

一种新的拓扑无关的按需分配多信道自组网 MAC 协议^{*})

郑相全 郭伟 黄磊

(电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室 成都 610054)

摘要 本文针对节点具有多个可用信道的自组网,提出了一种与拓扑无关的多信道 MAC 接入协议,协议采用按需预约的方式进行动态的信道分配,通过携带在信道预约消息中的节点邻居状态信息实现节点信道状态的更新。该协议所需信道数与网络的拓扑和度无关,克服了拓扑相关的多信道 MAC 协议不适用于节点密集的应用场合的问题。在协议开销增加很小的情况下,每个节点只需要一部半双工收发信机就能够实现在多个信道上高效的数据收发,不需要节点间的时钟同步,极大地降低了对网络节点设备的硬件要求,具有良好的应用前景。仿真结果表明,协议在网络总吞吐量、端到端时延等方面具有优良的性能。

关键词 自组网,信道接入协议,信道分配,多信道

A Novel Topology-independent MAC Protocol with on-Demand Channel Assignment for Multi-Channel Ad-hoc Networks

ZHENG Xiang-Quan GUO Wei HUANG Lei

(National Key Laboratory of Communication, UEST of China, Chengdu 610054)

Abstract A novel topology-independent medium access control scheme for ad hoc networks with multiple channels available is presented in this paper, which follows an "on-demand" method to assign channels to mobile hosts dynamically, and exploits the status information of neighbor nodes piggyback on channel-reservation messages to update the channel status recorded in nodes. The number of channels that the protocol requires is independent of the network topology and degree makes the protocol well adaptive to crowded environment, for which the topology-dependent MAC protocols are inappropriate. The protocol may lead to efficient data transmission on multiple channels with only one half-duplex transceiver each node, at the same time with few control messages exchange as well as little overhead increment, and without clock synchronization, which greatly simplifies the hardware configuration of nodes within network and broads its usage areas. By presenting and analyzing simulation results, the protocol is shown to result in good performance in the aspects of packet delivery ratio and average end-to-end delay, which makes it well adaptive to the dynamic ad hoc network environment.

Keywords Ad hoc networks, Channel access protocol, Channel assignment, Multi-channel

1 引言

自组网(ad hoc networks)^[1]的研究起源与 TCP/IP 协议族类似,是一种移动通信和计算机网络相结合的网络,整个网络没有固定的基础设施,可以在不能利用或不利用现有网络基础设施的情况下提供一种通信支撑环境,拓宽了移动网络的应用场合,可以广泛应用于国防战备、灾难救助、偏远地区等无法得到有线网络支持或某些只是临时需要通信的环境,满足用户对移动数据通信的需求。由于自组网的特殊组织形式,固定网络和有线中心无线网络(如蜂窝网)的很多协议无法直接被它采用,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、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^[2]。

根据信道分配方式的不同,自组网中的 MAC 协议可分为竞争协议、预留协议和混合协议。竞争协议相对容易实现,但采用竞争协议的节点当有分组要传送时以自由竞争的方式

占用信道。分组之间发生冲突的可能性很大,适用于业务量比较小的网络。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,但存在信令分组冲突时的远近效应、衰落和信道捕获效应,而且难以提供服务质量(QoS)和公平性保证。采用预留协议的节点按照预定的分配方案或通过协商的方式占用信道,由于节点之间进行了预先协调,因而使用这种协议的节点在其有效的传输范围之内占用信道传输数据通常不会产生冲突,在提供 QoS 和节点占用信道的公平性方面具有优势。但预留协议通常需要中心基站进行端到端的信道预约,这在自组网中是难以实现的。在自组网中寻求最优的信道接入方案往往最终会导致图论中的 NP-问题(如对点或边的 k -着色)^[3~4],因此在很多情况下都需要对问题进行简化,通过采用随机方式或基于节点度等图形特征的启发式方法而获得次优的解决方案,如将随机竞争和预留分配结合起来的混合协议,以尽量实现各节点接入信道的公平性和信道利用率的提高。目前,多数混合协议都通过数据分组发送之前在邻居节点之间的消息交换^[5]或者带内信令^[6](如 RTS/CTS 握手)的方式为节点动态分配临时的接入信道,但邻居节点之间的消息交换或带内信令会引入较长的时

^{*} 国家级重点实验室基金项目(No. 51434020101ZS0404)、战术通信抗干扰技术国防科技重点实验室基金项目(No. 51434040103ZS0401)和重庆市科技计划项目(No. 0830)资助。郑相全 博士研究生,主要研究方向是自组网技术、软件无线电组网技术等。郭伟 教授,博士生导师,主要从事网络优化设计及仿真技术、网络可靠性、自组网技术、信号检测与处理技术等方面的研究。

延和消耗相当部分的带宽。为避免采用文[6]中拓扑相关 MAC 协议的带内信令,文[7]提出了一种拓扑透明的信道分配方式,但发送节点必须在一个帧的不同时隙发送其分组,使得帧长(时隙数)远大于其两跳内的邻居节点数,协议对于网络规模的可扩展性较差。

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,其设计难点主要集中在解决隐藏终端和暴露终端问题,大多数的协议都采用 RTS/CTS 分组的预约机制来解决该问题,该机制也被广泛接受的基于单信道模型的 IEEE802.11 标准所采纳。采用单信道的一个共同问题就是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^[3]。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^[4],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,其吞吐量将立即上升。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。

随着技术的进步,现在已经有可以通过一个 DSP 控制多达 260 个信道的无线设备,不同信道间的切换可以在 1 μ s 内完成,使得在每个节点处采用廉价而简单的设备就可以构建多信道网络。因此本文主要针对自组网中的多信道进行 MAC 协议的设计,提出一种拓扑无关的多信道 MAC 协议,将竞争和预约方式结合起来对信道进行动态按需分配,在邻居节点之间进行少量信息交换的基础上尽量实现节点公平接入信道和信道利用率的提高。

2 多信道自组网 MAC 协议研究现状

基于多信道的自组网 MAC 协议用于具有多个信道的自组网络,主要研究信道分配和接入控制两个方面的内容,前者负责为通信节点对分配相应的信道,使尽量多的节点可以无冲突地同时通信,后者负责确定节点接入信道的时机、冲突的避免和解决方式。多信道的接入控制比单信道更加灵活,可以使用其中一个信道作为公共控制信道,也可以采用控制分组和数据分组在同一个信道上混合传送的方式。

