使用有限阶矩估计信息年龄

Licheng Chen[1], Yunquan Dong[1,2],[1]南京信息工程大学电子与信息工程学院，中国南京[2]东南大学国家移动通信研究实验室，中国南京{charliechen, yunquandong}@nuist.edu.cn

arXiv:2303.02423v1 [cs.IT] 4 Mar 2023

摘要——信息年龄（AoI）被提出作为一种比时延和吞吐量等传统指标更适合表征信息新鲜度的度量。然而，计算信息年龄需要复杂的分析和严格的端到端同步。现有大多数与信息年龄相关的研究都假设已知到达过程和服务过程的统计特征。事实上，由于信源和信道噪声具有随机性，这些过程在现实中往往不可用。为此，我们提出一种方法，利用可用的到达过程有限阶统计矩，估计点对点无线瑞利信道上的平均信息年龄。基于该方法，我们明确给出了系统平均信息年龄的上下界。结果表明：1）随着业务强度增加，估计得到的平均信息年龄界限的绝对误差先增大后减小，而平均信息年龄则单调递增；2）利用前两阶矩估计界限可以有效近似平均信息年龄，尤其是在业务强度较小或接近 1 时；3）利用更多矩可以得到更紧的界限。

索引词——信息年龄、分块瑞利衰落信道、排队分析、年龄估计、矩。

I. 引言

如今，物联网中的低时延无线通信变得越来越重要。例如，在智慧医疗中，传感器提供患者身体状况的及时数据 [1], ；在智能驾驶中，车辆实时共享自身状态信息（如加速度、位置等） [2], [3], ，等等。这些应用有严格的时效性要求，因为处理器需要这些信息来做出决策并控制系统 [4], [5]。然而，专注于传统指标的控制策略，例如通过提高吞吐量来确保系统得到充分利用，或通过限制更新速率来降低数据包时延，并不等同于及时调度 [6]。这是因为前者会导致排队系统中的更新积压，而后者会使接收端缺乏新鲜数据。

为此，文献[2], 提出了信息年龄（AoI），其定义为当前时间与最新成功传输的数据包生成时间之差。作为一种端到端指标，AoI 全面刻画了由队列拥塞和空闲时间导致的信息陈旧程度。此外，无丢包的先到先服务（FCFS）系统与有丢包的后到先服务（LCFS）系统在 [7] 中的性能可以通过信息年龄进行比较，因为该指标与丢包无关 [8], [9]。

基于排队论，已有研究在不同服务规则下分析了 M/M/1、M/D/1 和 D/M/1 [6] 系统的平均信息年龄，例如先生成先服务（FCFS）策略 [6] 和后生成先服务（LGFS）策略 [7]。无缓冲系统的信息年龄分布也已得到推导 [10]。作者在 [11], 中给出了信息年龄平稳分布的一个通用且详尽的公式，该公式适用于点对点系统。然而，若没有分组调度方案，这些服务规则通常无法在各种应用中达到最优。文献 [12]研究了零等待策略的合理性。具体而言，为了最大化吞吐量并最小化时延，当信道空闲时应立即发送数据包。文献 [13]研究了用新到达的数据包替换缓冲区中的第一个数据包时的平均信息年龄。

然而，要进行上述平均信息年龄的计算，我们需要知道到达过程和服务过程，而这些变量很难获取，或获取时存在未知误差[14]。因此，许多研究人员尝试利用生成和接收的统计时间戳来获取平均信息年龄。在[15], 中，研究人员考察了由 WiFi、LTE、3G、2G 和以太网提供服务的 TCP/IP 链路上真实通信中的信息年龄变化。此外， [16] 报道了首次在真实物联网测试平台上对信息年龄开展的研究。在 [17], 中，作者指出，数据流相关的平均信息年龄值会受到发射端与接收端之间时钟同步误差的影响。他们还提出了一种无需时钟同步的瞬时信息年龄测量方法。具体而言，源节点通过 UDP 连接将数据包经由互联网发送给接收端，随后接收端将其回传 [26], [27]。然而，该方法需要额外传输，且存在更多不确定性。

