

一种适用于自组网的多信道轮询多址 MAC 协议

彭 艺¹ 赵东风² 查光明¹ 周正中¹

(电子科技大学通信学院 成都 610054)¹ (云南大学信息学院 昆明 650091)²

摘要 本文针对节点具有多个可用信道的自组网,提出了一种基于令牌环的多信道轮询多址 MAC 协议,协议在控制信道上采用令牌轮询接入方式来实现节点公平接入信道,通过令牌的传递预约数据信道来实现动态按需分配信道的数据传输,并对该协议进行了性能分析。

关键词 多信道,令牌环,自组网

A Multi-channel Polling MAC Protocol for Ad-hoc Networks

PENG Yi¹ ZHAO Dong-Feng² CHA Guang-Ming¹ ZHOU Zheng-Zhong¹

(Institute of Communication and Information Engineering, UESTC, Chengdu 610054)¹

(Institute of Network and Communication, Information Academy of Yunnan University, Kunming 650091)²

Abstract A multi-channel polling MAC protocol based on token ring for ad hoc networks with multiple channels available is presented in this paper, which uses the polling access of token to realize the node access on control channel fairly and follows an "on-demand" method to assign channels to mobile hosts dynamically by the pass of token, and the performance of protocol is analyzed.

Keywords Multi-channel, Token ring, Ad-hoc network

1 引言

自组网(ad hoc networks)是一种特殊的对等式网络。它使用无线通信技术,网络中的节点互相作为其邻居(在直接通信范围内的节点)的路由器,通过节点转发实现节点之间的通信。由于自组网特殊的组织形式,无法直接采用固定网络和中心无线网络(如蜂窝网)的很多协议,因而需要设计专门适用于自组网的协议。其中,MAC 协议是自组网设计和研究的主要技术难点之一。网络的性能如吞吐量、容量、时延及功耗等性能都依赖于所采用的 MAC 协议,其设计目标有两个方面:公平性和高信道利用率,即在尽量保证节点公平占用信道的情况下充分利用有限的频率资源。

根据自组网中 MAC 协议使用的信道数目,又可把已有的自组网 MAC 协议分为基于单信道和基于多信道(含双信道)的 MAC 协议。目前在自组网中研究得最多的 MAC 协议是单信道 MAC 协议,其主要问题是在多跳环境下存在隐藏、暴露终端问题以及移动节点数的增加将加剧节点间的竞争和分组发送的冲突,使得网络性能随之急剧下降,信道利用率降低^[1]。解决竞争和冲突问题的有效方法之一是采用多信道。由于网络中有多个信道,相邻节点可以使用不同的信道同时进行通信,接入控制更加灵活。采用多信道可以获得优于单信道的网络时延特性^[1],还可以使网络具有更好的抗衰落和噪声容限。由于单信道 MAC 协议的最大吞吐量受限于信道带宽,因此如果每个节点使用多信道,其吞吐量将立即获得提升。另外,单信道难以对 QoS 进行支持,而采用多信道则更容易实现 QoS 支持。

目前已经有不少关于多信道的 MAC 协议提出。文[2]将 MACA 与扩频 MAC 协议结合起来,提出了基于公共信道和基于收发信机信道进行信道预约和数据发送的两种多信道

协议,提高了 MACA 协议对节点移动性的适应能力。文[3]提出了一种动态信道分配的多信道 MAC 协议,该协议是度无关的,且不需要移动主机之间的时钟同步。文[4]将文[3]与功率控制相结合,以期获得更好的频率复用和延长电池使用时间。文[5]提出了一种提供差分服务和解决隐藏多信道问题的多信道 MAC 协议,在节点数较少或网络业务量较小时能够获得较好的信道效率和公平性。目前的多信道 MAC 协议都是将网络中的多个信道分为一个控制信道和多个数据信道,大都采用在控制信道上交换控制信息来选择相应的数据信道进行数据传输。协议采用公共信道发送 ACK 的方法,容易降低网络在业务流较大情况下的吞吐率性能和网络协议的可靠性。由于在控制信道上采用竞争的接入方式,使得控制信道成为所提出的多信道 MAC 协议的性能瓶颈。而且典型的竞争协议都基于 CSMA/CA,采用冲突避免的方法尽力消除数据分组的冲突,会存在信令分组冲突时的远近效应、衰落和信道捕获效应^[1],难以提供服务质量(QoS)和公平性保证。

因此,本文提出一种将令牌和预约方式结合起来对信道进行动态按需分配的多信道 MAC 协议。针对自组网中的多信道,将其分为一个控制信道和多个数据信道,在控制信道上采用令牌环轮询接入方式来实现收发节点公平接入信道,通过令牌的传递预约数据信道来实现动态按需分配信道的数据传输,从而提高了信道的利用率。

