

文章编号:1671-251X(2019)06-0021-06

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.17424

基于 IEEE 802.11ah 的井下安全 监测传感网性能分析

王倩玉¹, 陈岩¹, 杨俊秋¹, 李松¹, 孙彦景^{1,2}

(1. 中国矿业大学 信息与控制工程学院, 江苏 徐州 221116;

2. 西安科技大学 通信与信息工程学院, 陕西 西安 710054)



扫码移动阅读

摘要:针对煤矿井下特殊通信环境对安全监测无线传感网的需求及现有安全监测无线传感网存在接入设备数量和传输距离受限等不足,提出了将 IEEE 802.11ah 应用于煤矿安全监测无线传感网,并利用 NS-3 仿真平台对其传输距离、吞吐量、时延、能耗等性能进行了分析。分析结果表明,IEEE 802.11ah 的传输距离远大于传统 WiFi 通信技术,其传输距离为 600 m 时丢包率仍为 0;当节点数较少、网络未饱和时,节点竞争信道冲突和碰撞情况并不严重,IEEE 802.11ah 在吞吐量、时延、能耗等方面的性能优势并不明显,但在接入节点数众多时,IEEE 802.11ah 能很好保证网络的吞吐量、时延、能耗等性能,网络饱和后随着接入节点数的增加,相比传统 WiFi 通信技术网络性能的持续大幅下降,其网络性能下降幅度更小且渐趋稳定;IEEE 802.11ah 网络上行链路数据传输性能与受限访问窗口参数选取有关,准确选取受限访问窗口参数可以更好地发挥基于 IEEE 802.11ah 的煤矿安全监测无线传感网的性能优势。

关键词:煤矿安全监测;井下无线传感网;RAW 机制;网络性能;时延;吞吐量;IEEE 802.11ah

中图分类号:TD655

文献标志码:A

Performance analysis of underground safety monitoring wireless sensor network based on IEEE 802.11ah

WANG Qianyu¹, CHEN Yan¹, YANG Junqiu¹, LI Song¹, SUN Yanjing^{1,2}

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

Xuzhou 221116, China; 2. School of Communication and Information Engineering,

Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: In view of need of safety monitoring wireless sensor network in special communication environment of underground coal mine and limitation of access device number and transmission distance of existing safety monitoring wireless sensor network, IEEE 802.11ah was applied to underground safety monitoring wireless sensor network, and NS-3 simulation platform was used to analyze its performances, such as transmission distance, throughput, delay, energy consumption. The analysis results show that the transmission distance of IEEE 802.11ah is much longer than that of traditional WiFi communication technology, and the packet loss rate of IEEE 802.11ah is still 0 when the transmission distance is 600 m. When the number of nodes is small and the network is not saturated, and the channel competition and collision of nodes are not serious, the performance advantages of IEEE 802.11ah in terms of throughput,

收稿日期:2019-04-09;修回日期:2019-05-15;责任编辑:张强。

基金项目:国家自然科学基金项目(51734009,61771417,51804304);徐州市科技项目(KC18105,KC18068)。

作者简介:王倩玉(1994—),女,山东烟台人,硕士研究生,主要研究方向为无线网络,E-mail:719985915@qq.com。通信作者:孙彦景(1977—),男,山东滕州人,教授,博士,博士研究生导师,主要从事挑战环境下的嵌入式实时系统及无线传感器网络等方面的研究工作,E-mail:yanjingsun_cn@163.com。

引用格式:王倩玉,陈岩,杨俊秋,等.基于 IEEE 802.11ah 的井下安全监测传感网性能分析[J].工矿自动化,2019,45(6):21-26.

WANG Qianyu, CHEN Yan, YANG Junqiu, et al. Performance analysis of underground safety monitoring wireless sensor network based on IEEE 802.11ah[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(6): 21-26.

time delay and energy consumption are not obvious. However, when the number of access nodes is large, IEEE 802.11ah can well guarantee the performances of throughput, time delay, energy consumption. As the number of access nodes increases after network saturated, performance of the traditional WiFi communication technology network continues to drop sharply, performance of IEEE 802.11ah declines less and becomes gradually stable. In addition, performance of IEEE 802.11ah network uplink data transmission is related to selection of restricted access window parameters, accurate selection of restricted access window parameters can better exploit performance advantages of underground safety monitoring wireless sensor network based on IEEE 802.11ah.

