

一种无线 Mesh 网络中基于协同通信的多包接收方法

朱 赟^{①②} 潘成康^① 徐友云^① 蔡跃明^①

^①(解放军理工大学通信工程学院 南京 210007)

^②(通信指挥学院 武汉 410010)

摘要: 协同通信容许移动节点共享彼此的天线以构建虚拟多入多出系统, 可有效获得空间分集增益。为利用虚拟多入多出信道的分集增益, 该文提出了一种在无线 Mesh 网络上行链路中采用协同策略的多包接收方法。该方法中提出由发生冲突的 Mesh 终端及其协同节点构建虚拟多入多出信道, 且多天线 Mesh 路由器通过串行干扰消除算法来快速分离冲突包。理论分析和仿真结果表明该方法可充分利用空间资源, 相比 NDMA 和 TDMA 可有效提高系统的有效吞吐量并降低时延。

关键词: 无线 Mesh 网络; 协同通信; 虚拟多入多出; 多包接收; 包冲突解析

中图分类号: TN393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)05-1200-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00744

A Multi-packet Reception Method Based on Cooperative Communication for Wireless Mesh Networks

Zhu Yun^{①②} Pan Cheng-kang^① Xu You-yun^① Cai Yue-ming^①

^①(Institute of Communications Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

^②(Commanding Communications Academy, Wuhan 410010, China)

Abstract: Cooperative communication enables nodes to share their antennas to form a virtual multiple-input multiple-output system and achieve spatial diversity gain. Exploiting the diversity gain of V-MIMO channels, a multi-packet reception method is proposed to employ cooperative strategies in up links of wireless mesh networks. The method can support random amount of collided mesh clients by selecting cooperative nodes to form V-MIMO channels. Mesh routers with multiple antennas adopt the successive interference cancellation algorithm to receive separate the collided packets quickly. The theoretical analysis and simulation results show that the proposed method is capable of fully utilizing the spatial resources and outperforms the conventional NDMA and TDMA in terms of system throughput and transmission delay.

Key words: Wireless Mesh Network(WMN); Cooperative communication; Virtual Multiple-Input Multiple-Output (V-MIMO); Multi-packet reception; Packet collision resolution

1 引言

无线 Mesh 网络(Wireless Mesh Network, WMN)从无线自组织中衍生出来, 作为一种新型大容量高速率的无线分布式网络, 引起了学术界和产业界的普遍关注。无线 Mesh 网主要由 Mesh 路由器和 Mesh 终端两种网络节点组成, 并由 Mesh 路由器互连构成骨干网, Mesh 终端可通过 Mesh 路由器接入骨干网, 同时 Mesh 终端的路由能力为无线 Mesh 网络增强连接性和扩大覆盖范围^[1]。降低节点间数据包冲突对于网络吞吐率、带宽等服务质量的影响和避免频繁的启动重传机制以优化传输性能等是无线 Mesh 网络须解决的主要问题^[2]。

协同通信理论是信息理论的一个重要的新分支, 成为目前无线网络中研究的热点问题^[3]。它是一种广义的空间分集技术, 其基本思想是容许移动节点通过无线链路共享彼此的天线, 以构建一个虚拟多入多出^[4](Virtual multiple-input multiple-output, V-MIMO)系统, 同时利用节点信号之间空间衰落的独立性保证 V-MIMO 信道的非相关性, 以获得 MIMO 系统的技术优势^[5]。为 Mesh 路由器引入多天线技术可让无线 Mesh 网络获得更高的传输速率, 以提高网络容量。但 Mesh 终端因受尺寸或硬件复杂度的限制一般使用单天线, 可采用协同通信技术, 以形成 V-MIMO 来得到分集增益, 可提高能量效率和抗衰落能力, 进而增强无线链路的传输质量, 降低中断概率并节省能耗^[6]。Lin 等人提出了一种基于 V-MIMO 技术的包冲突解析方案^[7], 将协同通信和网络辅助分集多址接入^[8](Network-

