

一种面向输电线路监测的 WSN 混合式 MAC 协议

林俊如^{1,2} 朱宝晖^{1,2} 王秋石¹ 曾 鹏¹ 于海斌¹

(中国科学院沈阳自动化研究所工业信息学重点实验室 沈阳 110016)¹

(中国科学院研究生院 北京 100039)²

摘 要 考虑到应用于输电线路监测系统中的无线传感器网络在拓扑结构、网络流量上都呈现出新的特点,提出了一种混合式 MAC 协议,即在网络空闲时期使用 X-MAC 协议,在繁忙时期使用流水线式传输调度方法。根据节点的不同角色,使用不同的 X-MAC 参数提高网络的响应实时性,采用流水线式的传输调度解决线状网络中的隐藏终端问题。仿真结果表明,这种协议能够满足网络对实时性和能量有效性的要求。

关键词 无线传感器网络,输电线路监测,MAC 协议

中图法分类号 TP393 **文献标识码** A

Wireless Sensor Networks Hybrid MAC Protocol for Overhead Transmission Line Monitoring

LIN Jun-ru^{1,2} ZHU Bao-hui^{1,2} WANG Qiu-shi¹ ZENG Peng¹ YU Hai-bin¹

(Key Laboratory of Industrial Informatics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)¹

(Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)²

Abstract Considering the new feature of wireless sensor network applying to the overhead transmission line monitoring in topology and network traffic, a hybrid MAC protocol was proposed. The protocol adopts X-MAC during idle period and pipelined transmission during busy period. It uses different X-MAC parameters according to node's role to improve real-time performance and pipelined transmission to resolve the hidden terminal problem. Simulation results show that the protocol can meet the network's requirement of real-time and energy efficient.

Keywords Wireless sensor networks, Overhead transmission line monitoring, MAC protocol

1 引言

随着电网规模的不断扩大,输电线路越来越分散和难于维护,目前常采用定期人工巡视、直升机巡视、巡线机器人等方式来对其进行维护,但这些方式成本高、劳动强度大,同时无法实现全天候在线监测。利用传统的传感器与通信技术来建立覆盖电网的在线监控系统,代价非常高昂^[1]。无线传感器网络具有能工作于恶劣环境,大面积覆盖,错误容忍,高监控精度,自配置、自组织以及低成本的优势^[2],在大规模输电线路监测系统中具有很大的应用潜力。

在输电线路监测上,使用无线传感器网络对 MAC 协议提出了新的挑战:首先,应用拓扑结构上的特殊性使隐藏终端等无线通信的问题更为突出;其次,应用中的不同时期网络流量存在巨大差异,需要 MAC 协议能够自适应这种变化;再次,电网的 SCADA 系统的周期在 4~8s^[3],整个监测系统对网络的实时性也提出了相应的要求;最后,虽然在输电线上取

电技术取得了一定的进展,但现有的传感器电源一般都是基于高能锂电池,太阳能电池节能依然是 MAC 协议必须考虑的问题,针对这些问题,我们做了如下工作。

1) 在网络流量稀少时,采用了 X-MAC 来节省能量并且不同角色的节点采用不同 MAC 参数来均衡网络的实时性和能量有效性。

2) 在网络繁忙时,采用流水线式传输协议来应对隐藏终端问题。

3) 对前面两种方法进行了仿真验证,结果表明,在网络流量稀少时,下行数据平均延迟小于 2s,并且上行数据平均延迟小于 1s,能够满足系统的实时性要求;采用流水线式传输协议后 MAC 层重传次数仅为发送次数的 0.01%。

本文首先介绍了相关的研究工作,其次分析了输电线路监测应用中的网络模型;随后给出了 MAC 协议并进行了仿真验证;最后总结了相关工作和描述了将来的工作方向。

到稿日期:2011-11-10 返修日期:2012-03-01 本文受国家自然科学基金(60704046,60725312,60804067),国家科技重大专项基金资助项目(2010ZX03006-005-01),973 计划前期研究专项课题(2010CB334705),中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KGCX2-EW-104, KGCX2-YW-126)资助。

