

多跳 Ad Hoc 网络中支持 MIMO 的广播传输调度算法

李建东, 张光辉, 陈艳羽, 李长乐, 张文柱

(西安电子科技大学 综合业务网理论与关键技术国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘要: 针对当前支持 MIMO 的多址协议仅支持点对点传输, 提出多跳 Ad Hoc 网络中支持 MIMO 的广播传输时分多址接入协议, 其核心算法是保证每个节点无冲突传输广播业务且保证最小帧长的时隙调度算法, 充分利用了 MIMO 系统并行数据流传输的特性, 该特性可使发生传输冲突的节点集从两跳范围内的邻节点减小到一跳范围内的邻节点, 从而提高网络容量. 结果表明该协议可极大地提高网络容量和减小平均分组时延.

关键词: 多输入多输出系统; 时分多址接入; 广播; 多跳 Ad Hoc 网络

中图分类号: TN915.04 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2400(2006)04-0580-04

Broadcast scheduling algorithms in multihop Ad Hoc networks with MIMO links

LI Jian-dong, ZHANG Guang-hui, CHEN Yan-yu,
LI Chang-le, ZHANG Wen-zhu

(State Key Lab. of Integrate Service Networks, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract: As the current medium access control (MAC) protocols with multiple input multiple output (MIMO) links only bear point to point service, a broadcast scheduling algorithm in multihop Ad Hoc networks with MIMO links is proposed. The key to the algorithm is the time slot scheduling which guarantees collision-free transmissions for every node and minimum frame length. The algorithm increases the simultaneous broadcast transmissions of MIMO links efficiently. Due to the interference null capacity of MIMO links, the interference node set of each node can decrease from two hop neighbors to one hop neighbors. Results show that our algorithm can greatly improve network capacity and decrease average packet delay.

Key Words: multiple input multiple output (MIMO); time division multiple access (TDMA); broadcast; multihop Ad Hoc network

MIMO (multiple input multiple output) 无线链路在丰富多径环境下可有效地提高频谱利用率^[1]. MIMO 系统的发送端和接收端均配备多天线, 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^[2]. 如果 MIMO 采用 V-BLAST 结构, 可极大提高数据传输速率^[3]. 在 V-BLAST 中, 多个并行数据流可同时以相同频率在多个天线中并行发送和接收. 在丰富多径传播下, 接收端利用数据流所经过的不同空间特性将它们分离^[3]. 无线 Ad Hoc 网络是一种不需要固定基础设施支撑的、由若干移动节点组成的自组织无线网络^[4]. 在无线 Ad Hoc 网络中, MIMO 技术与 MAC (medium access control) 协议的有效结合是一个非常重要的研究课题, 然而, 目前仅看到文献^[5]提出了基于 MIMO 的时分多址点对点传输 MAC 协议. 笔者针对广播传输提出了多跳 Ad Hoc 网络中支持 MIMO 的 TDMA (time division multiple

收稿日期: 2005-09-28

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(20050701007); 国家自然科学基金和微软亚洲研究院联合资助项目(60372048); 高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划资助项目; 国家自然科学基金重大项目(60496316); 国家“863”课题认知无线电技术研究(2005AA123910); 教育部科学技术研究重点项目(104171)

作者简介: 李建东(1962-), 男, 教授.

access) 协议,该协议的核心算法是充分利用 MIMO 的并行传输数据流的能力和其干扰抑制能力,保证每个节点的广播传输的干扰节点集合由两跳范围内的邻节点构成尽量减少为由一跳范围内的邻节点构成,从而有效实现节点的无冲突传输,并使帧长最小.本文中所述的广播传输是指 MAC 层的广播传输,即发送节点向其所有一跳邻节点广播发送数据,并保证其所有一跳邻节点都能正确接收.

1 MIMO 模型与网络模型

假设 MIMO 链路的发送端和接收端的天线数一样,均为 M . 在 V-BLAST 结构下,发送端每次传输可并行发送 M 个数据流,可获得 M 倍的通过率.然而,当综合考虑全网相互干扰的链路时,每个链路均采用 M 个数据流并行发送的方式对于改善全网的通过率而言并不是最佳的,而应综合考虑全网的情况并控制每个链路的数据流数目^[5].例如,在 TDMA 方式下相互干扰的两个链路,如果让两个链路同时发送,每个链路发送 $M/2$ 个数据流比每个链路均使用 M 个数据流分别在不同时隙传输可获得更好的网络通过量.一般说来,当相互干扰的链路数为 l ,每个链路所使用的数据流降为 M/l ^[5].且当一个链路允许使用 M 个数据流中的 m 个 ($m < M$) 时,它可将传输功率分配给具有最好信道性能的 m 个数据流,这样可获得更大的链路容量^[6,7].

