

# 一种基于矿井的 WSN 自适应 MAC 协议设计

李俊霞, 张长森

(河南理工大学 物理与电子信息学院, 河南 焦作 454000)

**摘要:**针对现有矿井监控通信系统在自然灾害发生时,有线通信中断,无法及时得知井下人员信息,现有应急通信系统通信范围没有包括需要救援人员的问题,构建了新型的矿井监控与应急通信网络.系统在有线通信中断时,唤醒部分 WSN 节点,构成 Ethernet- WSN-Ethernet 应急通信网络以保证井下人员信息无碍传输.针对矿井监控与应急通信系统需求,设计了一种 IS-MAC(Improved S-MAC)协议,设计了带有优先级标志的数据帧和控制帧,引入自适应接入控制机制,以实现不同工作模式自动切换.仿真结果表明,IS-MAC 改进协议,与 S-MAC 相比,降低了能耗,延长了网络生存期,提高了网络吞吐量;可以较好地地区分优先级,具有自适应性,能满足系统需求.

**关键词:** WSN; MAC 协议; 自适应; 接入控制; 优先级

**中图分类号:** TP393.1

**文献标志码:** A

无线传感网络技术是国际学术界和产业界共同关注的前沿研究热点,国内外研究工作者对无线传感技术在矿井安全监控中的应用也开展了大量研究.本文就是利用无线传感网络灵活、扩展简便、移动性强和自我组织等特点,通过带有两种网络接口的网关节点,将 WSN 与有线通信系统相融合,构成新型矿井监控与应急通信系统.有线系统完好时,WSN 节点作为监控神经网络末梢部分,完成监测数据收集;在有线通信出现故障或发生自然灾害时,利用 WSN 网络自组织特性,由部分 WSN 节点+网关节点构成软网桥,与未损毁的有线网络共同形成应急通信系统,以无碍传输井下人员信息.针对这种矿井监控与应急通信系统的特殊需求,结合矿井应用环境的特点,设计了一种基于 S-MAC 的改进协议,IS-MAC,引入了优先级的概念,设计了带有数据类型的数据帧,对不同类型数据结合工作模式信息,给予不同的接入控制权限.实验结果表明,所设计的协议能够实现系统两种工作模式自动切换,且网络生存期、接入延时和网络吞吐量等性能指标都优于 S-MAC 协议.

## 1 相关工作

矿井安全一直是困扰矿井工业发展的难题,我国也针对这个问题,出台了一系列的政策法规和技术标准.随着无线传感网络技术的发展,目前国内外已投入使用大量的井下安全监控、无线传感与通信系统,主要集中在以下几个方面.

1) 人员和设备位置的监控.这类系统多数采用工业以太网或现场总线作为信息传输平台,采用射频识别(Radio Frequency Identification, RFID)技术或者借鉴 RFID 的思想来实现.在矿井内以一定间隔布置固定的射频接口设备,当佩戴射频发射器的人员或设备进入射频接口设备的有效无线通信范围内,射频接口设备读取移动目标的 ID 代码,并将该信息传送至监控中心,实现对移动目标的定位和跟踪.例如,北京美达嘉润数码安全技术有限公司引进的 L3 系统、美国安菲斯公司研制的 T/T 井下人员跟踪系统等,以及南京北路自动化系统有限公司生产的 KJ222(A)煤矿人员管理系统等.

2) 应急救灾通信.抢险救灾时在井下建立临时无线基站,实现救援队员与指挥中心的通信,一般需要借

收稿日期:2016-11-28;修回日期:2017-01-16.

基金项目:国家自然科学基金(51174263);河南省基础与前沿技术研究(142300410144).

作者简介(通信作者):李俊霞(1979-),女,河南焦作人,河南理工大学讲师,研究方向为无线传感网络通信技术, E-mail: lijunxia20020@163.com.

助探险绳扩大有效通信范围(有线或者漏泄通信).这类系统包括:北京中西集团生产的TK4-KTW2型矿用救灾无线电通信系统,河南中煤电气有限公司生产的PED井下无线急救通信系统等.

3)调度和通信.将地面蜂窝移动通信技术移植到煤矿井下,用微小区的概念将井下巷道进行划分,利用双工无线电通信系统实现移动语音通信.例如,北京达因瑞康科技有限责任公司的KTL109矿用多信道无线调度通信系统、英国DAC公司的紧急报警通信系统、波兰EMAG广播通信系统等<sup>[1-10]</sup>.

