

低功耗物联网 RTRS 算法

陈瑜晨¹, 曹渊², 张来鹏¹, 丁良辉¹, 杨峰¹

(1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240; 2. 海军研究院, 北京 104422)

摘要: 针对低功耗物联网 IEEE 802.11ah 接入终端周期性上传数据的业务特点, 提出一种能量最优的实时限制接入窗口 (RAW, restricted access window) 分组参数设置 (RTRS, real-time RAW setting) 算法。在 RTRS 算法中, 多个节点向一个基站接入点 (AP, access point) 报告数据, 上行信道资源按照时间被划分成多个 Beacon 周期。在一个 Beacon 周期内, AP 根据当前周期终端的上传时间预测下一次 Beacon 周期内终端的上传时间和需要上传数据的终端总量; AP 根据一个周期内的接入终端总量计算能量效率, 设计能量最优的 RAW 参数, 并通知接入终端按照最优参数接入。仿真结果表明, 该方法能够根据上个周期内终端的上传时间准确预测当前网络状态, 根据预测的状态动态调整 RAW 配置参数, 显著提高能量效率。

关键词: 低功耗物联网; IEEE 802.11ah; 隐藏节点; 实时接入窗控制

中图分类号: TP391

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2019.00132

RTRS algorithm in low-power Internet of things

CHEN Yuchen¹, CAO Yuan², ZHANG Laipeng¹, DING Lianghui¹, YANG Feng¹

1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

2. Naval Research Academy, Beijing 104422, China

Abstract: Considering the feature of periodical uplink data transmission in IEEE 802.11ah low-power wide area network (LWPAN), a real-time RAW setting (RTRS) algorithm was proposed. Multiple node send data to an access point (AP), and the uplink channel resources were divided into Beacon periods in time. During a Beacon period, AP firstly predicted the next data uploading time and the total amount of devices that will upload data in the next Beacon period. The AP calculated the optimal RAW parameters for minimum energy cost and broadcasted the information to all node. Then all devices upload data according to the RAW scheduling. The simulation results show that the current network state can be predicted accurately according to the upload time of the terminal in the last period. According to the predicted state, raw configuration parameters can be dynamically adjusted and the energy efficiency can be significantly improved.

Key words: low-power IoT, IEEE 802.11ah, hidden node, RTRS

1 引言

万物互联迅速发展, 无线物联网应用呈现爆发式增长趋势, 出现了数量巨大的 M2M 终端^[1-2]。

研究预测, M2M 终端的数量会以每年 20% 的速度增长^[2]。

当前的低功耗物联网通信技术主要分为两大类, 分别为个人无线局域网 (WPAN, wireless

收稿日期: 2019-02-21; 修回日期: 2019-08-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61771309, No.61671301, No.61420106008, No.61521062); 上海市科学技术委员会资助项目 (No.15DZ2270400); 上海市重点实验室基金资助项目 (No.STCSM15DZ2270400); 上海交通大学医工交叉基金资助项目 (No.YG2017QN47)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61771309, No.61671301, No.61420106008, No.61521062), The Project of Shanghai Science and Technology Commission (No.15DZ2270400), Shanghai Key Laboratory Foundation Project (No.STCSM15DZ2270400), Shanghai Jiao Tong University Medical and Worker Cross-Fund Project (No.YG2017QN47)

personal area network) 和低功耗广域网络 (LWPAN, low-power wide-area network) [3]。WPAN 主要提供小范围中等数据速率的接入, LWPAN 主要侧重于低数据速率、长距离与大面积覆盖。典型的 WPAN 网络包括 ZigBee 与低功耗蓝牙 (BLE) 等 [4], LWPAN 包括 Sigfox、LoRa、NB-IoT 等。

IEEE 802.15.4ah 和 BLE 标准重点解决低功耗问题, 但是传输距离短, 通信速率较低; LoRa、SigFox 和 NB-IoT 标准主要解决长距离传输问题, 但是系统吞吐率较低。针对上述问题, IEEE 组织于 2017 年初确认了 IEEE 802.11ah 标准, 兼顾长距离传输和较高吞吐率的需求。

