

多跳 Ad Hoc 网络中支持 MIMO 的分布式拓扑未知时分多址接入协议的研究与分析

张光辉¹, 李建东¹, 赵 敏², 陈艳羽³, 李长乐¹

(1. 西安电子科技大学 ISN 国家重点实验室, 信息科学研究所宽带无线通信实验室, 陕西西安 710071;
2. 吉林大学, 吉林长春 130012; 3. 东北师范大学, 吉林长春 130012)

摘 要: 针对 Ad Hoc 网络和 MIMO 的有效结合, 提出了适于多跳 Ad Hoc 网络的支持 MIMO 的分布式拓扑未知时分多址接入协议. 该协议通过有限域无线网络设计算法在每帧给每个节点分配时隙且无需知道全网拓扑信息, 这极大地减小了收集全网拓扑信息的开销. 通过预约, 每个节点在其分配的无干扰时隙并行发送 MIMO 链路的所有数据流, 并在与其他节点共享的时隙发送 MIMO 链路的一部份数据流来解决传输冲突. 同时推导出保证通过率和最佳帧长. 结果显示动态分配 MIMO 的传输容量和抗干扰能力会极大地提高通过率.

关键词: 时分多址接入; 多输入多输出; 多跳 ad hoc 网络; 拓扑未知

中图分类号: TN915.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 10-1763-05

Study and Analysis of Distributed Topology-Transparent Schedule for Time Division Multiple Access with MIMO Links in Multihop Ad Hoc Networks

ZHANG Guang-hui¹, LI Jian-dong¹, ZHAO Min², CHEN Yan-yu³, LI Chang-le¹

(1. State Key Lab. of Integrated Service Network, Information Science Institute, Lab. of Broadband Wireless Communications, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

2. Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China; 3. Northeast Normal University, Changchun, Jilin 130012, China)

Abstract: To effectively combine ad hoc networks with multiple input multiple output (MIMO), distributed topology-transparent schedule for time division multiple access (TDMA) protocol with MIMO links in multihop ad hoc networks is proposed. By Galois Radio Network Design (GRAND), the protocol assigns each node slots in each frame and need not know the whole network topology information, thus the overhead to collect topology information is greatly reduced. By reservation each node simultaneously transmits all data streams in the MIMO link in its assigned interference-free slots and utilizes its shared slots with other nodes to transmit a part of all data streams in the MIMO link to resolve collisions. The guaranteed throughput and optimal frame length are also derived. Results show that the network throughput will be improved greatly by dynamically allocating MIMO transmission capacity and its anti-interference ability.

Key words: time division multiple access (TDMA); multiple input multiple output (MIMO); multihop ad hoc networks; topology-transparent

1 引言

Ad hoc 网络是一种不需要固定基础设施支撑的、由若干地理上分散的移动节点组成的自组织无线网络, 这些节点可以自由地进入和离开网络, 也可以在网络中自由移动^[1]. 移动 ad hoc 网络 (MANET) 通过将路由功能引入到移动节点中而使无线网络支持灵活和有效的操作^[2]. 容易安装和灵活配置使

Ad hoc 网络有非常广泛的应用前景, 如救灾、战场及需要快速安装和具有抗毁性的场合. 此外, ad hoc 网络已被认为是超 3G 的一个主要特性^[1]. 以上提到的 ad hoc 网络的灵活性对多址接入协议 (MAC) 提出了新的挑战. MAC 协议是指有效地协调各个节点接入到共享无线信道的机制. 近来, 多输入多输出技术 (MIMO) 已经得到快速地发展, 也越来越受到人们重视, 并且已经应用到 ad hoc 网络中. MIMO 系统已经在物理层被广泛

收稿日期: 2005-09-27; 修回日期: 2006-01-24

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金 (No. 20050701007); 国家自然科学基金和微软亚洲研究院联合 (No. 60372048); 国家自然科学基金重大项目 (No. 60496316); 国家“863”课题认知无线电技术研究 (No. 2005AA123910); 高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划; 教育部科学技术研究重点项目 (No. 104171)

的研究,然而,它的有效性和性能加强只有通过合理的设计高层,如 MAC 层,才能有效地得到加强.限于作者的学识,目前仅文献[3]提出了针对 Ad hoc 网络的支持 MIMO 的 MAC 协议,并且该文献表明合理地利用 MIMO 链路可以极大地增加 ad hoc 网络的容量.然而,文献[3]的协议需要知道全网的拓扑信息,这是对 ad hoc 网络带宽的极大浪费.显然节点的移动性会极大地降低该协议的效率.

