

一种利用跨层优化策略选择中继的协作路由算法

陈超 郑宝玉 赵贤敬

(南京邮电大学信号与信息处理研究所 南京 210003)

摘要: 该文提出了一种新的中继选择的协作路由算法, 该算法利用网络的路由包获得信道的信息, 通过分布式计算从候选中继集中选择一个最佳中继转发数据。在分层的无线网络中, 中继选择的实现包括了时间同步和跨层优化等。仿真结果表明, 相对于 DSDV 协议, 该文所提出的算法有效地提高了数据包的递交率并有效地降低了网络的时延。

关键词: 协作路由; 跨层优化; 中继选择; Ad hoc 网络

中图分类号: TN915.02, TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)12-2981-05

A Cooperative Routing Algorithm Based on Relay Selection through Crosslayer Optimization Strategy

Chen Chao Zheng Bao-yu Zhao Xian-jing

(Institute of Signal and Information Processing, NJUPT, Nanjing 210003, China)

Abstract: In this paper, a novel cooperative routing algorithm is proposed based on a relay selection strategy, where the routing packets on potential relays are exploited to collect the channel state information. Then a distributed algorithm is taken to select the "best" relay from potential relay set with which a cooperative routing protocol is presented for Ad hoc networks. In layered wireless networks, the implementation of relay selection involves time synchronization and crosslayer optimization. The simulative results show that the proposed algorithm outgoes non-cooperative DSDV routing protocol with considerable gain of deliver ratio and latency.

Key words: Cooperative routing; Crosslayer optimization; Relay selection; Ad hoc networks

1 引言

近年来, 协作分集技术已经成为无线通信领域研究的热点之一。协作分集(cooperative diversity)^[1,2]是一种虚拟多天线的分集技术, 可以有效地抵抗信道的衰落, 它通过分布式实现并结合一定的编码方式, 可以获得显著的性能增益。Sendonaris^[3,4]等最早研究了分集的网络容量和中断概率, 并给出了在低速和高速 CDMA 系统中的实现方案; Laneman^[5,6]等深入研究了分集的实现策略, 提出了固定中继、选择中继和增量中继三种策略; Babarossa^[7,8]和Anghel^[9]继续研究了在高斯信道和平坦瑞利衰落信道环境下, 采用空时编码技术实现协作分集的问题。

协作的思想在网络层和MAC层也有着广泛地应用。Khandani^[10]等总结了网络层的协作路由算法, 并给出了一个加权的折衷方案。Zorzi^[11,12]等提出了地理路由的概念。其基本思想是节点在发送数据包的时候将自身和目标的位置信息在网络中广播, 其他的节点收到该信息后通过衡量自己和目标的距离远近来决定是否为该节点转发数据包。这就要求每个节点都必须知道自身及其目标的位置(例如节点配置了

GPS接收机)。Biswas^[13]等在地理路由的基础上提出了机会路由的概念, 其思想是源节点在发送数据包的同时将一系列优先级不同的节点的名字包含在数据包内并向外广播, 优先级最高的节点转发该数据包, 而其他优先级相对较低的节点则将该数据包丢弃。在这里, 优先级的具体含义是距离目的节点的位置最佳。

Bletsas^[14-16]等又将机会路由的思想引入到协作分集中, 提出了一种基于网络路径选择的协作分集方案。在文献[14]的方案中, 中继利用MAC层的RTS-CTS获得源与中继以及中继与目的之间的信道信息, 并根据不同准则(最小值或调和平均值)获得了信道的综合量度。Bletsas将^[13]中优先级的概念引伸为每个中继都具有的一个定时器, 该定时器与信道的综合量度成反比。每个中继在接收到数据包后计算各自的定时器, 定时器最先耗尽的中继即成为最佳中继向目的转发数据包, 并通知其他中继丢弃该数据包。这个算法的缺点在于其复杂度偏高。本文以文献[14]的中继选择方案为基础, 给出了一种基于跨层优化策略的协作路由算法。该算法在先发式路由协议基础上(例如DSDV), 利用网络层固有的路由信息来获取中继信道的信息, 分布式地选取最佳中继并运用跨层技术自适应地调整MAC协议以减少端到端的时延。本文的方案无需网络拓扑信息和GPS设施, 也无需源节点和中继节点间的额外通信, 简单易行, 对现有系统稍做修改, 即可