2009-05-15 收到, 2009-10-22 改回

国家自然科学基金(60672079)和江苏省自然科学基金(BK2006701, BK2007002)资助课题

通信作者: 朱赟 zhuwwb@163.com

assisted Diversity Multiple Access, NDMA)融合后,由于同时得到了空间和时间双重分集增益,因此该方案的性能与 ALOHA 及 NDMA 相比有显著提升,可有效地解决数据包冲突问题。但该方案建立的系统信号模型较为复杂,未讨论采用该方案后系统能获取的归一化容量问题,且其研究局限于单天线接收。本文结合基于 V-MIMO 的包冲突解析技术,针对无线 Mesh 网络中 Mesh 终端的数据包冲突问题,提出一种基于协同通信的多包接收方法,给出无线 Mesh 网络中基于协同通信的系统信号模型,通过串行干扰消除方法提供稳健的冲突包分离能力,并利用 Mesh 路由器的多天线接收使协同通信和 NDMA 得以构建具有很强非相关性的 V-MIMO 信道。

2 系统模型

在图 1 中给出了一种无线 Mesh 网络中基于协同通信的多包接收模型,适用于 IEEE 802.11s^[9]中 Mesh 终端与 Mesh 路由器互连的上行链路。Mesh 路由器作为目的节点可配置 A 个接收天线, N 个单天线单信道 Mesh 终端在该 Mesh 路由器信号覆盖范围内随机分布^[10]。作为独立信源发送自己信息的 Mesh 终端作为源节点,中继转发源节点信息的 Mesh 终端作为协同节点,所有节点具有同样的发射功率 P_T 。将系统时间资源时隙化,采用时分半双工模式,每个时隙长度对应一个数据包的传输时长,并且各节点保持分组、载波和符号同步^[11]。

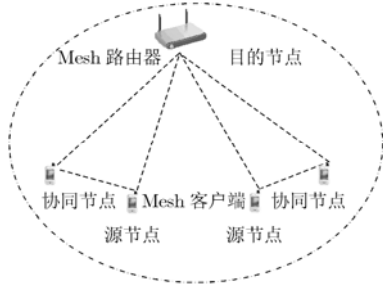


图 1 无线 Mesh 网络中基于协同通信的多包接收模型

设定在第 n 个时隙有 K_n 个节点同时接入信道,节点发送数据包的概率为 p ,源节点集合为 Φ_n ,节点 k 的协同节点集合为 $\Gamma_{k,n}$,则系统信号模型为

$$\mathbf{y}_n = \underbrace{\left[\mathbf{h}_{1,n}, \dots, \mathbf{h}_{k,n}, \dots, \mathbf{h}_{K_n,n} \right]}_{\mathbf{h}_n} \cdot \left[\sqrt{P_1} s_{1,n}, \dots, \sqrt{P_k} s_{k,n}, \dots, \sqrt{P_{K_n}} s_{K_n,n} \right]^T + \mathbf{n}_n, \quad k \in \Phi_n \quad (1)$$

其中 \mathbf{y}_n 为接收信号向量, $s_{k,n}$ 为节点 k 的信息符号, P_k 为节点 k 的发送功率, \mathbf{h}_n 为等效联合信道矩阵, \mathbf{n}_n 为目的节点的复高斯噪声向量,且满足 $\mathbf{n}_n \mathbf{n}_n^H$

$\sim N(0, \delta_d^2 \mathbf{I})$, $(\cdot)^H$ 为共轭转置, \mathbf{I} 为单位矩阵, $\mathbf{h}_{k,n}$ 为节点 k 到目的节点的信道频率响应向量,且满足均值为零、方差为 1 的独立同分布循环对称复高斯随机变量,目的节点通过信道估计可获知接入节点 k 的信道状态信息 $\mathbf{h}_{k,n}$ 。本文中采用 LKH 算法^[12]来选择协同节点,节点 k_j 作为源节点 k 的协同节点后,开始接收节点 k 第 n 时隙信号,接收完毕后节点 k_j 将向目的节点发送指示信息,通报成为节点 k 的协同节点。若节点 k 的数据未被目的节点成功接收,则目的节点将在随后的时隙按随机的顺序指示协同节点 k_j 转发其相应源节点的信号^[13]。

