

分簇 ad hoc 网络协同 MIMO 传输策略

冯文江, 赵伟, 王东

(重庆大学 通信工程学院, 重庆 400044)

摘 要: 对协同 MIMO 传输所具有潜力进行研究, 提出一种适用于分簇 ad hoc 网络的传输策略, 包括 2 个主要方面: 其一是加权协同节点选择算法, 该算法综合考虑节点间不对称的双向信道状态、节点剩余能量和节点连接度等因素, 选择最优节点的集合构成协同 MIMO 系统; 其二是虚拟节点之间虚拟链路的建立及维护机制。仿真表明, 有节点选择的协同 MIMO 比 SISO 传输能获得更大的信道容量, 比无节点选择的协同 MIMO 传输降低能耗约 70%。

关键词: 协同 MIMO 传输; 信道状态信息; 剩余能量; 连接度

中图分类号: TN919.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2012)03-0001-09

Cooperative MIMO transmission scheme for clustered ad hoc networks

FENG Wen-jiang, ZHAO Wei, WANG Dong

(College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The potential of cooperative multiple-input multiple-output (CMIMO) transmission was explored. An according CMIMO transmission scheme was proposed for clustered ad hoc networks, including two critical aspects. The first was weighted cooperative node selection algorithm, which synthesized the asymmetrical bi-directional channel state information (CSI) between nodes, as well as the nodes' residual energy and connectivity. Consequently, a set of optimal nodes was selected to develop the CMIMO system mentioned above. The second was the mechanism of establishing and maintaining virtual link between two virtual nodes. Simulation shows that the proposed CMIMO transmission scheme affords higher capacity against SISO, and the scheme with node selection is more energy-efficient than that without node selection for the 70% energy saved.

Key words: CMIMO transmission; channel state information; residual energy; connectivity

1 引言

Ad hoc 网络是一种由兼具路由器和终端功能的无线收发节点构成的多跳自组织网络。无中心、自组织、动态拓扑、多跳路由、有限带宽、有限安全性、非对称信道及特殊的信道共享模式, 决定了

ad hoc 网络的传输策略需要特殊设计。

协同通信通过彼此共享网络内无线收发节点的信道资源, 构成虚拟多天线从而获得空间分集增益。Sendonaris^[1,2]等的研究表明, 多节点协同能够改善系统容量并有效抵抗无线信道的衰落效应。

随着协同通信技术的发展, 协同多输入多输出

收稿日期: 2011-05-03; 修回日期: 2011-11-15

基金项目: 重庆市自然科学基金重点资助项目 (CSTC2009BA2064); 中央高校基本科研业务费基金资助项目 (CDJXS11162236)

Foundation Items: The Key Natural Science Foundation of Chongqing(CSTC2009BA2064); The Fundamental Research Funds for the Central Universities(CDJXS11162236)

(CMIMO, cooperative multi-input multi-output)^[3]被提出。研究表明,在协同 MIMO 系统中,多个具有全向单天线的节点构成协同传输实体,能够克服传统 MIMO 的限制^[4-7],所获得的发送、接收分集增益及阵列增益能显著提高信道容量、减小端到端传输时延、降低数据传输能耗和接收误比特率(BER, bit error rate)^[8]。Zhao^[9]等设计了一种基于分簇 ad hoc 网络的协同 MIMO 系统模型,并分析系统的时间效率和香农容量限,结果表明,协同 MIMO 无需额外的带宽资源就能增加系统容量,但并非任何情况下均可获得系统容量增益,而是取决于协同节点数和簇内/间信道状态。当簇内信道状态优于簇间信道状态时,协同节点数越多,所获得的系统容量增益越大,但能耗也随之增大。考虑到系统能耗因素,需要选择适当的节点来构建协同 MIMO 系统。Nasim^[10]等针对 ad hoc 网络提出一种层次化簇头选择算法,充分考虑节点间的能量均衡选择簇头节点及协同节点,构成 2×2 协同 MIMO 系统,并引入簇重构机制来应对节点能量耗尽导致的网络拓扑变化。在无线传感器网络中的应用表明,该算法能有效节省节点能耗、延长网络生存周期。Islam^[11]等提出一种基于协同 MIMO 的无线传感器网络高效簇间传输策略,利用特定的节点选择函数选择收发节点构成协同 MIMO 系统,并建立了相应的能耗模型和时延模型。研究表明,相对于无节点选择的协同 MIMO 系统和 SISO 系统,该系统能量效率更高。

已有研究大多假定无线链路对称,但 ad hoc 网络中的无线链路往往具有非对称性。本文综合考虑非对称无线链路状态、节点剩余能量以及节点连接度 3 个因素,提出一种适用于分簇 ad hoc 网络的加权协同节点选择算法,并通过定义虚拟节点和基于协同 MIMO 的虚拟链路,研究基于协同 MIMO 的传输策略,分析算法的能量效率和信道容量增益。

2 系统模型

2.1 名词术语

虚拟节点(VN, virtual node): 定义分簇 ad hoc 网络中每个簇为虚拟节点,簇头为核心节点(KN, kernel node),其余节点为成员节点(TN, team node)。

虚拟链路(VL, virtual link): 定义连接 2 个 VN 的实际通信链路集合为一条 VL,本质上是虚拟

MIMO 信道。

连接度(association): 能互通的节点称为邻居节点,连接度定义为同一个 VN 内 TN 的邻居节点数与 KN 的邻居节点数的比值。

2.2 网络结构

分簇 ad hoc 网络结构如图 1 所示。若 VN 中的 TN 能互通,称为相邻 VN,相邻 VN 间通过 VL 连接构成虚拟骨干网络。假设网络中任意节点间收发同步,节点间信道为加性高斯白噪声(AWGN)信道。