因此，本文提出了一种利用到达过程和服务过程的有限阶矩来估计平均信息年龄的方法，该方法可提供一对紧致的上下界。我们在无需同步的情况下，分别在两端获取到达间隔时间和服务时间的矩。此外，使用该方法估计平均信息年龄无需复杂的排队分析，只需进行一些简单的迭代。即使仅采用一阶矩和二阶矩，该方法给出的估计界也表现良好。利用高阶矩进行更多次迭代，可以

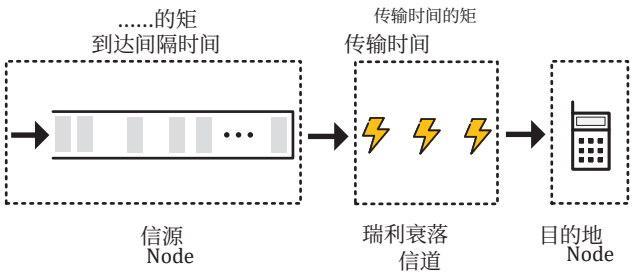


图 1. 点对点通信系统

进一步提高平均信息年龄估计的精度。

本文的贡献如下:

- 我们为瑞利信道上的通信提供了一种离散传输模型，并利用到达过程的矩估计其平均信息年龄。
- 我们利用到达过程的有限阶矩，提供了一种估计平均信息年龄的方法。该方法针对每个业务强度 ρ 给出一组紧致的上界和下界。
- 我们证明了该方法的性能取决于各阶矩的大小和业务强度。此外，我们还给出了使系统平均信息年龄达到最大和最小的到达间隔时间分布。

本文其余部分安排如下：第二节介绍系统模型和传输模型。第三节讨论传输模型，并给出其平均信息年龄及相应的估计方法。第四节通过仿真测试该方法估计平均信息年龄的性能。最后，我们在第五节总结全文。

II. 系统模型

A. 信道与传输模型

我们考虑一个由源节点和目的节点组成的无线通信系统，其中源节点通过带有加性白高斯噪声（AWGN）的块衰落信道传输数据包，如图 1 所示。时间是离散的，区块长度为 T_{B}。源节点以随机间隔采样周围环境。每个样本都编码为一个大小为 L 比特的数据包，并存储在无限长缓冲区中。随后，数据包按照先到先服务规则通过衰落信道传输。我们考虑数据包通过瑞利衰落信道传输的情形，其功率增益分布为 $f_\gamma(x)$，且假设该分布已知。基于一系列数据包传输，我们假设可以估计数据包传输时间的矩，且阶数可达到某个有限的较大值。

在每个区块中，当瞬时信噪比（SNR）大于某一阈值 V_T 时，数据包即可成功传输。否则，数据包将在下一个区块中重传（参见第 III 节）。可以很容易证明，数据包的传输时间服从几何分布。我们假设到达间隔时间的分布未知，并利用其矩估计平均信息年龄。

B. 排队系统

我们将信道上的传输过程建模为单服务器先到先服务队列。如图 2 所示，我们分别将 k^{th} 数据包的到达（生成）时刻和离开时刻记为 n_k 和 n'_k。我们将相邻两个到达时刻之间的时间段称为到达间隔时间$X_k = n_k - n_{k-1}$，并将相邻两次离开之间的时间段称为离开间隔时间 $Y_k = n'_k - n'_{k-1}$。

完成一个数据包传输所需的块数称为服务时间。注意，数据包的服务时间 S_k 由信道决定，且与到达间隔时间无关。我们还将系统时间记为 $T_k = n'_k - n_k$。如果 k^{th} 数据包到达缓冲区时，信源正忙于传输第（$k-1$）th个数据包，则它必须在缓冲区中等待，直到第（$k-1$）th 个数据包传输完成。因此，k^{th}数据包的等待时间为 $W_k = \max\{n'_{k-1} - n_k, 0\} = \max\{T_{k-1} - X_k, 0\}$，并且有 $T_k = W_k + S_k$。相反，如果 k^{th} 数据包的到达时刻晚于 $k-1^{\text{th}}$数据包的离开时刻，则缓冲区会有一段时间保持空闲。因此，这段时间的长度可表示为$I_k = \max\{n_k - n'_{k-1}, 0\} = \max\{X_k - T_{k-1}, 0\}$，并且有 $Y_k = I_k + S_k$。

