

面向物联网的 Wi-Fi HaLow 技术研究

田乐, 胡宇翔, 韩伟涛

(信息工程大学, 河南 郑州 450002)

摘要: 最新推出的 Wi-Fi 标准 IEEE 802.11ah 又称为 Wi-Fi HaLow, 是一种支持大规模网络的低功耗物联网通信技术, 主要应用于智能家居、医疗健康、车联网、工业流程控制、物流与资产管理、智慧农业和智慧城市等领域。首先介绍了 HaLow 标准, 重点描述了为支持物联网而引入的新机制, 进而梳理并分析了 HaLow 相关的研究工作。在此基础上, 探讨了目前面向物联网的 Wi-Fi HaLow 技术仍存在的问题及挑战。

关键词: IEEE 802.11ah (HaLow); 物联网; 大规模; 低功耗

中图分类号: TN929.53

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2019.00119

Research on Wi-Fi HaLow for the Internet of things

TIAN Le, HU Yuxiang, HAN Weitao

Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China

Abstract: The new Wi-Fi standard, named IEEE~802.11ah or Wi-Fi HaLow, is considered as a very promising technology for the Internet of things (IoT), aiming to support large-scale IoT networks in an energy-efficient manner. It is mainly to be used for IoT scenarios, such as smart homes, digital health care, connected cars, industrial process control, logistics & asset management, smart cities, agriculture & environmental sensors, etc. An overview of the IEEE 802.11ah technology and its recent development were provided. The key features were explored, demonstrating that IEEE 802.11ah is suitable for its target use cases. Moreover, a comprehensive summary and analysis of the related work were conducted. Finally, identifies several open research issues that need to be addressed to fully realize the vision of large-scale and low power Wi-Fi networks for the IoT were discussed.

Key words: IEEE 802.11ah (HaLow), Internet of things, large scale, low power

1 引言

物联网 (IoT, Internet of things) 即“万物相连的互联网”, 是基于互联网延伸和扩展的网络, 将各种信息传感设备与互联网结合起来, 目的是在任何时间、任何地点实现人、机、物的互联互通。所谓的“设备”包括手机、咖啡壶、洗衣机、耳机、灯具、传感器、执行器和可穿戴设备以及其他任何

人类能想到的物品。

全球 IT 研究与顾问咨询公司高德纳 (Gartner) 预测, 到 2020 年全球将有 200 亿个物联网设备, 其中, 大部分采用电池供电模式^[1]。因此, 能够支持远距离传输、大规模接入、低功耗的无线传输技术日益成为物联网的重要组成部分。

现有的低功耗物联网无线通信协议主要分为两大类, 即无线个人局域网 (WPAN, wireless personal area

收稿日期: 2019-06-14; 修回日期: 2019-08-08

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No.2017YFB0803204); 国家自然科学基金资助项目 (No.61521003, No.61872382, No.61702547); 广东省重点领域研发计划资助项目 (No.2018B010113001)

Foundation Items: The National Key R&D Program of China (No.2017YFB0803204), The National Natural Science Foundation of China (No.61521003, No.61872382, No.61702547), Research and Development Program Subsidized Projects in Key Areas of Guangdong (No.2018B010113001)

network)技术和低功率广域网络(LPWAN, low-power wide-area network)技术。WPAN技术如ZigBee、低功耗蓝牙(BLE, bluetooth low energy)和Dash7,支持短距离传输。ZigBee的传输距离为30~50 m, BLE的传输距离为100 m, Dash7的传输距离为1 000 m, 吞吐量可达几百或上千 kbit/s^[4]。LPWAN技术则包括工作于未授权频谱的LoRa、Sigfox等以及工作于授权频谱、3GPP(3rd generation partnership project)支持的2G/3G/4G蜂窝通信技术,如EC-GSM、LTE Cat-m、NB-IoT等。这些技术支持远距离传输,最远可达50 km,但吞吐量极低,一般为几百或几千 bit/s。上述两种技术各有侧重,适合于不同的物联网应用。但尚有部分应用需求处于“空白”地带,即WPAN和LPWAN技术均无法覆盖到,如传输距离从几百米到几千米,吞吐量从几百 kbit/s到上百 Mbit/s。Wi-Fi联盟于2017年推出的新Wi-Fi标准IEEE 802.11ah又称为Wi-Fi HaLow,则能够填补上述空白,IEEE 802.11ah和WPAN及LPWAN技术的比较如图1所示。

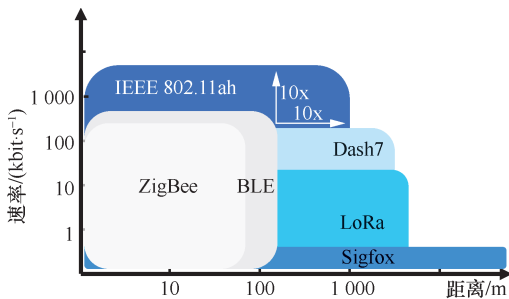


图1 IEEE 802.11ah和WPAN及LPWAN技术的比较

HaLow是为了满足物联网应用而设计的无线局域网标准,主要应用于传感器网络、智能家居、车联网以及健康医疗等新兴领域^[2-3]。HaLow在兼容传统IEEE 802.11技术的基础上对物理(PHY)层、媒体接入控制(MAC, media access control)层进行了修改^[5]。在PHY层,不同于传统IEEE 802.11使用2.4 GHz和5 GHz频段,HaLow工作在小于1 GHz的频段,即Sub-GHz频段,具有较远的传输距离,最远可达1 km;单天线情况下,传输速率为150 kbit/s~346.666 Mbit/s;支持中继技术以进一步扩大覆盖面;支持定向天线以解决隐藏的终端问题。在MAC层,引入了多种机制使其更好地支持大规模、低功耗网络。规定了多种终端类型如传感器及非传感器以适应不同的应用场景;单个接入点(AP)支持多达8 192个终端;改进了传统

的信道接入机制“载波监听多路访问/冲突避免(CSMA/CA)”,提出了受限访问窗口(RAW, restricted access window)以减少信道竞争;在传统流量指示图(TIM, traffic indication map)的基础上提出了TIM分段机制以获得更长的轮询周期^[6];增加了目标唤醒时间(TWT, target wake time)使节点获得长达一年的待机时间等^[7]。

2 Wi-Fi HaLow概述

2.1 PHY层

HaLow PHY层继承了IEEE 802.11ac的特性,并使其适用于1 GHz以下的频段^[8-9],其信道带宽包括1 MHz、2 MHz、4 MHz、8 MHz和16 MHz,其中,1 MHz和2 MHz是强制性支持,4 MHz、8 MHz和16 MHz为可选。Wi-Fi HaLow频段如表1所示,列出了主要国家或地区规定的HaLow频段,从中可以看出,欧洲、日本及韩国支持部分带宽,中国则支持1~16 MHz的所有带宽。在低频率和窄带宽情况下,允许HaLow在更远距离范围内传输(理论上传输距离达1 km甚至更多),并且比使用2.4 GHz和5 GHz频带的传统Wi-Fi技术的功耗更低。类似于IEEE 802.11ac,HaLow使用正交频分复用(OFDM, orthogonal frequency division multiplexing),多输入多输出(MIMO, multiple-input multiple output)和下行链路多用户MIMO。当带宽大于或等于2 MHz时,时钟速率为IEEE 802.11ac的1/10,即HaLow中OFDM符号的持续时间比802.11ac长10倍,而子载波数与IEEE 802.11ac相同。如HaLow中的2 MHz信道和IEEE 802.11ac中的20 MHz信道都具有64个子载波,其中,52个子载波用于发送数据。对于1 MHz信道来说,子载波数是10 MHz信道的一半,有24个子载波用于发送数据。