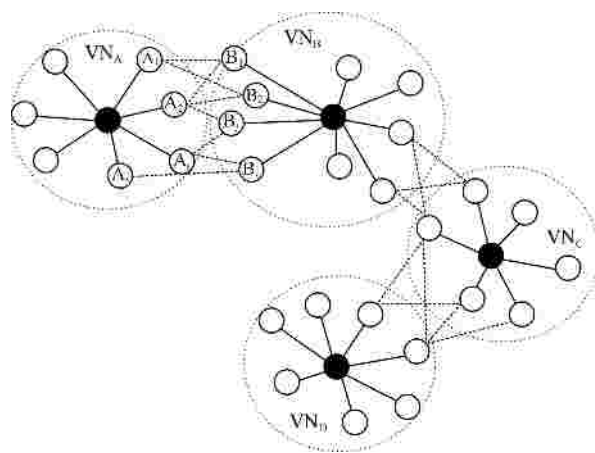


图 1 网络结构

假定相邻虚拟节点 VN_A 和 VN_B 之间能互通的节点分别为 A_1, A_2, \dots, A_r 和 B_1, B_2, \dots, B_r , 节点 A_i 与 B_j 间的信道参数用 L_{ij} 表示,则虚拟链路 VL 对应的信道参数矩阵为

$$L = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & \dots & L_{1r} \\ L_{21} & L_{22} & \dots & L_{2r} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{r1} & L_{r2} & \dots & L_{rr} \end{bmatrix} \quad (1)$$

归一化节点剩余能量用当前可用能量与初始能量的比值表征,节点 A_1, A_2, \dots, A_r 和 B_1, B_2, \dots, B_r 的归一化剩余能量分别为

$$\begin{aligned} E_A &= [E_{A_1}, E_{A_2}, \dots, E_{A_r}, \dots, E_{A_r}] \\ E_B &= [E_{B_1}, E_{B_2}, \dots, E_{B_j}, \dots, E_{B_r}] \end{aligned} \quad (2)$$

节点 A_1, A_2, \dots, A_r 和 B_1, B_2, \dots, B_r 的连接度分别为

$$\begin{aligned} A_A &= [A_{A_1}, A_{A_2}, \dots, A_{A_i}, \dots, A_{A_r}] \\ A_B &= [A_{B_1}, A_{B_2}, \dots, A_{B_j}, \dots, A_{B_r}] \end{aligned} \quad (3)$$

式中, E_{A_i} 和 E_{B_j} 分别为节点 A_i 和 B_j 的归一化剩余能量; A_{A_i} 和 A_{B_j} 分别为节点 A_i 和 B_j 的连接度。

3 协同节点选择算法

3.1 协同节点选择机制

根据协同 MIMO 理论, 当且仅当收发阵元数相等时, 系统能获得最大分集增益^[3], 因此需要通过节点选择算法选择一定数量的节点来构建协同 MIMO 系统以获得全分集增益。Ahmed^[7]等根据节点地理位置选择协同节点; Islam^[11]等依据信道增益选择协同节点, 然而单参数算法无法综合考虑影响系统性能的多个因素。Behrouz^[12,13]等根据平均信道条件和节点剩余能量选择协同节点并设计了一种最优功率分配策略; Islam^[11]认为, 发送端协同节点选择应以信道条件、剩余能量、节点间距离以及地理位置信息为依据, 而接收端协同节点选择只需考虑信道状态。

VN 间通过空间分离的单天线节点构成协同 MIMO 实现通信, 考虑到 ad hoc 网络的基本特性, 本文综合考虑非对称无线链路状态、节点剩余能量以及节点连接度 3 个因素, 提出一种加权协同节点选择机制。质量好的无线链路能保证传输速率和误比特率性能; 而节点剩余能量直接决定其生存时间, 必须选择有足够能量的节点来组建协同 MIMO 系统; 节点连接度越大, VN 中能与其直接通信的节点数越多, 在进行数据传输时需要的中继越少, 有助于减少数据传输能耗。

用 γ_{m-n} 表示节点 m 以预定功率 P_0 向节点 n 发送数据时, 节点 n 的接收信噪比。节点 A_i 与 B_j 之间的信道参数定义为 L_{ij} :

$$L_{ij} = \sqrt{1 + \frac{g_{A_i \rightarrow B_j}^2 + g_{B_j \rightarrow A_i}^2}{\max(g_{A_i \rightarrow B_j}, g_{B_j \rightarrow A_i}) \min(g_{A_i \rightarrow B_j}, g_{B_j \rightarrow A_i})}} \quad (4)$$

上式综合衡量了节点 A_i 与 B_j 间的双向链路状态, 节点 A_i 、 B_j 的接收信噪比越接近, 信道对称性越好; 接收信噪比越大, 信道参数 L_{ij} 越大。根据 L_{ij} 构建归一化的信道参数矩阵 L , 使得 $L_{ij} \in [0,1]$ 。

节点加权选择函数综合考虑信道参数、节点剩余能量和节点连接度 3 个因素, 定义为

$$S_{ij}(L_{ij}, E_{A_i}, E_{B_j}, A_{A_i}, A_{B_j}) = w_L L_{ij} + w_E \left(\frac{E_{A_i} + E_{B_j}}{2} \right) + w_A \left(\frac{A_{A_i} + A_{B_j}}{2} \right) \quad (5)$$