目前已经有不少关于多信道的 MAC 协议提出。文[9,10]主要针对传统分组无线网络的信道分配,协议对移动性支持较弱。文[11]将 MACA^[12]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[13,14]提出了两种类似于 IEEE802.11 的 MAC 协议,将数据业务和控制业务流分别在不同的信道中传输,由于只考虑了一个数据信道,因此它们仅仅是多信道 MAC 协议的一种特例。文[15]提出了一种基于拉丁方的 MAC 方案,采用一种 TDMA-over-FDMA 的技术进行固定的信道分配。文[16]提出了一种由接收机发起的冲突避免 MAC 协议 RICH-DP,该协议无需进行载波侦听或对每个移动主机都分配不同的信道码就能实现在隐藏终端存在的情况下在接收端无冲突地接收数据。文[17]提出了一种对移动主机进行动态信道分配的协议,该协议要求两跳之内的移动主机必须分配彼此互不相同的信道。因此,只要两跳之内的任意一个主机的信道发生了变化,就需要大量地更新消息以保证上述协议要求得到满足,这对于移动性较强的自组网来说难

以获得较高的信道使用效率。而且,协议需要的信道数正比于网络的最大连接度的平方,即该协议是度相关的,因此不适用于节点密集的应用场合。文[18]提出了一种度无关的多信道 CSMA 协议,协议假定每个移动节点有与信道数相同数量的接收机能够同时侦听所有信道,但只有一部发射机在不同信道上跳转以实现在任意被检测为空闲状态的信道上发送数据。该协议的硬件要求较高,且没有类似于 RTS/CTS 的预约机制解决隐藏终端的问题。文[19]提出了一种与网络度无关的基于慢速跳频的逐跳预约 MAC 协议,但需要在所有移动主机之间实现时钟同步,这在节点稀疏分布于一个广阔地域情况下的自组网中是难以实现的。文[20]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[21]将文[20]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[22]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低时能够获得较好的信道效率和公平性,但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。文[23~30]针对 CSMA 和 RTS/CTS 无法解决的具有不同发射功率的异构隐藏终端和暴露终端问题(heterogeneous hidden terminal problem/ heterogeneous exposed terminal problem)提出了可变发射半径的多信道 MAC 协议,通过功率控制和干扰感知的方式获得信道利用率的提高。文[31]通过一种自适应规避算法以实现自组网在多信道情况下对多种业务类型一定程度的 QoS 支持。文[32]提出了一种基于接收机的协议 SNDR,采用邻居排序和双重预约的方法来避免竞争和提高网络吞吐量,但该协议由 SNDR 帧引入的传输时延也比较大,而且发送节点必须等待接收节点产生了帧开始信号或者计时器超时的情况下才能发送数据,降低了 SNDR 的吞吐量。文[33]在文[32]的基础上将有传输请求的多信道网络抽象为一个有向图,采用最大对集(匹配)算法以最大化信道利用率,通过“禁止时间”方案解决了基于接收机的 MAC 协议带来的盲目等待问题。

每一种协议都有其特定的适用范围和先决条件,在其假定的条件下具有最优性能表现,在其它应用环境中则表现出一定的缺陷和不足,相应地有其自身的局限性。如文[9,10,11,15,32,33]中的节点即使没有数据传输仍然需要占用信道资源,文[9,10,17,20,21]要求网络中节点移动性不大,文[9,10,11,17,32,33]中协议需要的信道数是网络最大连接度的函数(拓扑相关的协议),文[15,16,19]要求在所有移动节点间实现时钟同步,文[15,18]要求网络中每个节点都有与信道数相同数量的接收机以便能够同时接收所有信道上的信息,文[31]需要两部半双工收发信机,文[22]适用于节点数较少或网络业务量较低的情况,文[23~30]需要复杂的硬件设备实现功率控制和干扰感知。

基于此,本文提出一种新的多信道 MAC 方案,采取按需方式对信道进行动态“软”预约,节点不发送数据时不占用信道资源,协议所需要的信道数与网络的拓扑和最大连接度无关,不需要在所有网络节点之间进行时钟同步,每个节点只需要一部收发信机进行信道状态监测和数据收发。协议能够很好地支持节点的移动性和适应网络业务流强度的变化,对节点的硬件配置要求很低,具有很强的环境适应能力和广泛应用前景,特别适用于网络节点的硬件条件受限的应用场合,如可应用于我军一些现有无线通信装备的组网自动化^[35]以及软件无线电台网络^[36]或新一代超宽带无线 ad hoc 网^[37]中。

3 协议描述

3.1 协议设计思想

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用以传递公共控制信息,其余的信道作为数据信道。网络中每个节点 i 都维护一个邻居节点状态表(Neighbor.list(i))、一个信道状态表(channel.list(i))和一个成功预约的信道号(Suc.chan.id)变量,记录邻居节点的忙闲状态和信道占用情况以及上一次进行数据收发时成功预约的数据信道。两个状态表包含如下内容:邻居节点 ID 号(Neighbor.ID)、邻居节点当前驻留的信道号(Channel.ID)、信道状态(Channel.status)和邻居节点对信道还将占用多长时间或本节点需要回退的时间。如图 1 所示的节点 1 的邻居节点状态表和信道状

态表分别如表 1 和表 2 所示(表中 $t_{res}(i, X)$ 为邻居节点 i 还将占用当前驻留的数据信道 X 的剩余时间,Backoff 为节点 1 对控制信道的回退时间,假设 0 为控制信道,节点共有 $M-1$ 个数据信道)。

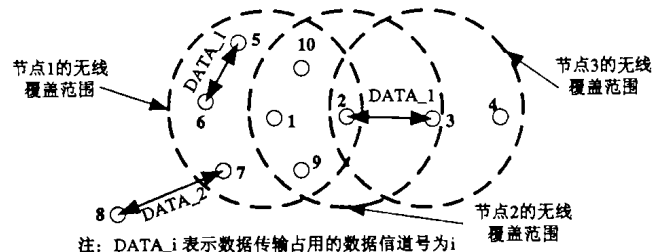


图 1 节点 1 的邻居节点及信道预约情况

表 1 节点 1 的邻居节点状态表

Neighbor.ID	2	5	6	7	9	10
Channel.ID	1	1	1	2	0	0
TIMER	$t_{res}(2,1)$	$t_{res}(5,1)$	$t_{res}(6,1)$	$t_{res}(7,2)$	Backoff	Backoff