IEEE 802.11ah 标准的主要特征包括: 工作在 Sub-1 GHz 免授权频段, 较低的载波频率能够实现覆盖距离更远; 具备较高的通信速率, 最低速率为 100 kbit/s, 最高速率可达 78 Mbit/s; 一个 AP 最多能够支持 8 191 个用户接入网络终端。但是, 大量的用户会导致严重冲突, 因此, IEEE 802.11ah 设计了 RAW 机制, 在一定时间段内只允许部分终端接入, 从而降低信道冲突, 减少因冲突导致的能量浪费。但是, 接入窗设置和接入终端数量是影响整体能量开销的重要因素, 需要针对具体应用进行优化。

针对该问题, Raeesi 等 [5-6] 提出了一种研究计算 IEEE 802.11ah 系统能量消耗和吞吐率的分析模型。Wang 等 [8] 提出了一种根据接入终端数量优化 RAW 组内时隙个数的方案, 提高了能量效率, 但是需要已知接入终端数量, 实际应用比较困难。Bel 等 [9] 采用多目标博弈最优化的方法设计研究上行和下行时隙分配个数对系统功耗的影响, 并获取最优信道接入时隙个数。该方案能够保证终端长时间处于休眠状态, 但是要求精确的系统时钟同步, 难度较大。Ogawa 等 [7] 基于增强型分布式信道访问 (EDCA, enhanced distributed channel access) 方式建立了一种延长终端休眠时间的策略, 强制休眠多个接入时隙连续退避的终端。该方案能够有效降低冲突次数, 延长终端休眠时间, 降低系统功耗开销,

但是该方法会导致数据传输时延较长。文献 [10] 中针对具有部分连接的射频传输系统结构的多用户大规模 MIMO 系统, 制定了计算和通信功率的联合优化问题。文献 [11-12] 中提出了考虑交通负荷和功耗的空间分布的蜂窝网络能效模型, 并对网络中的能量效率进行了分析。上述研究均没有考虑接入终端数量随时间的变化特性, 因此, 本文针对 IEEE 802.11ah MAC 协议特点, 提出一种终端上传数据周期估计方法和 RTRS 算法。RTRS 算法分为两部分, 分别为终端上传数据周期预测和 RAW 分组参数优化。在终端上传数据周期预测中, AP 根据每个终端上传数据的时间间隔使用比例积分微分 (PID) 方法自适应跟踪终端上传周期的改变, 预测数据发送周期。在 RAW 分组参数优化中, AP 根据预测每个终端的数据发送时间周期估计下一上传数据时间段内将要上传数据的终端数量, 求取能量效率最优的 RAW 参数, 并通知接入终端按照最优参数接入。

仿真结果表明, 与随机信道接入算法对比可知, RTRS 算法的终端接入信道成功率为 100%。

2 IEEE 802.11ah 的 MAC 协议

IEEE 802.11ah 标准的拓扑为星型结构, 所有终端直接与 AP 通信。在终端接入信道阶段, RAW 机制指终端被分在不同的组内, 规定在一定的时间段内只允许一个组内的终端竞争信道, 从而降低信道申请的碰撞概率, 提高数据通信吞吐率。

RAW 原理如图 1 所示, AP 周期性广播信标预定传送时间 (TBTT, target beacon transmission time), 两个 Beacon 帧信号之间包含多个 RAW 分组。终端周期性唤醒, 接收 Beacon 信息, 信息中包含 Beacon 时间间隔以及在两个 Beacon 之间的 RAW 窗参数设置 (RPS, raw parameter set)。RPS 包含两个 Beacon 帧之间的一个或者多个 RAW 的参数设置, 包括 RAW 起始时间、RAW 编号、RAW 组内信道接入时隙分配和允许加入的终端 AID 范