其中, w_L 、 w_E 、 w_A 分别表示信道参数、剩余能量以及连接度的权重。节点选择函数中采用平均剩余能量 $(E_{A_i} + E_{B_j})/2$ 和平均连接度 $(A_{A_i} + A_{B_j})/2$ 综合考量节点 A_i 和 B_j 的状态, 并使其取值在 $[0,1]$ 之间, 便于计算加权值。根据计算出的加权值 S_{ij} , 构建加权节点选择矩阵 S :

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & S_{1r} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & S_{2r} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{r1} & S_{r2} & \dots & S_{rr} \end{bmatrix} \quad (6)$$

S_{ij} 综合衡量发送节点 A_i 与接收节点 B_j 的能量状态、连接状态及信道状态。 S_{ij} 越大, 节点 A_i 与 B_j 被选择成为协同节点的几率越大。

3.2 协同节点选择流程

协同节点选择流程如图 2 所示。各 KN 根据其 TN 上传的信道参数、剩余能量和连接度参数计算加权节点选择矩阵 S , 然后进行协同节点选择。针对节点剩余能量因素, 遵循以下约束: 如果 VN 中某 TN 的剩余能量小于所有成员节点剩余能量的平均值, 该节点不参与协同节点选择; 针对连接度因素, 遵循以下约束: 如果 VN 中某 TN 的连接度小于所有成员节点连接度的平均值, 该节点不参与协同节点选择。

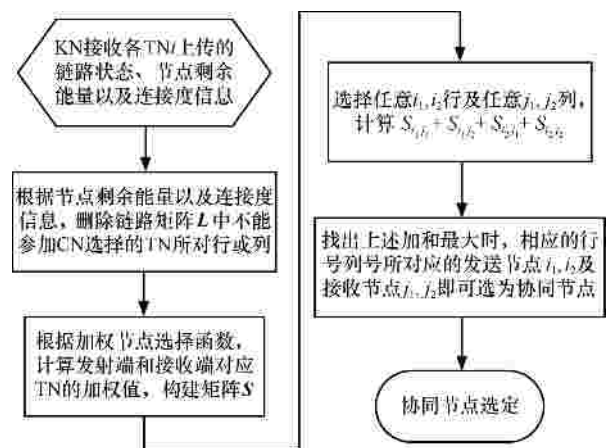


图 2 协同节点选择流程

在式(5)中, 信道参数、剩余能量和连接度权重根据不同情况有不同取值。如果节点 i, j 之间无法

通信, 对应的 $L_{ij}=0$, 则各参数权重应为 0, 即 $w_L=w_E=w_A=0$, 否则应满足 $w_L+w_E+w_A=1$, 其中, $w_L, w_E, w_A \in [0,1]$, 使得加权值 $S_{ij} \in [0,1]$, 即:

$$\begin{cases} w_L = w_E = w_A = 0, & L_{ij} = 0 \\ w_L + w_E + w_A = 1, & L_{ij} > 0 \end{cases} \quad (7)$$

获得加权节点选择矩阵 S 后, 计算所有非零元素的平均值, 找到 $i_1, i_2 (i_1 \neq i_2)$ 行及 $j_1, j_2 (j_1 \neq j_2)$ 列, 如果元素值 $S_{i_1 j_1}, S_{i_1 j_2}, S_{i_2 j_1}, S_{i_2 j_2}$ 均大于平均值, 再计算 4 个元素的总和。遍历整个加权选择矩阵, 找出总和最大的矩阵行、列号, 所对应的节点则选定为协同发送节点和协同接收节点。

各个 VN 中, KN 根据各协同节点的 ID 分别将接收协同节点和发送协同节点划分为奇节点和偶节点, ID 较小的节点为奇节点, ID 较大的节点为偶节点。如此处理是为了在后续数据传输阶段, 协同节点能独立于 KN 分布式地实现数据分块, 使不同节点发送不同的数据分块。

3.3 协同 MIMO 实现过程

对图 1 所示的网络结构, 建立连接相邻 VN 的虚拟链路, 并启动路由发现过程搜寻从源节点到目的节点的最佳传输路径。本文重点研究协同 MIMO 传输策略, 对路由算法及协议不做详述。以 VN_A 中源节点 A_S 向 VN_B 中目的节点 B_D 传输数据为例, 阐述协同 MIMO 传输过程。假设经过节点选择后选出的协同节点分别为 A_1, A_2 及 B_1, B_2 , 链路状态如图 3 所示。

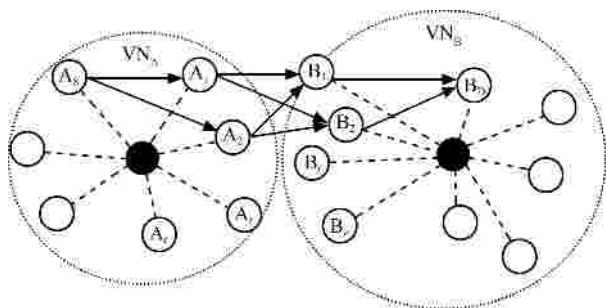


图 3 协同传输过程

源节点 A_S 将发送数据封装后发送给协同发送节点 A_1 和 A_2 ; A_1, A_2 根据自身 ID 的奇偶性, 分拣各自信号再次进行封装并发送给协同接收节点 B_1 和 B_2 ; B_1, B_2 接收来自 A_1, A_2 的不同数据块, 解码后再根据自身 ID 的奇偶性提取相应的数据块转发给下一跳中继节点或目的节点。如果节点无法纠错, 则请求上级节点重传数据。

