

基于 TDMA 的无线 Ad Hoc 网络 MAC 协议研究

朱全继¹, 慕福奇^{2,3}, 冷永清³

(1 中国科学院大学 微电子学院, 北京 101400; 2 江苏中科羿链通信技术有限公司,
江苏 无锡 214000; 3 中国科学院 微电子研究所, 北京 122000)

摘 要: 提出了一种基于 TDMA 的多信道 MAC 协议, 采用动态变更子帧长度、控制信道与数据信道时域重合方式, 尽可能提高时隙资源利用率, 采用协商机制, 有效降低分组冲突, 保证网络吞吐量、时延等性能指标. 在 OPNET 仿真平台中建模, 该协议在网络负载较高时, 仍然可以保证分组传输成功率和较低的时延, 为 Ad hoc 网络的设计提供参考.

关键词: Ad Hoc; MAC; QoS; TDMA; OPNET

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000—7180(2018)01—0106—04

Research on MAC Protocol of Ad Hoc Network Based on TDMA

ZHU Quan-ji¹, MU Fu-qi^{2,3}, LENG Yong-qing³

(1 Electronic and Communication Engineering, University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 101400, China;
2 Jiangsu Zhongke Yilian Communication Technology Co., Ltd, Wuxi 214000, China;
3 Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101400, China)

Abstract: This paper studies and designs a multi-channel MAC protocol based on TDMA. In order to improve the utilization ratio of resource as far as possible, this protocol could change the length of the subframe dynamically and make control channel and data channels overlap in the time domain. The negotiation mechanism is adopted to reduce the packet conflict effectively, ensure the network throughput and delay. By modeling in the OPNET simulation platform, when the network load traffic is high, the packet transmission success rate and low latency can be guaranteed to provide reference for the design of Ad Hoc network.

Key words: Ad Hoc; MAC; QoS; TDMA; OPNET

1 引言

移动自组织网络由于具有无中心、自组织、不需要固定的通信基础设施等特点, 在军事对战、救灾救援、智能交通等领域能够灵活组网, 且抗干扰性强, 因而被广泛应用. 随着移动自组织网络规模的扩大, 节点数量的增加, QoS(Quality of Service)指标受到严峻的考验, 合理高效的资源调度分配方式是现在 MAC 协议研究的热点之一^[1]. MAC 层位于 Ad Hoc 网络协议栈的数据链路层. MAC 协议的主要功能是完成网络中节点对无线信道的访问, 使多个

节点高效地使用有限的通信资源, 以保证网络的整体性能. 现有一些基于 TDMA 的多信道 MAC 协议, 它们有一些自身的适用场景和参考价值. 如文献[2]中所描述的, 该协议可以实现节点的动态组网和预约, 但是可能存在多个节点同时需要预约时隙, 当时隙窗口出现重叠时, 容易导致预约的空闲时隙处于同一时隙, 从而导致冲突. 文献[3]中提出一种专用控制信道协议, 该协议数据信道采用 TDMA 方式实现了数据无冲突传输, 但是控制信道采用竞争方式协商, 在业务分组小且频繁的场景, 控制信道协商冲突急剧上升, 其时延非常长, 通信能力受限

制信道的处理能力. 文献[4]中提出了一种动态变更子帧长度的方法,可以自适应变动帧长,但是不支持多个节点同时加入网络的场景. 本文设计一种基于 TDMA 的多信道 MAC 协议. 本文的研究重点是基于 TDMA 的 MAC 协议中时隙资源的分配算法. 所以该算法有一些前提和假设:

- (1) 网络没有控制中心,采取分布式资源分配方法;
- (2) 节点工作在半双工模式下,即同一时刻,节点只能发送数据或者只能接收数据;
- (3) 节点的同步不是本文研究内容,默认节点加入网络可以获知当前时间;
- (4) 每一个节点都有全网唯一的节点标识.