表 2 节点 1 的信道状态表

Channel.ID	0	1	2	3	4	...	$M-1$
Channel.status	竞争	忙	忙	闲	闲	...	闲
TIMER	Backoff	$\text{Max}\{t_{res}(2,1), t_{res}(5,1), t_{res}(6,1)\}$	$t_{res}(7,2)$	0	0	...	0

由表 2 可知,节点所维护的数据信道的状态分为“忙”和“闲”两种。对于任意节点 j ,如果节点 j 在控制信道上预约数据信道 X 以前侦听到其他任意节点 i 成功预约数据信道 X 的握手信息,则该数据信道对于节点 j 而言,在该数据信道的信道预约剩余时间 $TIMER.X = t_{res}(i, X)$ 递减到 0 以前都是不可用的,在节点 j 的信道状态表中该数据信道被标注为“忙”状态。其他所有 $TIMER.Y$ 递减为 0 的数据信道 Y 都被标注为“闲”状态。

协议的主要设计思想是有数据发送的节点(发送节点)通过将本节点的邻居节点状态信息嵌入信道预约消息 RTS 中并在公共控制信道上向一跳邻居节点广播,所有收到 RTS 消息的邻居节点都根据 RTS 所携带的信息对本节点所维护的邻居节点和数据信道的忙闲状态进行动态更新。通过上述状态信息更新方法克服了现有大多数多信道 MAC 协议中要求节点具有与信道数相同的多个接收机同时监测所有或多个信道的状态的苛刻条件,节点无需同时对所有信道进行侦听就能保证单工电台组网的实际应用中对漏听节点和信道状态的及时更新和所维护的状态信息的准确快速收敛。作为目的节点的邻居节点(接收节点)在收到 RTS 后,除了对所维护的邻居节点状态表和信道状态表采用上述方法进行更新方法以外,还需要选择对收发双方而言都为空闲的数据信道进行预约。接收节点在选择预约信道时,在“闲”状态的数据信道中优先选择上一次进行数据收发时成功预约的数据信道(“软”预约方式),并将其携带在 CTS 中向发送节点进行预约。发送节点收到 CTS 后,再发送 CONFIRM 对所选择的预约数据信道进行确认。收到 CTS 或 CONFIRM 的周围邻居节点都将修改本节点的邻居节点状态和信道状态表,并抑制本节点在该数据信道的信道预约剩余时间递减到 0 以前预约该已被选择的数据信道。

邻居节点在收到 RTS 后对所维护的邻居节点状态表和信道状态表的更新方法是:先对邻居节点集合取交集,再对交集集中的节点状态和信道状态取“忙-并”。具体描述为:

1. 邻居节点 j 在收到来自节点 i 的 $RTS(i)$ 以后,首先从收到的 $RTS(i)$ 中获得 $Neighbor.list(i)$,再计算 $Neighbor.list(i)$ 中节点状态为忙的邻居节点子集:

$I_{busy} = \{ (Neighbor.list(i) - TIMER > 0) - Neighbor.ID \}$
(其中 $(Neighbor.list(i) - TIMER > 0) - Neighbor.ID$ 表示邻居节点表 $Neighbor.list(i)$ 中 $TIMER > 0$ 的 $Neighbor.ID$ 域中的所有元素);

2. 计算 j 的邻居节点状态表中需要进行状态更新的节点子集:

$J_{to-update} = I_{busy} \cap \{ Neighbor.list(j) - Neighbor.ID \}$
(其中 $Neighbor.list(j) - Neighbor.ID$ 表示邻居节点表 $Neighbor.list(j)$ 中的 $Neighbor.ID$ 域中的所有元素);

3. 根据 $J_{to-update}$ 中的所有元素(需要进行状态更新的节点的 ID 号)获得 $Neighbor.list(i)$ 的一个子邻居节点状态表 $Sub-Nighbor.list(i)$,使其满足:

$\{ Sub-Nighbor.list(i) - Neighbor.ID \} = J_{to-update}$
(其中 $Sub-Nighbor.list(i) - Neighbor.ID$ 表示邻居节点表 $Sub-Nighbor.list(i)$ 中的 $Neighbor.ID$ 域中的所有元素);

4. 用 $Sub-Nighbor.list(i)$ 替换 j 的邻居节点状态表中 $J_{to-update}$ 中所有节点所对应的那部分子状态表,即对“忙”状态取“并”操作:

$Sub-Nighbor.list(i) \cup_{\#} Neighbor.list(j) \rightarrow Neighbor.list(j)$;

5. 根据更新后的 $Neighbor.list(j)$ 生成新的信道状态表 $channel.list(j)$ 。

接收节点在收到 RTS 后,除了对所维护的邻居节点状态表和信道状态表采用上述方法进行更新方法以外,还需要选择对收发双方而言都为空闲的数据信道进行预约。空闲数据信道的选择方法是:先通过 $Neighbor.list(i)$ 计算得到 $channel.list(i)$,再对 $channel.list(i)$ 和 $channel.list(j)$ 中的信道状态取“闲-交”,得到对收发双方而言都同时为空闲状态的数据信道集合 $IDLE(i, j); IDLE(i, j) = channel.list(i) - chan-$

$nel.ID \cap_{\text{网}} channel.list(j) - channel.ID$; 之后,再判断 $Suc.chan.id \in IDLE(i,j)$ 是否为真,如果为真,则选择信道 $Suc.chan.id$ 进行预约,否则在 $IDLE(i,j)$ 中任意选择一个元素作为预约的数据信道,并对变量 $Suc.chan.id$ 的值进行更新。如果 $IDLE(i,j)$ 为空集,则可通过将公共控制信道的标识放在 $CTS(j)$ 中发给节点 i 以表示没有合适的空闲数据信道可用。

3.2 协议操作方法及步骤

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。定义节点 i 的邻居节点集合为 NV_i 。

步骤 1: 初始化

每个节点 i 开机时,都要对 $Neighbor.list(i)$ 和 $channel.list(i)$ 进行初始化。

步骤 2: 驻留空闲信道

没有数据发送的节点处于空闲状态,均驻留在公共控制信道,并且对 $Neighbor.list(i)$ 和 $channel.list(i)$ 进行维护,此时有如下情况需要处理:

