

基于 UWB 的工业无线监控网络 MAC 协议设计

曾 文^{1,2}, 王 宏¹, 徐皓冬¹

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳 110016; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要: 将超宽带技术应用于工业无线网络, 分析基于脉冲的超宽带技术特点——低复杂度、低功耗、低成本、抗多径衰落、抗干扰、定位性好。讨论 MAC 层协议的同步和定位性这 2 个关键问题, 提出 MAC 层的设计思想和解决方案。仿真实验表明了该方案的正确性。

关键词: 工业无线监控网络; 超宽带; 媒体访问控制层; 同步; 定位

MAC Protocol Design Based on UWB Industrial Wireless Monitoring Network

ZENG Wen^{1,2}, WANG Hong¹, XU Ai-dong¹

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

【Abstract】 This paper applies ultra wideband technology to industrial wireless monitoring network, analyzes characteristics of impulse-radio-based ultra wideband technology, such as low complexity and low cost. It is resistant to severe multi-path and jamming, and has good positioning. Synchronization and positioning problems are discussed, and key ideas and solutions are proposed for Media Access Control(MAC) protocol. Simulations show validity of the solutions.

【Key words】 industrial wireless monitoring network; Ultra Wide Band(UWB); Media Access Control(MAC) layer; synchronization; positioning

无线通信技术存在多种不同的通信技术标准, 最热门的无线技术标准有: GPRS/GSM, 无线局域网(WLAN), 蓝牙(Bluetooth), ZigBee 标准等, 这些传统的载波无线通信技术已经在工业监控网络系统中得到应用, 但也存在诸如能耗、多径衰落、噪音/干扰、工作距离等方面的问题, 这些问题使工业监控网络系统的实时性和可靠性难以保证。UWB 是近年来发展十分迅速的一种通信方式。与其他无线通信技术相比, UWB 技术具有低功耗、低成本特点; 多径分辨率能力极高; 高达厘米级的定位精度; 传输速率快; 带宽宽和天然的安全性等优势。因此, UWB 技术能够解决传统正弦载波通信无线电技术难以解决的问题。

1 研究现状

到目前为止, 关于 UWB 系统的研究大都致力于解决物理层的传输问题, MAC 层的研究仍处于起步阶段。而基于 UWB 技术的工业无线监控网络的 MAC 层设计则是一个崭新的研究方向。

通过对 UWB 技术的物理层研究, 可以发现 UWB 技术本身所独有的特性, 其适合于工业无线监控网络, 由此产生了基于 UWB 技术的工业无线监控网络, 使用的协议有: ALOHA, CSMA, TDMA 等。

文献[1-3]分别从不同的角度分析和阐述基于 UWB 的 MAC 层方面的最新研究成果, 但它们都不是针对工业无线监控网络这一特殊应用而提出的。工业无线监控网络相对于其他无线网络, 更关注的是数据传输的实时性, 以及在恶劣的工业环境下数据传输的完整性和可靠性。研究和解决 UWB 技术对工业无线监控网络的协议设计带来的影响, 并设计能够同时满足工业无线通信需求的相关协议是本文的目的。

2 MAC 层协议设计中的关键问题

2.1 同步性

在无线网络系统中, 单个节点的能力非常有限, 整个系统所要实现的功能需要网络内所有节点相互配合共同完成。时间同步在无线网络系统中起着非常重要的作用。由于 UWB 技术使用皮秒级的脉冲, 因此发射机和接收机之间取得同步比特的时间相当长, 大约达到几毫秒。与窄带系统的微秒级的信道获取时间相比, 这是超宽带系统的一个缺点, 该缺点在一个无线多路接入环境中将严重影响媒体访问控制协议的执行。

分析和仿真表明: 即使脉冲级的跟踪偏差只有脉冲的 1/10(相对较小的时间抖动), 也会导致吞吐量的明显降低和传输延迟的增加, 这对实时性要求极高的工业无线监控网络来说是难以想象的。因此, 在 MAC 层的设计上考虑影响网络运行的获取时间非常重要。而且使用已有的针对窄带无线系统的 MAC 层协议, 对于基于 UWB 技术的工业无线监控网络显然是不适宜的。

2.2 定位性

按照传统的分层设计方法, 在 MAC 层执行的功能不必考虑物理层。但是一个有效的 MAC 层的设计常常需要对物理层的知识有准确的了解。由于 UWB 技术具有较高的时间分辨率和较强的穿透材料的能力, 因此理论上可以达到厘米级的测

基金项目: 国家“863”计划基金资助项目(2004AA412020)