N 个节点的多跳 Ad Hoc 网可表示为图 $G(V, E)$,其中 V 是所有节点的集合,且 $|V| = N$, E 是所有链路的集合.如果节点 u 在节点 v 的传输半径内,则链路 (u, v) 在链路集合 E 中.如果 $(u, v) \in E$,那么 $(v, u) \in E$,称 u, v 互为一跳邻节点.令 $N_u (\forall u \in V)$ 表示任意某节点 u 的一跳邻节点的集合,则节点 u 的度定义为其一跳邻节点数即 $|N_u|$.全网最大度为 $D = \max_{u \in V} |N_u|$,显然, $|N_u| \leq D, \forall u \in V$.所有节点均使用相同频段且不能同时发送和接收.

2 协议描述

冲突是导致广播传输失败的惟一原因.这里所说的广播传输失败是指只要有一个发送节点的一跳邻节点没有正确收到该发送节点的数据就认为广播传输失败.由于采用 V-BLAST 结构的接收节点可同时接收 M 个数据流,因此,支持 MIMO 的广播传输冲突与非 MIMO 网络是不同的,将支持 MIMO 的广播传输冲突分为第一类冲突和第二类冲突.在某时隙 i ,当节点 u 广播传输时,如果节点 u 的任意一个一跳邻节点 $v (\forall v \in N_u)$ 也在时隙 i 发送,则节点 v 无法同时发送和接收,第一类冲突就会发生.同理,当节点 u 在某时隙 i 传输时,节点 u 的任意一个一跳邻节点 $v (\forall v \in N_u)$ 的一跳邻节点中有 M 个或多于 M 个节点也在时隙 i 发送一个广播数据流,此时将导致节点 v 无法正确接收任何数据流,第二类冲突就会发生.因此,为了避免第一类冲突,一个节点的所有一跳邻节点应安排在不同的时隙.而对于两跳邻节点就可以空分复用时隙直到 MIMO 的最大容量,从而提高网络容量.具体地说,如果 $|N_v| \leq M (\forall v \in N_u)$,则对于所有 $N_v (\forall v \in N_u)$ 中的节点均可和节点 u 共享一个时隙;如果 $|N_v| > M (\exists v \in N_u)$,则对于 $N_v (|N_v| > M, \exists v \in N_u)$ 中的 $M-1$ 个节点可和节点 u 共享一个时隙,而其余 $|N_v| - M$ (需要减掉节点 u 本身) 个节点需要分配与节点 u 不同的时隙,这些 $|N_v| - M$ 个节点称为两跳干扰节点.所以,如果 $M \geq D$,只要两个节点超过一跳范围,该两个节点就可同一时隙无冲突传输,而不像非 MIMO 的多跳 Ad Hoc 网络中两个节点只有超过两跳才可在同一时隙无冲突传输.因此,使用 MIMO 有可能使发生冲突的节点集由两跳范围内的邻节点减小到一跳范围内的邻节点,从而提高网络容量.一旦时隙安排好,每帧重复.因此节点时隙调度的问题是:在一跳邻节点和两跳干扰节点范围内无冲突传输的限制下,分配每个节点尽可能多的时隙用于传输分组,并使帧长最短.

设 c 是调度算法计算过程中某时刻的帧长,即该帧包含的所有时隙数目.当节点 A 选择时隙 x 后,在节点 A 的一跳和两跳邻节点中选择时隙 i 的节点数为 $n_i, i = 0, 1, \dots, c-1$.因此,类似文献^[8,9]中的剩余时隙自由度函数,节点 A 在选择时隙 x 后的剩余时隙的调度自由度可用下面函数衡量:

$$F(u, x) = \prod_{i=0}^{c-1} n_i [|N_u| + |N_v|]^{-i}, \quad \forall v \in N_u. \quad (1)$$

可以看出, $F(A, x)$ 越小,节点 A 的一跳和两跳邻节点的分配时隙自由度就越大,因此需要的时隙总数就越

少,即帧长最短^[8,9].式(1)的计算要考虑 MIMO 的并行传输能力.

