

一种面向 IEEE 802.11ah 无线网络信息年龄的优化方法

蒋美佳 雷晓颖

(扬州大学 扬州 225000)

摘要: 物联网发展对信息时效性的需求越来越高,实时信息则变得越来越重要。信息年龄(AoI)用于衡量信息片段的新鲜度,对提高物联网信息时效性有一定的优势。吞吐量和延迟在物联网中已被广泛研究,针对物联网中数据包信息年龄的研究尚具有新颖性。因此,为了改善物联网中信息的时效性,提出了一种轮询机制。该机制通过降低数据包的接入时延进而减小信息年龄,确保接收端能收到最新的消息,进一步优化网络传输信息的时效性。仿真结果表明,该方法在拥塞密集的 IEEE802.11ah 无线局域网中具有显著的优势,可以有效降低信息年龄,并提升网络吞吐量。

关键词: 信息年龄;吞吐量;物联网;IEEE 802.11ah;轮询机制

中图分类号: TP393.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.60

Improving the AoI of the IEEE 802.11ah wireless network

Jiang Meijia Lei Xiaoying

(Yangzhou University, Yangzhou 225000, China)

Abstract: In the internet of things(IoTs), the information is required to be fresh becomes, and transmitting of real-time information becomes more and more important. The age of information (AoI) is a metric proposed to evaluate the freshness of specific pieces of information, which has certain advantages in improving the timeliness of information in IoTs. The throughput and latency have been studied extensively in the IoTs, but research on the AoI of IoTs is quite novel. Aiming at improving the freshness of the information, proposes a polling mechanism to reduce the access delay of packets and to improve the AoI of packets, such that the receiver can receive the latest messages. The simulation results show that this method has significant advantages in congested IEEE 802.11ah wireless LAN, such that it can reduce AoI of messages and increase the network throughput as well.

Keywords: age of information;throughput;internet of things;IEEE 802.11ah;polling mechanism

0 引言

随着物联网(internet of things,IoT)设备的迅速普及,及时提供底层物理过程的状态信息对于许多现实世界的物联网应用来说已经变得越来越重要。如交通安全、无人驾驶、智慧工地、农业等^[1-4]。考虑到在物联网应用中,维护物理过程的状态信息至关重要。将目标节点尽可能刷新,以便进行有效的监控。IEEE802.11ah 是针对物联网应用需求提出的一种低频段、低消耗的无线局域网技术。该技术具有覆盖面广,容纳节点多,网络速度高等优势。IEEE802.11ah 协议中路由作为接入点(access point,AP),大量仪表器和传感器接入 AP,完成采集传输数据以及控制设备等操作,最后发送至后台的数据处理中心。在具有实

时性应用的物联网系统中,设备需要实时的感知周围环境变化并监测系统状态,从而为高效的决策和控制提供及时、有效的信息。对于一些具备时间有效性的信息,若目的节点接收的是过时信息将会导致无效决策和错误控制,甚至造成系统性的安全隐患^[5]。在物联网发展应用中,信息的时效性将变得越来越重要,越新鲜的数据信息越能够使系统做出正确的控制决策。目前,基于信息时效性的信息年龄是一个研究热点。

为了优化物联网的相关性能,目标接收端需尽可能的及时得到用户感兴趣的信息,即监测数据的实时更新状态。文献[6]提出了信息年龄(age of information,AoI)的概念,信息年龄是一个较好的衡量信息时效性的度量标准。当监视器在 t 时刻接收到时间戳为 $u(t)$ 的状态更新信息时,则

$t - u(t)$ 表示状态更新年龄。AoI 为 $t - u(t)$ 的平均值,被定义为数据从发送时刻到被接收时刻之间的时间间隔。在 IEEE802.11ah 的网络中,AoI 包含了数据包传输前的等待时延以及数据传输时延之和,数据包等待传输时延主要取决于调度方案以及退避进程。当网络负载较大时,很容易产生冲突碰撞,信道的接入时延会增大。为降低冲突碰撞,减小信道的接入时延,本文提出了一种轮询机制。该机制主要通过减小数据在传输等待的退避时间,从而优化整个网络的 AoI,提高系统吞吐量。

文章结构安排如下,首先,介绍了相关的工作;其次,提出一种在载波侦听多路访问(carrier sense multiple access, CSMA)中的轮询机制;再次,通过仿真来验证性能是否提高;最后,对文章进行了总结。

