

基于跨层设计的无线自组网方案^①

王彦刚, 万留进, 吕遵明, 楼 俐

(中国电子设备系统工程公司 南京电讯技术研究所, 南京 210007)

摘 要: 首先详细描述了目前无线自组网现状及问题, 然后基于跨层设计思想提出一种无线节点组网方案, 尤其对 MAC 层、网络层的实现方案进行了详细描述, 最后进行样机实现并搭建半实物仿真环境进行了仿真试验, 仿真结果显示该组网方案在网络吞吐量方面比传统组网模式有显著提升。

关键词: 跨层设计; 半实物仿真; 网络吞吐量

Wireless Self-Organized Network Scheme Based on Cross-Layer Design

WANG Yan-Gang, WAN Liu-Jin, LV Zun-Ming, LOU Li

(Nanjing Telecommunication Technology Research Institute of CESEC, Nanjing 210007, China)

Abstract: After analyzing the shortages of current wireless self-organized network, this paper presents a radio self-organized network scheme based on cross-layer design, particularly describes the scheme contents of MAC and Network layers. Then, the semi-physical simulation environment for prototype aeroplane is developed. The simulation results show that this scheme can obviously improve the ability of network throughput comparing with the traditional self-organized network mode.

Key words: cross-layer design; semi-physical simulation; network throughput

随着无线自组网技术在军事领域、抢险救灾等民用领域的广泛应用, 目前各种类型的无线自组网节点设备被研制使用, 经过科研人员的多年努力, 物理层数据传输速率有了较大幅度的提升, 但网络构建方面还没有突破性的进展, 组网应用时网络吞吐量仍然偏低, 将物理信道提升的性能大打折扣。主要表现在:

1) 信道接入效率不高, 在信道接入方面普遍采用 CSMA 或 TDMA 接入方式, CSMA 模式适用于突发业务较多的网络环境, 在节点数增多且网络流量较均匀时, 性能会急剧下降, TDMA 模式适用于网络流量较均匀的网络环境, 但在实际使用中, 网络环境复杂多变, 位于网络中不同位置的节点之间的网络环境都会有巨大差别;

2) 网络易产生拥塞, 当前无线自组网在建立路由时, 往往不考虑业务负载分布情况, 这种方式非常容易产生局部网络流量较大情况, 尤其对 TDMA 的信道

接入方式, 局部网络流量较大情况极易造成“瓶颈”节点的出现, 导致网络拥塞, 甚至网络“瘫痪”, 造成严重后果;

3) QoS 保证能力不够, 话音、图像等多媒体信息的实时传输需求日益增长, 但无线自组网具有拓扑动态变化、隐终端、暴露终端等特性, 导致为应用业务提供一条端到端的具有 QoS 保证的通道仍然具有很大难度。

本文以解决或改善上述问题为目标, 基于跨层设计思想^[1,2]提出了一种自适应的自组网方案, 同时进行了样机实现, 最后经过半实物仿真环境测试, 测试结果表明, 该组网方案在网络吞吐量方面比传统组网模式有显著提升。

1 基本架构

根据无线自组网节点既要能够产生业务又要具有

^① 基金项目: 国家自然科学基金(61201216)

收稿时间: 2016-04-20; 收到修改稿时间: 2016-07-07 [doi:10.15888/j.cnki.csa.005605]

路由器功能的特点, 本方案将无线节点设计成为一个符合 TCP/IP 协议的路由器节点, 对外提供以太网接口, 通过网口可以连接任意多个符合 TCP/IP 协议栈的终端, 例如常用的 PC 机等, 业务由终端产生, 通过无线节点发送出去, 如图 1 所示.

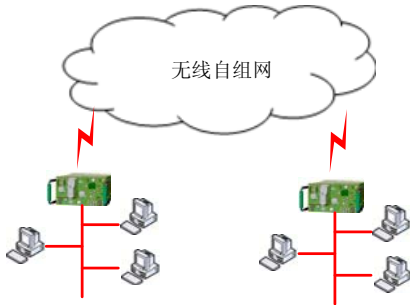


图 1 系统总体框图

2 实现方案

2.1 概述

本方案借鉴跨层设计思想将分散在网络各个子层的特性参数协调融合, 使协议栈能够以全局的方式适应特定应用和网络状况变化, 从而通信终端能够在尽可能少的人为操作下, 自适应的完成组网. 本方案中 MAC 层和网络层之间相互共享参数信息, 能够对网络资源进行有效分配, 提高网络的综合性能. 本方案基于 TCP/IP 协议栈进行设计, 逻辑框图如图 2 所示, 该框图只给出了本方案所独有的模块, 对于其它 TCP/IP 协议固有模块进行了省略.

