

一种基于多天线的动态 TDMA 协议仿真研究

闫鲁生, 王涛, 李威

(中国人民解放军91655部队, 北京 100036)

【摘要】提出一种用于 Ad Hoc 网络 MAC 层的多天线、多信道动态 TDMA 协议, 它采用一个全向天线和多个方向性的扇区天线。该协议通过空分复用控制, 可提高网络的吞吐量, 通过基于动态时隙分配算法和相应的邻居发现策略, 以减少时隙空闲, 提高信道利用率。利用 NS-2 平台进行的仿真研究表明, 与单一全向天线的 MAC 协议相比, 所提出的协议在吞吐量和时延方面有明显的提高。

【关键词】空分复用; 方向性天线; 时隙分配

【中图分类号】TP393.02

【文献标识码】A

【文章编号】1002-0802(2011)12-0107-04

Simulation Study of Multi-Channel Dynamic TDMA Protocol

YAN Lu-sheng, WANG Tao, LI Wei

(PLA Unit 91655, Beijing 100036, China)

【Abstract】A New Ad Hoc MAC protocol using multi-antenna and multi-channel is proposed in the paper. The protocol is supported by one omni-directional antenna and several sector antennas. The network throughput is improved by space division multiplex. The idle-time slot is reduced by dynamic time-slot allocation and neighbor discovery strategy. The simulation with NS-2 shows that the proposed protocol performs much better than the protocol based on one omni-directional antenna in throughput and delay.

【Key words】space division multiplex, directional antenna; time-slot allocation

0 引言

在传统 Ad Hoc 网是基于单一的全向天线设计, 采用时分复用的 TDMA 或 CSMA 等机制实现信道共享和多址接入, 由于 TDMA 的时隙等待或 CSMA 冲突造成的信道利用率较低等问题, 使网络传输时延和吞吐量等性能受到影响。

随着天线技术的发展, 智能天线、方向性天线/扇区天线等在无线通信中逐步得到推广应用, 将其应用于无线自组织网中能够有效提高网络的性能。由于电波传播的指向性特点, 方向性天线不但在同等条件下比全向天线的传输距离要远, 而且利用方向性天线构成空分复用网络, 还可以减少无线信号的冲突干扰, 能提高网络的吞吐量。如何将方向性天线有效应用于无线自组织网络, 已成为一个研究热点, 而基于方向性天线的 MAC 协议技术是其中的核心问题。

目前, 基于方向性天线的 MAC 协议主要有: D-MAC^[1]、ORTS-OCTS^[2]、DAMA^[3]、Tone DMAC^[4]、ABF-CSMA/CA^[5]、
收稿日期: 2011-11-01。

作者简介: 闫鲁生(1959-), 男, 硕士, 研究员, 主要研究方向为通信与网络; 王涛(1976-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为网络仿真; 李威(1981-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为无线通信。

SADCF^[6]和 SWAMP^[7]。这些协议在某些特定网络拓扑下能够发挥方向性天线的优势, 可提高网络吞吐量。但是, 上述基于方向性天线的 MAC 协议存在一些不足, 这些协议基本上都是竞争型的接入方式, 当节点数较多或负荷较高时, 相互冲突情况比较严重, 系统性能下降较快; 另外, 这些协议不具备业务分级服务的 QoS 保障机制, 在系统带宽有限和具有不同 QoS 需求的多类型业务同时存在的情况下, 难以满足端到端 QoS 要求。

1 基于方向性天线与全向天线的动态 TDMA 方案

各网络节点配置一副全向天线和 N 副扇区天线。全向天线主要用于节点间的信令和协议等管控信息交互, 可较好地支持自组织网络中节点的移动和拓扑动态变化。 N 副扇区天线形成 360 度的无缝无重叠的方向覆盖, 扇区天线除了发送业务数据外, 还需收发邻居探测信息, 以便获得扇区拓扑关系, 邻里节点按方向被划分为 N 个集合, 扇区天线用于对某个邻里节点集合的用户信息进行交互。从而增加信号收发增益, 并获得空分复用效益, 提高系统容量。

在时隙分配方面，采用时隙的预分配和动态分配，以及时隙竞争相结合的机制。根据业务量大小和 QOS 需要进行预分配，并留出一部分时隙作为动态使用，以避免全固定分配机制存在的时隙浪费问题，提高信道利用率。