表1 Wi-Fi HaLow频段

国家或地区	频段/MHz
中国	755~787
欧洲	863~868
日本	916.5~927.5
韩国	917.5~923.5
新加坡	866~869 & 920~925
美国	902~928

HaLow从IEEE 802.11ac标准继承了具有不同可靠性和传输速率的10个调制与编码策略(MCS,

modulation and coding scheme), 即 MCS0~MCS9。为了扩展 1 MHz 信道的传输距离和可靠性, HaLow 还定义了 MCS10。文献[10]证明了在室外 200 mW 发射功率和 1 MHz 信道的场景下, MCS10 的传输距离超过 1 km, 而 MCS0 提供的传输距离则为 850 m。如果使用 2.4 GHz 和 5 GHz 的默认 Wi-Fi 频率, 则传输范围会减少 3~9 倍。正常 OFDM 符号的持续时间为 40 μs, 其中, 持续时间的 20% 为保护间隔 (GI, guard interval) 以防止符号间干扰。HaLow 允许两个较短的保护间隔, 数据速率可以提高 10/9。HaLow 可使用多达 4 个空间流, N 个空间流表明数据速率增加 N 倍。HaLow 使用的编码方案包括传统二进制编码 (BCC) 和低密度奇偶校验码 (LDPC)。HaLow 的 MCS 和数据速率如表 2 所示, 表 2 中列出的带宽为 1 MHz 和 2 MHz, 采用 BCC 编码, 保护间隔和空间流分别为 8 μs 和 1 时, 得出数据速率和 MCS 的对应关系。

2.2 MAC 层

HaLow 中 MAC 层的主要功能如表 3 所示, 其中, 标*的特性为 HaLow 引入的新机制, 其余的特性则继承自 IEEE 802.11ac。由表 3 可以看出, HaLow 主要针对物联网应用, 旨在解决大规模接入和降低功耗两大问题。

2.2.1 低控制开销

1) 短报文头部

尽管 HaLow 的 PHY 层提供了较高的数据速

率, 但由于传感器网络采用较短的报文, 导致传输开销较大, 吞吐量可能很低, 且功耗增大, 因此, HaLow 提出了新的报文头部来降低传输开销。HaLow 在支持传统报文头部的基础上, 定义了一个新的向后兼容的报文头部。并使用帧控制 (FC, frame control) 字段中的协议版本位进行区分。报文头部格式如图 2 所示, 短报文头部不包含时长 (duration) 字段。此外, 服务质量 (QoS, quality of service) 和高吞吐量 (HT, high throughput) 字段也被删掉了。

表 2 HaLow 的 MCS 和数据速率

MCS	调制	编码速率	数据速率/(kbit·s ⁻¹)	
			1 MHz	2 MHz
0	BPSK	1/2	300	650
1	QPSK	1/2	600	1 300
2	QPSK	3/4	900	1 950
3	16-QAM	1/2	1 200	2 600
4	16-QAM	3/4	1 800	3 900
5	64-QAM	2/3	2 400	5 200
6	64-QAM	3/4	2 700	5 850
7	64-QAM	5/6	3 000	6 500
8	256-QAM	3/4	3 600	7 800
9	256-QAM	5/6	4 000	/
10	BPSK	1/2, 2 倍重复	150	/

表 3 HaLow 中 MAC 层的主要功能

功能	特性	描述
基础功能	DCF/PCF/EDCA/HCCA	信道竞争
低控制开销	短报文头部 (short MAC header) *	减少报文头部开销
	响应指示延后 (RID, response indication deferral) *	配合短报文头部
	报文聚合 (frame aggregation)	减少信道竞争开销
	块确认 (block acknowledgment)	减少确认报文传输开销
	多用户聚合 (multi user aggregation)	减少信道竞争开销
	空数据分组 (null data packet)	减少控制报文开销
大规模接入	受限访问窗口 (RAW, restricted access window) *	减少信道竞争, 用于关联完成后
	快速关联 (fast association) *	减少关联时的信道竞争
	分区分组 (group sectorization) *	减少数据传输时的信道竞争
	基本服务集着色 (BSS color) *	空间复用, 适用于高密度场合
低功耗	TIM 分段 (TIM segmentation) *	减少 TWT, 适用于下行传输
	TWT*	自定义节点唤醒及睡眠时间
	短信标 (short beacon) *	减少信标传输功耗

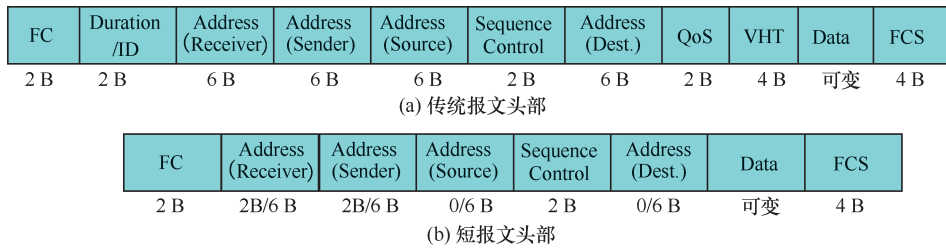


图 2 报文头部格式

2) RID

除了 PHY 层的载波监听外，传统的 IEEE 802.11 还使用基于网络分配矢量 (NAV, network allocation vector) 的虚拟载波监听机制以避免信道竞争冲突。发送节点会通过报文的“时长 / NAV”字段表明其需要占用的信道时间，其余节点接收该信息后，认为信道处于忙碌状态并开始倒计时，以允许接收节点能够在无信道竞争的状况下发送确认报文。倒计时至零时，节点认为信道处于空闲状态。但是，由于 HaLow 在报文头部取消了时长字段，因此，引入了 RID 机制来进行虚拟载波监听。RID 与 NAV 类似，都是利用计时作为信道忙碌与空闲的依据。区别在于 NAV 字段位于报文的 MAC 层头部，而 RID 字段位于报文的 PHY 层头部。其次，NAV 字段会给出具体的时长，而 RID 字段只有 2 bit，定义了 4 种不同的响应方式。