将发送数据分为 2 块分别由 2 个协同节点发射, 接收端将收到的数据块组合校验还原出原始数据, 且任一部分数据均通过 2 条独立信道传输给 2 个接收节点, 每个接收节点都能获取完整数据并进行校验, 该策略有助于消除传输差错, 提高通信可靠性。

4 虚拟链路建立与维护

4.1 信道接入机制

在虚拟链路建立过程中, 节点采用改进的 CSMA/CA 协议接入网络。每个节点设置退避计数器 and 超时计数器, 退避计数器初值与节点剩余能量相关, 剩余能量越大, 初值越小; 超时计数器初值是确定的, 表示节点为接入信道允许等待的最长时间, 如果该计数器超时, 则放弃本次接入请求。

当节点需要发送数据时, 首先根据剩余能量确定退避计数器初值, 开始侦听信道后启动超时计数器, 若信道空闲则将超时计数器复位并接入信道传输数据; 若信道忙, 则启动退避计数器, 如果节点在超时计数器归零时仍然没有获得信道使用权, 则放弃本次传输, 否则在退避计数器归零后, 重新侦听信道, 直到成功接入信道进行传输或超时计数器归零放弃传输。

退避计数器初值由节点剩余能量决定, 剩余能量越多的节点退避时间越短, 在超时计数器归零前节点能够侦听信道次数越多, 这保证了剩余能量较多的节点接入网络的机率大。而超时计数器使节点等待接入的时间可控, 各节点分布式地控制接入等待时间, 该机制有助于控制网络时延, 也有助于减少协同节点选择的候选节点数, 从而降低运算量和存储容量需求。

4.2 虚拟链路的建立及维护

网络分簇后所形成的 VN 之间通过 VL 构成虚拟骨干网络。虚拟节点 VN_A 和 VN_B 的核心节点及成员节点分别为 KN_A, KN_B 及 $\{TN_{A_i}\}, \{TN_{B_j}\}$, 协同节点为 $\{CN_i\}$, 如图 4 所示。 VN_A 和 VN_B 之间 VL 的建立分为 7 个阶段。

阶段 1: KN_A 向各成员节点 TN_{A_i} 广播 VL 建立内部请求消息(in-REVL, internal request to establish VL), in-REVL 消息中包含发起该请求的虚拟节点的 ID。

阶段 2: 各成员节点 TN_{A_i} 收到 in-REVL 消

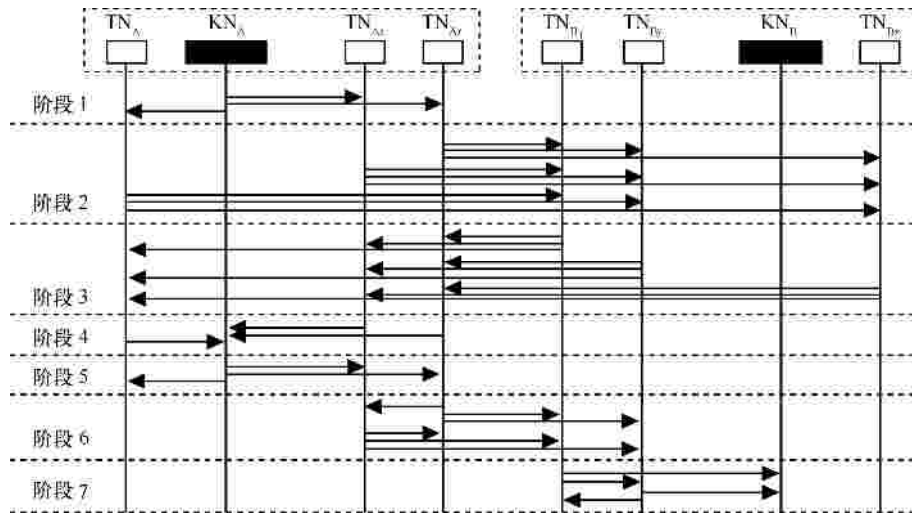


图4 虚拟链路建立流程

息后,若该节点尚未与其他 VN 的成员节点建立虚拟链路,则采用 4.1 节所述的接入机制接入信道,以预定的发射功率 P_0 向相邻的 VN(如 VN_B)广播 VL 建立外部请求(ex-REVL, external request to establish VL)消息。剩余能量越多的 TN_{A_i} 退避时间越短,能够更早接入网络。如果某成员节点超时计数器归零后仍然没有成功接入,该节点将不再参与 VL 建立,超时计数器的引入能够控制 VL 的建立时间,有助于加速 VL 的建立。

阶段 3: 相邻虚拟节点 VN_B 的成员节点 TN_{B_j} 收到首条 ex-REVL 消息后,复位并启动超时计数器,并从后续接收的多个 ex-REVL 消息中提取源节点 ID、估计接收信噪比,直到超时计数器超时。 TN_{B_j} 将自己所属的虚拟节点 ID、自身 ID、剩余能量、连接度以及源节点 ID 及接收信噪比加入虚拟链接建立请求外部反馈消息(ex-RREVL, external reply to request to establish VL),然后利用 4.1 节所述的信道接入机制接入网络,向源节点发送该反馈消息。

