

基于 Ad Hoc 的改进型多信道接入协议研究

刘海燕 谭 亮 刘春玲
(大连大学信息工程学院 大连 116600)

摘 要 为了解决目前多信道接入协议面临的多信道隐藏终端和多信道 Deafness 问题,加入了探测报文和等待报文,采用节点状态表和信道空闲状态表的方法,并采用 NS2 仿真软件对该协议进行性能仿真。仿真结果表明,该协议解决了多信道隐藏终端和多信道 Deafness 问题,与 DPC 协议相比提高了网络吞吐量和信道利用率,降低了网络传输的延迟,增强了网络的性能。

关键词 多信道,接入协议,吞吐量,延迟

中图分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.11.030

Improved Multi-channel Access Protocol Study Based on Ad Hoc

LIU Hai-yan TAN Liang LIU Chun-ling

(College of Information Engineering, Dalian University, Dalian 116600, China)

Abstract In order to solve multi-channel hidden terminal problem and multi-channel Deafness problem that the multi-channel access protocols are facing, this paper added in probe packet and wait packets and adopted the node status table and the channel idle state table. And we also used NS2 simulation software to simulate its function for this protocol. The simulation results show that the improved protocol resolves the multi-channel hidden terminal problem and multi-channel Deafness problem and raises the network throughput and channel utilization, reduces the network transmission delays, enhances the performance of the network compared with DPC protocol.

Keywords Multi-channel, Access protocol, Throughput, Delay

1 引言

我们通常讲的网络是指中心有基础架构的无线网络,例如移动蜂窝通信网络,而另一种就是 Ad Hoc 网络,它没有中心,由自组织移动节点组成,这些节点或终端相互链接通信构成了一个移动多跳自治的无线通信网络,分布式控制网络的运行和自我管理。它能够在没有基础设施支持的情况下提供灵活方便的通信。

道接入技术是 Ad Hoc 网络协议的基础,是解决用户如何共享通信信道,避免不同用户使用同一信道的技术。它控制着各通信节点如何及何时接入通信信道,以及如何相互间发送接收数据。多信道接入技术的出现解决了单信道条件下的隐藏终端和暴露终端问题。多信道条件下也有其无法避免的问题,比较突出的就是多信道隐藏终端的问题和 Deafness 问题,这些问题会严重影响网络的性能。

本文提出改进的多信道接入协议 MY-P,加入空闲状态表和节点状态表,以解决多信道隐藏终端和 Deafness 问题;同时加入探测报文和等待报文,以增加信道利用率,提升网络性能。

2 多信道存在问题

2.1 多信道隐藏终端

多信道条件下的隐藏终端的问题称为多信道的隐藏终端问题。

如图 1 所示,由于 C 无法获得 B 的通信状态,结果导致 CD 所使用的数据信道与 AB 所使用的数据信道相同,造成数据的冲突,进而使节点重发数据,增加延迟。

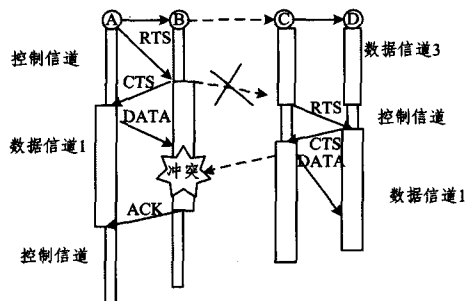


图 1 Ad Hoc 系统多信道隐藏终端示意图

造成上述冲突的原因是节点无法记录周围节点的通信状态,使数据发生冲突。

2.2 多信道 Deafness 问题

Deafness 问题即一个节点试图连接一个正在进行数据通信的节点并进行持续性的联系,从而使节点不断进行数据通信,浪费网络带宽,增加延迟,如图 2 所示。

文献[10]采用忙音来实现节点预知周围节点通信状况的功能,每个网络节点配备一个忙音接口工作于多个数据信道,通过打开和关闭来实现节点的忙碌与空闲,进而解决多信道隐藏终端和 Deafness 问题。