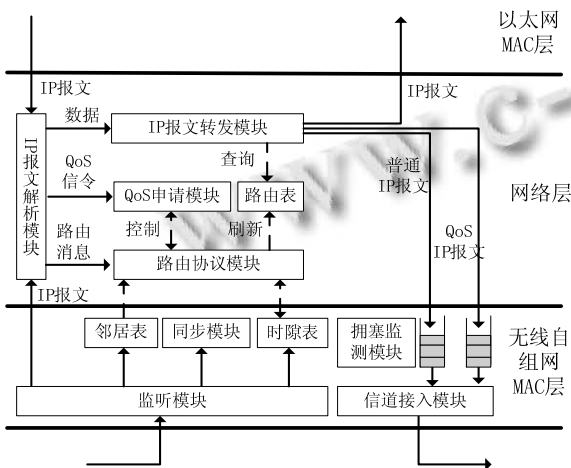


图 2 协议栈功能模块

2.2 MAC 层方案

2.2.1 信道接入模块

本方案采用时隙化信道, 时隙化信道由多个持续时间相等的时隙组成, 时隙组合成一个较大的时帧, 时帧循环重复使用. 信道接入模块的设计目标主要为: 网络中不采用固定设施进行集中管理, 节点以分布式的工作模式接入信道, 无需人工干预; 具有资源预约功能和时隙空间复用能力.

(1) 时帧格式

无线信道划分为连续时帧, 每个时帧有 $6N(N>1, N$ 为基本时隙数量)个时隙构成, 如图 3 所示. 其中, 前面 $3N$ 个时隙作为专用时隙, 后 $3N$ 个时隙为公共时隙, 另外, 专用时隙又分为基本时隙、应达时隙和再应答时隙三种. 下面详细描述这四种时隙.

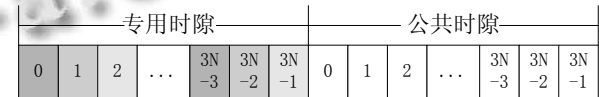


图 3 时帧格式

1) 基本时隙. 节点能否申请到一个基本时隙作为节点是否入网的标志, 当节点准备入网时, 首先通过一段时间的侦听过程, 然后通过基本时隙的申请算法竞争获得一个属于自己的基本时隙. 基本时隙能够实现可靠广播, 对信道资源预约、路由协议、网络时间同步等都有很好的支持.

2) 应达时隙和再应答时隙. 每个基本时隙后面都紧跟一个应达时隙和再应答时隙, 两个应达时隙和基本时隙是对应的. 在需要进行信道资源预约时, 两个应达时隙配合基本时隙一起进行资源预约, 当不需要信道资源预约时, 这两个时隙和基本时隙一起作为本节点的可靠广播时隙.

3) 公共时隙. 这些时隙允许网络中节点根据需要预约使用.

(2) 基本时隙申请及维护

采用 RR-ALOHA 协议^[3,4]中的算法进行申请和维护基本时隙, 该算法保证每个节点能够在局部范围内获得一个可靠的广播时隙.

(3) 时隙预约及释放

采用 RTS/CTS 握手机制进行时隙预约. 不同的网络环境中对 RTS/CTS 握手机制的实现方式是不同的, 本方案基于节点的基本时隙进行实现, 下面从四个部

分进行详细介绍时隙预约及释放过程:

1) 时隙无冲突预约条件. 当发送节点与接收节点预约时隙时, 发送节点必须选择无冲突且可空间复用的时隙进行预约, 这些时隙需要同时满足条件为: 对于本节点和接收节点这些时隙是空闲的; 对于本节点的邻居节点这些时隙没有被预约为接收时隙; 对于接收节点的邻居节点这些时隙没有被预约为发送时隙.