林俊如(1986—),男,博士生,主要研究方向为无线传感器网络、嵌入式系统等, E-mail: linjunru@sia.cn; 朱宝晖(1986—),男,硕士生,主要研究方向为无线传感器网络、智能电网等; 王秋石(1984—),男,助理研究员,主要研究方向为智能电网; 曾 鹏(1976—),男,研究员,博士生导师,主要研究方向为无线传感器网络、工业无线传感器网络等; 于海斌(1964—),男,研究员,博士生导师,主要研究方向为现场总线、工业无线通信、传感器网络及嵌入式系统等。

2 相关工作

无线传感器技术在近年来得到了快速的发展,其应用也越来越广泛。许多应用场景的物理架构要求将无线传感器网络布置为线状或者带状,如下水道监测、铁路/地铁监测、边境监测及输电线路的监测^[4]。随着应用的增多,线状网络也得到了国内外研究者越来越多的关注,现有的工作特别是针对线性网络的在网络层开展的比较多^[5,6]。在线状网络的MAC层研究方面,文献^[7]针对线性网络中突发流量导致网络传输碰撞加剧进而带来可靠性与实时性的问题,提出了一个基于随机信道接入的方法,即通过存在数据的节点以概率(attempt probability)决定是否发送数据的方法来提高数据收集过程中每条链路的单跳报文传输的可靠性。文献^[8]提出了具有方向调度的MAC协议,其在线性拓扑结构中带宽利用率能够达到50%,但要求每个节点都配备有向天线。文献^[9]根据线状拓扑结构和端到端流量的特点,提出了一个基于TDMA的具有同步性和确定性的MAC协议(WiWi),但这种方法仅适用于瘦一层线状传感器网络(Thin one-level LSNs^[4]),并且应用场景网络中间节点不主动产生数据,因此,将该方法应用到具有其它流量特征的应用中,性能无法得到保证。

3 网络模型

在输电线路监测的应用中传感器网络有基本传感器节点(BSN, Basic Sensor Node)和增强型转发节点(ERN, Enhanced Relay Node)两类,其中 BRN 节点有对输电线路相关参数检测的感知功能和短距无线通信功能,而 ERN 节点不仅包括基于短距离无线通信功能也包括基于 GSM, GPRS, UMTS 等技术的远程无线通信功能,它用于直接将收集到的数据发送给控制中心。由于传感器大部分部署在塔杆上或者绝缘子连接处只有极少部分部署在输电线上(如舞动传感器),因此整个网络拓扑结构上如图1所示,它的分布具有线状(带状)特点,并且局部密集,在每个塔杆上形成一个密集簇。

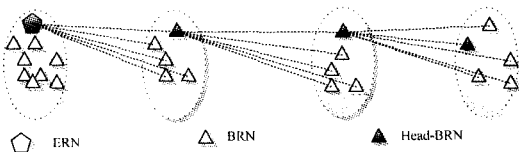


图1 面向输电线路监测的网络拓扑

在输电线路监测的应用中,网络中存在两种类型的数据,第一种是周期性数据,它是由整个在线监测系统以大约15~30分钟周期性地采集网络中的传感器数据产生的。第二种是非周期性数据,这类数据在系统的工作过程中非常稀少,它主要是由报警、网络控制、系统查询、配置等数据构成。两种数据的产生方式导致了网络运行周期可以分为两部分,第一部分为繁忙时期,它从在线监测系统周期性采样开始,系统中所有传感器数据采样都传输到ERN节点为止的这一段时期称为繁忙时期,繁忙时期持续时间相对较短,但这段时期网络流量较大。第二部分为空闲时期,它是在线监测系统一个工作周期中除去繁忙时期剩下的那段时期。空闲时期在整个监测系统工作周期中占有很大比例,持续时间相对较长,同时数

据量小。图2为一个ERN节点在单位时间内(5秒)接收到的数据的统计,它也反映了输电线路监测流量的规律性。

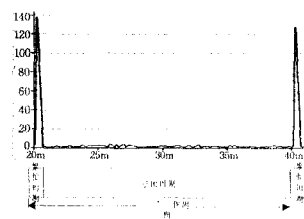


图2 输电线路监测工作周期

4 面向输电线路监测的混合型MAC协议

在输电线路监测的应用中,由于其特殊性,在进行MAC协议设计时需要解决以下几个问题。

1. MAC协议如何在实现节能的同时自适应网络的流量?

在面向输电线路监测的应用中,网络空闲时期和繁忙时期网络流量存在巨大差异。这种情况下难于设计一个统一的MAC协议在两种状态下都能保持低能耗和较高的实时性。

2. 线状网络中的隐藏终端问题如何解决?