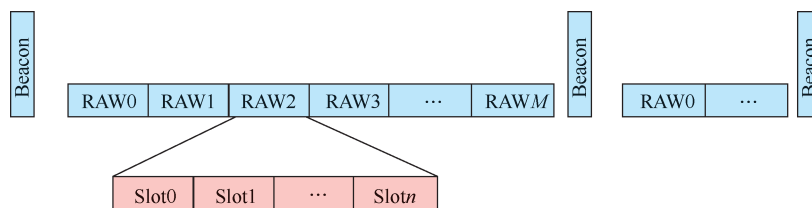


图 1 RAW 原理

围。一个 RAW 组中有一个或者多个信道接入时隙。

RAW 组内终端使用 EDCA 或者分布式协调 (DCF, distributed coordination function) 的方式进行信道竞争。如果终端不属于当前 RAW 分组, 即使该终端有数据需要上传或接收, 也不会参与信道竞争, 而是处于休眠状态。使用该机制能够保证大量终端长时间处于睡眠状态, 达到降低系统功耗的目的。

在 IEEE 802.11ah 中, 当终端的退避值递减到 0 时, 终端向 AP 上传一个 PS-poll 请求接入信道。终端成功接收 AP 允许接入反馈后, 继续上传数据分组, 等待接收 ACK。如果两个或多个终端退避值同时递减到 0, 则终端之间会发生信道冲突。发生碰撞后, 终端进入退避状态, 重新等待接入信道。同时, 为了节约能量, IEEE 802.11ah 支持虚拟网络侦听 (NAV, network allocation vector) 机制, 当终端侦听到有终端上传数据时, 直接进入睡眠状态。由以上分析可知, 终端能量消耗主要包括如下 4 个方面。

- 1) 所有终端周期性唤醒接收 Beacon 广播信息所消耗的能量;
- 2) 退避过程中, 终端侦听信道忙闲状态所消耗的能量;
- 3) 终端成功向 AP 发送一个数据流程所消耗的能量;
- 4) 冲突发生时, 终端发送 PS-poll 信号和接收 AP 反馈所消耗的能量。

3 RTRS

3.1 终端上传周期预测算法

终端上传周期预测算法要求 AP 能够根据当前周期内上传数据的终端, 预测每个终端的数据上传周期和下一个 Beacon 周期内需要上传数据的终端列表。

为了不失一般性, 假设大量终端以一定的时间间隔请求接入网络上传数据, 每个终端的最短上传时间间隔不低于 5 个上传周期。为了跟踪终端上传数据周期变大或者变小的情况, 提出一种基于比例积分微分 (PID, proportional integral derivative) 的动态预测算法。

动态预测算法通过统计 AP 连续成功预测终端上传周期的次数, 得到连续多次累加误差。借助误差值对预测终端上传周期进行比例、积分调节; 通过统计 AP 连续失败预测终端上传周期的次数, 得到预测值的变化趋势; 通过误差变化趋势对预测终

端上传周期进行快速调整, 实现微分调节。当预测值与终端实际上传周期误差较小时, 比例和积分调节算法实现主要的预测功能; 当预测值与终端实际上传周期误差较大时, 微分调节算法实现主要预测功能。

设 n_{succ} 、 n_{fail} 、 n_{over} 分别为 AP 连续成功预测终端上传周期的次数、AP 连续失败预测终端上传周期的次数和 AP 连续预测终端上传周期过大的次数。

根据当前 Beacon 周期内终端是否在 AP 预测的上传队列中, 终端上传周期预测算法实现流程分别设计如下。

1) 当前 Beacon 周期内终端 s 在 AP 预测的上传队列中, 如果终端 s 在当前 Beacon 周期内上传了数据, 则将 n_{succ} 加 1。

如果终端 s 在当前 Beacon 周期内未上传数据, 则分别处理如下。

① 当终端第一次发生数据未上传的情况时, 表明估计的上传周期 \hat{t}_{int}^s 与实际间隔 t_{int}^s 相差较小, 将预测的上传周期增加 $1/n_{succ}$ 周期。