作者简介: 曾文(1973-), 女, 博士研究生, 主研方向: 工业无线通信, 超宽带技术; 王宏, 研究员、博士生导师; 徐皓冬, 研究员

收稿日期: 2007-06-02 **E-mail:** zengwen@sia.cn

距精度,完全能够满足精确定位的需求^[4]。这种良好的性能为MAC层协议的设计提供了很好的支撑。同时定位性在工业无线监控网络系统中的地位也相当重要,在工业无线监控网络的通信过程中,无线通信节点实时采集所需信息,并以多跳中继的方式传送到用户的终端,节点所采集到的数据必须结合其位置信息才有意义;节点自身的定位性还可以在恶劣的工业环境下,解决不易维护节点的节约能耗等方面发挥作用。

3 MAC层协议设计

3.1 同步问题的解决

现有的同步问题研究包括面向PHY(物理层)和面向MAC层2个方面,主要关注的是MAC层协议的研究。为了降低时间同步的开销,文献[1]提出了一个链路维护方案,当没有数据包需要发送时数据信道通过传输低速率的控制包来维护,尽管链路维护方案在仿真中取得了很好的性能,仍有很多关键的问题是不清楚的。其中一个潜在的问题是链路维护方案将增加发射机的传输时间,因此,会降低节点的生命周期和引进额外的干扰。

文献[2]讨论了超宽带网络中长时间同步对CSMA/CA,TDMA方案的影响,但没有提出解决方案。文献[3]提出了加大帧长解决同步开销的方法,但是没有考虑节点能耗的问题。如果当前节点的能耗过大使其已不具备传输帧的能力,则对于该节点意味着最终仍是传输失败,整个网络系统会更耗时、更耗能。这对于实时性和可靠性要求极高的工业无线监控网络来说,是不能接受的。

本文改进文献[3]的思想,利用汇聚帧加大帧长,并且引入定位机制。这样既解决节点间的时间同步问题,又考虑了节点的能耗问题,使其更适用于工业无线监控网络。

MAC层中帧的结构如图1所示。

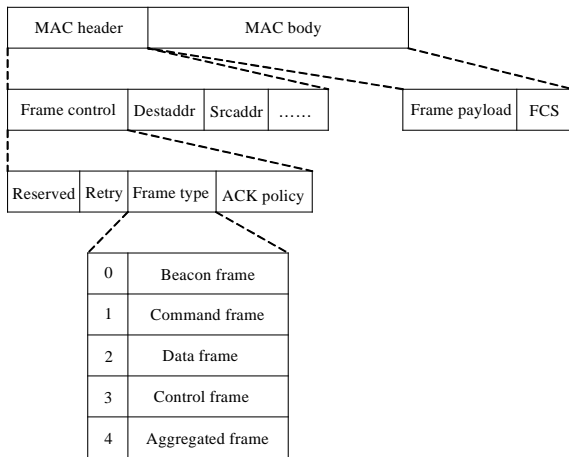


图1 帧结构

整个帧由固定长度的MAC首部和长度可变的MAC主体组成。在帧的类型中,命令帧指定位帧、能耗帧;控制帧指RTS帧、CTS帧、ACK帧;数据帧指工业通信中的通信信息;汇聚帧是由多个具有相同信宿地址的不同或相同帧类型的帧组成的长帧。汇聚帧的最大和最小长度分别为 $length_{max}$ 和 $length_{min}$ 。

当缓冲区中队列的长度大于或等于 $length_{min}$,将组装成一个小于 $length_{max}$ 的汇聚帧;在一个汇聚帧中分组的最大最小数分别用 $packet_{max}$ 和 $packet_{min}$ 来表示。有相同信宿地址的分组能被组装成一个汇聚帧,并放入相应的缓冲区中,此外当一

个发射机以一个全向天线发送数据,所有的在其发射范围内的邻居节点都能接收到这个发射,因此,利用这个特点,能够组装具有不同信宿地址的分组,来进步一步降低同步的开销。若汇聚帧被正确接收,则信宿返回一个ACK帧。帧间的通信通过RTS/CTS/ACK的握手和确认机制来保证节点间数据的可靠性传输。

3.2 定位性的利用

利用UWB的定位性获得节点之间的距离,其值保存在定位帧中。再根据节点之间的距离,使用能耗模型计算节点发送数据所需要的能耗。当发送方传输 k bit到距离为 d 的接收方时,可根据文献[5]得出的公式计算其能量消耗,即

$$E_{TX}(k, d) = E_{TX_elec}(k) + E_{TX_amp}(k, d) = kE_{elec} + k\epsilon_{mp}d^4 \quad (1)$$