2006-05-22 收到, 2006-10-30 改回

国家自然科学基金(60372107)和重庆市重点实验室开放课题基金资助课题

应用。

本文安排如下：首先介绍了中继的概念和协作路由模型，然后描述了本文提出的跨层优化中继选择方案及其实现方法。最后仿真比较了 DSDV 协议和本文的算法的性能差异。结果表明，本文所提出的算法以较小的路由开销为代价，提高了数据包的递交率并有效地降低了网络的时延。

2 中继选择策略

本文的中继选择策略是一种分布式策略。在源节点的 M 个中继中，每个中继通过自己的前向(源到中继)和后向(中继到目的节点)信道的综合量度，在候选中继集中分布式地选择一个最佳中继为源节点转发数据包。如图 1 所示， h_{si} 表示源节点与中继 i 之间的信道信息， h_{id} 表示中继 i 与目的节点之间的信道信息。中继选择就是在信道变化之前，以分布式的方式在所有的候选中继中迅速选择一个最佳中继。

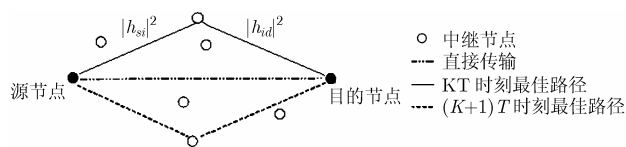


图 1 中继选择策略模型

如图 1 所示，源节点和目的节点可以直接通信，它们周围存在 6 个候选中继。假如采用先发式路由协议，那么在路由更新的过程中，候选中继分别通过来自源节点和来自目的节点的路由更新包提取并保存其前向和后向信道的信息。每个候选中继都设置了一个定时器，其时间长度与前后向信道信息有关。源节点向目的节点和中继分别发送数据包，每个候选中继在接收到该数据包之后，都会根据其保存的信道信息计算自身定时器的时间。定时器时间最先归零的节点即成为最佳中继向目的节点转发数据包。其他候选中继则将该数据包丢弃，同时将定时器清零。

3 算法实现

3.1 中继选择策略的实现

3.1.1 信道信息的获取 在现有的网络模拟器中，节点根据包的接收功率来判断是否能够接收到路由包或数据包。每个节点都设置了一个数据包接收功率的阈值，假如包的接收功率小于一定的阈值，那么节点则认为无法接收到该包。由于节点的发射功率可以设为恒定，因此可以将信道的信息(即接收信噪比)等效为路由包的接收功率，如果中继的接收功率大于阈值，那么中继即接收路由包，并保存路由包的接收功率。另外，本文采用先应式路由协议是因为这种协议的路由发现和路由维护都进行全网广播，即使在已经形成固定路由的情况下，由于其周期性更新的特点，仍然可以使节点能够及时获得信道的信息，而反应式路由协议(例如 AODV)只能按需地进行路由发现，一旦路由没有变化则不再进行周期性更新，这导致了路由上的节点无法感知到信道的变化，那么节点所保存的信道信息与真实信道信息有可能具有较大差异，

这就会影响到最佳中继的选择。

3.1.2 定时器的设置 在文献[14]的中继选择策略中，中继定时器的时间的定义：

$$T_i = \lambda / h_i \quad (1)$$

其中 λ 为时间常数，单位一般为毫秒或微秒， h_i 表示源与中继以及中继与目的之间信道的综合量度。根据不同准则可以得到不同的信道综合量度。本文中分别采用了两个不同的准则衡量信道的综合质量：

(1)最小准则：源 s 与中继 i 之间信道质量以及中继 i 与目的 d 之间信道质量的最小值

$$h_i = \min\{|h_{si}|^2, |h_{id}|^2\} \quad (2)$$

(2)调和平均准则：源 s 与中继 i 之间信道质量以及中继 i 与目的 d 之间信道质量的调和平均值

$$h_i = \frac{2}{1/|h_{si}|^2 + 1/|h_{id}|^2} = \frac{2|h_{si}|^2|h_{id}|^2}{|h_{si}|^2 + |h_{id}|^2} \quad (3)$$