组网模式如图 1 所示，图 1 中每个节点可以通过全向天线来进行控制数据的收发，业务数据通过协商确定的扇区天线来收发，图 1 中采用实线表示。为支持节点的移动性，节点需动态地获取网络拓扑信息，并进行相应的信道协商与切换，对于多信道网络，网络拓扑剧烈变化或节点快速移动使管控开销会迅速增加，本协议更适应于支持慢移动性、高负荷和时效性要求不太高的应用场合，如海面船舶节点组网情况。图中采用虚线来表示节点移动。

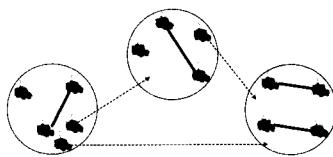


图 1 无线电台通信组网

下面分别从帧结构、扇区与信道分配、动态时隙分配、邻居发现策略 4 个部分来介绍方向性天线与全向天线相结合的动态 TDMA 技术。

1.1 帧结构定义

帧结构如图 2 所示^[9-10]。在时域上，将一帧划分为控制子帧和数据子帧两个部分。控制子帧包含网络控制子帧和时隙调度控制子帧两类。网络控制子帧用于实现新节点入网的同步与接入、网内节点同步、扇区信息同步、邻居信息交互等管控流程；调度控制子帧用于实现两跳范围内多个节点的带宽资源预留分配和协同传输，避免多节点间数据传输冲突。数据子帧被多个节点分时共享使用，用于传输用户信息。在空域上，将网络可用带宽分为多个信道，控制消息使用全向天线周期性发送；用户信息需要根据调度控制子帧的资源分配结果，使用扇区天线在数据子帧上发送。

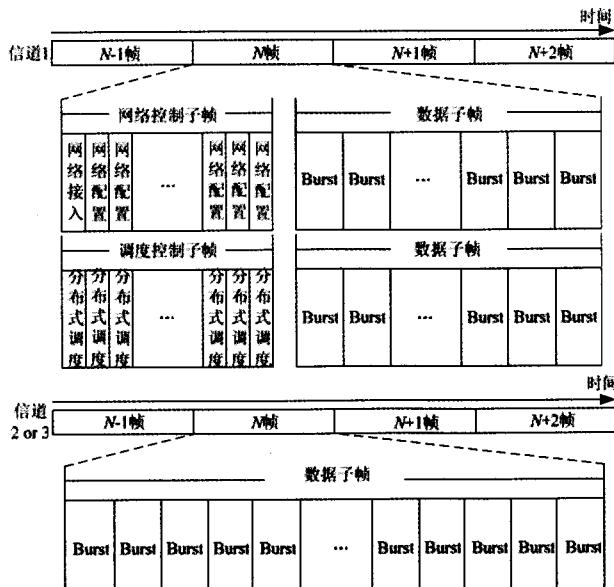


图 2 多信道 TDMA 帧结构

1.2 扇区与信道分配

扇区及信道分配过程用于协调控制消息和用户信息在哪个扇区与信道发送，以达到最佳的网络性能。扇区及信道分配过程也是用户信息调度过程的基础。网络运行过程分为两个阶段。

第一阶段：网络初始化期间。主要的控制管理消息、信令/协议消息基于全向天线发送和接收。扇区邻居探测消息采用扇区天线发送和全向天线接收，接收节点以此知道在特定方向上有哪些邻居节点，从而建立与邻居节点的方向性信道。全向天线接收的消息通过复制并在 N 个扇区依次发送，以扩散邻居拓扑关系。

第二阶段：网络稳定期间，用户信息采用扇区天线发送，扇区天线接收。收发扇区的选择在调度控制子帧协商完成。网络处于稳定状态后，扇区天线周期性向 N 个方向发送探测消息，通过邻居节点的回应获知其相对位置，从而形成“扇区拓扑”。通过探测消息获取的相对位置信息将作为扇区选择的重要判断依据。

1.3 时隙分配

每个帧被分为控制子帧和数据子帧，子帧根据网络规模被划分成 M 个时隙。时隙分为 3 类：预分配时隙、动态预留时隙、竞争时隙。

竞争时隙为控制子帧的第一个时隙，通常用于新节点入网。

预分配时隙属于广播时隙调度，主要用于网络中控制消息的传输，例如需要进行广播传输的邻居发现消息、路由发现消息、调度控制消息、网络配置消息等，都在全向天线上传输。基于方向性天线的 TDMA 中动态时隙预约过程中也在预分配时隙完成，预分配时隙的可靠调度是每个节点无冲突传输自己的用户信息的保证。可以通过不同的机制来进行时隙预分配，如通过 Hash 函数映射，或者通过网络初始化预设的 MAC 地址与预分配的时隙进行对应。