阶段 4: 成员节点 TN_{A_i} 收到来自 TN_{B_j} 的首条 ex-RREVL 消息后,启动超时计数器并接收 ex-RREVL 消息直到超时。从多个 ex-RREVL 消息中提取相关参数、估计接收信噪比,根据接收信噪比依据式(4)计算信道参数,与相应的节点 ID、剩余能量及连接度等一并加入虚拟链路建立内部反馈消息(in-RREVL, internal reply to request to establish virtual link),反馈给 KN_A 。

阶段 5: KN_A 收到首条 in-RREVL 消息后,启

动超时计数器并直接接收 in-RREVL 消息,直到超时计数器归零。 KN_A 从收到的全部 in-RREVL 消息中提取参数,利用式(5)计算 TN_{A_i} 和 TN_{B_j} 对应的加权值,根据 3.1 节、3.2 节所描述的协同节点选择机制及流程来确定 VN 中对应的协同节点 ID 并划分为奇节点和偶节点,然后将选择结果告知已选定的协同节点。

阶段 6: 成员节点收到核心节点发布的选择结果后,被选定的协同节点以上节所述的接入机制接入网络,告知相邻 VN 中被选定的协同节点,从而确定组成协同 MIMO 的各节点建立虚拟链路,未被选定的节点收到该消息后结束虚拟链路建立进程。

阶段 7: 在虚拟链路建立过程中,由于相邻核心节点 KN_B 并未参与协商决策,因此被选定的协同节点收到选择结果后,将 VN 间的虚拟链路状态告知 KN_B 以便实现双向通信。VL 建立后, VN 之间的通信便可用协同 MIMO 方式进行。然而核心节点或成员节点的状态变化会影响 VL 的稳定性和可用性,需采取以下维护措施。

1) KN 能量耗尽或切换导致 VN 消亡: 需要重新整合原来的成员节点,构建新的 VN。新的 VN 形成后,需要重新启动局部 VL 建立过程,建立与相邻 VN 之间的通信链路,并更新网络拓扑结构。

2) CN 能量耗尽或移动导致 VL 失效: VL 维护的任务是寻找其他符合条件的 CN 构成新的 VL。此时 VN 之间的连接状态不会改变,网络拓扑及路由不受影响。

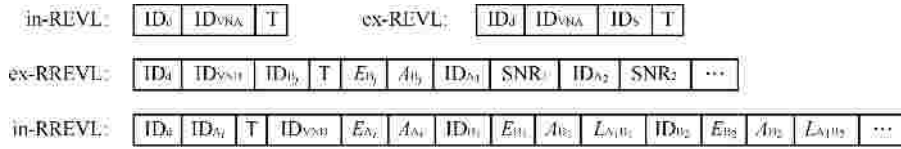


图 5 建立 VL 的消息格式

4.3 建立 VL 的消息格式

建立 VL 所用的 in-REVL、ex-REVL、ex-RREVL、in-RREVL 等消息格式如图 5 所示。

1) in-REVL: 包含目的节点 ID(ID_d)、源 VN 的 ID(ID_{vNA})以及消息类型 T (in-REVL)。TN A_i 收到该消息后首先检查消息类型,判断源 VN 的 ID 是否与自己所属 VN A 的 ID 一致,如果一致则进入阶段 2,否则丢弃该消息。

2) ex-REVL: 包含目的节点 ID(ID_d)、源 VN 的 ID(ID_{vNA})、源节点 ID(发送该消息的 TN A_i 的 ID_{A_i})以及消息类型 T (ex-REVL)。TN A_i 收到所属 KN A 发起的 in-REVL 消息后,以改进的 CSMA/CA 协议接入网络,向相邻 VN B 的成员节点 TN B_j 发起链路建立请求。

3) ex-RREVL: 包含目的节点 ID(ID_d)、消息类型 T (ex-RREVL)、VN B 的 ID(ID_{vNB})、源节点 TN B_j 的 ID(ID_{B_j})、源节点剩余能量(E_{B_j})、连接度(A_{B_j})及接收信噪比(SNR_i)。相邻 VN B 中 TN B_j 收到 ex-REVL 请求消息后,记录源 VN A 的 ID(ID_{vNA})以及所有源 TN A_i 的 ID(ID_{A_i}),估计接收信噪比,并将自己的剩余能量和连接度信息一并写入 ex-RREVL 消息中,将消息反馈给各个源节点 TN A_i 。

4) in-RREVL: 包含目的节点 ID(KN A 的 ID)、源 TN A_i 的 ID、消息类型 T(in-RREVL)、相邻 VN B 的 ID、各个 TN B_j 的 ID、剩余能量、连接度以及 TN A_i 与各个 TN B_j 之间的信道参数。TN A_i 收到相邻 TN B_j 的 ex-RREVL 消息后,各 TN A_i 提取 TN B_j 的 ID、剩余能量、连接度、接收信噪比信息,并估计来自 TN B_j 的接收信噪比,在 in-RREVL 消息中加入 TN A_i 和所有 {TN B_j } 的剩余能量、连接度以及式(4)计算的信道参数,反馈给 KN A 。

5 协同 MIMO 传输性能分析

5.1 信道容量

协同 MIMO 本质上是分布式 MIMO,其信道容量模型与 MIMO 一致。Dohler^[3]研究虚拟天线阵列时分析了 MIMO 系统的信道容量:

$$C = \text{lb det} \left(I_r + \frac{HDH^H}{N_r} \right) = \text{lb det} \left(I_r + HeH^H \frac{D}{N_r} \right) = \sum_{i=1}^t \text{lb} \left(1 + e_i l_i \frac{D}{N_r} \right) \quad (8)$$