1 相关工作

1.1 IEEE 802.11ah 关键技术

IEEE 802.11ah 标准的目标是提供健壮、灵活、可扩展和高效的 WLAN 解决方案,能够处理物联网通信要求。主要涉及远程、低功耗和低数据速率的无线通信。为了实现这些期望,802.11ah 增强了现有 802.11 标准的物理和 MAC 层特性。802.11ah MAC 层提出了受限访问窗口机制(restricted access window, RAW)。即 AP 将 RAW 平均划分若干个相等的时隙(time slot),这里结合图 1 展开说明 RAW 技术。每个时隙被分配给单独的一个节点或者一组节点,各节点只能在被分配到的时隙中进行数据包的传输,但 RAW 中的节点在传输数据前仍然是基于分布式协调功能(distributed coordination function, DCF)技术竞争接入信道。

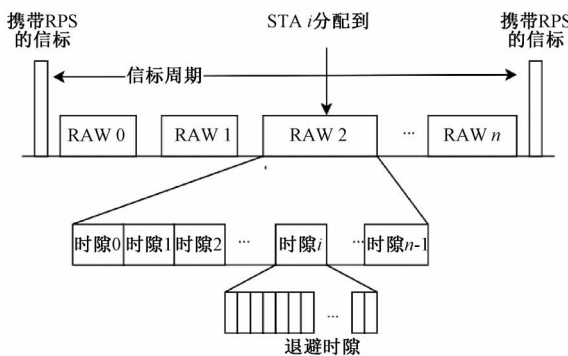


图 1 RAW 结构

802.11ah 对物联网的发展至关重要。文献[7]提出了一种能量延迟感知窗口控制算法。该算法通过估计不同分组 RAW 的时隙数和内部时隙持续时间来适应 RAW 的大小,利用梯度下降法求出最优解,网络延迟得到了很大的优化。文献[8]提出了一种新的 MAC 协议,称为具有冲突与干扰分辨率的受限访问协议。为了解决冲突问题,引入了一种基于概率估计的分散组分割算法。RAW 是 IEEE

802.1ah 的核心 MAC 机制之一,在每个 RAW 中,各节点仍然如要是通过 DCF 来争夺信道,这不能满足大多数工业应用的实时性要求。文献[9]则提出了一种信道道感知争用窗口适应算法。该算法基于信道状态调整争用窗口,具有外部干扰识别能力,提高了 IEEE802.11ah 的实时性能。

1.2 AoI

AoI 优化对实时物联网的传输应用至关重要。最近,优化 AoI 引起了极大的关注。文献[10-13]描述了状态包作为排队系统的生成过程,其随机到达源节点并排队后再转发至目的地。排队理论也被用来分析和优化先来先服务(first come first served, FCFS)^[10]和后来先服务(last come first served, LCFS)系统^[11]的平均 AoI。文献[12]提出了一种在无线广播网络中寻求最小平均 AoI 的调度方案。文献[13]研究了无线多接入网中 AoI 的最小化问题,并提出了相应的优化方案,其性能接近最优的一种分散调度策略。文献[14-16]中状态包可以在任何时候由源节点生成。文献[14]提出了一种最小化单源-目标对的平均 AoI 的最优更新策略,并分析了零等待策略的最优性。文献[15]提出了一种能量采集源的最优状态更新方案,并引入了最小平均 AoI 的最优在线算法。文献[16]在易出错信道上引入最优状态更新方案,在资源约束下最小化平均 AoI。

2 一种基于轮询的调度机制

2.1 系统模型

在 IEEE 802.11ah 网络中,考虑一个高性能 AP 关联大量节点的单跳拓扑结构。考虑上行链路,网络中的 n 个节点向同一个 AP 发送数据,每个发送端向 AP 发送状态更新。然而,由于干扰,每次只有一个节点向 AP 发送数据传输。依据在文中提出了一种轮询机制,将节点 i 在时刻 t 的接收方(AP)处的瞬时信息年龄被定义为:

$$\Delta_i(t) = t - U_i(t) \quad (1)$$

$U_i(t)$ 是节点 i 的接收方最后一次成功接收到的数据包的时间戳。显然, $\Delta_i(t)$ 取决于捕获媒介所花费的时间及其传输时间。因此,系统总平均年龄可定义为:

$$\bar{\Delta} = \sum_{i=1}^n \bar{\Delta}_i = \sum_{i=1}^n \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \Delta_i(t) dt \quad (2)$$