2.2.2 大规模接入

1) 节点快速关联

当 AP 完成部署或停电后，节点会试图向 AP 发送关联请求 (association request)，AP 收到关联请求后会发送关联响应 (association response) 给节点并赋予节点一个关联 ID (AID, association ID)。在大规模网络中，大量节点发送的关联请求会产生严重的信道竞争，导致完成关联需要很长时间。由此，HaLow 提出了更快速的关联机制，包括集中式关联机制和分布式关联机制。在集中式关联机制中，AP 在信标 (beacon) 的认证控制元素中设置了阈值。当节点完成初始化后，会生成一个在区间 [0,1 022] 中的随机值。如果随机值小于接收的信标中包含的门限值，则向 AP 发送认证/关联请求，否则，推迟认证/关联直到下一个信标到达。门限值应当由 AP 动态调整以使所有站点最终关联成功。分布式关联基于截断的二进制指数退避，将每个信标间隔分为相同时隙，节点随机选择一个时隙发送关联请求^[11-13]。

2) RAW

RAW 机制旨在减少信道访问冲突。RAW 对节点进行分组，通过仅允许特定时间内特定节点访问信道来减少信道竞争。RAW 工作机制描述如图 3 所示，由图 3 可知，信道时间被分为不同的时间间隔，每个间隔被分配给一个 RAW 分组，每个 RAW 分组包含一定数目的节点。带有 RAW 参数信息的信标 RPS 规定了每个分组所包含的节点数、起始时间及时长。此外，每个 RAW 分组被进一步均匀划分为多个时隙 (slot)，因此，RPS 还包含时隙数量、时隙格式和时隙持续时间计数器等，时隙的时长计算如式(1)所示。

$$D=500 \mu s+C \times 120 \mu s \tag{1}$$

其中，C 表示时隙持续时间计数数字段，若时隙格式子域被设置为 1 或 0，则相应的持续时间计数器包含 $y = 11 \text{ bit}$ 或 $y = 8 \text{ bit}$ ，时隙的数量子域包含 $(14-y) \text{ bit}$ 。根据时隙格式子域的取值分配时隙时长，如果时隙数量不超过 8，则每个时隙时长不超过 246.14 ms；如果时隙数量不超过 64，则每个时隙时长不超过 31.1 ms。

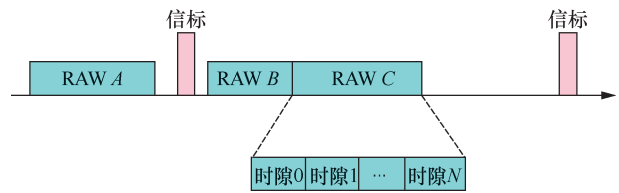


图 3 RAW 工作机制描述

与传统的 IEEE 802.11 技术不同，节点使用两个回退状态来分别管理 RAW 分组外部和内部的传输过程。对于第一个回退状态，节点在每个 RAW 分组开始时暂停回退并存储回退计数值，在 RAW 分组结束时恢复并继续回退过程。对于第二个回退状态，节点在其所属的 RAW 分组时隙内使用初始回退状态，并在时隙结束时丢弃回退状态。RAW 的两种回退状态示例如图 4 所示，节点 1 属于 RAW

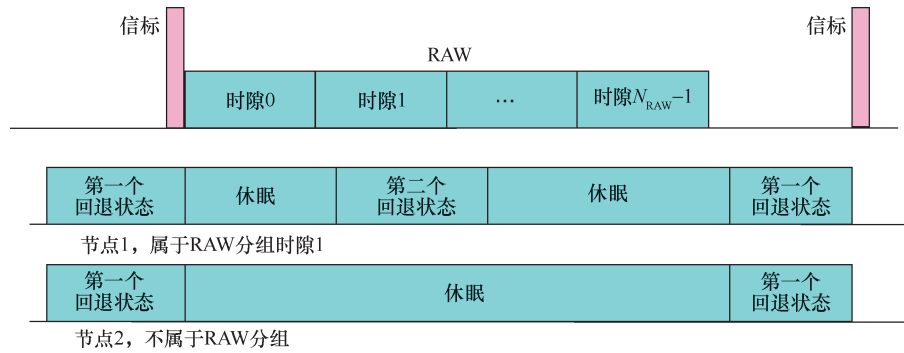


图4 RAW 的两种回退状态示例

分组的时隙 1，而节点 2 不属于 RAW 分组。因此，节点 1 在 RAW 分组外使用第一种回退状态，在其所属的 RAW 分组时隙 1 内使用第二种回退状态；而节点 2 仅在 RAW 分组外使用第一种回退状态，在 RAW 分组内进入休眠状态。

AP 可以允许节点跨越 RAW 分组时隙传输报文，在下一个 RAW 分组时隙的起始处，唤醒的节点应该等待直到帧交换结束或者信道空闲时，才开始征用信道。如果 AP 不允许跨越 RAW 分组时隙传输报文，则节点在其时隙开始时醒来，并立即开始征用信道。

3) 分区分组

在大规模物联网场景下，距离较远的节点容易成为彼此的隐藏节点，从而产生信道竞争冲突，造成信道利用率不足且功耗较大。分区分组采取“空分+时分”的信道访问策略，将空间划分为几个不同的子区，并将时间划分为相同数目的子间隔。AP 通过信标广播当前时间间隔内可以访问信道的子区。如果节点位于该子区内，则可以访问信道，否则进入休眠状态。分区分组和 RAW 的思想一致，可以认为分区分组是限制访问窗口的一个特例。HaLow 将分区分组和 RAW 两个机制并列，主要是考虑节点需要计算限制访问窗口的时间和所属的时隙，并完成两阶段回退机制。对部分传感器而言，RAW 具有一定的复杂性，而分区分组虽然灵活性不足，但容易实现。

4) BBS color

在高密度场景下，有多个基本服务集同时覆盖时，由于每个基本服务集都有一个 AP，因此节点会收到来自多个 AP 的报文。在传统的 IEEE 802.11 网络中，节点接收整个报文，然后进行解码。如果节点发现该报文不是来自于自身所属的基本服务集时，则将报文丢弃。此外，节点可能会接收很多

无关报文，不断重复进行“接收—丢弃”的动作，造成极大的资源浪费。而 BBS color 则可以有效地解决该问题。HaLow 允许节点在接收报文时，读取该报文 PHY 层里的基本服务集信息，如果正在接收的报文不是来自同一个基本服务集，则终止报文接收并把该报文丢弃；否则，继续接收。除 IEEE 802.11ah 外，其后发布的 IEEE 802.11ax 标准草案中也引入了 BBS color 机制。

2.2.3 低功耗

1) TIM 分段

已有的 IEEE 802.11 标准允许 AP 缓存下行数据，并由 AP 周期性发送 TIM 信标以广播缓存区情况。TIM 信标采用映射表 (bitmap) 结构，每个元素对应一个节点，当该元素为 1 时，表明有缓存数据；当该元素为 0 时，则表明没有缓存数据^[14]。当节点知道 AP 有数据要发送给自己时，会向 AP 发送 ps-poll 数据请求；否则，进入休眠状态。由于信标广播下行数据缓存情况，因此，节点需要唤醒并接收每个信标，导致浪费了大量功耗，这成为功耗管理的瓶颈。