2 基于 TDMA 的多信道 MAC 协议

2.1 帧结构设计

在该资源分配算法中考虑到两种帧结构划分:一是控制信道和数据信道在时域上不进行重合;二是控制信道和数据信道在时域上重合. 首先这两种帧结构具有相同的超长帧结构,针对有 N_0 个节点的网络,在一个超长帧中需要完成网络内所有节点的广播消息的收发,为了预留新入网节点广播时隙,需要在此超长帧中设置 N 个广播时隙($N > N_0$).

时域不重合方案:全网内所有的节点协商过程和数据传输过程分开,在协商阶段节点依次进行协商消息的传递,当经过若干个协商周期之后,节点统一使用一段时间进行数据的传输. 传输完成之后再切换到协商阶段. 对子帧设计中分为协商子帧和数据子帧,每个子帧包含若干个时隙,为了使在一个协商子帧内给每一个节点提供协商时隙,将协商子帧的长度设置为 N 个时隙,数据子帧的长度通常设置为 pN 个时隙, p 为数据子帧影响因子. 每个时隙的长度需要根据业务包大小、空口发送速率和网络路径传输时延得出. 子帧结构如图 1 所示.

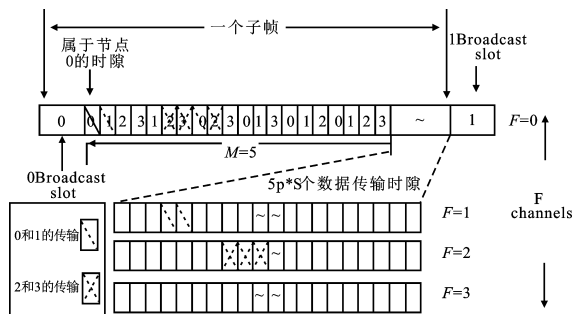


图 1 不重合方案子帧结构

时域重合的方案:节点协商过程和数据传输过程在时间轴上可以重合,具体就是当有的节点在进行协商预约时,在其两跳范围外的节点由于可以使用数据信道,传输业务数据并不会产生干扰. 其子帧结构如图 2 所示.

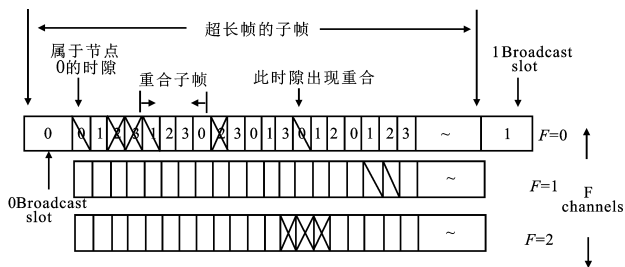


图 2 重合方案的子帧结构

2.2 动态变更子帧长度

针对有 N_0 个节点的网络,一个超长帧中设定了 N 个广播时隙($N > N_0$),多的 $N - N_0$ 个广播时隙为网络中增加新入网的节点设定. 网络中 0 到 $N_0 - 1$ 个时隙分别对应着网络中的 N_0 个节点,当时隙编号和节点号一致时,该节点开始发送广播信息,广播信息中携带了该节点的邻居节点信息表、当前网络内节点的数量和倒计时数值.

当有新节点入网时,在第一个超长帧范围内该节点先通过广播消息获取到网络内节点数和一跳节点信息,即更新 N_m 和相邻节点信息表 ($N_i, \{NextN_i\}$),并且启动倒计时计数器 $TD = N_0$,在属于新节点的广播时隙时将上述更新的内容广播出去,相邻节点收到该消息后会更新 $N_m = N_0 + 1, TD = N_0$,相邻节点信息表中添加新的节点. 在第二个超长帧起始时,TD 值不为 0 的节点会更新 $TD = N_0 - 1$,然后进行消息的广播. 新节点两跳的节点会更新 $N_m = N_0 + 1, TD = N_0 - 1$. 依此最多经过 N_0 次超长帧,网络内的所有节点就都将 $N_m = N_0 + 1, TD = 0$. 当节点在超长帧起始时检测到 TD 为 0 时,会读取新的 N_m ,如此实现全网内帧长的变更. 其发送和接收广播变动帧长的流程如图 3 所示.

