

# 面向工业物联网的 IEEE 802.11ah 协议 RAW 在线式重分组方法

孙彦景<sup>1</sup>, 杨俊秋<sup>1</sup>, 陈岩<sup>1</sup>, 王艳芬<sup>1</sup>, 陈晓晶<sup>2</sup>, 刘丰祯<sup>2</sup>, 孙智<sup>3</sup>

(1. 中国矿业大学信息与控制工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 天地(常州)自动化股份有限公司, 江苏 常州 213015;  
3. 纽约州立大学布法罗分校电气学院, 布法罗 14260)

**摘 要:** 针对标准 RAW 机制无法适应网络环境变化做出调整, 且分组依赖连续的 AID 问题, 提出一种基于伪随机序列的 RAW 重分组方法。AP 在关联阶段为节点分配一个伪随机序列作为地址码, 在分组阶段采用分组复合码携带分组信息。该方法实现了非连续 AID 节点在线式重分组, 减小了重分组的时间开销。为使 RAW 合理分配资源, 解决组间负载不平衡问题, 提出了基于期望信道时间的 RAW 重分组方法, 以信道利用率为分组依据, 优化了节点 RAW 组、RAW 持续时间和 RAW 分组数。NS3 仿真结果表明, 所提方法显著提高了 IEEE 802.11ah 协议的网络性能。

**关键词:** 监测传感网; IEEE 802.11ah 协议; RAW 机制; 伪随机序列

**中图分类号:** TN911.22

**文献标识码:** A

**doi:**10.11959/j.issn.1000-436x.2020060

## RAW online regrouping method in IEEE 802.11ah protocol for industrial Internet of things

SUN Yanjing<sup>1</sup>, YANG Junqiu<sup>1</sup>, CHEN Yan<sup>1</sup>, WANG Yanfen<sup>1</sup>, CHEN Xiaojing<sup>2</sup>, LIU Fengzhen<sup>2</sup>, SUN Zhi<sup>3</sup>

1. School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

2. Tiandi (Changzhou) Automation Co., Ltd., Changzhou 213015, China

3. Department of Electrical Engineering, University at Buffalo, the State University of New York, Buffalo 14260, USA

**Abstract:** Aiming at the problem that the standard RAW mechanism cannot adjust to changes in the network and the grouping depends on continuous AIDs, a RAW regrouping method based on a pseudo-random sequence was proposed. The AP assigned a pseudo-random sequence to the node as the address code during the association phase, and used compound code to carry groups information during the grouping phase. It implemented online regrouping of discontinuous AID nodes and reduced the overhead of regrouping. In order to rationally allocate resources in RAW and solve the problem of load imbalance between groups, a RAW regrouping method based on expected channel time was proposed. Based on channel utilization, the RAW groups, RAW duration, and numbers of RAW were optimized. NS3 simulation results show that the proposed method significantly improves the performance of IEEE 802.11ah protocol networks.

**Key words:** monitoring sensor network, IEEE 802.11ah protocol, RAW mechanism, pseudo random sequence

### 1 引言

在煤炭、石油等工业物联网 (IIoT, industry Internet of things) 应用场景中, 需要对生产过程中的海量数据进行传输与分析处理。相关数据普遍具有数据量小、周期性传输的特征<sup>[1]</sup>, 如环境感知、

设备状态等监测数据。虽然这些数据对时延和吞吐量要求不高, 但设备众多, 覆盖范围广, 且通常采用电池供电, 因此对接入网络的网络容量、通信距离和能耗都有较高要求<sup>[2]</sup>。

2016 年 12 月, IEEE 发布适用于物联网应用的协议标准 IEEE 802.11ah。该标准工作在低于 1 GHz

收稿日期: 2019-10-28; 修回日期: 2020-03-02

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (No.2017YFC0804400)

**Foundation Item:** The National Key Research and Development Program of China (No.2017YFC0804400)

的频段, 在工业场景中, 其可在一定程度上克服工业机器设备的电磁干扰; 同时, 较传统 2.4 GHz 和 5 GHz 的 Wi-Fi 协议, IEEE 802.11ah 有更大的通信距离 (理论可达 1 km)。此外, 针对物联网场景, IEEE 802.11ah 增强了 MAC 层和物理层, 支持 3~5 年的电池供电, 支持最大 8 191 个节点接入, 允许 150 kbit/s~78 Mbit/s 的传输速率选择, 适合多种类型的传输业务, 对工业物联网应用的可扩展性强。

IEEE 802.11ah 标准在 MAC 层引入了基于分组的限制接入窗口 (RAW, restricted access window) 机制<sup>[3]</sup>, 将传感节点划分多个组, 并为每个组分配一个 RAW 时隙, 属于同一个时隙中的节点竞争接入信道, 在一定程度上减少了节点间的碰撞。然而, 现有标准未充分发挥 RAW 分组性能优势, 仅简单地将节点随机分配到固定数量的 RAW 组中。因此, 文献[4-7]分别从能量效率、时延、吞吐量、公平性等方面对 RAW 分组进行研究, 得到了提高性能的分组方案。文献[8]设计了一种服务质量 (QoS, quality of service) 感知调度算法, 通过实时优先级分组, 满足 QoS 节点的需求。文献[9]提出了一种 traffic-aware 方法来优化 RAW 分组, 采用贪婪算法提高了信道利用率, 并提出回归模型近似估计 RAW 组内节点竞争成功概率。但是其分组方法并未考虑到 RAW 分组的实现方法, 仅提出了优化 RAW 分组的方法。同时, 该方法分组时采用固定的分组数, 网络扩展性差。Tian 等<sup>[10-11]</sup>提出了一种实时流量自适应 RAW 分组优化算法, 接入点 (AP, access point) 通过检测每个节点在前一个信标内的传输信息来确定在下一个信标内为每个节点分配的资源量。该分组算法可以提高动态异构无线传感器 (WSN, wireless sensor network) 中的上行链路吞吐量, 但并未解决 RAW 分组依赖节点关联标识符 (AID, assignment identifier) 连续的问题, 其分组数由相邻节点 AID 的连续性决定, 这可能导致分组数过多, RAW 分组的时间开销增大。

在 IEEE 802.11ah 协议标准中, RAW 分组机制并未规定 AID 的分配方案, 在实现中通常依据节点关联的先后顺序, AP 依次为每个关联的节点分配 AID, 该分配方法存在随机性。在分组时设置每个 RAW 组的起始节点 AID 和终止节点 AID, 在这 2 个 AID 内的所有节点 (包括起始节点 AID 和终止节点 AID) 划分为一个 RAW 组。该方法因节点关联的随机性引起 RAW 分组的随机性, 只能将 AID 连续