在上文中提到面向输电线路监测应用中的传感器网络拓扑结构呈线型并且局部密集,两个密集簇之间相距约为400米(相邻两个塔杆之间的距离),同时为了节省能量,传感器节点采用的发射功率的传输范围应该只覆盖相邻塔杆,这就导致在繁忙时期,网络中存在大量数据时易出现隐藏终端的问题。如图3所示,当节点A正在向节点B发送数据时,C节点无法感知节点AB之间的传输,若此时节点向节点B或者节点C发送数据,将会在节点B处产生碰撞从而产生隐藏终端的问题。RTS/CTS机制能够解决隐藏终端问题,在输电线路监测中数据报文非常短小(每次传感器采样产生2~8字节的数据),采用RTS/CTS开销大,不宜采用,因此我们在设计MAC协议时需要采用开销较小的方案来避免出现隐藏终端的问题。

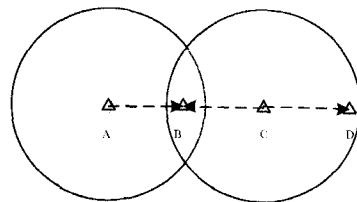


图3 线性网络中的隐藏终端问题

3. 能否根据节点的不同角色进行调整,使节能与实时性之间达到平衡?

在网络层协议中为了均衡网络中各节点之间的能量消耗,在每一个密集簇中定义了簇首,普通簇成员有两种不同角色节点,两者对网络性能的影响不同。簇首是网络中很多报文的中转节点,MAC接入延时将会在报文的传递过程中累加,若延时较大将显著增加网络的端到端延时,影响网络的性能。而普通簇成员的MAC接入延时将只会影响自己接收的报文延时,不会对其它簇成员产生影响。因此在MAC协议设计时需要考虑各节点角色的特点,使节能与实时性之间实现平衡。

为了解决上述问题,我们在网络空闲时期所有节点都采用X-MAC接入机制,并且通过簇首节点和簇成员节点采用

不同的 MAC 参数,使簇首节点能够更及时地响应请求,从而在节省能量的同时满足系统对网络实时性的要求。在繁忙时期采用了流水线式的调度传输方法来解决隐藏终端问题。通过网络不同时段采用不同的 MAC 层接入策略,使得在繁忙时期尽可能地提高吞吐量,在空闲时期尽可能地节省能量消耗并满足网络的实时性要求。

4.1 空闲时期—X-MAC

为了在节能的同时满足网络的实时性节点,需要周期性地唤醒侦听信道,当采用基于同步的 MAC 协议时,发送方仅需要较短的时间来发送前导码报文即可唤醒接收节点启动数据传输,但是基于同步的 MAC 协议需要在各节点间传递调度信息,如 SMAC^[10],TMAC^[11]需要每隔 15 秒发送一个同步报文,这将导致很高的能量消耗^[12]。而在面向输电线路在线监测的情景中,由于空闲时期网络中传输的报文非常少,这种情况下使用同步的 MAC 协议控制开销过大,而且实现相对复杂,尽管非同步的 MAC duty cycle 协议将同步的负担转移给了发送者,发送者需要发送较长的前导码来唤醒相应的节点,但鉴于空闲时期报文传输非常少,我们选择了非同步的 MAC 协议—X-MAC^[13]。

X-MAC 是一种基于非同步 duty cycle 方法的 MAC 协议。整个过程如图 4 所示。具体地,X-MAC 的工作过程可以描述如下:

1. 开始时,每个节点都按一定的 duty cycle 周期性休眠和唤醒,当某个节点收到上层来的数据时,它就被唤醒,先在信道上发送包含有目标节点地址信息的前导码报文(Preamble),然后等待来自目的节点的确认响应(ACK),重复此过程直到收到 ACK 响应,随后启动数据传输;
2. 目标节点处于唤醒周期(waken up period)时,它收到包含其地址信息的 Preamble 报文后,就发出 ACK 响应,以通知发送节点可以进行数据传输;
3. 如果非目标节点在唤醒周期接收到此前导码,前导码中包含的地址信息与它自身的地址信息不相符,不发送 ACK 响应,然后进入休眠状态。