我们将服务时间与到达间隔时间的期望之比称为业务强度，即 $\rho = E(S)/E(X)$。当 $\rho < 1$ 时，系统是稳定的。

C. 信息年龄

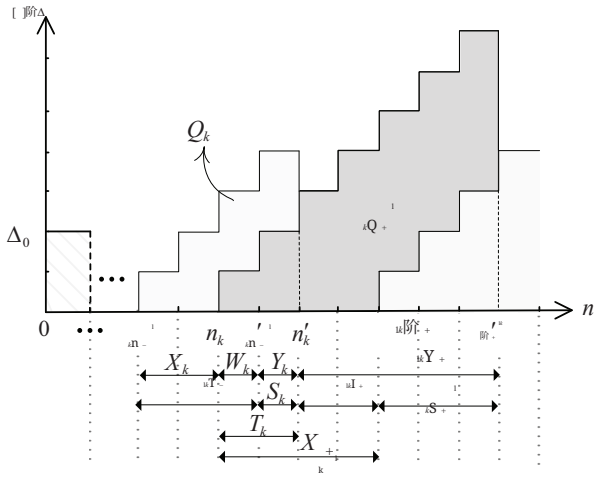


图 2. 离散平均信息年龄 $\Delta(n)$ 的样本路径

在区块 n 中，我们将最新成功接收的数据包的到达时刻记为 $U(n)$，信息年龄 $\Delta(n)$ 定义为

$$\Delta(n) = n - U(n).$$

从图 2 可以看出， $\Delta(n)$ 先增大（直至 $\Delta(n_k'^{-}) = X_k + T_k$），随后在目的地接收到新数据包时降至 $\Delta(n_k') = T_k$。在持续 N 块的时间段内，我们假设成功接收了 K 个数据包，并将该时间段的平均信息年龄记为 $\Delta = \lim_{N\to\infty}\sum_{n=0}^{N}\Delta(n)/N$。将图 2 的面积划分为一系列互不相交的多边形面积，这些面积合起来构成信息年龄曲线下方的面积，可得

$$\bar{\Delta} = \frac{E(XT) + E(X^2)/2}{E(X)}, \tag{1}$$

其中 $Q_k = \frac{1}{2}(T_k + X_k)^2 - \frac{1}{2}T_k^2$ [18, (3)]。

备注 1。为了计算式（1）所示平均信息年龄表达式中的项 $E(XT)$，我们需要到达间隔时间 X_k 的概率密度/质量分布。在实际实现中，很难获得到达间隔时间的分布。另一方面，获取其矩则容易得多。因此，本文将使用到达间隔时间 X_k 的矩来估计系统的平均信息年龄。具体而言，假设所需的矩已经完成估计，并可用于我们的分析。

III. 传输模型平均信息年龄的界定

在此模型下（参见 II-A 节），如果瞬时信噪比 $\mathrm{snr_n}$ 大于某一阈值 V_{T}，目的节点就能从接收信号中解码数据包。如果数据包无法解码，源节点需要在下一个区块中再次重传该数据包。我们将成功进行数据包传输的概率表示为 μ，即：

$$\mu = \Pr\{\mathrm{snr_n} > V_{\mathrm{T}}\}.$$

注意， μ 可以根据信道估计的结果进行估计。我们将成功传输 k^{th} 数据包所需的块数记为服务时间 S_k。显然，无论采用何种衰落模型， S_k 都是参数为 μ 的几何随机变量。具体而言， S_k 的分布可表示为

$$\Pr\{S_k = n\} = \bar{\mu}^{n-1}\mu, \qquad n \geq 1, \tag{2}$$

其中 $\bar{\mu} = 1 - \mu$。

我们对数据包过程作出以下假设。

D1. 分布未知：到达间隔时间 X_k 的分布未知 [28]。D2. 矩已知：到达间隔时间的一阶矩 $E(X_k)$和二阶矩 $E(X_k^2)$存在且已知。D3. 早到达系统：数据包在时隙末尾到达（n^-, n）。每个数据包的传输在块的起始处开始并完成（n', n'^{+}） [19pp. 193]。