的节点分为一组, 分组方法不灵活, 易造成组间负载分布不均匀。将负载较大的节点集中在部分 RAW 中, 此时组内传输拥塞, 导致吞吐量和时延性能变差, 且用于竞争的时间增加, 信道利用率也下降; 而在负载较小的 RAW 中, 由于存在信道空闲时间, 因此其利用率低。其次, 标准中并未规定如何确定最佳 RAW 分组参数, 并未根据当前网络状态进行参数调整。当某些节点采样率改变时, 会导致部分 RAW 组负载发生变化, 可能引起网络性能下降; 或者有节点加入或退出网络, 引起网络拓扑改变等。标准 RAW 机制并不会因为这些突发事件而调整分组参数, 因此不适应当前网络情况。

针对上述问题, 本文提出了基于 IEEE 802.11ah 协议的 RAW 在线式重分组方法, 该方法包含 2 个部分。1) 针对标准 RAW 机制分组依赖节点 AID 连续问题, 将信道编码技术中码分多址技术应用于 IEEE 802.11ah 协议设计中, 提出了基于伪随机序列的 RAW 重分组实现 (RRI-PRS, RAW regrouping implementation based on pseudo random sequence) 方法, 解决了目前 RAW 分组研究中重分组实现问题, 可将非连续 AID 节点灵活分组, 减小 RAW 重分组时间开销, 实现在线式 RAW 重分组。2) 为了解决标准 RAW 机制分组易导致组间负载不均匀, 且无法根据网络状态调整分组参数, 以信道利用率为指标, 设计了一种基于期望信道时间的 RAW 重分组 (RR-ECT, RAW regrouping base on excepted channel time) 方法, 优化了 RAW 节点分组、持续时间和分组数, 实现了周期性传感节点的高效分组。由于目前 IEEE 802.11ah 芯片仍在开发中, 本文采用 NS3 网络仿真器编程实现所提方法, 实验证明该方法能够有效提升网络性能。

## 2 系统模型

本文考虑工业物联网中大规模监测传感网场景下 IEEE 802.11ah 网络模型, 该模型包括一个接入节点和众多不同种类的传感节点  $S$ , 传感节点  $s \in S$  周期性地上传采样数据, 经 AP 汇聚到后端服务器。不同的传感节点有不同的业务负载、采样数据分组到达率  $\nu_s$ 、数据分组大小  $L_s$  和调制编码方式 (MCS, modulation and coding scheme)。传感节点  $s$  会根据当前信道条件自适应地选择最佳的调制编码方式, 对应传输比特率  $r_s$ 。为了支持传感节点的传输业务, AP 按 RAW 机制将传感节点分为  $M$  个

组,表示为  $G\{G_1, G_2, \dots, G_M\}$ , 每个组分配一个 RAW 时隙。在该时隙中, 组内节点通过载波侦听多路访问/冲突避免 (CSMA/CA, carrier sense multiple access with collision avoidance) 的方式竞争使用信道。AP 通过广播信标帧告知已关联的传感节点分组信息 (RPS, RAW parameter set), 在其所在 RAW 时间片内唤醒节点, 上传缓存中的采样数据。

同时, 本文将信道利用率作为所提 RAW 重分组及其实现方法的网络性能评估指标, 表示为信标间隔  $T_{\text{beacon}}$  内用于传输传感节点采样数据的时间与可用传输时间的比值, 即

$$U = \frac{T_{\text{data}}}{T_{\text{beacon}} - T_{\text{overhead}}} \quad (1)$$

其中,  $T_{\text{data}}$  和  $T_{\text{overhead}}$  分别表示传输业务数据所用时间和分组开销时间。

### 3 基于伪随机序列的 RAW 重分组方法

由于目前对 RAW 分组研究仅停留在分组方法上, 并未考虑具体的分组实现方法, 在标准中 RAW 机制也未规定分组实施方案。因此, 本文提出基于伪随机序列的 RAW 重分组实现方法, 对非连续 AID 节点划分 RAW 组。

首先, 本文设计了一种可行的 RAW 重分组实现方法, 即节点 AID 重分配, 通过重关联过程为同一 RAW 组节点重新分配连续 AID。该实现方法可分为 4 个步骤: 根据分组方案确定 RAW 分组数和各个组内节点的 MAC 地址; 按分组顺序, 建立各 RAW 组映射表, 将组内节点的 MAC 地址映射为连续 AID (即重新分配的 AID); AP 解除与所有节点的关联; 节点向 AP 重新发送关联请求, AP 依照 RAW 分组映射表查找请求节点 MAC 所对应的 AID, 将其回复给请求节点。为了保证节点传输的公平性, 避免一部分节点由于竞争失败导致关联时间过长, 设定待所有节点关联后, 才允许节点传输采样数据。

上述重分组实现方法虽然能解决非连续 AID 分组问题, 但节点需要与 AP 解除连接, 并重新关联, 由于重关联过程时间较长, 在节点规模大的监测传感网中, 时间开销会特别大。同时, 在网络运行过程中进行 AID 重分配, 将导致节点在断开关联时间内产生的数据分组处理不及时, 造成分组丢失, 影响网络的有效性和可靠性。

因此, 为了避免 AID 重分配所带来的时间开销和网络断联问题, 本文将信道编码技术中的码分多

址方法与 RAW 中的时分机制相结合, 提出了基于伪随机序列的 RAW 重分组实现方法。利用伪随机序列的相关特性区分网络中的传感节点, 实现在 RAW 中对非连续 AID 节点的信道复用。

RRI-PRS 方法以伪随机序列相关特性作为确定 RAW 分组的依据。在传感节点  $s \in S$  请求关联 AP 时, AP 为节点  $s$  分配一个唯一标志的伪随机序列  $g_s \in g\{g_1, g_2, \dots, g_{|S|}\}$ , 作为地址码回复给请求节点。在 RAW 分组阶段, AP 采用分组复合序列  $B_{\text{RAW}}$  携带分组信息, 其中第  $i$  个 RAW 分组复合序列  $B_{\text{RAW},i}$  可表示为

$$B_{\text{RAW},i} = \sum_{s \in S} g_s X_{s,i} \quad (2)$$

其中,  $X_{s,i} = \{0,1\}$  表示节点  $s$  是否被分配在该 RAW 内, 如果节点  $s$  被分配在该 RAW 内,  $X_{s,i} = 1$ ; 否则,  $X_{s,i} = 0$ 。