到稿日期:2015-10-29 返修日期:2016-03-18 本文受辽宁省教育厅科学研究项目(L2013461)资助。

刘海燕(1963—),女,博士,硕士生导师,主要研究领域为卫星网络通信、信号处理等,E-mail:liuhaiyan1@dlu.edu.cn;谭 亮(1989—),男,硕士生,主要研究领域为卫星通信;刘春玲(1971—),副教授,硕士生导师,主要研究领域为信号处理、卫星网络通信。

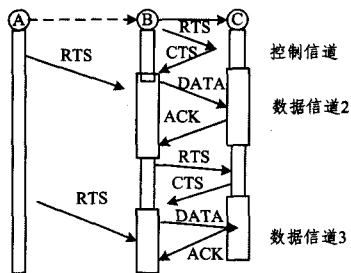


图2 Ad Hoc系统多信道 Deafness 问题示意图

虽然采用不同忙音频率来解决忙音冲突和确认的问题,但同时也会增加节点算法的复杂程度,增加节点的负载能耗和延迟,进而影响网络的性能。

文献[11]的 CAMAC 协议中节点使用列表 CUL[],信道空闲编码和值 FCCS 来保存信息。通过每个节点保存的信息列表来记录周围节点的状态,进而解决多信道隐藏终端问题。

3 改进的多信道接入协议

DPC 协议是一种发方预约、收方决策的多信道接入协议,采用 RTS-RTS-CTS-DATA 的握手机制。本文对 DPC 协议进行改进,采用信道空闲状态列表记录了周围各节点以及各数据信道的忙碌状态,预约数据信道前检查信道空闲状态列表,获取各数据信道状态,从而有效地解决了多信道条件下的隐藏终端问题和 Deafness 问题。

3.1 协议改进描述

文献[6]在单信道 DCF 协议的基础上增加了可发送列表和可接收列表功能,来解决多信道隐藏终端问题,采用无确认模式和确认模式来进行数据的传输。但是在确认模式中,发送节点发送完数据后在等待时间内若未收到确认报文 ACK,将会重发数据直至收到或达到最大次数。通常数据报文都非常大,这种情况下将会占用大量的网络资源,影响网络性能。

本文在此基础上提出改进的协议——MY-P 协议,在报文交互过程中加入探测报文 ST,若未收到 ACK,发送 ST 报文询问接收节点是否收到数据报文,若未收到则发送 NACK 报文,若收到则发送 ACK。探测报文大小比数据报文小得多,避免了重发数据报文导致的占用网络带宽的问题。同时加入等待报文 WCTS,报文格式如图 3 所示,若接收节点短时间内无可用数据信道,可以将最早完成数据传输的时间发送给发送节点,避免了发送节点因接收节点无可用数据信道而终止此次传输,造成发送节点退避发送等待过多的时间。

帧头	源地址	目的地址	最早完成通信的信道号	等待时间	FCS帧校验码
----	-----	------	------------	------	---------

图3 等待报文 WCTS 的报文格式

退避算法采用指数增加、指数减少算法来增加竞争的公平性。

当发生冲突时采用下述公式计算竞争窗口 CW 的值。

$$CW = \min(\alpha CW, CW_{\max}), CW < CW_{\max}$$

$$CW = CW_{\min}, CW > CW_{\max}$$

当成功发送数据后, CW 采用如下公式计算:

$$CW = \min(\beta CW, CW_{\max}), CW < CW_{\max}$$

$$CW = CW_{\min}, CW \geq CW_{\max}$$

$$\alpha = 1.5, \beta = 1.05$$

当数据发生冲突时,竞争窗口变为原来的 α 倍, α 较小,不会成倍增加,当达到最大竞争窗口后,重置为最小值。当数

据成功发送后,竞争窗口变成原来的 β 倍, β 比 1 稍大,会缓慢增加竞争窗口大小,增加其他未竞争到信道的节点竞争成功的机会,当增加到最大值时,竞争窗口重置为最小值。