为了减小获得网络拓扑所需要的开销,我们提出了一个支持 MIMO 链路的分布式拓扑未知时分多址接入(TDMA)协议.最初的拓扑未知 TDMA 协议不具有冲突分解能力^[4,5].在本文的协议中,我们通过平衡 MIMO 链路的传输容量和抗干扰能力来分解冲突.当一个时隙仅被一个用户占用时(该时隙称为无干扰时隙),该用户可以以最大传输速率占用该时隙.当一个时隙必需由多个用户共享时(该时隙称为共享时隙),我们可以减小每个用户的数据速率,并增强它的抗干扰能力,以使这些用户可以同时成功地发送减小速率后的数据流.通过这种方式,每个节点在它分配的无干扰时隙以最大速率发送所有数据流,而在其分配的共享时隙仅发送一部份数据流来解决冲突.干扰时隙和共享时隙可以通过预约方式获得.

2 MIMO 背景和网络模型

MIMO 系统可以看作发送端和接收端均配备了多天线的系统,其核心思想是发送天线阵列和接收天线阵列联合以降低误码率或提高数据传输速率^[6].MIMO 链路可提供三种增益:阵列增益,分集增益和空间复用增益.阵列增益和分集增益主要降低误比特率或扩展传输半径,空间复用增益主要提供较高的传输速率.在丰富的多径环境下,链路两端的多天线可以创造多个独立的信道.这些独立的信道可使多个独立的数据流在其上发送以提供极高的频谱效率(增加容量),而无需消耗额外的带宽或能量^[7].这可以认为是空间复用,并可以在发送端无任何信道状态信息(CSI)下实现,如贝尔实验室分层空时结构(BLAST^[8])和垂直型贝尔实验室分层空时结构(V-BLAST^[9]).因此,空间复用一般采用 V-BLAST 结构.在 V-BLAST 结构中,发送端和接收端均配备 M 个天线,一个高速比特流可以分解成 $1/M$ 原速率的 M 个独立比特流,每个比特流通过 M 个天线同时并行发送,这样,就占用了 $1/M$ 的原带宽.因此,MIMO 链路通过在相同的信道同时发送多个独立的数据流方式可以在多径信道下提供极高的频谱效率^[8,9].在丰富的多径环境下,这些不同的数据流可以在接收端由他们不同的空间特性而成功分离^[10].在接收端,通过训练序列辨识混合的信道矩阵后,每个比特流可以被分离和估计.这就像这些未知信号可以通过解 M 个线性方程组而得到.这需要假设每对发送天线和接收天线均产生一个独立的信道,因此需要平坦衰落条件.然而,对于频率选择情况,可通过使用直接多用户方法如 OFDM 来实现时域每个子载波的平坦化或者通过 MIMO 的时空检测实现平坦化^[11].通常,如果多径足够丰富,具有 M 个天线的接收机可以成功地接收 M 个数据流.并且,当接收机的邻节点已经发送 M 个或更少的数据流给接收机,接收机可以成功地分离出这些数据流.