在接收端, 节点  $s$  将关联阶段 AP 分配的伪随机序列  $g_s$  与信标中的分组复合序列  $B_{\text{RAW},i}$  转化为双极性码, 然后将两个序列进行点积运算, 即

$$C = g_s B_{\text{RAW},i} = \sum_{k=1}^K g_{s,k} B_{\text{RAW},i,k} \quad (3)$$

其中,  $k$  为序列的码片数。将归一化相关值  $C$  与相关函数门限  $\bar{C} (\bar{C} = 0.5)$  相比较, 若  $C \geq \bar{C}$ , 则节点  $s$  被分配在第  $i$  个 RAW 组内。由此, 所有节点根据信标计算出其分组信息, 在其所分配的 RAW 持续时间内传输数据。

为了实现上述功能, RRI-PRS 对 MAC 层协议帧格式进行修改, 包括关联阶段的 AID 请求帧和 AID 回复帧、分组阶段的 RAW 配置帧。在图 1 所示的 AID 请求帧中, 增加一种请求模式: 将请求字段“AID 请求模式”中保留位“保留”字字段的两位均置 1, 表示节点请求 AP 为其分配伪随机序列地址码。当 AP 接收到节点请求时, 在图 2 所示的 AID 回复帧中, 扩展出“Gold 序列”子字段, 用于携带 AP 为 STA (station) 分配的伪随机序列。图 3 为 RAW 配置子字段帧格式, 表示一个 RAW 的分组信息, 对“RAW 控制”子字段进行修改, 使用原 RAW 未使用的标志位, 将“RAW 控制”字段中“RAW 类型”和“RAW 类型选项”4 个数据位置 1, 表示采用分组复合序列携带 RAW 分组信息。此时, 将“RAW 组”字段扩展。其中“页索引”占两位, 表示节点所属的页; “复合序列”用于承载该 RAW 分组复合序列。

通过对 MAC 帧格式的修改，RRI-PRS 可以采用分组复合序列携带分组信息，实现将非连续 AID 节点 RAW 分组。具体实现流程如图 4 所示。首先，节点向 AP 发送关联请求帧，请求分配节点唯一的 AID 和 PRS；AP 收到请求后，若允许关联，则响应请求，依次给请求节点回复 AID 和 PRS；节点收到 AP 的回复帧后，将帧中的 AID 和 PRS 存储在本

地，用于确定所在的 RAW 组。待所有节点与 AP 关联后，按标准默认设置 RAW 初始分组，根据 AID 连续性将节点分组。当存在高效的重分组方法后，AP 根据 RAW 重分组方案和节点 PRS，按式(2)计算各个 RAW 的分组复合序列，然后将其配置到 RPS（分组参数集）中，广播给监测范围内所有节点。在接收端，节点从 RPS 中解析出每个 RAW 的分组

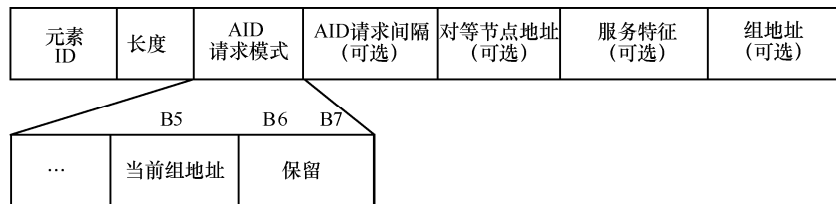


图 1 AID 请求字段帧格式

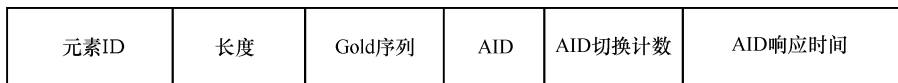


图 2 AID 回复字段帧格式

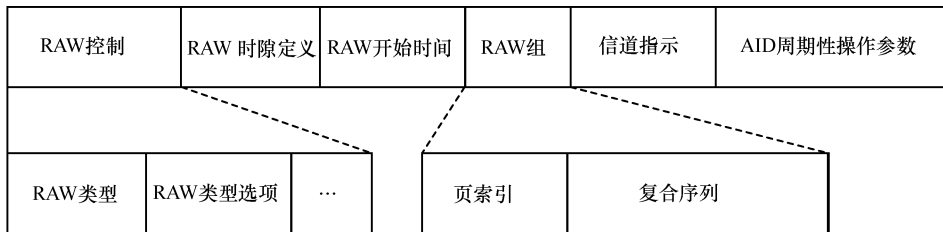


图 3 RAW 配置子字段帧格式

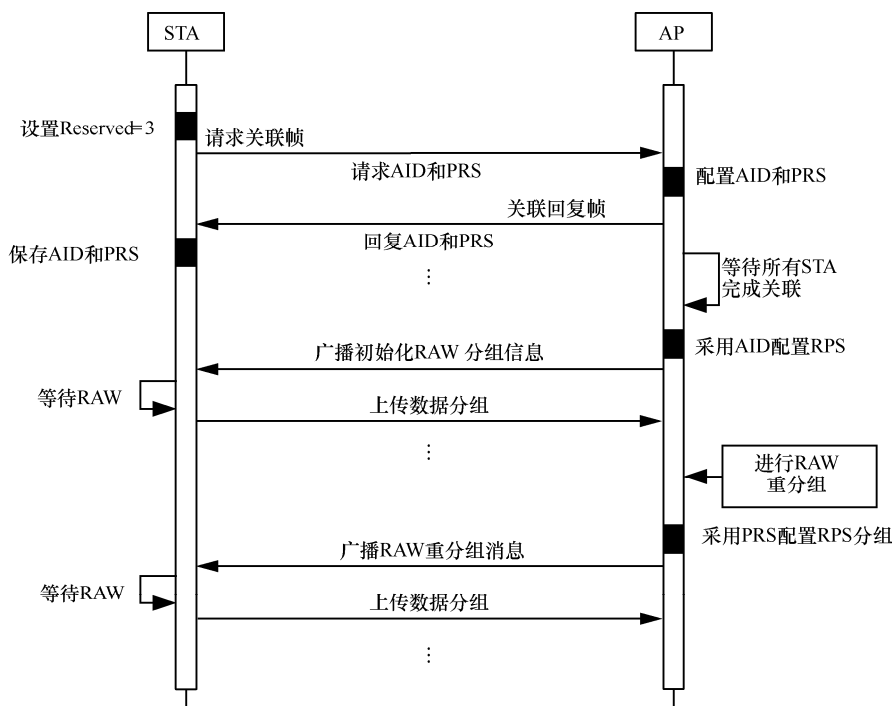


图 4 RRI-PRS 实现流程

复合序列, 将其与关联阶段存储的 PRS 内积, 与相关函数阈值相比较, 判断其所属的 RAW 组, 并计算该 RAW 组开始时间, 等待发送监测数据分组。

在实现中, 本文采用 Gold 序列作为伪随机序列。Gold 序列是  $m$  序列的复合码, 它由 2 个码长相等、码时钟速率相同的  $m$  序列优选对模二和构成, 具有良好的自相关和互相关特性<sup>[12]</sup>, 且在阶数较小时具有较大数目的序列数。本文采用 7 阶  $m$  序列本原多项式所构成的 90 个  $m$  序列优选对, 产生共 11 610 个 Gold 序列, 能支持 IEEE 802.11ah 网络对最大 8 191 个节点的寻址能力。图 5 为 RAW 组内节点和非组内节点分别与 RAW 分组复合序列的相关函数, 当码片数为 0 时, RAW 组内节点归一化相关函数为 1, 而非组内节点归一化相关函数值较小。这表明将相关特性 Gold 序列作为地址码, 能清楚区分节点所属的 RAW 组。

