

基于信息年龄优化的多信道无线网络调度方法

王恒^{*①} 段思颢^① 谢鑫^{①②}

^①(重庆邮电大学工业物联网与网络化控制教育部重点实验室 重庆 400065)

^②(重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065)

摘要: 信息年龄(AoI)是近年来针对时间敏感类应用所提出的一种描述数据交付及时性的度量标准,它是从网络中目标节点的角度出发,衡量其最新收到的数据包的新鲜程度。在信道资源受限的多信道无线网络场景中,基于信息年龄的链路调度问题需要考虑信道资源和链路冲突的约束。针对上述问题,该文提出一种逐时隙调度链路进行数据传输的调度方法,以最小化网络的平均信息年龄。该文首先将信息年龄的优化问题转化为李雅普诺夫优化问题,然后将冲突约束下的多信道分配问题转换为二分图匹配问题并采用Kuhn-Munkres(KM)算法进行求解,进而得到约束条件下的链路调度方法。仿真结果表明,所提方法有效地优化了网络中的平均信息年龄,提升了网络数据的新鲜度。

关键词: 信息年龄; 网络调度; 多信道网络; 李雅普诺夫优化

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2022)02-0702-08

DOI: 10.11999/JEIT210107

Scheduling Method for Multi-channel Wireless Networks Based on Optimization of Age of Information

WANG Heng^① DUAN Sixie^① XIE Xin^{①②}

^①(Key Laboratory of Industrial Internet of Things and Networked Control, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

^②(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: Age of Information (AoI) is a novel metric that describes the timeliness of data delivery for time-sensitive applications, which measures the freshness of the most recently received packet from the perspective of destination node. In the multi-channel wireless network scenario with limited channel resources, the constraints of channel resources and link conflicts should be considered in the link scheduling with respect to AoI. To address this issue, in this paper, a time slot based scheduling method for data transmission to minimize the average AoI in the network is proposed. In this method, the optimization problem of AoI is first formulated into a Lyapunov optimization problem. Then the multi-channel conflict problem is converted to find the maximum matching policy of bipartite graph, which is solved by Kuhn-Munkres (KM) algorithm. Thus, a scheduling policy under constraints is obtained. The simulation results demonstrate that the proposed method optimizes effectively the average AoI and improves the freshness of data in the network.

Key words: Age of Information (AoI); Network scheduling; Multi-channel network; Lyapunov optimization

收稿日期: 2021-01-21; 改回日期: 2021-05-25; 网络出版: 2021-06-09

*通信作者: 王恒 wangheng@cqupt.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1702000), 重庆市自然科学基金(cstc2019jcyj-jqX0012, cstc2019jcyj-msxmX0444), 重庆邮电大学博士研究生人才培养项目(BYJS202001)

Foundation Items: The National Key R&D Program of China (2018YFB1702000), The Natural Science Foundation of Chongqing (cstc2019jcyj-jqX0012, cstc2019jcyj-msxmX0444), The Ph.D. Talent Training Program of Chongqing University of Posts and Telecommunications (BYJS202001)

1 引言

随着无线网络技术的发展,数据交付的及时性对一些实时性要求较高的应用显得尤为重要。例如,在自动驾驶场景中,及时地传输汽车的速度、位置信息对汽车行驶的安全问题十分关键^[1];化工生产场景中,实时的现场数据是安全生产的基本保障;环境监控场景中,环境温度、语音视频等一些数据交付的及时性直接影响用户是否能及时做出正确的决策^[2]。因此,如何提高时间敏感类应用中数据交付的及时性,成为无线网络研究所面临的重要挑战。

信息年龄(Age of Information, AoI)是新近提出的一种评价数据及时性的度量标准,用以从目标节点的角度衡量数据的新鲜程度,表示为目标节点最新接收到的数据包自其生成以来所经过的时间^[3]。相较于传统的衡量数据及时性度量标准,AoI的刻画更加全面。例如,时延是从数据包本身的角度出发,度量数据包从网络中一端发送到另一端的过程中经历的时间。而AoI的度量则除了数据包的时延部分,还包括了数据包在数据源由于没有及时被调度,以及在目标节点没有进行更新而带来的停留时间。因此,AoI的大小刻画了目标节点最近接收到的数据包的新鲜程度,通过对网络中的AoI进行优化,能够更好地满足网络对数据交付及时性的要求。

近年来,众多学者以AoI为优化目标,从不同队列模型、数据更新方式、链路调度等角度展开相关研究^[3-10]。尤其是在多用户无线网络场景中,最小化平均AoI的链路调度问题受到了重点关注,主要集中于单信道无线网络系统进行研究^[7-10]。而在现实中,多信道机制也是无线网络系统中广泛使用的通信技术。例如,以工业无线传感器网络为设计对象的工业无线网络标准技术(Wireless networks for Industrial Automation Process Automation, WIA-PA)、无线可寻址远程传感器高速通道的开放通信标准(Wireless Highway Addressable Remote Transducer, WirelessHART)等国际标准普遍采用了多信道通信技术,能够利用多条信道进行数据传输,有效提升无线网络的容量和性能^[11]。由于多信道无线网络中存在信道冲突和链路冲突等问题,因此AoI链路调度策略的设计更加复杂。