2 协议描述

2.1 系统网络模型与信道状态表

在网络的多个可用信道中选择一个信道作为全网的公共控制信道,以传递公共控制信息,其余的信道作为数据信道。假设网络中共有 N 个节点、 M 个信道(其中信道 1 为公共控

彭 艺 博士研究生,研究方向是无线通信系统及其信号处理;赵东风 博士生导师,教授,从事无线网络通信的研究;查光明 教授,从事软件无线电、扩频通信的研究;周正中 博士生导师,教授,从事信号处理和软件无线电学科的研究。

制信道,信道 2,3,...,M 为数据信道),网络中每个节点 i 都维护一个信道状态表(channel.list(i)),状态表包含:信道 ID 号、信道状态和当前驻留在该信道上的节点 ID 号,用来记录节点的忙闲状态和信道占用情况。系统初始化时,所有节点都驻留在公共信道,节点维持的信道状态表如表 1 所示。当网络中某对节点要进行通信时,需对信道状态表进行更新。如当节点(i,j)占用信道 k 进行通信时,信道状态表修改为表 2 所示。通信完毕时,又更新信道 k 状态为闲。

表 1 系统初始化后的信道状态表

Channel.ID	Channel.status	Node.ID
1	忙	1,2,...,N
2	闲	0
-----	-----	-----
k	闲	0
-----	-----	-----
M	闲	0

表 2 k 信道占用后的信道状态表

Channel.ID	Channel.status	Node.ID
1	忙	1,2,...,N
2	闲	0
-----	-----	-----
k	忙	(i,j)
-----	-----	-----
M	闲	0

2.2 无线令牌环

所有节点驻留在公共信道上时会形成一个无线令牌环,如图 1 所示。其特点是信道的使用权是通过一种特殊的信号帧——令牌来分配的。由于令牌通常是按一种逻辑环的顺序进行传递,因此这类控制方式又称为令牌环。采用令牌环的控制方式,可以避免类似于集中控制方式中的中心结点 AP 失效导致整个网络瘫痪,具有较好的鲁棒性。

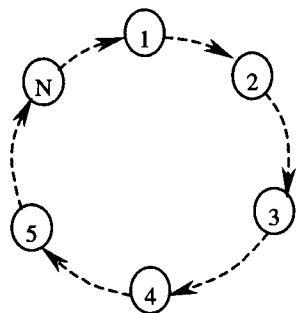


图 1 无线令牌环示意图

要发送数据的节点,产生一令牌帧,传给接收节点来预约信道。双方达成一致后,转到预约信道上进行数据传输,完成之后回到基于无线令牌环的公共信道上。环内传输的令牌帧有 3 种类型:请求帧、响应帧和释放帧,格式如图 2,3 所示。

FC	RA	DA	SA	Seq	$I_{idle}(i)$	Channel.ID	NNA	FCS	
2	6	6	6	4	0-128	8	6	2	Byte

图 2 请求帧格式

FC	RA	DA	SA	Seq	Channel.ID-status	FCS	
2	6	6	6	4	2	2	Byte

图 3 响应帧和释放帧格式

图中,FC 是帧控制字段(Frame Control),它定义了帧的类型;

RA 是环地址(Ring Address),表明令牌是属于哪个令牌环网络,以区别不同无线令牌环上的令牌;

DA 是目的地址(Destination Address),即令牌传输的目的节点地址;

SA 是源地址(Source Address),即发出令牌的源节点地址;

Seq 是序列号(Sequence number),初始值为 0。当令牌每经过一个站点,序列号就加 1;当返回令牌环的发起站时,Seq 就清 0;

NNA 是下一个获得令牌的节点地址(Next Node Address);

$I_{idle}(i)$ 是节点 i 信道状态表中的空闲信道号的集合;

Channel.ID 是预约的数据信道号,在请求帧中为 0;

Channel.ID-status 是预约的数据信道的状态,有忙、闲两种;

Fcs 是校验字段。

2.3 数据传输过程

假设网络中有 N 个节点和 $M (N > M)$ 个可用的信道,选择其中一个信道为网络的公共控制信道,其余 $M-1$ 个信道为所有节点按需预约的数据信道。

2.3.1 初始化

系统初始化后,所有节点都驻留在公共控制信道上,形成一个无线令牌环。每个节点都维护着一张信道状态表,其内容如图 1 所示。系统产生一令牌,依次轮询各节点是否有数据要发,拥有令牌的节点可进行发送请求。

2.3.2 发送请求

当节点 i 要发送数据给节点 j 时,先发出一令牌请求帧,其格式如图 2 所示。该帧中 DA 为节点 j 的地址,SA 为节点 i 的地址,Seq 初始值为 0。令牌每经过一个站点,序列号就加 1;当返回令牌环的发起站 i 节点时,Seq 就清 0。当节点 i 收到 Seq=0 的令牌帧时,就回收该帧。节点 i 查看自己的 channel.list(i),然后将空闲的信道 ID 号填入请求帧中 $I_{idle}(i)$ 字段。这时的 Channel.ID 和 NNA 字段都为 0。

