

## IEEE 802.15.4 协议在矿井无线传感器网络中的改进应用

徐文涛<sup>1</sup>, 闫静杰<sup>2</sup>

(1.南京航空航天大学 理学院, 江苏 南京 210016;

2.中国矿业大学 信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221008)

**摘要:**综合分析了无线传感器网络在煤矿井下的研究发展现状, 对无线传感器网络在井下应用的关键问题作了探讨。搭建了无线传感器网络性能分析平台, 设计了3种典型的带状井下无线传感器网络仿真场景。仿真结果证明了改进的有效性与必要性。

**关键词:**无线传感器网络; 矿井; IEEE 802.15.4

中图分类号: TP212

文献标识码: A

## The research and improvement of IEEE 802.15.4 protocol in wireless sensor networks of mine

XU Wen Tao<sup>1</sup>, RUN Jing Jie<sup>2</sup>

(1. College of Science, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2.School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008,China)

**Abstract :** This paper analyzes the development of wireless sensor networks in coal mine, and analysis of key issues for wireless sensor networks used in underground mine. In order to analyze the performance of the IEEE 802.15.4 standard in underground mine, a platform for analyzing wireless sensor network performance is structured, and three typical underground mine simulation scenario of wireless sensor networks are designed. The improvement simulation results prove that the improvement is effective and necessary.

**Key words :** wireless sensor network ; coal mine ; IEEE 802.15.4

煤矿井下是一个特殊的工作环境, 有易燃、易爆可燃性气体和腐蚀性气体, 潮湿、淋水、矿尘大、电网电压波动大、空间狭小、会发生冒顶和片帮事故, 机电设备启动频繁、无线传输损耗大等 (在地面通信距离可达数十千米的对讲机, 在井下通信距离仅有百米)。矿井通信和矿井监控与一般地面通信和工业监控相比, 具有电气防爆、无线传输损耗大、设备体积重量受限、无线电发射功率受限 (本质安全防爆要求)、抗干扰能力强、防护性能好、电源电压波动适应能力强、抗故障能力强、服务半径大 (巷道长达 10 余千米)、信道容量大 (全矿井综合监控与通信) 等特点<sup>[1-2]</sup>。因此, 矿山监测监控与网络系统、矿井通信、矿山信息处理与传输等方面都遇到许多与地面不同的问题, 有许多理论问题和工程实际问题需要研究和解决。这就给通信与监控技术的应用提出了新的课题。

## 1 无线传感器网络在煤矿井下的研究发展现状

目前矿井中无线传感器网络的研究还很少, 大部分的

研究都基于地面系统。参考文献 [3] 探讨了用于土壤中监测的地下无线传感器网络 WUSN (Wireless Underground Sensor Network), 其中针对地下应用指出了其主要挑战来自于信道特性, 例如极端路径丢失、反射/折射、多径衰落等。但是该论文针对的是无线传感器网络在土壤中的情况, 与矿井仍然有很大不同。参考文献 [4] 提出在煤矿井下大巷中利用 WSN 实现煤矿工人的跟踪定位及井下环境监测。中国科技大学在国家发展改革委员会资助下立项研究“基于 CNGI 和 WSN 的矿山井下定位与应急联动系统”, 通过无线传感网络对每个矿工进行实时定位, 期望实现与各种灾害预警系统的联动。2005 年国家自然科学基金重点项目“煤矿瓦斯传感技术和预警信息系统基础理论与关键技术研究”, 拟将无线传感网络引入到煤矿安全监控系统, 实现环境参数的采集、处理和传输。总体来看, 目前无线传感器网络在矿井中的应用仍处于起步阶段, 还有很多工作要做<sup>[5]</sup>。