现有的矿井监控系统为无线通信技术在井下的应用奠定了良好的基础,但经过研究分析可知,在实际应用中仍存在以下问题.①以有线网络为骨干网的通信系统,在自然灾害发生后一旦有线网络通信中断,定位、跟踪与通信功能失效,受困人员无法与指挥中心取得联系.②应急救援通信系统仅在地面指挥中心—井下指挥中心—救援队员之间展开,没有包括最需要通信的被困人员.③系统功能单一,采掘工作面的瓦斯传感器布设经常跟不上掘进速度,造成了大量监测死角和安全隐患的出现.

本文就是针对以上问题,设计了一种新型矿井监控与应急通信系统,使得即使有线通信中断,仍然能够无障碍地传输井下人员信息,提高救援效率,为人员安全增加一层保障.

WSN是和应用紧密相关的网络,针对不同的应用环境,研究人员提出了很多个有关关注点的无线传感网络MAC协议.文献[11]提出了一种流量自适应异步协议,该协议基于短前导序列采样技术,当节点收到数据后并不立即转入睡眠,而自适应增加若干个最短侦听时间,用于接收发送节点可能传输的其他数据,使得收发双方在网络负载较重时能实现一次配对多次收发数据,然而,该协议中存在空闲侦听和数据碰撞等能耗问题.文献[12]提出了一种新的自适应混合MAC协议TC<sup>2</sup>-MAC,采用了基于二叉树结构的时隙块分配策略和基于时隙约束的CSMA/CA竞争接入方式,能够为不同传感器节点或不同类型业务的差异性QoS需求提供良好支持,并能够通过灵活的信息调度机制改善信道接入公平性,提高网络效率.文献[13]提出的DW-MAC,为降低节点间数据传输延时,通过传输一个控制帧(SCH),使得路径上的各个节点明确自己应该在何时唤醒,使得任何两个处于通信范围内的节点都可以互相传递信息.但是DW-MAC对时间同步要求极高,实现花销较大.

井下巷道具有复杂性、动态性等特点,经过分析可知,现有无线传感器网络MAC层通信协议都不是针对这种复杂环境设计的,不能满足新型矿井监控与应急通信系统的需求<sup>[14-17]</sup>,所以很有必要设计一种新型MAC协议.

## 2 基于矿井的监控与应急通信系统设计

1)系统体系结构.以现有矿井安全监控系统为基础,融合无线传感器网络,以一定间隔布置带有两种网络接口的无线接入点,形成以工业以太网为主、以WSN为辅的信息传输体系.体系结构如图1所示.

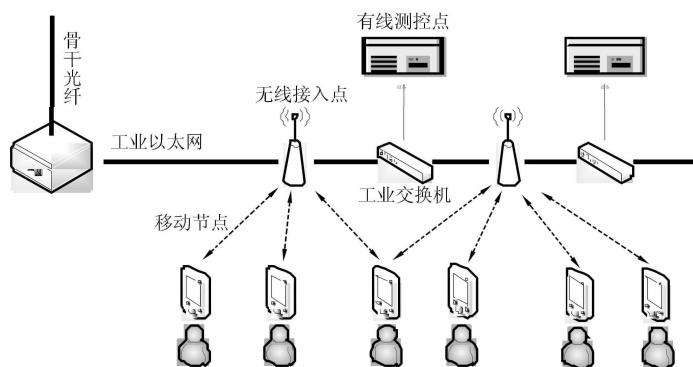


图1 矿用信息传输网络系统结构图

2)工作模式.这种新型矿井监控与应急通信网络有两种工作模式:正常工作模式和应急工作模式.有线网络完好时,无线传感网络完成对环境参数、设备状态监测,并通过带有两种网络接口的网关节点实现WSN与有线骨干网络互连,将这些数据通过有线主干网上传到地面控制中心.当井下有线通信网络中断后,网关

节点通过对有线信道周期性侦听,检测到有线通信中断时,则通知 WSN 网络做出调整,优先传送人员定位信息.无线传感器节点通过一跳或多跳路径将信息传递给带有两种网络接口的网关节点,固定的网关节点和一些固定节点形成软网桥,完成井下人员信息传输,形成无线传感器网络+工业以太网(矿难后未破坏段)矿井应急救援通信网络.如图 2 所示.