当目的节点对节点 k 信号检测处理后获得的信扰噪比 $\text{SINR}_{k,n}$ 不低于信扰噪比门限 SINR_{th} ,节点 k 的数据包可正确接收。采用 M 阶的正交幅度调制(QAM)时,信扰噪比门限为调制方式和未编码误比特率指标 BER_0 的函数

$$\text{SINR}_{\text{th}} = -\frac{2}{3} \ln(5\text{BER}_0)(M-1) \quad (2)$$

3 多包接收方法

该方法用于 Mesh 路由器作为目的节点处理多个 Mesh 终端的冲突数据包,在信号检测中采用串行干扰消除(SIC)接收技术来分离数据包。

3.1 目的节点对接收信号进行初步信号检测

(1)源节点个数 $K_n \geq \dim(\mathbf{h}_{k,n})$ 的处理过程 当 $K_n \geq \dim(\mathbf{h}_{k,n})$,则令 $\mathbf{h}'_{k,n} = \mathbf{h}_{k,n} / \|\mathbf{h}_{k,n}\|_2$,其中 $\dim(\cdot)$ 为向量维数, $\|\cdot\|_2$ 为向量的 2 范数。在第 n 时隙,目的节点利用 $\mathbf{h}'_{k,n}$ 作为节点 k 的均衡向量,采用部分迫零对其信号进行检测,可得信息符号估计值为

$$\hat{y}_k = \mathbf{h}_{k,n}^H \mathbf{y}_n = \sum_{i=1}^{K_n} \eta_{k,i,n} \sqrt{P_i} s_{i,n} + \mathbf{h}_{k,n}^H \mathbf{n}_n \quad (3)$$

其中 $\eta_{k,i,n} = \mathbf{h}_{k,n}^H \mathbf{h}_{i,n}$ 表示节点 k 和节点 i 信号之间的空间相关系数。由式(4)可以初步得到节点 k 的接收信扰噪比计算式

$$\text{SINR}_{k,n} = \frac{h_{k,n}^2 P_k}{\delta_d^2 + \sum_{i \neq k} \eta_{k,i,n}^2 h_{i,n}^2 P_i}, \quad i, k \in \Phi_n \quad (4)$$

其中 $h_{k,n}^2 = \|\mathbf{h}_{k,n}\|_2^2$ 为处理后信道增益, $\eta_{k,i,n}^2 = \left| \mathbf{h}_{k,n}^H \mathbf{h}_{i,n} \right|^2$ 。由式(4)可看出,部分迫零技术虽然不能完全消除节点间干扰,但不放大噪声功率,因此本文中可采用串行干扰消除进一步计算各节点的接收信扰噪比,其算法详细步骤如下:

(a)根据接收信扰噪比计算式,寻找具有最大信扰噪比的节点 k ;

(b)若 $\text{SINR}_{k,n} \geq \text{SINR}_{\text{th}}$,则节点 k 数据包被成功接收,其中 SINR_{th} 为信扰噪比门限;

(c)节点 k 信号从 \mathbf{y}_n 中消去,并更新 \mathbf{y}_n ;

(d)若 $\text{SINR}_{k,n} < \text{SINR}_{\text{th}}$, 则结束算法;