动态预留时隙策略是针对方向性天线在网络中两跳节点之间的单播时隙预留。单播时隙预留也即协商后的方向性链路上时隙调度，用于通信双方利用方向性天线来传输节点间单播业务使用。

同时，采用区分服务 QoS 调度机制，时隙的数量和次序按照业务的优先级来调度，并加入高优先级业务节点抢占低优先级业务节点的策略，保证 QoS 要求高的业务获得时隙的机率更大一些。

1.4 邻居发现策略

节点通过全向天线周期性发送 Hello 消息给邻居节点，其 Hello 消息中包含该节点及其邻居的 ID 号和位置信息。当网络中的其他节点从全向天线收到该 Hello 消息之后，提取其“全向”邻居节点集合信息，并与本节点的“方向性”邻居节点信息进行比较，通过位置信息计算这些节点与本节点的距离及方向，对于满足通信条件的节点加入本节点的全向邻居节点集合。

若节点使用全向天线不能发现的邻居通过方向性天线可能会发现。首先节点选择一个扇区天线监听信道，如果信道忙，则继续监听该信道，如果信道处于空闲状态，则通过信道在该扇区发送 Hello 消息，在 Hello 消息中包含了该节点的 ID 信息、位置信息；采用相同的方式遍历不同的扇区方向来发送 Hello 消息。遍历完成之后，节点恢复全向性天线模式。当网络中其他节点从方向性天线收到该节点的 Hello 消息时，将该节点加入到自己的方向性邻居节点信息集合中，同时在相应的方向性天线向该节点返回 Hello 消息。

本节点邻居表的建立与维护的是实现路由技术的基础，因此如何更快更准确地实现邻居发现是非常关键的，并且在所提出的邻居发现策略中不需要依赖任何其他辅助信息就能独立实现邻居发现。具体来衡量邻居发现算法性能的优越性，主要是依据邻居发现策略对网络中节点发现的成功率和完成邻居发现所需要的时间，并且与整个网络拓扑、网络规模、方向性天线的性能、信道传输特征及邻居发现算法参数等有关。

2 仿真分析

2.1 仿真设计

2.1.1 仿真建模

采用 NS-2 网络仿真工具进行建模和仿真试验。所用到的 NS-2 标准模块包括 UDP 和 TCP 代理、FTP 和 CBR 流量生成器、链路模型等。在原有 NS-2 标准模型基础上，根据需要开发了三个新模型的软件模块，包括方向性天线传播模块、动态 TDMA 时隙分配模块和邻居发现策略模块。新开发的模块以 patch 方式添加到仿真平台中。

在搭建好仿真平台后，编写仿真测试 TCL 脚本，进行仿真实验，对获得的 trace 数据进行分析，评估其性能^[8]。在文中的仿真过程中，还安装了 recover 工具，可以更加方便地直接获取到运行的结果，而跳过了对繁冗的 trace 文件数据分析环节，最后根据所得到的结果，并利用 Linux 平台下的画图工具绘出仿真结果图。

2.1.2 参数配置

在扩展后的 NS-2 仿真平台中，采用了最短路径路由算法，信道模型采用 TwoRayGround，天线采用一个全向天线和三个扇区方向性天线，天线最大增益 10 dB，天线高度 8 m，发射功率 5 W，通信半径 12.5 km，信道带宽 10 Mb/s，数据包 256 字节。限于篇幅，这里重点讨论文中所提方案与采用单一全向天线的 MAC 技术方案，在几种典型场景下的吞吐量和传输时延等性能指标。

从广义上来说时延是网络端到端传输性能的重要指标，从狭义上来说时延是每个分组发送的平均等待时间，也就是所有分组从发送端准备发送到接收端开始接收的平均时间间隔，对于延迟敏感的业务，如 VoIP 语音等业务，时延是非常重要的网络指标。