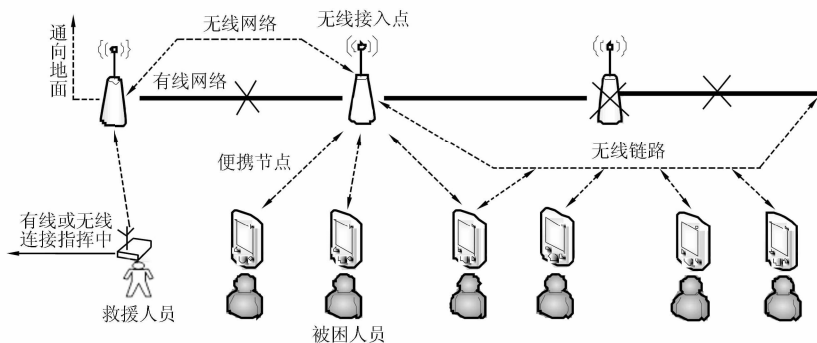


图2 矿难发生后形成的应急救援通信网络

3)节点布设.在有线矿井监控系统骨干网可以延伸到的主巷道区和一些支巷道区,每隔一定距离就布置带有两种网络接口的类似于普通监控分站的无线接入点,基站之间,安置一些固定 WSN 节点,这类节点呈静止状态.采煤区作业面一直在随时间推进,是动态变化区域,有线网络无法铺设,WSN 节点可以直接佩戴在井下人员身上或者安装在移动设备上.在地理位置较复杂的区域或巷道分支处节点布置要较为密集以确保信息正确传输.

### 3 IS-MAC 协议设计

由特殊的矿井应用环境决定,WSN 网络 SINK 节点可以人为布置,无须担心供电问题,所以以下前提条件在实际中可以满足.设定条件如下:

- a)网络中的 SINK 节点能量无限制;
- b)当 SINK 节点广播同步信息(SYNC-WM)时,所有网内节点都可以接收到;
- c)所有网内节点占空比统一,每个节点都有唯一 ID.

IS-MAC 协议针对所设计的矿井监控与应急通信系统需求,在 S-MAC 协议基础上,主要对其进行了以下几点改进.

1)统一时间调度.IS-MAC 协议局部采用统一时间调度,时间调度安排由 SINK 节点发起.时间调度有两种,采用相同调度周期,为低占空比时间帧.调度 1 把时间帧划分为休眠时段和侦听时段;调度 2 时间帧划分为 4 个部分,短睡眠时段、同步监听时段、邻居列表建立时段和数据传输时段.普通节点调度时间帧分配如图 3 所示.

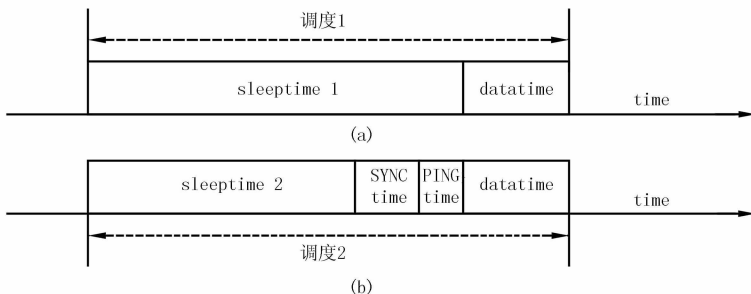


图3 自适应MAC协议的调度结构示意图

SINK 节点主要完成的工作有两个,一是周期性侦听有线通信网络通信状态,二是周期性广播 SYNC-WM 帧,SYNC-WM 帧中携带有节点下次休眠时间,SINK 节点地址和 WSN 网络工作模式标志,SYNC-WM 周期 =  $n \times$  调度 1 周期 + 调度 2 短睡眠时间,每过一个 SYNC-WM 周期,SINK 节点就广播 SYNC-WM 帧.

2) 自适应访问控制机制. 所设计的矿井监控与应急通信系统有两种工作模式,在正常工作模式下,监测的环境参数希望能得到优先发送,人员定位信息则延迟发送;在应急工作模式下,为使救援及时,希望人员定位信息优先发送,环境参数信息则优先级较低.

SINK 节点周期性检查有线通信状态,在下一个发送 SYNC-WM 时间到来时,设置 SYNC-WM 帧内工作状态标志,并广播给簇内节点. 簇内节点接收到 SYNC 信息,依据工作状态标志,动态改变不同优先级数据竞争策略.