其中, N_r 为接收端平均噪声功率, H 为信道矩阵, 对角阵 D 为发送码字的协方差矩阵。 $l_i \in (1, t)$ 为 $H^H H$ 的特征值, $e = \text{diag}(e_1, \dots, e_t)$, 第 i 个阵元分配的功率为 $e_i = (\mu - (D/N_r)^{-1})^+$, $i \in (1, t)$, μ 使得 $\sum e_i = 1$, 其中, $(a)^+ = \max(a, 0)$ 。

基于式(8)对协同 MIMO 系统信道容量进行仿真分析。发射功率平均分配,所有节点均用全向单天线,收发天线数分别为 r, t ,接收信噪比在 0~20dB 范围内变化,仿真结果如图 6、图 7 所示。

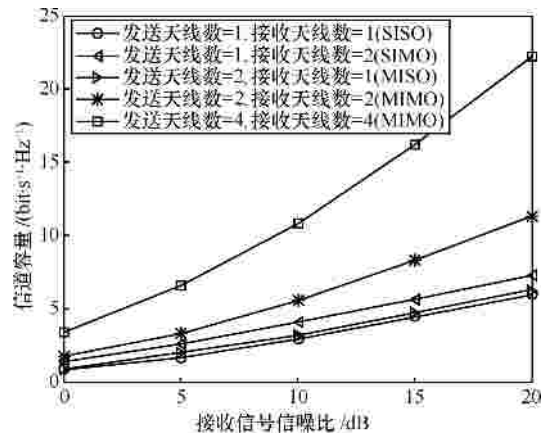


图 6 MIMO 信道容量与信噪比的关系

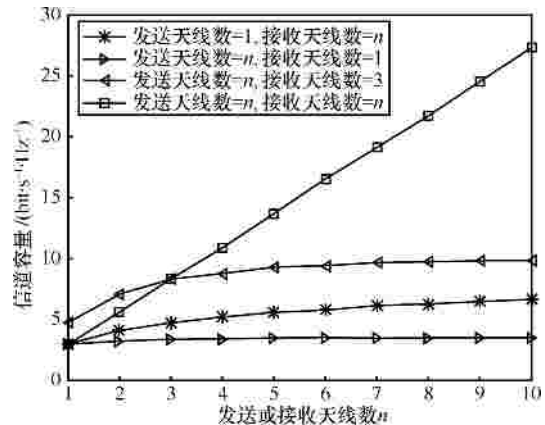


图 7 MIMO 信道容量与天线数的关系

图 6 表明, 随着接收信噪比的增大, 信道容量呈增长趋势。当 $t < r$ 时, 随着信噪比增加, 信道容量增长缓慢; 当 $t = r$ 时, 信道容量增长更快。图 7 表明, 当 $t > r$ 时, 随着发送天线数的增加所产生的子信道会消耗信道分集度, 系统容量迅速饱和; 当 $t < r$ 时, 信道容量与信噪比的对数成正比, 因此信道容量随接收天线数 r 的增加呈对数增长, 当接收天线数超过一定数量后, 信道容量增速减缓趋于饱和; 当 $n = t = r$ 时, 信道容量随天线数的增加呈线性增长趋势, 达到完全分集, 空间资源能够得到最佳利用。每个接收天线都会接收到多个来自不同衰落信道的独立有噪信号样本, 当收发天线数相等时, 信道容量随天线数的增加呈线性增长, 系统复杂度也随收发天线增多而增大, 因此必须选择合理的天线数来构成协同 MIMO 系统。2×2 协同 MIMO 能获取的分集度为 4、阵列增益为 2, 在相同误比特率和吞吐量下, 所需平均功率更小。可见 2×2 协同 MIMO 是一种折中的优化节点选择方案, 在代价和收益之间能取得较好折中^[5]。

5.2 能耗分析

无线信道为经历 k 阶路径损失的加性高斯白噪声(AWGN)信道, 簇内短距离传输 $k=2$, 簇间长距离传输 $k=3$ 。发射功率 $P_0=5\text{mW}$, G_r 、 G_t 分别为收发天线增益, 信号频率 $f=960\text{MHz}$, 节点接收信号功率为 $P_r = P_0 G_t G_r / ((4\pi)^2 d_{ij}^k) = P_0 G(d_{ij})$, 其中, d_{ij} 为发送节点 i 与接收节点 j 之间的距离, $G(d_{ij})$ 为信道增益。节点接收信噪比 $\gamma = P_r / BN_r = P_0 G(d_{ij}) / BN_r N_0$, 其中, P_r 为接收功率, 信道带宽 $B=10\text{kHz}$, 接收端平均噪声功率 N_r , 单边噪声功率密度 $N_0 = -171\text{dBm/Hz}$, 接收端噪声系数 $N_f = N_r / N_0 = 10\text{dB}$ 。