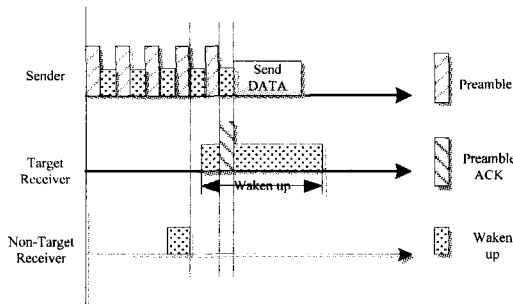


图 4 X-MAC 工作示意图

X-MAC 在前导码中嵌入目的地址信息,相对于使用前导码的 MAC 协议,使非目的接收端在接收前导码后不必保持唤醒状态,防止了串音问题。通过前导码 ACK 响应使得目的接收端中止发送端大量前导码的发送,既节省了发送端的能量也提高了数据传输的实时性,同时 X-MAC 的前导码发送可以很好地用 CC2420 等 packet radio 实现。

X-MAC 协议的实时性能很大程度上决定于接收方的 duty cycle,当节点的 duty cycle 较短时,节点能够以较短的周期唤

醒侦听信道从而及时响应网络请求。我们的应用场景中,空闲时期信道上要传输的数据量很小且较稀疏,故节点的 duty cycle 周期可设置比较长(500ms)。另一方面,我们的簇首节点设置了相对较短的 duty cycle。由于在面向输电线路监测的线状网络中,各簇首节点负责转发数据,数据在簇首的停留时间占整个端到端延时的主体,因此提高各簇首节点的响应速度将能够极大地提高网络的实时性。我们将网络中的簇首节点采用比普通簇成员更短的 duty cycle 来保证实时性,而普通簇成员采用较长的 duty cycle 来降低能耗。

4.2 繁忙时期—流水线式传输调度

面向输电线路监测的网络在拓扑上具有线状、局部密集的特性,特别是繁忙时期网络中的数据流量大大增加,产生隐藏终端的可能性很大。为了解决这个问题,我们使用了改进流水线式的传输调度方式在原流水线式(pipelined)传输^[14]以避免网络碰撞,并在尽可能提高网络传输并行性的基础上增加了基于命名的时隙分配方法来解决簇内数据的竞争问题。繁忙时期整个 MAC 协议包括以下 2 个阶段:

1. 簇内收集阶段。如图 5 所示,在每个时隙内,网络中一部分簇的簇首收集其后继簇所有簇成员的传感数据。从图中可以看出,在整个系统中只需要 3 个时隙即可将网络传输调度开,保证正在进行数据传输的簇的相邻簇不会同时发送数据,从而规避了隐藏终端的发生。进行数据收集时簇内数据都需要发送,为了解决它们之间的碰撞,我们首先将时隙二次划分成多个小时隙,各节点在加入网络时会分得相应的簇内地址 $addr \in [1, N]$,其中 N 为簇内成员的数目,节点根据自身的 $addr$ 选择相应的小时隙来进行数据发送,而我们的地址命名算法保证了同一个簇内所有节点 $addr$ 不相同,因此能够保证它们之间不会产生碰撞。

2. 数据转发阶段。数据转发阶段所有的工作都是由簇首完成的。同样为了规避隐藏终端问题,与上一个阶段不同的地方在于,在簇内收集阶段,每个时隙被划分为多个小时隙并分配给一个簇内的节点,但在数据转发阶段,每个时隙不再进一步划分,仅分配给某一个簇首,簇首可在此时隙连续发送多个数据包。此阶段的时隙分配仅需要 3 个时隙组成的超帧即可使正在进行数据传输的簇首的相邻簇不会同时发送数据,从而解决了隐藏终端的问题。