2) 时隙预约. 发送节点将选择的可预约为发送的时隙和预约时隙数量放到 RTS 中, 在基本时隙发送给接收节点, 接收节点收到 RTS 后从中选择可预约为接收的时隙放到 CTS 中, 在应答时隙回复, 当发送节点收到 CTS 后, 提取预约时隙, 则在接下来的预约时隙发送数据, 同时将预约的时隙放入到 RESV, 通过再应答时隙发送出去, 向邻居节点通告预约的发送时隙, 如图 4 所示.

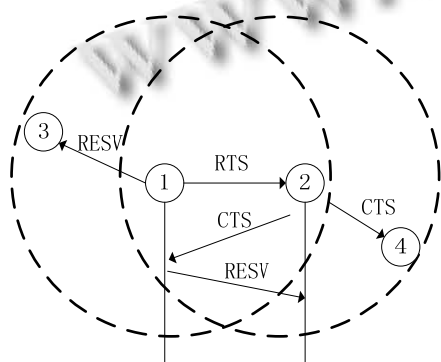


图4 资源预约过程

3) 时隙通告. 根据 1) 中描述的无冲突预约时隙条件, 发送节点必须知道本节点的邻居预约时隙的情况. 时隙通告采用监听机制, 当邻居节点监听到 CTS 消息, 就会得知邻居节点预约了哪些时隙为接收, 当邻居节点监听到 RESV 消息, 就会得知邻居节点预约了哪些时隙为发送.

4) 时隙释放. 由于网络拓扑在不停的变化, 可能有新邻居节点到达, 同时没有监听到时隙通告消息, 就会造成预约冲突, 此时则放弃使用这些时隙.

2.2.2 同步模块

同步模块用来进行时隙和时帧同步. 首先网内各个节点都具备高稳时钟, 这些时钟在网络系统运行之前被统一校准, 依靠硬件时钟的高稳定特性能够维持网络同步较长时间, 同时在组网时指定时间主控节点, 其它节点通过周期性与时隙主控节点进行交互

TOD(Time Of Date)信息, 进行维持网络时间同步, 另外时间主控节点使用第 1 个基本时隙, 同时在基本时隙内广播当前网络时帧长度以及当期基本时隙的编号, 其它节点通过监听这些信息实现时帧同步.

2.2.3 监听模块

监听模块收到一个 MAC 帧时, 通过其帧类型字段判断当前数据部分的内容并进行处理, 通过这种方式可以获得邻居节点、时隙使用状态、TOD 等信息.

2.2.4 拥塞监测模块

本方案引入报文队列增长系数进行描述节点的拥塞情况, 即一个时帧内到达的报文数量除以转发数量的值, 反映了报文队列的变化趋势. 这需要设置两个预警门限: 最小预警门限和最大预警门限. 当报文队列达到最小预警门限, 则拥塞检测模块开始计算报文队列增长系数. 如果增长系数大于 1 就表示缓存队列变长, 拥塞程度增加, 则不再通过该节点继续建立路由, 直到拥塞状态解除.

2.3 网络层方案

2.3.1 IP 报文解析模块

当前网络层下面有两个 MAC 层, 都有数据到达和转发. IP 报文解析模块负责对两个 MAC 层提交上来的 IP 包进行解析, 然后提供给相应的模块处理.

2.3.2 路由模块

(1) 设计目标

AODV 协议^[5]是为自组网节点设计的, 能够对动态链路状况快速自适应, 具有处理开销和存储开销低等特点. 本方案基于本文第二节描述的 MAC 层协议设计了一种 AODV 协议的改进方案, 设计目标如下:

1) 具有流量均衡功能, 能够避开网络流量集中的节点, 减少网络拥塞发生;

2) 具有端到端资源预约功能, 提供 QoS 保证.

(2) 设计方案

AODV 协议的工作过程可以简单概述为源节点发起 RREQ 消息, 中间节点转发 RREQ 消息, 目的节点收到 RREQ 消息后回复 RREP 消息, RREP 消息按照 RREQ 消息路径到达源节点, 源节点收到 RREP 消息表示路由建立完毕.