如果已知信号发射功率 P_0 , 可以根据接收信噪比估计节点间的信道增益 $G(d_{ij})$ 。所有能正确接收数据的节点接收信噪比一定大于门限 $\gamma_0 = 3\text{dB}$, 相应的最小发射功率应满足 $P_s \geq BN_f N_0 \gamma_0 / \min(G(d_{ij}))$ 。令源节点广播数据的最小信道增益为 $G(d_{\text{brd}})$ 、发送节点 i 到接收节点 j 的最小信道增益为 $G(d_i)$, 接收节点 j 到目的节点间的最小信道增益为 $G(d_j)$ 。发射节点采用 BPSK 调制, 接收节点采用相干解调时的误比特率 $P_{\text{ber}} = \text{erfc}(\sqrt{c})/2$ 。给定误比特率要求 $P_{\text{ber}} \leq 10^{-4}$, $c = Bg/R$, 数据传输比特率 $R=10\text{kb/s}$ 。 L , L_0 , H 分别表示待传输数

据长度、数据分组大小以及分组头大小, 满足 $L \gg L_0 \gg H$, 取 $L=10\text{kbit}$ 、 $L_0=1\text{kbit}$ 、 $H=64\text{bit}$; E_{brd} 为源节点广播该数据所需能量; 假设 2 个虚拟节点中能相互通信的成员节点数分别为 M_t 和 M_r , t 和 r 分别为选定的协同发送节点数和协同接收节点数; E_i^t 为发送节点 i 协同 MIMO 传输所需的能量; E_j^r 为接收节点 j 向目的节点发送数据所需能量; $\lceil f \rceil^+$ 表示向上取整。

$$\begin{aligned} E_{\text{brd}} &= P_{\text{brd}} \cdot \frac{(L_0 + H)}{R_{\text{brd}}} \left[\frac{L}{L_0} \right]^+ \\ &= \frac{BN_f N_0}{G(d_{\text{brd}})} g_{\text{brd}} \cdot \frac{(L_0 + H)}{R_{\text{brd}}} \left[\frac{L}{L_0} \right]^+ \\ &= \frac{N_f N_0}{G(d_{\text{brd}})} c_{\text{brd}} (L_0 + H) \left[\frac{L}{L_0} \right]^+ \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} E_i^t &= P_i \cdot \frac{L_0 + H}{R_i} \left[\frac{L}{L_0} \right]^+ \\ &= \frac{BN_f N_0}{G(d_i)} g_i \cdot \frac{L_0 + H}{R_i} \\ &= \frac{N_f N_0}{G(d_i)} c_i (L_0 + H) \left[\frac{L}{L_0} \right]^+ \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} E_j^r &= P_j \cdot \frac{L_0 + H}{R_j} \left[\frac{L}{L_0} \right]^+ \\ &= \frac{BN_f N_0}{G(d_j)} g_j \cdot \frac{L_0 + H}{R_j} \left[\frac{L}{L_0} \right]^+ \\ &= \frac{N_f N_0}{G(d_j)} c_j (L_0 + H) \left[\frac{L}{L_0} \right]^+ \end{aligned} \quad (11)$$

仿真过程中 $c_{\text{brd}} = c_i = c_j = 6.9155$, 不考虑数据处理及协同链路建立过程的能耗, 在给定误比特率条件 $P_{\text{ber}} < 10^{-4}$ 下, 协同发送数据的射频总能耗为

$$E_{\text{total}} = E_{\text{brd}} + \sum_{i=1}^t E_i^t + \sum_{j=1}^r E_j^r \quad (12)$$

如表 1 所示的环境参数下, 仿真对比无节点选择算法的 4×4 协同 MIMO 传输、有节点选择算法的 2×2 协同 MIMO 传输以及 SISO 传输的能耗, 并计算有节点选择算法相比无节点选择算法的协同 MIMO 传输的能量效率, 结果如图 8、图 9 所示。

表 1 仿真参数

项目	参数值
w_A	0.2
w_L	0.6
w_E	0.2
M_1 /个	4
M_2 /个	4
T /个	2
R /个	2

注: w_A, w_L, w_E 为 3 个加权参数无量纲。

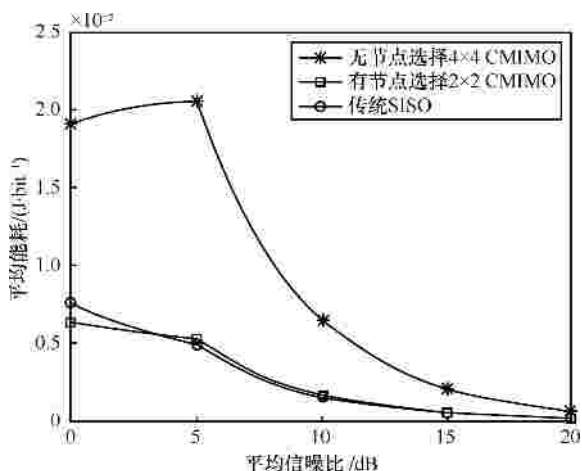


图 8 不同传输策略的平均能耗

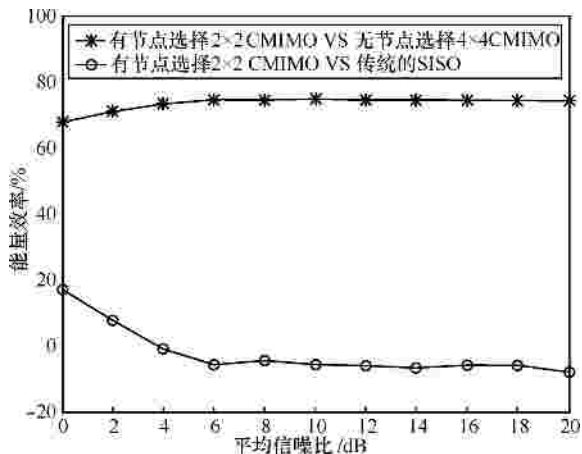


图 9 有节点选择的 2x2 协同 MIMO 的能量效率比较

图 8 给出了无节点选择 4x4 协同 MIMO 传输、有节点选择 2x2 协同 MIMO 以及 SISO 传输的平均能耗。无节点选择 4x4 协同 MIMO 传输能耗远高于后 2 种传输策略, 这是由于每个协同节点均发送全部数据, 而有节点选择 2x2 协同 MIMO 传输将协同节点分为奇节点和偶节点, 每个节点只传送了总数据的一半。有节点选择 2x2 协同