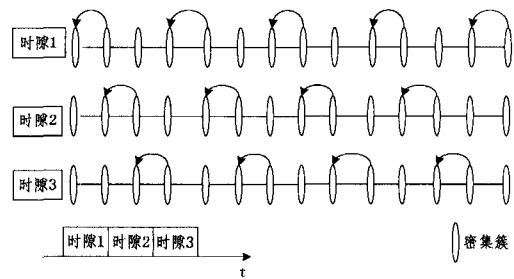


图 5 簇内数据收集阶段的流水线式传输

5 性能仿真

在仿真过程中采用仿真软件 OPNET 搭建仿真平台,仿真场景区域为 $L=4000m, W=40m$,ERN 节点(即数据收集节点)位于矩形左边界,整个区域内大致均匀分布着 11 个密集簇(模拟 11 个塔杆),每个密集簇内均有 6 个传感器节点,

整个网络部署有 66 个节点。节点能量消耗模型是建立在实验室研制的节点模块 SiA2455 基础上的,模块 SiA2455 主要由控制器 MSP430 与射频模块 cc2420 构成。在射频发送时,信号经过功率放大器来延长节点的收发距离,它的通信距离在室外可达 600m,能够满足输电线路在线监测的应用需求。模块的能量消耗参数及仿真时能量仿真模块采用的参数如表 1 所列。网络中的传感数据长度均设为 20bytes。

表 1 模块及仿真的能耗参数

	发射电流	接收电流	休眠电流	工作电压
SiA2445 参数	85mA@3.3V, +12dBm	20mA@3.3V	<8uA	2.8~3.6V
仿真采用参数	85mA	20mA	8uA	3.3V

5.1 空闲时期 MAC 协议性能仿真

空闲时期 MAC 协议主要是为了在网络流量稀少的情况下降低能耗,但又能满足应用对系统实时性的要求,因此在仿真时主要比较两个性能指标:节点的能量消耗和端到端延时。实验中采用了 4 组对比协议:数据请求周期分别为 5s,10s 的 Zigbee 非信标模式下的 MAC 协议,全部节点 duty cycle 为 200ms 的 X-MAC 协议,及簇首节点 duty cycle 为 200ms、普通簇成员 duty cycle 为 500ms 的 X-MAC 协议。为了模拟网络流量,在仿真时分别在第 1 跳和第 11 跳的簇中选择两个节点,均以 Poisson 分布、平均每 60s 产生一个目的地址为对方簇中簇成员的报文。仿真结果如图 6—图 8 所示。

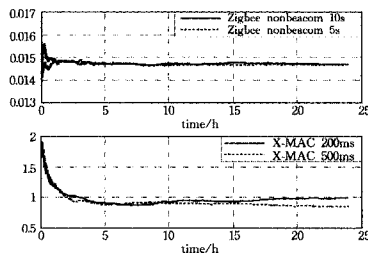


图 6 上行数据传输延迟

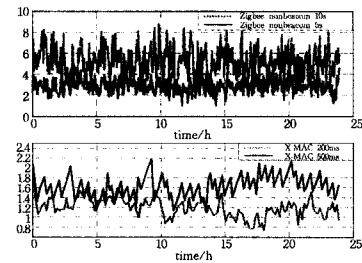


图 7 下行数据传输延迟

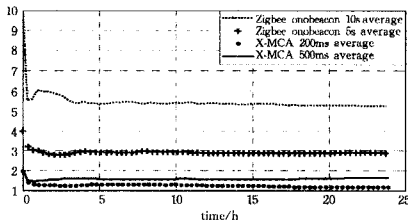


图 8 下行数据传输平均延迟

在图 7、图 8 中为了使图形更具辨识度,都对仿真数据做了均匀采样处理。图 7 中还对 Zigbee 非信标模式的非 average 的数据做了窗口长度为 300s 的 window-average 平滑操作。图 7 示出数据汇聚节点到端节点的下行数据的端到端延

时。从图中可以看出 Zigbee 的非信标模式的端到端延时主要由端节点的数据请求周期决定,网络中数据非常稀少,几乎不可能发生传输碰撞。由于簇首节点转发造成的延时非常小,网络的平均延时约为端节点数据请求周期的 1/2,在采用 X-MAC 后,相比 Zigbee 的非信标模式,网络实时性得到了大大的提高。在普通簇成员采用 500ms 的 duty cycle 时,与 5s 数据请求周期的 Zigbee 非信标模式相比,延时依然降低了 42.9%,并且因为整个延时较平均地分布在各个节点的转发延时上,所以其延时抖动相对较小。从数据中可以看出采用 X-MAC 后,延时最大仅为 2.5s(Zigbee 非信标模式延时最大值数据请求周期为 10s 时为 9.976s,5s 时为 4.975s),能够满足系统对网络实时性 4~8s 的要求。