优化方案的目标就是最小化 $\bar{\Delta}$ 。

2.2 轮询机制的设计

该章节重点阐述面向 802.11ah MAC 层的轮询机制。通过轮询降低信道接入时延,减小 AoI,同时提高吞吐量。

1) 802.11ah MAC

在 802.11ah 中,以一个 RAW 为单位进行分析。这里使用 T_s 表示应用生成的包的平均服务时间,即从包到达队列然后传输结束所经过的平均时间。可表示 $T_s = T_w + T_b + T_x$, T_w 表示一个数据包在到队列中等待的平均时间, T_b 表示数据包在队首所等待接入的平均退避时间, T_x 是传播时延(可以忽略)和传输时延之和(数据包大小除以

PHY 层速率)。

下面,则分析数据包如何执行退避的过程。数据包传输之前,会执行信道检测,如图 2 所示。当信道被检测为空闲状态,如果该站点的退避计数器值不为 0,则继续以一个时隙为单位减少该值。否则,站点将会在 $[0, CW]$ (CW 表示竞争窗口) 范围内随机生成一个退避窗口值进行退避。站点在时隙内监听信道的过程可能会导致两种情况的发生: 如果检测到信道空闲,退避计时器就继续递减;如果检测到信道繁忙,退避计时器的值将会立即被冻结,等待下一次信道变为空闲并延迟 DCF 帧间间隔 (distributed coordination function inter-frame space, DIFS) 后,从被冻结的时间开始继续递减。只有当退避计时器的值递减为 0,才能发送数据帧。

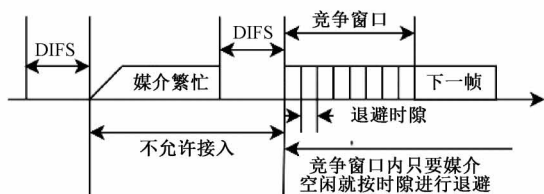


图 2 退避过程

根据 802.11ah 协议中节点传输信息帧都要执行退避机制,以及通过对平均信息年龄的相关分析可得:信道接入延迟增大, AoI 也随之增大。为了通过降低时延来减小 AoI,提出了一种轮询机制。

2) 轮询机制

轮询机制讨论同样是在一个 RAW 中进行讨论,具体的方案如下所述。

(1) 轮询 ACK

轮询 ACK 用于指定的站点在不执行任何争用进程的情况下进行传输,检查无线信道上传的每个数据包。原始的 ACK 帧的字段如图 3(a) 所示。包含 4 个字段: Frame Control, 用来决定各种帧的类型; Duration, 表示持续时间, 为监听站更新其 NAV 提供了必要的信息; RA, 发送数据帧或管理帧的立即目的地址; FCS, 错误检查码, 检测传输过程中帧的完整性。在提出的方案中, 修改了原始的 ACK 帧使之包含一个关联标识符 (association identifier, AID), ACK 字段的修改如图 3(b) 所示。轮询 ACK 有以下 3 个功能: 确认正确接收; 指示传输周期的结束; 通知指定的 AID 值的工作站以无争用的方式发送。

网络中, n 个工作站 $\{STA_1, STA_2, \dots, STA_n\}$, 每个工作站 STA_i 都拥有基本服务集 (basic service set, BSS) 内部的唯一标识符 AID_i 。网络中不考虑隐藏节点存在的情况, 此时, AP 发送的轮询 ACK 帧可以被 BSS 中关联的所有工作站侦听到, AP 确定轮询 ACK 中 AID 的值 (AID_j)。其中, $j = (i \bmod n) + 1$ 。实际上, AP 以循环的方式发送轮询。



(a) 标准 ACK 字段



(b) 轮询 ACK 字段

图 3 标准 ACK 与轮询 ACK 字段

(2) 传输过程

如果工作站 STA_j 侦听到其轮询 ACK 的通知, 并有数据传输, 则 STA_j 进入无竞争模式传输, 如图 4 所示。在该模式中, 传输在连续帧间间隔 (concatenation inter frame space, CIFS) 之后立即接入信道, 向接收端发送数据。在 CIFS 延迟时间之后, 最多只有一个站可以进行传输, 多个工作站之间使用无竞争模式循环传输。如果 STA_j 在听到它的轮询 ACK 通知后没有数据要发送, 则 STA_j 不接入信道, 其他有数据要发送的节点则进入传统的竞争模式。节点延迟一个 DIFS, 然后触发二进制指数退避 (binary exponential backoff, BEB) 的争用过程, 确定下一个数据包的传输, 如图 5 所示。