面对这一挑战,本文基于存在信道冲突和链路冲突约束的多信道无线网络,综合运用李雅普诺夫偏移调度方法和Kuhn-Munkres(KM)匹配算法,提出最小化平均AoI的在线链路调度算法,有效地提高网络的实时性。

2 相关工作

AoI作为一种新的度量指标,最初由Kaul等人^[3]引入,用以从目标节点的角度量化数据的新鲜度。自此以后,学术界结合不同的排队模型,从源更新频率、服务率等方向展开了AoI相关的理论研究;并且在无线网络场景中,综合考虑了信道状态、吞吐量、能量等因素,对优化AoI的调度方法进行了广泛而深入的研究。Kaul等人^[3]结合排队论研究了AoI的计算和迭代过程,并在随机调度策略下给出了平均AoI与服务率、到达率间的解析式。Kam等人^[4]探究了固定截止时间约束和随机指数截止时间约束下,服务率对平均AoI的影响。文献^[5,6]在单源单目的地的边缘计算场景下,分析了不同计算模式下的AoI。而在无线网络的链路调度方面,文献^[7]研究了周期性数据更新下逐时隙链路调度的问题,提出了随机、贪婪、李雅普诺夫优化、Whittle Index等策略进行链路调度以优化网络的平均AoI。文献^[8]针对数据随机到达的场景,基于马尔可夫决策过程分别提出了离线和在线调度算法。文献^[9]和文献^[10]分别研究了在吞吐量约束和能量约束下的优化AoI的链路调度问题。

上述文献^[7-10]均是在单信道网络场景中对AoI链路调度方法进行研究。而在多信道无线网络场景中,文献^[12]考虑了能量收集的无线传感器网络,研究了最小化平均AoI的调度问题,开发了基于Whittle Index的低复杂度算法。文献^[13]基于多信道网络场景,分别提出了最小化峰值AoI和平均AoI的调度策略。文献^[14,15]考虑了多信道无线网络中的链路干扰约束,采用遍历的方式构造可行的调度集合,推导出最小化平均AoI的调度策略。文献^[16]针对信道状态未知条件下的多信道网络链路调度问题进行了研究,并分别提出了基于虚拟队列的策略和Age-based策略。文献^[17]考虑了非均匀状态更新的多信道传输问题,并分别在任意采样和随机采样两种更新方式下,将优化问题构造为马尔可夫决策过程,研究最小化平均AoI的调度策略。

以上多信道场景中AoI的相关研究均未对链路冲突和信道冲突进行综合考虑,而且现有的AoI的调度研究大多是在假设数据产生时间已知的情况下进行策略设计^[7-17],但在实际网络中,获取数据的产生状态需要消耗一定的网络资源。因此,在数据产生状态未知的情况下,针对多信道无线网络中可能同时存在的链路冲突和信道冲突问题,开发最小化系统平均AoI的调度方法是本文的研究重点。

3 系统模型

考虑一个包含多个源节点和目标节点的网络, 多个源节点需要向对应的目标节点进行数据传输。多个源节点 s_1, s_2, \dots, s_N 通过 M 个互不干扰的正交信道向序号为 l_1, l_2, \dots, l_a 的目标节点发送最新的数据包, 源节点的索引按照顺序递增。源节点 s_1, s_2, \dots, s_{l_1} 对应序号为 l_1 的目标节点, 源节点 $s_{l_1+1}, s_{l_1+2}, \dots, s_{l_2}$ 对应序号为 l_2 的目标节点, 源节点 $s_{l_{a-1}+1}, s_{l_{a-1}+2}, \dots, s_{l_a}$ 对应序号为 l_a 的目标节点。在图1的拓扑结构示意图中, l_1 为目标节点的序号, 其对应的源节点为 $\{s_1, s_2, s_3, s_4, s_5\}$, 且 $l_1 = 5$ 。值得说明的是, 图1所示的网络模型能够应用到如WIA-PA网络等现实的无线通信系统中。WIA-PA是主流的工业无线网络标准, 采用分簇结构, 每个簇内的源节点与簇头节点进行数据传输; 同时, WIA-PA还采用了时隙和多信道通信机制, 并通过网络管理器对时隙、信道资源进行管理, 使各条链路在不同的时隙、信道上进行通信, 以避免相互干扰, 为数据的实时传输提供保障。因此, 本模型能够契合于实际的无线通信系统。

网络中的时间按照时隙进行划分, 在每个时隙的起始处, 源节点首先向目标节点进行数据传输, 目标节点在成功收到数据包后, 保留该源节点的最近一次成功传输数据包的时隙 T_i , 并更新源节点的AoI值。各源节点在每个时隙产生新数据包的过程服从概率为 α_i 的伯努利分布, 且源节点只保存最新产生的数据包, 在新数据包产生时会清空过时的数据包。由于信道中可能存在噪声干扰, 每个源节点 $i \in \{1, 2, \dots, N\}$ 在每个信道 $j \in \{1, 2, \dots, M\}$ 的传

输成功率 $P_{i,j}$ 可能不同, 该概率在不同时隙保持不变。令 $S_{i,j} \in \{0, 1\}$ 表示源节点 i 在当前时隙通过信道 j 发送数据包时的信道状态良好与否, 其中 $S_{i,j} = 1$ 表示该信道状态良好。