其中, E_{TX_elec} 表示无线收发电路所消耗的能量; E_{TX_amp} 表示放大器消耗的能量;参数 ϵ_{mp} 的取值与应用需求的接收器灵敏度和接收器噪音系数密切相关。此外,网络中节点周期性地用hello信息(即能耗帧)通报它目前的可用能耗值,当节点需要发射信息之前,hello信息中的能耗值 E_{hello} 和经过式(1)计算的结果进行比较,若计算后的值大于 E_{hello} ,则说明节点不具备发送信息的能力,该节点是“问题”节点,做出标记,若 E_{hello} 小于规定的能耗阈值,则通过相应的策略向网络内所有节点发布信息,宣布该节点“死亡”,更新网络定位表。对于帧则意味着发送失败,对于汇聚帧,可能是由于汇聚的分组过多使 k 增大,而造成出现大于 E_{hello} 的情况,这也同样意味着帧发送失败。这种节点能耗与定位机制的结合,可以及时发现“问题”节点,从整体上降低通信的延迟和开销,提高网络的吞吐量,这对于保证工业监控网络数据通信的实时性和可靠性是非常重要的。

4 传输延迟和吞吐量分析

假设不考虑信号的传播延迟,平均传输延迟等于发送前在发送缓冲区的等待时间与帧在信道上的传输时间之和 T_s ;若能耗过大,不能发射该信息,还应再加上修改帧长造成的延迟 T_p ;若发生碰撞,还应再加上碰撞后的随机延迟和重传时间 T_c ;若发生位传输错误,还应再加上位出错造成的重传延迟 T_b 。这样平均传输延迟可表示为

$$Delay = T_s + T_p + T_c + T_b \quad (2)$$

$$T_s = 4T_{sync} + T_p + \frac{1}{V}(4L_{PH} + L_{RTS} + L_{CTS} + L_{ACK} + L_{MH} + length(b))$$

$$T_c = 2T_{sync} + \frac{1}{V}(2L_{PH} + L_{RTS} + L_{CTS})$$

$$T_b = 2T_{sync} + \frac{1}{V}(2L_{PH} + L_{RTS} + L_{CTS} + L_{MH})$$

其中, T_{sync} 表示同步时间; L_{PH} 表示物理层首部的长度; L_{MH} 表示MAC帧首部的长度; L_{ACK} 表示ACK帧的长度; L_{RTS} 表示RTS帧的长度; L_{CTS} 表示CTS帧的长度; $length(b)$ 表示分组的长度(bit); V 表示数据传输速率。在 $[0, t]$ 时间内,成功传输的数据大小为

$$S(b, t) = v(b) \times t \times b \times length(b) \times \left[1 - (p_\delta)^{m+1}\right] \times (1 - p_a) \quad (3)$$

则在给定的时间 t 内,MAC层每个节点成功接收的数据总数即吞吐量定义为

$$Throughput = \frac{\sum_{b=packet_{min}}^{b=packet_{max}} S(b, t)}{t} = length(b) \times \sum_{b=packet_{min}}^{b=packet_{max}} v(b) \times b \times \left[1 - (p_\delta)^{m+1}\right] \times (1 - p_a) \quad (4)$$

其中, p_δ 表示帧中位发生错误的概率; δ 表示位出错速率;分组数为 b 的汇聚帧且能耗满足发射的概率为 p_b ;发射速率为

$v(b)$ 。

5 仿真试验与性能分析

通过仿真、对比普遍应用的 CSMA, WLANMAC 协议来分析和评价本文提出的 MAC 协议(UWBMAC), 假设网络的节点之间可以直接通信, 网络中各个节点的初始能耗值均为 2 J。表 1 给出了在仿真中用到的控制参数的数值。仿真中考察的主要性能指标是传输延迟、吞吐量和能耗。

表 1 仿真参数和值

Simulation parameters	values
MAC protocol	CSMA, WLANMAC, UWBMAC
Channel bandwidth(C)	50 Mb/s
Area of network(X,Y)	100 m×100 m
Transmission range(R)	10 m
Packet size(P)	64 B-8 192 B
Acquisition time	1 ms
RTS	20 B
CTS	14 B
ACK	14 B
Contention slot time	100 μ s

在图 2 中, 给出了节点数为 20, 数据包产生速率逐渐增大的情况下, 3 个协议传输延迟的比较。当数据包速率和负载很小时, 因为网络没有饱和, 所以协议之间的延迟差距不是很大, 但随着速率的增大, 同步时间过长导致协议之间延迟差距变大, UWBMAC 协议的延迟相对较低, 而 CSMA 的延迟最大。