准则(1)考虑了单条链路(源到中继或中继到目的)的信道质量对中继选择的限制，而准则(2)则考虑了两条链路(源到中继和中继到目的)信道的综合质量对中继选择的影响。

最佳中继即定时器首先归零的中继，其定时器的时间必然是所有候选中继中最小的。最佳中继定时器的时间定义为

$$T_b = \min\{T_i\}, \quad i \in [1, M] \quad (4)$$

3.2 时间同步问题

由于信号在信道中传输存在延迟，所以中继接收数据包的时刻有所不同。最佳中继在接收到数据包之后其定时器即开始计时，时间一旦耗尽，它就会向目的转发该数据包，同时向其它中继广播一个 flag 包，flag 包的作用是向其他中继声明最佳中继已经存在。其它中继接收到 flag 包之后就会将自己的定时器清零，以免再向目的节点发送重复的数据包而造成冲突。另外，网络中可能存在着隐中继问题，即中继之间无法直接通信。在这种情况下，最佳中继会将 flag 包先发给目的节点，由目的节点向其它中继广播 flag 包，这同样可以避免重复发包的情况。虽然两个中继的定时器不可能同时归零，但是不同中继定时器的时间在同一时间间隔内耗尽的可能性是存在的。因为 flag 包的传输有一定的延迟，其他中继可能在接收到 flag 包之前其定时器的时间已经耗尽，由于采用分布式处理，所以这一中继会将自己视为最佳中继而向目的节点转发数据包。这就会导致接收端接收数据包时发生冲突。根据数据包的到达时间就可以分析冲突事件发生的概率。

如图 2 所示， t_b , t_j 分别为最佳中继和一般中继接收到路由包的时刻。 n_j 表示中继 j 与目的节点的传输时延。在最佳中继时间耗尽之后，节点的无线收发设备需要一定的时间从接收模式转为发射模式，这一时间间隔设为 d 。在 d 间隔之后，最佳中继向其他中继广播一个 flag 包，flag 包的持续时间为 D ，其他中继收到 flag 包的延迟为 r 。无线收发设备的

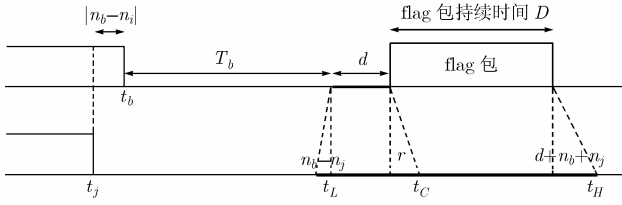


图 2 时间冲突模型

状态转换时间一般非常快，所以 d 可以非常小。flag 包的作用只是为了标志最佳中继，所以包长一般也很小(有效数据为 1 比特就已经足够)。

在不考虑隐中继的网络中，一般中继定时器的时间如果在 $[t_L, t_C]$ 内耗尽就会与最佳中继产生冲突，如果考虑了网络的隐中继问题，则还需要考虑 flag 包的持续时间以及收发转换时间和传输延迟。冲突的时间间隔为变为 $[t_L, t_H]$ 。本文将冲突时间间隔定义为 Δt 。

(1) 不考虑隐中继的情况

$$\Delta t = |n_b - n_j| + r + d \tag{5}$$

(2) 考虑隐中继的情况

$$\Delta t = |n_b - n_j| + r + 2d + D + n_b + n_j \tag{6}$$

据此，冲突事件发生的概率可以定义为

$$\Pr(\text{collision}) \leq \Pr(T_j < T_b + \Delta t | j \neq b), \tag{7}$$

$$j \in [1, M] \text{ 且 } \Delta t > 0$$

根据定时器时间的定义，式(7)可转化为

$$\Pr(\text{collision}) \leq \Pr\left(\frac{1}{h_j} < \frac{1}{h_b} + \frac{\Delta t}{\lambda}\right) \tag{8}$$

其中 h_j 和 h_b 分别为一般中继和最佳中继的综合信道量度。

显然，增加 λ 可以减小冲突概率但同时却又会延长时间 T ，所以既需要减小冲突概率同时又希望尽快选择出最佳中继。基于以上分析，不考虑网络的隐中继问题，分别给出了在自由空间和阴影衰落传播模型下的中继冲突概率(见图 3 和图 4)：