Key words: coal mine safety monitoring; underground wireless sensor network; RAW mechanism; network performance; time delay; throughput; IEEE 802.11ah

0 引言

目前我国煤炭资源开采大多采用井工方式,瓦斯、顶板、矿尘等安全隐患严重威胁着矿井生产和矿工生命安全,为有效预防煤矿事故发生,亟需建立完善的煤矿安全监测系统^[1]。煤矿安全监测系统的完善依赖于对煤矿各种与安全问题相关信息的准确采集与及时传输,井下安全监测信息采集网络的性能对煤矿安全监测系统的建设尤为重要。

用于煤矿安全监测信息采集的通信方式可分为有线、无线 2 种。早期的有线通信方式在极端环境下易遭破坏,设备维护成本高,线路固化死板、难以改动,建成后重新布线施工难度大,采煤工作面变化后原有设备只能被废弃,通信设备利用率低,且存在监测盲区^[2]。无线通信方式较有线通信方式布设灵活、成本低,但现有井下无线通信技术也有其局限性:红外线技术不具备穿透障碍物的能力;电磁泄漏技术信号易衰减、抗干扰能力弱;无线射频识别(Radio Frequency Identification,RFID)技术通信距离短,且目前缺乏完整的标准体系;传统 WiFi 通信技术传输可靠性高、速度快、传输成本低、系统易维护,但接入设备数量有限,传输距离也有限,只适合视距无遮挡的点对点直线通信^[3]。井下环境复杂多变、障碍物多、高频信号易被吸收,用于井下安全监测信息采集的传感器节点大多为电池供电的能量受限节点,且节点部署密集、数目大,现有通信技术已无法满足井下安全监测发展的需要,煤矿安全监测信息采集网络亟需一种可以满足大范围、低功耗、大量设备接入的通信技术。IEEE 802.11ah 无线网络协议工作在 1 GHz 以下的免授权频段,传输距离长达 1 km,数据传输速率大于 100 kbit/s,单个接入点(Access Point,AP)的可接入节点(Stations,STAs)数多达 8 191 个^[4],具有通信范围广、功耗低、允许海量设备接入的优点^[5]。本文针对煤矿井下特殊通信环境对安全监测无线传感网的需求及现有安全监

测无线传感网存在接入设备数量和传输距离受限等不足,提出将 IEEE 802.11ah 应用于井下安全监测无线传感网,并利用 NS-3 仿真平台对其性能进行了分析。

1 IEEE 802.11ah 协议

为更好支持传感器网络和未来物联网的发展,IEEE 802.11 工作组于 2016 年发布了称为 IEEE 802.11ah 的新标准,主要针对 3 种应用场景:无线传感器网络(Wireless Sensor Networks,WSN)、传感器和智能仪表计量数据回传网络及范围扩展的 WiFi 网络^[6]。

IEEE 802.11ah 继承了 IEEE 802.11 系列标准演进的传统,在 IEEE 802.11ac 的基础上增强了物理层(Port Physical Layer,PHY)和媒体访问控制层(Media Access Control,MAC)^[7]。

1.1 IEEE 802.11ah PHY 层特点

在 PHY 层上,IEEE 802.11ah 继承了 IEEE 802.11ac 的一些特性,在 IEEE 802.11ac 物理层时钟降频 10 倍的基础上工作,使其能够在低于 1 GHz 频段上拥有更优异的传输性能^[8]。IEEE 802.11 无线局域网(Wireless Local Area Networks,WLAN)主要工作在 2.4 GHz 和 5 GHz 频段,高频频段限制了传输距离,因而工作在 1 GHz 以下免授权频段的 IEEE 802.11ah 具有更好的传播特性和穿透性,能够有效降低如矿山地下的电磁吸收与干扰,使其传输距离可达 1 km,可以满足煤矿井下大范围、多障碍物、高频信号易被吸收的复杂环境通信需求。对于不同的数据速率和带宽,IEEE 802.11ah 使用不同的调制和编码方案(Modulation and Coding Scheme,MCS)、空间流数(Number of Spatial Streams,NSS)和保护间隔(Guard Interval,GI)^[9]。IEEE 802.11ah 将带宽定义为 2、4、8、16 MHz,并为进一步扩展通信范围额外定义了 1 MHz 信道,通过强制性支持 1 MHz 和 2 MHz 信道以扩展通信范