图 3 是在与图 2 条件相同的情况下, 3 个协议吞吐量的比较, WLANMAC 和 CSMA 协议由于信道获取时间长, 使得信道利用率低, 同时由于竞争开销和相应的延迟, 因此吞吐量度低于 UWBMAC 协议。

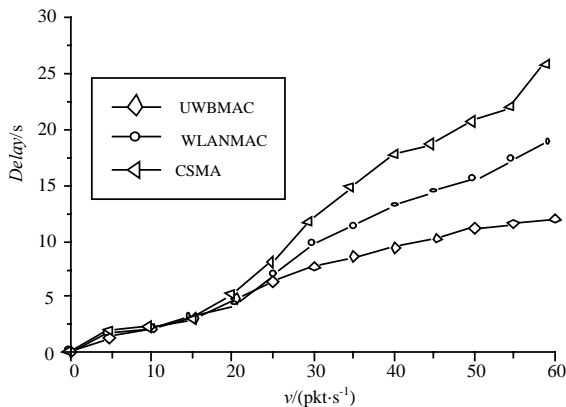


图 2 传输延迟比较

3 种协议在数据包产生的速率恒定, 在网络中节点数增大的情况下, 延迟和吞吐量的仿真比较与图 2、图 3 相似。图 4 显示了在数据包产生速率增大、网络中节点数不变的情况下, 3 个协议的能耗比较。结果表明, 由于 WLANMAC、CSMA 协议没有节能机制, 因此其网络能耗较大。

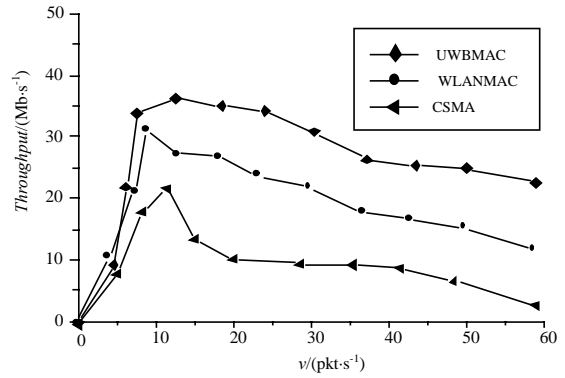


图 3 吞吐量比较

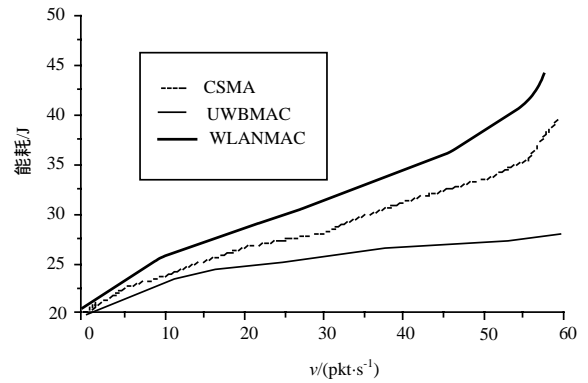


图 4 能耗性能比较

6 结束语

该 MAC 协议(UWBMAC)在传输延迟、吞吐量和能耗方面性能良好。因此, UWBMAC 协议更符合工业无线监控网络的实时性和可靠性需求, 但是如何对 MAC 层的数据信息分类进行细化、如何建立在多跳环境下传输延迟, 吞吐量和能耗的均衡等问题还有待于进一步的研究。

参考文献

- [1] Kolenchery S S, Townsend J K, Freebersyser J A. A Novel Impulse Radio Network for Tactical Military Wireless Communications[C]// Proceedings of IEEE MILCOM'02. [S. l.]: Business Week Press. 1999.
- [2] Jin Ding, Li Zhao. MAC Protocols for Ultra Wideband(UWB) Wireless Networks: Impact of Channel Acquisition Time[C]// Proceedings of SPIE ITCOM'02. Boston, MA: [s. n.], 2002.
- [3] Bianchi G. Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function[J]. Areas Communication, 2000, 18(3): 535-547.
- [4] Opshaug G R. Integrated GPS and UWB Navigation System: Motivates the Necessity of Non-interference[C]// Proceedings of IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies. Maryland, USA: [s. n.], 2002.
- [5] Smithgall D. Toward the 60gm Wireless Phone[C]// Proceedings of the 1998 Radio and Wireless Conference. Colorado Springs: [s. n.], 1998: 157-159.