

中继辅助的多源状态更新系统的 信息年龄评估

Evaluating Age-of-Information of Relay-Assisted Multi-Source Status Update System

张亮,贾向东,牛夏秧,薛凯来(西北师范大学,甘肃兰州 730070)
Zhang Liang, Jia Xiangdong, Niu Xiayang, Xue Kailai (Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

摘要:

针对当前只考虑服务器的状态更新系统无法评估远距离通信的信息年龄(AoI)问题,设计了一种中继辅助的多源状态更新系统。运用随机混合系统(SHS)理论评估了所设计模型在非抢占策略下的平均AoI,提出了一种离散状态的合并思想,简化了计算的复杂性。仿真结果表明平均AoI随着源1的生成速率和服务时间的增大而减小,与已有研究中平均AoI的变化趋势一致,验证了所提出的将离散状态进行合并的思想在运用SHS理论评估AoI的过程中是可行的。

关键词:

信息年龄;随机混合系统;多源排队模型
doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2025.07.010
文章编号:1007-3043(2025)07-0059-06
中图分类号:TN929.5
文献标识码:A
开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

In response to the inability of current server-only status update systems to evaluate the age of information (AoI) for long-distance communication, an relay-assisted multi-source status update system is designed. This system utilizes the theory of stochastic hybrid systems (SHS) to assess the average AoI under a non-preemptive policy. Additionally, a concept of merging discrete states is proposed to simplify computational complexity. Simulation results indicate that the average AoI decreases as the generation rate and service time of Source 1 increase, and consistent with the trends observed in existing research, which verifies the feasibility of the proposed idea of merging discrete states in applying SHS theory to evaluate AoI.

Keywords:

Age of information; Stochastic hybrid systems; Multi-source queueing model

引用格式:张亮,贾向东,牛夏秧,等. 中继辅助的多源状态更新系统的信息年龄评估[J]. 邮电设计技术, 2025(7): 59-64.

0 引言

随着通信网络的日益普及和物联网技术的快速发展,实时状态更新已成为一种重要且无处不在的通信形式,对新服务和新应用也提出了更高的及时性需求,这就需要所获得的信息要足够新鲜,否则过时信息会引起无效决策,给终端带来极大的安全隐患。时延和吞吐量等经典的指标不能捕获信息更新的新鲜

度。所以文献[1]提出了信息年龄(Age of Information, AoI)的概念来捕捉信息的新鲜度。文献[2]完成了AoI排队理论的开创性工作,分析了单源先到先服务M/M/1排队模型的平均AoI。文献[3]首次研究了多源M/M/1 FCFS排队模型的平均AoI。文献[4]推导了多源M/M/1 FCFS排队模型的平均AoI的精确表达式和多源M/G/1 FCFS排队模型的平均AoI的近似表达式。

上述文献采用了对信息年龄演进图求面积的方式来分析平均AoI,但随着网络资源的增加,时效性能演化出现困难,使用上述分析方法对于具有2个或

基金项目:国家自然科学基金(62261048)

收稿日期:2025-05-16

多个服务的系统变得非常复杂⁵⁾。为了克服这个问题,文献[6]引入了一种分析框架,即随机混合系统(Stochastic Hybrid Systems, SHS),评估连续时间排队系统中的AoI,研究了在服务中抢占(LCFS-S)和等待中抢占(LCFS-W)2种包管理策略下的平均AoI。文献[7]将SHS理论分析扩展到计算AoI的矩生成函数(MGF)。文献[8]和文献[9]开发了一个框架用来研究AoI的联合分布特性。文献[10]研究了具有2个节点的单源串联网的平均峰值AoI,其中一个源将数据包传输到全双工中继。然后,中继器将它们发送到目的节点。

在文献[10]的启发下,本文设计了一种中继辅助的多源状态更新系统,适用于远距离通信的场景。源产生的数据包由服务器先传输给中继,再通过中继传输给目的节点,其中2个独立的源根据泊松过程生成数据包。采用非抢占的策略,当服务器为空时,任意源生成的数据包直接进入服务器进行服务;当服务器繁忙时,源生成的数据包进入缓冲区等待,此时如果有新的数据包生成则直接丢弃。通过运用SHS理论解决了所考虑的排队模型的平均AoI评估问题,并对复杂模型中离散状态太多不易求解的问题,提出了一种离散状态的合并思想,简化了计算的复杂性。