围^[10],可以很好地适用于井下等范围广、空间环境复杂、设备安装难的特殊应用场景。

1.2 IEEE 802.11ah MAC 层特点

在 MAC 层上,IEEE 802.11ah 引入了分层结构、短 MAC 包头、受限访问窗口(Restricted Access Window, RAW)、流量指示图(Traffic Indication Map, TIM)分段和目标唤醒时间(Target Wake Time, TWT)等机制^[4]。连接标志码(Association ID, AID)分级结构使连接到同一 AP 的节点可达 8 191个,并通过 RAW 机制对节点进行分组,限制同时参与竞争信道的节点数,以解决大量节点同时接入信道的碰撞问题^[7]。由此,IEEE 802.11ah 可以很好满足无线传感网,如煤矿安全监测无线传感网等日益增长的传感器设备数和上行链路监测业务数据量的传输需求。针对短数据包包头带来的传输能量损耗大的问题,定义了短 MAC 包头;针对高密度网络下行数据传输 TIM 过长问题,TIM 分段机制通过分段每次仅唤醒有数据要接收的 TIM 分段内的节点;TWT 为节点安排唤醒时间,使不同节点可以在不同的时间醒来^[8]。以上机制降低了网络能耗,提高了密集部署的大量能量受限节点的能量效率,使节点电池寿命长达数年,可以满足采用电池供电且无法频繁更换电池的井下安全监测传感网的发展需求。

由于传感网中上行数据占主体,MAC 层的 RAW 机制对无线传感网,如煤矿安全监测无线传感网的通信尤为重要,也是目前对 IEEE 802.11ah MAC 层研究的主流方向。图 1 描述了 RAW 的具体工作原理:对大量节点进行分组,信道接入时间也被分成多个时间间隔,每个时间间隔只允许一组节点竞争信道,分组信息由信标帧携带的 RAW 参数集(RAW Parameter Set, RPS)确定。每个 RAW 组可以进一步细分,由一个或多个等长的时隙(slot)组成,有关 RAW 时隙的参数也由 RPS 携带^[4]。 i_{NRAW_C} 为 RAW 组 C 的最后一个 slot 的序号。

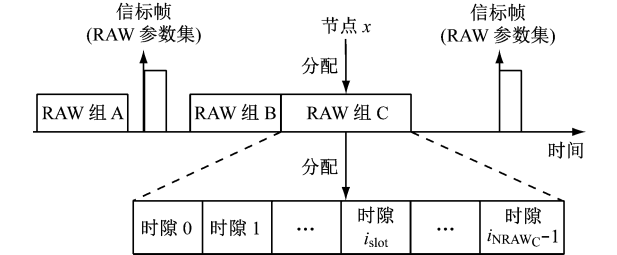


图 1 RAW 结构
Fig. 1 RAW structure

2 基于 IEEE 802.11ah 的井下安全监测无线传感网

井下安全监测无线传感网工作原理:在井下巷

道需要监测的区域内部署大量微型传感节点,用于采集温度、压力、瓦斯浓度等多种信息(图 2)^[11-13],节点以无线通信方式连接,形成传输网络,将监测区域内采集的信息处理后通过传输网络实时可靠地上传到地面监控中心,用于灾害预警决策^[14]。

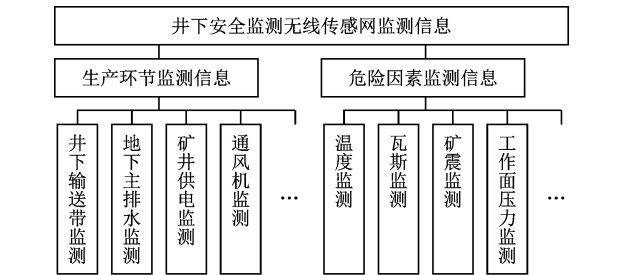


图 2 井下安全监测无线传感网监测信息
Fig. 2 Monitoring information of underground safety monitoring wireless sensor network