网络吞吐量是评价网络性能的另一重要指标，所反映的是单位时间内通过网络的业务量大小。对于吞吐量敏感的业

务，如流媒体业务，吞吐量比时延更重要一些。因此主要从时延和吞吐量这两方面来进行仿真分析。

2.2 仿真结果及分析

2.2.1 12 个节点均匀分布场景下吞吐量和时延比较

图 3 给出了 12 个节点均匀分布的仿真场景。节点编号为 0~11，场景中配置 6 条业务流，业务流传输路径分别为 1->0, 3->2, 5->4, 7->6, 9->8, 11->10。该场景只考虑了网络同时对 1 跳业务传输的支持能力。在这种场景下，针对电台节点是否采用空分复用技术进行系统的吞吐量比较，如图 4 所示，该图反映了吞吐量随业务速率的变化曲线。

仿真结果表明，在使用全向天线时，随着业务速率的增加，网络的吞吐量先上升，然后趋于极限值，此时增大业务速率，吞吐量并不会增大，并导致丢包率剧增。而采用多天线进行空分复用后，在业务速率比较小时(8 Mb/s 和 10 Mb/s)，吞吐量与使用全向天线的吞吐量相差不大，因为此时网络容量并没有达到最大。在业务速率比较大时(12 Mb/s 以上)，采用空分复用的网络吞吐量明显上升，这是因为采用扇区天线不但从空间上减少了冲突域内节点的个数，而且增加了单跳传输的距离，减小干扰，从而将显著增大网络的容量。在业务速率分别为 12 Mb/s、15 Mb/s、20 Mb/s、25 Mb/s 时，通过空分复用，系统端到端吞吐量分别比使用全向天线提高了 21.8%，42.9%，49.4% 和 49.4%。

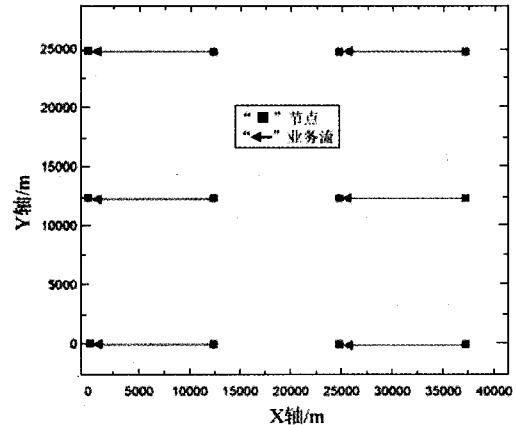


图 3 网络拓扑为 9 节点时业务流发送示意

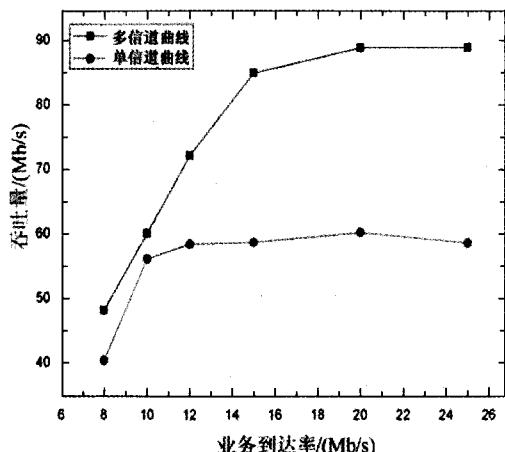


图 4 吞吐量与业务速率关系

2.2.2 8个节点均匀分布场景下吞吐量和时延性能

如图5所示的典型3跳拓扑结构中,分布着8个节点,节点编号为0~7,包含了3路VoD和15路VoIP业务,具体的业务流发送情况如表1所示。在这种场景下,针对节点是否采用空分复用技术进行系统的吞吐量和时延仿真比较,如表2所示。

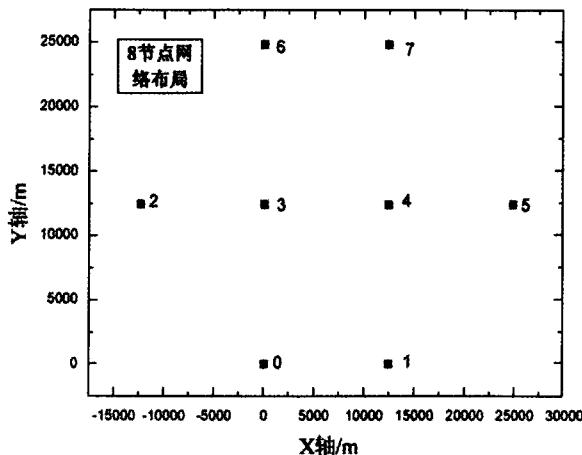


图5 三跳8节点典型拓扑网络

表1 业务流发送情况

业务类别	1跳	2跳	3跳
VoIP	2→3,0→3	0→6,1→5	
	3→4,7→4	7→3,0→4	7→0
	3→0,1→4	6→4,3→1	6→1
	6→7,4→5		
VoD	6→7	0→4	6→1