1 系统模型

本文考虑由2个独立的源节点、1个缓冲区、1个服务器、1个中继和1个接收器组成的状态更新系统(见图1)。每个源在随机时刻观察随机过程,接收器感兴趣的是关于这些随机过程状态的即时信息。状态更新以数据包的形式传输,其中包含被监视过程的测量值和表示生成样本时间的时间戳。假设源1和源2的包是根据泊松过程生成的,速率分别为 λ_1 和 λ_2 。由于信道条件不完善(如噪声、干扰等),数据包由服务器传输到中继以及中继传输到目的节点需要一个随机的时间间隔,假设缓冲区发送状态包到中继节点和中继节点到接收器所需的服务时间服从参数为 μ_1 和 μ_2 的指数分布。当服务器为空时,任何到达的数据

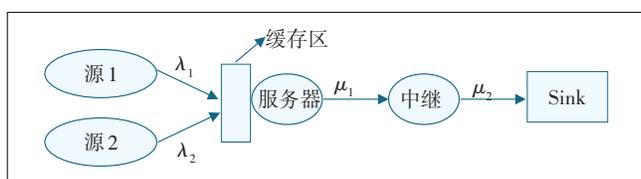


图1 系统模型

包都会立即进入服务器,当服务器繁忙时,新到达的数据包在缓冲区等待,不允许抢占。为了不失一般性,将源1标记为感兴趣的源。

关于感兴趣过程的信息的时效性可以用信息年龄来表征,我们将其定义如下:

令 $t_{c,i}$ 表示源 c 的第 i 个状态更新数据包产生的时刻, $t'_{c,i}$ 表示此数据包到达接收器的时刻。在时刻 τ ,源 c 最近接收到的数据包的索引由 $N_c(\tau) = \max \{i | t'_{c,i} \leq \tau\}$ 给出,源 c 最近接收到的数据包的时间戳为 $U_c(\tau) = t_{c,N_c(\tau)}$ 。源 c 在目的节点的AoI定义为随机过程: $\Delta_c(t) = t - U_c(t)$ 。令 $(0, \tau)$ 表示观测区间,因此,源 c 在目的节点的时间平均AoI可表示为 $\Delta_{\tau,c}$,定义如下

$$\Delta_{\tau,c} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \Delta_c(t) dt \quad (1)$$

源 c 的平均AoI用 Δ_c 表示,定义为

$$\Delta_c = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \Delta_{\tau,c} \quad (2)$$

2 SHS理论

SHS理论通过混合状态 $(q(t), x(t))$ 对排队系统进行建模,其中 $q(t) \in Q = \{1, \dots, m\}$ 是一个描述系统占用情况的连续时间有限状态马尔科夫链, $x(t) = [x_0(t), \dots, x_n(t)] \in \mathbb{R}^{1 \times (n+1)}$ 是一个连续的过程,描述了在目的节点与年龄相关的过程的演变。按照文献[9]中的方法,将感兴趣的源标记为源1,并使用连续过程 $x(t)$ 来跟踪源1状态更新在目的节点处的年龄。

马尔可夫链 $q(t)$ 可以表示为图 (Q, L) ,其中每个离散状态 $q(t) \in Q$ 是链的节点,从节点 q_i 到 q'_i 的链 $l \in L$ 表示从状态 $q_i \in Q$ 到状态 $q'_i \in Q$,当数据包到达或离开服务器时,会发生转变。由于数据包离开和到达之间的时间是指数分布的,因此从状态 q_i 到 q'_i 的转移 $l \in L$ 以指数概率 $\lambda^{(l)} \delta_{q_i, q(t)}$ 发生,其中克罗内克函数确保只有当离散状态 $q(t)$ 等于 q_i 时转变 l 才发生。当转变 l 发生时离散状态 q_i 变成状态 q'_i ,连续状态 x 重置为 $x' = xA_l$,其中 $A_l \in B^{(n+1) \times (n+1)}$ 是二进制重置映射矩阵。此外,在每个状态 $q(t) = q, q \in Q$,连续状态 x 通过微分方程 $\dot{x}(t) \triangleq \frac{\partial x(t)}{\partial t} = b_q$ 演变为分段线性函数,其中 $b_q = [b_{q,0}, b_{q,1}, \dots, b_{q,n}]$ 是二进制元素的向量,例如 $b_{q,j} \in \{0, 1\}, \forall j \in \{0, \dots, n\}, q \in Q$ 。如果年龄过程 $x_j(t)$ 以单位速率递增,则 $b_{q,j} = 1$,否则 $b_{q,j} = 0$ 。