井下特殊环境使地面信息化技术不能直接应用于井下,井下安全监测无线传感网通信有其自身需求^[15]:① 节能需求:井下用于安全监测信息采集的传感器节点大多是由电池供电,且井下安全监测无线传感网不便于人工维护,更换电池困难,为实现更长的使用寿命,这就要求井下信息采集节点工作能耗低。② 对大规模节点的容纳需求:井下的传感器节点布设于不同深度地层,并且常采用加倍部署节点方法避免覆盖盲区的产生,提高系统监测精度的同时增加了节点密度,因此要求网络可以容纳大规模密集部署的节点。③ 对复杂环境的适应性需求:狭小矿井巷道空间内灾害源众多,且地下电磁吸收与干扰会吸收高频信号,这都会影响通信设备正常工作,因此要求网络对井下复杂的环境条件具有良好的适应性。④ 拓扑应变性需求:开采过程矿井巷道不断推进,新开的巷道需布置新节点或原有节点故障失效都要求网络具有对节点离开或加入的适应性^[3]。

针对井下安全监测无线传感网的需求,本文提出将 IEEE 802.11ah 应用于井下安全监测无线传感网。基于 IEEE 802.11ah 的井下安全监测无线传感网如图 3 所示,井下密集部署了大量类型不同、位置相对固定的传感器节点,如温度传感器、压力传感器等,节点与 AP 间采用 IEEE 802.11ah 网络协议通信。原本由于遮挡、分布范围过大、设备接入数量过大等限制因素导致需接入不同 AP 的节点,在基于 IEEE 802.11ah 的井下安全监测无线传感网中可直接接入同一 IEEE 802.11ah AP 节点;AP 通信范围内大量密集部署的传感器节点与该 AP 通过单跳的方式直接建立连接并上传监测数据,无需中间节点,任何节点的故障失效都不会对其他节点的

传输造成影响,网络抗毁性强,且新加入的节点也只要直接与 AP 建立连接即可进行数据上传;AP 通过与井下无线网关连接,将众多井下传感器节点采集到的煤矿安全监测信息上传;网关通过光纤与地面监控中心以有线方式连接,最终将传感器监测信息传至地面监控中心。

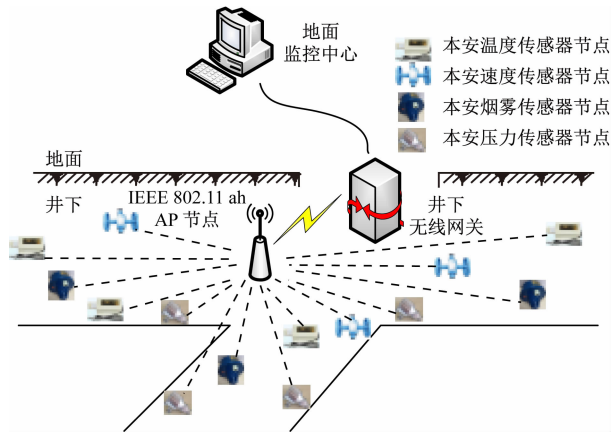


图 3 基于 IEEE 802.11ah 的井下安全监测无线传感网
Fig. 3 Underground safety monitoring wireless sensor network based on IEEE 802.11ah

IEEE 802.11ah 通信范围广、允许接入同一 AP 的节点数目多,井下传感器密集部署的大范围区域只需安置少量 AP 就可以完成组网,无需大量组网设备,网络拓扑结构简单,从而降低了井下安全监测传感网的布设难度和成本,增强了监测网络的可靠性和抗毁性;特有的 RAW 机制通过对信道接入时间和节点分别进行分组,减少同时竞争信道的节点数,很好地协调了大量密集部署的传感器节点庞大上传数据对信道的需求,保证井下安全监测传感网的传输性能;多种降低网络传输能耗的节能机制,延长了井下传感器节点的使用寿命;工作频段较低,在 1 GHz 以下,由于通信信号在低频段的传输性好、穿透性强,在复杂、障碍物多、高频信号易被吸收的井下环境中不易被遮挡或吸收,从而可实现更长的传输距离。

井下煤仓、采区回风巷等处部署的本安甲烷传感器、机电硐室等处部署的本安温度传感器、通风机等设备部署的本安开停传感器等上电启动后,主动发送探测请求,通过收到的回复确定其所在区域可连接到的 IEEE 802.11ah AP 节点;传感节点根据该 AP 的认证管理机制确定当前是否可向其发送认证请求,若可以则发送认证请求以进行后续连接,若不可以则需等待一个信标帧间隔,再次进行上述是否允许认证的判定,以避免大量节点同时竞争信道产生的碰撞问题;当前可进行认证的传感器节点向该 AP 发送认证请求,得到回复则向该 AP 发送关联请求,若收到连接请求回复证明已成功接入该

