

基于 V-MIMO 的广义混合转发 PCR 方案

周尧 蔡跃明 胡均权 潘成康
(解放军理工大学通信工程学院 南京 210007)

摘要: 传统的包冲突解析(PCR)方案一般采用抛弃重传策略,性能差强人意。该文对基于虚拟多入多出技术的广义混合转发 PCR 方案进行了研究,建立了此类方案的一种理论分析模型,对已有的两类协同节点选择算法进行改进,提出了两种广义混合转发 PCR 方案,并对方案的平均容量、丢包率、时隙等效吞吐量及节点最佳发送概率进行了理论分析和推导。所提方案可以支持任意个节点同时接入信道,通过选择协同节点构建等效并行通道,解决了包冲突问题。理论分析和仿真结果表明,所提方案与传统方案及其它同类方案相比,可在系统容量及吞吐量方面获得显著的性能提升,且应用范围更广。

关键词: 虚拟多入多出; 协同通信; 协同节点选择; 包冲突解析

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)02-0430-05

Generalized Hybrid Forward Packets Collision Resolution Scheme Based on Virtual MIMO Techniques

Zhou Yao Cai Yue-ming Hu Jun-quan Pan Cheng-kang
(*Institute of Communication Engineering, PLAUST, Nanjing 210007, China*)

Abstract: In the traditional schemes, the collided packets will be discarded and retransmitted, which results in a lower performance. In this article, Generalized Hybrid Forward Packets Collision Resolution (GHF-PCR) scheme based on virtual-MIMO techniques is studied and discussed. A kind of theoretic analytic model is established, and two kinds of cooperative nodes selection algorithms are also improved. Two PCR schemes are proposed and the average capacity, packets error rate, slot equivalent throughput and optimal transmission probability are analyzed. The proposed schemes could support random amount of collided nodes by selecting cooperative nodes to form virtual parallel channels and hence can deal with the collisions. The simulation results show that the proposed schemes can obtain better performance gain and be used in broader domain of application comparing with traditional schemes and other congener ones.

Key words: Virtual MIMO; Cooperative communication; Cooperative nodes selection; Packets collision resolution

1 引言

在采用随机接入方式的无线通信网络中,多个数据包在发送时出现冲突是无法彻底避免的情况,因此如何有效解决数据包冲突一直是人们关心的问题。随着各种新型网络架构的提出,对数据传输速率和系统容量的要求也越来越高,在这种情况下,包冲突解析(Packets Collision Resolution, PCR)方案的重要性日益彰显。

传统的 PCR 方案采用的是抛弃重传策略,近年来虚拟多入多出(Virtual MIMO, V-MIMO)技术的引入为解决这类问题开辟了新途径,引起了人们的广泛关注。协同通信^[1, 2](Cooperative Communication)和网络辅助分集多址接入^[3](Network-assisted Diversity Multiple Access, NDMA)都是新兴的虚拟多入多出技术。文献[2]中提出了一种基于

V-MIMO 技术的 PCR 方案。该方案与 ALOHA 及纯 NDMA 方案相比能够更有效地解决数据包冲突问题。但是文献[2]中没有讨论系统容量,而且给出的协同节点选择(Cooperative Nodes Selection, CNS)算法——预定序列法存在一定不足,建立的理论分析模型也不便于分析。文献[4]对文献[2]中所提方案进行了改进,并重新建立了一种新的理论分析模型。但是,文献[4]中所提方案仅讨论了冲突节点数目小于门限冲突节点数的情况,而且其建立的理论分析模型不够完备。

鉴于此点,本文在文献[4]的基础上建立了广义混合转发 PCR 方案(Generalized Hybrid Forward PCR, GHF-PCR)的理论分析模型。GHF-PCR 方案在 MAC 层采用了混合转发机制,并且可支持对任意个同时接入信道的节点进行冲突解析。此外,对文献[4]中所提的 CNS 算法进行了改进,并结合理论分析模型对方案性能进行了分析推导。仿真结果表明,所提方案与传统方案及其它同类方案相比,在系统容量、吞吐量方面可获得较为显著的性能提升,且应用范围更广。

2007-04-06 收到, 2007-10-16 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

本文内容安排为:第2节给出了 GHF-PCR 方案的理论分析模型;第3节给出了两种改进的 CNS 算法并对其进行分析;第4节对采用改进 CNS 算法的 GHF-PCR 方案的性能进行了讨论及公式推导;第5节对方案进行了仿真,并对仿真结果做了分析讨论;第6节对全文做了小结。