2.3 协商过程设计

控制传输阶段是为了完成协商出节点传输业务数据使用的具体信道和时隙. 在本次方法中,采用三次握手机制,即 RTS、CTS 和 ACK 三步完成预约过程. 协商传输阶段使用专用控制信道,所以对控制信道在时隙上进行划分,在一个时隙上时,只允许一个节点发送控制类的消息,并且将时隙编号 SN 与节点号 N_0 设置出一种映射关系 f ,如果映射满足条

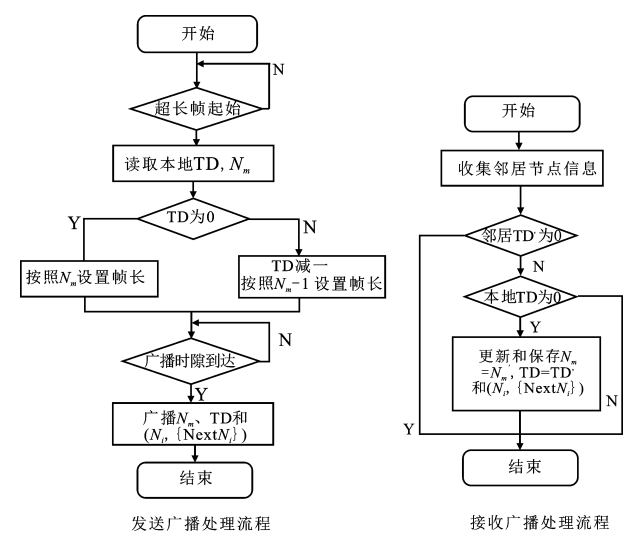


图3 帧长变更流程图

件,则表明该时隙 SN 属于节点 N_0 的时隙, N_0 节点在该时隙拥有发送权.协商过程描述为,源端节点在 RTS 中携带了需要发送给目的节点的所有源端可用时隙-信道列表,目的节点通过比对自身的时隙-信道列表,选择出可用的时隙和频点,发送 CTS 消息给源端节点.源端节点通过确认协商是有效时才进行 ACK 的应答.其协商的过程如图 4 所示.

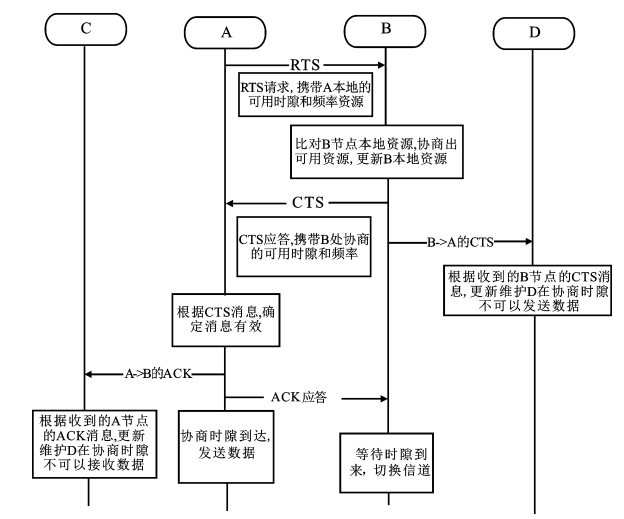


图4 协商过程

3 实验及结果分析

实验选择 OPNET 软件作为网络仿真工具,OPNET Modeler 提供三层建模机制^[5].最底层为进程模型,以状态机和状态转移线来描述协议;中间为节点模型,对应着设备的协议栈,反映设备的特性.最上层为网络模型,反映实际的网络部署.三层模型与实际的网络、设备和协议的层次一一对应,全

面反映出网络的硬件和软件的相关特性.