节点 i 的请求帧发出后,在环中按顺序传递,每个节点对经过的请求帧都进行接收。接收下来后,首先检查 DA 是否为自己的地址。如果不是,还要看自己是否有数据要发。如果有数据要发,则修改 NNA 为自己的地址,然后转发出去;如果不发数据,则不改动请求帧,继续转发给下一节点。如果 DA 为自己的地址,则知节点 i 要和自己进行通信,这时从请求帧中的 $I_{idle}(i)$ 随机选一个信道出来进行数据传输。将选出来的信道号填入 Channel.ID 中去,最后将该帧转发到下一节点。

节点 i 收到自己发出的请求帧后,首先查看 Channel.ID 内容。若 Channel.ID 内容不为 0,则知道接收节点已经准备好接收并预约了数据信道;如果仍为 0,则表示接收节点忙,需随机等待下次令牌到来再传。然后查看 NNA 字段。若不为空,则将令牌传给 NNA 中的要传数据的节点;若为空,则将令牌传给下一节点。

2.3.3 信道预约

当接收节点 j 收到节点 i 传来的请求帧后,选择好要传的数据信道(假设选中 k 信道),修改请求帧中的 Channel.ID = k 然后转发出去,同时节点 j 发出一响应帧来通知环上各

节点修改相应的信道状态。响应帧中 DA 为节点 i 的地址, SA 为节点 j 的地址, Channel. ID-status 字段中内容为 Channel. k-status="忙"。Seq 初始值为 0, 当令牌每经过一个站点, 序列号就加 1; 返回令牌环的发起站 j 节点时, Seq 就清 0。当节点 j 收到 Seq=0 的令牌帧时, 就回收该帧。

当响应帧在环上流动时, 每经过一个节点都会看到 Channel. ID-status 字段内容, 则知该字段中的 k 信道已经被预约了, 于是更新自己的信道状态信息表, 将 k 信道的状态改为忙状态。当节点 i 收到响应帧后, 就切换到 k 信道上进行数据传输, 节点 j 在回收响应帧后也切换到 k 信道上进行数据传输。

2.3.4 数据传输与释放信道

节点 i 和节点 j 在信道 k 上传输信息期间, 一直占用 k 信道到信息传输完毕。在节点 i 和节点 j 传输数据完毕后, 双方都回到公共控制信道上, 由接收节点 j 发一释放帧来释放 k 信道。响应帧中 DA 为节点 i 的地址, SA 为节点 j 的地址, Seq 初始值为 0, Channel. ID-status 字段中内容为 Channel. k-status="闲"。令牌每经过一个站点, 序列号就加 1; 返回令牌环的发起站 j 节点时, Seq 就清 0。当节点 j 收到 Seq=0 的令牌帧时, 就回收该帧。这样, 当释放帧在环上流动时, 就通知了环上各节点, 更新了信道状态信息表。

3 协议性能分析

本文所提出的协议是在公共控制信道使用令牌环来实现多信道的接入, 一旦通过令牌传输约定了数据信道后, 将在该信道上完成数据的传输。假定网络是全互联的, 公共控制信道上的令牌环可认为是一个轮询系统。轮询系统又称为周期查询系统, 在逻辑上可以看作是一种多队列、单服务器循环服务的排队系统。在这种排队系统中, 每个队列都按秩序、周期性地获得服务器的服务, 并按终端站服务时间的长短来划分, 可分为完全服务、门限服务和限定服务 3 种类型。按协议的设计思想来看, 本文提出的系统属于离散时间完全服务轮询系统。在分析轮询系统的时候, 平均等待时间和平均排队队长是衡量系统性能的两个重要指标, 本文采用概率母函数和马尔可夫链进行理论解析结果的推导求解。

假设系统中有 N 个终端站, 每个站由中心服务器(逻辑性服务器)依次序查询服务。假设 i 号终端站($i=1, 2, \dots, N$) 在 t_n 时刻接受服务器提供的服务, 当 i 号终端站发送完其存储器内按完全服务协议规定的信息分组后, 经过一个转换时间接着查询第 $i+1$ 号终端站, $i+1$ 号终端站是在 t_{n+1} 时刻开始查询、接受服务的。每个终端站在任何一个时隙期内都以相互独立、同分布的概率分布向各自的存储器内送入信息分组, 其分布的概率母函数、均值和方差分别是 $A(z)$, $\lambda=A'(1)$ 和 $\sigma_a^2=A''(1)+\lambda-\lambda^2$; 任何两个相邻的忙终端站之间的查询转换时间变量服从于一个相互独立、同分布的概率分布, 其分布的概率母函数、均值和方差分别是 $R(z)$, $\gamma=R'(1)$ 和 $\sigma_r^2=R''(1)+\gamma-\gamma^2$; 任何一个终端站在接受服务时, 即由其存储器内向外发送一个信息分组, 所用的时间变量服从于一个相互独立、同分布的概率分布, 其分布的概率母函数、均值和方差分别是 $B(z)$, $\beta=B'(1)$ 和 $\sigma_b^2=B''(1)+\beta-\beta^2$ 。在所讨论的排队服务系统中, 每个终端站的存储器容量足够大, 不会产生信息分组丢失现象, 服务规则按先到先服务的原则进行。