高优先级数据,当节点检测到信道空闲,等待 DIFS 时间,进入随机退避时间,退避结束,接入信道;低优先级数据,首先等待一段时间,等待时间结束后,信道空闲,才能进入随机退避时间,退避时间结束,再接入信道. 通过这种自适应控制机制,可以实现优先级高的数据优先传输,优先级低的数据延迟传输,以实现矿井监控与应急通信系统两种工作模式自由切换需求.

在 IS-MAC 协议中,设计有两种窗口,一个是随机退避窗口  $[0, W_{i-1}]$ ,一个是等待时间窗口  $[0, W_{j-1}]$ ,其中

$$W_i = \begin{cases} 2^i, & 4 \leq i \leq m; \\ 2^m, & i > m. \end{cases} \quad (1)$$

$$W_j = \begin{cases} 2^j, & 0 \leq j \leq n; \\ 2^n, & j > n. \end{cases} \quad (2)$$

$W_i$  为第  $i$  次发生碰撞以后选择的随机退避窗口,  $W_j$  为第  $j$  次发送碰撞以后选用的等待时间窗口. 在 IS-MAC 协议中设重传次数为 10 次,  $W_{i\max} = 1024$  则为避免优先级低的数据一直发送不成功,选等待时间窗口  $W_{j\max} = 256$ . 当  $W_j = W_{j\max}$  时,即使数据再次发生碰撞,  $W_j$  窗口也不再变化,仍保持最大值. 数据发送成功或重发次数达到 10 以后,  $W_j, W_i$  返回最小值,  $W_{i\min} = W_{j\min} = 16$ .

上述随机退避时间和等待时间为:  $T = R \cdot S_a$ , (3)

$R$  为竞争窗口  $[0, W_{i-1}]$  或等待窗口  $[0, W_{j-1}]$  内均匀分布的伪随机整数,  $S_a$  为一个时隙时间.

3) 邻居发现. 每当 SYNC-WM 周期到来,SINK 节点就广播 SYNC-WM 帧,簇内节点收到 SYNC-WM 帧后,提取帧内 SINK 节点 ID,调度信息和工作模式信息,若节点收到多个 SYNC-WM,则取距离近的 SINK 节点作为自己的网关节点,且保留其他 SINK 节点信息及调度信息以备应急工作模式时启用. 等到 SYNC-WM 广播时间结束,若侦听到信道空闲,则广播发送 PING 信息帧,PING 信息帧中包含源节点 ID. PING 信息的发送不采用握手/应答机制,通过设置重发 PING 消息次数(重发 PING 消息次数 = 节点平均邻居个数),以保证每个节点都可以成功建立起一跳范围内邻居节点列表. 发送节点一跳范围内的邻居节点接收到 PING 信息,从中提取发送节点 ID,将其与邻居列表中的 ID 比较,若已经有此 ID 则丢弃,若没有,则将其添加到邻居列表,邻居个数加 1. 节点邻居列表包括邻居的 ID 及活动状态  $a_c$ ,及没有接收到邻居节点 PING 信息的次数  $n$ . 若在整个邻居寻找阶段,节点没有接收到邻居列表中已有邻居节点的 PING 信息,则将该节点活动状态标志置零,说明该节点可能处于死亡状态,将  $n$  置 1. 下一次 SYNC 同步时间过后,在邻居列表建立时段,仍没有收到该节点的 PING 信息,则视其死亡,删除该节点信息. 该邻居发现机制,具有较强的适应网络拓扑变化的能力.

4) IS-MAC 协议帧结构. 在 IS-MAC 协议中,用到的信息帧主要有 PING 信息帧、SYNC-WM 同步信息帧、握手应答控制帧 RTS/CTS /ACK、带有优先级标志的数据帧. 各帧采用的格式见图 4~6,其中: Wormode 为工作模式标志,Data Priority 为数据类型,单位为 B.

	2	1	2	8	1	2
type	length	SrcAddr	Sleeptime	Wormode	CRC	

图4 SYNC帧的结构图

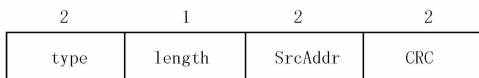


图5 PING消息的格式

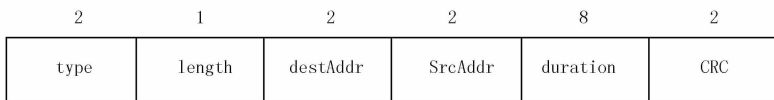


图6 RTS/CTS/ACK的格式

数据帧格式如图 7 所示.