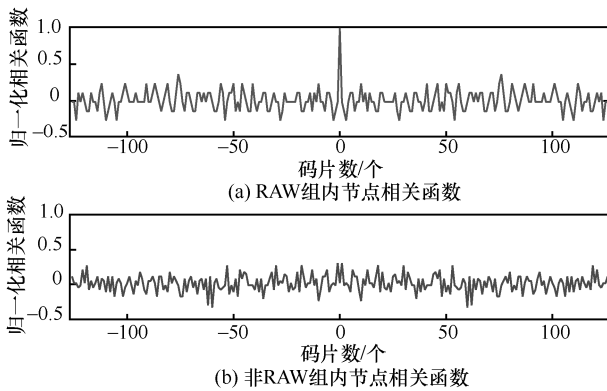


图 5 RAW 组内节点和非组内节点分别与 RAW 分组复合序列的相关函数

#### 4 基于期望信道时间的 RAW 重分组方法

在规模化监测物联网中, 标准 RAW 机制随机分组可能导致负载不均匀, 且 RAW 参数不能随网络状态的变化及时调整, 为了解决上述问题引起的网络性能下降, 并提高信道利用率, 本文设计了基于期望信道时间的 RAW 重分组方法, 并采用 RRI-PRS 作为重分组的实现方法。

传感节点由于业务需求不同, 传输数据分组占用信道的时间也不同, 将节点  $s$  传输数据分组所必要的时间定义为期望信道时间  $E_s$ , 即

$$E_s = \left( \frac{L_s + L_H}{r_s} \right) N_s \quad (4)$$

其中,  $L_H$  表示数据帧头的字节数,  $N_s = T_{\text{beacon}} \nu_s$  表示节点  $s$  在一个信标间隔  $T_{\text{beacon}}$  内所产生的数据分

组个数,  $\nu_s$  为节点  $s$  采样数据分组到达率。

由式(4)可以得到所有节点的期望信道时间, RR-ECT 根据期望信道时间将所有节点分为  $M$  个组, 每个组分配一个 RAW 时隙, 且各个 RAW 时隙的持续时间由组内节点的期望信道时间和所有节点的总期望信道时间确定, 具体如式(5)~式(8)所示。

$$E_{\text{RAW},i} = \sum_{s \in S} X_{s,i} E_s \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^M X_{s,i} = 1, \forall s \in S \quad (6)$$

$$T_{\text{RAW},i} = \frac{E_{\text{RAW},i}}{\sum_{i \in G} E_{\text{RAW},i}} T_{\text{RAW}} \quad (7)$$

$$T_{\text{RAW}} = T_{\text{beacon}} - T'_{\text{overhead}} \quad (8)$$

式(5)中,  $E_{\text{RAW},i}$  表示第  $i$  个 RAW 内节点期望信道时间,  $X_{s,i} = \{0,1\}$  表示节点  $s$  是否在  $i$  组内。

式(6)表示每个节点只能选择一个 RAW 进行数据传输, 与其他组内节点竞争使用该 RAW 时隙。式(7)表示第  $i$  个 RAW 时隙的持续时间按其期望信道时间占总期望信道时间的比例来分配,  $T_{\text{RAW}}$  表示在信标持续时间  $T_{\text{beacon}}$  内用于节点数据交付的时间。为了保证在  $T_{\text{beacon}}$  内至少传输一个数据分组,  $T_{\text{beacon}}$  应该大于所有节点中单个数据分组的最大传输时间。其中,  $T'_{\text{overhead}}$  表示一个 RAW 组的时间开销。

以信道利用率为指标优化 RAW 分组, 由式(1)可得 RAW 组  $G_i$  的信道利用率为

$$U_i = \frac{T_{\text{data},i}}{T_{\text{RAW},i} - T'_{\text{overhead}}} \quad (9)$$

其中,  $T_{\text{data},i}$  表示 RAW 组  $i$  持续时间内传输采样数据所使用的时间, 即

$$T_{\text{data},i} = \sum_{s \in G_i} \frac{L_s N_s P_i^{\text{succ}}}{r_s} \quad (10)$$

其中,  $P_i^{\text{succ}}$  表示第  $i$  个 RAW 组  $G_i$  内数据分组传输的成功率。假设节点数据分组传输失败仅由传输碰撞引起, 由于组内节点采用 CSMA/CA 的方式公平竞争信道, 每个组内节点都具有相同的竞争成功概率。

RAW 的信道利用率依赖于组内节点竞争成功概率的精确估算, 已存在一些分析模型对 IEEE 802.11ah 网络的节点碰撞概率(即  $1 - P_i^{\text{succ}}$ )进行研究, 但其假设在一个信标间隔内, 节点的缓存中有

无限的数据分组<sup>[13]</sup>或者只有一个数据分组<sup>[14]</sup>，这与监测物联网节点缓存中实际分组个数存在差异。在监测物联网应用中，数据分组周期性到达节点 MAC 层队列，而节点只能在其分配的 RAW 内传输数据，在其他时间睡眠并缓存数据。因此，在复杂的传感网中，很难得到一个精确计算节点碰撞概率的通用模型。为了估计真实网络中的竞争成功概率，文献[9]采用回归模型得到竞争成功概率的近似值，即

$$P_i^{\text{succ}} = \sum_{s \in G_i} \omega_s \gamma_{K_i}(N_s) \quad (11)$$

$$\omega_s = \frac{N_s \delta_s}{\sum_{N_j \in N} N_j \delta_j} \quad (12)$$

$$\gamma_{K_i}(N_s) = b_1 \ln(N_s) + b_2 \quad (13)$$

其中， $N_s$  为节点  $s$  在  $T_{\text{beacon}}$  内分组到达数， $\gamma_{K_i}(N_s)$  表示在第  $i$  组中  $s$  节点的竞争成功概率， $K_i$  表示  $i$  组中包含节点的个数，文献中将竞争成功概率拟合为如式(11)所示的对数曲线； $\omega_s$  表示组内信标间隔内分组到达数为  $N_s$  所占的权值； $\delta_s$  表示  $T_{\text{beacon}}$  内分组到达数为  $N_s$  的节点个数。由于文献中采用固定 RAW 数的分组方法，故本文并没有讨论组内节点数  $K_i$  对竞争成功概率的影响。