(e)转到步骤(a), 重新计算剩余各节点信扰噪比。

(2)源节点个数 $K_n < \dim(\mathbf{h}_k)$ 的处理过程 令 $\mathbf{H}_n = (\mathbf{h}_n^H \mathbf{h}_n)^{-1} \mathbf{h}_n^H$ 为 \mathbf{h}_n^H 的左伪逆, 将 \mathbf{H}_n 左乘 \mathbf{y}_n , 采用全局迫零消除节点间干扰, 初步得到节点 k 的信扰噪比

$$\text{SINR}_{k,n} = \frac{h_{k,n}^2 P_k}{\delta_d^2 \left[(\mathbf{h}_n^H \mathbf{h}_n)^{-1} \right]_{k,k}}, \quad k \in \Phi_n \quad (5)$$

而后执行串行干扰消除算法, 用式(5)计算接收信扰噪比, 并更新 \mathbf{h}_n 和 \mathbf{H}_n 。全局迫零实现简单, 但由于 \mathbf{h}_n 中列向量之间的相关性易放大噪声功率, 因而可采用协同通信来降低其相关性。

3.2 目的节点指示协同节点转发和包冲突解析过程

已成功检测的信号将从 \mathbf{y}_n 中消除, 则更新为剩余信号 $\mathbf{y}_n^1 = \sum_{k=1}^{K_{n+1}} \mathbf{h}_{k,n} s_{k,n} + \mathbf{n}_n$, $k \in \Phi_{n+1}$, 其中 Φ_{n+1} 表示数据包接收失败的节点集合, 个数为 K_{n+1} 。而后目的节点广播指示信息, 指示信息 $I_i = 1$ 表示节点 i 数据包接收成功, $i \notin \Phi_{n+1}$; $I_k = 0$ 表示节点 k 数据包接收失败, $k \in \Phi_{n+1}$ 。 $I_{k_j} = 0$ 指示节点 k 的协同节点 k_j 在第 $n+1$ 时隙转发节点 k 信息, $k_j \in \Gamma_{k,n}$, 而其它节点缄默。则第 $n+1$ 时隙接收信号为

$$\mathbf{y}_{n+1} = \sum_{k=1}^{K_{n+1}} \mathbf{h}_{k_j,n+1} \beta_{k_j,n} \left(h_{k,j,n} \sqrt{P_k} s_{k,n} + z_{k_j,n} \right) + \mathbf{n}_{n+1}, \quad k \in \Phi_{n+1} \quad (6)$$

其中 $h_{k,j,n}$ 为第 n 时隙中源节点 k 到协同节点 j 的信道传输系数, $z_{k_j,n}$ 为协同节点 j 处的复高斯噪声, 其方差为 δ_c^2 , $\mathbf{h}_{k_j,n+1}$ 为第 $n+1$ 时隙中协同节点 j 到目的节点的信道频率响应向量, $\beta_{k_j,n}$ 为信号放大系数, 满足 $|\beta_{k_j,n} h_{k,j,n}| = 1$ 。

目的节点根据 \mathbf{y}_n^1 和 \mathbf{y}_{n+1} 通过联合信号检测来进行包冲突解析, 以分离冲突的数据包。对于信扰噪比低于 SINR_{th} 的某个节点 k , 目的节点将指示 $\Gamma_{k,n}$ 中的一个节点在第 $n+1$ 时隙转发其信号, 得到式(6)中的接收信号 \mathbf{y}_{n+1} 。

处理 \mathbf{y}_{n+1} 信号分两种情况: 处理 \mathbf{y}_{n+1} 与处理 \mathbf{y}_n 一致, 若 $K_{n+1} \geq \dim(\mathbf{h}_{k,n})$, 采用部分迫零, 若 $K_{n+1} < \dim(\mathbf{h}_{k,n})$, 采用全局迫零, 执行串行干扰消除算法, 对于信扰噪比高于 SINR_{th} 的节点, 其信号将从 \mathbf{y}_{n+1} 和 \mathbf{y}_n^1 中同时消去, 最终得到 \mathbf{y}_{n+1} 的剩余信号 \mathbf{y}_{n+1}^1 和 \mathbf{y}_n^1 的剩余信号 \mathbf{y}_n^2 。