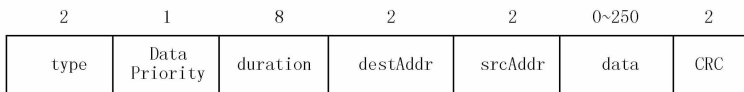


图7 数据帧格式

### 4 MAC 协议性能仿真分析

1)巷道环境. 矿井的 WSN 网络拓扑抽象为两种结构,对于比较宽敞的巷道内 WSN 网络,分布主要呈现线型网络,所以选择一个节点较少的线型网络作为网络的拓扑结构. 选择为 8 个普通节点,一个 SINK 节点. 在 OMNet++ 仿真中设置的主要参数为<sup>[18]</sup>: 发送能耗 0.038 6 W,接收能耗 0.036 82 W,空闲侦听能耗 0.034 42 W,睡眠 0.000 005 W,节点初始化能量 10 J,传输层采用 UDP 模型,网络数据流采用 CBR 模式,节点占空比为 10%,仿真场景大小设为 800 M×100 M,数据包长度为 200 B. 通过控制数据包发送间隔体现网络负载变化.

端到端数据延时分析. 端到端延时是指同一数据帧从源节点出发,到到达目的节点所经历时间,分为排队等待延时,重传延时,传输延时等. S-MAC 两种数据端到端延时仿真结果如图 8 所示,两种类型数据延时都是随着网络负载增加而增加,且延时相差不大. 图 9 是自适应 MAC 协议在普通工作模式时,两种数据端到端延时,  $P_r=0$  为普通数据,  $P_r=1$ , 为人员定位信息数据. 两种数据端到端延时,随着网络负载增加而增加,且网络负载越重,延时相差越大. 图 10 为应急工作模式,两种不同数据端到端延时. 结果与普通工作模式相反. 从结果可以看出,与 S-MAC 相比,IS-MAC 较好地实现了区分优先级,能够实现两种工作模式自动切换.

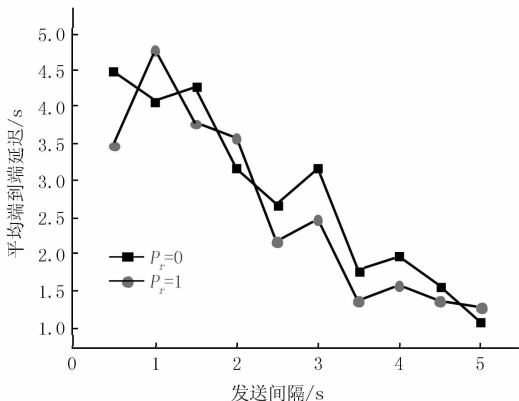


图8 S-MAC不同数据端到端延时

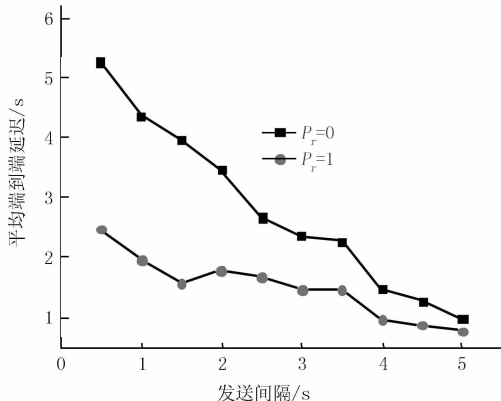


图9 普通工作模式端到端延时

网络生命周期分析. 仿真结果如图 11 所示,从图 11 中可以看到,所设计的 IS-MAC 协议在网络负载较大时,网络生存期明显优于 S-MAC.