2 理论分析模型

2.1 信号模型

首先给出 GHF-PCR 方案的全连通 N 节点网络模型:各移动节点配置单天线,其地理位置随机分布,任意两节点之间可以直接进行通信。其中,作为初始独立信源发送自己数据包的节点称为源节点,除了各源节点和目的节点之外的其它节点称为空闲节点,作为中继转发其它节点数据的空闲节点以及在协同传输期(Cooperative Transmission Epoch, CTE)中重发自身数据包的源节点统称为协同节点。系统时间资源时隙化,每个时隙长度对应一个数据包的传输时长,并假设各节点保持分组、载波和符号同步。暂不考虑排队状态并假设所有节点总有数据等待传输,并以相同的概率 p 发送数据。假设第 n 个时隙有 N_c 个节点向同一个目的节点发送数据包,则发生数据包冲突。此时目的节点接收到的信号可表示为

$$\mathbf{y}_n = [h_{1,n}, \dots, h_{k,n}, \dots, h_{N_c,n}] [\sqrt{P_1} \mathbf{s}_{1,n}, \dots, \sqrt{P_k} \mathbf{s}_{k,n}, \dots, \sqrt{P_{N_c}} \mathbf{s}_{N_c,n}]^T + w_n \quad (1)$$

其中 $(\cdot)^T$ 表示矩阵转置, \mathbf{y}_n 为接收信号, $h_{k,n}$ 为该时隙节点 k 到目的节点的信道系数, $\mathbf{s}_{k,n}$ 为节点 k 发送的能量归一化数据包, P_k 为节点 k 的发送功率, w_n 为目的节点处复高斯噪声, $w_n \sim N(0, \delta_d^2)$ 。目的节点在网络中广播特殊控制信令,声明有多个节点的数据包发生了冲突。网络中的节点收到该控制信令之后,系统进入 CTE。

假设系统消耗了 m 个时隙,解决了 N_c 个数据包冲突。在 CTE 中的第 j 个时隙内 ($1 \leq j \leq m$),若是协同节点以功率 P 向目的节点转发混合数据包,则此时隙目的节点接收到的信号为

$$\mathbf{y}_{n+j} = h_{r_j} \alpha_{r_j} \left(\sum_{k=1}^{N_c} h_{k,r_j} \sqrt{P_k} \mathbf{s}_{k,n} + z_{r_j} \right) + w_{n+j} \quad (2)$$

式中 h_{r_j} 表示 CTE 第 j 个时隙所选的协同节点与目的节点之间的信道系数, α_{r_j} 表示此协同节点的放大系数,满足 $\alpha_{r_j}^2 \left[\sum_{k=1}^{N_c} |h_{k,r_j}|^2 P_k + \delta_c^2 \right] = P$ 。本文规定系统在每个时隙的总发送功率 P 必须相同,由上可知 $P = \sum_{k=1}^{N_c} P_k$ 。 h_{k,r_j} 表示在冲突发生的时隙内第 k 个源节点与第 j 个时隙所选协同节点 r_j 之间的信道系数, z_{r_j} 为协同节点处的复高斯噪声,方差为 δ_c^2 , w_{n+j} 为目的节点处复高斯噪声,方差为 δ_d^2 。相似地,若在 CTE 中的第 j 个时隙内没有空闲节点充当协同,而是由源节点重发自身数据包,则此时隙目的节点接收到的信号为

$$\mathbf{y}_{n+j} = h_{r_j} \sqrt{P} \mathbf{s}_{r_j,n} + w_{n+j} \quad (3)$$

以上所得式(1)一式(3),即为 PCR 方案的信号模型。

2.2 V-MIMO 矩阵

CTE 结束之后,系统可得到 V-MIMO 矩阵 \mathbf{V} 。根据信号模型,可以定义 \mathbf{V} 的行等价矩阵 $\mathbf{H} = [\mathbf{A} \ \mathbf{B} \ \mathbf{C}]^T$,其中 \mathbf{H} 是 $m \times N_c$ 的矩阵。 \mathbf{A} 是 $1 \times N_c$ 的行向量,是在发生冲突的时隙形成的。 \mathbf{B} 是大小为 $m_1 \times N_c$ 的矩阵,是在 CTE 中 m_1 个时隙内仅由空闲节点充当协同而形成的。 \mathbf{C} 是大小为 $m_2 \times N_c$ 的矩阵,是在 CTE 中 m_2 个时隙内仅由源节点重发数据包而形成的。为表述方便,下文将 V-MIMO 矩阵的行等价矩阵 \mathbf{H} 简称为 V-MIMO 矩阵。由信号模型易推得 \mathbf{H} 的形式如式(4)所示。一般地,对 \mathbf{H} 而言有 $m \geq N_c$ 。特别地,当 $N_c=1$ 时,多节点随机接入的 PCR 方案退化为点对点(Point to Point, P2P)的传输方案,由矩阵表达式易知,此时 \mathbf{H} 矩阵已退化为一个 $m \times 1$ 的列向量。因此,可以将协同传输方案看作 PCR 方案的一个特例加以考虑。