表2 仿真结果

业务(单位)	1跳	2跳	3跳
VoIP 业务条数	8	5	2
VoD 业务条数	1	1	1
VoIP 端到端平均时延/ms	23.83	44.96	84.88
VoD 端到端平均时延/ms	24.77	63.66	108.03
VoIP 单路丢包率/(packets/s)	0.03	0.2	0.375
VoD 单路丢包率/(packets/s)	0	0.25	0.375
VoIP 业务容量/(kb/s)	679	401.5	133.5
VoD 业务容量/(kb/s)	990.3	999.5	1007.7

表2为图5所示场景时,网络直径为3跳的情况下,同时支持3路VoD、15路VoIP的仿真结果。从表2中可以看出在网络直径3跳情况下,能同时支持3路视频、15路VoIP电话,并且VoIP最大时延不超过150 ms。但业务的时延和网络的吞吐量等指标由于网络拓扑以及网络负载情况不同而不同,这里给出了在网络负载在比较均衡并且同时存在1跳,2跳,3跳的业务流情况下的仿真结果。

3 结语

针对慢移动和高负荷应用场景下(如海上舰船间网络)的无线自组网MAC技术,提出了一种基于方向性天线与全向天线相结合的动态TDMA MAC协议方案。设计了帧结构和时隙分配方式,采用方向性天线进行空分复用,实现网络节点间的协同传输。最后,采用NS-2工具构建了仿真模型,对所提出的MAC协议与传统的全向天线MAC协议进行仿真分析及对比,结果表明:提出MAC协议具有较好的空分复用性能,减小了业务传输时延,提高了网络吞吐量。

参考文献

- [1] KO Y B, SHANKARKUMAR V, VAIDYA N H. Medium Access Control Protocols Using Directional Antennas in ad hoc Networks[C]// INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE, Aviv, Israel: IEEE, 2000:13-21.
- [2] KORAKIS T, JAKLLARI G, TASSIULAS L. A MAC Protocol for Full Exploitation of Directional Antennas in Ad-hoc Wireless Networks[M]. USA: ACM Press, 2003.
- [3] CORDEIRO C DE M, GOSSAIN H, AGRAWAL D P. A Directional Antenna Medium Access Control Protocol for Wireless Ad Hoc Networks[J]. Revista da Sociedade Brasileira de Telecomunicacoes, 2004, 13(02):61-73.
- [4] CHOUDHURY R R, VAIDYA N H. Deafness: a MAC Problem in Ad Hoc Networks when Using Directional Antennas. Network Protocols[C]// 2004. ICNP 2004. Proceedings of the 12th IEEE International Conference. [s. l.]: IEEE, 2004:283-292.
- [5] 杨军,李建东,周晓东.一种新的有效支持智能天线应用的多址接入协议[J].电子学报,2004,32(10):1600-1604.
- [6] 赵力强,樊昌信.支持智能自适应阵列天线的无线局域网媒体接入控制协议[J].西安电子科技大学学报:自然科学版,2004,31(04):602-607.
- [7] TAKATA M, NAGASHIMA K, WATANABE T. A Direction Antennas-Based Dual Model MAC Protocol for Ad hoc Networks[C]// Performance, Computing, and Communications, 2004 IEEE International Conference on IEEE. [s. l.]: IEEE, 2004: 579-584.
- [8] 侯蓉晖,史浩山,杨少军.无线传感器网络链路统计特性研究与应用[J].系统仿真学报,2007,19(07):33-37.
- [9] ZHAO C C, HU J L, ZHOU J H, et al. Channel Quality Dependent Rate-limited Scheduling Algorithm for IEEE 802.16 Wireless Networks[C]// International Conference on Communications and Mobile Computing (CMC), 2009. [s. l.]: CMC, 2009: 402-406.
- [10] 单志龙,兰丽. Ad hoc 网络中基于定向天线的 MAC 协议[J].计算机工程,2010,36(02):21-24.

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>