考虑到频谱资源的限制, 假设有 $M (M < a)$ 个可用正交信道。由于存在链路冲突问题, 不同链路若同时在一个信道进行数据传输会导致数据碰撞, 因此每个信道也只能分配给一条链路传输数据。此外, 在通信设备的能力限制下, 同一目标节点也只能支持单个源节点进行数据传输。

根据AoI的定义, 各源节点的AoI表示为当前时隙 t 与各源节点最近一次成功传输的数据包的产生时隙 $G_i(t)$ 之间的差值。在未能成功地进行数据传输时, 由于来自源节点的数据包的产生时隙 $G_i(t)$ 未发生变化, 其AoI值随时隙的递增保持线性增长。 $A_i(t)$ 表示为源节点 i 在 t 时隙的AoI值, 其迭代过程可以表示为

$$A_i(t) = \begin{cases} A_i(t-1) + 1, & \text{其他情况} \\ t - G_i(t), & \text{成功进行数据传输} \end{cases} \quad (1)$$

对于网络中的所有链路, 通常用网络中的平均AoI衡量网络中的数据新鲜程度, 令 C^{avg} 表示网络中的平均AoI, 具体为

$$C^{\text{avg}} = \lim_{K \rightarrow \infty} \frac{1}{KN} \sum_{t=1}^K \sum_{i=1}^N A_i(t) \quad (2)$$

式(2)中 C^{avg} 衡量当时隙数 K 趋于无穷时, 网络中的AoI的全局平均值, C^{avg} 越低则该网络中目标节点的数据新鲜程度越高。本文的目标是设计一种调度方法, 优化网络中的平均AoI, 提升数据交付的及时性。

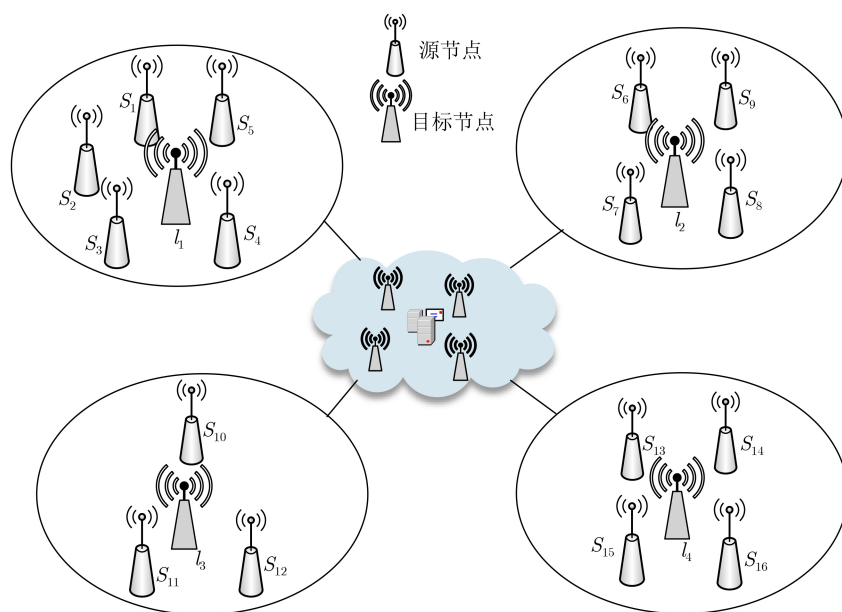


图1 网络拓扑

4 调度方法

在本文的优化问题中，需要逐时隙分配信道给不同链路进行数据传输以最小化网络中的平均AoI。首先，将AoI的优化问题构造为李雅普诺夫优化问题^[18]，提出了Max-Weight调度策略来最小化系统的李雅普诺夫漂移。然后，针对多信道无线网络中存在的信道冲突问题，运用KM匹配算法求解最小偏移量的链路调度组合。

4.1 Max-Weight调度策略

所提方法使用Max-Weight调度策略逐时隙通过最小化李雅普诺夫漂移量来进行调度决策。在Max-Weight调度策略中，李雅普诺夫函数刻画了在单个时隙下整个网络中AoI平方的大小，其偏移量则表示随着时隙的增加，相邻时隙中AoI平方的变化趋势。因此运用Max-Weight调度策略通过优化下一时隙的AoI，能够有效优化网络中的平均AoI^[18]。

本文定义李雅普诺夫函数为

$$L[A(t)] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i^2(t) \quad (3)$$

相应的李雅普诺夫的偏移为

$$\Delta(A(t)) = E\{L[A(t)] - L[A(t-1)] | A(t-1)\} \quad (4)$$

用 $d_{i,j}$ 表示对源节点 i 通过信道 j 进行的调度决策， $d_{i,j} \in \{0, 1\}$ 表示该源节点在当前时隙是否通过信道 j 进行数据传输。由于信道噪声的干扰，当且仅当该时隙下对链路进行调度($d_{i,j} = 1$)且信道状态良好($S_{i,j} = 1$)时，能成功进行数据传输。而未能进行成功传输时，源节点的AoI相较上一时隙递增1，于是根据不同的调度决策和信道状态，李雅普诺夫的偏移量表示为

$$\begin{aligned} \Delta(A(t)) = & \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M d_{i,j} \{P_{i,j} \{E[A_i^2(t) | d_{i,j}=1, S_{i,j}=1] \\ & - A_i^2(t-1)\} + (1 - P_{i,j}) [2A_i(t-1) + 1]\} \\ & + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(1 - \sum_{j=1}^M d_{i,j}\right) [2A_i(t-1) + 1] \end{aligned} \quad (5)$$