一个具有 N 个节点的多跳 ad hoc 网络可以表示为图 $G(V, E)$,其中 V 和 E 分别是所有节点和链路的集合.令 S_u 表示节点 $u(u \in V)$ 的邻节点集合,而 $|S_u|$ 是集合 S_u 中节点的数目,并称为节点 u 的度.全网最大度 $D = \max_u |S_u|$.冲突被认为是导致传输失败的唯一原因.我们将 ad hoc 网络中的冲突分为第一类冲突和第二类冲突.对于在时隙 i 的某个传输 $u \rightarrow v(\forall u \in V, \forall v \in S_u)$,如果节点 v 也在时隙 i 发送则第一类冲突就会发生,这是因为节点 v 不能同时发送和接收.对于具有 M 个天线的 MIMO 链路,如果节点 v 在时隙 i 接收到超过 M 个的数据流,或者说,节点 v 的邻节点(包括 u)在时隙 i 已经发送了超过 M 个的数据流,则第二类冲突将会发生.因此,传输 $u \rightarrow v$ 的干扰节点集是 $S_v - \{u\}$,其中 $|S_v - \{u\}| = |S_v| - D$.图 1 显示了传输 A \rightarrow B 的第一类冲突和第二类冲突,其中网络有五个节点 A,B,C,D 和 E.

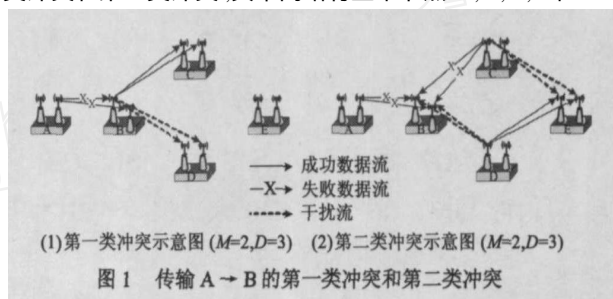


图 1 传输 A \rightarrow B 的第一类冲突和第二类冲突

3 协议描述

我们把本文提出的协议命名为支持 MIMO 的拓扑未知预约 TDMA(简称为 MIMO-TTR).MIMO-TTR 基于 TDMA 结构,其中每个时隙分为预约阶段和数据传输阶段.此外,MIMO-TTR 无需知道全网的拓扑信息.令 $GF(q)$ 是 q 阶有限域.每个 MIMO-TTR 帧由 q^2 个时隙组成,并分成 q 个子帧,这样每个子帧就由 q 个时隙组成.每个节点在每帧中按如下规则分配 q 个时隙.每个节点 $u \rightarrow v$ 分配了唯一的项 $f_u = \sum_{i=0}^{k-1} a_i x^i \text{ mod } q$,其中 $a_i, x \in GF(q)$.参数 q 和 k 通过有限域无线网络设计^[4]算法来计算,该算法只需知道参数 N 和 D .这样,在子帧 $s(s = 0, 1, \dots, q-1)$ 分配给节点 u 的时隙为 $f_u(s)$.通过使用 $f_u(s)$,每个节点在每帧中分配 q 个时隙.对于以上分配,我们除了需要知道 N 和 D 外,无需知道全网的任何拓扑信息,这样所需要的网络开销就会极大地减小.图 2 显示了帧结构和节点 u, v 和 $S_v - \{u\}$ 的时隙分配.