3.2 协议工作过程

本文将整个网络信道带宽分为一个控制信道和多个数据信道。每个终端有两个收发器:控制收发器和数据收发器,分别工作在控制信道和数据信道。

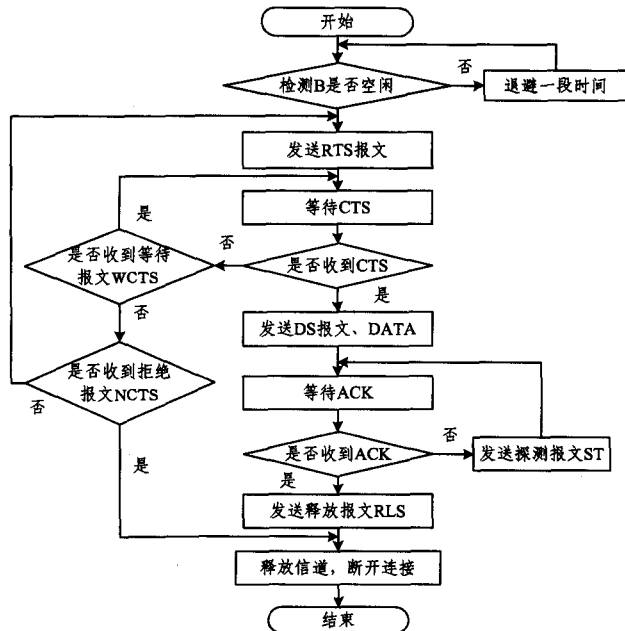


图4 发送节点的工作过程

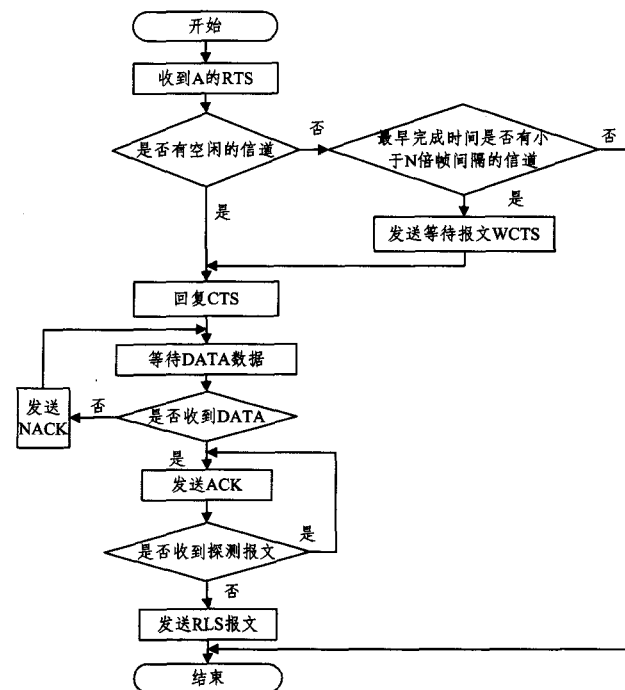


图5 接收节点的工作过程

(1)发送节点工作过程如图4所示。首先,节点A想要发送数据给B时,检查B的节点状态,若是B为忙状态,则退避一段时间,重新检查B的信道状态;若是B为空闲,则向节点B发送请问报文 RTS(Request To Send)。