为了计算平均AoI,需要计算马尔可夫链的状态

概率以及离散状态 $q(t)$ 与连续状态 $x(t)$ 之间的相关向量。设 $\pi_q(t)$ 表示处于马尔可夫链状态 q 的概率,设置 $v_q(t)=[v_{q0}(t),\dots,v_{qm}(t)]\in\mathbb{R}^{1\times(n+1)}$ 作为离散状态 $q(t)$ 和连续状态 $x(t)$ 之间的相关向量。

则

$$\pi_q(t) = \Pr[q(t) = q] = E[\delta_{q,q(t)}], \forall q \in Q \quad (3)$$

$$v_q(t) = [v_{q0}(t), \dots, v_{qm}(t)] = E[x(t)\delta_{q,q(t)}], \forall q \in Q \quad (4)$$

假设 L_q' 和 L_q 是状态 q 的传入和传出转变的集合,定义 $L_q' = \{l \in L: q_l' = q\}, L_q = \{l \in L: q_l = q\}, \forall q \in Q$ 。

根据AoI分析中马尔可夫链 $q(t)$ 的遍历性假设,状态概率向量 $\pi(t)=[\pi_0(t), \dots, \pi_m(t)]$ 收敛于一个唯一的平稳向量 $\bar{\pi}(t)=[\bar{\pi}_0, \dots, \bar{\pi}_m]$,满足

$$\bar{\pi}_q \sum_{l \in L_q'} \lambda^{(l)} = \sum_{l \in L_q} \lambda^{(l)} \bar{\pi}_{q_l}, \quad \forall q \in Q \quad (5)$$

$$\sum_{q \in Q} \bar{\pi}_q = 1 \quad (6)$$

根据文献[9]中的定理4,在马尔可夫链 $q(t)$ 的遍历性假设下,当 $t \rightarrow \infty$ 时,相关向量 $v_q(t)$ 收敛到一个非负极限 $\bar{v}_q = [\bar{v}_{q0}, \dots, \bar{v}_{qm}]$, $\forall q \in Q$,则

$$\bar{v}_q \sum_{l \in L_q} \lambda^{(l)} = \bar{\pi}_q b_q + \sum_{l \in L_q'} \lambda^{(l)} \bar{v}_{q_l} A_l, \quad \forall q \in Q \quad (7)$$

则源1的平均AoI可表示为:

$$\Delta_1 = \sum_{q \in Q} \bar{v}_{q0} \quad (8)$$

3 运用SHS理论分析平均AoI

本章使用上述所介绍的SHS理论来计算源1的平均信息年龄。

在本文的模型中,马尔可夫链的离散状态空间为 $Q = \{0,1,2,\dots,20\}$,如表1所示。例如, $q = 0$ 表示系统为空; $q = 1$ 表示源1的数据包在服务器中,缓冲区和中继为空; $q = 6$ 表示缓冲区中是源2的数据包,服务器中是源1的数据包,中继为空。

连续过程为 $x(t)=[x_0(t),x_1(t),x_2(t),x_3(t)]$, $x_0(t)$ 代表在时刻 t 源1的信息年龄, $x_1(t)$ 代表在时刻 t 中继中数据包的年龄, $x_2(t)$ 代表在时刻 t 服务器中数据包的年龄, $x_3(t)$ 代表在时刻 t 缓冲区中数据包的年龄。

我们的目标是找到 $\bar{v}_q, \forall q \in Q$,通过式(8)计算源1的平均AoI。为此,需要求解线性方程(7)中的变量 $\bar{v}_q, \forall q \in Q$,所以需要确定每个状态下的 $b_q, \bar{\pi}_q$ 和 $\bar{v}_{q_l} A_l$ 。

3.1 确定每个状态下 $\bar{v}_{q_l} A_l$ 的值

由于本文考虑的模型较为复杂,导致有较多的离散状态,使得求解平均AoI很困难,为了解决这个问题,

表1 SHS马尔可夫链状态

状态	缓冲区中数据包的索引	服务器中数据包的索引	中继中数据包的索引	状态	缓冲区中数据包的索引	服务器中数据包的索引	中继中数据包的索引
0	-	-	-	11	-	1	2
1	-	1	-	12	-	2	2
2	-	2	-	13	1	1	1
3	-	-	1	14	2	1	1
4	-	-	2	15	1	2	1
5	1	1	-	16	2	2	1
6	2	1	-	17	1	1	2
7	1	2	-	18	2	1	2
8	2	2	-	19	1	2	2
9	-	1	1	20	2	2	2
10	-	2	1				