A. 如果收到上层要发送的数据或是有需要转发的数据,跳转到步骤 3。

B. 如果收到 RTS,首先根据 RTS 携带的邻居节点状态信息按照 3.1 节中所述方法更新本节点所维护的邻居节点状态表和信道状态表,然后判断收到的 RTS 的目的节点是否为本节点,如果是,则跳转到步骤 4。否则,判断本节点是否有数据发送,如果有,则进行回退以免和 CTS 发生冲突。如果没有,则继续在公共控制信道上侦听。

C. 如果收到 CTS 或 CONFIRM,则根据 CTS 或 CONFIRM 中预约的信道,按照 3.1 节中所述方法更新本节点所维护的邻居节点状态表和信道状态表,将 CTS 或 CONFIRM 中预约的数据信道的状态修改为“忙”,并将对应的节点的 TIMER 进行重新设置。邻居节点状态表和信道状态表中的“忙”状态只有在计时器的值递减为 0 后,才能重新转换为“闲”状态。

在数据信道的预约过程中,由于 RTS(i) 的发送使得邻居节点进行回退,因此 CTS(j) 和 CONFIRM(i) 通常可以无冲突地被正确接收。

步骤 3: 数据发送

假设节点 i 有数据向节点 j 发送,节点 i 首先查看 $channel.list(i)$ 以判断是否有空闲数据信道可用,如果没有,则继续驻留公共控制信道,等待 TIMER 值最小的数据信道状态转换为“闲”(即对应的 $TIMER=0$),再进行后续操作。如果当前的 $channel.list(i)$ 中有空闲数据信道可用,则节点 i 再查看 $Neighbor.list(i)$ 以判断节点 j 当前所处状态。如果节点 j 处于“忙”状态,则节点 i 再去查看是否有数据需要发送给其它处于“闲”状态的节点 $m(m \in NV_i, \text{且 } m \neq j)$ 。如果节点 j 处于“闲”状态,则节点 i 产生一个携带邻居节点状态信息的 RTS(i),并按照 CSMA/CA 的竞争方式在公共控制信道上向节点 j 发送 RTS(i),即先侦听后发送,遇到冲突后进行随机规避。

节点 i 在公共控制信道上发送 RTS(i) 后,就开始计时等待接收节点 j 的 CTS(j),超时仍然没有收到相应节点 j 的 CTS(j),则表示接收节点 j 处发生冲突,节点进入规避重发状态。在节点 i 没有竞争到公共控制信道而等待重发 RTS(i) 期间,需要处理如下情况:

A. 如果收到由其它节点 $k(k \in NV_i)$ 发给本节点的 RTS

(k),则将本节点的数据发送推后,跳转到步骤 4(数据接收优先的原则的优点)。

B. 如果侦听到其它节点 $m(m \in NV_i, \text{且 } m \neq j)$ 发送的目的节点不为本节点的 RTS(m),根据 RTS(m) 包含的邻居节点状态信息更新本节点的 $Neighbor.list(i)$ 和 $channel.list(i)$,并开始回退一段时间以避免冲突,在回退时间为 0 时再根据最新的 $Neighbor.list(i)$ 和 $channel.list(i)$ 产生新的 RTS(i)。

C. 如果收到节点 j 发送的目的节点不为本节点的 RTS(j) 和 CTS(j),根据 RTS(j) 和 CTS(j) 包含的邻居节点状态信息更新本节点的 $Neighbor.list(i)$ 和 $channel.list(i)$,之后节点 i 再去查看是否有数据需要发送给其它处于“闲”状态的节点 $m(m \in NV_i, \text{且 } m \neq j)$ 。

D. 如果侦听到其它节点 $m(m \in NV_i, \text{且 } m \neq j)$ 发送的包含了预约数据信道的 CTS(k) 或 CONFIRM(k),则节点 i 需要根据 CTS(k) 或 CONFIRM(k) 中预约的数据信道更新 $Neighbor.list(i)$ 和 $channel.list(i)$,并根据更新后的信息判断是否还有空闲数据信道并重新产生 RTS(i)。

E. 如果收到节点 j 发送的 CONFIRM(j),根据 CONFIRM(j) 包含的邻居节点状态信息更新本节点的 $Neighbor.list(i)$ 和 $channel.list(i)$,之后节点 i 再去查看是否有数据需要发送给其它处于“闲”状态的节点 $m(m \in NV_i, \text{且 } m \neq j)$ 。

如果节点 i 在公共控制信道上发送 RTS(i) 后,在计数器超时前收到了节点 j 发送的 CTS(j) 时,则进行如下处理:

A. 如果收到的 CTS(j) 中不包含预约的数据信道,则表明节点 i 维护的 $channel.list(i)$ 中所有标注的空闲信道在节点 j 维护的 $channel.list(j)$ 中并不处于“闲”状态,即 $channel.list(i)$ 中标注的空闲信道被节点 $n(n \in NV_j, \text{且 } n \notin NV_i)$ 占用了。

B. 如果收到的 CTS(j) 中携带预约的数据信道,则根据 CTS(j) 产生一个 CONFIRM(i) 向自己的一跳邻居节点进行广播(其中包含 CTS(j) 中预约的信道),之后节点 i 从公共控制信道转换到 CTS(j) 中预约的数据信道上进行数据发送和接收相应的 ACK 应答。

步骤 4: 接收数据

节点 j 收到目的节点为本节点的 RTS(i) 后,按照 3.1 节中所述方法更新 $Neighbor.list(j)$ 和 $channel.list(j)$,生成 $IDLE(i,j)$,选择空闲数据信道并将其嵌入新产生的 CTS(j) 中发送给节点 i 进行信道预约。节点 j 发出携带有预约数据信道的 CTS(j) 后,就转换到预约的数据信道上进行数据接收和相应 ACK 的应答。