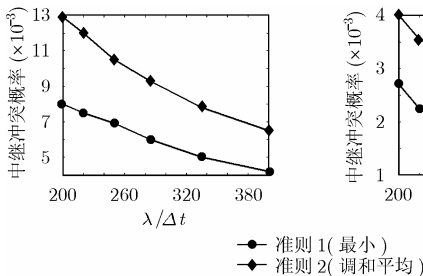


图 3 自由空间模型下中继冲突的概率

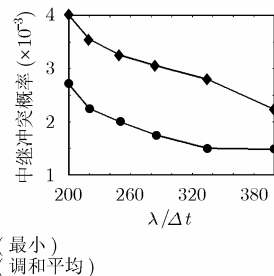


图 4 阴影衰落模型下中继冲突的概率

中继选择的时间必须远小于信道的相干时间范围，这样中继选择才能不滞后于信道变化，即在信道变化之前做出选择。移动速度为 1m/s，多普勒频移为 2.5Hz 的网络环境，

如图 3 和图 4 所示，当 $\lambda / \Delta t = 200$ 时，对于准则(1)，冲突概率已经小于 1%，而收发转换时间可使 λ 减小至约 1ms 甚至更小，这就保证了中继选择的时间远小于信道相干时间。同时可以发现，准则(2)的冲突概率大于准则(1)，这是因为准则(2)调和了中继的前后向信道的信噪比(接收功率)，中继定时器时间的衰落所引起的随机化效果在此就表现得不是很明显。

3.3 跨层优化策略的实现

本文在网络层通过跨层方法自适应地调整 MAC 层重传次数以达到减小时延的目的。Ad hoc 网络的 MAC 层普遍采用了 IEEE 802.11 协议，该协议使用 RTS-CTS 握手信号以解决隐终端问题，并通过比较数据包长度与 RTS 门限从而决定是否使用 RTS-CTS。该协议还根据 RTS-CTS 使用与否设置不同的重传次数的上限(短重传为 7，长重传为 4)。由于本文的信道环境为慢变信道，所以前后两次数据传输的信道可能比较相似，如果发射端在传输一次或几次之后(小于重传次数上限)即收到接收端的 ACK，那么发射端就将本次传输的次数设为下次传输的重传上限，如果在下一次传输中，由于该上限值过小而导致传输失败，那么发射端会将重传次数重新设置为 IEEE 802.11 协议所规定的上限值。如果重传的次数一直很小，而节点仍能够接收到 ACK，那么就不必使用 RTS-CTS 握手信号，而可以调整 RTS 门限使节点不需要通过 RTS-CTS 而直接将数据包发送给接收端。

除此之外，假如直接传输的信道不好，那么可以采用“分集”传输的方法，即中继向目的节点转发一个相同的数据包以避免数据包的丢失。假如直接传输的信道已经比较好，那么中继没有必要再重新传输一个相同的数据包，这时节点可以不需要中继的协作而直接传输数据给其下一跳，或者采用类似“分组”传输的方法，将数据包分段，直接传输和通过中继转发这两条不同的链路传输数据包的不同段，在接收端再将 these 段重新组合成数据包，这样既能提高了递交率又降低了网络的时延。

4 仿真结果及性能分析

由于网络层路由包的传输延迟，真实的信道信息与节点路由表中保存的信息之间存在着误差。统计表明，这个误差是秒级的。这就要求信道的变化不能太快，换言之，本文所提出的方案只适用于慢变或静态信道。

本文使用 NS-2^[17] 网络模拟软件作为仿真工具。需要特别指出的是，本文的信道模型使用的是 NS 自带的无线传播模型。NS 包括 3 种无线传播模型：Freespace, TwoRayGround 和 Shadowing。Freespace 是一种自由空间传播模型，它只考虑了传输过程中的路径损失，它是发射-接收距离的函数；TwoRayGround 在 Freespace 的基础上又考虑了传输路径上有可能伴有表面反射路径，所以公式中还包含了天线的高度和增益以及路径损耗因子；而 Shadowing 将一个零均值高斯

分布的随机噪声引入了无线传播模型,其特征可以用对数正态分布的随机变量来刻画。

本文分别在 TwoRayGround 模型和 Shadowing 模型下比较了本文的方案与 DSDV 协议的性能差异。在本文的仿真环境中,拓扑范围为 1000×1000 矩形区域,移动节点数为 20,业务源连接数为 5,节点停顿时间为 0,节点运动最大速度变化范围为 0~20m/s,仿真时间为 400s,节点的发包速率为 1pkt/s。