本方案将 MAC 层的资源预约过程与 AODV 协议进行结合. 在 RREQ 发送阶段, 源节点将 RTS 和 RREQ 消息级联后进行发送, 中间收到 RTS-RREQ 级联消息后, 提取 RTS 并分析, 认为资源满足需求, 则构建给上游节

点回复的 CTS 消息、以及给下游节点的 RTS 消息, 然后与 RREQ 消息进行级联继续转发, 否则不处理, 当上游节点侦听到 CTS-RTS-RREQ 级联的消息后, 提取 CTS 消息完成资源预约握手, 下游节点收到 CTS-RTS-RREQ 消息后, 提取 RTS 和 RREQ 消息进行处理, 处理过程和上游节点相同. 在 RREP 回复阶段, 目的节点收到 CTS-RTS-RREQ 的级联消息后, 构建给上游节点回复的 CTS 消息然后和 RREP 消息级联发送给上游节点, 上游节点收到 CTS-RREP 消息后, 根据 CTS 构建 RESV 消息, 然后再与 RREP 消息级联为 RESV-RREP 继续向上游节点发送, 直到源节点收到 RESV-RREP 消息, 表示一条资源充沛的路径被选择. 具体如图 5 所示.

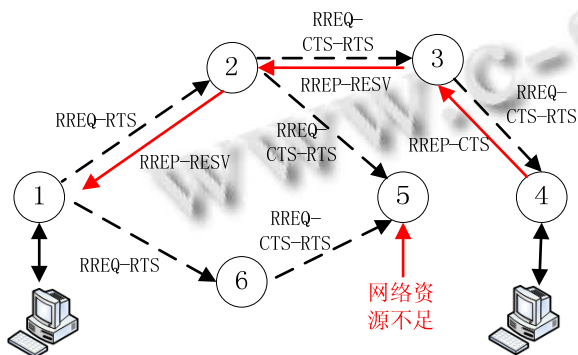


图 5 路由建立过程

当路由建立成功后, 源节点和目的节点之间周期地发送正向路由和反向路由的维护消息, 完成路由的维护, 当节点超时收不到路由维护消息, 则认为路由失效, 将路由删除并释放预约资源.

2.3.3 QoS 申请模块

当有 QoS 申请信令到达, 则触发 QoS 申请模块, 该模块将 QoS 请求命令进行解析, 根据其 QoS 要求进行端到端的资源预约.

2.3.4 IP 报文转发模块

该模块用于区分普通 IP 报文和 QoS IP 报文, 同时进行相应的转发处理. 对于普通的 IP 报文, 通过路由表转发, 如果没有路由, 则触发路由模块重新建立路由; 对于 QoS IP 报文, 则放入 QoS 报文缓存队列, 通过 QoS 路径转发, 如果没有 QoS 路径, 则丢弃.

3 半实物仿真

3.1 仿真内容

利用 VRNET 搭建半实物网络环境仿真环境, 其

中实物节点两个, 仿真节点 12 个, 采用网络性能测试软件 IxChariot 仿真测试网络吞吐量和网络时延.

3.2 软件介绍

3.2.1 VRNET 网络仿真软件

VRNET Developer 是一款由北京未尔科技研发的离散事件网络仿真器, 提供大量通信协议库, 能够支持用户在有线和无线网络领域的各种仿真需求, 尤其在无线自组网以及无线传感器网络方面, VRNET 提供了大量的协议模型, 能够满足用户的各种应用.

3.2.2 IxChariot 网络测试软件

IxChariot 是美国 IXIA 公司推出的针对应用层性能测试的一款软测试工具, 能够评估网络应用的性能和容量, 对网络和设备进行压力测试, 得到设备及网络在不同应用、不同参数下的吞吐量、时延、丢包、反应时间等性能参数.

3.3 半实物网络环境搭建

3.3.1 场景描述

半实物仿真场景搭建需要一台服务器、两台计算机终端和两台无线节点样机, 其中服务器运行 VRNET 仿真环境, 模拟 12 个网络虚拟节点, 计算机终端 1 和无线节点样机 1 映射到虚拟仿真环境中的两个节点, 计算机终端 2 和无线节点样机 2 连接, 样机之间可以进行无线通信, 如图 6 所示. 此时计算机终端 1 和终端 2 都运行 IxChariot 软件, 通过半实物的网络环境进行通信测试.