而后对 \mathbf{y}_{n+1}^1 和 \mathbf{y}_n^2 进行联合处理。记 \mathbf{y}_{n+1}^1 和 \mathbf{y}_n^2 中包含的节点集合为 Φ_{n+2} , 个数为 K_{n+2} 。重新定义 $\mathbf{h}_{k,n} \triangleq [\mathbf{h}_{k,n}, \mathbf{h}_{k_j,n+1}]^T$ 为节点 k 等效联合信道频率响应向量, 其中 $[\cdot]^T$ 表示矩阵转置, 则 \mathbf{y}_{n+1}^1 和 \mathbf{y}_n^2 可以联合表示为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{y}_n^2 \\ \mathbf{y}_{n+1}^1 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{h}_{1,n} & \cdots & \mathbf{h}_{K_{n+2},n} \end{bmatrix}}_{\mathbf{h}_n} \begin{bmatrix} \sqrt{P_1} s_{1,n} & \cdots & \sqrt{P_{K+2}} s_{K_{n+2},n} \end{bmatrix}^T + \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{n}_n \\ \sum_{k=1}^{K_{n+2}} \mathbf{h}_{k,n+1} \beta_{k_j,n} z_{k_j,n} + \mathbf{n}_{n+1} \end{bmatrix}}_{\mathbf{N}_n}, \quad (7)$$

$$k \in \Phi_{n+2}, k_j \in \Gamma_{k,n}$$

其中 \mathbf{N}_n 为等效联合噪声向量。

(1) 若 $K_{n+2} \geq \dim(\mathbf{h}_{k,n})$, 更新 $\mathbf{h}'_{k,n} \triangleq \mathbf{h}_{k,n} / \|\mathbf{h}_{k,n}\|_2$, 以 $\mathbf{h}'_{k,n}$ 为均衡向量, 采用部分迫零, 执行串行干扰消除算法, 用式(8)计算接收信扰噪比。

$$\text{SINR}_{k,n} = \frac{h_{k,n}^2 P_k}{\sum_k \left| \beta_{k_j,n} \right|^2 h_{k,n}^2 \delta_c^2 + 2N_R \delta_d^2 + \sum_{i \neq k} \eta_{k,i,n}^2 h_{i,n}^2 P_i}, \quad (8)$$

$$i, k \in \Phi_{n+2}$$

(2) 若 $K_{n+2} < \dim(\mathbf{h}_{k,n})$, 更新 $\mathbf{H}_n = (\mathbf{h}_n^H \mathbf{h}_n)^{-1} \mathbf{h}_n^H$, 采用全局迫零。令 $h_{k_j,m+1}^m$ 为 $\mathbf{h}_{k_j,m+1}$ 中第 m 个元素, $m = 1, \dots, A$, 设定各协同节点处噪声为独立分布可得

$$\mathbf{E}[\mathbf{N}_n \mathbf{N}_n^H] \triangleq \mathbf{W}_n = \begin{bmatrix} \delta_d^2 \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \delta_c^2 \widetilde{\mathbf{W}} + \delta_d^2 \mathbf{I} \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中 $\mathbf{E}[\cdot]$ 为均值, $\widetilde{\mathbf{W}} = \text{diag} \left\{ \sum_{k=1}^{K_{n+2}} \left| \beta_{k_j,n} h_{k_j,n+1}^1 \right|^2, \dots, \right.$

$\left. \sum_{k=1}^{K_{n+2}} \left| \beta_{k_j,n} h_{k_j,n+1}^{N_R} \right|^2 \right\}$ 。节点 k 的信扰噪比为

$$\text{SINR}_{k,n} = \frac{h_{k,n}^2 P_k}{\left[\mathbf{H}_n \mathbf{W}_n \mathbf{H}_n^H \right]_{k,k}}, \quad k \in \Phi_{n+2} \quad (10)$$