在式(5)中，其调度决策 $d_{i,j}$ 的约束条件将在下

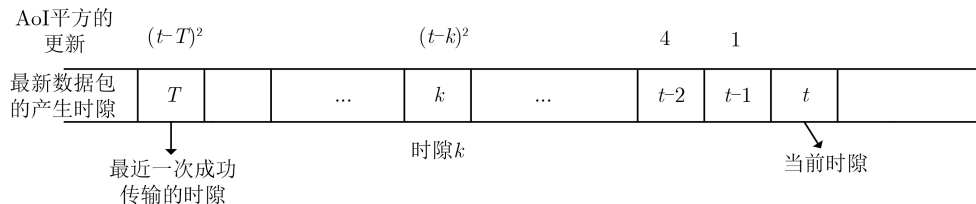


图2 数据包更新时隙分析

一节进行探究。首先讨论 $E[A_i^2(t) | d_{i,j} = 1, S_{i,j} = 1]$ ，即当成功进行数据传输时AoI平方的期望。当源节点 i 成功进行数据传输时，目标节点对该源节点的AoI更新为 $A_i(t) = t - G_i(t)$ 。源节点更新数据包的过程服从伯努利分布，时隙模型如图2所示，当源节点 i 的最新数据包更新时隙 $G_i(t)$ 为 $t-1$ 时，AoI的平方更新为1，该事件发生的概率为 α_i ；若源节点 i 的最新数据包更新时隙为 $t-2$ ，则该事件的概率为 $(1-\alpha_i)\alpha_i$ ；当其更新时隙为 $t-k$ 时，AoI的平方更新为 k^2 ，其发生概率为 $(1-\alpha_i)^{k-1}\alpha_i$ ；其新的最新数据包产生时隙最早为该源节点最近一次成功传输数据包的时隙 T_i ，AoI的平方更新为 $(t-T_i)^2$ ，该事件的概率为 $(1-\alpha_i)^{t-T_i-1}\alpha_i$ 。当上一次成功调度至当前时隙均未产生新的数据包时，AoI的平方更新为 $[A_i(t-1) + 1]^2$ ，该事件的概率为 $(1-\alpha_i)^{t-T_i}$ 。

因此当节点成功进行数据传输时其AoI平方的分布为

$$A_i^2(t) = \begin{cases} 1, & \alpha_i \\ 4, & (1-\alpha_i)\alpha_i \\ \vdots & \\ k^2, & (1-\alpha_i)^{k-1}\alpha_i \\ (t-T_i)^2, & (1-\alpha_i)^{t-T_i-1}\alpha_i \\ [A_i(t-1) + 1]^2, & (1-\alpha_i)^{t-T_i} \end{cases} \quad (6)$$

则各源节点在成功调度后AoI的平方的期望表示为

$$\begin{aligned} E[A_i^2(t) | d_{i,j} = 1, S_{i,j} = 1] \\ = \sum_{k=1}^{t-T_i} k^2 \alpha_i (1-\alpha_i)^{k-1} + (1-\alpha_i)^{t-T_i} [A_i(t-1) + 1]^2 \end{aligned} \quad (7)$$

将式(7)代入式(5)中可得

$$\begin{aligned} \Delta(A(t)) \\ = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M d_{i,j} \left\{ P_{i,j} \left[\sum_{k=1}^{t-T_i} k^2 \alpha_i (1-\alpha_i)^{k-1} \right. \right. \\ \left. \left. + (1-\alpha_i)^{t-T_i} (A_i(t-1) + 1)^2 - (A_i(t-1) + 1)^2 \right] \right\} \\ + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 2A_i(t-1) + 1 \end{aligned} \quad (8)$$

根据式(8), $d_{i,j}$ 为变化项且只影响首项, 定义Max-Weight调度策略的源节点*i*在信道*j*的权重函数 $W_{i,j}$ 为

$$W_{i,j} = P_{i,j} \left[\sum_{k=1}^{t-T_i} k^2 \alpha_i (1-\alpha_i)^{k-1} + (1-\alpha_i)^{t-T_i} \cdot (A_i(t-1)+1)^2 - (A_i(t-1)+1)^2 \right] \quad (9)$$

由式(9)分析, $\alpha_i(1-\alpha_i)^{k-1}$ 为AoI平方的分布概率, 那么 $\sum_{k=1}^{t-T_i} \alpha_i(1-\alpha_i)^{k-1} + (1-\alpha_i)^{t-T_i} = 1$ 。 $t-T_i$ 为当前时隙与最近一次成功调度时隙之间的差值, 则 $t-T_i > 1$ 。对于式中 $A_i(t-1)+1$, 根据信息年龄的定义, 有 $A_i(t-1)+1 = t - G_i(t-1) + 1$, 其中 $G_i(t-1)$ 为最近一次成功调度的数据包产生时隙, 而 T_i 为最近一次成功传输的时隙, 则 $G_i(t-1) < T_i$, 于是 $t-T_i < A_i(t-1)+1$, 从而可以得到

$$\begin{aligned} W_{i,j} &= P_{i,j} \left[\sum_{k=1}^{t-T_i} k^2 \alpha_i (1-\alpha_i)^{k-1} + (1-\alpha_i)^{t-T_i} \cdot (A_i(t-1)+1)^2 \right. \\ &\quad \left. - \left[\sum_{k=1}^{t-T_i} \alpha_i (1-\alpha_i)^{k-1} + (1-\alpha_i)^{t-T_i} \right] \cdot [(A_i(t-1)+1)^2] \right] \\ &= P_{i,j} \left[\sum_{k=1}^{t-T_i} [\alpha_i (1-\alpha_i)^{k-1} \cdot (k^2 - (A_i(t-1)+1)^2)] \right] < 0 \quad (10) \end{aligned}$$