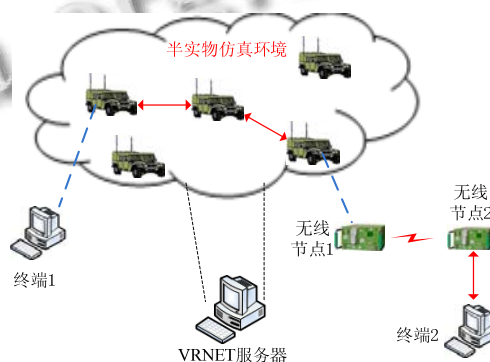


图 6 半实物仿真场景

3.3.2 仿真场景参数配置

根据一般使用环境, 网络仿真环境设置为: 信息速率 1.5 Mbit/s; 节点随机移动; 节点移动随机速度 0 km/h~60 km/h; 链路误比特率 4.42×10^{-5} ; 节点通信距离 5 km; 拓扑范围 20 km×15 km; 节点数 12; 路由

模块 AODV、改进版 AODV; MAC 层 CSMA/CA、TDMA(时隙长度 10 ms)、本方案 MAC 协议(时隙长度 10 ms); 仿真节点随机产生背景业务, 报文间隔符合指数分布。

3.3.3 测试过程

测试过程可以分为以下几个步骤:

1) 运行计算机终端 1、终端 2 的 IxChariot 控制端软件, 同时配置测试参数;

2) 在 IxChariot 控制端软件加载吞吐量测试脚本文件, 运行测试软件, 同时更改 VRNET Developer 仿真环境中的背景业务量, 再重复上述步骤, 记录当前网络背景业务情况下的平均吞吐量, 共计测试八种背景业务量下的平均吞吐量;

3) 按照 2) 中方法再测试网络时延。

3.4 仿真测试结果分析

本仿真基于背景业务量由轻及重的过程, 对网络性能进行了仿真测试, 并将测试结果进行了对比。

3.4.1 网络吞吐量分析

图 7 是网络吞吐量测试结果。通过仿真结果看出:

1) 当没有背景业务或背景业务比较小时, CSMA/CA 和本方案的网络吞吐量相对比较高, 静态 TDMA 网络吞吐量较低。这是因为背景业务较少, 信道竞争不激烈, 对 CSMA/CA 有利, 但在节点转发过程中, 仍然会与上下游节点竞争, 依然存在报文碰撞及空闲信道被误认为繁忙的现象, 本方案通过协商的方式接入信道, 能够很大程度减小上述现象的发生, 但本方案中还有接近一半的时隙被静态划分出的作为基本时隙使用, 因此与 CSMA/CA 吞吐量相差不大, 对于静态 TDMA 来说, 资源被固定划分给每个节点, 处于较忙状态的节点资源必定不够, 即使其它大部分时隙空闲, 也无法使用, 因此即使没有背景业务, 静态 TDMA 的吞吐量也较低。

2) 随着背景业务的增加, 本方案仍然保持较稳定的吞吐量, CSMA/CA 吞吐量在逐步下降, 静态 TDMA 吞吐量下降幅度较大。这是因为网络节点竞争信道的频率增加了, 对于 CSMA/CA 来说, 每个节点占用信道的机会变小且碰撞概率增大, 导致发送队列变长且重传次数增加, 网络吞吐量开始下降, 对于本方案来说, 节点之间通过协商的方式使用信道, 碰撞概率低, 空闲时隙能够被充分利用, 吞吐量基本不会下降太多, 对于静态 TDMA 来说, 虽然没有碰撞问题发生, 但每

个节点仅有的带宽被众多业务平分, 发送队列迅速增加, 导致发送端超时重传, 进一步导致队列长度倍增, 网络拥塞现象逐步显现。

3.4.2 网络时延分析

图 8 是网络时延测试结果。通过仿真结果看出:

1) 当没有背景业务或背景业务比较小时, CSMA/CA 的时延最小、本方案次之、静态 TDMA 时延最大。这是因为 CSMA/CA 不受时隙限制, 只要有数据就可以竞争信道发送, 对于静态 TDMA 方式, 则必须等到自己的时隙到达后才能发送, 因此报文在发送队列里的等待时间较长, 本方案的时延要明显好于静态 TDMA, 可以根据需要在一个时隙内预约多个空闲时隙, 时延降低。