为了研究监测物联网中异构流量和非固定分组对竞争成功概率的影响，本文对上述回归模型进行扩展，将回归函数  $\gamma_{K_i}(N_s)$  改写为  $\gamma(K_i, N_s)$ ，即

$$\gamma(K_i, N_s) = b_1 \ln(N_s) + b_2 K_i^{\frac{1}{2}} + b_3 \quad (14)$$

$$P_i^{\text{succ}} = \sum_{s \in G_i} \omega_s \gamma(K_i, N_s) \quad (15)$$

其中，当节点  $N_s$  一定时，根据仿真结果，竞争成功概率与组内节点数的关系曲线同幂函数非常相近，因此，将  $\gamma(K_i, N_s)$  与  $K_i$  的关系拟合为幂函数形式，由式(11)、式(12)和式(14)得到了式(15)所示的竞争成功概率回归模型。

图6所示为采用回归模型的节点竞争成功概率曲线。与210组仿真结果进行对比，回归函数的均方根误差为4.37%，结果表明回归函数的竞争成功概率与仿真的数值结果十分相似，可以作为竞争成功概率  $P_i^{\text{succ}}$  的近似值，用于信道利用率  $U_i$  的计算。

设 AP 通过传感节点关联反馈或者其他方式已知每个节点的业务信息。RR-ECT 分为2个步骤，如算法1所示。

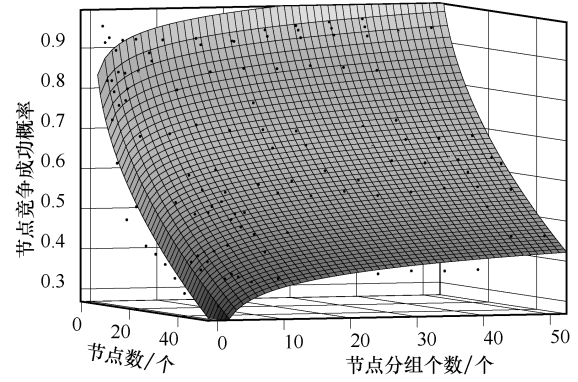


图6 节点竞争成功概率

#### 算法1 RR-ECT

输入 节点  $s \in S, L_s, N_s, r_s, \gamma(K_i, N_s)$

输出 RAW 分组集合  $G$

- 1)  $i \leftarrow 0, G_i \leftarrow \{\}, U_i \leftarrow 0, K_i \leftarrow 0$
- 2) for  $s \in S$  do
- 3)  $E_s \leftarrow \frac{(L_s + L_H)N_s}{r_s}$
- 4) //sort  $S$  by  $E_s$
- 5) end for
- 6) while  $S \neq \{\}$  do// 依次从集合  $S$  的两端取

得节点  $s$

- 7)  $T_{\text{RAW},i,s} \leftarrow T_{\text{RAW},i}(G_i \cup \{s\})$
- 8)  $P_{i,s}^{\text{succ}} \leftarrow P_i^{\text{succ}}(G_i \cup \{s\})$
- 9)  $T_{\text{data},i,s} \leftarrow T_{\text{data},i}(G_i \cup \{s\})$
- 10)  $U_i' \leftarrow \frac{T_{\text{data},i,s}}{T_{\text{RAW},i,s}}$
- 11)  $\Delta U \leftarrow U_i' - U_i$
- 12) if  $\Delta U \geq \mu$  do
- 13)  $G_i \leftarrow G_i \cup \{s\}$
- 14)  $S \leftarrow S \setminus \{s\}$
- 15)  $U_i \leftarrow U_i', K_i \leftarrow K_i + 1$
- 16) else
- 17)  $G \leftarrow G \cup \{G_i\}$
- 18)  $i \leftarrow i + 1$
- 19)  $G_i \leftarrow \{s\}, K_i \leftarrow 1$ //更新  $T_{\text{RAW},i,s}, P_{i,s}^{\text{succ}}, T_{\text{data},i,s}, U_i$
- 20) end if
- 21) end while

首先，由式(4)计算出每个节点的期望信道时间  $E_s$ ，并且根据节点  $s$  大小将节点集合  $S$  排序。通过排序过程，将低采样率、小数据分组、高传输速率

的低负载节点和高采样率、大数据分组、低传输速率的高负载节点区分，分别位于所排节点集合  $S$  的两端。为了平衡 RAW 组内的负载，依次取集合  $S$  两端的节点进行分组操作，兼顾了每个 RAW 组的负载量，避免出现部分 RAW 组内拥塞而部分 RAW 空闲的情况。

然后，确定 RAW 组  $G_i$  中分配的节点。依次从集合  $S$  的两端中取得  $s$  后，根据式(7)计算此时  $G_i$  的持续时间  $T_{RAW,i,s}$ ，并根据节点  $s$  的分组到达数  $N_s$  和组内节点数  $G_i$ ，计算竞争成功概率  $P_{i,s}^{succ}$  的近似，进一步由式(8)估算得到传输数据占用的时间  $T_{data,i,s}$ ，于是由式(9)得到加入节点  $s$  后 RAW 组  $G_i$  的信道利用率  $U_i'$ ，将  $U_i'$  与原信道利用率  $U_i$  的差值定义为加入节点  $s$  后 RAW 组  $G_i$  的信道利用率增量  $\Delta U$ 。比较  $\Delta U$  和设定的增量阈值  $\mu$ ，判断是否应该将节点  $s$  放入组中。若  $\Delta U \geq \mu$ ，将节点  $s$  加入  $G_i$  中，并更新此时  $G_i$  组的信道利用率  $U_i$  和组内节点数  $K_i$ ；若  $\Delta U \leq \mu$ ，则结束当前 RAW 组，将节点  $s$  加入下一个 RAW 组  $G_{i+1}$ ，同时更新其信道利用率。当迭代完  $S$  中的所有节点时，即确定了 RAW 中的节点数与 RAW 分组数，RAW 重分组完成。

