部接收端都成功接收发送端所发送的数据包将变得越来越困难。当有一个接收端未收到发送端传输的数

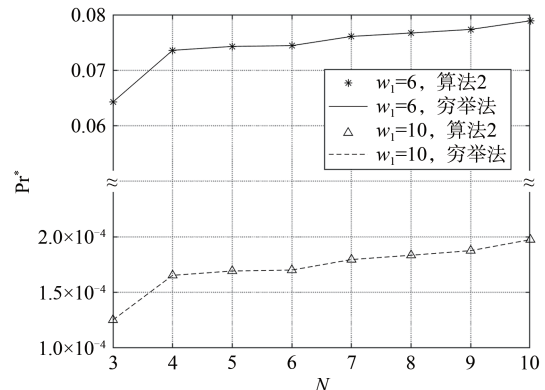


图7 Pr^* 随接收端个数 N 的变化

据包时，发送端将对数据包进行重传，因此 N 增加，发送端的重传次数也会增加，这会导致发送端平均发送功率增加。由于平均发送功率是有限的，因此 N 增加会导致发送功率减小， Pr^* 增加。

为了分析算法2的时间复杂度，下面考虑 $N=3$ ， $w_2=13$ ， $w_3=14$ ， $D \leq \min_{j=1,2,3}\{w_j\}$ 时的情形。给定一组大尺度衰落分量，然后比较算法2和穷举法求解问题式(5)所需要的时长。穷举法的求解思路是先取一个定值 D ，然后利用算法1找到一个满足问题式(5)约束条件的发送功率，之后再搜索可行域内满足约束条件的更大发送功率，搜索精度为 1.0×10^{-2} mW，最后再比较不同定值 D 下性能的优劣以确定最优解。针对 \bar{P}_{\max} 的两种取值情况，得到算法运行时间随 w_1 的变化如图8所示。按上述穷举思路并结合前面的理论推导， \bar{P}_{\max} 越大，搜索的起始功率就越大，因而搜索范围越窄，算法运行时间越短。使用穷举法时， w_1 越大， D 的范围越大，算法运行时间越长。而对于算法2，当 w_1 增加时，由于迭代收敛速度较快，因此算法运行时间基本保持不变。

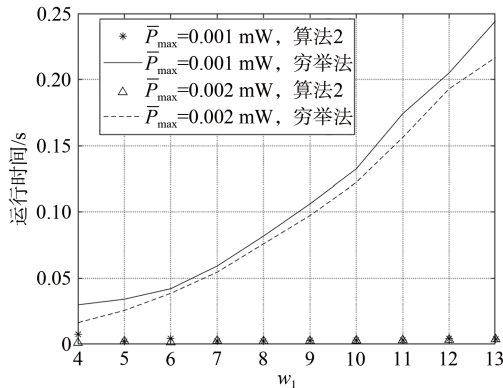


图8 算法运行时间随 w_1 的变化

5 结束语

信息年龄在车辆状态更新网络领域中具有重要的作用，许多研究表明，采用合理的数据包传输机制提高系统性能具有重要的意义。在不考虑通信资源限制的情况下，在本文所提出的数据包传输机制中，数据包采样速率越大，AoI减小得就越多，但这并不意味着采样速率可以无限制地增大。在实际的应用中，需要综合考虑多种因素对系统的影响，例如硬件设备、通信资源的限制等。

本文所考虑的是一个车辆状态更新网络中的广

播通信场景，受数据包后到先服务传输机制的启发，提出了一种最小时间戳优先的排队系统模型，基于排队论进行了理论分析。理论分析结果表明，相对于先到先服务的数据包传输机制，本文所提的排队系统模型能有效降低AoI中断概率。同时，根据AoI中断概率随数据包采样速率和发送功率变化的单调性，提出了基于迭代的采样速率和发送功率联合优化算法，通过采样与功率控制在功率受限的条件下最小化了所有接收端中的最大AoI中断概率，实现了接收端信息新鲜度的公平提升。最后在通信资源受限条件下对系统进行了优化，最小化了所有接收端中的最大AoI中断概率，并通过仿真验证了理论分析的正确性和算法的高效性。