HaLow 引入了 TIM 分段机制，将 TIM 中的 Bitmap 分成几个分段，并分开传输。HaLow 使用 TIM 信标携带其对应的 TIM 分段内节点的缓存信息，使用 DTIM 信标携带 TIM 分段的缓存信息，而传统的 DTIM 信标只携带组播信息。DTIM 同样采用 Bitmap 结构，每个元素对应一个 TIM 分段，当 AP 有至少一个节点的缓存信息时，其所属的 TIM 分段对应的元素为 1，否则为 0。AP 每隔 N 个 TIM 信标传输一次 DTIM 信标，用户可定义 N 的具体数值。TIM 分段机制示例如图 5 所示，节点接收 DTIM 信标后，如发现其所属的 TIM 分段无缓存数据，则休眠至下一个 DTIM 信标传输时；如有缓存数据，则休眠至其所属的 TIM 传输时。TIM 分段机制允许

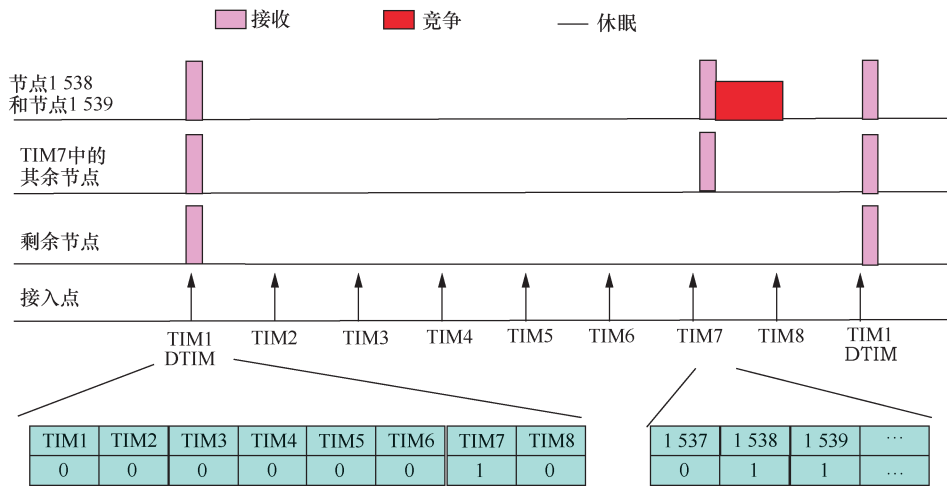


图 5 TIM 分段机制示例

节点只在部分 TIM 唤醒，因此，能够保持更长的节能状态^[11,14]。

2) TWT

为了使终端节点能够最大限度地节省功耗，需要使其尽可能关闭发送/接收模块并进入休眠状态，只有在有数据发送或接收时醒来。HaLow 引入了 TWT，允许 AP 管理节点的唤醒时间，使不同终端能够在不同时间段醒来并发送数据，这段时间被称为 TWT 服务周期 (SP, service period)。TWT 允许节点有更长的休眠时间，并降低了竞争冲突，大大节省了终端节点的能量消耗^[15]。

TWT 有两种操作模式，即隐性模式和显性模式。在显性模式下，AP 通过与终端节点间的帧交换，将下一次唤醒时间发送给终端节点；在隐性模式下，终端节点可以通过前面获得的信息计算出下次唤醒时间。TWT 可以是周期性的，也可以是非周期性的。周期性 TWT 能够避免节点在每次苏醒时都发送一次唤醒时间值，进一步降低了终端唤醒时间，从而达到降低终端节点功耗的目的。除 HaLow 之外，其后发布的 IEEE 802.11ax 标准草案中也引入了 TWT 机制。

3) 短信标

在 IEEE 802.11 网络中，AP 定期发送信标给网络中的所有节点。在 IEEE 802.11g/n 网络中，信标长度可能超 100 B^[16]。因为携带针对所有节点的广播信息，信标通常以最低速率发送，因此，占据了大量信道时间，并且发送和接收信标也消耗了很多能量。

为了减少发送和接收信标所消耗的能量，除了

传统信标（全信标）外，HaLow 还引入了短信标。短信标的发送频率高于全信标，不包含非核心和非紧急信息。为了通知节点更新信息，短信标包含一个单字节的“更改序列”字段，在接收“更改序列”为新值的短信标后，节点会等待一个完整的信标来获得更新信息。传输下一个全信标的时刻可以从信标的 TBTT 字段中获知，所以，节点可以保持休眠状态至全信标传输时。

3 相关研究

3.1 HaLow 相关产品

目前，主要由一些新创公司进行 HaLow 产品的研发。从 2019 年 1 月开始，Wi-Fi 联盟已经展开了一系列互操作性测试，2019 年 8 月左右 Wi-Fi 联盟启动了 HaLow 认证计划，预计包括博通公司、赛普拉斯、华为技术有限公司、台湾联发科科技股份有限公司、高通公司和瑞昱等传统 Wi-Fi 芯片供货商会进入该市场。

总部位于比利时鲁汶的微电子研究中心率先推出了针对 HaLow 的收发器，与现有的 OFDM 收发器相比，功耗降低了 10 倍，并支持从 755~928 MHz 的 ISM 频段^[17-18]。美国新创公司 Palma Ceia SemiDesign (PCS) 也开发了 HaLow 收发器，该公司准备募资，并计划于今年推出一款 HaLow 组件，作为其首款芯片级产品。

全球首款 HaLow 芯片级产品 NRC7292 来自韩国的新创公司 Newracom，已用于韩国电信的网关中。支持 1 MHz/2 MHz/4 MHz 带宽，数据速率最高达 15 Mbit/s，支持节点模式和 AP 模式。总

部位于荷兰埃因霍芬的 Methods2Business 公司开发了 HaLow 片上系统, 包括面向传感器节点的 M2B7011 和支持 AP 的 M2B7211。该公司计划推出面向非传感器节点的 M2B7111。位于美国硅谷的 Adapt-IP 与其合作伙伴共同开发了基于 FPGA 的 HaLow 解决方案 Aegis-IP 802.11 ah, 包含 MAC 和基带功能, 支持低功耗的传感器节点模式和 AP 模式。总部位于澳大利亚悉尼的新创公司 Morse Micro 则计划明年推出 HaLow 芯片。

3.2 HaLow 仿真器

在真实的网络系统中, 一些分析和研究是比较困难或者无法做到的, 利用软件进行仿真具有快速、灵活可控和节省资源等特点。仿真软件提供了可以控制的系统行为以及可重复的实验环境来研究网络工作情况, 适用于学术研究及性能探索, 是硬件测试的重要补充。目前, 支持 HaLow 仿真的软件主要包括 MATLAB、OMNeT++ 和 NS-3。

MATLAB 的 WLAN Toolbox 支持对 HaLow 的 PHY 层仿真, 包括信号的调制/解调、信道编码、发送/接收以及信道建模。OMNeT++ 是一个免费的、支持多协议、模块化的开源网络仿真平台。Raeesi 等^[19]在 OMNeT++ 上实现了 HaLow 的限制访问窗口功能并进行了仿真实验, 但仿真器的代码并未公开, 因此, 未被广泛使用。