② 当终端连续多次未在估计的 Beacon 内上传数据时, 表明估计的 \hat{t}_{int}^s 与终端实际间隔 t_{int}^s 偏差较大, 每失败一次则失败次数 n_{fail} 加 1, 将估计的上传间隔增加 $2 \cdot (n_{fail} - 1) + 1$ 。

2) 当前 Beacon 周期内终端 s 不在 AP 预测的上传队列中。当终端第一次提前上传数据时, 表明估计的 \hat{t}_{int}^s 略大于终端实际间隔 t_{int}^s , 将预测上传周期减少 $1/n_{succ}$ 周期。

当终端连续多次提前上传数据时, 则估计时间 t_{int}^s 变化变快, 更迅速逼近终端实际的间隔 \hat{t}_{int}^s 。每超前一次, 则超前次数 n_{over} 加 1。将预测上传数据周期设为 $\max\{t_{int}^s - 2 \cdot (n_{over} - 1) + 1, 1\}$ 。

每个节点终端数据上传周期的预测算法流程如图 2 所示。

3.2 RAW 参数优化

3.2.1 终端能量消耗分析

设每个 RAW 组内有 n 个终端竞争信道, 若当前时隙有终端退避值递减为 0, 则发起信道接入的概率为

$$\tau = \frac{2(1-2p_n)}{(1-2p_n)(CW_{min}+1) + p_n CW_{min}(1-(2p_n)^m)} \quad (1)$$