要最小化目标函数 $\Delta[A(t)]$, 则根据所有链路在不同信道下的权重函数值, 在满足信道的资源约束和节点间的冲突约束下, 选择最小的权重函数值的链路调度组合, 使得链路组合的调度决策 $d_{i,j} = 1$ 。

4.2 信道冲突分析

在本文所考虑的网络中, 节点和信道在数据传输过程中存在冲突, 在冲突约束下合理地进行调度决策是调度方法需要考虑的重要问题。

由于网络中的可用信道数量 M 有限, 因此调度决策需要满足约束

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M d_{i,j} \leq M \quad (11)$$

节点间的链路冲突是在设备受限情况下, 一个目标节点在同一时隙中接受来自不同源节点的数据包时会发生数据碰撞, 从而导致传输失败。对于目

标节点 l_b 和其对应的源节点 $s_{l_{b-1}+1}, s_{l_{b-1}+2}, \dots, s_{l_b}$ 的调度决策需要满足约束

$$\sum_{i=l_{b-1}+1}^{l_b} \sum_{j=1}^M d_{i,j} \leq 1 \quad (12)$$

此外, 当一条信道分配给不同的链路时也会产生信道冲突。因此, 同一时隙一条信道只能分配给一条链路, 对于同一信道*j*, 不同节点的调度决策需要满足约束

$$\sum_{i=1}^N d_{i,j} \leq 1 \quad (13)$$

所提方法的决策过程是根据权重函数, 在满足所有约束条件下, 挑选出最小的李雅普诺夫偏移量的链路调度组合。首先考虑使用遍历所有可行的调度集合, 因为需要遍历链路和信道的所有组合, 所以在该方法下其算法的时间复杂度将达到 $O(N^M)$ 。在链路和信道的数量的值较大时, 遍历的算法复杂度过高。因此, 本文将结合KM匹配算法得出一种复杂度较低的信道匹配方法。

4.3 Kuhn-Munkres匹配算法

KM匹配算法用以求解带权二分图的最大权匹配问题。其中二分图作为一种图论的模型, 用于构建两个集合中各点间的边的权重关系。最大匹配为满足每个点最多和一个点匹配的条件下, 使得匹配的边权值最大的匹配组合^[19]。在本文的方法中, 将权重函数值取反并令其定义为匹配的边权, 在约束条件下通过KM匹配算法所得的最大权匹配即为最小的李雅普诺夫偏移量的链路调度组合。

首先, 将多信道冲突和链路调度问题转换为二分图的最大匹配问题, 能够满足约束式(11)、式(13), 即信道数量有限且一个信道只能和一条链路进行匹配的约束。但若直接构建源节点和信道间的二分图, 则无法满足约束条件式(12), 该约束使得同一目标节点下只有一条链路可以被调度。

然后, 针对约束条件式(12), 为了满足最小化李雅普诺夫偏移量的目标, 同一目标节点*b*在信道*j*下只会选择最小的权重函数值 $W^{b,j}$, 即 $W^{b,j} = \min\{W_{i,j} | i \in (l_{b-1}+1, l_{b-1}+2, \dots, l_b)\}$ 。因此, 需要构建目标节点和信道之间的二分图, 其中目标节点与信道之间的边权定义为该目标节点和信道下不同源节点的最小权重函数值。在目标节点与信道之间进行最大匹配的情况下, 会使得目标节点与信道间进行单一匹配, 于是相同目标节点下只会存在单个源节点传输数据, 从而满足约束条件式(12)。表1给出了KM匹配算法的具体流程。

表 1 KM匹配算法执行过程

| KM匹配算法求解带权二分图的最大权匹配 | |
|---------------------|--|
| 步骤 1 | 构建二分图 G 的点集为信道的点集 $\{x_1, x_2, \dots, x_M\}$, 目标节点的点集 $\{y_1, y_2, \dots, y_a\}$ 。定义信道 x_j 和目标节点 y_b 的边权为 $w(x_j, y_b) = \max \{-W_{i,j} i \in (y_{b-1} + 1, y_{b-1} + 2, \dots, y_b)\}$ 。 |
| 步骤 2 | 定义信道点集和目标节点的点集的顶标值, 对于信道 x_j 的顶标值为 $L(x_j) = \max \{w(x_j, y_b) b \in (1, 2, \dots, a)\}$, 即为信道 x_j 在所有目标节点下最大的边权值; 初始化信道点集的顶标值, 对于信道 y_b 的顶标值 $L(y_b) = 0$ 。 |
| 步骤 3 | 构建相等子图 G_e , 用来保留二分图 G 中所有的点集和顶标值。 |
| 步骤 4 | for $j = 1, 2, \dots, M$ |
| | 在相等子图 G_e 中添加满足匹配条件 $L(x_j) + L(y_b) = w(x_j, y_b)$ 的边, 使用匈牙利算法在 G_e 中寻找其最优匹配 ^[49] 。若未找到其最优匹配, 则根据匈牙利算法中形成的交错树, 该交错树为匈牙利算法中所访问的目标节点与信道间形成的点集, 取相等子图点集中所有信道节点 x'_j 被访问到而目标节点 y'_b 没被访问到的边, 求解交错树中的各松弛量 $L(x'_j) + L(y'_b) - w(x'_j, y'_b)$ 的最小值 q , 将交错树中所有信道顶标减小 q , 目标节点顶标增加 q , 再重新匹配该信道。 |
| | end for |