NS-3 是一个开放的网络仿真平台, 提供了数据分组在网络中的传输和处理模块, 支持 LTE、Wi-Fi 和 WiMAX 等多种常用网络协议模块, 并允许用户根据自身需要对已有的模块进行修改或优化。基于 NS-3 的开源 HaLow 仿真器由比利时安特卫普大学和根特大学联合课题组 IDLab 开发而成, 支持 PHY 层及 MAC 层的多种功能, 广泛适用于针对 HaLow 的相关研究中。

HaLow 仿真器支持的 PHY 层功能包括: 1) 调制和编码方案: MCS0~MCS9, 信道带宽 1 MHz、2 MHz、4 MHz、8 MHz 和 16 MHz; 2) HaLow 数据分组格式; 3) 基于 HaLow 数据分组的报文错误概率模型; 4) Sub-GHz 传播损耗模型。

MAC 层功能包括: 1) 节点快速关联机制; 2) RAW 机制; 3) RAW 动态配置接口; 4) 基于 RAW 的功耗模型; 5) MCS 动态自适应; 6) TIM 分段。

HaLow 仿真器代码开源, 研究人员可以利用其进行仿真实验, 或者对仿真器的功能做进一步扩展。

3.3 大规模接入机制研究

目前, 对大规模接入机制的研究主要集中在快速关联和 RAW 这两个机制上, 对分区分组和 BBS color 的研究则较少。

3.3.1 快速关联机制相关研究

文献[20-24]研究如何在大规模网络下实现节点快速关联, 快速关联机制相关研究如表 4 所示。目前的研究主要侧重于集中式关联机制。Wang 等^[20]率先提出了门限自适应的思想, 允许 AP 根据发送队列长度 (Lq) 动态调整关联门限 (T), 但没有给出 Lq 和 T 值及调整幅度。Bankov 等^[12]利用 AP 预测尚未关联的节点数目以及可被允许发送关联请求的节点数目, 然后, 利用虚拟载波监听为节点关联提供无竞争的信道接入。更进一步地, Bankov 等^[24]提出了 Up-Down 算法, 将节点关联分为等待、学习和运行 3 个不同模式。根据当前 Lq 和 T 值确定关联模式, 在不同模式下采用不同的门限调整策略。在此基础上, Bankov 等^[22]针对关联过程中大量新节点加入网络的情况, 改进了 Up-Down 算法, 根据当前状况和历史 T 值共同确定新的门限值。Shahi^[23]则提出了 Smart Up-Down 算法, 同样支持等待、学习和运行 3 个不同模式, 不同的是, AP 根据 Lq 和前一个信标间隔内成功完成关联的数目调整 T 值。相比较而言, 对分布式关联机制的研究较少, Bankov 等^[21]提出了一个简化的、无隐藏节点的数学模型。

表 4 快速关联机制相关研究

文献	类型	算法描述
[20]	集中式	根据 Lq 动态调整 T 值
[12]	集中式	无竞争的信道接入方式
[24]	集中式	文献[20]中算法的改进版, 采用更精确的门限调整策略
[22]	集中式	文献[24]中算法的改进版, 支持关联过程中大量新的节点加入网络
[23]	集中式	根据 Lq 和前一个信标间隔内成功完成关联的数目调整 T 值
[21]	分布式	无隐藏节点的数学模型

3.3.2 RAW 机制相关研究

对 RAW 的研究主要集中在性能评估、建模和优化 3 个方面。性能评估是指通过仿真器分析 RAW 相关参数对网络性能的影响; 建模是指建立输入参数 (即 RAW 及网络相关参数) 与输出结果 (如吞吐量、功耗) 的映射关系; 优化是指根据网络场景选择 RAW

参数以获得最优性能，是研究 RAW 的最终目的。

1) 性能评估

文献[25-27]对 RAW 的性能进行了评估。Zhao 等^[25]在能耗效率方面对 RAW 进行了评估，表明增加 RAW 分组的数量显著降低了传感器节点的功耗。文献[26]讨论了各种流量下的最佳分组配置，揭示亟需设计一种考虑网络和流量变化的动态分组算法。此外，文献[27]分析了移动模型，如随机游走(random walk)、高斯马尔可夫(Gauss-Markov)以及随机停留点移动(random waypoint mobility)对 RAW 分组的影响。

2) 建模

文献[28-37]对 RAW 的性能进行了建模，RAW 建模相关研究如表 5 所示。目前的模型主要分为两大类，一类模型假设网络处于饱和状态，即任意节点在任何时候都有报文发送；另一类模型则假设网络处于非饱和状态。Bianchi 模型是利用马尔可夫链建立的针对 CSMA/CA 的吞吐量模型。在此基础上，针对 RAW 两阶段回退的特点，Zheng 等^[29-30]提出了流量饱和状态下的吞吐量模型。同样地，Raeesi 等^[31]提出了饱和状态下的吞吐量、时延及功耗模型。该模型在文献[32]中进行了扩展，支持多 AP 网络。针对 RAW 在时隙初始阶段对回退计数进行

初始化的特点，Khorov 等^[33]提出了更精确的模型，用于计算不同 RAW 分组长度下的报文传输成功率，该模型假设一个节点在每个 RAW 分组中只发一个报文。Ometov 等^[28]提出的模型则假设报文到达服从伯努利分布。在文献[33]的基础上，Lyakhov 等^[34]计算了饱和状态下 RAW 的吞吐量和功耗。另外，不同于 HaLow 协议规范中的二进制指数退避机制，Gopinath 等^[35]提出了一种新的退避机制，基于整数序列计算新的竞争窗口大小，并且不增加任何额外的控制开销。

总体而言，上述模型均假设理想状态，没有考虑报文传输中产生的错误、隐藏节点和捕获效应。相对而言，基于代理模型(surrogate model)的 RAW 模型更接近现实网络^[36-37]。只需要极少数输入—输出数据，如 RAW 相关参数为输入，吞吐量或功耗为输出，便可训练出一个精确的 RAW 性能模型。其采用接近现实网络的仿真结果进行训练，支持传输错误、隐藏节点和捕获效应。该模型支持同构网络，即所有节点使用同样的 MCS 进行传输并且报文长度相同。

3) 优化

RAW 优化相关研究如表 6 所示，文献[38-49]侧重于对 RAW 性能的优化，文献[38-41]假设分组数目已知，根据节点的位置，通过将节点划分到不

表 5 RAW 建模相关研究

文献	场景	描述
[29-30]	流量饱和状态	吞吐量模型，基于 Bianchi 模型
[31-32]	流量饱和状态	吞吐量、时延及功耗模型，支持多 AP 网络，基于 Bianchi 模型
[33]	节点在 RAW 分组内只发一个报文	报文传输成功率，基于马尔可夫链
[28]	报文到达服从伯努利分布	吞吐量模型，基于马尔可夫链
[34]	流量饱和状态	吞吐量和功耗模型，基于马尔可夫链
[35]	流量饱和状态	吞吐量模型，基于整数序列的退避机制
[36-37]	节点在 RAW 分组内发一个报文	吞吐量和功耗模型，基于代理模型