A. 使用矩和概率生成函数刻画平均信息年龄

我们将到达间隔时间 X_k 内已送达数据包的数量记为 B_k，并将第 k^{th} 个数据包到达时的队列长度记为 L_k^-。显然， L_k^- 可表示为

$$L_{k+1}^- = \begin{cases} L_k^- + 1 - B_{k+1} & L_k^- + 1 - B_{k+1} > 0, \\ 0 & L_k^- + 1 - B_{k+1} \leq 0. \end{cases}$$

过程 $\{L_k^-, k \geq 0\}$ 是一个嵌入马尔可夫链。队列长度 L^- 的平稳分布在下面的引理中给出。

引理1. 给定 $\rho < 1$ 且系统是稳定的，队列长度 $L^- =$ 的平稳分布$\lim_{k\to\infty} L_k^-$ 存在，并可表示为

$$\Pr\{L^- = n\} = (1-\alpha)\alpha^n \qquad n \geq 0,$$

其中， α 是方程 $z = G_X(\bar{\mu} + \mu z)$在 $z \in (0, 1)$中的唯一实根。此外，数据包的系统时间T_k 的分布为

$$\Pr\{T = n\} = (1-\lambda)\lambda^{n-1}, \qquad n \geq 1. \tag{3}$$

证明。详细证明见 [20, 第4.6节。2]■

根据式 (3)，系统的平均信息年龄可表示如下定理所示。

定理1. 系统的平均信息年龄可表示为

$$\bar{\Delta}_{\mathrm{d}} = E(S) + \frac{E(X^2)}{2E(X)} + \frac{\lambda G_X'(\lambda)}{E(X)(1-\lambda)}. \tag{4}$$

在式 (4) 中， $E(S)$ 可以计算或估计。根据假设 D1, $E(X)$ 和 $E(X^2)$ 的前两个阶矩也可以通过某些估计获得。剩下的问题是，我们能否利用前两个阶矩 $E(X)$ 和 $E(X^2)$ 来近似 $G_X'(\lambda)$。此外，我们还需要根据 $G_X(\lambda) = \alpha$ 和$\lambda = \bar{\mu} + \mu\alpha$ 求解 α 和 λ。假设 $\rho < 1$ 且队列稳定，则可通过 $\lambda = {}_{1-}\ {}^{\bar{u}}{}_{\Pr\{Y=1\}}$ 得到 λ，其中 $\Pr\{Y = 1\}$ 是离开间隔取值为 1 的概率。

B. 利用前两个阶矩估计平均信息年龄

离散随机变量 X 的概率生成函数仅当 X 具有有限的矩 $E(S^n)$ 时才存在，对所有 $n = 1, 2, \cdots$ 均成立（参见 [21, 第 1] 页）。 X 的分布完全由矩序列 [22 确定（定理 4.17.1]）。如果到达间隔时间 S 的某些矩不是有限的，我们可以像 [23, 第 3 节 3] 那样截断变量 X 的支撑集。假设到达间隔时间的矩有限，不失一般性。

下面的定理给出了到达间隔时间的概率生成函数及其矩。

定理 2. 到达间隔时间的一级概率生成函数 $G_X'(z)$ 可以用其矩表示为

$$G_X'(z) = \frac{1}{z}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\ln(z)^{n-1}E(X^n)}{(n-1)!}, \qquad z \in (0, 1]. \tag{5}$$

证明. 根据概率生成函数的定义，我们有

$$G'_X(z) = \frac{1}{z}\sum_{m\geq 1} m\Pr\{X=m\}z^m.$$

将 $z^m = \exp(m\ln(z))$ 表示为其泰勒级数后，可得

$$\begin{aligned} G'_X(z) &= \frac{1}{z}\sum_{m\geq 1} m\Pr\{X=m\}\sum_{n\geq 0}\frac{\ln(z)^n m^n}{n!}, \\ &= \frac{1}{z}\sum_{n\geq 0}\frac{\ln(z)^n}{n!}\sum_{m\geq 1}\Pr\{X=m\}m^{n+1}, \\ &= \frac{1}{z}\sum_{n\geq 1}\frac{\ln(z)^{n-1}E(X^n)}{(n-1)!}. \end{aligned}$$

因此，定理 2 得证。 ■

我们将式（5）中给出的概率生成函数的部分和记为

$$\widehat{G}'^{K}_X(z) = \frac{1}{z}\sum_{n=1}^{K}\frac{\ln(z)^{n-1}E(X^n)}{(n-1)!}, \tag{6}$$