如前所述, 所提方法使用Max-Weight调度策略并结合KM匹配算法, 形成的最大匹配即为最小的李雅普诺夫偏移量的链路调度组合。Max-Weight调度策略基于李雅普诺夫优化, 在信道约束条件下最小化李雅普诺夫偏移量 $\Delta[A(t)]$ 。通过数据产生概率和传输成功率对李雅普诺夫偏移量进行计算分析, 得出不同源节点在不同信道下的权重函数, 然后使用KM匹配算法获得最大权匹配, 令匹配的链路组合的调度决策 $d_{i,j} = 1$ 。在复杂度方面, 相较于遍历所有可行的链路调度组合的复杂度 $O(N^M)$, KM匹配算法在递归过程中的算法复杂度为 $O(Ma)$, 从而其算法的总体时间复杂度为 $O(Ma^2)$ 。由此可见所提方法在优化网络中平均AoI的同时还能进一步降低复杂度。

5 仿真性能与分析

本文使用Matlab软件搭建仿真验证平台, 分别在不同的数据包产生概率、信道传输成功率、源节点数量、目标节点数量和信道数量等网络参数设置下进行了仿真实验, 验证算法的性能优劣。所用计算机的配置参数为: Intel(R) Core(TM) i5-8500 双核处理器; 3.0 GHz主频; 16GB RAM; Windows10 操作系统。

当网络中源节点及其对应的目标节点的比例保持一致时有利于提升网络的性能^[20], 设定网络中不同目标节点均有相同数量的源节点进行数据传输, 网络中的初始信息年龄均为1^[3], 仿真时隙数为 10^6 。对文献[7]中的贪婪(Greedy)调度策略、随机(Randomized)调度策略和文献[16]中的Age-based策略进行改进, 并与所提方法进行对比分析。改进的贪婪调度策略运用KM匹配算法, 在避免冲突的情况下选择最大AoI的链路组合进行调度。改进的Age-based策略则选择满足 $m_t = \arg \max_{m \in A} \sum_{e \in m}$

$\gamma_e[A_e^2(t) + \beta A_e(t)]$ 的链路组合进行调度, 其中 γ_e 为信道传输成功率, β 是一个超参数, 设置为1^[16]。而改进的随机调度策略在源节点中随机选择节点调度, 为了避免冲突的发生, 首先随机选择目标节点, 然后在选出的目标节点下随机选择源节点进行调度。

图3展示了几种算法下网络中的平均AoI随信道数量递增的变化趋势, 其中传输成功概率和数据包产生概率在区间[0.2, 1]不等, 源节点数量 $N = 100$, 目标节点数量为 $a = 20$ 。从图中可以看出随着信道数量的递增, 网络中的平均AoI呈下降趋势。这是由于信道数量的增加, 源节点被调度的机会更大, 从而降低了其在目标节点处的AoI。

图4(a)展示了几种算法下网络中的平均AoI随着信道传输成功率基准值 P_B 递增的变化趋势, 不同信道传输成功率为 P_B 减去一个[0, 0.1]间的随机数, 即 $P_{i,j} = P_B - 0.1 \times \text{rand}(1)$ 。而数据包产生概率在区间[0.5, 0.8]不等, 源节点数量 $N = 100$, 目标节点数量 $a = 20$, 信道数量 $M = 4$ 。在传输成功率较小时, 几种调度方法的性能差异也比较明显, 随着 P_B 的增加, 贪婪调度策略和Age-based策略的优化性能逐步接近Max-Weight策略。这是因为Age-based策略和Max-Weight策略的制定均与信道传输