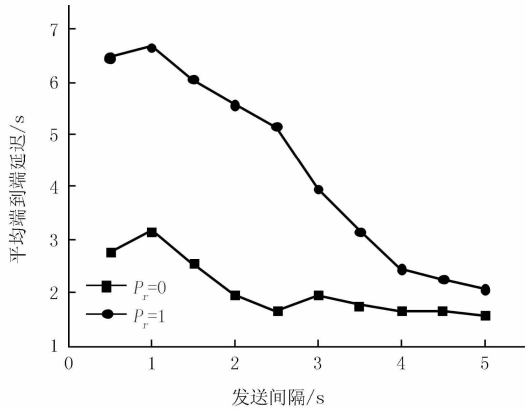


图10 应急工作模式端到端延时

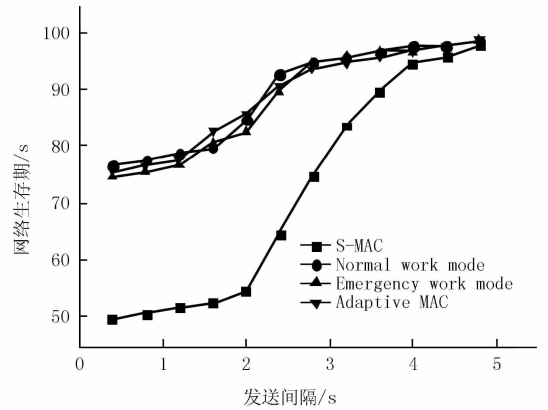


图11 线状拓扑下网络生存期

网络吞吐量分析. 如图 12 所示, S-MAC 采用周期性侦听/睡眠机制, 网络流量大时, 数据会在节点缓存处排队等待发送, 碰撞次数和延迟都比较大, 在网络流量不断加大的情况下吞吐量提高. 普通工作模式, 应急工作模式和采用自适应 MAC 协议时, 网络吞吐量相差不大, 这是因为采用类似的机制. 但是从图 12 中看出, 网络负载较大时, 网络吞吐量比 S-MAC 要好些, 原因是 IS-MAC 协议采用了网内统一调度方式, 减少了数据中转带来的时延, 且在数据传输时考虑了数据优先级, 将不同类型数据分时传送, 减少了碰撞重传; 网络负载较小时, 二者差别很小.

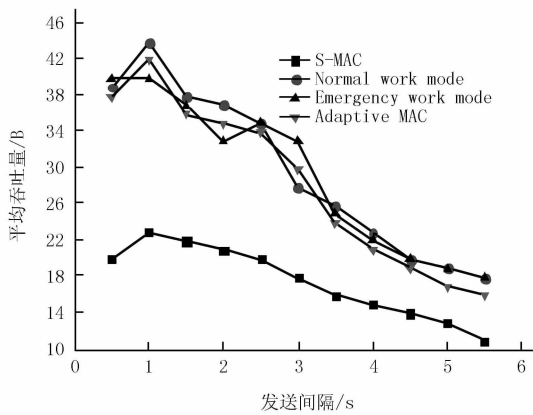


图12 线状拓扑网络吞吐量

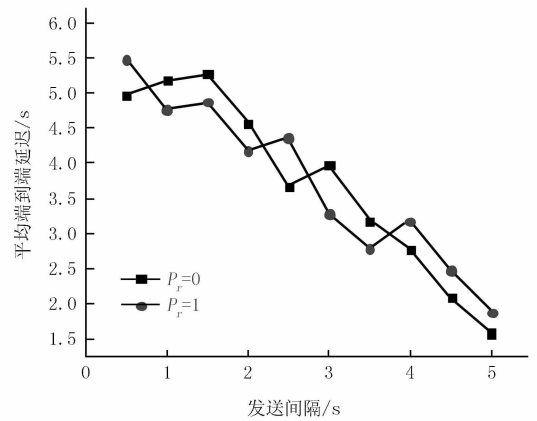


图13 面状拓扑, SMAC协议端到端延时

2) 工作面环境. WSN 网络用于工作面时, 拓扑可以抽象为平面拓扑结构. 选择为 60 个普通节点, 一个 SINK 节点. 仿真设置主要参数同上, 仿真场景大小设为 1000 M×1000 M, 数据包长度为 200 B.

端到端延时分析. 在 S-MAC 中各种类型数据端到端延时, 变化基本一致, 没有大的区别, 如图 13 所示. 但是由图 14、图 15 可知, 与 S-MAC 相比, IS-MAC 协议无论是在应急通信模式还是普通工作模式, 高优先级数据端到端延时, 变化明显不同. 当数据发生速率增加时, 高优先级数据端到端延时比低优先级数据端到端延时增加速度慢得多.

网络生存期比较分析. 从图 16 可以看出, S-MAC 网络生存期随着网络负载增加而缩短, 并且在负载很高和负载很低的范围内, 变化都比较缓慢. 网络负载大时, 待发送数据增加, 发送能耗增大; 数据传输发生碰撞概率也增大, 数据重传能耗也会增加. 和线状拓扑相比, 普通工作模式, 应急工作模式和 IS-MAC 协议网络生存期没有多大差别, 与 S-MAC 相比, 网络生命期有明显改善.