其中 $K = 1$、2、$\cdots$和 $z\in(0,1]$。项 $G'_X(\lambda)$ 可通过式（6）中的部分和以可接受的误差进行近似。

引理 2. 对于其概率生成函数存在且概率 $\Pr\{X=0\}=0$ 的随机变量 X，以下界成立

$$\frac{G_X(z)}{z} \leq G'_X(z) \leq \frac{1-G_X(z)}{1-z}, \quad z\in(0,1]. \tag{7}$$

证明。在图 3 中，以 $z=\lambda$ 为例。由于 $G'_X(z)$ 是单调递增的凹函数，我们可以在 [29] 中应用詹森不等式，推导出约束 $l'_{L_0}(\lambda) \leq G'_X(\lambda) \leq l'_{U_0}(\lambda)$，其中 $l'_{L_0}(\lambda) = G_X(\lambda)/\lambda = \alpha/\lambda$ 以及 $l'_{U_0}(\lambda) = \frac{1-G_X(\lambda)}{1-\lambda} = E(S)$。

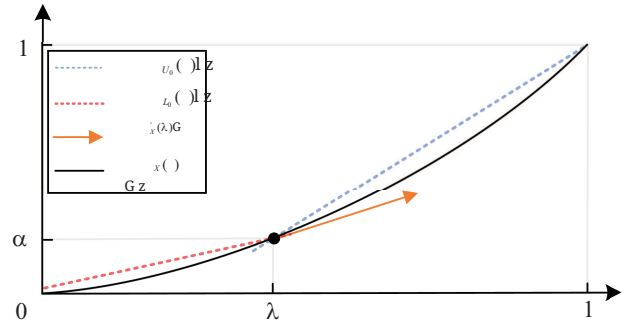


图 3. $G'_X(\lambda)$ 的初始界。

■

因此，我们可以使用 $\widehat{G}'^{1}_X(\lambda)$ 和 $\widehat{G}'^{2}_X(\lambda)$ 来估计系统的平均信息年龄，而不是使用 $G'_X(\lambda)$。

定理3。基于对 X_k 前两个阶矩的估计，系统平均信息年龄的界可表示为

$$f\bar{\Delta}_{\mathrm{d}} < E(S) + \frac{E(X^2)}{2E(X)} + \frac{\lambda\min\{E[S], G'^{1}_X(\lambda)\}}{E(X)(1-\lambda)}, \tag{8a}$$

$$\bar{\Delta}_{\mathrm{d}} > E(S) + \frac{E(X^2)}{2E(X)} + \frac{\lambda\max\{\alpha/\lambda, G'^{2}_X(\lambda)\}}{E(X)(1-\lambda)}. \tag{8b}$$

证明。通过将式（4）中的 $G'_X(\lambda)$ 替换为 $G'^{1}_X(\lambda)$ 和 $G'^{2}_X(\lambda)$，即可证明该定理。■

我们还将在以下命题中说明部分和如何限制 PGF$G'_X(z)$。

命题1。每个达到偶数阶的部分和估计 $\widehat{G}'^{K}_X(z)$（参见式（6））都小于 $G'_X(z)$，而每个达到奇数阶的部分和估计都大于 $G'_X(z)$。即，

$$\widehat{G}'^{2i+1}_X(z) > G'_X(z) \tag{9a}$$

$$\widehat{G}'^{2i}_X(z) < G'_X(z), \tag{9b}$$

对于任意 $z\in(0,1]$ 和 $i=0$，1，2，$\cdots$。

通过在矩的阶数（等价地，在 i）上对式（9）中的上界进行最小化并对下界进行最大化，可以得到更紧的界。此外，式（7）中的界适用于具有 PGF 的分布。因此，对于 $z=\lambda$，我们有

$$G'_X(\lambda) \leq \min_i\left\{\widehat{G}'^{2i+1}_X(\lambda), E(S)\right\} \doteq \widehat{G'^{2i+1}_X}(\lambda), \tag{10a}$$

$$G'_X(\lambda) \geq \max_i\left\{\widehat{G}'^{2i}_X(\lambda), \frac{\alpha}{\lambda}\right\} \doteq \underset{\smile}{G'^{2i}_X}(\lambda). \tag{10b}$$