参照文[6]可分析得到系统在 t_{n+1} 时刻的状态变量的概

率母函数为:

$$G_{i+1}(z_1, z_2, \dots, z_i, \dots, z_N) = R_i \left[\prod_{j=1}^N A(z_j) \right] G_i(z_1, z_2, \dots, z_{i-1}, \dots, B_i \left(\prod_{j=1, j \neq i}^N (A(z_j)) \right) F_i \left(\prod_{j=1, j \neq i}^N (A(z_j)) \right), z_{i+1}, \dots, z_N] \quad (1)$$

定义在 t_n 时刻第 i 号终端站开始接受服务时, 第 j 号终端站的存储器中平均存储的报文数是:

$$g_i(j) = \lim_{z_1, z_2, \dots, z_i, \dots, z_{N-1} \rightarrow 1} \frac{\partial G_i(z_1, z_2, \dots, z_i, \dots, z_N)}{\partial z_j} \quad (2)$$

将(1)式代入(2)式, 求得平均排队队长为:

$$g_i(i) = \frac{N\lambda(1-\rho)}{1-N\rho} \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (3)$$

定义信息分组的等待时间 w_i 表示一个分组信号从进入 i 号终端站($i=1, 2, \dots, N$) 的存储器到其被发送出去的时间。其中, 对于离散时间系统, 分组在某一时隙中的任一时刻到达, 到这一时隙结束的时间定义为剩余时间 \bar{w}_i , 可以得到信息分组等待发送的平均时间^[6]:

$$E[w_E] = \bar{w}_i - \bar{w}_s = \frac{1}{2} \left\{ \frac{R''(1)}{\gamma} + \frac{1}{1-N\rho} [(N-1)\gamma + (N-1)\rho + N\lambda B''(1)] + \frac{\rho A''(1)}{\lambda^2(1-N\rho)} \right\} \quad (4)$$

结束语 传统的多信道 MAC 协议采用在公共控制信道上使用 CSMA/CA 的接入方式, 使得控制信道成为所提出的多信道 MAC 协议的性能瓶颈。基于此, 本文提出了一种将令牌和预约方式结合起来对信道进行动态按需分配的多信道 MAC 协议, 针对自组网中的多信道, 将其分为一个控制信道和多个数据信道, 在控制信道上采用令牌环轮询接入方式来实现收发节点公平接入信道, 并通过令牌的传递预约数据信道来实现动态按需分配信道的数据传输。协议采用“按需”的方式对移动节点进行动态地信道分配, 消除了固定分配方式中无数据传输的节点仍然要占用信道所造成的信道资源浪费。本文还采用概率母函数和马尔可夫链方法对协议所属的离散时间完全服务轮询系统进行了理论性能分析, 得到了系统平均等待时间和平均排队队长的理论解析结果。

参考文献

- Li Jiandong, Haas Z J, Sheng Min. Capacity evaluation of multi-channel multi-hop ad hoc networks. In: 2002 IEEE Intl. Conf. on Personal Wireless Communications, 2002. 211~214
- Joa-Ng M, Lu I T. Spread spectrum medium access protocol with collision avoidance in mobile Ad-hoc wireless network. In: Proc. of Eighteenth Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies, IEEE INFOCOM'99, 1999, 2: 776~783
- Wu S-L, Lin C-Y, Tseng Y-C, et al. A new multi-channel MAC protocol with on-demand channel assignment for multi-hop mobile ad hoc networks. In: Intl. Symposium on Parallel Architectures, Algorithms and Networks, 2000. 232~237
- Wu S-L, Lin C-Y, et al. A multi-channel MAC protocol with power control for multi-hop mobile ad hoc networks. In: Intl. Conf. on Distributed Computing Systems Workshop, 2001. 419~424
- Choi Nakjung, Seok Yongho, Choi Yanghee. Multi-channel MAC protocol for mobile ad hoc networks. In: 2003 IEEE 58th Vehicular Technology Conference, 2003. 2: 1379~1382
- 赵东风, 郑苏民. 查询式完全服务排队模型分析. 电子学报, 1994, 22(5): 102~107