网络吞吐量比较. 从图 17 可以看到, 与线状拓扑结果类似, 在网络负载比较大时和网络负载比较小时, 吞吐量变化都比较缓慢. S-MAC 随着网络负载增加, 网络吞吐量有比较缓慢的提高, 但变化不大. IS-MAC 协议, 因为不同工作模式, 对不同优先级数据, 采用不同竞争机制, 优先级高的数据优先传送, 优先级低的数

据等待一段时间再开始竞争接入信道,这种机制可以在一定程度上减少数据拥塞.所以,与S-MAC相比,随着网络负载增加,网络吞吐量增加速度较快.

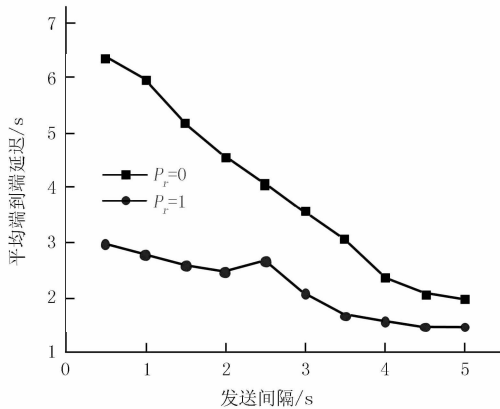


图14 面状拓扑,普通工作模式,端到端延时

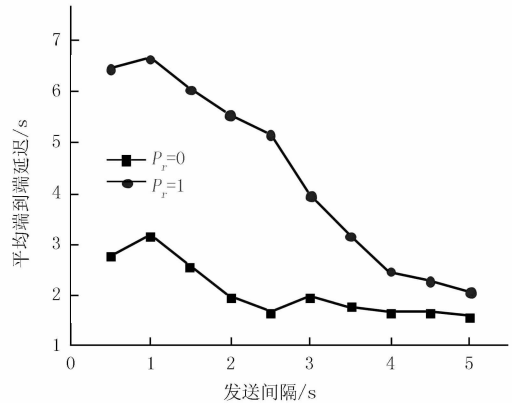


图15 面状拓扑,应急工作模式,端到端延时

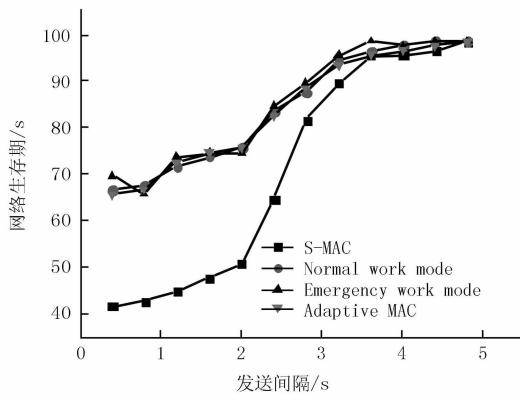


图16 面状拓扑,网络生存期比较

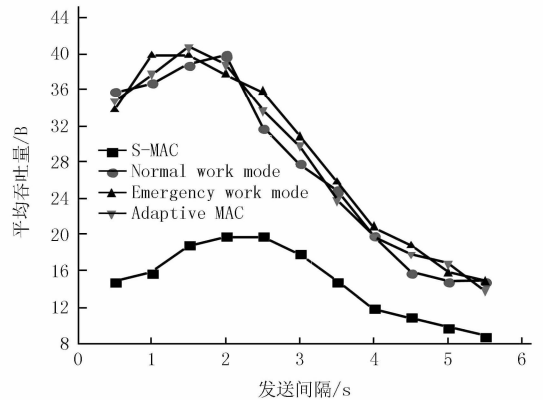


图17 面状拓扑,网络吞吐量比较

## 5 结论

本文设计了基于Ethernet和WSN的矿井监控与应急通信系统,具有经济、可靠、可扩展性好的优点,设计了适用于这种矿山监控与应急通信系统的WSN网络IS-MAC协议,基于系统两种工作模式自动切换的需求,结合能量有效性要求,采用局部统一调度机制,由SINK-WM节点充当簇头,周期性发送SINK-WM调度信息机制;当SINK节点检测到有线中断时,会在下一个SINK-WM的数据域更新工作模式标志,节点自适应改变接入控制策略,优先传送人员定位信息,实现工作模式自动切换.由仿真结果可以看出,与S-MAC相比,IS-MAC协议在延长网络生存期,减少延时,提高网络吞吐量方面都有较好的表现.