执行串行干扰消除算法, 用式(10)计算接收信扰噪比。

若存在数据包仍不能分离的源节点, 目的节点继续指示其相应的协同节点在第 $n+2$ 时隙中转发其信号, 接收信号处理与上述第 $n+1$ 时隙中处理过程一致。以此类推, 在接下来的时隙中协同节点根据目的节点指示转发源节点数据包, 已成功检测的数据包将被消除, 并更新剩余信号, 如此重复直到 Φ_n 中所有节点数据包成功接收完毕或者当总时隙数达到门限为止。设置时隙数门限是为了满足一定的时延要求和避免空间资源浪费。以上过程中采用多包接收方法分离数据包所需的时隙数被称为冲突包分离周期(Collided Packets Separating Period, CPSP), 可记为 N_{cpSP} , 用于评估传输时延。

4 性能分析

节点发送数据包的概率 p 是本文中一个影响系统性能的重要参数,若 p 较小会浪费多天线接收提供的空间资源,无法获取系统所能支持的吞吐量,反之 p 较大,则会造成节点间过多干扰,难以快速分离冲突数据包,降低系统吞吐量以及提高时延,因此发送概率应视具体情况取优化值,使得系统吞吐量较大。当节点以概率 p 发送数据,同时接入信道节点数为 K_n 的概率为 $\Pr(K_n) = \binom{N}{K_n} p^{K_n} (1-p)^{N-K_n}$ 。令发送概率 $p = c/N$, 其中 c 为待定常数,当 N 较大时, $\Pr(K_n) \approx \frac{c^{K_n}}{K_n! \exp(c)}$ 。

设定 $p_s(K_n)$ 为成功分离的数据包个数与 K_n 的比值,则丢包率为 $1 - p_s(K_n)$ 。在本文所提方法 (Multi-packet Reception Based on Cooperative Communication, MPRC) 中每时隙能够支持的等效吞吐量为 $C_P = \sum_{K_n=1}^N \Pr(K_n) K_n p_s(K_n) / N_{\text{csp}}(K_n)$, 其中 $N_{\text{csp}}(K_n) = E[N_{\text{csp},n}]$ 为 K_n 条件下 CPSP 的统计均值。在 NDMA 中每时隙等效吞吐量为 $C_C = \sum_{K_n=1}^N \Pr(K_n) K_n p_s(K_n) / K_n$ 。在 TDMA 中目的节点检测到包冲突后,指示所有相关节点依次在其后 K_n 时隙内重发数据即可,则每时隙等效吞吐量为 $C_T = \sum_{K_n=2}^N \Pr(K_n) K_n p_s(K_n) / (K_n + 1) + \Pr(K_n = 1) p_s(K_n)$ 。

为了方便比较 C_P , C_C 和 C_T , 可引入发射功率 P_T 。在 MPRC 中,由于 $|\beta_{k_j,n} h_{k_j,n}| = 1$, 且协同节点 k_j 发送功率 $P_k = P_T$, 则总功率为 $P_{S,P} = E\left[\sum_{i=0}^{N_{\text{csp}}(K_n)-1} K_{n+i}\right] P_T$ 。在 NDMA 中总功率为 $P_{S,C} = \sum_{K_n=1}^N \Pr(K_n) K_n K_n P_T$ 。在 TDMA 中总功率为 $P_{S,T} = \Pr(K_n = 1) P_T + \sum_{K_n=2}^N \Pr(K_n) 2K_n P_T$ 。令 $P_{S,P} = P_{S,C} = P_{S,T}$ 即可得 3 种方案的瞬时发送功率。

利用 $\sum_{K_n=1}^N \Pr(K_n) K_n \approx c$, 可得 $C_P \approx c p_s(c) / N_{\text{csp}}(c)$, $C_C \approx p_s(c)$, $C_T \approx c p_s(c) / (c + 1) + p_s(1) / \exp(c)$, $P_{S,C} \approx c^2 P_T$ 以及 $P_{S,T} \approx (2c - 1) / \exp(c) P_T$, 但在 C_P 和 $P_{S,P}$ 分析过程中,难以给出闭式解。