4 协议性能分析与仿真结果

4.1 吞吐量性能分析

为了便于分析,本文采用与文[11]中相同的假设。假定网络是全互联的,分时隙工作(分组的发送只能在时隙开始时刻进行),时隙长度定义为网络握手交互 RTS/CTS/CONFIRM 进行信道预约所需要的时间 τ 。分组长度为时隙的整数倍,平均分组长度为 L 个时隙。数据分组到达间隔服从负指数分布,每个分组的服务时间也服从负指数分布。根据上述假设,系统是离散的,分组的长度和到达间隔占用的时隙数服从几何分布。假设在一个时隙结束时一个分组完成发送的概率为 q ,每个时隙开始时一个节点产生一个分组的概率为 p ,则分组长度 l 满足 $p(l=k) = (1-q)^{k-1}q$,平均长度 $L = 1/q$,每个节点的分组到达间隔 s 满足 $p(s=k) = (1-p)^{k-1}p$,到达率为 $\lambda = p/\tau$ 。假设网络中节点数为 $N(N = 2n, n = 1, 2, 3 \dots)$,系统

状态 x 为网络中正在进行通信的节点对数, 系统状态 k 到状态 m 的一步转移概率 $P_{k,m} = P(x_{t-1} = k, x_t = m)$ 。根据上述假设, 系统状态为一个齐次 Markov 链, 且该 Markov 链是各态历经的^[11], 因此, 转移概率为:

$P_{k,m} = P\{t-1 \text{ 时隙结束时} \text{ 有} i \text{ 对节点结束通信, } t-1 \text{ 时隙内有} j \text{ 对节点成功预约信道}\}$, 其中 i, j 满足 $m = k - i + j$ 。

由于协议只有一个公共控制信道, 且网络全互联, 因此在任一时隙内最多有一对节点成功预约信道, 即 $j=0$ 和 $j=1$ 。所以

$P_{k,m} = P\{t-1 \text{ 时隙结束时} \text{ 有} k-m \text{ 对节点结束通信} / t-1 \text{ 时隙内有} 0 \text{ 对节点成功预约信道}\} \times P\{t-1 \text{ 时隙内有} 0 \text{ 对节点成功预约信道}\} + P\{t-1 \text{ 时隙结束时} \text{ 有} k-m+1 \text{ 对节点结束通信} / t-1 \text{ 时隙内有} 1 \text{ 对节点成功预约信道}\} \times P\{t-1 \text{ 时隙内有} 1 \text{ 对节点成功预约信道}\}$ (1)

由于节点结束通信于节点成功预约信道之间相互独立, 因此(1)式简化为:

$P_{k,m} = P\{t-1 \text{ 时隙结束时} \text{ 有} k-m \text{ 对节点结束通信}\} \times P\{t-1 \text{ 时隙内有} 0 \text{ 对节点成功预约信道}\} + P\{t-1 \text{ 时隙结束时} \text{ 有} k-m+1 \text{ 对节点结束通信}\} \times P\{t-1 \text{ 时隙内有} 1 \text{ 对节点成功预约信道}\}$ (2)

由于

$P\{t-1 \text{ 时隙结束时} \text{ 有} k-m \text{ 对节点结束通信}\} = C_{k-m}^k q^{k-m} (1-q)^m = C_k^{k-m} q^{k-m} (1-q)^m$ (3)

$P\{t-1 \text{ 时隙结束时} \text{ 有} k-m+1 \text{ 对节点结束通信}\} = C_{k-m+1}^k q^{k-m+1} (1-q)^{m-1} = C_k^{k-m+1} q^{k-m+1} (1-q)^{m-1}$ (4)

$P\{t-1 \text{ 时隙内有} 1 \text{ 对节点成功预约信道}\} = P\{t-1 \text{ 时隙内只有} 1 \text{ 个节点预约信道, 且只向空闲节点预约信道}\} = P\{t-1 \text{ 时隙内只有} 1 \text{ 个节点预约信道}\} \times P\{\text{只向空闲节点预约信道}\} = C_{N-2k}^N p(1-p)^{N-2k-1} = (N-2k)p(1-p)^{N-2k-1}$ (5)

$P\{t-1 \text{ 时隙内有} 0 \text{ 对节点成功预约信道}\} = 1 - P\{t-1 \text{ 时隙内有} 1 \text{ 对节点成功预约信道}\} = 1 - (N-2k)p(1-p)^{N-2k-1}$ (6)

将(3)(4)(5)(6)式代入(2)式并化简可得:

$P_{k,m} = (1-q)^{m-1} q^{k-m} \{ [C_k^{k-m} q - C_k^{k-m+1} (1-q)] p(1-p)^{N-2k-1} (N-2k) + C_k^{k-m} (1-q) \}$ (7)

(7)式中 $0 < m \leq N/2, 0 < k \leq N/2$, 且 $m < k+1, m < M-1$ 。对于 $m=0, N/2$ 和 $k=0, N/2$ 都要进行特殊处理:

$P_{0,0} = 1 - C_N^N p(1-p)^{N-1}, P_{0,1} = C_N^N p(1-p)^{N-1}, P_{0,m} = 0 (1 < m < k+1)$ (8)

$P_{k,m} = \begin{cases} (N-2k)(1-q)^k p(1-p)^{N-2k-1} & (m = k+1) \\ 0 & (k+1 < m < N/2) \end{cases}$ (9)

$P_{N/2,m} = C_{N/2}^{N/2-m} q^{N/2-m} (1-q)^m \quad (0 < m \leq N/2)$ (10)

通过以上式子可得到一步转移概率矩阵, 并进而求出系统的平稳分布 $S = \{S_0, S_1, S_2, \dots, S_{N/2}\}$, 该分布给出了平稳条件下系统中不同节点数处于数据发送状态的概率, 则系统的吞吐量为:

$$\gamma = \sum_{m=0}^{N/2} m S_m \quad (11)$$

由于协议采用“软”预约方式, 而且节点在发送前能根据目的邻居节点的忙闲状态抑制对忙节点的发送, 加之在实际的非全连接网络中将使得握手交互成功的概率远大于该假设条件下握手信息交互成功的概率, 使得单控制信道支持的数据信道数或业务流负载强度更大, 从而可使网络获得较(11)式更好的吞吐量性能, 即通过(11)式得到的是网络吞吐量的