D_{data} 表示数据帧的长度, V_{rate} 表示数据的传输速率,则数据帧 DATA 的传输时间为:

$$T_{DATA} = \frac{D_{data}}{V_{rate}} \quad (3)$$

T_{RTS} , T_{CTS} , T_{ACK} 分别表示 RTS, CTS, ACK 报文在控制信道中的传输时间, T_{SIFS} 表示帧间隔的时间。则 RTS 报文中请求占用的时间为:

$$R_{RTS} = T_{RTS} + T_{CTS} + T_{DATA} + T_{ACK} + 3T_{SIFS} \quad (4)$$

RTS 报文中包括了目的节点和源节点地址、空闲可发送的信道号和请求占用的时间 R_{RTS} 。

(2) 接收节点工作过程如图 5 所示。节点 B 接收到来自节点 A 的 RTS 报文后, 首先将发来的信道号与自己的空闲信道对比, 选出一条空闲的信道; 然后将此次请求占用的时间 R_{CTS} 以及选择的信道号加入到 CTS (Clear To Send) 报文中, 发送给源节点 A, 将数据信道切换到协商好的信道上, 等待源节点 A 发送数据报文。CTS 报文中请求占用的时间为:

$$R_{CTS} = T_{CTS} + T_{DATA} + T_{ACK} + 2T_{SIFS} \quad (5)$$

若源节点在等待时间内未收到来自节点 B 的 CTS, 则认为发生了冲突或是正忙, 退避一段随机时间后重新发送 RTS, 直至最大次数 N 。

(3) 若接收节点 B 收到 RTS 后, 无可用信道或信道正在占用, 此时检查信道空闲状态表, 读取信道占用时间, 若最小占用时间小于 N 倍的帧间隔, 发送等待报文 WCTS (Wait CTS), 将等待时间加入到报文中发送给源节点, 其中等待时间 R_{WCTS} 的计算公式为:

$$R_{WCTS} = T_O - T_{WCTS} \quad (6)$$

其中, T_O 为信道的最小占用时间, T_{WCTS} 为等待报文在控制信道中的传输时间。等最早完成数据传输的信道空闲后, 向源节点发送 CTS 报文。如果等待时间超过 N 倍的帧间隔, 等待时间过长, 发送拒绝报文 NCTS (No CTS), 取消此次通信链路的建立。

节点 B 在规定的时间内未收到数据, 认为报文发生了冲突或丢失, 重新发送 CTS 报文, 并等待数据报文 DATA。

(4) 源节点 A 收到来自 B 的应答报文 CTS 后, 发送通知报文 DS (Data Sending), 并将数据信道切换至双方约定的信道上, 开始发送 DATA 报文, 并等待确认报文 ACK (Acknowledge)。DS 报文中请求占用的时间为:

$$R_{DS} = T_{DATA} + T_{ACK} + T_{SIFS} \quad (7)$$

接收节点收到 DATA 数据报文后, 发送 ACK 确认报文, 通知源节点数据成功接收, 释放约定的信道, 并发送 RLS 通知周围节点此次的通信结束, 节点 B 空闲, 可以接收和发送报文。

源节点收到 ACK 报文后, 发送释放信道报文 RLS (Release), 释放之前通信的数据信道, 并可以向 A 发送连接请求。

(5) 若源节点 A 未收到 ACK, 则发送一探测报文 ST (Sending Test); 假如 B 未收到 DATA, 向 A 回送 NACK (No ACK) 报文, 通知 A 未收到 DATA 数据, 请重新发送, 并继续等待 ACK 确认报文; 如果 B 收到 DATA, 则向 A 回复 ACK 报文, 通知 A 已收到数据, 完成通信, 断开链接。

若 AB 周围的节点收到来自 AB 的 RTS, CTS 和 DS 报文后, 检查报文的目的节点和源节点, 同时更新自己的节点状态表及信道空闲状态表, 将选择好的信道设为禁用, 并禁止向 A 和 B 发送报文。

无碰撞时, 发送节点成功发送一个数据包所需要的时间为:

$$T_{R,S} = T_{RTS} + T_{CTS} + T_{DATA} + T_{ACK} + 3T_{SIFS} + \vartheta \quad (8)$$