表 6 RAW 优化相关研究

文献	优化目标	描述
[38-41]	隐藏节点	根据节点的位置，将节点划分到不同的 RAW 分组
[42-44]	功耗、信道利用率	不符合 HaLow 标准规范
[45]	传输成功率	根据估计的节点数目分配 RAW 时隙的大小
[46]	信道利用率	流量均匀分配到不同的 RAW 分组中
[47]	信道利用率	利用回归模型确定任意流量下的 RAW 分组数和分组内的节点数
[48-49]	吞吐量	预测流量并对 RAW 进行实时优化算法
[36-37]	吞吐量、功耗	在文献[48-49]中方案的基础上，基于代理模型确定最优的 RAW 分组

同的 RAW 分组以减少隐藏节点，其思想与分区分组机制一致。Wang 等^[42]利用概率论寻找 RAW 分组中最优的节点数目，以降低功耗。但该算法假设节点可以通过一定概率主动选择其所属的 RAW 时隙，违反了 HaLow 标准规范，该问题也存在于文献[43-44]的方案中。Nawaz 等^[44]认为 HaLow 标准规范中将一个 RAW 分组中的节点平均分配给若干个子时隙，可能会造成最后一个时隙中的节点数目小于平均值，而每个时隙的时长却是相同的，造成信道的利用不充分。因此，提出根据最后一个时隙内的节点数目调整时长。但是，HaLow 允许多个 RAW 分组共存并且时长可以不相同，因此，Nawaz 的提议没有太大的实际意义。

Park 等^[45]假设网络处于饱和状态，根据估计的节点数目分配 RAW 时隙的大小。Chang 等^[46]假设 AP 已知各节点的流量，且 RAW 分组数目已知，将流量均匀分配到不同的 RAW 分组中。更进一步地，Chang 等^[47]根据两个极端情况（即饱和状态和每个 RAW 分组发一个数据分组）的吞吐量结果，推导出一个回归模型，以确定任意流量下的 RAW 分组数目和时长。然而，建模时未考虑 RAW 时隙长度有限这一约束。文献[45]未考虑动态流量。在实际网络中，由于各种原因，节点的上行流量强度可能随时间而变化，因此，算法应适应这些变化。而且，期望的所有信息如每个节点的准确流量强度可以由 AP 随时获得，这在实际网络中并不现实。最后，文献[46]假设 RAW 分组的数量及其持续时间已知，只需要解决节点的划分问题。

相对而言，文献[48-49]和文献[36-37]则解决了上述问题。文献[48]假设每个节点的传输具有一定（可预测）频率，并且可能会随时间改变，提出了一种流量自适应 RAW 实时优化算法（TAROA）。TAROA 算法在每个目标信标传输时间内执行，首先，基于 AP 在上一个信标间隔期间获得的传输信息来估计每个节点的传输频率，然后，根据估计的传输频率以及饱和状态下 RAW 参数和节点数目的关系，确定 RAW 分组数目及时长。文献[49]提出了增强版本即 E-TAROA，E-TAROA 能够利用接收报文的“more data”字段来确定发送节点是否还有报文发送，进一步提高了流量预测的准确性，优化了 RAW 分组的性能。文献[36-37]在 E-TAROA 的基础上，建立了关于 RAW 的代理模型，并基于该模型而不是饱和状态来确定最优的 RAW 分组。文献[36]

实现了对吞吐量的优化，而文献[37]则同时支持对吞吐量和功耗的优化。

3.4 低功耗研究

3.4.1 TIM 分段相关研究

TIM 分段相关研究如表 7 所示。TIM 用于下行链路，文献[50-57]对其进行了研究。Ji 等^[50]提出了 3 级 TIM 压缩方案，以减少 TIM Bitmap 的大小。Badihi 等^[51]分析了 TIM 分段在照明系统中的时延和功耗，发现需要权衡考虑时延和功耗。DTIM 信标发送间隔较小时可以获得较低时延，但却增加了功耗。因此，应当根据具体场景和要求，动态调整 DTIM 间隔。此外，Kim 等^[52]提出了赋予一个节点 2 个 AID，节点交替使用不同的 AID，使得节点可在不同的 TIM 分段中进行切换。AP 通过动态改变 TIM 信标的 Bitmap，使得节点的休眠时长最大化，减少能量消耗。

表 7 TIM 分段相关研究

文献	目标	描述
[50]	Bitmap	3 级 TIM 压缩方案
[51]	时延、功耗	分析 TIM 分段在照明系统中的时延和功耗
[52]	功耗	动态改变 TIM 信标的 Bitmap
[53]	区分 QoS	使用 RAW 和 TIM 分段以支持区分 QoS
[54]	吞吐量、时延和功耗	TCP 流量下，RAW 和 TIM 分段对吞吐量、时延和功耗的影响
[55]	功耗	RAW 和 TIM 分段的功耗数学模型
[56]	吞吐量、功耗	利用 RAW 和 TIM 分段减少功耗或增加吞吐量
[57]	时延	利用 RAW 和 TIM 分段，同时支持时延敏感和时延不敏感节点

文献[53-57]研究了 RAW 和 TIM 共存机制。Ali 等^[53]探索了区分 QoS 方面的性能，结果表明，通过有效使用 RAW 和 TIM 分段，HaLow 能够很好地支持优先流量和非优先流量共存。Seferagic 等^[54]分析了在双向 TCP/IP 流量下，共同使用 RAW 和 TIM 对吞吐量、时延和功耗等性能的影响。Bel 等^[55]建立了数学模型，以预测不同 TIM 分段 RAW 参数下的功耗。Kureev 等^[56]考虑了一个场景，即网络中大部分节点由电池供电，少部分节点由稳定的电源供电，提出了一种数学模型以设置最优参数，从而减少大部分节点的能量消耗，并增加少部分节点的吞吐量。Charania 等^[57]利用 DTIM 信标，将信道划分为基于非竞争和竞争的 RAW 分组，以同时支持时延敏感和时延不敏感节点。

3.4.2 TWT 相关研究

RAW 可以用于保护 TWT 节点在 TWT SP 内免于其他节点的信道竞争, Zhang 等^[58]提出了 TWT 节点交织方案, 使得一个 RAW 分组内可以覆盖 TWT 节点的 SP, 以减小 RAW 的开销并使 TWT 节点的时延最小化。Beltramelli 等^[59]提出了针对上行链路的一个混合的竞争预留 (contention-reservation) 机制。在该机制中, 通过共用 RAW、TIM 和 TWT, 允许节点在信道竞争阶段告知 AP 其有缓存数据待发送, 然后, AP 为该节点预留时隙以供发送数据, 从而减少信道竞争, 以降低功耗。

4 未来研究方向

目前, 学术界对 HaLow 的研究已经取得了一定成果, 但仍存在一些问题待解决。

1) 对异构网络的支持

当前研究大部分假设在同一网络中, 所有节点具有相同的数据速率和报文大小, 但实际状况并非如此。在现实网络中, 节点可以根据信道状况及其与 AP 的距离动态调整 MCS, 发送报文的大小随着应用需求的不同而有所变化。因此, 增加对异构网络的支持具有重要的现实意义。