下限。与文[11]中的结果进行比较可知, 本文中协议将获得较文[11]中协议更好的吞吐量性能。

4.2 仿真结果

采用仿真工具 OPENET 8.1 对本文提出的多信道 MAC 协议进行性能评估的仿真结果如图 2~4 所示。仿真采用文[8, 20, 21]中的方式进行仿真参数的设置: 将全互联的 60 个节点随机分布, 每个节点的通信范围是 300m, 传播时延为 1us, $SLOT-TIME = 50us, SIFS-TIME = 20us, DIFS-TIME = SIFS-TIME + 2 \times SLOT-TIME = 120us$, 控制分组长度为 256bits。每个节点的分组到达速率为 λ 分组/秒。公共控制信道和每个数据信道都设定为 1Mbps 带宽。仿真中对协议性能的评估主要集中在协议对网络吞吐量和端到端时延的影响。由于采用了全互联结构, 通过 4.1 节的分析知, 仿真统计得到的是协议性能的下限。在多跳环境中, 配合相应的路由协议, 本文中的 MAC 协议将具有更好的性能表现。

在给定分组长度为 512bytes 的情况下, 网络总吞吐量与信道数量的关系如图 2 所示。从图中可以看出, 随着信道数 M 的不断增长, 网络的吞吐量也随之不断地增长。当分组到达率达到公共控制信道的吞吐量极限时, 会引起较多的控制分组冲突, 表明公共控制信道已经不能再把更多的数据信道有效地分配给节点了, 使得网络的总吞吐量增长趋势变缓, 最终达到稳定状态。从图中可以看出, 在信道数较少的情况下, 通过增加信道数可以很显著地改善网络的总吞吐量, 当信道数从 10 增加到 12 时, 单纯增加信道数对网络的总吞吐量的改善幅度已经变得非常有限了。

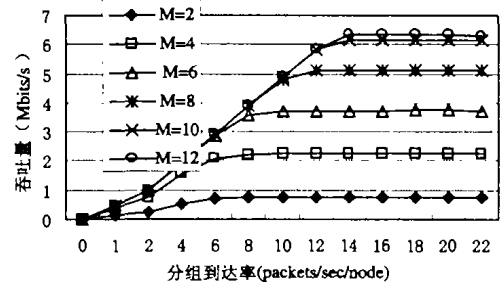


图 2 网络总吞吐量与信道数的关系(分组长度=512bytes)

在公共控制信道达到满负荷极限时, 数据信道并不一定也同时达到了其最大吞吐量的饱和状态。图 3 所示为信道数固定为 6 的情况下通过改变数据分组长度的大小所得到的仿真结果。仿真结果表明, 在数据信道数固定的情况下, 改变数据分组的大小, 可以使得网络的饱和吞吐量得到较大的增加, 即通过加大数据分组长度, 在一次成功握手后能传输更多的数据比特, 从而使得网络的总吞吐量得到进一步改善。但是, 当分组长度增加到一定程度以后, 网络总吞吐量的增加速度变缓, 即数据信道也趋于饱和状态。

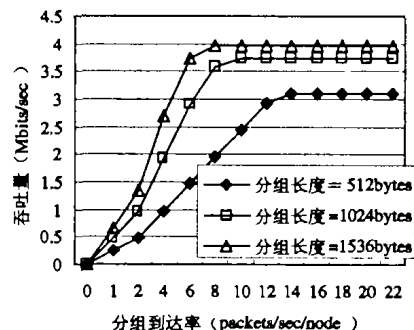


图 3 网络总吞吐量与分组长度的关系(M=6)

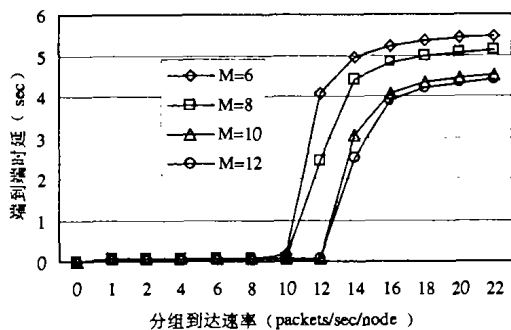


图4 端到端时延特性与信道数的关系(分组长度=512bytes)

在分组长度为512bytes的情况下,端到端时延特性与信道数的关系如图4所示。图中可看出,多信道情况下信道数的增加对于网络端到端时延特性有一定的改善作用,随着信道数的增加,其改善程度与网络吞吐量增加情况具有相类似的变化趋势。

结束语 本文提出了一种新的拓扑无关的按需分配多信道自组网MAC协议,该协议具有以下优点: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;所需要的信道数与网络拓扑和网络的度无关,克服了拓扑相关MAC协议不适于节点分布密集场合的缺陷;能灵活适应节点的移动性,只需通过交换少量的携带节点邻居状态信息的控制分组就能实现节点信道状态信息的更新和有效的信道分配,使得协议具有良好的可扩展性;不需要全网的时钟同步,每个节点只需要一部半双工收发信机就能够实现在多个信道上高效的数据收发,极大地降低了对网络节点设备的硬件要求;在信道预约时叠加了一种“软”预约方式,即节点倾向于选择最近一次成功进行数据收发的信道,减少了基于接收节点或发送节点的多信道MAC协议中节点所选择信道发生变化时对周围邻居节点信道选择造成的“动荡”因素。在信道数足够多的情况下,每个节点都倾向于选择某一个固定的信道进行数据传输,从而将两个节点同时竞争同一个信道进行数据传输的可能性最小化,而且软预约还具有灵活地使用其它空闲信道的特性,每个节点都以相互排斥的方式动态选择空闲信道,使得并行、无干扰的数据发送成为可能;即使在业务流很大使得信道数不足以提供无冲突的数据传输的情况下,发生冲突的概率也会由于每个节点坚持预约自己的信道而降低。该特点使得协议在完全分布式控制的自组网中具有极大的优势。

仿真结果表明,本文提出的多信道MAC协议在网络总吞吐量和端到端时延特性方面都具有良好的性能。仿真结果同样表明,由于在控制信道上采用CSMA/CA的接入方式,使得控制信道成为本文所提出的多信道MAC协议的性能瓶颈,可以通过在公共控制信道上采用吞吐量性能更为优良的单信道接入协议进行改善,使得本协议能够支持更多的数据信道和获得更好的网络总吞吐量和端到端时延性能,这也是我们下一步的工作。

参考文献

- 1 IETF. Mobile ad hoc networks charter. <http://www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html>
- 2 Garcia-Luna-Aceves J J, Tzamaloukas A. Reversing the Collision-Avoidance Handshake in Wireless Networks. In: Proc. of ACM/IEEE MILCOM, Seattle, Washington, Aug. 1999
- 3 Ephremides A, Truong T V. Scheduling broadcasts in multihop