对离散状态进行了合并。因为旨在求解源1的平均AoI,所以源2的数据包不相关,即源2的数据包在缓冲区、服务器和中继中年龄都为0,但传输源2的数据包使得产生的源1数据包的等待时间变长,间接增大了源1的信息年龄。基于源2的数据包年龄为0的特性,本文将离散状态空间进一步合并为 $Q = \{0,1,2,3,4,5,6,7\}$,分别对应 $\{(0,0,0), (1,0,0), (0,1,0), (0,0,1), (1,0,1), (1,1,0), (0,1,1), (1,1,1)\}$,在状态 (x,y,z) 中, x 代表缓冲区中的数据包包, $x=0$ 表示缓冲区为空或者缓冲区中是源2的数据包, $x=1$ 表示缓冲区为源1的数据包; y 代表服务器中的数据包包, z 代表中继中的数据包包。

简化后的离散状态 $q(t)$ 的马尔可夫链如图2所示;离散状态 $q_l \rightarrow q_l', \forall l \in L$ 之间的转换以及对连续状态 $x(t)$ 的影响总结如表2所示。

在表2中, $l = 1$ 有3种转换,分别是:新生成的源2数据包直接进入服务器,缓冲区和中继为空;服务器中为源2的数据包,新生成的源2数据包进入缓冲区等待,中继为空;服务器和中继中均为源2的数据包,新生成的源2数据包进入缓冲区。这3种情况下,源1的信息年龄不会发生改变,即 $x_0' = x_0$,这是因为源1的数据包在被传递到目的节点之前不会产生年龄的下降。由于中继、服务器和缓冲区中的数据包包为空或者是来自源2的数据包,所以 $x_1' = 0, x_2' = 0, x_3' = 0$ 。

最终:

$$x' = [x_0, x_1, x_2, x_3] A_1 = [x_0, 0, 0, 0] \quad (9)$$

根据式(9)可知,二进制矩阵 A_1 由式(10)给出:

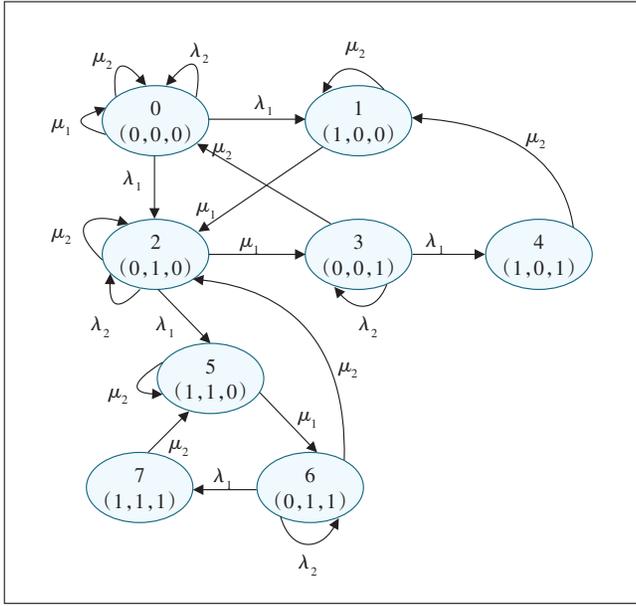


图2 随机混合系统马尔可夫链

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

然后,通过式(10), $\bar{v}_0 A_1$ 由式(11)给出:

$$\bar{v}_0 A_1 = [\bar{v}_{00}, \bar{v}_{01}, \bar{v}_{02}, \bar{v}_{03}] A_1 = [\bar{v}_{00}, 0, 0, 0] \quad (11)$$

$l = 2$ 有3种转换,分别是:缓冲区为空,服务器中是源2的数据包,中继中源2的数据包成功传输到目的节点;缓冲区为空和服务器为空,中继中源2的数据包传输到目的节点;缓冲区和服务器中都是源2的数据包,中继中源2的数据包传输到目的节点。这3种情况下,源2的数据包被目的节点成功接收不会更新源1的AoI,故 $x_0' = x_0$;服务器和缓冲区中为空或者是来自源2的数据包,故 $x_2' = 0, x_3' = 0$;中继为空,所以 $x_1' = 0$ 。

$l = 6$ 的缓冲区中为源1的数据包,服务器中为源2的数据包,中继中源2的数据包成功传输到目的节点,此时中继为空。因为源2的数据包成功传输到目的节点不会更新源1的AoI,故 $x_0' = x_0$;由于缓冲区中源1的数据包是线性增长的,故 $x_3' = x_3, x_1' = 0, x_2' = 0$ 。