## 网络与通信 Network and Communication

### 2 IEEE 802.15.4 标准介绍

随着通信技术的迅速发展,人们提出了在人自身附近几米范围之内通信的需求,这样就出现了个人区域网络和无线个人区域网络的概念。1998年3月,IEEE 802.15工作组成立。这个工作组致力于无线个人区域网络的物理层和媒体访问层的标准化工作,目标是为在个人操作空间内相互通信的无线通信设备提供通信标准<sup>[9]</sup>。在IEEE 802.15工作组内有4个任务组,分别制定适合不同应用的标准。这些标准在传输速率、功耗和支持的服务等方面存在差异。

### 3 无线传感器网络性能分析平台和仿真场景

本文选用NS2来仿真无线传感器网络,而无线传感器网络实验平台GAINZ负责实测现实网络的参数,网络模拟软件NS2根据GAINZ测得的参数构建仿真模型与仿真环境,达到尽量逼近真实环境的效果。本文利用仿真平台设计了3种典型的带状井下无线传感器网络仿真场景。

矿井下无线传感器网络的布置明显迥异于地面上传统的无线传感器网络的布置,因为矿井的地形环境与地面上不一样。一般来说,矿井大巷的长度都在几千米甚至几十千米上下,而宽度仅有几米到十几米,井下的无线传感器网络节点大都布置在平行巷道方向上,而在垂直方向上仅需要布置1~2个节点,因此,井下WSN网络节点是一种带状分布、信息流量统计不均衡的网络。本文根据网络中节点的冗余度原则设计了3种典型的带状井下无线传感器网络仿真场景:Line型场景、Meshroof型场景以及Meshchain型场景。

#### 3.1 Line 型场景

Line型场景如图1所示。无线节点的传输距离为 $D$ ,平行巷道中相邻节点的摆放距离不会超过 $D$ ,但也不会小于 $D/2$ 。该场景中节点的冗余度最低,每个节点的信息只能传给传播方向上的相邻节点传播至汇聚节点,一旦传播方向上链路中某个无线节点失效,则失效节点后的链路信息不能上传。例如图1上的节点A的信息只能传给节点B,一旦节点B失效,则节点A以后的链路信息都不能正常传播至汇聚节点。

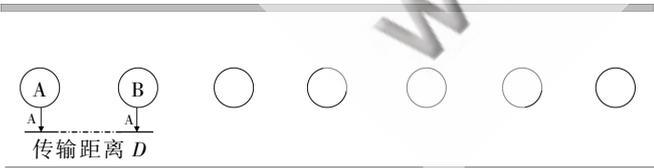


图1 井下Line型仿真场景

#### 3.2 Meshroof 型场景

Meshroof型场景如图2所示。无线节点的传输距离为 $D$ ,平行巷道中相邻节点的摆放距离不会超过 $D$ ,但也不会小于 $D/2$ 。该场景中节点的冗余度为大于等于2,每个节点的信息至少可以传给传播方向上相邻的2个节点中的任意一个至汇聚节点。在Meshroof型场景中,即使传播方向上的相邻节点失效,只要不是传播方向上的相邻2个节

《微型机与应用》2009年第20期

点都失效,则失效节点后的链路信息依然能上传。例如,图2中的节点A的信息既可以传给节点B,也可以传给节点C,只要不是节点B与C同时失效,节点A以后的链路信息都能正常传播至汇聚节点。

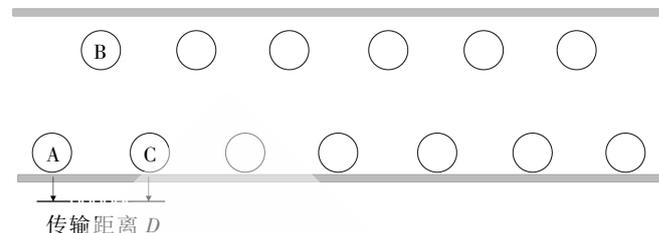


图2 井下Meshroof型仿真场景

#### 3.3 Meshchain 型场景

Meshchain型场景如图3所示。无线节点的传输距离为 $D$ ,平行巷道中相邻节点的摆放距离不会超过 $D$ ,但也不会小于 $D/2$ 。该场景中节点的冗余度为大于等于3,每个节点的信息至少可以传给传播方向上相邻的3个节点中的任意一个至汇聚节点。在Meshchain型场景中,即使传播方向上的相邻节点失效,只要不是传播方向上的相邻3个节点都失效,则失效节点后的链路信息依然能上传。例如图3中的节点A的信息可以传给节点B,也可以传给节点C与D,只要不是节点B、C、D同时失效,则节点A以后的链路信息都能正常传播至汇聚节点。