## 参考文献

- [1] 李敏. 井下高速率无线数据传输系统的研究[D]. 西安:西安工程大学, 2011.
- [2] 杨士娟. 井下无线通信网络系统研究[D]. 青岛:山东科技大学, 2006.
- [3] 李峰敏. 浅谈煤矿安全生产过程煤矿地质测量的作用[J]. 工业工程与技术, 2014(1):18-26.
- [4] 于喜双. 井下无线应急通信系统研究与分析[J]. 煤炭技术, 2013, 32(8):191.
- [5] IAN F, ZHI S, MEHMET C. Signal propagation techniques for wireless underground communication networks[J]. Physical Communication, 2009, 2(3):167-183.
- [6] LAKSHMANAN M K, NIKOOKAR H. A review of wavelets for digital wireless communication[J]. Wireless Personal Communications, 2006, 37(3/4):387-420.

- [7] LIU Z G, LI C W, WU D C, et. A wireless sensor network based personnel positioning scheme in coal mines with blind areas[J]. *Sensors*, 2010, 10(11):98-91.
- [8] 徐立军, 段友莲. 基于 RFID 与无线传感器网络的矿井安全系统[J]. *微处理机*, 2012(1):35-36.
- [9] TAO J Y, ZHANG Y C. Study on the effect of frequency on conductivity of underground strata in coal mine through-the-earth wireless communication[J]. *Sensors & Transducers*, 2014, 178(9):111-116.
- [10] 赵展. 井下无线通信系统的设计与实现[D]. 西安:西安电子科技大学, 2012.
- [11] 陈存香, 何遵文, 贾建光, 等. Te<sup>2</sup>-MAC:一种无线传感器网络自适应混合 MAC 协议[J]. *通信学报*, 2014, 35(4):91-102.
- [12] 陈德富, 陶正苏, 朱建平. 一种自适应侦听的异步无线传感器网络 MAC 协议[J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(6):1290-1293.
- [13] Sun Y, Du S, Gurewitz O. DW-MAC: a low latency, energy efficient demand-wakeup MAC protocol for wireless sensor networks[C]// *Proceedings of the 9th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*. Hong Kong: MobiHoc, 2008: 53-62.
- [14] Merlin C J, Heinzelman W B. Duty Cycle Control for Low-Power-Listening MAC Protocols[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2010(11):1508-1521.
- [15] Kannan S, Prabal D. An empirical study of low-power wireless[J]. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 2010, 6(2):351-359.
- [16] 黄金科, 樊晓光, 万明, 等. 支持 QoS 的 MANETs 资源预留型 MAC 协议[J]. *系统工程与电子技术*, 2016, 38(4):929-934.
- [17] 卓琨, 张衡阳, 郑博, 等. 一种优先级区分的机载无线网络 MAC 层自适应退避算法[J]. *航空学报*, 2016, 37(4):1281-1291.
- [18] 夏锋. OMnet++ 网络仿真[M], 北京:清华大学出版社, 2013.

## A Self-Adaptive MAC Protocol for Wireless Sensor Network Used for Mine

Li Junxia, Zhang Changsen

(School of Physics & Electronic Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

**Abstract:** During natural disasters, existing mine monitoring and controlling communication systems often fail to get timely information of trapped underground victims in the event of wire communication outage. Besides, the communication ranges of existing emergency communication systems do not cover the victims to be rescued. In view of what has been mentioned above, a new mine monitoring and emergency communication network was designed. Where wire communication outage occurs, the system will wake parts of WSN nodes and form the Ethernet-WSN-Ethernet emergency communication network to secure the smooth information transmission of the trapped underground victims. In line with demands of the mine monitoring and emergency communication system, the IS-MAC (Improved S-MAC) protocol was designed. Also the data frame and control frame with priority identity was designed. The self-adaption access control mechanisms were introduced for automatic switch between different working modes. The simulation results showed that, compared with S-MAC, IS-MAC consumed less energy, prolonged the network lifetime, improved network throughput, did a better job in distinguishing the priority, featured adaptivity, and met demands of the system.

**Keywords:** WSN; MAC Protocol; self-adaptive; access control; priority

[责任编辑 陈留院]