$l = 10$ 有2种转换,分别是:服务器中源1的数据包进入中继,缓冲区中源2的数据包进入服务器,此时缓冲区为空;缓冲区为空,服务器中源1的数据包进入中继,此时服务器为空。由于没有源1的数据包到达目的节点,所以 $x_0' = x_0$ 。而源1的数据包在服务器完成服务后到达中继,则中继中源1的年龄继续线性增

表2 图2中马尔可夫链的转换表

l	$q_l \rightarrow q_l'$	$\lambda^{(l)}$	$x A_l$	A_l	$\bar{v}_{q_l} A_l$
1	0 → 0	λ_2	$[x_0, 0, 0, 0]$	A_1	$[\bar{v}_{00}, 0, 0, 0]$
2	0 → 0	μ_2	$[x_0, 0, 0, 0]$	A_2	$[\bar{v}_{00}, 0, 0, 0]$
3	0 → 0	μ_1	$[x_0, 0, 0, 0]$	A_3	$[\bar{v}_{00}, 0, 0, 0]$
4	0 → 1	λ_1	$[x_0, 0, 0, 0]$	A_4	$[\bar{v}_{00}, 0, 0, 0]$
5	0 → 2	λ_1	$[x_0, 0, 0, 0]$	A_5	$[\bar{v}_{00}, 0, 0, 0]$
6	1 → 1	μ_2	$[x_0, 0, 0, x_3]$	A_6	$[\bar{v}_{10}, 0, 0, \bar{v}_{13}]$
7	1 → 2	μ_1	$[x_0, 0, x_3, 0]$	A_7	$[\bar{v}_{10}, 0, \bar{v}_{13}, 0]$
8	2 → 2	λ_2	$[x_0, 0, x_2, 0]$	A_8	$[\bar{v}_{20}, 0, \bar{v}_{22}, 0]$
9	2 → 2	μ_2	$[x_0, 0, x_2, 0]$	A_9	$[\bar{v}_{20}, 0, \bar{v}_{22}, 0]$
10	2 → 3	μ_1	$[x_0, x_2, 0, 0]$	A_{10}	$[\bar{v}_{20}, \bar{v}_{22}, 0, 0]$
11	2 → 5	λ_1	$[x_0, 0, x_2, 0]$	A_{11}	$[\bar{v}_{20}, 0, \bar{v}_{22}, 0]$
12	3 → 3	λ_2	$[x_0, x_1, 0, 0]$	A_{12}	$[\bar{v}_{30}, \bar{v}_{31}, 0, 0]$
13	3 → 0	μ_2	$[x_1, 0, 0, 0]$	A_{13}	$[\bar{v}_{31}, 0, 0, 0]$
14	3 → 4	λ_1	$[x_0, x_1, 0, 0]$	A_{14}	$[\bar{v}_{30}, \bar{v}_{31}, 0, 0]$
15	4 → 1	μ_2	$[x_1, 0, 0, x_3]$	A_{15}	$[\bar{v}_{41}, 0, 0, \bar{v}_{43}]$
16	5 → 5	μ_2	$[x_0, 0, x_2, x_3]$	A_{16}	$[\bar{v}_{50}, 0, \bar{v}_{52}, \bar{v}_{53}]$
17	5 → 6	μ_1	$[x_0, x_2, x_3, 0]$	A_{17}	$[\bar{v}_{50}, \bar{v}_{52}, \bar{v}_{53}, 0]$
18	6 → 6	λ_2	$[x_0, x_1, x_2, 0]$	A_{18}	$[\bar{v}_{60}, \bar{v}_{61}, \bar{v}_{62}, 0]$
19	6 → 2	μ_2	$[x_1, 0, x_2, 0]$	A_{19}	$[\bar{v}_{61}, 0, \bar{v}_{62}, 0]$
20	6 → 7	λ_1	$[x_0, x_1, x_2, 0]$	A_{20}	$[\bar{v}_{60}, \bar{v}_{61}, \bar{v}_{62}, 0]$
21	7 → 5	μ_2	$[x_1, 0, x_2, x_3]$	A_{21}	$[\bar{v}_{71}, 0, \bar{v}_{72}, \bar{v}_{73}]$

注:

$$A_1 = A_2 = A_3 = A_4 = A_5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, A_6 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A_7 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, A_8 = A_9 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, A_{10} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$A_{11} = A_9, A_{12} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, A_{13} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, A_{14} = A_{12},$$

$$A_{15} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, A_{16} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, A_{17} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$A_{18} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, A_{19} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, A_{21} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A_{20} = A_{18}.$$