在上行数据的端到端延时(见图 6)中,由于 Zigbee 的非信标模式中路由一直处于唤醒状态,因此其延时非常小,而在采用 X-MAC 的协议中,由于簇首节点也会进行休眠,以达到节能的目的,因此与之相比有稍大的延时,但其延时完全在系统允许的范围。

在能量消耗方面,Zigbee 非信标模式中的路由节点的工作模式往往需要有稳定的电源供应,不适合用于输电线路监测。图 9 给出的是端节点的能量消耗情况,可以看出采用 X-MAC 协议后设备的能量消耗能够和非信标模式的端节点能量消耗维持在同一水平,特别是当 X-MAC 非簇首节点采用 500ms 的 duty cycle 时其能量消耗比数据请求周期为 10s 的 Zigbee 非信标模式低 24.1%,比采用 200ms 的 duty cycle 的 X-MAC 的能耗降低了 49.4%。

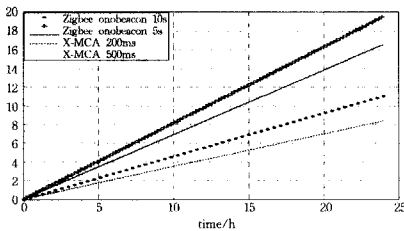


图 9 空闲时期非簇首节点的能量消耗

综上所述,采用 X-MAC 能够很好地在网络流量稀少的情况下实现网络延时小于 4~8s,同时保持较低能耗,并且通过簇首节点和其它簇成员采用不同的 duty cycle 能够在牺牲较少实时性代价的前提下进一步节省能量,以满足输电线路监测的应用需求。

5.2 繁忙时期-流水线式调度性能仿真

繁忙时期采用流水线式的传输方式来应对输电线路监测应用中由于拓扑结构网络流量的特征导致的隐藏终端的问题。为了模拟这种情况,仿真时使用了理想的无线信道模型,通过网络中的节点在大致相等的时刻产生传感数据来模拟繁忙时期的网络流量。为了验证流水线式调度解决隐藏终端问题的有效性,采用了数据重传次数作为指标。其中数据重传次数为所有节点在 MAC 层进行数据重传次数的总和。我们采用了原始的 IEEE 802.15.4 非时隙 CSMA/CA 机制来进行对比。整个仿真过程进行了 144 轮(24 小时)。实验结果如下:图 10 为整个实验过程的结果,图 11 为在某一轮中 802.15.4 时网络的重传情况。

(下转第 59 页)

- [29] Chang J, Venkatasubramanian K K, West A G, et al. AS-TRUST: a trust characterization scheme for autonomous systems in BGP[R]. MS-CIS-10-25. University of Pennsylvania, 2010
- [30] Short-Lived Prefix Hijacking on the Internet[EB/OL]. <http://www.nanog.org/mtg-0602/pdf/boothe.pdf>
- [31] Ratul M, David W, Tom A. Understanding BGP misconfigura-

tion[C]// ACM SIGCOMM. Pittsburgh. Pennsylvania, USA, ACM, 2002; 3-16

- [32] Josang A, Ismail R. The beta reputation system[C]// the 15th Bled Electronic Commerce Conference. Bled, 2002; 1-14
- [33] RouteViews [EB/OL]. <http://www.routeviews.org/>
- [34] The SSFNET Project[EB/OL]. <http://www.ssfnet.org>
- [35] BRITE topology generator[EB/OL]. <http://www.cs.bu.edu/brite/>

(上接第 50 页)

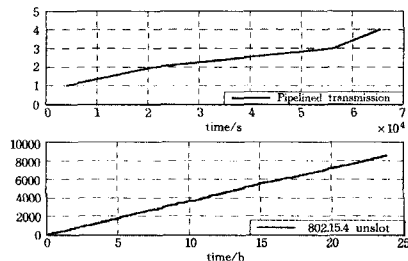


图 10 mac 层重传次数

从图 11 中可以看出,采用 IEEE 802.15.4 非时隙 CSMA/CA 平均每轮需要进行约 60 次重传,而采用流水线式的传输方式通过在时间上规避竞争及隐藏终端,在整个过程中(共 47520 次有效传输)只使用了 4 次重传,验证流水线式的传输方式能够极大地改善输电线路监测应用中的隐藏终端。