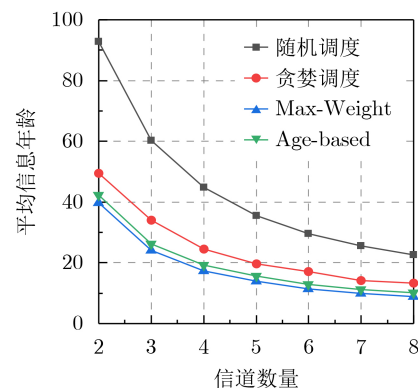


图 3 不同信道数量下4种方法对比

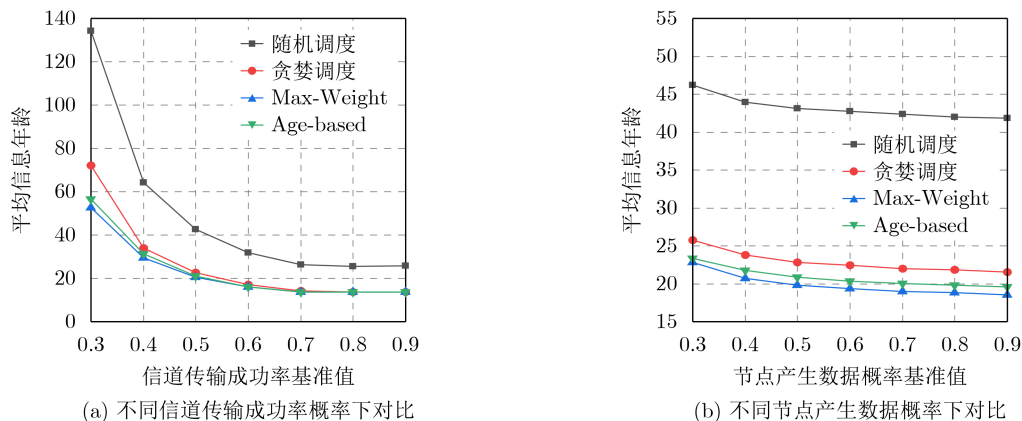


图4 不同信道传输成功率和节点产生数据概率下对比

成功率密切相关, 随着 P_B 的增加, 不同信道传输成功率的差异性逐渐减小, 对这两种策略的影响逐渐减弱, 因此, 当 P_B 接近1时, 贪婪调度策略、Age-based策略和Max-Weight策略更有可能做出相似的调度决策, 3种算法的性能基本相当。图4(b)给出了传输成功率在区间 $[0.5, 0.8]$ 不等, 而数据产生概率为一个基准值 α_B 减去一个 $[0, 0.1]$ 间的随机数, 即 $\alpha_i = \alpha_B - 0.1 \times \text{rand}(1)$ 时, 源节点的数据包产生概率对平均AoI的影响。可以看出随着数据产生概率的增加, 平均AoI呈现出递减的趋势。这是因为频繁的数据产生可以保持源节点处数据的新鲜度, 使得数据产生时间趋近于当前时间。

图5展示了几种算法下网络中的平均AoI随着源节点数量递增的变化趋势, 其中源节点的传输成功概率和数据包产生概率在区间 $[0.2, 1]$, 目标节点数量 $a = 20$, 信道数量 $M = 4$ 。可以看出随着节点数量的递增, 所有方法的AoI基本呈线性增长的趋势。这是由于随着源节点数量的增加, 每个源节点被调度的机会相应变小。

考虑到算法的实用性, 表2给出了使用Matlab软件进行仿真时, 所提方法的平均执行时间。在不同节点规模下, 其平均执行时间在1 ms以内, 而在实际网络中, 调度算法可运行于系统的管理器(如WIA-PA网络的网关设备和主控计算机)中, 能够较好地满足工业无线网络的传输需求。

综上所述, 相较于3种改进的对比策略, 所提方法均表现出更好的优化性能。特别是在网络中的信道传输成功率和源节点数量相差较大时, 所提方法由于对各种网络参数的综合考虑, 其优化性能对比其他3种算法, 有显著的提升。

6 结束语

本文提出一种在考虑链路冲突约束的多信道无线网络中基于平均AoI优化的调度方法。本方法将

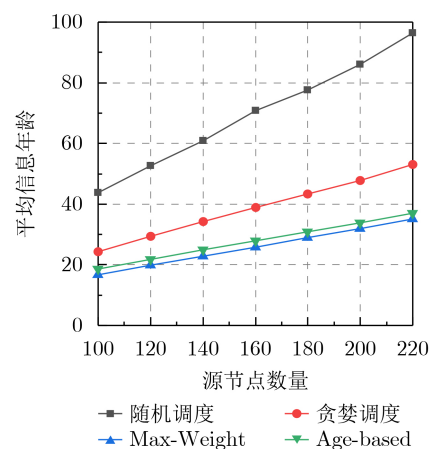


图5 不同源节点数量下几种方法对比

表2 Max-Weight方法的平均执行时间(ms)

| | 节点数量 | | | | |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 |
| 平均运行时间 | 0.354 | 0.457 | 0.557 | 0.743 | 0.939 |

平均AoI优化问题转换为李雅普诺夫优化问题, 利用Max-Weight调度策略对李雅普诺夫偏移量进行优化, 并结合KM匹配算法解决网络中的信道冲突问题。理论分析和仿真验证表明, 该场景下Max-Weight调度策略优于改进的对比策略, 能够有效优化网络中的平均AoI, 提升网络数据传输的及时性。在未来的研究工作中, 将考虑在多信道无线网络场景下, 结合吞吐量、截止时间和能耗等因素对AoI进行联合优化, 使之能够在提升数据传输的及时性的同时满足更多的应用需求。

参考文献

- [1] CHEN Maohong, XIAO Yong, LI Qiang, *et al.* Minimizing age-of-information for fog computing-supported vehicular networks with deep Q-learning[C]. 2020 IEEE International Conference on Communications, Dublin, Ireland, 2020: 1-6.
- [2] LI Jie, ZHOU Yong, and CHEN He. Age of information for