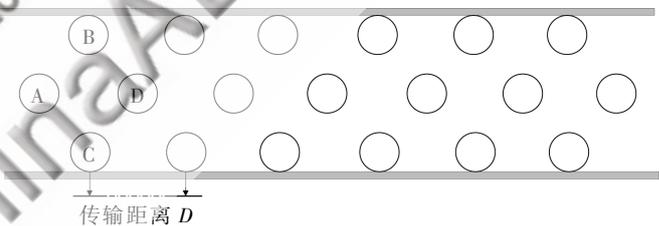


图3 井下Meshchain型仿真场景

## 4 仿真实验结果与讨论

在上述设计的3种场景中,Meshchain场景的冗余度最高,网络结构最复杂,Line场景的冗余度最低,网络结构最简单。本文将在这3种场景中,分别仿真不同节点数的情况下IEEE 802.15.4标准在矿井环境中的丢包率与平均延迟时间的变化。IEEE 802.15.4标准可以工作于信标使能方式或非信标使能方式,信标使能方式使用Slotted CSMA/CA模式,非信标使能方式使用Unslotted CSMA/CA模式,但Slotted CSMA/CA模式只适合于简单星型拓扑网络,扩展性非常差,不适合动则几千米以上的矿井巷道,本文将只仿真使用非信标使能方式的IEEE 802.15.4标准在矿井下的效能。

#### 4.1 平均延迟时间

实验中假设其中传输介质的传输延迟为0,所计算的延迟时间为封包从产生(有封包要被送出)到经过MAC层之后,成功地送出这段时间。式(1)中 $T_r$ 为封包产生的时间, $T_s$ 为成功送出的时间。如果途中有发生碰撞的话

欢迎网上投稿 www.pcachina.com 33

## 网络与通信 Network and Communication

则会因为MAC层中的碰撞算法而延迟发送，而造成大量的时间延迟。

$$\text{延迟时间} = T_s - T_r \quad (1)$$

在本次仿真实验中，比较了在3种场景中矿井内所有节点静止的情况下，相同的设备数量下的平均延迟时间。提供给网络的 Traffic interval 分别从 0.01 s 一直到 1 s，并且节点数为 80，对网络整体的平均延迟时间做观察。实验结果如图 4 所示。