其中, ϑ 表示报文传输的总时延。

当一个节点占用一个数据信道的同时没有其他节点的干扰, 成功发送数据, 其吞吐量为:

$$TH_1 = \frac{D_{DATA}}{T_{R,S}} = \frac{D_{DATA}}{T_{RTS} + T_{CTS} + T_{DATA} + T_{ACK} + 3T_{SIFS} + \vartheta} \quad (9)$$

当 N 个用户共享一个数据信道时, 存在 3 种状态:

- 1) 一个节点成功发送数据包;
- 2) 无节点占用信道, 信道空闲;
- 3) 多用户同时占用信道, 发生冲突碰撞。

发生的概率分别用 P_s , P_{idle} , P_c 来表示, r 表示节点在随机的时隙发送报文的概率。

可知,

$$P_{idle} = (1-r)^N \quad (10)$$

当一个用户成功发送数据时,

$$P_s = N \cdot r \cdot (1-r)^{N-1} \quad (11)$$

$$T_{S,N} = T_{RTS} + T_{CTS} + T_{DATA} + T_{ACK} + 3T_{SIFS} + \vartheta$$

当发送碰撞时,

$$P_c = 1 - (1-r)^N - N \cdot r \cdot (1-r)^{N-1} \quad (12)$$

假设发生碰撞是发生在发送数据阶段, RTS 及 CTS 发生冲突及碰撞的时间与数据碰撞的时间很短, 此处只计算数据报文发生碰撞, 并等待了 n 倍的帧间隔时间。

$$T_{C,N} = T_{RTS} + T_{CTS} + T_{DATA} + T_{ACK} + 3T_{SIFS} + n \cdot T_{SIFS} \quad (13)$$

因此用户成功传送一个数据包的接入时延统计时间为:

$$T_A = P_{idle} \cdot T_{idle} + P_s \cdot T_{S,N} + P_c \cdot T_{C,N} \quad (14)$$

节点的吞吐量可以表示为:

$$TH_N = r \cdot (1-r)^N \cdot \frac{D_{DATA}}{T_A} \quad (15)$$

3.3 解决多信道隐藏终端和 Deafness 问题

本文采用节点状态表和信道空闲状态表, 在 RTS, CTS 报文中加入节点的预计通信时间。当节点收到 RTS 或 CTS, DS 报文时, 读取其中的目的地址和源地址以及持续时间和占用信道号, 将其节点以及信道设置为忙碌, 在此持续时间内不可向此节点发送数据通信请求, 选取数据信道时, 不可选取被占用的数据信道, 从而有效地解决了多信道条件下的隐藏终端问题。

当 B 和 C 在数据信道上进行通信时会在事先发送 RTS 报文和 DS 报文, 并通知其他节点在此时间段内进行数据通信, A 收到后就会在空闲信道列表中将 B 的状态设为忙碌, 在此时间段内不会向 B 发送数据请求, 因而避免了向 B 多次发送请求而无应答的状况, 解决了多信道条件下的 Deafness 问题。因本协议在控制信道和数据信道使用两个半双工的收发器, 所以当 B 发送 RTS 报文或 DS 报文时, A 处于数据接收或发送状态时, 也会在控制信道上正确接收到报文, 不会发生冲突。

图 6 示出模拟多信道隐藏终端问题时延迟的变化。在 4s 时模拟发生多信道隐藏终端问题, 从图中可以看出, 在 4s 时网络的延迟开始明显增大, 8s 时采用改进的协议, 延迟开始下降。