- radio networks. IEEE Transactions on Communications, 1990, 38(4):456~460
- 4 Even S, Goldreich O, Moran S, Tong P. On the NP-completeness of certain network testing problems. Networks, 1984, 14(1):1~24
- 5 Cidon I, Sidi M. Distributed assignment algorithms for multihop packet radio networks. IEEE Transactions on Computers, 1989, 38(10):1353~1361
- 6 Tang Z, Garcia-Luna-Aceves J J. A Protocol for Topology-Dependent Transmission Scheduling. In: Proc. of IEEE Wireless Communications and Networking Conference 1999 (WCNC'99), New Orleans, Louisiana, Sep. 1999
- 7 Ju J H, Li V O K. An optimal topology-transparent scheduling method in multihop packet radio networks. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1998, 6(3):298~306
- 8 Li J, Haas Z J, Sheng M. Capacity evaluation of multi-channel multi-hop ad hoc networks. In: 2002 IEEE Intl. Conf. on Personal Wireless Communications, Dec. 2002: 211~214
- 9 Hu L. Distributed Code Assignment for CDMA Packet Radio Networks. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1993, 1(6): 688~677
- 10 Bertossi A, Bonuccelli M. Code Assignment for Hidden Terminal Interference Avoidance in Multihop Radio Networks. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1995, 3(4):441~449
- 11 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, Vol. 2, New York, USA, March 1999. 776~783
- 12 Karn P. MACA- a new channel access method for packet radio. In: ARRL/CRRL Amateur Radio 9th Computer Networking Conf. 1990. 134~140
- 13 Deng J, Haas Z J. Dual busy tone multiple access (DBTMA): a new medium access control for packet radio networks. In: IEEE 1998 Intl. Conf. on Universal Personal Communications, Oct. 1998. 973~977
- 14 Wu S-L, Tseng Y-C, Sheu J-P. Intelligent Medium Access for Mobile Ad Hoc Networks with Dual Busy Tone and Power Control. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000, 18(9):1647~1657
- 15 Ju J-H, Li V O K. TDMA Scheduling Design of Multihop Packet Radio Networks Based on Latin Squares. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1999, 17(8):1345~1352
- 16 Tzamaloukas A, Garcia-Luna-Aceves J J. A Receiver-Initiated Collision-Avoidance Protocol for Multi-Channel Networks. IEEE INFOCOM 2001, 2001, 1:189~198
- 17 Garcia-Luna-Aceves J J, Raju J. Distributed Assignment of Codes for Multihop Packet-Radio Networks. In: Proc. of IEEE MILCOM'97, Vol. 1, Nov. 1997. 450~454
- 18 Nasipuri A, Zhuang J, Das S R. A multichannel CSMA MAC protocol for multihop wireless networks. In: Proc. of Wireless Communications and Networking Conf. vol. 3, Sep. 1999. 1402~1406
- 19 Tang Z, Garcia-Luna-Aceves J J. Hop-Reservation Multiple Access (HRMA) for Ad-Hoc Networks. In: Proc. of IEEE INFOCOM'99, vol. 1, March 1999. 194~201
- 20 Wu S-L, Lin C-Y, Tseng Y-C, Sheu J-P. 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, Dec. 2000. 232~237
- 21 Wu S-L, Lin C-Y, Tseng Y-C, Sheu J-P. A multi-channel MAC protocol with power control for multi-hop mobile ad hoc networks. In: Intl. Conf. on Distributed Computing Systems Workshop, April 2001. 419~424
- 22 Choi N, Seok Y, Choi Y. Multi-channel MAC protocol for mobile ad hoc networks. In: 2003 IEEE 58th Vehicular Technology Conf. Vol. 2, Oct. 2003. 1379~1382
- 23 Yeh C-H. Medium access control with differentiated adaptation for QoS management in wireless networks. In: Proc. IEEE Int'l Conf. Mobile and Wireless Communication Networks, 2001. 208~219
- 24 Yeh C-H. ROC: A wireless MAC protocol for solving the moving terminal problem. In: Proc. IEEE Int'l Conf. Wireless LANs and Home Networks, 2001. 182~189
- 25 Yeh C-H. ROAD: A class of variable-radius MAC protocols for ad hoc wireless networks. In: Proc. IEEE Vehicular Technology

- Conf. vol. 1, May 2002. 399~403
- 26 Yeh C-H. IPMA: An interference/power-aware MAC scheme for heterogeneous wireless networks. In: Proc. IEEE Int'l Symposium on Computer Communications, vol. 2, June/July 2003. 849~854
 - 27 Yeh C-H, You T. A power-controlled multiple access scheme for differentiated service and energy efficiency in mobile ad hoc networks and wireless LANs. In: Proc. IEEE PIMRC'03, vol. 1, Sep. 2003. 765~771
 - 28 Yeh C-H. The advance access mechanism for differentiated service, power control, and radio efficiency in ad hoc MAC protocols. In: Proc. IEEE Vehicular Technology Conf. Vol. 3, Oct. 2003. 1652~1657
 - 29 Yeh C-H, Zhou H, Ho P-H, Mouftah H T. A Variable-radius Multichannel MAC protocol for High-Throughput Low-Power Heterogeneous Ad Hoc Networking. In: Proc. IEEE Globecom'03, Dec. 2003. 1284~1289
 - 30 Yeh C-H. High-throughput interference-aware MAC protocols for heterogeneous ad hoc networks and multihop wireless LANs. In: Proc. IEEE Globecom'03, Dec. 2003
 - 31 Tian Hui, Li Ying Yang, Hu JianDong, et al. A MAC protocol supporting multiple traffic over mobile Ad Hoc networks. In: The 57th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conf. Vol. 1, Apr. 2003. 665~669
 - 32 Cai Z, Lu M. SNDR: a new medium access control for multi-channel ad hoc networks. In: Proc. IEEE VTC, vol. 2, 2000. 966~971
 - 33 Hsu S-H, Hsu C-C, Lin S-S, Lin F-C. A multi-channel mac protocol using maximal matching for ad hoc networks. In: Proc. 24th Intl. Conf. on Distributed Computing Systems Workshops, March 2004. 505~510
 - 34 郭伟,郑相全,等. 短波抗干扰电台组网技术研究. 电子科技大学通信抗干扰技术国防重点实验室预研基金项目书, 2002

(上接第 16 页)