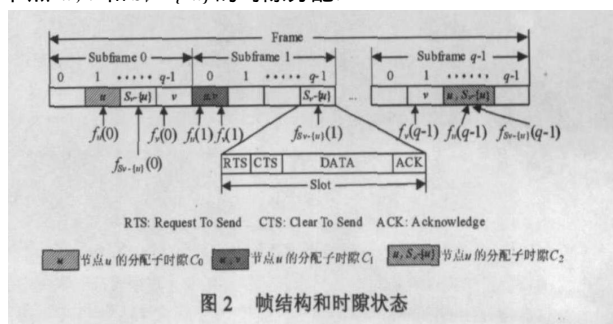


图 2 帧结构和时隙状态

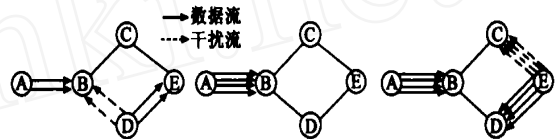
然而,通过以上时隙分配,几个节点会在某个子帧共享一个相同的时隙,这样干扰或冲突就会在该时隙发生.例如,在图 2, C_1 是节点 u 和节点 v 的共享时隙, C_2 是节点 u 和节点 $S_v - \{u\}$ 的共享时隙.通常,每两个节点在一帧中最多共享 k 个相同的时隙^[4].此外,每个节点的最大干扰节点数是 D ,则每个节点和他的干扰节点在一帧中最多共享 kD 个时隙.因为每个节点在每帧中分配 q 个传输时隙,因此为了保证最小通过率,或者说,保证每个节点在每帧中至少有一个无干扰的时隙,我们应当满足条件 $q > kD$ ^[4,5].对于某传输 $u \rightarrow v (\forall u \in V, \forall v \in S_u)$,我们将分配给节点的 q 个时隙分成无干扰时隙,与 v 共享的时隙,及与 $S_v - \{u\}$ 共享的时隙.节点 u 的以上三种类型的分配时隙分别表示为 C_0, C_1 和 C_2 .图 2 显示了 C_0, C_1 和 C_2 .令在一帧中分配给节点 u 的时隙表示为 u ,其中 $|u| = q$.显然, $|C_0| + |C_1| + |C_2| = |u| = q$.通过以上讨论,我们知道在时隙 C_0 ,传输 $u \rightarrow v$ 一定成功,这是因为没有来自干扰节点集的干扰.在 C_1 ,第一类冲突会发生.在 C_2 ,第二类冲突可能会发生,这要取决于 $S_v - \{u\}$ 和 u 共同发送的数据流的数目与 M 的关系.

为了解决分配时隙中的冲突,每个时隙分成四个阶段:RTS(request to send),CTS(clear to send),DATA 和 ACK(acknowledge)阶段.其交换过程除了根据时隙状态在不同阶段使用不同的 MIMO 数据流数目之外其余均类似于 IEEE802.11^[12].每个发送节点和接收节点仅以一个数据流交换 RTS/CTS 分组,以利于接收节点冲突分解.并且,RTS/CTS 分组可以用于 MIMO 链路的 CSI 估计.如果发送节点 u 有数据要发送给 v ,发送节点 u 当且仅当 $i = u$ 时才在时隙 i 的 RTS 阶段发送 RTS 分组给 v 用于预约.如果接收节点 v 成功接收到 RTS 分组, v 将立即给发送节点 u 回复 CTS 分组.通过是否接收到 CTS 分组,发送节点 u 可以得知当前时隙的状态.

下面我们讨论如何规划在时隙 C_0, C_1 和 C_2 的传输 $u \rightarrow v$.在 C_0 , u 的 RTS 传输不会受到干扰节点 $S_v - \{v\} - \{u\}$ 点的干扰,因此,RTS/CTS 的传输一定成功,则 u 可以在该时隙给 v

发送 M 个数据流(例如,以 MIMO 的最大数据速率发送).在 C_1, v 也发送 RTS,或者,对于 $u \rightarrow v$ 的 RTS 传输,第一类冲突会发生,因此, u 将不会在该时隙接受到来自 v 的 CTS 分组,那么 u 也不会 C_1 发送任何数据流.最后,在 C_2 ,既然 v 可以同时成功接收 M 个数据流,并且每个节点仅以一个数据流发送 RTS 分组,那么,如果 v 的邻节点数 $|S_v|$ 小于 M ,节点 v 的邻节点(包括 u)发送的 RTS 分组将会成功,每个邻节点则可以在时隙 C_2 平均发送 $M/|S_v|$ 个数据流.然而,如果 v 的邻节点数 $|S_v|$ 大于 M ,此时第二类冲突会发生,则所有 RTS 预约将失败,节点 v 的所有邻节点(包括 u)将不会发送任何数据流.图 3 显示了网络拓扑,时隙分配和传输过程.

图 4 显示了在节点 A 分配时隙的数据流传输,其拓扑结构同图 3.从图 3 和图 4 可以看出,MIMO-TTR 不仅无需知道整个网络拓扑,而且可以分解在每个节点分配时隙的冲突.此外,它可以有效地控制 MIMO 链路的数据流数目,这可以有效地提高网络容量.