2) 随着背景业务增多, CSMA/CA 时延增大, 本方案变化不明显, 静态 TDMA 时延增大, 这是因为 CSMA/CA 竞争信道困难且报文碰撞概率增大, 报文重传增多, 时延增大, 对于本方案来说, 此时依然可以保持高效利用信道资源, 时延增加不明显, 对于静态 TDMA 来说, 缓存队列增加明显, 导致发送端超时重传, 队列长度倍增, 网络出现拥塞, 时延增大明显。

3.4.3 总体评价

实际使用过程中, 任何节点既不会长期处于负载较轻也不会处于负载过重状态, 此时本方案要优于 CSMA/CA 和静态 TDMA, 虽然在时延方面比 CSMA/CA 略差一些, 但也基本能够满足大部分业务需求, 另外, 随着物理信道性能的提升, 时隙划分可以越来越小, 时延会得到更好的改善。对于网络拥塞问题, 本方案提出的路由协议是可以对其改善的, 即便网络负载过重, 也不会导致网络“瘫痪”。

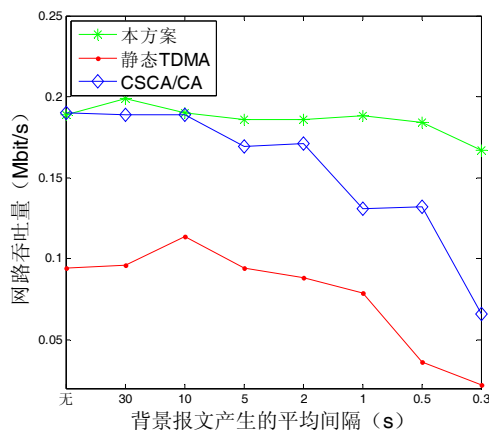


图 7 网络吞吐量测试结果

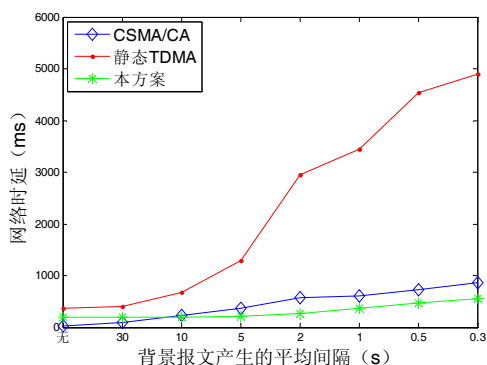


图 8 网络时延测试结果

4 结语

目前,本方案组网性能还远没有达到高效接入、智能管理等理想实用状态,只是在一定程度上具有自适应功能,比传统组网模式具有一定先进性,与理想状态还有很大距离,例如:组网时必须指定时间主控节点,一旦时间主控节点出现故障或者被摧毁,网络时间就会随着时间的推移逐步“失步”;另外,本方案虽然节点通过监听自动入网,能够省去手动分配时隙的繁琐,但网络规模(网络节点)数需要事先确定,当网络饱和后,节点将无法继续入网,不能根据实际情况

进行扩大网络规模.因此,后续还需针对上述的题进一步研究并提出更好的解决思路.

参考文献

- 1 王金龙,吴启晖,龚玉萍,等.认知无线网络.北京:电子工业出版社,2010.
- 2 Su H, Zhang X. Cross-layer based opportunistic MAC protocols for QoS provisionings over cognitive radio wireless networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(1): 118–129.
- 3 Borgonovo F, Capone A, Cesana M, Fratta L. RR-ALOHA: A reliable R-ALOHA broadcast channel for ad-hoc inter-vehicle communication networks. Proc. of Med-Hoc-Net 2002. Chia, Italy. 2002. 15–19.
- 4 Borgonovo F, Capone A, Cesana M, Fratta L. Ad hoc MAC: A new MAC architecture for ad hoc networks providing efficient and reliable point-to-point and broadcast services. ACM Wireless Networks (WINET), 2004, 10(4): 359–366.
- 5 陈林星,曾曦,曹毅.移动 Ad hoc 网络.北京:电子工业出版社,2012:210–236.