- multicast transmission with fixed and random deadlines in IoT systems[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(9): 8178–8191. doi: [10.1109/JIOT.2020.2981144](https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.2981144).
- [3] KAUL S, YATES R, and GRUTESER M. Real-time status: How often should one update?[C]. 2012 Proceedings IEEE INFOCOM, Orlando, USA, 2012: 2731–2735.
- [4] KAM C, KOMPPELLA S, NGUYEN G D, *et al.* On the age of information with packet deadlines[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2018, 64(9): 6419–6428. doi: [10.1109/TIT.2018.2818739](https://doi.org/10.1109/TIT.2018.2818739).
- [5] KUANG Qiaobin, GONG Jie, CHEN Xiang, *et al.* Age-of-information for computation-intensive messages in mobile edge computing[C]. 2019 11th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), Xi'an, China, 2019: 1–6.
- [6] KUANG Qiaobin, GONG Jie, CHEN Xiang, *et al.* Analysis on computation-intensive status update in mobile edge computing[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(4): 4353–4366. doi: [10.1109/TVT.2020.2974816](https://doi.org/10.1109/TVT.2020.2974816).
- [7] KADOTA I, SINHA A, UYSAL-BIYIKOGLU E, *et al.* Scheduling policies for minimizing age of information in broadcast wireless networks[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2018, 26(6): 2637–2650. doi: [10.1109/TNET.2018.2873606](https://doi.org/10.1109/TNET.2018.2873606).
- [8] HSU Y P, MODIANO E, and DUAN Lingjie. Age of information: Design and analysis of optimal scheduling algorithms[C]. 2017 IEEE International Symposium on Information Theory, Aachen, German, 2017: 561–565.
- [9] KADOTA I, SINHA A, and MODIANO E. Scheduling algorithms for optimizing age of information in wireless networks with throughput constraints[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2019, 27(4): 1359–1372. doi: [10.1109/TNET.2019.2918736](https://doi.org/10.1109/TNET.2019.2918736).
- [10] TANG Haoyue, WANG Jintao, SONG Linqi, *et al.* Minimizing age of information with power constraints: multi-user opportunistic scheduling in multi-state time-varying channels[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2020, 38(5): 854–868. doi: [10.1109/JSAC.2020.2980911](https://doi.org/10.1109/JSAC.2020.2980911).
- [11] 路新华, MANCHÓN C N, 王忠勇, 等. 大规模MIMO系统上行链路时间-空间结构信道估计算法[J]. *电子与信息学报*, 2020, 42(2): 519–525. doi: [10.11999/JEIT180676](https://doi.org/10.11999/JEIT180676).
LU Xinhua, MANCHÓN C N, WANG Zhongyong, *et al.* Channel estimation algorithm using temporal-spatial structure for up-link of massive MIMO systems[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(2): 519–525. doi: [10.11999/JEIT180676](https://doi.org/10.11999/JEIT180676).
- [12] 赵悦超, 杨涛, 胡波. 无线传感器网络中基于信息年龄的状态更新策略[J]. *微电子学与计算机*, 2020, 37(11): 29–34.
- ZHAO Yuechao, YANG Tao, and HU Bo. A status updating policy based on age of information in wireless sensor network[J]. *Microelectronics & Computer*, 2020, 37(11): 29–34.
- [13] SOMBABU B and MOHARIR S. Age-of-information based scheduling for multi-channel systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(7): 4439–4448. doi: [10.1109/TWC.2020.2983670](https://doi.org/10.1109/TWC.2020.2983670).
- [14] TALAK R, KARAMAN S, and MODIANO E. Improving age of information in wireless networks with perfect channel state information[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2020, 28(4): 1765–1778. doi: [10.1109/TNET.2020.2996237](https://doi.org/10.1109/TNET.2020.2996237).
- [15] TALAK R, KARAMAN S, and MODIANO E. Minimizing age-of-information in multi-hop wireless networks[C]. 2017 55th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton), Monticello, USA, 2017: 486–493.
- [16] TALAK R, KADOTA I, KARAMAN S, *et al.* Scheduling policies for age minimization in wireless networks with unknown channel state[C]. 2018 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT), Vail, USA, 2018: 2564–2568.
- [17] ZHOU Bo and SAAD W. Minimum age of information in the internet of things with non-uniform status packet sizes[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(3): 1933–1947. doi: [10.1109/LWC.2019.2891598](https://doi.org/10.1109/LWC.2019.2891598).
- [18] LIU Chenfeng and BENNIS M. Taming the tail of maximal information age in wireless industrial networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2019, 23(12): 2442–2446. doi: [10.1109/LCOMM.2019.2940965](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2019.2940965).
- [19] XIAO Qinkun, LUO Yichuang, and LÜ Zhongkai. Motion retrieval based on graph matching and revised Kuhn-Munkres algorithm[C]. 2013 IEEE International Conference on Signal Processing, Communication and Computing, Kunming, China, 2013: 1–4.
- [20] 吕敬祥, 罗文浪. 无线传感网络量化及能量优化策略[J]. *电子与信息学报*, 2020, 42(5): 1118–1124. doi: [10.11999/JEIT190185](https://doi.org/10.11999/JEIT190185).
LÜ Jingxiang and LUO Wenlang. Quantization and energy optimization strategy of wireless sensor networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(5): 1118–1124. doi: [10.11999/JEIT190185](https://doi.org/10.11999/JEIT190185).
- 王 恒: 男, 1981年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为工业物联网、实时调度、时间同步等。
段思懿: 男, 1994年生, 硕士生, 研究方向为无线网络调度。
谢 鑫: 男, 1990年生, 博士生, 研究方向为无线网络调度。
- 责任编辑: 余 蓉