加,故 $x_1' = x_2$ 。因为缓冲区和服务器为空或者是源2的数据包,故 $x_2' = 0, x_3' = 0$ 。

$l = 13$ 有3种转换,分别是:缓冲区为空,服务器中是源2的数据包,中继中源1的数据包被成功传输到目的节点;缓冲区和服务器均为空,中继中源1的数据包被成功传输到目的节点;缓冲区和服务器中均为源

2的数据包,中继中源1的数据包被成功传输到目的节点。因为源1的数据包被成功接收,所以源1的AoI更新为最新接收的数据包的年龄,故 $x_0' = x_1$;此时缓冲区和服务器为空或为源2的数据包,中继为空,故 $x_1' = 0, x_2' = 0, x_3' = 0$ 。

$l = 16$ 的缓冲区和服务器均为源1的数据包,中继中源2的数据包被成功传输到目的节点。故 $x_0' = x_0, x_1' = 0, x_2' = x_2, x_3' = x_3$ 。

$l = 20$ 的服务器中为源1的数据包,中继中为源1的数据包,新生成的源1数据包进入缓冲区。因为新生成的数据包年龄为0,所以 $x_3' = 0$ 。由于没有源1的数据包到达目的节点,故 $x_0' = x_0$ 。此时服务器和中继中仍为源1的数据包,故 $x_1' = x_1, x_2' = x_2$ 。

$l = 21$ 的缓冲区和服务器中均为源1的数据包,中继中源1的数据包被成功传输到目的节点。故 $x_0' = x_1, x_1' = 0, x_2' = x_2, x_3' = x_3$ 。

3.2 计算每个状态 $q \in Q$ 的 b_q 和 $\bar{\pi}_q$

$x(t)$ 在每个离散状态 $q(t) = q$ 的演化通过 b_q 确定,即 $\dot{x} = b_q$ 。因此 b_q 的第1项在所有离散状态都等于1,即 $b_{q,1} = 1, \forall q \in Q$ 。这是因为源1的信息年龄 $\Delta_1(t) = x_0(t)$ 在所有离散状态下以单位速率随时间增加。如果中继、服务器和缓冲区中是源1的数据包,则 x_i 以速率1线性增长,如果中继、服务器和缓冲区为空或者是源2的数据包,则 x_i 为0。因此 b_q 可以表示为:

$$b_0 = [1,0,0,0], b_1 = [1,0,0,1], b_2 = [1,0,1,0], b_3 = [1,1,0,0], b_4 = [1,1,0,1], b_5 = [1,0,1,1], b_6 = [1,1,1,0], b_7 = [1,1,1,1]$$

为了计算平稳概率向量 $\bar{\pi}_q$,根据式(5)和(6),通过求解线性方程组,最终可求得每种状态 $q \in Q$ 的平稳概率 $\bar{\pi}_q$ 为:

$$\begin{aligned} \bar{\pi}_0 &= 1 / (1 + 2\rho_1 + \rho_1\rho_2 + \rho_1\varphi + \rho_2 + \rho_2^2 + 2\rho_1^2 + \rho_1^2\rho_2 \\ &+ \rho_1\rho_2\varphi + \rho_1\rho_2^2\varphi), \bar{\pi}_1 = 2\rho_1\bar{\pi}_0 + \rho_1\rho_2\bar{\pi}_0, \bar{\pi}_2 = \rho_1\varphi\bar{\pi}_0 \\ \bar{\pi}_3 &= \rho_2\bar{\pi}_0, \bar{\pi}_4 = \rho_2^2\bar{\pi}_0, \bar{\pi}_5 = 2\rho_1^2\varphi\bar{\pi}_0 + \rho_1^2\rho_2\varphi\bar{\pi}_0 \\ \bar{\pi}_6 &= \rho_1\rho_2\varphi\bar{\pi}_0, \bar{\pi}_7 = \rho_1\rho_2^2\varphi\bar{\pi}_0 \end{aligned} \quad (12)$$

$$\text{其中, } \rho_1 = \frac{\lambda_1}{\mu_1}, \rho_2 = \frac{\lambda_1}{\mu_2}, \varphi = \frac{3\mu_2 + \lambda_1}{2\mu_2}$$