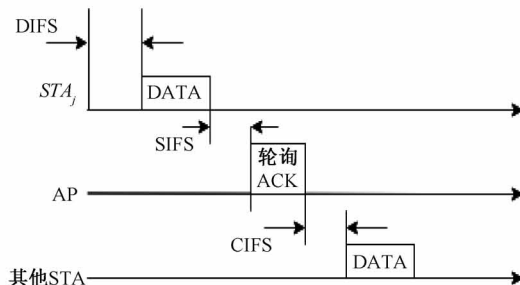


图 4 轮询的信道接入传输过程

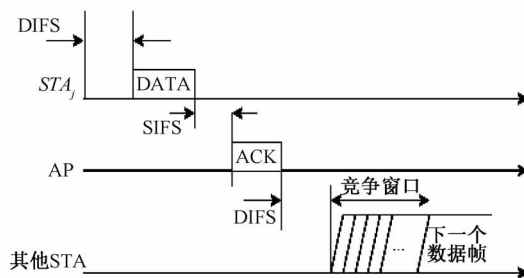


图 5 IEEE 802.11ah 信道接入传输过程

从图 4、5 的比较中, 可以看出文章所提出的方案优化了数据包在队首所等待的平均退避时间。在一个数据包传输完成后不需要执行退避机制来决定下一次传输的数据包, 而是通过 AP 向节点回应轮询 ACK 这一操作来指定下一个传输数据包的节点向 AP 发送数据包。AP 向发送数据包的节点回应轮询 ACK, 其他的节点是可以侦听到的,

当告知下一个传输数据的节点发送数据,其他节点会等待。只有侦听到轮询 ACK 中的 AID 与自身的 AID 相同的时候,才能发送数据包。当一个节点在听到它的轮询 ACK 通知后没有数据要发送,那么该工作站不接入信道,其他有数据要发送的工作站则进入传统的竞争模式。节点延迟一个 DIFS,然后触发 BEB 争用过程,以确定下一个数据包传输。通过竞争接入信道的节点完成传输后,轮询 ACK 继续通知下一个节点的数据传输。通过以上分析,可观察到只有在被轮询的节点没有数据包发送的情况下,其他节点才会执行退避机制。当被轮询的所有节点都有数据包发送时,节点则不需要执行退避进程,此时网络的信道接入时延则最小。综上所述,本方案有效降低了信道接入时延,进一步减小了网络 AoI。因此,提升了信息时效性。

3 仿真实现

该章节根据网络中的 AoI、吞吐量评估不同机制下的网络性能。这里网络被定义为处于最优的状态,所有节点都有数据发送。仿真场景是一个高性能 AP 与多个节点的网络,节点随机分布在以 AP 为中心的 $200\text{ m} \times 200\text{ m}$ 的区域内。相关的仿真配置参数如表 1 所示。

表 1 参数设置

参数	数值	参数	数值
Slot Time	$52\text{ }\mu\text{s}$	CIFS	$160\text{ }\mu\text{s}$
SIFS	$160\text{ }\mu\text{s}$	传输速率	2.6 Mbit/s
ACK	$240\text{ }\mu\text{s}$	DIFS	$264\text{ }\mu\text{s}$
信标间隔	0.1 s	数据包大小	256 Bytes

对评估网络的 AoI 和吞吐量,通过改变节点数量,从 20 增长 100 个节点的情况进行分析。图 6 显示的是不同节点数量下 AoI 的变化。从图中可以得出 802.11ah 原始机制下的 AoI 明显大于轮询机制下的 AoI,随着节点的增多,AoI 也会增大。原始机制中是因为节点增多,冲突碰撞的概率就会增大,退避的时间就会增大,则整个网络的 AoI 也随之增大。而轮询机制的方案中,由于节点增加,AP 需要更多的时间维护节点,所以也会增大。由于轮询机制的方案中没有发生冲突,不需要进行退避机制,接入时延降低,所以轮询机制下的 AoI 更小。接收端接收的信息时效性越好,更有利于信息的交互。

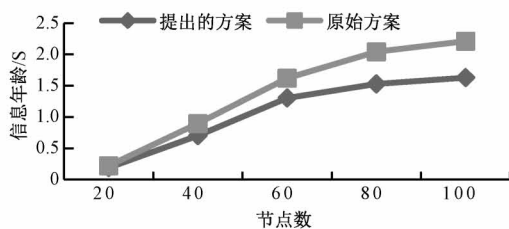


图 6 信息年龄

图 7 显示的是不同节点数量下吞吐量的变化。从图中可以看出,刚开始,吞吐量随着节点数目的增加而增加,然后逐渐达到饱和状态,之后吞吐量略有下降。这是因为刚开始节点数量少,还处于不饱和状态,当处于饱和状态时吞吐量最大。轮询机制相比原始机制更迟达到饱和状态。由于通过降低信道接入时延,减小数据包的冲突,提升了信道利用率,吞吐量随之增大。所以,综上分析,轮询机制的方案更优。