### 5 仿真结果

为了验证所提出的 IEEE 802.11ah 协议 RAW 在线重分组方法的传输性能，由于没有 IEEE 802.11ah 芯片支持，本文在 NS3 网络仿真器上对算法进行编程实现<sup>[15]</sup>。在单跳的网络环境中，传感节点在半径为 400 m 内随机分布，AP 置于中心位置。传感节点采样间隔服从参数为 5 的泊松分布，且每采样一次即封装成分组加入发送缓存队列。考虑到传感节点类型不同，采样数据分组的大小也不同，设置传感节点数据分组大小服从 (100, 1 000) 的均匀分布<sup>[10]</sup>。仿真场景设定为无遮挡的开阔环境，传感节点调制编码方式由传感节点到 AP 的距离决定。物理层和 MAC 层主要参数如表 1 所示。设置信道的中心频率为 900 MHz，带宽为 2 MHz；噪声系数（接收端的信噪比损失）为 6.8 dB，传输损耗模型采用文献[16]中的室外模型。在 MAC 层，仲裁时间间隔和信标间隔分别为 316  $\mu$ s 和 0.5 s，最小和最大竞争窗口分别为 15 和 1 023；每个 RAW 内时隙数为 1，即组内 RAW 节点共享一个时隙 slot。采用恒定速率控制方法，流量访问类型为 AC\_BE。传输层采用 UDP 传输协议。

表 1 物理层和 MAC 层主要参数

参数	取值
中心频率/MHz	900
带宽/MHz	2
噪声系数/dB	6.8
传输损耗模型	outdoor, macro
仲裁时间间隔/ $\mu$ s	316
信标间隔/s	0.5
竞争窗口 ( $CW_{min}$ , $CW_{max}$ )	(15, 1 023)
RAW 内时隙数	1
速率控制方法	恒定速率
RTS/CTS	不启用
流量访问类别	AC_BE

### 5.1 RRI-PRS 方法性能

将所设计的 RRI-PRS 与 AID 重分配方法进行对比，结果分别如图 7 和图 8 所示。图 7 对比了 2 种方法重分组开销时间与节点数的关系。结果显示，AID 重分配方法的开销时间随着节点数线性增加，因为 AP 需要花费时间与每个节点重新关联，节点数越多，开销时间也越长；而本文设计的 RRI-PRS 方法不必与节点断开关联，因此没有重关联的时间开销，其开销时间主要是扩展后的信标帧长度带来的开销，与分组数相关，但也仅是毫秒级的开销。图 8 表示在实时仿真中采用 2 种方法对信道利用率的影响，信道利用率取 20 次迭代的平均值，实验在 10.5 s 时对 50 个节点进行 RAW 重分组。结果表明，AID 重分配方法在 RAW 重分组时间内信道利用率为 0，可能导致节点在该时间段内的采样分组丢失，系统性能严重下降；而 RRI-PRS 方法能在线不断联地进行 RAW 重分组，几乎不影响信道利用率。

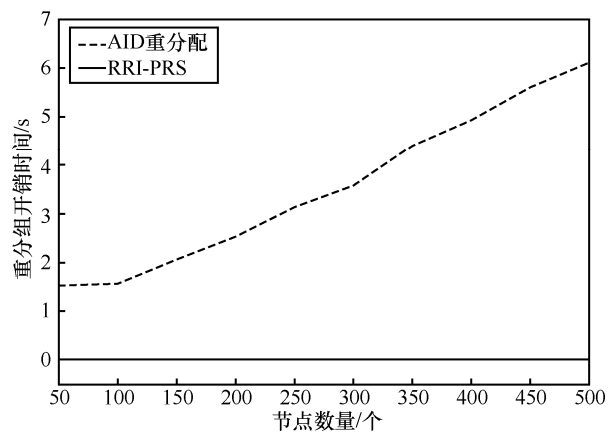


图 7 2 种方法重分组开销时间与节点数的关系

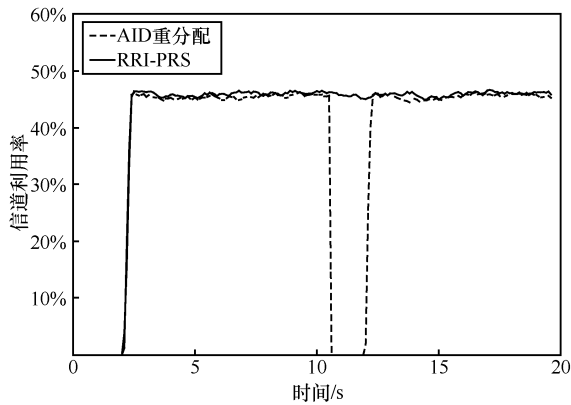


图8 2种方法对信道利用率的影响

## 5.2 RR-ECT 方法性能

为了验证所提 RR-ECT 方法的性能，分别与 2 种分组方法进行对比。1)原 RAW 随机分组方法。将节点随机分为  $M$  个 RAW 组，且服从均匀分布，每个 RAW 的持续时间相同，即  $T_{\text{RAW}} = \frac{T_{\text{beacon}}}{M}$ 。2)文献[9]

所提的 traffic-aware 方法。采用与随机分组方法相同的分组数，每个 RAW 的持续时间也为  $T_{\text{RAW}}$ ，分组方法采用贪婪算法寻找每个节点所属的 RAW。仿真时间为 100 s，结果取 10 次仿真结果的均值。

图9显示了3种方法 RAW 组的平均信道利用率和最差分组的信道利用率。当节点数小于 200 时，信道利用率持续增加，此时信道未达到饱和状态，RAW 持续时间内存在空闲时间，未被全部利用，增加了节点数即增加了网络流量，占用空闲时间用于传输任务，因此信道利用率随节点数增加而提高。当节点数大于 200 时，本文所提 RR-ECT 方法明显优于随机分组方法和 traffic-aware 方法。当网络达到 400 个节点时，RR-ECT 方法的平均信道利用率达到了 54.1%，相对于随机分组方法和 traffic-aware 方法，本文提出的方法分别有 32.5%和 13.7%的增益。这是由于本文所设计的重分组方法同时对 RAW 组内节点、持续时间和分组数进行了优化配置。

### 1) RAW 组内节点优化

RR-ECT 方法按照期望信道时间将流量高和流量低的节点离散开，然后进行合理分组；随机分组方法未考虑节点的负载情况进行分组，易出现负载集中，组内传输拥塞，因而信道利用率低，在饱和时最差分组的信道利用率只有 19.5%；traffic-aware 方法由于进行了组内节点的优化，平均信道利用率和最差信道利用率较好。

### 2) RAW 持续时间优化

RR-ECT 方法对 RAW 持续时间进行了优化，根据组内流量大小申请相应的 RAW 持续时间；traffic-aware 方法和随机分组方法均采用固定且均匀的 RAW 持续时间，没有充分考虑组内的流量负载，RAW 持续时间相对于组内负载或多或少，每个组的信道利用率差别较大，因此平均信道利用率较低，当节点数为 400 时，平均信道利用率分别为 47.58%和 40.83%。