AP 节点,完成基于 IEEE 802.11ah 的井下无线监测传感网组网,就可进行后续监测数据传输。

3 性能分析

利用 NS-3 仿真平台^[6-8]对煤矿安全监测无线传感网的应用场景进行仿真,验证 IEEE 802.11ah 相较于传统 IEEE 802.11 系列协议应用于井下安全监测无线传感网的性能优势。

3.1 传输距离对比

IEEE 802.11ah 协议相较于传统 IEEE 802.11 协议可以获得更大的覆盖范围。随着传输距离的增加,不同 WiFi 模型(WiFi 模型用于描述网络的物理信道速率和信道带宽)下,IEEE 802.11ah 与 IEEE 802.11ac、IEEE 802.11b 的丢包率如图 4 所示。丢包率为 1 时,说明传输距离超过通信范围。

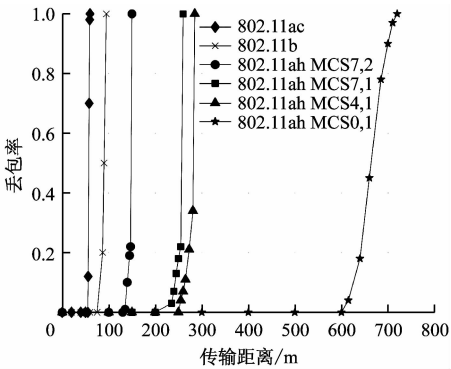


图 4 传输距离对比

Fig. 4 Comparison of transmission distance

从图 4 可看出,IEEE 802.11ac 在传输距离接近 60 m 时丢包率已经为 1;IEEE 802.11b 在传输距离接近 100 m 时丢包率已经为 1;WiFi 模型 MCS7,2 MHz (物理层信道数据传输速率为 6.5 Mbit/s,带宽为 2 MHz)的 IEEE 802.11ah MCS7,2 在传输距离为 130 m 时丢包率为 0,在传输距离为 135 m 时丢包率才开始上升,在传输距离约为 150 m 时丢包率达到 1;WiFi 模型 MCS7,1 MHz (物理层信道数据传输速率为 3 Mbit/s,带宽为 1 MHz)的 IEEE 802.11ah MCS7,1 在传输距离为 200 m 时丢包率为 0,在传输距离为 230 m 之后丢包率才开始急剧上升,在传输距离约为 260 m 时丢包率为 1;WiFi 模型 MCS4,1 MHz (物理层信道数据传输速率为 1.8 Mbit/s,带宽为 1 MHz)的 IEEE 802.11ah MCS4,1 在传输距离为 250 m 时丢包率为 0,之后丢包率骤升,在传输距离约为 285 m 时丢包率为 1;WiFi 模型 MCS0,1 MHz (物理层信道数据传输速率为 300 kbit/s,带宽为 1 MHz)的 IEEE 802.11ah MCS0,1 在传输距离为 600 m 时丢包率仍为 0,传输距离 710 m 之后丢包率才为 1。证明 IEEE 802.11ah 的传输距离

远大于传统 IEEE 802.11 系列协议。

3.2 吞吐量、时延、能耗对比

依据煤矿安全监测系统的实际应用场景,鉴于 IEEE 802.11ac 传输距离较小,本仿真仅选取 IEEE 802.11b 与 IEEE 802.11ah 进行对比。由于 IEEE 802.11b 传输距离限制,设定节点随机分布在半径为 90 m 的圆形范围内、接入点 AP 位于圆心的固定网络拓扑。本文考虑实际场景中传感网一般包含不同种类传感器,以含 2 种不同传感器节点的传感网为例,设定传感网中进行信息采集的传感器节点的发包间隔和发包大小情况:以 0.5 s 的发包间隔周期性向 AP 发送大小为 256 byte 的数据包和以 0.2 s 的发包间隔发送大小为 64 byte 的数据包。鉴于井下安全监测无线传感网中上行数据量远大于下行数据,本文只针对用于信息采集的传感器节点周期传输的上行数据进行研究,验证 IEEE 802.11ah 由于 RAW 机制的设置,随着节点数的增加,在吞吐量、时延、能耗三方面表现出的性能优势。仿真参数设置见表 1。为在各自所支持的 DataMode 范围内尽量保持仿真参数设置一致,DataMode 选择分别为 DsssRate5_5 Mbit/s (IEEE 802.11b)、MCS7,2 MHz (IEEE 802.11ah)。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数	数值
发包大小/byte	64、256
发包间隔/s	0.2、0.5
信标间隔/s	0.1
拓扑半径/m	90
队列长度(数据包数)	无限
PHY 层信道模型	YansErrorRate