3.3 平均AoI计算

将式(12)代入式(7),并求解相应的线性方程组,可以计算出 $\bar{v}_q, \forall q \in Q$ 的值。然后将 $\bar{v}_q, \forall q \in Q$ 的值代入式(8),可以得到源1的平均AoI为:

$$\Delta_1 = \frac{(2 + 6\mu_2\psi)\pi_0}{\lambda_1} + \frac{6 + (3\theta_3 + 12\mu_2\psi + 6\lambda_1\psi + 6\theta_4 + 4)\pi_0}{3\mu_1} + \frac{2 + \theta_5\pi_0}{\mu_2} \quad (13)$$

其中,

$$\psi = \frac{\rho_2(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_1 + 2\mu_2) + \theta_1(\lambda_1 + 2\mu_2) + 2\mu_1\mu_2\theta_2}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_1 + 2\mu_2)(\lambda_1 + 3\mu_2)} \quad (14)$$

其中, $\theta_1 = 2\rho_1 + \rho_1\rho_2 + \rho_1\varphi + \rho_2^2, \theta_2 = (2\rho_1^2 + \rho_1^2\rho_2 + \rho_1\rho_2 + \rho_1\rho_2^2) \times \varphi, \theta_3 = 4\rho_1 + 2\rho_1\rho_2 + 2\rho_2^2, \theta_4 = 1 + 2\rho_1 + \rho_1\rho_2 + \rho_1\varphi + \rho_2^2 + 4\rho_1^2\varphi + 2\rho_1^2\rho_2\varphi + 2\rho_1\rho_2^2\varphi, \theta_5 = \rho_2^2 + (2\rho_1^2 + \rho_1^2\rho_2 + 2\rho_1\rho_2^2)\varphi$ 。

4 数值仿真结果

在前面数学分析的基础上,给出数值仿真结果来研究源1的平均AoI,本文采用Matlab搭建实验平台,分析了源1的生成速率 λ_1 和服务时间 μ_1, μ_2 对平均AoI的影响。

图3所示为源1的生成速率 λ_1 对源1平均AoI的影响,其中 $\mu_1 = 2$ 。从图3可以看出,当 λ_1 增大时,平均AoI先减小,然后略微增大后趋于稳定,因为当服务时间 μ_1 和 μ_2 一定时,源1的生成速率 λ_1 太小,系统长时间等待新的数据包达到,造成平均AoI的增大;当 λ_1 增大到某一个值时,与给定 μ_1 和 μ_2 达到一种平衡,此时平均AoI最小;当 λ_1 继续增大时,由于受到给定的服务时间 μ_1 和 μ_2 的约束,生成的数据包因为系统繁忙而被丢弃,对平均AoI影响不大。

图4所示为中继服务时间 μ_2 对源1的平均AoI的影响,其中 $\lambda_1 = 2$ 。从图4可以看出,随着 μ_2 的增大,平均AoI逐渐降低后趋于稳定; μ_1 从0.25增大到0.5

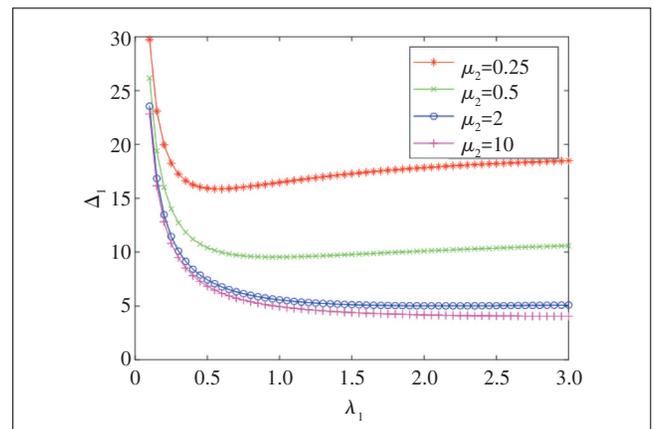


图3 平均AoI和生成速率的关系

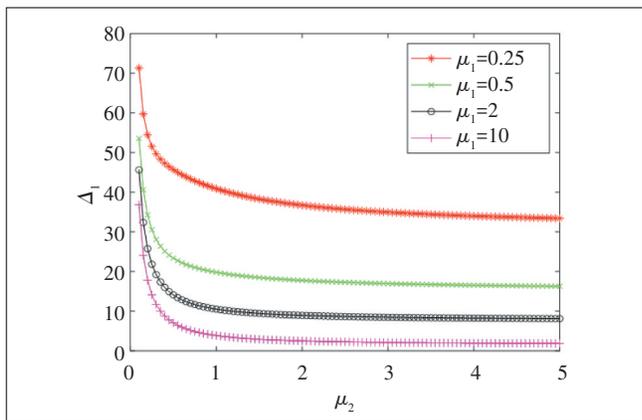


图4 平均AoI和中继服务时间的关系

时,平均AoI显著降低,而 μ_1 从1增大到10时,平均AoI降低幅度不大,说明平均AoI受生成速率和服务时间综合影响,不断增大某一个参数不能得到最优的平均AoI。