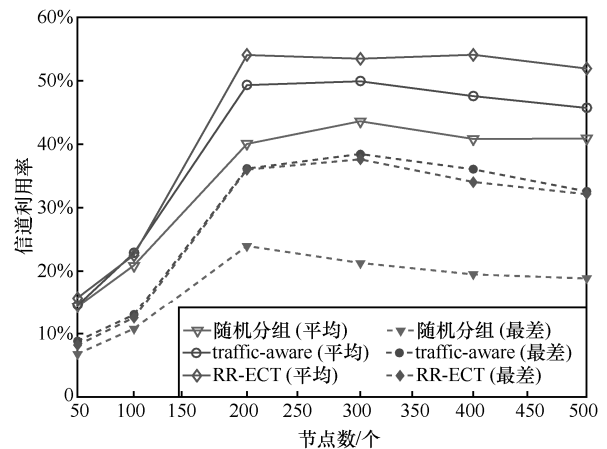


图9 节点数对信道利用率的影响

### 3) RAW 分组数优化

分组数增加在一定程度上能减小组内节点碰撞概率<sup>[12]</sup>，但是也会带来分组开销。RR-ECT 方法对 RAW 分组数进行了优化，权衡了分组开销和组内传输成功概率，采用信道利用率增量确定分组数，相较于 traffic-aware 方法和随机分组方法，RR-ECT 方法能灵活地确定分组数，因此平均信道利用率优于其他 2 种方法，最差分组信道利用率也明显优于随机分组方法，与 traffic-aware 方法相接近，这是因为其最差分组的持续时间小于  $T_{\text{RAW}}$ ，分组开销所占的比重较大，但是 RR-ECT 方法整体信道利用率比 traffic-aware 方法更优。

将网络中吞吐量定义为 AP 平均每秒成功接收到的有效载荷数。该性能与节点数的关系和信道利用率相似，如图 10 所示，当负载未饱和时，吞吐量随节点数增加而增加，但 RR-ECT 方法和 traffic-aware 方法优于随机分组方法，原因是其对节点分组进行优化调整，进一步减小组内碰撞。当负载近饱和（200 个节点）时，RR-ECT 方法的吞吐量达到 735.6 kbit/s，优于 traffic-aware 方法和随机分组方法。特别是当分组数  $M=20$  时，相较于随机分组方法

和 traffic-aware 方法, RR-ECT 方法吞吐量分别提高了 85.6%和 27.6%。并且随着节点数继续增加, 在过负载时, 其吞吐量性能也比另外 2 种方法稳定。

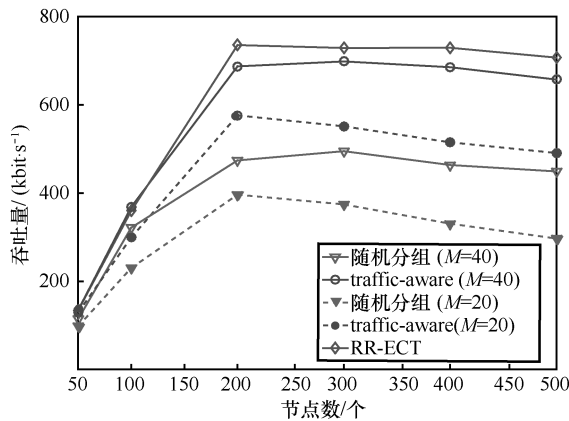


图 10 节点数对吞吐量的影响

在如图 11 所示的分组丢失率曲线中, 分组丢失率与网络中的节点数呈正相关。随着网络负载 (节点数较大) 饱和, 由于组内负载增加使传输碰撞加剧, 分组丢失率也随即升高。RR-ECT 方法由于平衡了组间负载, 同时调整了 RAW 组的持续时间和分组数, 其分组丢失率低于 traffic-aware 方法和随机分组方法。即使 traffic-aware 方法和随机分组方法采用最优分组数 ( $M=40$ ), RR-ECT 方法性能也表现突出。并且节点数越多, 效果越明显。当节点数为 500 个时, RR-ECT 方法分组丢失率较随机分组方法 ( $M=20$ ) 和 traffic-aware 方法 ( $M=20$ ) 分别降低了 38.8%和 31.1%。

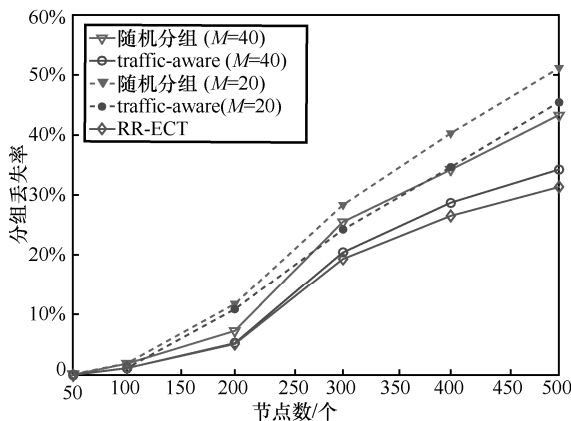


图 11 节点数对分组丢失率的影响

此外, 图 12 显示了节点数对时延的影响。从图 12 可以看出, RR-ECT 方法的时延优于其他 2 种方法。对于 traffic-aware 方法 ( $M=40$ ) 和随机分组

方法 ( $M=40$ ), 节点只能在其所属的 RAW 持续时间内争用信道, 导致传输的间隔加大, 因此传输时延较大。由于节点数增加, 网络负载增加, 节点传输拥塞, 退避窗口也随之加大, 因此数据分组传输时延增加。当节点数为 500 个时, RR-ECT 方法较随机分组方法 ( $M=20$ ) 和 traffic-aware 方法 ( $M=20$ ) 时延分别降低了 24.9%和 17.4%, 因为 RR-ECT 方法对节点进行了优化分组, 自适应调整 RAW 分组数, 使组内竞争减小, 传输成功概率增加。虽然网络传输时延处于秒级, 但在密集网络中, 满足大规模节点的接入需求优先于满足节点的时延需求, 并且工业物联网中大部分为非时延敏感设备, 如作业环境监测等。