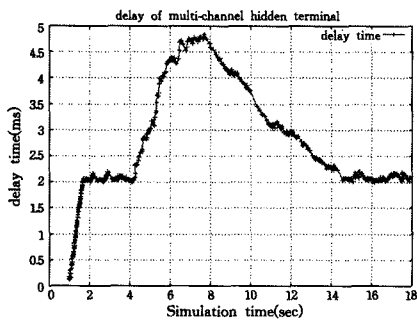


图6 多信道隐藏终端问题的延迟

图7示出模拟 Deafness 问题对信道造成的影响。从图中可以看出,模拟出现 Deafness 问题之后网络吞吐量迅速下降,采用改进的协议后,吞吐量开始上升。

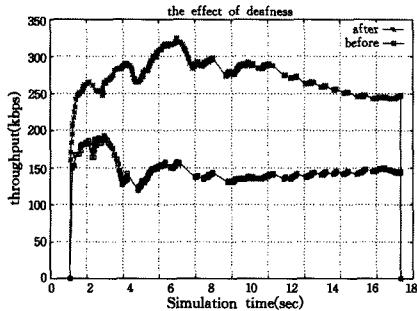


图7 Deafness 问题的吞吐量

4 性能仿真

仿真区域为 $1\text{km} \times 1\text{km}$ 的正方形区域,节点数为 10,节点通信范围为 300m,仿真时间为 20s,有 10 个可用信道,数据包的产生服从泊松分布。仿真参数设置如表 1、表 2 所列。

表 1 仿真参数(一)

Channel bit rate	Communication range	Slot time	DIFS	SIFS
0.1-1Mbps	300m	$20\mu\text{s}$	$50\mu\text{s}$	$10\mu\text{s}$

表 2 仿真参数(二)

ACK	RTS	CTS	WCTS	RLS
116bit	163bit	163bit	163bit	163bit

仿真实验中采用网络吞吐量、分组延迟等性能指标来评价改进后的协议。

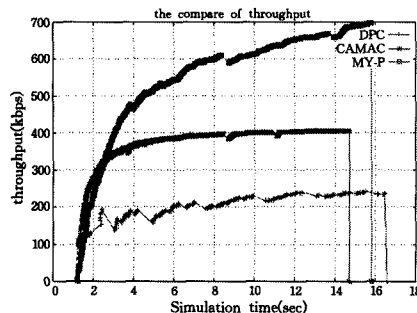


图8 200kbps 速率条件下吞吐量对比

从图8可以看出,仿真开始阶段,本协议的吞吐量要小于 DPC 协议,这是由于本协议通信需要复杂的报文间的交互,需要建立可靠的链接来保证随后的数据报文的可靠传输接收,而 DPC 协议和 CAMAC 不需要多种控制报文的交互,因此刚开始的吞吐量要小于 DPC、CAMAC 协议。随着仿真的

推进,DPC 协议不能保证报文的可靠传输,报文间的冲突概率、丢包率及节点的避让次数开始增加,CAMAC 协议的冲突概率也会缓慢增加,从而导致整体的吞吐量增长缓慢,并趋于饱和。

仿真结果如图9所示。根据式(15),随着仿真时间的增大,本文改进协议的优势逐渐表现出来,报文间的多次交互以及节点间的多次握手保证了数据传输的可靠性,并且充分利用了网络的带宽资源,吞吐量迅速增大,但由于数据信道数目有限,随着仿真的进行,吞吐量也会慢慢趋于饱和。在本文仿真条件下,与 CAMAC 相比,当 $t=11\text{s}$ 时所提协议的吞吐量提高了将近 10%。

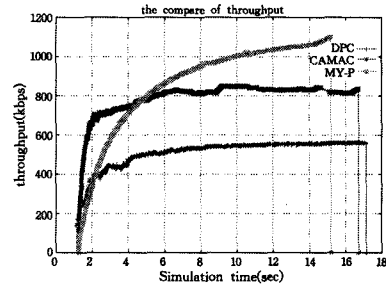


图9 500kbps 速率条件下吞吐量对比

仿真结果如图10所示,根据式(14)随着仿真时间的增大,两个协议的延迟都在增大。CAMAC 协议较少地控制报文,使得数据的准确到达率下降,重传和退避的次数也增加,报文丢弃概率增大,延迟也相应提高。在本文仿真条件下,与 CAMAC 相比,当 $t=11\text{s}$ 时所提协议的延迟减少了 60ms。本协议加入多种控制报文,保证了通信链路建立的可靠性成功率,减少了丢包率,并优化了退避算法,使节点公平地接入信道,从而减少了端到端的延迟。