其中, p_n 为当前时隙内出现冲突的概率, 表示为 $p_n = 1 - (1 - \tau)^{n-1}$ 。

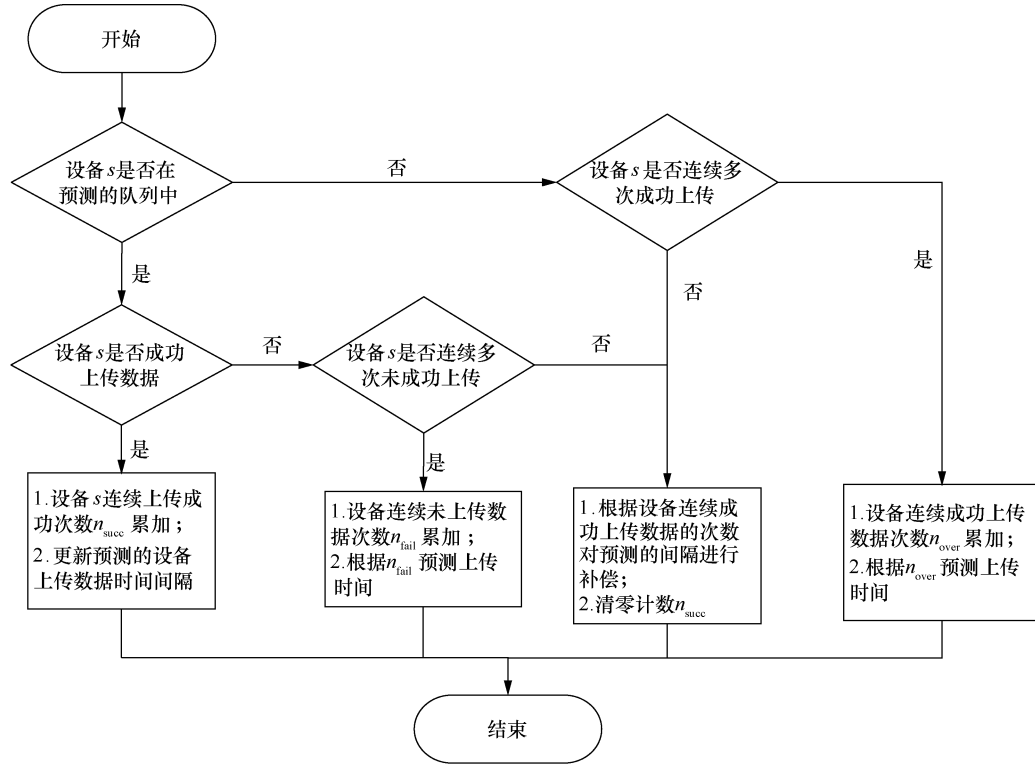


图 2 预测算法流程

任何一个退避时隙可以分为成功接入、空闲和冲突 3 种状态。根据式(1)可知，当前时隙有一个终端成功接入信道的概率为

$$p_{ns} = n\tau(1-\tau)^{n-1} \quad (2)$$

当前时隙处于空闲状态的概率为

$$p_{ni} = (1-\tau)^n \quad (3)$$

当前退避时隙出现冲突的概率为

$$p_{nc} = 1 - p_{ns} - p_{ni} \\ = 1 - n\tau(1-\tau)^{n-1} - (1-\tau)^n \quad (4)$$

若某个终端成功向 AP 上传数据，则需要经过的退避时隙个数为 $N_n = 1/p_{ns}$ 。因而，一个终端成功向 AP 上传一次数据所需的总时间期望为

$$T_{ns} = \frac{1}{p_{ns}}T_{slot} + p_{nc} \frac{1}{p_{ns}}T_c + T_s \quad (5)$$

其中， T_{slot} 为一个时隙长度， T_c 为发生终端冲突所消耗的时间， T_s 为终端成功发送数据所用的时间。

当出现冲突时，至少有两个终端同时选择该时隙进行数据传输，则当有 n 个终端竞争信道时，平均每次冲突的终端个数为

$$N_{nc} = \sum_{k=2}^n k\tau^k(1-\tau)^{n-k} \quad (6)$$

因此，当有 n 个终端竞争信道，且有一个终端成功上传数据时，RAW 组内终端消耗的总能量期望为

$$W_n = nN_nW_r + N_n p_{nc} N_{nc} W_c + W_s \quad (7)$$

其中， W_r 为终端在一个时隙内接收消耗的功率， W_c 为一个终端出现冲突时消耗的功率， W_s 为一个终端成功发送数据的流程消耗的能量。

3.2.2 RAW 总能量消耗分析

根据低功耗物联网的特性，假设每个终端在一个 Beacon 周期内最多有一个数据分组需要上传。因此，在一个 RAW 组内，终端上传数据成功后进入休眠状态，剩余的终端继续竞争信道，直至所有终端数据上传成功或者 RAW 分组结束。将每次终端发送成功数据耗费的总能量进行累加，得到在一个 RAW 组内终端消耗的总能量和总时间。

设一个 RAW 组内初始存在 N 个用户需要接入，则能够成功接入的用户数量期望 T_N 满足式(8)条件为

$$\sum_{k=N}^{T_N} T_{ks} \leq T_{RAW} \leq \sum_{k=N}^{k=T_N+1} T_{ks} \quad (8)$$

相应地， T_N 个终端成功发送数据所消耗的能量期望为

$$W_{\text{RAW}} = \sum_{k=N}^{T_N} W_k \quad (9)$$

在系统运行过程中，终端需要周期性唤醒，接收解析 AP 广播的 Beacon 信息。设要给 Beacon 周期分为 M 个 RAW 分组，则所有终端接收 RPS 消耗的能量为

$$W_{\text{oh}} = MT_{\text{RPS}} N_{\text{all}} P_{\text{rx}} \quad (10)$$

其中， M 为系统中 RAW 分组个数， T_{RPS} 为一个 RPS 信息传输需要的时间。

在包含 M 个 RAW 分组的一个 Beacon 周期内，有 N_{sum} 个终端需要向 AP 上传数据时，需要消耗的总能量为 $W_{\text{sum}} = MW_{\text{RAW}} + W_{\text{oh}}$ 。