MIMO 传输能耗与传统 SISO 传输能耗相近, 而前者能获得信道容量增益。图 9 给出了有节点选择的协同 MIMO 传输相比于无节点选择的协同 MIMO 传输以及 SISO 传输的能量效率。由图可知, 采用加权协同节点选择算法相比于无节点选择的协同 MIMO 传输可以减少约 70% 的能耗。在信道状态较差时, 有节点选择的 2x2 协同 MIMO 相比于 SISO 系统能节约 20% 的能量; 在信道状态较好时, 有节点选择的 2x2 协同 MIMO 比 SISO 多消耗 10% 左右的能量, 但却获得远高于 SISO 的信道容量。

6 结束语

本文提出了一种基于分簇 ad hoc 网络的协同传输策略。加权协同节点选择算法以不对称双向信道状态、节点剩余能量和节点连接度为参数, 构建加权节点选择函数, 从虚拟节点的多个成员节点中选择出状态最优的协同节点构成 2x2 协同 MIMO 系统; 设计了一种虚拟链路建立和维护机制; 仿真比较无节点选择的 4x4 协同 MIMO 传输、有节点选择的 2x2 协同 MIMO 传输和 SISO 传输的信道容量和能耗, 结果表明有节点选择的协同 MIMO 传输策略能获得更大的信道容量和更高的能量效率。

构建虚拟链路所需的大量交互信息, 必然会产生一定开销, 当相邻虚拟节点间能互通的成员节点数较多时尤为明显, 因此必须合理设定退避计数器和超时计数器初值, 有效控制参与协同节点选择的节点数并减小系统时延。此外, 协同节点选择需要存储大量信道参数、剩余能量以及连接度信息, 对存储能力也有较高要求。采用遍历矩阵搜索最优协同节点运算量较大, 虽然采取措施去除了部分状态较差的节点, 减小协同选择矩阵规模, 但运算量仍较大, 还需进一步改进。

参考文献:

[1] SENDONARIS A, ERKID E, AAZHANG B. User cooperation diversity-part I: system description [J]. IEEE Transactions on Communications, 2003, 51(11): 1927-1938.

[2] SENDONARIS A, ERKID E, AAZHANG B. User cooperation diversity-part II: system description [J]. IEEE Transactions on Communications, 2003, 51(11): 1939-1948.

[3] DOHLER M. Virtual Antenna Arrays[D]. Department of Electrical

- and Electronic Engineering, King's College London, University of London, 2003.
- [4] CUI S G, GOLDSMITH A J, BAHAI A. Energy-efficiency of MIMO and cooperative MIMO techniques in sensor network [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2003, 22(6): 1089-1098.
- [5] JAYAWEERA S K. Virtual MIMO-based cooperative communication for energy-constrained wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 5(5): 984-989.
- [6] LI X. Energy efficient wireless sensor networks with transmission diversity [J]. IEEE Electron Device Letters, 2003, 39(24): 1753-1755.
- [7] AHMED I, PENG M, WANG W. Exploiting geometric advantages of cooperative communications for energy efficient wireless sensor networks[A]. Int'l J Communications, Network and System Sciences[C]. 55-61.
- [8] LIBRINO F, LEVORATO M, ZORZI M. Distributed cooperative routing and hybrid ARQ in MIMO-BLAST ad hoc networks[A]. IEEE Globecom[C]. 2007. 657-662.
- [9] ZHAO H T, XI Y, WEI J B. A typical cooperative MIMO scheme in wireless ad hoc networks and its channel capacity[A]. IEEE ICC[C]. 2008. 4644-4648.
- [10] NASIM M, QAISAR S. Hierarchical MIMO: a clustering approach for ad hoc wireless sensor networks[A]. Information Science and Systems (CISS)[C]. 2010.
- [11] ISLAM M R, KIM J. On the cooperative MIMO communication for energy-efficient cluster-to-cluster transmission at wireless sensor network[A]. Ann Telecommun[C]. 2010.325-340.
- [12] BEHROUZ M, HJORUNGNES A, DEBBAH M. Power allocations in minimum-energy SER-constrained cooperative networks[A]. Ann Telecommun[C]. 2009. 545-555.
- [13] BEHROUZ M, HJORUNGNES A. Near-optimum power allocation for BER-restricted multi-hop cooperative networks[A]. IEEE ICC[C]. 2010. 1-5.

作者简介:



冯文江 (1963-), 男, 四川西充人, 博士, 重庆大学教授、博士生导师, 主要研究方向为宽带无线接入技术、认知无线电、通信信号处理等。



赵伟 (1987-), 男, 白族, 贵州毕节人, 重庆大学硕士生, 主要研究方向为协同通信。



王东 (1983-), 女, 陕西西安人, 重庆大学硕士生, 主要研究方向为协同通信。