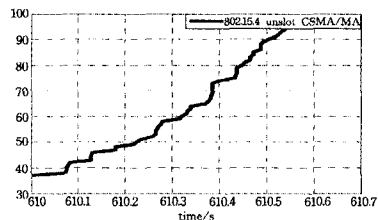


图 11 某一轮数据收集时 mac 层重传次数的情况

结束语 本文首先分析在面向输电线路在线监测应用中部署无线传感器网络对通信的需求,以及由于应用的特殊性给无线传感器网络带来的特点,根据这些特点提出了一系列的传输协议来优化传输性能并解决这些特点带来的问题(如隐藏终端)。在 MAC 层,为了应对应用中网络流量在不同时期呈现不同特征,采用了一种混合的 MAC 协议;在空闲时期采用基于 X-MAC 的 MAC 协议,并且不同角色的节点采用不同的 MAC 参数来节省能量,以满足一定网络实时性的要求;在繁忙时期采用了流水线式的传输调度方法来解决隐藏终端的问题。仿真结果表明这些方法都达到了其设计要求。在未来的工作中,还将在此基础上研究无线传感器网络针对舞动传感器、网络 trace back 数据等大流量数据的实时高效传输。

参 考 文 献

- [1] Yi Y, Lambert F, Divan D. A Survey on Technologies for Implementing Sensor Networks for Power Delivery Systems[C]// Power Engineering Society General Meeting. Florida USA, 2007; 1-8
- [2] Gungor V C, Lambert F C. A survey on communication net-

works for electric system automation[J]. Comput. Netw., 2006, 50(7): 877-897

- [3] Leon R A, Vittal V, Manimaran G. Application of Sensor Network for Secure Electric Energy Infrastructure[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(2): 1021-1028
- [4] Jawhar I, Mohamed N, Agrawal D P. Linear wireless sensor networks: Classification and applications[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2011, 34(5): 1671-1682
- [5] 程真, 李腊元, 杨少华, 等. 基于带状区域路由的无线传感器网络 QoS 协议[J]. 计算机科学, 2010, 37(2): 4
- [6] 吴华君, 张自力, 李卫. 一种适用于煤矿井下无线传感网的能量均衡路由协议[J]. 计算机科学, 2011, 38(4): 146-150
- [7] Zhang H, Shen H, Tian H. Reliable and real-time data gathering in multi-hop linear wireless sensor networks[J]. Wireless Algorithms, Systems, and Applications, 2006; 151-162
- [8] Karveli T, Voulgaris K, Ghavami M, et al. A Collision-Free Scheduling Scheme for Sensor Networks Arranged in Linear Topologies and Using Directional Antennas[C]// Sensor Technologies and Applications, 2008. SENSORCOMM '08. Second International Conference. 2008; 18-22
- [9] De Caneva D, Montessoro P L. A Synchronous and Deterministic MAC Protocol for Wireless Communications on Linear Topologies[J]. Int'l J. of Communications, Network and System Sciences, 2010, 3(12): 925-933
- [10] Wei Y, Heidemann J, Estrin D. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks[C]// INFOCOM 2002. Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE, 2002, 3: 1567-1576
- [11] Dam T V, Langendoen K. An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks[C]// Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. Los Angeles, California, USA, 2003; 171-180
- [12] Ganeriwal S, Tsigkogiannis I, Shim H, et al. Estimating clock uncertainty for efficient duty-cycling in sensor networks[J]. IEEE/ACM Trans. Netw., 2009, 17(3): 843-856
- [13] Buettner M, Yee G V, Anderson E, et al. X-MAC: a short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless sensor networks [C]// Proceedings of the 4th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. Boulder, Colorado, USA, 2006; 307-320
- [14] Pakzad S N, Fennes G L, Kim S, et al. Design and implementation of scalable wireless sensor network for structural monitoring[J]. Journal of infrastructure systems, 2008, 14(89)