先假设每个节点在其所分配的每个时隙中只传输 MIMO 链路中的一个数据流.时隙调度分两个阶段:第一阶段,每个节点在一帧中只分配一个时隙,从而获得最小帧长;第二阶段,尽量分配给每个节点更多的时隙.由于有更大度的节点的干扰节点会更多,从而在选择时隙上有更多的限制,因此应当首先为这些节点分配时隙,以提高它们获得更多时隙的机会^[8,9].因此,为了获得公平调度,每个节点以节点度按降幂分配,在每轮分配中,每个节点仅分配一个时隙.在分配时隙过程中,采用剩余时隙自由度来衡量选择时隙的优先权.下面详细描述算法,步骤(1)~(7)是第一阶段,步骤(8)~(11)是第二阶段.

(1) 将所有节点按节点度的大小降幂排序 S_1, S_2, \dots, S_N , 显然具有最大度的节点 S_1 的度为 D .

(2) 将最大度的节点 S_1 及其所有一跳邻节点分配不同的时隙,首先令 $c = D + 1$, 将时隙 1 分配给 S_1 , 并将时隙 2 到 c 分配给 S_1 的所有一跳邻节点.

(3) 令 $j := 1$.

(4) 如果节点 S_j 已经分配时隙,转到(6).

(5) 分配时隙给 S_j (寻找不被一跳邻节点和两跳干扰节点使用的时隙):

a) 如果没有时隙可分配,则 $c := c + 1$, 并分配 c 给 S_j ;

b) 如果仅有一个时隙可分配,则分配该时隙给 S_j ;

c) 如果有多于一个时隙可分配,选择有最小 $F(S_j, x)$ 值的时隙分配给 S_j .

(6) 如果 $j < n$, 则 $j := j + 1$, 转到(4).

(7) 通过以上分配,每个节点在每帧中仅分配一个时隙,并且得到了最小帧长,然而,有些时隙可被继续分配以实现最大空分复用,从而提高网络容量.

(8) 再令 $j := 1$.

(9) 再分配时隙给 S_j (寻找不被一跳邻节点和两跳干扰节点使用的时隙):

a) 如果没有时隙可分配,则不再分配时隙给 S_j ;

b) 如果仅有一个时隙可分配,则分配该时隙给 S_j ;

c) 如果有多于一个时隙可分配,选择具有最小 $F(S_j, x)$ 值的时隙分配给 S_j .

(10) 如果 $j < N$, 则 $j := j + 1$, 转到(9).

(11) 如果再没有任何节点可在一帧中分配时隙,则算法结束,否则再转到(8).



图 1 network1 时隙分配示意图

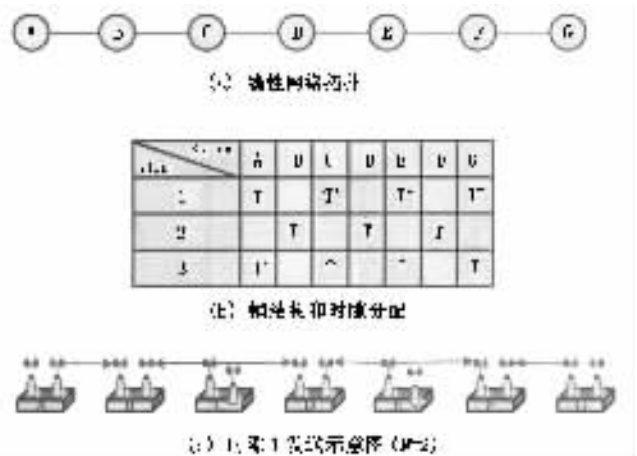


图 2 network2 时隙分配示意图

下面举例说明算法:5 个节点网络拓扑如图 1(a)所示,首先计算所有节点的度,并把所有节点按节点度降幂排序为 B, D, A, C, E , 然后把节点 B 和其邻节点 A, C 和 D 分配 4 个时隙,分别为时隙 2, 1, 3, 4. 令 $j := 1$, 分配时隙. 显然, S_1, S_2, S_3 和 S_4 (即 B, D, A 和 C) 已经分配了时隙,只需分配节点 S_5 (即 E) 时隙,由于节点 E 可与节点 B 或节点 C 共享时隙 2 或时隙 3, 因此需要计算 $F(E, 2)$ 和 $F(E, 3)$. 因为 $F(E, 2) \leq F(E, 3)$, 所以节点 E 应选择时隙 2 与 B 共享一个时隙,至此所有节点在每帧中只分配一个时隙,此时也得到最小帧长,帧长