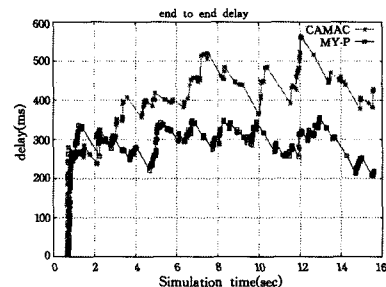


图10 500kbps 速率条件下延迟对比

虽然本协议提高了吞吐量,减少了延迟,但是以增加节点发射功率为代价的。复杂的报文交互需要更高的发送功率,同时需要更大尺寸的天线来增大天线的增益,增加了节点的能耗与造价,并且通信功率的增大也会增大对邻居节点的干扰。同时多次的握手机制增加了节点的负载,使协议的算法实现更加复杂困难。

从仿真结果看,本协议显著提高了网络的吞吐量,减少了延迟,并且解决了影响网络性能的多信道隐藏终端问题和 Deafness 问题。

结束语 本文基于多信道隐藏终端问题和 Deafness 问题,参考分析了 DPC 协议的机制,提出了一种新的改进的多信道接入协议,加入节点状态表及信道空闲状态表解决了影响网络性能的多信道隐藏终端问题和 Deafness 问题,并加入了探测报文和等待报文,减少了不必要的数据重发,增强了网络的吞吐量性能。

对本协议的吞吐量和延迟进行了仿真,并对性能进行了验证,从仿真结果可以看出本协议与 CAMAC 协议相比,吞吐量增加了 10%,延迟减少了 60ms,提高了网络的吞吐量,减少了节点间传输数据的延迟。