(1)子帧 0 时隙 0 传输示意 (2)子帧 1 时隙 1 传输示意 (3)子帧 2 时隙 2 传输示意
图 4 Ω_A 的传输示意图 ($D=3, M=4$)

4 理论分析

本文仅考虑传输 $u \rightarrow v$ 的通过率.既然更多的邻节点会导致更多的冲突,我们仅分析 $|S_v| = D$ 和所有邻节点都向 v 发送数据流情况下的通过率.并假设网络处于重负载.既然每两个节点最多共享 k 个时隙^[4],则节点 u 和节点 v 的共享时隙应满足如下关系式

$$|C_1| \leq k \tag{1}$$

同时,节点 u 的不包含 v 的干扰节点数最多为 $D - 1$,因此,节点 u 与这些干扰节点的共享时隙应满足如下式子

$$|C_2| \leq k(D - 1) \tag{2}$$

通过以上讨论,我们可以知道节点 u 可以在 C_0 给 v 发送 M 个数据流,其中 $|C_0| = q - |C_1| - |C_2|$,并且在 C_1 不会发送任何数据流.如果 $D \leq M$,节点 v 的所有邻节点(包括 u)可以平均发送 M/D 个数据流.但是,如果 $D > M$,节点 v 的所有邻节点(包括 u)就不会发送任何数据流.因此,令 M_s 表示在 C_2 的平均发送的数据流数目,我们可得

$$M_s = \begin{cases} M/D, & \text{if } D \leq M \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \tag{3}$$

在本文,链路 $u \rightarrow v$ 的通过率定义为每帧中成功发送的数据流数目对帧长的比例,因此 u 的通过率可以表示如下

$$G(u) = [M(q - |C_1| - |C_2|) + M_s |C_2|] / q^2 = [Mq - M|C_1| - (M - M_s)|C_2|] / q^2 \tag{4}$$

其中 $M(q - |C_1| - |C_2|)$ 是在 C_0 中平均发送的数据流数目, $M_s |C_2|$ 是在 C_2 中平均发送的数据流数目, q^2 是帧长.因此,将式(1)和(2)的最大值代入到式(4)中,可得最小通过率或者

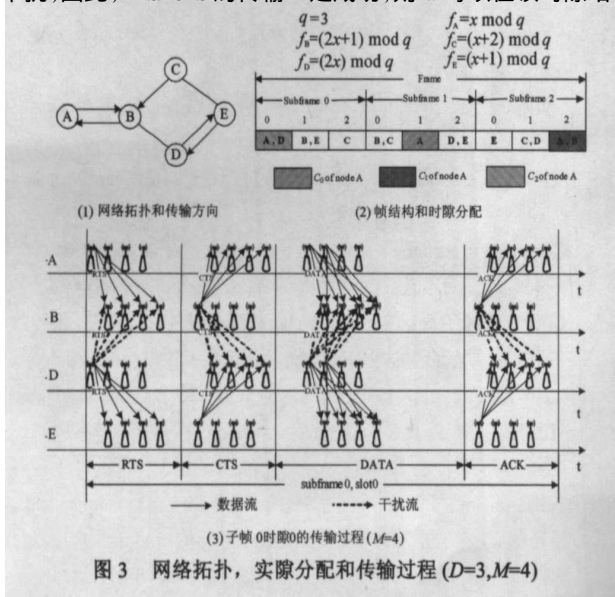


图 3 网络拓扑,时隙分配和传输过程 ($D=3, M=4$)

保证通过率如下

$$G_{\min} = [M(q - kD) + M_s k(D - 1)] / q^2 \quad (5)$$

这里 G_{\min} 表示所有节点通过率中的最小通过率, 因此, 它反映了所有节点中的保证通过率. 下面, 我们将讨论最佳帧长, 即最佳 q 值. 为了得到 G_{\min} 的最大值, 我们需解如下等式:

$$\partial G_{\min} / \partial q = -Mq^{-2} + 2k(MD - M_s D + M_s)q^{-3} = 0 \quad (6)$$