参考文献：

- [1] GARCIA M H C, MOLINA-GALAN A, BOBAN M T, et al. A tutorial on 5G NR V2X communications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2021, 23(3): 1972-2026.
- [2] 钱志鸿, 田春生, 郭银景, 等. 智能网联交通系统的关键技术与发展[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(1): 2-19.
QIAN Z H, TIAN C S, GUO Y J, et al. The key technology and development of intelligent and connected transportation system[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2020, 42(1): 2-19.
- [3] LEE J, NA W. A survey on vehicular communication methods[C]// Proceedings of 2022 13th International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC). Piscataway: IEEE Press, 2022: 2258-2260.
- [4] FUNG C C, YOGARAYAN S, ABDUL RAZAK S F, et al. A review study of IEEE 802.11p on-board unit for V2X deployment[C]// Proceedings of 2023 11th International Conference on Information and Communication Technology (ICoICT). Piscataway: IEEE Press, 2023: 165-171.
- [5] MOURA D L L, RAMOS G S, AQUINO A L L, et al. A centrality approach to select offloading data aggregation points in vehicular sensor networks[C]// Proceedings of IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. Piscataway: IEEE Press, 2023: 11639-11653.
- [6] BALKUS S V, WANG H G, CORNET B D, et al. A survey of collaborative machine learning using 5G vehicular communications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2022, 24(2): 1280-1303.
- [7] KAUL S, GRUTESER M, RAI V, et al. Minimizing age of information in vehicular networks[C]// Proceedings of 2011 8th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks. Piscataway: IEEE Press, 2011: 350-358.

- [8] YATES R D, SUN Y, BROWN D R, et al. Age of information: an introduction and survey[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2021, 39(5): 1183-1210.
- [9] CHOUDHURY B, SHAH V K, DAYAL A, et al. Joint age of information and self risk assessment for safer 802.11p based V2V networks[C]//*Proceedings of IEEE INFOCOM 2021 - IEEE Conference on Computer Communications*. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-10.
- [10] HISHAM A, STRÖM E G, BRÄNNSTRÖM F. Radio resource management for V2V multihop communication considering adjacent channel interference[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, 22(11): 7084-7101.
- [11] PENG N H, LIN Y, ZHANG Y J, et al. AoI-aware joint spectrum and power allocation for Internet of vehicles: a trust region policy optimization-based approach[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(20): 19916-19927.
- [12] HE W, GUO C T, WANG X J. Age of information aware resource allocation and packet sampling control in vehicular networks[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2022, 11(11): 2245-2249.
- [13] TANG Z F, YANG N, SADEGHI P, et al. Age of information in downlink systems: broadcast or unicast transmission? [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2023, 41(7): 2057-2070.
- [14] ABBAS Q, HASSAN S A, JUNG H, et al. On minimizing the age of information in NOMA-based vehicular networks using Markov decision process[C]//*Proceedings of IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. Piscataway: IEEE Press, 2022: 15557-15567.
- [15] GÓMEZ J T, MORALES-CÉSPEDES M, ARMADA A G, et al. Minimizing age of information on NOMA communication schemes for vehicular communication applications[C]//*Proceedings of 2020 12th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP)*. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [16] LI Z P, XIANG L, GE X H. Age of information modeling and optimization for fast information dissemination in vehicular social networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, 71(5): 5445-5459.
- [17] NAJM E, YATES R, SOLJANIN E. Status updates through M/G/1/1 queues with HARQ[C]//*Proceedings of 2017 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*. Piscataway: IEEE Press, 2017: 131-135.
- [18] YANG Y Q, ZHANG B N, GUO D X, et al. Stochastic geometry-based age of information performance analysis for privacy preservation-oriented mobile crowdsensing[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, 72(7): 9527-9541.
- [19] CHANG T G, CAO X H, CHENG Y. Age of local information for fusion freshness in Internet of Things[C]//*Proceedings of 2023 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC)*. Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-6.
- [20] KAUL S, YATES R, GRUTESER M. Real-time status: how often should one update? [C]//*2012 Proceedings IEEE INFOCOM*. Piscataway: IEEE Press, 2012: 2731-2735.
- [21] INOUE Y, MASUYAMA H, TAKINE T, et al. A general formula for the stationary distribution of the age of information and its application to single-server queues[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2019, 65(12): 8305-8324.
- [22] KOSTA A, PAPPAS N, EPHREMIDES A, et al. Non-linear age of information in a discrete time queue: stationary distribution and average performance analysis[C]//*Proceedings of ICC 2020 - 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [23] TAGLIAFERRI D, MIZMIZI M, AYOUBI R A, et al. Conformal intelligent reflecting surfaces for 6G V2V communications[C]//*Proceedings of 2022 1st International Conference on 6G Networking (6GNet)*. Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-8.
- [24] SHURRAB M, SINGH S, OTROK H, et al. An efficient vehicle-to-vehicle (V2V) energy sharing framework[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(7): 5315-5328.
- [25] SHURRAB M, SINGH S, OTROK H, et al. A stable matching game for V2V energy sharing-a user satisfaction framework[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(7): 7601-7613.
- [26] GAO S, TAO M X. Resource allocation for AoI-constrained V2V communication in finite blocklength regime[C]//*Proceedings of 2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [27] GUO C T, LIU S T, LIAO B, et al. AoI-driven power allocation and batch sampling control for V2V status update communications[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 1888, PP(99): 1-11.
- [28] FARAZI S, KLEIN A G, RICHARD BROWN D. Average age of information in multi-source self-preemptive status update systems with packet delivery errors[C]//*Proceedings of 2019 53rd Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers*. Piscataway: IEEE Press, 2020: 396-400.
- [29] YATES R D. Age of information in a network of preemptive servers[C]//*Proceedings of IEEE INFOCOM 2018 - IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 118-123.
- [30] ABDEL-AZIZ M K, SAMARAKOON S, LIU C F, et al. Optimized age of information tail for ultra-reliable low-latency communications in vehicular networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(3): 1911-1924.
- [31] GU Y F, CHEN H, ZHOU Y, et al. Timely status update in Internet of Things monitoring systems: an age-energy tradeoff[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(3): 5324-5335.
- [32] SUN M Y, XU X D, QIN X Q, et al. AoI-energy-aware UAV-assisted data collection for IoT networks: a deep reinforcement learning method[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(24): 17275-17289.