参 考 文 献

- [1] Oyman O, Singh S. Quality of experience for HTTP adaptive streaming services[J]. Communications Magazine, 2012, 50(4): 20-27
 - [2] Du Wei. Multi-Channel MAC Protocol in Ad Hoc Research[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009(in Chinese)
杜威. Ad Hoc 网络多信道 MAC 协议研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009
 - [3] Maamar H, Boukerche A, Petriu E. Streaming 3d meshes over thin mobile devices[J]. Wireless Communications, 2013, 20(3): 136-142
 - [4] Qureshi F F, Baksh A G. Reliable Cognitive Radio Multi-Channel MAC Protocol for Ad Hoc Networks[C]//ICCSA. 2015
 - [5] Wen Jing-rong. Research on The MAC Layer And Related Technology of Wireless Ad Hoc Networks[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2013(in Chinese)
温景容. 无线自组网 MAC 层及相关技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2013
 - [6] Bai Ke. Design and Simulation of A Novel Ad Hoc Multi-Channel Access Protocol[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2008(in Chinese)
白科. 一种新的 Ad Hoc 多信道接入协议的设计与仿真[D]. 成都: 电子科技大学, 2008
 - [7] Rezende C, Mammeri A, Boukerche A, et al. Areceiver-based video dissemination solution for vehicular networks with content transmissions decoupled from relay node selection[J]. Ad Hoc Networks, 2014, 17(6): 1-17
 - [8] Vella J, Zammit S. A survey of multicasting over wireless access networks[J]. Communications Surveys Tutorials, IEEE, 2012, 15(2): 1817-1827
 - [9] Run Xi. Research on QoS-Guaranteed MAC Protocol in Ad Hoc Network[J]. Modern Navigation, 2013(3): 212-215(in Chinese)
闰哲. 确保无线 AdHoc 网络服务质量的 MAC 协议研究[J]. 现代导航, 2013(3): 212-215
 - [10] Wang Fu-cai. Protocol Design and Research in Multi-Channel Wireless Ad Hoc Networks[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011(in Chinese)
王付彩. 多信道无线 Ad hoc 网络协议设计与研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011
 - [11] Li Jia. Multi-Channel MAC Protocol Research and Performance Analysis for Mobile Ad Hoc Network[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2013(in Chinese)
李佳. 移动 Ad Hoc 网络多信道 MAC 协议研究及性能分析[D]. 北京: 北京邮电大学, 2013
 - [12] 柯志恒. NS2 仿真实验[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009
-
- (上接第 129 页)
- [2] Berthomieu B, Diaz M. Modeling and Verification of Time Dependent Systems Using Time Petri Nets [J]. IEEE Trans. Softw. Eng., 1991, 17(3): 259-273
 - [3] Wang J, Xu G, Deng Y. Reachability analysis of real-time systems using time Petri nets[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 2000, 30(5): 725-736
 - [4] Pan Li, Ding Zhi-jun, Zhou Meng-chu. A Configurable State Class Method for Temporal Analysis of Time Petri Nets[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2014, 44(4): 482-493
 - [5] Boucheneb H, Gardey G, Roux O H. TCTL model checking of time Petri nets[J]. Journal of Logic and Computation, 2009, 19(6): 1509-1540
 - [6] Berard B, Cassez F, Haddad S, et al. The expressive power of time Petri nets[J]. Theoretical Computer Science, 2013, 474(N/A): 1-20
 - [7] Boel R K, Jiroveanu G. The on-line diagnosis of time Petri nets [M]. Control of Discrete-Event Systems. Springer London, 2013: 343-364
 - [8] Wu N Q, Chu F, Chu C, et al. Net Modeling and Cycle-Time Analysis of Dual-Arm Cluster Tools With Wafer Revisiting[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2013, 43(1): 196-207
 - [9] Du Y, Tan W, Zhou M C. Timed compatibility analysis of web service composition; A modular approach based on Petri nets [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2014, 11(2): 594-606
 - [10] Gardey G, Lime D, Magnin M, Romeo A. A tool for analyzing time Petri nets[C]//Proceedings of 17th International Conference on Computer Aided Verification. LNCS 3576, Springer Berlin Heidelberg, 2005: 418-423
 - [11] Berthomieu B, Ribet P, Vernadat F. The tool TINA-Construction of abstract state spaces for petri nets and time petri nets [J]. International Journal of Production Research, 2007, 42(14): 2741-2756
 - [12] Lin Chuang, Qu Yang, Li Ya-juan. Modeling, Consistency and Inference of Extended Interval Temporal Logic [J]. Chinese Journal of Computers, 2002, 25(12): 1338-1347(in Chinese)
林闯, 曲扬, 李雅娟. 扩展时段时序逻辑的模型、一致性和推理 [J]. 计算机学报, 2002, 25(12): 1338-1347
 - [13] Lei D M. Interval job shop scheduling problems[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 60(1-4): 291-301
 - [14] Sotskov Y N, Lai T C, Werner F. Measures of problem uncertainty for scheduling with interval processing times [J]. OR Spectrum, 2013, 35(3): 659-689
 - [15] Lei D M, Guo X P. An effective neighborhood search for scheduling in dual-resource constrained interval job shop with environmental objective [J]. International Journal of Production Economics, 2015, 159(1): 296-303
 - [16] Pan Li, Ding Zhi-jun, Chen Gang. A Time Petri Net Model Based on Uniform Distribution [J]. Chinese Journal of Computers, 2010, 33(5): 900-907(in Chinese)
潘理, 丁志军, 陈刚. 基于一致分布的时间 Petri 网模型 [J]. 计算机学报, 2010, 33(5): 900-907
 - [17] Donald R B, Sherrill E T. Mean and variance of truncated normal distributions[J]. The American Statistician, 1999, 53(4): 357-361
 - [18] Jawitz J W. Moments of truncated continuous univariate distributions[J]. Advances in Water Resources, 2004, 27(3): 269-281