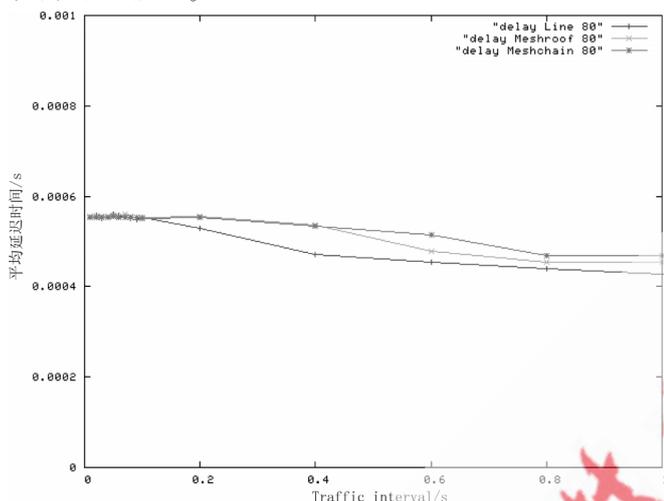


图4 节点数为80的情况下的3种场景的平均延迟时间比较

图4显示了节点数相同的情况下，3种场景下平均延迟时间的比较，可以看到 Meshchain 场景、Meshroof 场景、Line 场景的平均延迟时间依次减小，这主要是因为 Meshchain 场景的冗余度最大、节点摆放密集，所以节点之间发生碰撞的几率非常大，根据 IEEE802.15.4 标准的 CSMA/CA 算法，当节点之间发生碰撞时，数据包的传输需要向后退避随机长度的时间段，因此，在该场景下，数据包的传输延迟由于碰撞引起的随机退避而增大。而 Meshroof 场景与 Line 场景的冗余度依次减小，所以节点发生碰撞的概率依次减小，随机退避的时间也比较少，因此平均延迟时间也依次减小。

### 4.2 丢包率

丢包率是指所有发送出去的封包中，因为链路等原因封包丢失的几率。式(2)中  $S_{failure}$  为所有传送的封包丢失的个数， $S_{dl}$  为网络中所有包的个数， $S_{success}$  为所有成功发送的包的个数。

$$\text{丢包率} = \frac{S_{failure}}{S_{dl}} = \frac{S_{dl} - S_{success}}{S_{dl}} \quad (2)$$

在矿井内所有节点静止的情况下，对3种场景中相同的节点数量下的丢包率作比较。提供给网络的 Traffic interval 分别从 0.01 s 一直到 1 s，节点数量为 80，对网络整体的丢包率做观察。实验结果见图 5 所示。

在仿真实验结果中，可以看到 IEEE 802.15.4 标准在矿井下的丢包率在3种场景中随着 Traffic interval 的增大而减小，在 0.01~0.1 之间丢包率随着 Traffic interval 增大而减

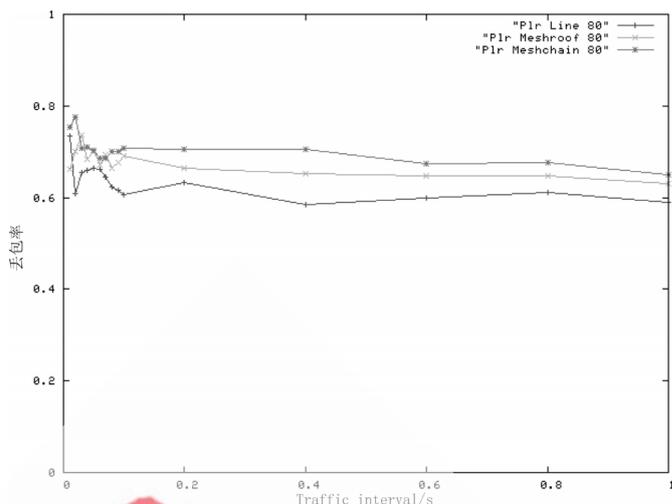


图5 节点数为80的情况下的3种场景的丢包率

小的幅度比较陡，而 0.1 之后丢包率随着 Traffic interval 增大而减小的幅度非常缓，这主要是因为仿真环境中数据包的长度是 70 B，而传输速度是 250 kb/s，则传输时间为 2.24 ms，Traffic interval 在 0.01~0.1 之间，由于 Traffic interval 只稍大于传输时间，大量节点在一个 Traffic interval 中同时传输而产生碰撞丢包的几率比较大，此时随着 Traffic interval 的增大而引起的丢包率明显下降。