结合式(4)和式(10)，我们在以下推论中给出了关于系统平均信息年龄的一组更紧且适用范围更广的界。

推论1. 基于更高阶的 $2i+1^{\mathrm{st}}(i>0)$阶矩，离散传输模型的平均信息年龄分别具有如下上界和下界：

$$\bar{\Delta}_{\mathrm{d}} < E(S) + \frac{E(X^2)}{2E(X)} + \frac{\lambda\widehat{G'^{2i+1}_X}(\lambda)}{E(X)(1-\lambda)} \doteq \widehat{\Delta}^{2i+1}_d, \tag{11a}$$

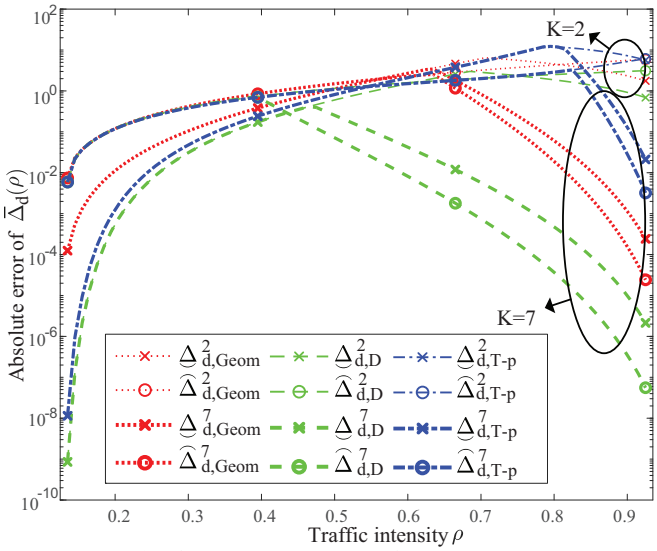
$$\bar{\Delta}_{\mathrm{d}} > E(S) + \frac{E(X^2)}{2E(X)} + \frac{\lambda\underset{\smile}{G'^{2i}_X}(\lambda)}{E(X)(1-\lambda)} \doteq \underset{\smile}{\Delta}^{2i}_d, \tag{11b}$$

其中 $\widehat{G'^{2i+1}_X}(\lambda)$和 $\underset{\smile}{G'^{2i}_X}(\lambda)$在式(10)中给出。

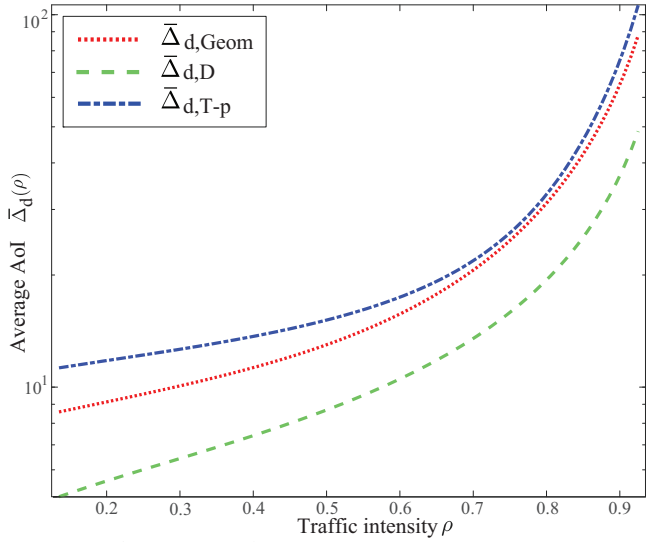
IV. 数值结果

本节研究在不同系统参数组合下平均信息年龄界的准确性，例如到达间隔时间的分布、用于估计的矩的最高阶数，以及业务强度 ρ，其中

- 业务强度 $\rho = p/\mu$ 决定估计项 $G'\mathrm{X}(\lambda)$（参见（4））；
- 对于给定的共同期望，高阶矩较大的分布，其估计误差也较大；