由于给定每个 RAW 分组内的用户数，可知成功发送的报文个数，则单位能量能够传输的信息量，即能量效率为

$$\eta = \frac{MT_{N_{\text{sum}}/N}}{W_{\text{sum}}} = \frac{MT_{N_{\text{sum}}/N}}{MW_{\text{RAW}} + W_{\text{oh}}} \quad (11)$$

3.2.3 能量最优 RAW 分组

由式(11)可知，当接入信道终端数量一定时，如果 RAW 分组个数过少，则 RAW 组内终端信道冲突出现的概率越高，能量效率较低；如果分组个数过多，则 RAW 组内终端较少，组内出现信道冲突的概率较低。但是，分组个数 M 过多则会增加接收 Beacon 信号的能量消耗，降低能量效率。因此，随着分组个数的增加，系统能量效率呈现先增大后减小的趋势，存在一个最优分组个数 M ，使得系统的能量效率最高。其优化方程可以写为

$$\max \eta \quad (12)$$

$$\text{s.t. } T_{\text{beacon}} - M(T_{\text{RAW}} + T_{\text{RPS}}) \geq 0 \quad (13)$$

其中， T_{beacon} 为当前 Beacon 周期的时间长度。

由于式(12)中包含用户数量迭代，并非线性优化问题。因此，对于给定的用户数 N_{sum} ，本文通过二分法搜索求解最优分组个数 M_{opt} ，使得系统能量效率最高。

4 仿真实验

4.1 仿真配置

假设系统已进行初始化操作，每个终端具有一个特定的 AID 编号，并且在一定连续的 AID 编号范围内的终端不会出现隐藏节点。RTRS 算法仿真参数如表 1 所示。

表 1 RTRS 算法仿真参数

参数	数值
通信速率	100 kbit/s
SIFS	160 μ s
DIFS	200 μ s
退避时隙	52 μ s
发送功率	200 mW
Beacon 周期	93.6 s
ACK 分组大小	8 B
载波频率	900 MHz
最小竞争窗	8
最大竞争窗	1 024
最大退避次数	8
接收功率	200 mW
RPS 参数大小	12 B
PS-poll	16 B

本文从 3 个方面进行仿真：1) RTRS 算法在一个数据上传周期内终端发送数据的成功率；2) 数据分组大小对最优系统分组个数的影响；3) AP 预测需要上传数据的终端个数对系统能量效率的影响。

在系统初始化阶段，AP 对每个终端上传数据周期值还未趋于稳定，存在很大的波动，令系统工作 10 个 Beacon 周期，当估计值趋于稳定时，再进行数据统计。为了防止个别实验结果对系统结果的影响，当每次参数设定后，进行 100 次 Beacon 周期的数据统计，以消除随机事件对实验结果的影响。

4.2 仿真结果

4.2.1 终端上传成功率对比

在一个 Beacon 周期内，有 1 000 个终端需要进行数据上传，每个上传数据分组的大小为 920 bit，不同算法终端上传数据成功率如图 3 所示。从图 3 中可以发现，当 RAW 分组个数不小于 5 时，RTRS 算法中的终端上传数据成功率趋近于 100%；当随机时隙选择算法在分组个数为 1~20 时，终端上传数据成功率始终维持在 85%左右。因为随机选择接入时隙会造成接入时隙浪费较多，使得系统整体上传数据成功率降低。使用 RTRS 算法时，若 RAW 分组个数较小，则会导致终端上传数据成功率较低。随着分组个数的增加，RAW 组内终端数量逐渐减少，信道繁忙程度降低，终端上传数据成功率逐渐上升，直至不会发生分组丢失的情况。

4.2.2 终端数据分组大小对系统的影响

数据分组大小对系统性能的影响如图 4 所示，从图 4 中可以发现，在分组个数相同的情况下，终端每次上传的数据分组越大，则相应的系统能量效率越高。因为当终端向 AP 上传数据时，其他终端处于休眠状态，不需要额外耗费能量。终端发送的数据分组越大，则对应消耗的有用功率所占比重就越大，所以会出现终端上传数据分组越大，对应的系统能量效率越高的现象。