3.1 协议性能验证

下面将部署一些场景,场景中节点数为 4~16 个,协议中子帧划分的时隙可分配给 20 个节点,应用层数据包大小设置为 400 B,时隙长度设定为 400 μ s,发包速率为每秒 200 个包,使用一个专用控制信道和 4 个数据信道,发包的目的节点为随机的两跳内节点,获得以下仿真结果.如图 5 所示.

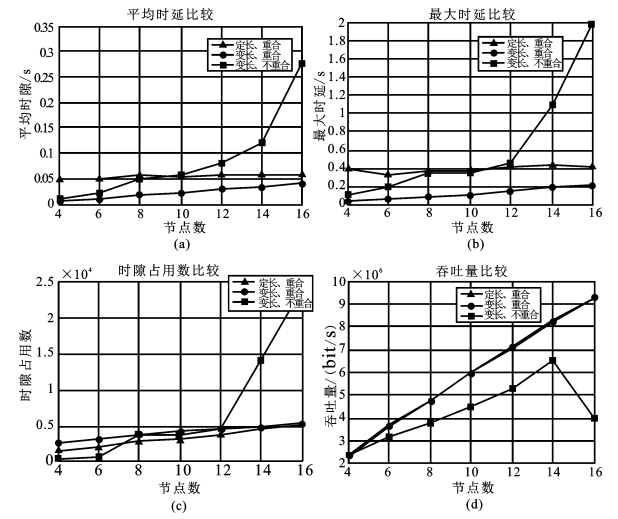


图5 协议验证性能比较

图 5 中主要对比了三种方案的四个性能指标.三种方案:采用固定的帧长、控制信道和数据信道时域上重合;根据节点数变动帧长度,控制信道和数据信道时域重合;采用变动帧长,控制信道和数据信道时域不重合.四个性能指标:平均时延,最大时延、时隙占用数和吞吐量.

平均时延是指源节点的数据包从应用层产生到目的节点的应用层接收的时间差的平均值,最大时延是指在一个统计桶内数据包到达的最大的时间差值.从图 5(a)、(b)可以看出,当节点的发包速率相同且固定时,随着节点数的增加,三种方案的时延特性也都在上升.对比可以发现采用变动帧长和重合的方式时延特性最优,采用不重合的方式时延特性随着节点数目的增加曲线上升得更快.重合方式中,采用帧长固定的方式,时延特性曲线趋向平稳,而帧长随着节点数增加时,平均时延和最大时延都在缓慢增加,且呈现出线性关系.在重合方式下,节点数较少时,固定帧长和变动帧长的方式时延差值较大,随着节点数增加,子帧长度逐渐靠近设置的固定帧长,时延差值越来越小.在该算法中由此可以得出一点信息:传输的时延与子帧的长度存在直接的关系,

并且时延受到预约协商时隙划分的影响。

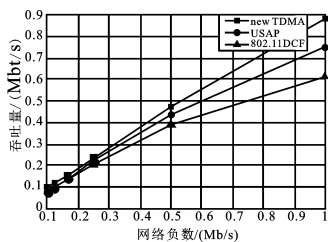
时隙占用数是统计了控制信道上节点发送数据时对时隙的占用次数,在仿真时间一定时,是控制信道利用率的体现。从图 5(c)中可以看出,采用定长的重合方案比采用变长的重合方案,其时隙占用数要少一些的,而从图 5(d)中反映的吞吐量相差不大,这体现出变动帧长的的方式可以提高时隙的利用率。但是两种方案相差不多的原因是,采用固定帧长的长度设置为满足 20 个节点的网络,是仿真的实际节点数相差不大引起的。