(a) 估计的平均信息年龄界限相对于业务强度的绝对误差强度 ρ，其中到达率为 $p = 0.125$



(b) 平均信息年龄随业务强度 ρ 的变化，其中到达率为 $p = 0.125$

图 4. 系统的数值结果

- 如式（5）所示，利用无限阶矩时，估计误差趋于零；使用更多阶矩时，估计误差很可能会减小。

给定一个共同期望，我们评估退化分布、两点分布和几何分布的界限估计误差。

图 4 展示了平均信息年龄 $\bar{\Delta}$ 及其对应的绝对估计误差如何随业务强度 ρ变化。我们将到达率设为 $p = 1/E(X) = 0.125$，并调整服务率 μ，使业务强度的取值介于零与一之间。在图 4(a) 中，标记为 $\times$ 和 $\circ$的曲线分别表示平均信息年龄下界和上界的绝对误差。首先，我们观察到随着 ρ 增大，绝对误差先增大后减小。当 ρ 趋近于一时，平均信息年龄较大；当 ρ 较小时，绝对误差较小。其次，从图 4(b) 可以看出，平均信息年龄随 ρ单调递增。当 ρ 趋近于一时，平均信息年龄较大；当 ρ 较小时，绝对误差较小。因此，我们观察到，在这两种情况下，界的误差都相对较小。第三，对于下界和上界，两点分布的绝对估计误差最大，而退化分布的绝对估计误差最小。第四，细线和粗线分别表示采用前两个（即 $K = 2$）阶矩以及最多采用第七个（即 $K = 7$）阶矩得到的绝对误差。使用更多矩时，随着 ρ 趋近于一，绝对估计误差会显著减小。此外，当 ρ 较小时，无论采用前两个阶矩还是最多采用第七个阶矩，各边界都会重合。在测试的三种分布中，两点分布的曲线分离需要最大的 ρ。由于式 (3) 中给出的较小 λ是由更小的 ρ引入的，采用前两个阶矩和前七个阶矩得到的界都不如替换它们的初始集合，因此这些界的前半部分重合。

V. 结论

本文研究了点对点无线网络中平均信息年龄的估计问题。具体而言，我们考虑了一种典型的传输模型，并求得其平均信息年龄。表达式中的未知项是到达过程的概率生成函数。我们利用到达过程的有限阶矩，明确给出了平均信息年龄的上下界。仅利用到达间隔时间的前两个阶矩，即可推导出一对紧致界。利用更多高阶矩可以提高计算性能。通过数值仿真，我们研究了业务强度、到达间隔时间的分布以及各阶矩的大小对所提估计方法性能的影响。

参考文献

[1] Ko J G、Lu C、Srivastava M B 等，“用于医疗保健的无线传感器网络”，Proceedings of the IEEE，2010，98(11)：1947-1960。[2] S. Kaul、M. Gruteser、V. Rai 和 J. Kenney，“车载网络中的信息年龄最小化”，2011年第8届IEEE通信学会传感器、网状及自组通信与网络会议，2011年，第350-358页。[3] Qiong Wu、赵宇和Qiang Fan，“交叉路口车队通信的时变性能建模”，在线发表，IEEE物联网期刊，2022年3月。[4] Bao Z、Dong Y、Chen Z 等，“物联网中的信息年龄最优服务和决策过程”，IEEE物联网期刊，2020，8 4 2826 2841 ( )：-。[5] Qiong Wu、万子扬、Qiang Fan、Pingyi Fan 和 Jiangzhou Wang，“面向MEC辅助车队网络的速度自适应接入方案：通过数据新鲜度实现接入公平性”，IEEE物联网期刊，第9卷，第6期，2022年3月，第4229-4244页。[6] S. K. Kaul、R. D. Y ates 和 M. Gruteser，“实时状态：应多久更新一次？”，载于IEEE INFOCOM论文集，美国佛罗里达州奥兰多，2012年3月，第2731–2735页。