图5所示为服务器服务时间 μ_1 和中继服务时间 μ_2 对平均AoI的影响,其中 $\lambda_1 = 1$;从图5可以看出,当 λ_1 一定时, μ_1 和 μ_2 同时增大,在此设定中平均AoI才会趋于最小。

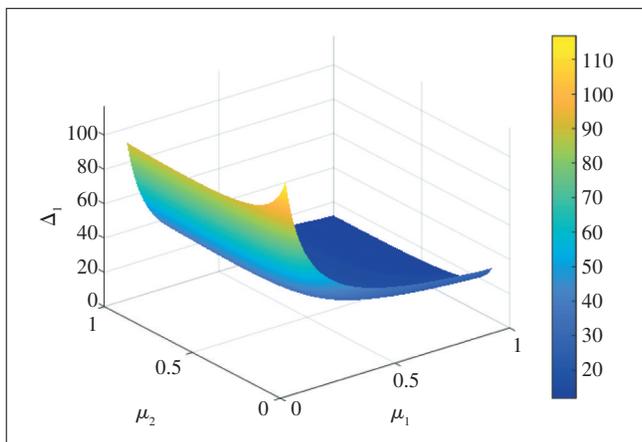


图5 服务器服务时间和中继服务时间与平均AoI关系

以上仿真结果验证了本文提出的离散状态合并思想在运用SHS理论评估此模型平均AoI的有效性。

5 结论

本文研究了中继辅助的多源状态更新系统的AoI,运用SHS理论评估了非抢占策略下的平均AoI,首次对SHS离散状态进行合并,简化了多状态情况下运用SHS理论评估AoI的计算复杂性,数值仿真结果验证了合并的有效性。当前工作还可以扩展到源可

知抢占、源不可知抢占等不同数据包管理策略下的多源中继状态更新系统的AoI研究。本文所做工作对运用SHS理论研究AoI的排队模型进行了补充,并对运用SHS理论评估AoI时离散状态太多而难以求解的问题提供基本解决依据。

参考文献:

- [1] 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. Salt Lake City: IEEE, 2011: 350–358.
- [2] KAUL S, YATES R, GRUTESER M. Real-time status: how often should one update? [C]//2012 Proceedings IEEE INFOCOM. Orlando: IEEE, 2012: 2731–2735.
- [3] YATES R D, KAUL S. Real-time status updating: multiple sources [C]//2012 IEEE International Symposium on Information Theory Proceedings. Cambridge: IEEE, 2012: 2666–2670.
- [4] MOLTAFET M, LEINONEN M, CODREANU M. On the age of information in multi-source queueing models [J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(8): 5003–5017.
- [5] FOUNTOLAKIS E, CHARALAMBOUS T, NOMIKOS N, et al. Information freshness and packet drop rate interplay in a two-user multi-access channel [C]//2020 IEEE Information Theory Workshop (ITW). Riva del Garda: IEEE, 2021: 1–5.
- [6] YATES R D, KAUL S K. The age of information: real-time status updating by multiple sources [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2019, 65(3): 1807–1827.
- [7] YATES R D. The age of information in networks: moments, distributions, and sampling [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2020, 66(9): 5712–5728.
- [8] ABD-ELMAGID M A, DHILLON H S. A stochastic hybrid systems approach to the joint distribution of ages of information in networks [C]//2022 20th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad hoc, and Wireless Networks (WiOpt). Torino: IEEE, 2022: 65–72.
- [9] ABD-ELMAGID M A, DHILLON H S. Joint distribution of ages of information in networks [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2023, 69(9): 5701–5722.
- [10] ASVADI S, ASHTIANI F. Evaluating peak age-of-information via stochastic hybrid systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(12): 16923–16928.

作者简介:

张亮, 西北师范大学硕士在读, 主要研究方向为信息年龄, 随机混合系统等; 贾向东, 西北师范大学硕士生导师, 研究方向为无线通信关键理论与技术; 牛夏秧, 西北师范大学硕士在读, 研究方向为无线通信, 中继辅助通信, 信息年龄等; 薛凯来, 西北师范大学硕士在读, 研究方向为无线通信, 非线性信息年龄等。