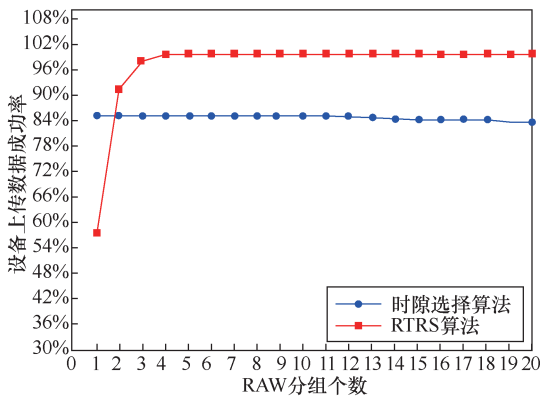


图 3 不同算法终端上传数据成功率

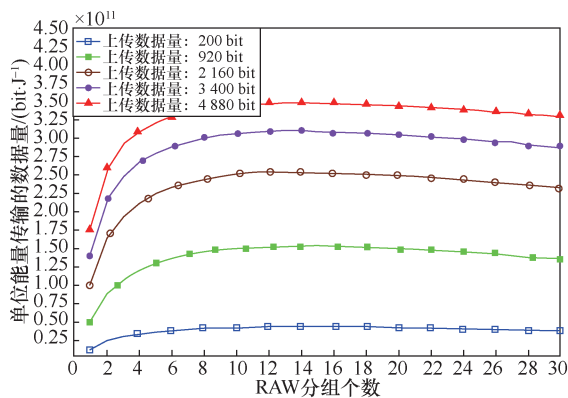


图 4 数据分组大小对系统性能的影响

同时，由图 4 可知，终端上传数据分组的大小不会影响系统能量效率最高时的 RAW 分组个数。当接入终端数量为 1 000 左右时，RAW 最优的分组个数范围为[12,16]。当 Beacon 周期内接入系统的终端数量一定时，RAW 分组个数决定了每个 RAW 组内信道的忙闲程度。当每个周期内接入系统的终端数量与上传数据分组大小固定时，即可得到最优的 RAW 分组个数范围。

4.2.3 接入终端个数对系统的影响

终端总量对系统性能的影响如图 5 所示。随

着 RAW 分组个数增加，每条能量效率曲线都呈现先上升后下降的趋势。当 RAW 分组个数较小时，RAW 组内终端较多，信道竞争冲突情况严重，导致系统整体能量效率较低。当 RAW 分组个数增加时，RAW 组内终端间信道竞争冲突状况缓和，系统能量效率升高；当分组个数过高时，所有终端需要耗费较多能量以接收 RAW 分组设置信令 RPS。

对于不同接入终端数量，最优的 RAW 分组个数不同。当接入终端数量为 1 000 时，最优的 RAW 划分个数范围为[12,16]，当接入终端总量为 5 000 时，最优的 RAW 划分个数范围为[23,28]。最优的 RAW 划分个数随着接入终端的增多而变大，当 RAW 划分个数固定时，随着接入终端数量的增加，RAW 组内终端竞争冲突情况加重，需要增加 RAW 分组个数来降低 RAW 组内终端竞争冲突出现的概率，进而提高能量效率。

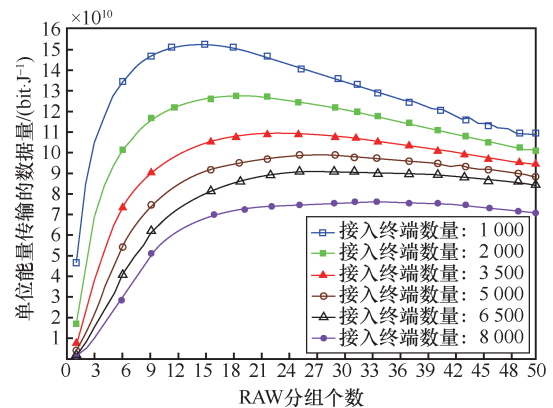


图 5 终端总量对系统性能的影响

根据以上分析可知，在一个 Beacon 周期内，当接入系统的终端数量固定时，上传数据分组大小在一定范围内不影响 RAW 优化的分组个数。RAW 最优分组个数范围受接入系统的终端个数影响，可以根据该特性，当 AP 预估好下一 Beacon 周期内需要上传数据的终端队列时，即可得到最优的 RAW 划分个数的范围，实现系统能量效率实时最优的目的。