[7] A. M. Bedewy、Y . Sun 和 N. B. Shroff，“在多服务器信息更新系统中优化数据新鲜度、吞吐量和时延”，载于IEEE国际信息论研讨会（ISIT），西班牙巴塞罗那，2016年7月，第2569–2573页。[8] Yates R D. “网络中的信息年龄：矩、分布与采样”，IEEE信息论汇刊，2020，66(9)：5712-5728。[9] M. Costa、M. Codreanu 和 A. Ephremides，“带分组管理的状态更新系统中的信息年龄”，IEEE信息论汇刊，第62卷，第4期，第1897–1910页，2016年4月。[10] Kesidis G、Konstantopoulos T、Zazanis M A. “消息处理系统中信息年龄性能度量的分布”，Queueing Systems，2020，95(3)：203-250。[11] Y. I noue、H. Masuyama、T. Takine 和 T. Tanaka，“信息年龄平稳分布的一般公式及其在单服务器队列中的应用”，IEEE信息论汇刊，第65卷，第12期，第8305-8324页，2019年12月。[12] Y . Sun、E. Uysal-Biyikoglu、R. D. Yates、C. E. Koksal 和 N. B. Shroff，“更新或等待：如何保持数据新鲜”，IEEE信息论汇刊，第63卷，第11期，第7492–7508页，2017年11月。[13] C. Kam、S. Kompella、G. D. Nguyen、J. E. Wieselthier 和 A. Ephremides，“控制信息年龄：缓冲区大小、截止期限和分组替换”，载于IEEE军事通信会议，美国马里兰州巴尔的摩，2017年11月。 2016， 301 306 第–页 E. Uysal、O. Kaya、S. Baghaee 和 H. B. Beytur，“实际应用中的信息年龄”，CoRR，第abs/2106.02491卷，2021年。 [在线]。可访问：https://arxiv.org/abs/ 2106 02491 。C. Son mez、S. Baghaee、A. Ergis¸i 和 E. Uysal-Biyikoglu，“实际应用中的信息年龄：通过WiFi、以太网和LTE连接测量TCP/IP连接上的状态年龄”，2018年IEEE黑海国际通信与网络会议，2018年，第1-5页。[16] Beytur H B、Baghaee S、Uysal E. “面向信息年龄感知的智能物联网系统”，2020年国际计算、网络与通信会议（ICNC）。IEEE，2020：353-357。[17] Beytur H B、Baghaee S、Uysal E. “测量实际连接中的信息年龄”，2019年第27届信号处理与通信应用会议（SIU）。IEEE，2019：1-4。[18] Yates R D、Sun Y、Brown D R 等，“信息年龄：介绍与综述”，IEEE通信领域精选期刊，2021，39(5)：1183-1210。[19] Hunter J J. “应用概率的数学技术：第2卷，离散时间模型：技术与应用”，Academic Press，1985。[20] Alfa A S. “电信排队论：单节点系统的离散时间建模”，Springer Science & Business Media，2010。[21] Lin G D. “矩问题的最新发展”，Journal of Statistical Distributions and Applications，2017，4(1)：1-17。[22] Simon B. “全面的分析课程”，美国罗得岛州普罗维登斯：美国数学学会，2015。[23] Wanyang D A I. “计算机与网络仿真中截断随机变量与重尾及长程依赖之间的冲突”，Journal of Computational Information Systems，2011，7(5)：1488-1499。[24] Q. Wang、D. Wu 和 P. Fan，“无线传感器网络中时延约束最优链路调度”，IEEE车辆技术汇刊，第59卷，第9期，第4564–4577页，2010年9月。[25] S. Wan、J. Lu、P. Fan 和 K .B. Letaief，“迈向智慧城市：应急公共安全网络设计”，IEEE Access，第6卷，第1451–1460页，2017年3月。[26] X. Chen、J. Lu、P. Fan 和 K. B. Letaief，“面向高移动性无线通信的具有发射分集的大规模MIMO波束成形”，第6卷，第23032–23045页，2017年5月。[27] Z. Yao、J. Jiang、P. Fan、Z. Cao 和 Vok Li，“自组织网络中的基于邻居表的多路径路由”，载于第57届IEEE半年度车辆技术会议，2003年。[28] Hongbiao Zhu、Qiong Wu、Xiao-Jun Wu、Qiang Fan、Pingyi Fan 和 Jiangzhou Wang，“基于深度强化学习的MIMO-NOMA车载边缘计算去中心化功率分配”，IEEE物联网期刊，第9卷，第4期，2022年7月，第12770-12782页。[29] Jensen J L W V. “关于凸函数及平均值之间的不´等式”，Acta Mathematica，1906，30(1)：175-193。