吞吐量特性对比如图 5 所示,图中 NRAW 为 RAW 的分组数。从图 5 可看出,当节点数较少、网络未饱和时,节点竞争信道冲突和碰撞情况并不严重,IEEE 802.11ah 的 RAW 机制优势不明显,IEEE 802.11ah 和 IEEE 802.11b 吞吐量相近;当接入节点数为 128 时,吞吐量达到峰值,网络达到饱和;之后,随着接入节点数的增加,IEEE 802.11ah 吞吐量略有下降,下降幅度小且渐趋稳定,而 IEEE 802.11b 吞吐量持续急剧下降。

时延特性对比如图 6 所示。从图 6 可看出,当节点数较少、网络未饱和时,节点竞争信道冲突和碰撞情况并不严重,IEEE 802.11ah 的 RAW 机制优势不明显,IEEE 802.11ah 和 IEEE 802.11b 时延相近,甚至由于分组原因导致 IEEE802.11ah 时延略

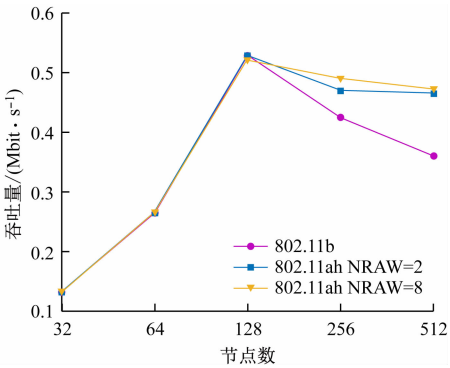


图 5 吞吐量特性对比

Fig. 5 Comparison of throughput characteristics

高于 IEEE 802.11b;当接入节点数为 128 时,网络达到饱和;之后,随着接入节点数的增加,虽时延都有所上升,但 IEEE 802.11ah 的时延增幅明显低于 IEEE 802.11b,且节点数越多,增幅差距越明显。

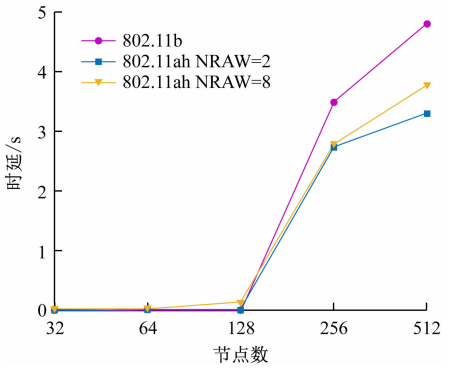


图 6 时延特性对比

Fig. 6 Comparison of delay time characteristics

网络总能耗特性对比如图 7 所示。从图 7 可看出,当节点数较少、网络未饱和时,节点竞争信道冲突和碰撞情况并不严重,IEEE 802.11ah 的 RAW 机制优势不明显,IEEE 802.11ah 能耗优势表现虽不明显,但由于其设置多种节能机制,能耗一直比 IEEE 802.11b 低;当接入节点数为 128 时,网络达到饱和;之后,随着接入节点数的增加,IEEE 802.11ah 能耗优势越来越明显,虽都有所上升,但 IEEE 802.11ah 增幅明显低于 IEEE 802.11b。