(1)数据包递交率的比较 图 5 和图 6 分别比较了 TwoRayGround 模型和 Shadowing 模型下本文的方案与 DSDV 协议数据包的递交率(delivery ratio)。数据包的递交率定义如下:

$$\text{递交率} = \frac{\text{目的节点接收到的数据包个数}}{\text{源节点发送的数据包个数}}$$

递交率反映了网络传输的可靠性,递交率越高则网络的可靠性越大。

由图 5 和图 6 可知,在 TwoRayGround 和 Shadowing 模型下,数据包的递交率都较 DSDV 有所提高。在 TwoRayGround 模型下,数据包的递交率最多提高了约 8%,最少约提高了 3%;在 Shadowing 模型下的递交率最多提高了 12%,最少提高了 6%。同时可以注意到,Shadowing 模型下的递交率低于 TwoRayGround 模型下的递交率,这是因为 TwoRayGround 模型下信号的衰落主要是因为路径损耗,而 Shadowing 模型的不仅衰减较大而且随机噪声影响也比较明显,所以递交率相对较低。但是相对 TwoRayGround 模型而言,Shadowing 模型的递交率的增益比较高,这是因为在 TwoRayGround 模型中继的信道状况和直接传输的信道状况比较类似,但是在 Shadowing 模型下中继的信道状况和直接传输的信道状况相对独立,可以更好地达到“分集”的效果,所以递交率增益较明显。

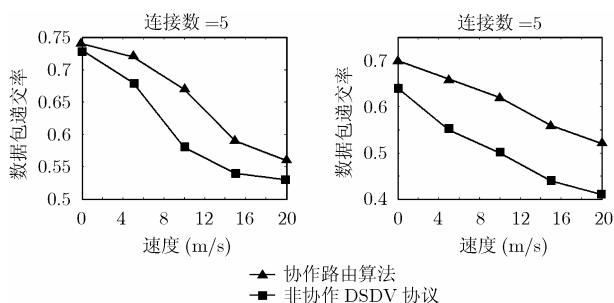


图 5 TwoRayGround 模型下的递交率比较

图 6 Shadowing 模型下的递交率比较

(2)端到端平均时延的比较 图 7 和图 8 分别比较了 TwoRayGround 模型和 Shadowing 模型下本文的方案与 DSDV 协议数据包的端到端时延(end-to-end latency)。端到端时延定义如下:

$$\text{端到端时延} = \frac{\sum(\text{接到数据包的时间} - \text{发送数据包的时间})}{\text{发送数据包的个数}}$$

端到端平均时延包括路由查找时延、数据包在接口队列中的等待时延、传输时延和 MAC 层重传时延,反映了路由的有效性,时延太大会严重影响通信质量。

由图 7 和图 8 可知,在 TwoRayGround 和 Shadowing 模型下,数据包的端到端时延都较 DSDV 有明显的降低。MAC 层的 RTS-CTS 以及相应的重传次数是影响时延的一个重要因素,本文采用了跨层优化的方法(见 3.3 节),通过 ACK 的反馈自适应地调整 RTS-CTS 的发送与否以及重传次数的上限,并通过判断信道的好坏决定是否直接传输或协作传输(“分集”或“分组”),上述一系列方法缩短了数据包的等待时间,进一步地降低了网络的时延。可以看到,TwoRayGround 模型的时延比 Shadowing 模型要小,这是因为 TwoRayGround 模型只有路径损耗而 Shadowing 模型衰减较大,数据包的往往不能直接传输给目的而是通过中继转发给目的,所以时延比较大。

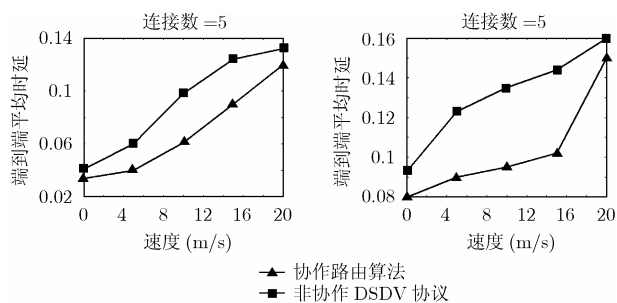


图 7 TwoRayGround 模型下的时延比较

图 8 Shadowing 模型下的时延比较

5 结束语

本文提出了一种利用跨层优化策略进行中继选择的协作路由算法,给出了中继选择方案及模型,并描述了方案的具体实现过程,同时对实现过程中几个关键问题(时间同步和跨层优化)进行了分析。最后仿真比较了在不同的无线信道传播模型下(TwoRayGround 和 Shadowing)本文提出的算法与 DSDV 协议在数据包递交率、端到端时延和归一化路由开销等性能方面的差异。仿真结果表明,本文所提出的算法在提高了数据包平均递交率的同时,有效地降低了网络的端到端平均时延。