吞吐量是通过网络中节点每秒发送的整体数据量进行统计的指标,可以用来反映网络的传输特性。从图 5(d)中可以看出,采用重合的方案,固定帧长和变动帧长的对吞吐量几乎没有区别,这是因为帧长主要影响到时延,对时隙冲突没有影响,当没有丢包问题存在时,吞吐量一致是符合理论的。而采用不重合的方案,在 16 个节点时,吞吐量出现下降,这可能的原因是,多次协商失败导致数据包在节点的消息队列中滞留,网络拥塞越来越严重导致的。在 16 个节点时,时延和时隙占用数急剧上升也很好地说明了这一点。

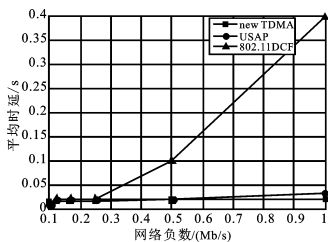
3.2 协议对比分析

与现有的基于固定帧长的 TDMA 协议 USAP^[6]和基于竞争的 802.11 DCF 协议^[7-8]进行性能的比较。根据仿真的结果,总结两类 MAC 协议所适合场景类型。场景设定:部署节点数 10,应用层数据包大小设置为 128 B,时隙长度设定为 400 μ s,发包时隙分别设定为 0.1 s、0.08 s、0.06 s、0.04 s、0.02 s、0.01 s,发包的目的节点为随机的两跳内节点,分别统计吞吐量之间的对比图和时延的对比图。

图 6(a)中,新的 TDMA 协议和基于 TDMA 的 USAP 协议网络吞吐量均比 802.11DCF 的要高,这是因为 802.11DCF 属于竞争的资源分配方式,节点对信道的接入是随机的,当节点有信道需求时,会对信道进行抢占。这样产生冲突是不可避免的,所以产生的吞吐量比较低。而 USAP 和新的 TDMA 协议都是基于 TDMA 的时隙分配方式进行预约资源的,产生冲突是少于竞争方式的。其中新的 TDMA 协议是采用专用的控制信道进行资源的预约,如果控制信道不产生冲突,业务数据就不会产生冲突,当网络内负载比较低时,其控制信道时隙资源充足,所以表现的性能最好。图 6(b)中当网络负载较低时,802.11DCF 的时延是非常小的,当网络负载增加时,其时延急剧上升。这是因为当网络内负载较低时,资源比较充足,节点对信道的竞争成功率非常高,



(a) 吞吐量比较



(b) 平均时延比较

图 6 与其他协议的比较

但是当负载增加时,信道经常出现繁忙,节点竞争的产生的冲突就会急剧增加,时延也就会大幅增加。而基于 TDMA 的方式,属于时隙分配进行资源预约的,当网络负载较大时,仍会为节点预留协商的时隙资源。只有当负载足够高时,网络内协商的传输的数据包不足以抵消从上层收到的数据包时,数据包在节点内堆积,导致网络崩溃,时延才会急剧上升。

4 结束语

本文主要研究、设计并仿真实现一种面向多信道的 Ad Hoc 网络的 MAC 协议。该协议通过动态获取网络内节点个数,根据全网节点数变动子帧结构,可以更好地适应拓扑,降低不必要的时隙资源浪费;采用控制信道和数据信道实现时域重合方式,提高时隙利用率。在 OPNET 网络仿真平台对协议进行建模,通过比较,该协议在网络负载较高的环境下,整体性能优于竞争类的 802.11DCF 协议和固定帧长的 USAP 协议。

参考文献:

- [1] Mukherjee A, Keshary V, Pandya K, et al. Flying Ad-hoc Networks : A Comprehensive Survey[C] // Int. Conf. on Computer and Communication Technologies. IEEE,2016.
- [2] Boulfekhar S, Bouallouche L, Benmohammed M. S-TDMA: A new MAC protocol for wireless sensor networks[C] // Ieee/acm, International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications. IEEE Computer Society, 2012:29-35.