这样可得

$$q = 2k(MD - M_s D + M_s) / M \quad (7)$$

因此, 如果 $q = 2k(MD - M_s D + M_s) / M$, G_{\min} 达到最大值. 但是, 我们知道 q 必须满足如下关系^[4,5].

$$q \leq \max(N^{1/(k+1)}, kD) \quad (8)$$

因此, 如果 $2k(MD - M_s D + M_s) / M \leq \max(N^{1/(k+1)}, kD)$, 则当 $q = 2k(MD - M_s D + M_s) / M$ 时, G_{\min} 达到最大值, 否则, 当 $q = \max(N^{1/(k+1)}, kD)$ 时, G_{\min} 达到最大值. 因此, 我们得到最佳 q 值为,

$$q_{\text{opt}} = \max(2k(MD - M_s D + M_s) / M, N^{1/(k+1)}, kD) \quad (9)$$

同时, G_{\min} 的最大值如下:

$$\max(G_{\min}) = G_{\min}(q_{\text{opt}}) \quad (10)$$

5 结果

在这一部分, 我们评估 MIMO-TTR 在不同的最大度 D , 天线数 M 和节点数 N 下的性能. 对于任何参数 D , M 和 N , 网络均处于重负载.

图 5 显示当 D 较小时, 对于所有 M 值, G_{\min} 随 D 的增加而迅速减小. 然而, 当 D 变得较大时, G_{\min} 就不再很敏感地随 D 而变化. 这表明 D 对网络通过率具有较大的影响. 从图 6 我们可以看到当给定 M 和 D , G_{\min} 几乎不随 N 而变. 这表明我们的协议不仅无需知道网络拓扑信息, 而且 N 对网络性能

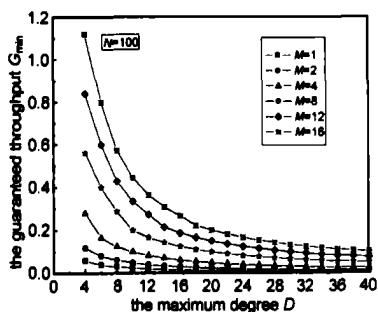


图 5 保证通过率 G_{\min} 在不同 M 下随 D 的变化图

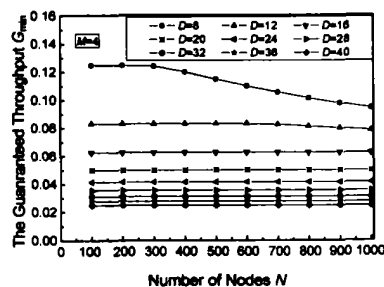


图 6 保证通过率 G_{\min} 在不同 D 下随 N 的变化图

的影响也很小. 网络通过率随 N 和较大 D 的较小的波动表明 MIMO-TTR 很稳定, 或者说, 网络拓扑变化对网络性能影响很小, 这是网络设计的一个重要指标. 图 7 表明 G_{\min} 对于所有 N 值随 M 增加而快速增加. 此外, 当 M 大于 D 时, 通过率会增加得很快. 这是因为当 M 增加时, 不仅在 C_0 的通过率线性增加, 而且在 C_2 的通过率也快速增加, 特别当 $M > D$ 时. 这表明如果有效地使用 MIMO 链路, MIMO-TTR 的通过率会极大地提高.

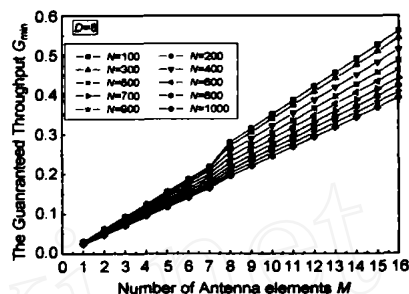


图 7 保证通过率 G_{\min} 在不同 N 下随 M 的变化

6 结论

通过动态分配 MIMO 的传输容量和它的抗干扰能力, MIMO-TTR 极大地提高了通过率. 通过预约, 每个节点在其无干扰时隙可同时发送 MIMO 链路的所有数据流, 并在其共享时隙发送 MIMO 链路的一部份数据流来解决冲突. 该协议无需知道全网的拓扑信息, 便于实现, 适合分布式应用.