参考文献

- [1] Nosratinia A and Hunter T E. Cooperative communication in wireless networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2004, 42(10): 74-80.
- [2] 殷勤业, 张莹, 丁乐等. 协作分集: 一种新的空域分集技术[J]. *西安交通大学学报*, 2005, 39(6): 551-557.
Yin Qin-ye, Zhang Ying, and Ding Le, *et al.* Cooperation

- diversity: A new spatial diversity technique[J]. *Journal of Xi'an jiaotong university*, 2005, 39(6): 551-557.
- [3] Sendonaris A, Erkip E, and Aazhang B. User cooperation diversity part I: System description[J]. *IEEE Trans. on Commun.* 2003, 51(11): 1927-1937.
- [4] Sendonaris A, Erkip E, and Aazhang B. User cooperation diversity Part II: Implementation aspects and performance analysis[J]. *IEEE Trans. on Commun.*, 2003, 51(11): 1939-1948.
- [5] Laneman J N. Cooperative diversity in wireless networks: algorithms and architectures[D]. [Ph.D. thesis], M.I.T., Cambridge, MA, 2002.
- [6] Laneman J N, Wornell G W, and Tse D N C. An efficient protocol for realizing cooperative diversity in wireless network[A]. In Proc IEEE Int ISIT[C]. Washington D C, June, 2001: 24-29.
- [7] Barbarossa S, Pescosolido L, and Ludovici D, *et al.* Cooperative wireless networks based on distributed space time coding[A]. International Workshop on Wireless Ad-hoc Networks, Taiwan, China, June, 2004: 30-34.
- [8] Barbarossa S and Scutari G. Distributed space-time coding strategies for wideband multihop networks: regenerative vs. non-regenerative relays[A]. ICASSP '04, Montreal, Canada, May, 2004: 501-504.
- [9] Anghel P A, Leus G, and Kaveh M. Multi-user space-time coding in cooperative networks[A]. ICASSP '03, Hong Kong, China, April, 2003: 73-76.
- [10] Khandani A, Abounadi J, and Modiano E, *et al.* Cooperative routing in wireless networks, 41st Allerton Conference on Communications, Control and Computing, Monticello, Illinois, United States, October, 2003: 1270-1279.
- [11] Zorzi M and Rao R R. Geographic random forwarding (GeRaF) for Ad hoc and sensor networks : multihop performance, *IEEE Trans. on Mobile Comput.*, 2003, 2(4): 337-348.
- [12] Zorzi M and Rao R R. Geographic random forwarding (GeRaF) for Ad hoc and sensor networks: Energy and latency performance. *IEEE Trans. on Mobile Comput.*, 2003, 2(4): 349-365.
- [13] Biswas S Z. Opportunistic routing in muliti-hop wireless networks, [M.S.thesis], Mass. Inst. Tech., Cambridge, 2005.
- [14] Bletsas A, Khisti A, and Reed P, *et al.* A simple cooperative diversity method based on network path selection, *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*, 2006, 24(3): 659-672.
- [15] Bletsas A. Intelligent antenna sharing and user cooperation in wireless networks, [Ph.D Dissertation], M.I.T., Cambridge, MA, 2005.
- [16] Bletsas A, Reed D P, and Lippman A. A simple distributed method for relay selection in cooperative diversity wireless networks based on reciprocity and channel measurements, in proc. 61st IEEE semiannu. Vech. Technol. Conf, Stockholm, Sweden, May. 30-Jun.1, 2005, vol.3: 1484-1488.
- [17] 徐雷鸣, 庞博, 赵耀. 《NS 与网络模拟》, 北京, 人民邮电出版社. 2003.11, 57-117.
Xu Lei-Ming Pang Bo, and Zhao Yao. NS and Network Emulation. Beijing, Posts & Telecomm Press, 2003. 11: 57-117.
- 陈 超: 男, 1982 年生, 硕士生, 研究方向为现代通信中的信号与信息处理.
- 郑宝玉: 男, 1945 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为现代通信中的智能信号和信息处理.
- 赵贤敬: 男, 1978 年生, 博士生, 研究方向为现代通信中的信号与信息处理.