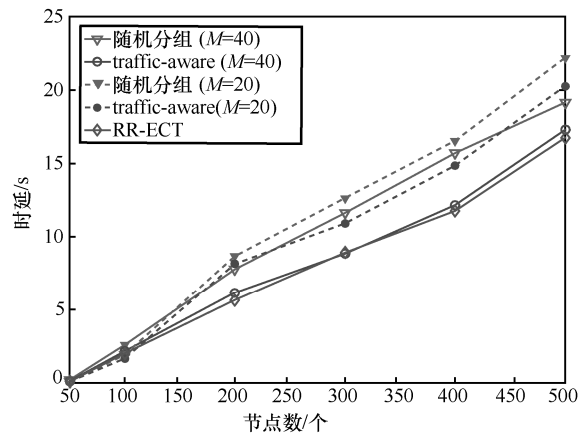


图 12 节点数对时延的影响

## 6 结束语

本文在工业物联网场景中, 提出了一种基于 IEEE 802.11ah 协议的 RAW 在线式重分组方法。首先, 针对目前 RAW 分组优化方法未考虑到 RAW 重分组实现, 且标准 RAW 分组依赖节点 AID 连续问题, 将信道编码技术中码分多址技术应用于 IEEE 802.11ah 协议, 提出了基于伪随机序列的 RAW 重分组实现方法, 设计了伪随机序列作为节点地址码, 采用分组复合码传递 RAW 分组信息, 实现非连续 AID 节点在线式重分组, 大大减少了重分组时间开销。然后, 针对标准 RAW 随机分组方法无法根据实际网络条件调整分组参数, 存在组间负载不平衡问题, 本文提出了基于期望信道时间的 RAW 重分组方法, 采用 RRI-PRS 作为 RAW 重分组实现方法, 分别对节点分组、RAW 持续时间和分组数进行了优化, 按期望信道时间将节点合理安排分

组, 调整 RAW 分组持续时间, 使每个组的负载均衡, 降低了组内节点的碰撞概率, 同时, 权衡分组开销和信道利用率, 优化 RAW 分组数。仿真结果表明, 所提方法明显提高了信道利用率和吞吐量, 降低了分组丢失率和时延。

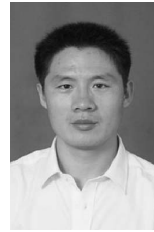
### 参考文献:

- [1] GUNGOR V C, HANCKE G P. Industrial wireless sensor networks: applications, protocols, and standards[J]. Crc Press, 2017(81): 1-2.
- [2] 胡青松, 杨维, 丁恩杰, 等. 煤矿应急救援通信技术的现状与趋势[J]. 通信学报, 2019, 40(5): 163-179.  
HU Q S, YANG W, DING E J, et al. State-of-the-art and trend of emergency rescue communication technologies for coal mine[J]. Journal on Communications, 2019, 40(5): 163-179.
- [3] IEEE 802.11ah/D10.0. Draft for information technology telecommunications and information exchange between systems-local and metropolitan area networks-specific requirements-Part 11: wireless lan medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications-amendment 2: sub 1 GHz license exempt operation[S]. (2016-10-25) [2020-03-02].
- [4] KAI C, ZHANG J, ZHANG X, et al. Energy-efficient sensor grouping for IEEE 802.11ah networks with max-min fairness guarantees[J]. IEEE Access, 2019(7): 102284-102294.
- [5] SEFERAGIC A, MOERMAN I, DE POORTER E, et al. Evaluating the suitability of IEEE 802.11ah for low-latency time-critical control loops[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(5): 7839-7848.
- [6] ALI M Z, MISIC J, MISIC V B, et al. Performance evaluation of heterogeneous IoT nodes with differentiated QoS in IEEE 802.11ah RAW mechanism[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(4): 3905-3918.
- [7] LAKSHMI L R, SIKDAR B. Achieving fairness in IEEE 802.11 ah networks for IoT applications with different requirements[C]//2019 IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [8] AHMED N, DE D, HUSSAIN M I, et al. A QoS-aware MAC protocol for IEEE 802.11ah-based Internet of things[C]//Wireless and Optical Communications Networks. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-5.
- [9] CHANG T C, LIN C H, LIN K C J, et al. traffic-aware sensor grouping for IEEE 802.11ah networks: regression based analysis and design[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2018, 18(3): 674-687.
- [10] TIAN L, KHOROV E, LATRÉ S, et al. Real-time station grouping under dynamic traffic for IEEE 802.11 ah[J]. Sensors, 2017, 17(7): 1559.
- [11] TIAN L, SANTI S, LATRÉ S, et al. Accurate sensor traffic estimation for station grouping in highly dense IEEE 802.11 ah networks[C]//Proceedings of the First ACM International Workshop on the Engineering of Reliable, Robust, and Secure Embedded Wireless Sensing Systems. New York: ACM Press, 2017: 1-9.
- [12] YAN J, LIN K, LIAO M, et al. Timing synchronization free multi-user OFDM-RoF uplink with gold sequence multiplexing[C]//International Conference on Photonics in Switching. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-3.
- [13] SOARES S M, CARVALHO M M. Throughput analytical modeling of

IEEE 802.11ah wireless networks[C]//Consumer Communications and Networking Conference. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-4.

- [14] LIU R P, SUTTON G J, COLLINGS I B. WLAN power save with offset listen interval for machine-to-machine communications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(5): 2552-2562.
- [15] TIAN L, DERONNE S, LATRÉ S, et al. Implementation and validation of an IEEE 802.11 ah module for NS-3[C]//Proceedings of the Workshop on NS-3. New York: ACM Press, 2016: 49-56.
- [16] HAZMI A, RINNE J, VALKAMA M. Feasibility study of IEEE 802.11ah radio technology for IoT and M2M use cases[C]//2012 IEEE Globecom Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2012: 1687-1692.

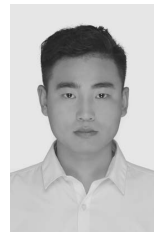
### [作者简介]



孙彦景 (1977- ), 男, 山东滕州人, 博士, 中国矿业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为嵌入式实时系统、无线传感器网络、信息物理系统。



杨俊秋 (1994- ), 男, 四川泸州人, 中国矿业大学硕士生, 主要研究方向为无线网络。



陈岩 (1994- ), 男, 江苏睢宁人, 中国矿业大学博士生, 主要研究方向为无线网络、边缘计算、物联网等。

王艳芬 (1962- ), 女, 江苏徐州人, 博士, 中国矿业大学教授, 主要研究方向为信号处理与通信。

陈晓晶 (1981- ), 男, 江苏南通人, 天地 (常州) 自动化股份有限公司高级工程师, 主要研究方向为煤矿自动化、数字化、智能化研发等。

刘丰祯 (1990- ), 男, 山东潍坊人, 天地 (常州) 自动化股份有限公司助理研究员, 主要研究方向为矿井无线通信、矿井监控。

孙智 (1981- ), 男, 北京人, 博士, 纽约州立大学布法罗分校教授, 主要研究方向为无线通信网络、水下无线通信、磁感应通信。