(下转第 114 页)

```
rorCode 为中断驱动初始化时动态注册得到的 * /
    faultRec( IntrErrorCode, errScene)
}
Return result;
}
```

(2)中断屏蔽测试算法

中断屏蔽算法设计与中断响应测试算法类似,区别在于通过 PIC 屏蔽看门狗中断后,设置看门狗定时器的中断产生条件,延时等待看门狗定时器产生中断.最后通过 WatchdogIntHandler 中设置的标志位是否发生改变判断处理器是否响应了中断.如果响应了中断,则说明通过 PIC 屏蔽中断失败,应上报与此错误相关的动态故障码.

8 结束语

故障管理技术是机载系统中不可缺少的部分.有效的记录和定位故障方法可以带给开发人员和排故人员极大便利,对提高机载系统安全性,降低开发成本有很大的意义.

本文结合当前主流的机载系统架构,提出了一套完整的故障管理机制,并以工程实例为依据验证了该机制.该实例显示此机制高效灵活,移植性良好.

参考文献:

[1] 卢海涛,王自力.综合航空电子系统故障诊断与健康管理技术发展[J].电光与控制,2015,22(8):60-65.

(上接第 109 页)

[3] Zhang J, Zhou G, Huang C, et al. TMMAC: An energy efficient multi-channel MAC protocol for Ad Hoc networks[C] // IEEE International Conference on Communications. IEEE, 2007;3554-3561.

[4] Bgra Gedik, Liu L, Yu P S. ASAP: An adaptive sampling approach to data collection in sensor networks[J]. IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems, 2007, 18(12):1766-1783.

[5] Surhone L M, Timpledon M T, Marseken S F, et al. OPNET[M]. Betascript Publishing, 2010.

[6] Young D. USAP: A unifying dynamic multichannel TDMA slot assignment protocol[J]. IEEE, 1996, 1(1):235-239.

[7] Bahl P, Chandra R, Dunagan J. SSCH: slotted seeded

[2] Semiconductor F. Programming Environments Manual for 32-Bit Implementations of the PowerPCTM Architecture[Z]. Freescale Semiconductor, 2005.

[3] Semiconductor F. P2020 QorIQ Integrated Processor Reference Manual[Z]. Freescale Semiconductor, 2012.

[4] 李向东,张晓红,戴小氏,等.机载嵌入式系统中多种机内自测试的软件设计[J].计算机测量与控制,2014,22(4):107-112.

[5] 李向东,赵根学,杜杏虎. MPC8641 处理器内中断控制器的自检测技术[J].计算机工程与设计,2014,35(5):1630-1633.

[6] 任国鹏,柴小丽,蒋祺明.基于 ASAAC 标准的 BIT 设计[J].计算机工程,2012,38(12):228-231.

[7] 杨芳,齐璇,董丽,等.嵌入式软件中断系统资源冲突检测技术研究[J].计算机工程与设计,2010,31(23):5036-5038.

[8] 徐凯,张天宏.航空发动机电子控制器可测试性技术应用研究[J].航空发动机,2008,34(2):51-55.

作者简介:

陈 宁 女,(1993-),硕士研究生.研究方向为机载嵌入式软件. E-mail:1025822449@qq. com.

李向东 男,(1986-),工程师.研究方向为嵌入式实时操作系统、嵌入式软件.

赵根学 男,(1975-),高级工程师.研究方向为嵌入式操作系统内核.

作者简介:

朱全继 男,(1992-),硕士研究生.研究方向为自组网 MAC 层算法. E-mail:zhuquanji@ciotc. org.

慕福奇 男,(1957-),博士研究生,博士生导师.研究方向为无线通信系统与技术、物联网传输与应用.

冷永清 男,(1981-),博士研究生,助理研究员.研究方向为微波固态功率技术、高效功率放大器、微波发射机和接收机.

channel hopping for capacity improvement in IEEE 802.11 ad-hoc wireless networks[C] // International Conference on Mobile Computing and NETWORKING. ACM, 2004;216-230.

[8] 叶林睿.基于 TDMA 的 Ad Hoc 网络 MAC 协议研究[D].成都:电子科技大学,2011.