2) 对多个 AP 的支持

目前, 大部分研究均只考虑网络中有一个 AP, 即基本服务集。而在现实环境中, 往往多个基本服务集会构成一个扩展网络, 即扩展服务集, 以扩大网络覆盖范围。同时, 节点可能具有一定的移动性, 需要不同的 AP 进行切换。因此, 应当对各个 AP 进行协同控制, 使其能够通过如 RAW、TIM 分段和 TWT 等机制, 以实现性能的最优化。

3) QoS 控制与管理

基于 RAW 的 QoS 以满足不同节点和应用的需求, 利用 RAW 对节点分配不同的信道时间, 并结合 TIM 分段或者 TWT 以提供不同的服务保障, 如关键服务的低时延、节点的低功耗和数据流应用稳定的吞吐量等。同时, 不同应用场景的性能要求各有侧重, 应实现对吞吐量、时延和功耗等性能的多目标优化, 得到这些目标性能的帕累托 (Pareto) 最优解。

5 结束语

作为一项面向物联网的新型 Wi-Fi 技术, HaLow 被认为将在传感器网络、智能家居、车联网

以及健康医疗等新兴领域发挥重要作用。首先, 对 HaLow 的特点进行了概述, 然后, 对其 PHY 层和 MAC 层的重要机制进行了详细介绍。这些机制表明, HaLow 能够很好地支持大规模网络, 并且满足物联网场景的低功耗要求。其次, 总结了与 HaLow 相关的研究, 包括相关的产品、仿真器和媒体接入机制等, 并给出了未来研究方向。作为 Wi-Fi 联盟的一次大胆尝试, 面向物联网的 Wi-Fi 技术具有广泛的应用前景, 同时, 面临着多方面的技术挑战, 机遇与挑战并存。

参考文献:

- [1] HUNG M. Leading the IoT, gartner insights on how to lead in a connected world[J]. Gartner Research, 2017: 1-29.
- [2] BADIHI B, CARPIO L F D, AMIN P, et al. Performance evaluation of IEEE 802.11 ah actuators[C]//Vehicular Technology Conference. IEEE, 2016.
- [3] MADUENO G C, STEFANOVIC C, POPOVSKI P. Reliable and efficient access for alarm-initiated and regular M2M traffic in IEEE 802.11ah systems[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2016, 3(5): 673-682.
- [4] MARCO P D, CHIRIKOV R, AMIN P. Coverage analysis of bluetooth low energy and IEEE 802.11ah for office scenario[C]// International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications. IEEE, 2015: 2283-2287.
- [5] VICTOR B G, AFAQUI M, ELENA L A. IEEE 802.11ah: a technology to face the IoT challenge[J]. Sensors, 2016, 16(11): 1960.
- [6] ZHENG S K, LEI Z D. TIM encoding for IEEE 802.11ah based WLAN[C]//IEEE International Conference on Communication Systems. IEEE, 2014: 559-563.
- [7] ARGYRIOU A. Power-efficient estimation in IEEE 802.11ah wireless sensor networks with a cooperative relay[C]//IEEE International Conference on Communications. IEEE, 2015: 6755-6760.
- [8] SUN W P, MUNHWAN C, SUNGHYUN C. IEEE 802.11 ah: a long range 802.11 WLAN at sub 1 GHz[J]. Journal of ICT Standardization, 2013: 83-108.
- [9] 李明明, 钱肇钧. 基于 IEEE 802.11ah 协议的物联网 1 GHz 以下候选频段分析[J]. 数字通信世界, 2014(6): 44-48.
LI M M, QIAN Z J. Sub 1 GHz candidate spectrum analysis of the Internet of things based on the IEEE 802.11 ah protocol[J]. Digital Communication World, 2014(6): 44-48.
- [10] UST S, PRASAD R V, NIEMEGEREERS I G M M. IEEE 802.11ah: advantages in standards and further challenges for sub 1 GHz Wi-Fi[C]//IEEE International Conference on Communications. IEEE, 2012: 6885-6889.
- [11] HOROV E, LYAKHOV A, KROTOV A. A survey on IEEE 802.11ah: an enabling networking technology for smart cities[J]. Computer Communications, 2015, 58(1): 53-69.
- [12] BANKOV D, KHOROV E, LYAKHOV A. The study of the centralized control method to hasten link set-up in IEEE 802.11ah networks[C]//European Wireless 2015, European Wireless Conference. IEEE, 2015: 1-6.