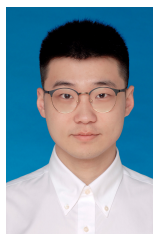
5 结束语

本文以物联网通信中的低功耗为目的，基于 IEEE 802.11ah 标准提出 RTRS 算法，实现在系统通信过程中动态用户数量估计，并实时动态调整 RAW 分组参数，达到系统能量效率最高的目标。

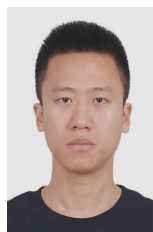
参考文献:

- [1] ZHENG L, NI M M, CAI L, et al. Performance analysis of group-synchronized DCF for dense IEEE 802.11 networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(11): 6180-6192.
- [2] ADAME T, BEL A, BELLALTA B, et al. IEEE 802.11ah: the Wi-Fi approach for M2M communications[J]. IEEE Wireless Communications, 2014, 21(6): 144-152.
- [3] TIAN L, KHOROV E, LATRÉ S, et al. Real-time station grouping under dynamic traffic for IEEE 802.11ah[J]. Sensors, 2017, 17(7): 1559.
- [4] WANG H N, DONG L X, WEI W, et al. The WSN monitoring system for large outdoor advertising boards based on ZigBee and MEMS sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(3): 1314-1323.
- [5] RAEESI O, PIRSKANEN J, HAZMI A, et al. Performance evaluation of IEEE 802.11ah and its restricted access window mechanism[C]//2014 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC). IEEE, 2014.
- [6] RAEESI O, PIRSKANEN J, HAZMI A, et al. Performance enhancement and evaluation of IEEE 802.11ah multi-access point network using restricted access window mechanism[C]//2014 IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems. IEEE, 2014.
- [7] OGAWA K, SANGENYA Y, MORIKURA M, et al. IEEE 802.11ah based M2M networks employing virtual grouping and power saving methods[C]//2013 IEEE 78th Vehicular Technology Conference (VTC Fall). IEEE, 2013.
- [8] WANG Y R, CHAI K K, CHEN Y, et al. Energy-delay aware restricted access window with novel retransmission for IEEE 802.11ah networks[C]//2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). IEEE, 2016.
- [9] BEL A, ADAME T, BELLALTA B, et al. CAS-based channel access protocol for IEEE 802.11ah WLANs[C]//2014 European Wireless Conference. VDE, 2014: 1-6.
- [10] GE X H, SUN Y, GHARAVI H, et al. Joint optimization of computation and communication power in multi-user massive MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(6): 4051-4063.
- [11] XIANG L, GE X H, WANG C X, et al. Energy efficiency evaluation of cellular networks based on spatial distributions of traffic load and power consumption[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(3): 961-973.
- [12] GE X, YANG B, YE J, et al. Spatial spectrum and energy efficiency of random cellular networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(3): 1019-1030.

[作者简介]



陈瑜晨（1995- ），男，河南洛阳人，上海交通大学硕士生，主要研究方向为通信与信息系统。



曹渊（1985- ），男，山西阳城人，海军研究院工程师，主要研究方向为舰载武器系统。



张来鹏（1992- ），男，天津人，上海交通大学硕士生，主要研究方向为信息与通信系统。



丁良辉（1981- ），男，江苏东台人，上海交通大学副教授，主要研究方向为信息与通信系统。



杨峰（1978- ），男，北京人，上海交通大学副教授，主要研究方向为导航技术和高速无线视频传输技术。