对补偿而不是回滚的需求。另外一个重要的改变在于对成功情况的定义。“全部或者没有”语义适用于大多数情况,但事务成功的概念已经逐渐变成业务流程的成功,而不是事务所有部分的全部完成。

Web 服务事务的研究,应该着眼于解决 Web 服务事务与传统分布式事务的不同点,提出 Web 服务上事务的相关模型和形式化理论,解决 Web 服务事务监控执行的关键技术问题,提出 Web 服务上事务调度的优化算法,并通过实现事务监控器的软件原型验证所提出模型和算法。此外,目前关于 Web 服务事务的监控执行则缺乏深入的研究,特别是在 Web 服务事务的调度和资源管理方面。Web 服务支持多种通信方式,包括同步调用、异步调用、事件通知等。同时,Web 服务的事务协调本身也是一个 Web 服务。需要给出相应的算法调度 Web 服务事务,重新组合执行顺序,变换通信方式,提高 Web 服务事务执行的并发度和系统吞吐率。这些是 Web 服务事务的研发中应解决的关键问题和未来的研究方向,也是我们正在从事的工作。

参 考 文 献

- 1 Curbera F, Nagy W A, Weerawarana S. Web services: Why and how. In: Proc. of the OOPSLA 2001 Workshop on Object-Oriented Web Services. 2001
- 2 Dalal S, Temel S, Little M, Potts M, Webber J. Coordinating Business Transactions on the Web. IEEE Internet Computing, Jan./Feb. 2003
- 3 Cabrera F, Copeland G, Freund T, et al. Specification: Web Services Coordination. Available at <http://www-106.ibm.com/developerworks/library/ws-coor/>, Aug. 2002
- 4 Potts M, et al. Business Transaction Protocol. Available at: <http://www.oasis-open.org/business-transaction/>, Jun 2002
- 5 Cabrera L F, et al. Web Service Transaction (WS-T). Available at <http://www-106.ibm.com/developerworks/library/ws-transpec/>, Aug. 2002
- 6 OMG. OMG's Activity Service specification. Available at: <http://cgi.omg.org/cgi-bin/doc? orbos/2000-06-19>, 2000
- 7 Bunting D, Chapman M, et al. Web Services Composite Application Framework (WS-CAF), Ver1. 0. Available at <http://developers.sun.com/techtopics/webservices/wscaf/>, July 2003
- 8 Gray J, Reuter A. Transaction Processing Concepts and Techniques. Morgan Kaufmann Publishers, 1993
- 9 Pires P F. WebTransact: A Framework for specifying and coordinating reliable web services compositions: [technical report es-578/02]. Federal University of Rio De Janeiro, Brasil. 2002
- 10 Pires P F. WebTransact: A Framework for specifying and coordinating reliable web services compositions: [technical report es-578/02.] Federal University of Rio De Janeiro, Brasil, 2002
- 11 Bennett B, Hahm B, et al. A Distributed Object Oriented Framework to Offer Transactional Support for Long Running Business Processes. In: Proc. IFIP/ACM Intl. Conf. on Distributed Systems Platforms, New York, NY, USA April 2000, Lecture Notes in Computer Science 1795, Springer-Verlag, Berlin, April 2000. 331~348
- 12 Thatte S. XLANG: Web Services for Business Process Design. Available at: <http://www.gotdotnet.com/team/xml-wsspecs/xlang-c/>, 2001
- 13 Curbera F, Golland Y, Klein J, Leymann F, Roller D, Thatte S, Weerawarana S. Business Process Execution Language for Web Services (BPEL4WS). Available at: <http://www-106.ibm.com/developerworks/library/ws-bpel/>, July 2002
- 14 Leymann F. Web Service Flow Language (WSFL1.0). Available at: <http://www-306.ibm.com/software/solutions/web-services/pdf/WSFL.pdf>, May 2001
- 15 Rinard M C, Diniz P C. Commutativity Analysis: A New Analysis Technique for Parallelizing Compilers. ACM Trans. Program. Lang. Syst., 1997, 19(6): 942~991
- 16 Mangala G N, Karnik N M. Synchronization Analysis for Decentralizing Composite Web Services, SAC 2003, 2003. 407~414
- 17 Naoto S, Shin S, Kinichi M. Optimizing Composite Web Services through Parallelization of Service Invocations. ED0C'02, Switzerland, Sep. 2002
- 18 Sadiq W, Orłowska M. Analyzing Process Models using Graph Reduction Techniques. Information Systems, 2000, 25(2): 117~134
- 19 Schuldt H. Process Locking: A Protocol Based on Ordered Shared Locks for the Execution of Transactional Processes. In: Proc. of the ACM Symposium on Principles of Database Systems (PODS'01). Santa Barbara, California, USA, May 2001. 289~300
- 20 Catania N, Kumar P, Murray B. Web Service Event (WS-Events) Version 2. 0. Hewlett-Packard Company, July 2003
- 21 Hewlett-Packard. hp web services transactions 1.0 tech preview. <http://www.hpmiddleware.com/downloads/pdf/wst-spec-sheet.pdf>, 2002
- 22 OMG. OMG's Activity Service specification. Available at <http://cgi.omg.org/cgi-bin/doc? orbos/2000-06-19>, 2000
- 23 Sun. JSR 95: J2EE™ Activity Service for Extended Transactions. Available at <http://www.jcp.org/en/jsr/detail?id=95>, Aug. 2003
- 24 Sun. JSR 156: XML Transactioning API for Java (JAXTX). Available at <http://jcp.org/en/jsr/detail?id=156>
- 25 Mohan C. Tutorial: Advanced Transaction Models Survey and Critique. In ACM SIGMOD Intl. Conf. on Management of Data, Minneapolis, May 1994
- 26 Weikum G. Principles and Realization Strategies of Multi-Level Transaction Management. In ACM Transactions on Database Systems, March 1991
- 27 Garcia-Molina H, Salem K. SAGAS. In: Proc. of ACM SIGMOD Conf. on Management of Data, 1987. 249~259
- 28 Kaiser G E, Pu C. Dynamic Restructuring of Transactions. In Database Transaction Models for Advanced Applications, Aug. 1991
- 29 Bukhres O, Elmagarmid A, Kuhn E. Implementation of the Flex Transaction Model. In IEEE Data Engineering, 1993, 16(2): 28~32