### 5 IEEE 802.15.4 的部分改进

从上面的仿真结果可以看出，非信标使能方式的 IEEE 802.15.4 标准 MAC 协议在井下的性能还可以，但丢包率非常高，因此，IEEE 802.15.4 MAC 协议在井下应用首先需要解决可靠性的问题。IEEE802.15.4 MAC 协议可靠性低的原因主要是由于丢包率过高，根据仿真节讨论结果，丢包率较高这主要是因为隐藏终端问题比较突出，为了将 IEEE802.15.4 应用到环境恶劣的井下，笔者在原协议的基础上添加 RTS/CTS 机制来解决隐藏终端问题，提高传输的可靠性。RTS/CTS 机制是指：首先，A 向 B 发送 RTS 信号，表明 A 要向 B 发送若干数据，B 收到 RTS 后，向所有无线节点发出 CTS 信号，表明已准备就绪，A 可以发送，其余基站暂时“按兵不动”，然后，A 向 B 发送数据，最后，B 接收完数据后，即向所有基站广播 ACK 确认帧，这样，所有基站又重新可以平等侦听、竞争信道了。图 6 为添加了 RTS/CTS 机制后 802.15.4 MAC 协议在井下的丢包率对比。

从图 6 明显可以看出添加了 RTS/CTS 机制后，网络的丢包率下降了许多。因此，在原有 IEEE 802.15.4 MAC 协议的基础上添加 RTS/CTS 机制可以有效地解决丢包率过高的问题。

为了在井下实现无线传感器网络，本文综合分析了无线传感器网络在煤矿井下的研究发展现状，由于 IEEE802.15.4 是重要的无线传感器网络国际标准，为了分析 IEEE802.15.4 标准 MAC 协议在井下的性能，构建了无线传感器网络性能分析平台，设计了 3 种典型的带状井下

《微型机与应用》2009 年第 20 期

# 网络与通信

Network and Communication

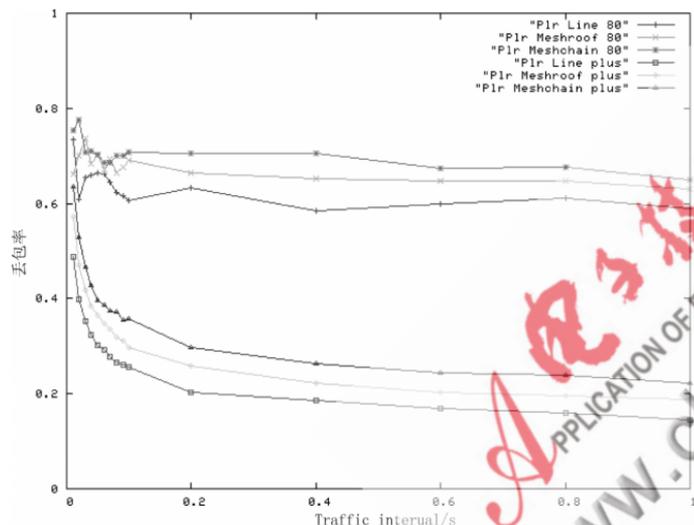


图6 添加了 RTS/CTS 机制后的实验结果

无线传感器网络仿真场景,对平均延迟时间和丢包率做了仿真和比较,给出了仿真实验结果的讨论,并根据讨论结果对 IEEE 802.15.4 标准 MAC 协议作了改进,并将改进后的协议仿真结果与原仿真结果比较,证明了改进的有效性

与必要性。

## 参考文献

- [1] 孙继平.矿井无线传输的特点[J].煤矿设计,1999(4):20-22.
- [2] 孙继平.矿井移动通信系统性能探讨[J].煤矿自动化,1999(1):20-22.
- [3] HAN F A, ERICH P S. Wireless underground sensor networks: Research challenges. Ad Hoc Networks,2006(4):669-686.
- [4] PRADEEP K M. Application of wireless sensor network technology for miner tracking and monitoring hazardous conditions in underground mines. A RFI Response (MSHA RIN 1219-AB44):MSHA,2006.
- [5] AKYILDIZ I F, SU W, SANKARASU B Y. A survey. computer networks[J]. Wireless Sensor Networks;2002, 38(4):393-422.
- [6] 刘晓芳.无线传感器网络路由协议比较研究[D].北京:北京邮电大学电信工程学院,2006.

(收稿日期:2009-05-24)