为 4,然后再进行第二阶段分配,即尽量在一帧中分配每个节点尽可能多的时隙.显然,没有其他时隙可分配给 B 使其与其他节点共享,也没有其他时隙可分配给 C,但可分配时隙 1 给 D 同 A 共享,分配时隙 4 给 A 同 D 共享,分配时隙 3 给 E 同 C 共享.此时,发现再无节点可以无冲突的分配时隙,至此分配结束,且每个节点在其分配的每个时隙中仅传输一个数据流.得到时隙分配如图 1(b) 所示,图中 T 表示第一阶段分配的时隙, T^* 表示第二阶段分配的时隙.分配在时隙 1 的节点的传输示意图如图 1(c) 所示.图 2 给出了 7 个节点的线性网络拓扑的时隙分配图和传输示意图.

3 性能比较

下面以网络容量和时延作为衡量网络性能的指标.设 C_k 表示节点 k 的容量,由于每个节点在其分配的每个时隙仅传输一个数据流,则 C_k 可表示为^[8]

$$C_k = T_k / L \quad (2)$$

其中 T_k 为一帧中分配给节点 k 的时隙数, L 为帧长.则整个网络容量为

$$C = \sum_{k=1}^N C_k \quad (3)$$

假设在重负荷下,第 k 个节点的分组时延为^[8]

$$D(k) = (L - T_k) / T_k \quad (4)$$

这里的时延以时隙为单位.所有节点的平均分组时延为

$$D_{av} = (1/N) \sum_{k=1}^N D(k) \quad (5)$$

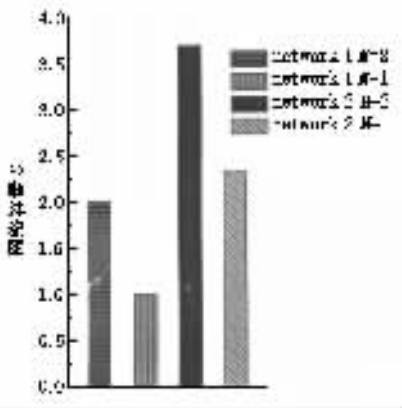


图 3 不同拓扑和天线数下容量比较

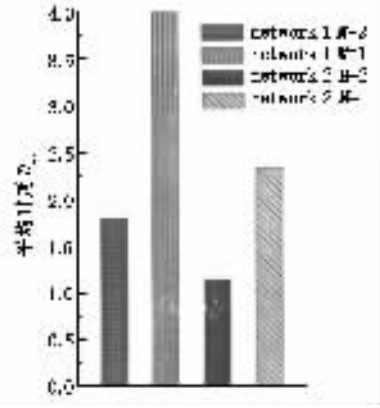


图 4 不同拓扑和天线数下平均时延比较

图 3 和图 4 分别比较在图 1 和图 2 网络拓扑下天线数 M 对网络容量和平均分组时延的影响,图 1 和图 2 中的网络分别标识为 network1 和 network2.这里并没有考虑把能量分配给最好性能的信道所带来的增益,因此,实际的网络容量要更大些.从图 3 可看出采用 MIMO 结构可极大地提高网络容量,无论在哪种拓扑下采用 MIMO 都会极大地提高网络容量,这是因为 MIMO 的 V-BLAST 结构使每个节点的冲突节点可由两跳范围内的邻节点减小到一跳范围内的邻节点,这样可极大地提高网络容量.同时,从图 4 也可看出采用 MIMO 可极大地减小分组时延.无论在哪种拓扑下,时延均随天线数的增加而减小.总之,增加 MIMO 的天线数可极大地提高网络容量和减小平均分组时延.

4 结束语

针对当前多跳 AdHoc 网络中支持 MIMO 的多址协议仅支持点对点传输,提出了支持 MIMO 的广播