参考文献:

- [1] Xu B, Hischke S. The role of ad hoc networking in future wireless communications [A]. International Conference on Communication Technology Proceedings 2003 (ICCT 2003) [C]. Beijing: IEEE, 2003. 1353 - 1358.
- [2] IETF MANET Working Group. mobile Ad hoc Networking (MANET): Routing Protocol Performance Issues and Evaluation Considerations (RFC2501) [DB/QL]. <http://www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html>.
- [3] Sundaresan K, Sivalumar R, Ingram M A, Chang T Y. Medium access control in ad hoc networks with MIMO links: optimization considerations and algorithms [J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2004, 3(4): 350 - 365.
- [4] Chlamtac I, Farago A. Making transmission schedules immune to topology changes in multihop packet radio networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1994, 2(1): 23 - 29.
- [5] Ju J H, Victor O K Li. An optimal topology-transparent scheduling method in multihop packet radio networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1998, 6(3): 298 - 306.
- [6] Narasimhan R. Spatial multiplexing with transmit antenna and constellation selection for correlated MIMO fading channels [J]. IEEE Trans Signal Processing, 2003, 51(11): 2829 -

- 2838.
- [7] Foschini G J, Gans M J. On the limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas[J]. Wireless Personal Communications, 1998, 6(3) :311 - 335.
- [8] Foschini G J. Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multiple antennas[J]. Bell Lab Technical Journal, 1996, 1(2) :41 - 59.
- [9] Wolniansky P W, Foschini G J, Golden G D, Valenzuela R A. V-BLAST: An architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel[A]. Int Symp on Advanced Radio Technologies 1998[C]. Boulder: IEEE, 1998. 9 - 11.

- [10] Golden G D, Foschini G J, Valenzuela R A, Wolniansky P W. Detection algorithm and initial laboratory results using the V-BLAST space-time communication architecture [J]. Electronic Letter, 1999, 35(1) :14 - 15.
- [11] Gesbert D, Shafi M, Shiu D S, J. Smith P, Nguib A. From theory to practice: An overview of MIMO space-time coded wireless systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2003, 21(3) :281 - 302.
- [12] IEEE Std. 802. 11: Wireless LAN Media Access Control (MAC) and Physical Layer (Phy) Specification[S]. IEEE Std. 1999.

作者简介:



张光辉 男, 1976 年 7 月生于吉林省榆树市, 博士研究生, 1995 年入长春邮电学院(现吉林大学)通信工程系读本科, 2001 年入西安电子科技大学通信与信息系统专业硕博连读, 研究方向为无线 ad hoc 网络的多址接入技术的研究。
E-mail: ghzhang_xd@yahoo.com.cn



赵敏 女, 1981 年 2 月生于吉林省榆树市, 硕士研究生, 2003 年入吉林大学, 研究方向包括资源管理。



李建东 男, 1962 年 10 月生于江苏省阜宁县, 博士生导师。1982 年和 1985 年分别毕业于西北电讯工程学院本科和研究生班, 1990 年毕业于西安电子科技大学博士生班, 获工学博士学位, 1994 年破格晋升为教授, 2002 年 1 月-2003 年 1 月美国 Cornell 大学访问教授, 现任西安电子科技大学通信工程学院院长和综合业务网理论和技术国家重点实验室主任、博士生导师, 总装部通信导航测控专业专家组成员, 从事宽带无线 IP 技术、移动通信、软件无线电、ad hoc 自组织网络等方面的研究。

陈艳羽 女, 1975 年 7 月生于黑龙江省龙江县, 硕士研究生, 1998 年毕业于大庆石油学院通信工程专业, 2005 年 9 月入东北师范大学理想信息研究院, 研究方向是软件与理论。

李长乐 男, 1976 年生于河南南阳, 博士生, 研究方向是多址接入技术, 无线局域网和智能天线技术。