下面进行网络仿真,对不同方案进行数值分析,其中目标 $\text{BER}_0 = 0.001$, QAM 调制阶数 $M = 4$, $\text{SINR}_0 = \text{SINR}_{\text{th}}$, 所有噪声归一化为 1, 即 $\delta_d^2 = \delta_c^2 = 1$ 。图 2 给出了 MPRC 中冲突包分离周期的统

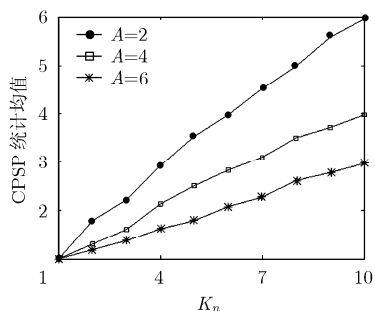
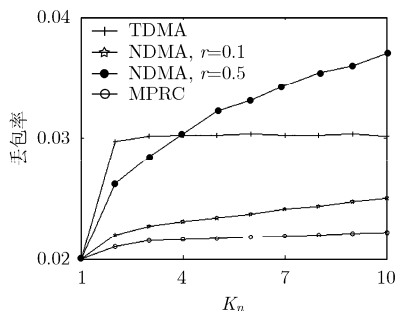
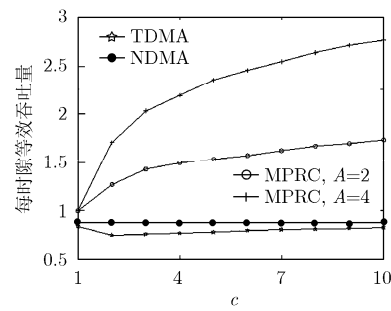
计均值 $N_{\text{csp}}(K_n)$ 与 K_n 的关系。从图中可以看出,接收天线数越大, $N_{\text{csp}}(K_n)$ 值就越小,同时 $N_{\text{csp}}(K_n)$ 随着 K_n 增加呈近似线性增加的关系,其增加速率随着天线数的增加而下降,表明通过多天线接收可有效降低时延。在 NDMA 中, $N_{\text{csp}} = K_n$, 而 MPRC 中 N_{csp} 为一个小于等于 K_n 的变量,可见利用多天线接收,协同通信和 NDMA 得以构建具有很强非相关性的 V-MIMO 信道(信道矩阵满秩),算法多包接收能力正是来自于 V-MIMO 信道提供的分集增益。

图 3 给出了 3 种方案的丢包率 $1 - p_s(K_n)$ 与 K_n 的关系曲线,其中 $P_T = 5$ dB, $A = 4$, 同一节点相邻时隙信道传输系数的相关系数分别为 $r = 0.1$ 和 0.5 。从图中可以看出由于 MPRC 可充分利用空间资源,使得丢包率最低。当信道时间相关系数 r 较低时,NDMA 性能逼近所提方案,而 r 较高时其性能比 TDMA 差,反映了信道时间相关性对 NDMA 性能的影响。而 MPRC 通过协同通信保证信道的非相关性,获取了空间分集增益和时间分集增益,从而提高信号传输的可靠性来降低误码率,同时避免频繁的启动重传机制,以有效提高网络性能。

图 4 显示了每时隙等效吞吐量与参数 c 的关系,其中同一节点相邻时隙信道传输系数的相关系数 $r = 0.1$ 。从图中可以看出,对于 NDMA, $C_C \approx 1$, 对于 TDMA, 当 c 增大, C_T 趋近 1, 因此参数 c 对 NDMA 和 TDMA 影响较小。对于 MPRC, C_P 随着 c 增加而趋近 N_R , 其中 N_R 为目的节点天线数。而节点发送数据包的概率 p 与 c 成线性关系,可见由于 p 的增加使得多个节点同时接入,MPRBCC 通过协同通信有效利用多天线的空间资源,利用虚拟 MIMO 提供的空间复用增益来提高信道的容量,趋近其最大的空间自由度 N_R 。