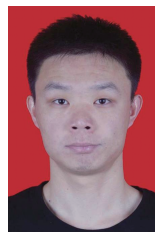
- [33] HUANG J J, GONG J, ZHAN W. Energy-age tradeoff in status update communication systems based on HARQ[C]//Proceedings of 2021 13th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-5.
- [34] HISHAM A, YUAN D, STRÖM E G, et al. Adjacent channel interference aware joint scheduling and power control for V2V broadcast communication[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(1): 443-456.
- [35] GHABBOUN R, DAWOUD D W, SHABAB E A, et al. Adaptive real-time speed limit broadcasting for autonomous driving applications using visible light communication[C]//Proceedings of 2023 IEEE International Conference on Electro Information Technology (eIT). Piscataway: IEEE Press, 2023: 191-196.
- [36] CHO Y, PARK M, PAEK J. Broadcasting in vehicular ad-hoc network: survey on recent advances[C]//Proceedings of 2022 13th International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC). Piscataway: IEEE Press, 2022: 813-816.
- [37] 常促宇, 向勇, 史美林. 车载自组网的现状与发展[J]. 通信学报, 2007, 28(11): 116-126.
CHANG C Y, XIANG Y, SHI M L. Development and status of vehicular ad hoc networks[J]. Journal on Communications, 2007, 28(11): 116-126.
- [38] 沈嘉. 3GPP LTE 核心技术及标准化进展[J]. 移动通信, 2006, 30(4): 45-49.
SHEN J. 3GPP LTE core technology and standardization progress[J]. Mobile Communications, 2006, 30(4): 45-49.
- [39] 李俨, 高路. 5G NR-V2X 直连通信频率需求研究[J]. 中兴通讯技术, 2020, 26(1): 40-44.
LI Y, GAO L. 5G NR-V2X sidelink spectrum requirement[J]. ZTE Technology Journal, 2020, 26(1): 40-44.

- [40] GUO C T, LIANG L, LI G Y. Resource allocation for high-reliability low-latency vehicular communications with packet retransmission[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(7): 6219-6230.
- [41] GUO C T, LIANG L, LI G Y. Resource allocation for low-latency vehicular communications: an effective capacity perspective[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2019, 37(4): 905-917.

[作者简介]



曾健华(1998-), 男, 深圳大学电子与信息工程学院硕士生, 主要研究方向为车联网、信息年龄、凸优化等。



郭重涛(1987-), 男, 博士, 深圳大学电子与信息工程学院副教授、硕士生导师, 主要研究方向为无线通信、机器学习等。



郭成(1986-), 男, 博士, 鹏城实验室助理研究员, 主要研究方向为空口技术、组网技术、星地融合、无线AI、软件无线电等。