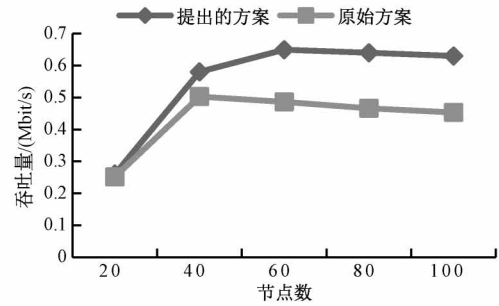


图 7 吞吐量

4 结 论

文中提出的一种轮询机制,旨在缓解 IEEE802.11ah 无线网络在密集环境下发生的冲突碰撞,降低信道接入时延,从而优化 AoI。方案中通过对 ACK 帧进行修改,使其能够向网络中的其他节点发送 AID 消息,从而实现对节点的轮询。在高负载下,轮询机制的方案可以防止整个网络发生严重的冲突,减少整个网络执行退避的时间,降低接入时延。从而降低了整个网络的 AoI,提高网络中信息的时效性。冲突的降低会减少空闲退避时隙造成的带宽浪费以及数据包的丢失,系统容纳容量得到了显著提升。

参考文献

- [1] 苗建国,王剑宇,张恒. 无人机故障诊断技术研究进展概述[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(9): 56-69.
- [2] 闫文娟,王水璋. 无人机倾斜摄影航测技术与 BIM 结合在智慧工地系统中的应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(10): 59-65.
- [3] 陶林,瞿少成,易宇凡. 一种模拟农场环境监测与灌溉控制的教育物联网系统实现[J]. 电子测量技术, 2019, 42(24): 81-85.
- [4] 李永丹,马天力,陈超波. 无人驾驶车辆路径规划算法综述[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(6): 72-79.
- [5] MOSTL M, SCHLATOW J, ERNST R. Synthesis of monitors for networked systems with heterogeneous safety requirements [J]. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2018, 37(11): 2824-2834.
- [6] 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.
- [7] WANG Y, CHAI K K, CHEN Y, et al. Energy delay aware restricted access window with novel retransmission for IEEE 802.11ah networks[C]. Global Communications Conference, IEEE, 2016: 4-8.
- [8] MUHAMMAD S, MAQBOOL A, AZEEM I, et al. Multiple access control for cognitive radio-based IEEE 802.11ah networks[J]. Sensors, 2018, 18(7): 1-28.
- [9] CHENG Y J, ZHOU H C, YANG D, et al. Channel-aware contention window adaption in IEEE 802.11ah for soft real-time industrial applications[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2019, 19(13): 1-15.
- [10] KAUL S, YATES R, GRUTESER M. Real-time status: How often should one update[J]. Proceedings IEEE Infocom, 2012: 2731-2735.
- [11] KAUL S K, YATES R D, GRUTESER M. Status updates through queues[C]. Information Sciences and Systems (CISS), 2012 46th Annual Conference on, IEEE, 2012: 1-6.
- [12] 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.
- [13] HSU Y P, MODIANO E, DUAN L. Scheduling algorithms for minimizing age of information in wireless broadcast networks with random arrivals[J]. In IEEE Transactions on Mobile Computing, 2020, 19(12): 2903-2915.
- [14] SUN Y, UYSAL-BIYIKOGLU E, YATES D R, et al. Update or wait: How to keep your data fresh[J]. IEEE INFOCOM 2016-IEEE Conference on Computer Communications, 2017, 63(11): 7492-7508.
- [15] WU X W, YANG J, WU J X. Optimal status update for age of information minimization with an energy harvesting source[J]. IEEE Transactions on Green Communications & Networking, 2018, 2(1): 193-204.
- [16] CERAN E T, GUNDUZ D, GYORGY A. Average age of information with hybrid ARQ under a resource constraint[J]. In IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(3): 1900-1913.

作者简介

蒋美佳, 硕士研究生, 主要研究方向为 802.11ah 无线网络。

E-mail: 2528565995@qq.com

雷晓颖, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为无线网络。

E-mail: 2485265417@qq.com