- [13] STHAPIT P, SUBEDI S, KWON G R, et al. Performance analysis of association procedure in IEEE 802.11ah[C]/ICSNC 2015: the Tenth International Conference on Systems and Networks Communications. IEEE, 2015: 80.
- [14] LIU R P, SUTTON G, COLLINGS I B. Power save with offset listen interval for IEEE 802.11 ah smart grid communications[C]/IEEE International Conference on Communications. IEEE, 2013.
- [15] 傅新星, 苏寒松, 刘高华. 面向物联网的 IEEE 802.11ah 低功耗技术改进[J]. 陕西师范大学学报 (自然科学版), 2017, 45(2): 36-41.
FU X X, SU H S, LIU G H. Improvement of low power techniques in IoT-oriented IEEE 802.11ah[J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 2017, 45(2): 36-41.
- [16] MERLIN S, SHORT B. IEEE mentor IEEE 802.11ah short beacon[R]. 2011.
- [17] BA A, LIU Y H, JOHAN V D H. 26.3A 1.3nJ/b IEEE 802.11ah fully digital polar transmitter for IoE applications[C]/IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC). IEEE, 2016: 440-441.
- [18] BA A, SALIMI K, MATEMAN P, et al. A 4mW-RX 7mW-TX IEEE 802.11ah fully-integrated RF transceiver[C]/Radio Frequency Integrated Circuits Symposium (RFIC). IEEE, 2017: 232-235.
- [19] RAEESI O, PIRSKANEN J, HAZMI A. Performance evaluation of IEEE 802.11ah and its restricted access window mechanism[C]/IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC). IEEE, 2014: 460-466.
- [20] WANG H. Supporting authentication/association for large number of stations[S]. 2012.
- [21] BANKOV D, KHOROV E. The study of the distributed control method to hasten link set-up in IEEE 802.11ah networks[C]/Problems of Redundancy in Information and Control Systems, 2016 XV International Symposium. IEEE, 2016: 13-17.
- [22] BANKOV D, KHOROV E, LYAKHOV A. What is the fastest way to connect stations to a Wi-Fi HaLow network[J]. Sensors, 2018, 18(9): 2744.
- [23] SHAHIN N, ALI R, KIM Y T. Hybrid slotted-CSMA/CA-TDMA for efficient massive registration of IoT devices[J]. IEEE Access, 2018(6): 18366-18382.
- [24] BANKOV D, KHOROV E, LYAKHOV A. Fast centralized authentication in Wi-Fi HaLow networks[C]/2017 IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2017: 1-6.
- [25] ZHAO Y, YILMAZ O N C, LARMO A. Optimizing M2M energy efficiency in IEEE 802.11ah[C]/IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). IEEE, 2015: 1-6.
- [26] TIAN L, FAMAAY J, STEVEN L. Evaluation of the IEEE 802.11ah restricted access window mechanism for dense IoT networks[C]/IEEE 17th International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM). IEEE, 2016.
- [27] MUKTIARTO R N, PERDANA D, NEGARA R M. Performance analysis of mobility impact on IEEE 802.11ah standard with traffic pattern scheme[J]. International Journal of Communication Networks and Information Security, 2018, 10(1): 139-147.
- [28] OMETOV A, DANESHFAR N, HAZMI A, et al. System-level analysis of IEEE 802.11ah technology for unsaturated MTC traffic[J]. International Journal of Sensor Networks, 2018, 26(4): 269-282.
- [29] ZHENG L, CAI L, PAN J P, et al. Performance analysis of grouping strategy for dense IEEE 802.11 networks[C]/2013 IEEE Global Communications Conference (Globecom). IEEE, 2013: 219-224.
- [30] 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.
- [31] RAEESI O, PIRSKANEN J, HAZMI A. Performance evaluation of IEEE 802.11ah and its restricted access window mechanism[C]/IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC). IEEE, 2014: 460-466.
- [32] RAEESI O, PIRSKANEN J, HAZMI A. Performance enhancement and evaluation of IEEE 802.11ah multi-access point network using restricted access window mechanism[C]/IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems. IEEE, 2014: 287-293.
- [33] KHOROV E, LYAKHOV A, YUSUPOV R. Modelling machine type communication in IEEE 802.11ah network[C]/IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW). IEEE, 2015(14): 1149-1154.
- [34] LYAKHOV A, KHOROV E, YUSUPOV R. Two-slot based model of the IEEE 802.11ah restricted access window with enabled transmissions crossing slot boundaries[C]/IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM). IEEE, 2018.
- [35] GOPINATH A J, NITHYA B. Mathematical and simulation analysis of contention resolution mechanism for IEEE 802.11ah networks[J]. Computer Communications, 2018(124): 87-100.
- [36] TIAN L, MICHAEL M, SANTI S. IEEE 802.11ah restricted access window surrogate model for real-time station grouping[C]/19th International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM). IEEE, 2018.
- [37] TIAN L, MICHAEL M, SANTI S. Multi-objective surrogate modeling for real-time energy-efficient station grouping in IEEE 802.11ah[J]. Pervasive and Mobile Computing, 2019.
- [38] PARK M. IEEE 802.11ah: energy efficient MAC protocols for long range wireless LAN[C]/2014 IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2014: 2388-2393.
- [39] YOON S G, SEO J O, BAHK S. Regrouping algorithm to alleviate the hidden node problem in 802.11ah networks[J]. Computer Networks, 2016(105): 22-32.
- [40] DAMAYANTI W, KIM S, YUN J H. Collision chain mitigation and hidden device-aware grouping in large-scale IEEE 802.11ah networks[J]. Computer Networks, 2016(108): 296-306.
- [41] DONG M X, WU Z J, GAO X. An efficient spatial group restricted access window scheme for IEEE 802.11ah networks[C]/6th International Conference on Information Science and Technology (ICIST). IEEE, 2016: 168-173.
- [42] WANG Y R, LI Y, CHAI K K. Energy-aware adaptive restricted access window for IEEE 802.11ah based smart grid networks[C]/IEEE International Conference on Smart Grid Communications. IEEE, 2015: 581-586.
- [43] LIN Y C, et al. Study of uplink contention access in IEEE 802.11ah network[D]. Taiwan: National Central University, 2018.
- [44] NAWAZ N, HAFEEZ M, ZAIDI S A R. Throughput enhancement of restricted access window for uniform grouping scheme in IEEE 802.11ah[C]/2017 IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2017: 1-7.
- [45] PARK C W, HWANG D, LEE T J. Enhancement of IEEE 802.11ah MAC for M2M communications[J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(7): 1151-1154.

- [46] CHANG T C, LIN C H, LIN C J. Load-balanced sensor grouping for IEEE 802.11ah networks[C]//IEEE Global Communications Conference. IEEE, 2015.
- [47] CHANG T C, LIN C H, LIN K C J. Traffic-aware sensor grouping for IEEE 802.11ah networks: regression based analysis and design[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2018: 1.
- [48] TIAN L, EVGENY K, LATRÉ S. Real-time station grouping under dynamic traffic for IEEE 802.11ah[J]. Sensors, 2017, 17(7): 1559.
- [49] TIAN L, SANTI S, LATRÉ S. Accurate sensor traffic estimation for station grouping in highly dense IEEE 802.11ah networks[C]//ACM International Workshop on the Engineering of Reliable, Robust, and Secure Embedded Wireless Sensing Systems. ACM, 2017.
- [50] JI B F, CHEN S D, SONG K. Throughput enhancement schemes for IEEE 802.11ah based on multi-layer cooperation[C]//2015 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference. IEEE, 2015: 1112-1116.
- [51] BADIHI B, CARPIO L F D, AMIN P. Performance evaluation of IEEE 802.11ah actuators[C]//2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference. IEEE, 2016: 1-5.
- [52] KIM T, CHANG J M. Enhanced power saving mechanism for large scale 802.11ah wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2017, 1(4):516-527.
- [53] ALI M Z, MISIC J, MISIC V. Differentiated QoS to heterogeneous IoT nodes in IEEE 802.11ah raw mechanism[C]//Proceedings of the IEEE Globecom. IEEE, 2018.
- [54] SEFERAGIC A, KERKHOVE D, TIAN L. Performance evaluation of IEEE 802.11ah networks with high-throughput bidirectional traffic[J]. Sensors, 2018, 18(2): 1-28.
- [55] BEL A, ADAME T, BELLALTA B. An energy consumption model for IEEE 802.11ah WLANs[J]. Ad Hoc Networks, 2018(72): 14-26.
- [56] KUREEV A, BANKOV D, KHOROV E. Improving efficiency of heterogeneous Wi-Fi networks with joint usage of TIM segmentation and restricted access window[C]//2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications. IEEE, 2017: 1-5.
- [57] CHARANIA N. Delay and energy aware raw formation scheme to support delay sensitive M2M traffic in IEEE 802.11ah network[D]. Indian: Institute of Technology Hyderabad, 2017.
- [58] ZHANG X. Enhancing IEEE 802.11ah for the Internet of things[D]. Hong Kong: the University of Hong Kong, 2018.
- [59] BELTRAMELLI L, ÖSTERBERG P, JENNEHAG U, et al. Hybrid MAC mechanism for energy efficient communication in IEEE 802.11ah[C]//2017 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). IEEE, 2017.

[作者简介]



田乐（1987- ），男，陕西咸阳人，博士，信息工程大学助理研究员，主要研究方向为 IEEE 802.11ah 等面向物联网的低功耗无线传输技术、可编程网络及未来网络关键技术。



胡宇翔（1982- ），男，河南周口人，博士，信息工程大学副教授，主要研究方向为未来网络关键技术、网络智能化等。



韩伟涛（1989- ），男，河北石家庄人，博士，信息工程大学助理研究员，主要研究方向为网络空间安全、无线通信、复杂系统、统计物理等。