5 结论

本文提出了一种无线 Mesh 网络中基于协同通信的多包接收方法,适用于 Mesh 路由器与 Mesh 终端之间互连的上行链路。该方法通过多天线接收,并将协同通信和 NDMA 结合,来构建近乎满秩的 V-MIMO 信道,创造强健的空分多址能力。在该方法中采用复杂度较低的迫零检测技术和易于实现的串行干扰消除算法进行包冲突解析,提供稳健的冲突包分离能力。理论分析和性能仿真表明,MPRC 可有效提高系统的吞吐量并降低时延,适合于无线 Mesh 网络中上行链路的业务传输。

图2 CPSP 统计均值 $N_{\text{cpSP}}(K_n)$ 与 K_n 的关系图3 丢包率 $p_s(K_n)$ 与 K_n 的关系图4 每时隙等效吞吐量与参数 c 的关系

参考文献

- [1] Akyildiz I F and Wang X. A survey on wireless mesh networks [J]. *IEEE Communication Magazine*, 2005, 43(1): 23-30.
- [2] Avallone S, Akyildiz I F, and Ventre G. A channel and rate assignment algorithm and a layer-2.5 forwarding paradigm for multi-radio wireless mesh networks [J]. *IEEE/ACM Transactions on Communications*, 2009, 17(1): 267-280.
- [3] Zhou Zhong, Zhou Shengli, Cui Shuguang, and Cui Junhong. Energy-efficient cooperative communication in a clustered wireless sensor network [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, 57(6): 3618-3628.
- [4] Chen Yifan, Teo J Q, Lai J C, Gunawan E, Kay S L, Cheong B S, and Rapajic P B. Cooperative communications in ultra-wideband wireless body area networks: channel modeling and system diversity analysis [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2009, 27(1): 5-16.
- [5] Ibrahim A S, Sadek A K, and Su W F. Cooperative communications with relay-selection: when to cooperate and whom to cooperate with [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(7): 2814-2827.
- [6] Shan H, Zhuang W, and Wang Z. Distributed cooperative MAC for multihop wireless networks [J]. *IEEE Communication Magazine*, 2009, 47(2): 126-133.
- [7] Lin R and Petropulu A P. A new wireless network medium access protocol based on cooperation [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2005, 53(12): 4675-4684.
- [8] Tsatsanis M K, Zhang R, and Banerjee S. Network-assisted diversity for random access wireless networks [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2000, 48(3): 702-711.
- [9] IEEE 802.11 Standard Group [EB/OL]. <http://www.ieee802.org/11/>.
- [10] Cheng Hoting and Zhuang Weihua. Novel packet-level resource allocation with effective QoS provisioning for wireless mesh networks [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(2): 694-700.
- [11] Xu Feng, Lau F C M, Zhou Q F, and Yue Dian-Wu. Outage performance of cooperative communication systems using opportunistic relaying and selection combining receiver [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2009, 16(2): 113-116.
- [12] Simic L, Berber S M, and Sowerby K W. Distributed partner choice for energy efficient cooperation in a wireless sensor network [C]. Proc. IEEE GLOBECOM. New Orleans, LA, USA, 2008: 1-6.
- [13] Shan H, Zhuang W, and Wang Z. Distributed cooperative MAC for multihop wireless networks [J]. *IEEE Communication Magazine*, 2009, 47(2): 126-133.

朱 贇: 男, 1980 年生, 博士生, 研究方向为无线 Mesh 网络.

潘成康: 男, 1978 年生, 博士, 研究方向为协同通信.

徐友云: 男, 1966 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为新一代高速无线通信关键技术.

蔡跃明: 男, 1961 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为无线资源管理.