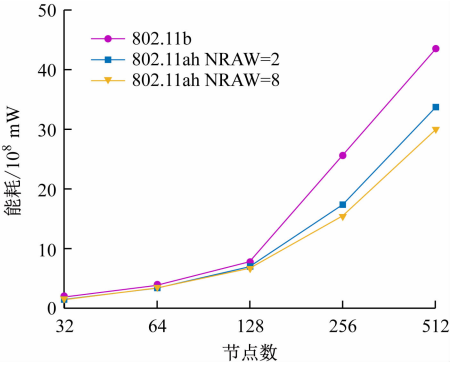


图 7 能耗特性对比

Fig. 7 Comparison of energy consumption characteristics

通过以上分析可知,随着节点数的增加,IEEE 802.11ah 在吞吐量、时延、能耗方面的特性较 IEEE 802.11b 优势明显,另外,随着 RAW 分组数的增大,IEEE 802.11ah 网络吞吐量和能耗性能也有所提升,时延特性略有下降。IEEE 802.11ah 网络上行链路数据传输性能与 RAW 参数的选取有关,准确选取 RAW 参数可以更好地发挥基于 IEEE 802.11ah 的煤矿安全监测无线传感网的性能优势。

4 结论

- (1) 提出将 IEEE 802.11ah 协议应用于煤矿安全监测无线传感网,并通过仿真对其性能进行了分析。结果表明,IEEE 802.11ah 的传输距离远大于传统 IEEE 802.11 系列协议,随着网络中节点数的增加,其吞吐量、时延、能耗性能优势越来越明显。
- (2) 目前针对 IEEE 802.11ah 的研究还在不断开展,随着研究的深入,IEEE 802.11ah 的性能优势将得到更好发挥,基于 IEEE 802.11ah 的井下安全监测无线传感网性能也将进一步得到优化。

参考文献(References):

[1] 周坚和. 煤矿安全监测系统无线传感器网络网关设计[J]. 工矿自动化,2013,39(3):26-30.
ZHOU Jianhe. Design of WSN gateway for coal mine safety monitoring system [J]. Industry and Mine Automation,2013,39(3):26-30.

[2] 徐寿泉,徐宝平,张阳太,等. 煤矿井下无线通信技术的现状与发展[J]. 工矿自动化,2014,40(9):111-114.
XU Shouquan,XU Baoping,ZHANG Yangtai,et al. Current situation of coal mine wireless communication technology and its development[J]. Industry and Mine Automation,2014,40(9):111-114.

[3] 朱凯. 矿井围岩监测无线传感网技术研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2015:1-122.

[4] IEEE 802.11ah—2016 IEEE standard 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 amendment2:Sub 1 GHz license exempt operation[S].

[5] KHOROV E,LYAKHOV A,KROTOV A,et al. A survey on IEEE 802.11ah: an enabling networking

technology for smart cities [J]. Computer Communications,2015,58(1):53-69.

[6] MINYOUNG P. IEEE 802.11ah:sub-1-GHz license-exempt operation for the Internet of things[J]. IEEE Communications Magazine,2015,53(9):145-151.

[7] TIAN L,FAMAEY J,LATRÉ S. Evaluation of the IEEE 802.11 ah restricted access window mechanism for dense IoT networks [C]//17th International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks,2016:1-9.

[8] 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,ACM,2016:49-56.

[9] TIAN L,MEHARI M,SANTI S,et al. 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,2018:14-22.

[10] ADAME T,BEL A,BELLALTA B,et al. IEEE 802.11ah: the WiFi approach for M2M communications [J]. IEEE Wireless Communications,2014,21(6):144-152.

[11] 武先利,王鹏,温良,等. 一种新型煤矿井下无线通信系统研究[J]. 工矿自动化,2013,39(8):22-25.
WU Xianli,WANG Peng,WEN Liang,et al. Research of a new underground wireless communication system [J]. Industry and Mine Automation,2013,39(8):22-25.

[12] 秦维阳. 矿井安全监测监控系统论述[J]. 煤炭科技,2017(2):187-189.
QIN Weiyang. Discussion on mine safety monitoring and control system[J]. Coal Science & Technology Magazine,2017(2):187-189.

[13] 宋海鹰. 煤矿井下无线通信系统的应用研究[J]. 山西煤炭,2017,37(3):74-76.
SONG Haiying. Application of wireless communication system in mines [J]. Shanxi Coal,2017,37(3):74-76.

[14] 王泉夫. 基于 WSN 的工作面监控及瓦斯浓度预测关键技术研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2009:1-129.

[15] 马磊. 无线传感器网络在煤矿井下监测监控系统中的应用[J]. 无线互联科技,2015(17):22-23.
MA Lei. Wireless sensor network application in the coal mine monitoring and control system[J]. Wireless Internet Technology,2015(17):22-23.