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{B} \\ \mathbf{C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{P_1} h_{1,n} & \dots & \dots & \sqrt{P_k} h_{k,n} & \dots & \dots & \sqrt{P_{N_c}} h_{N_c,n} \\ G\sqrt{P_1} h_{1,r_1} & \dots & \dots & G\sqrt{P_k} h_{k,r_1} & \dots & \dots & G\sqrt{P_{N_c}} h_{N_c,r_1} \\ \vdots & & & \vdots & & & \vdots \\ Q\sqrt{P_1} h_{1,r_{m_1}} & \dots & \dots & Q\sqrt{P_k} h_{k,r_{m_1}} & \dots & \dots & Q\sqrt{P_{N_c}} h_{N_c,r_{m_1}} \\ 0 & \dots & \sqrt{P} h_{m_1+1} & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \dots & \sqrt{P} h_{m_1+m_2} & \dots & 0 \end{bmatrix}_{m \times N_c} \quad (4)$$

式中 $G = h_{r_1} \alpha_{r_1}$, $Q = h_{r_{m_1}} \alpha_{r_{m_1}}$

在各时隙接收到的数据包写作矩阵形式: $\mathbf{Y} = [\mathbf{y}_n, \mathbf{y}_{n+1}, \dots, \mathbf{y}_{n+N_c-1}]^T$ 。定义源数据包矩阵 $\mathbf{S} = [\mathbf{s}_{1,n}, \mathbf{s}_{2,n}, \dots, \mathbf{s}_{N_c,n}]^T$,此时噪声向量为

$$\mathbf{z} = [\mathbf{z}_A \ \mathbf{z}_B \ \mathbf{z}_C]^T = [w_n, h_{r_1} \alpha_{r_1} z_{r_1} + w_{n+1}, \dots, h_{r_{m_1}} \alpha_{r_{m_1}} z_{r_{m_1}} + w_{n+m_1}, w_{n+m_1+1}, \dots, w_{n+m_1+m_2}]^T$$

其中 \mathbf{z}_A 的长度为 1, \mathbf{z}_B 长度为 m_1 , \mathbf{z}_C 长度为 m_2 ,分别对应 \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} 的形成过程中产生的噪声。由上可得系统表达式为

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H} \mathbf{S} + \mathbf{z} \quad (5)$$

式(5)与 MIMO 系统表达式具有完全相同的形式。

至此,已经建立了 GHF-PCR 方案的理论分析模型,通过获取 V-MIMO 矩阵 \mathbf{H} ,建立类似式(5)的系统表达式,然后可对 GHF-PCR 方案进行分析。一般地, GHF-PCR 方案的 V-MIMO 矩阵都具有与 \mathbf{H} 相同的结构。 \mathbf{H} 包括 \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} 三个部分,其中 \mathbf{A} 是普遍存在的,与 CNS 算法无关。但是 \mathbf{B} , \mathbf{C} 的存在与否及其维数大小、元素取值都与 CNS 算法有密切关系,下文将结合具体的 CNS 算法对此展开分析。

3 CNS 算法及其分析

3.1 两种改进的 CNS 算法

由混合转发机制和理论分析模型易知,当冲突节点数目为 N_c 时,至少需要 $N_c - 1$ 个 CTE 时隙,亦即需要 $N_c - 1$ 个协同节点。由于网络中共有 N 个节点,故有 $N - N_c - 1$ 个空闲节点。当 $N - N_c - 1 \geq N_c - 1$, 也即 $N_c \leq \lfloor N/2 \rfloor$ 时,空闲节点集合可提供足够的非重复的节点充当协同。 $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整。由此可定义门限冲突节点数目 $N_{th} = \lfloor N/2 \rfloor$ 。

文献[4]中提出的 CNSBC 算法和 RSIN 算法只适用于 $2 \leq N_c \leq N_{th}$ 时的情况,而本文研究对象是适用于任意冲突节点数的 GHF-PCR 方案,因此必须考虑支持 $1 \leq N_c < N$ 的 CNS 算法。基于以上分析,在原有 CNS 算法的基础上,给出改进 CNSBC, RSIN 算法如下:

(1)改进的 CNSBC 算法:

在第 $n + j$ 个时隙,设网络中候选节点集合为 Φ_{n+j} , 则有

$$\Phi_{n+j} = \begin{cases} \Psi_{n+j}, & 1 \leq j \leq N - N_c - 1 \\ \Theta_{n+j}, & N - N_c - 1 < j < N \end{cases}$$

其中 Ψ_{n+j} 表示未充当过协同的空闲节点集合, Θ_{n+j} 表示未重发过数据包의源节点集合。根据候选节点与目的节点之间的信道系数幅度大小进行排序,然后取排名第一的节点,即

$$r_j = \arg \left\{ \max_{i \in \Phi_{n+j}} \left(|h_{i,N,n+j}| \right) \right\} \quad (6)$$

式中 $h_{i,N,n+j}$ 表示 Φ_{n+j} 中的第 i 个候选节点与目的节点之间的信道系数, r_j 表示在第 $n + j$ 个时隙被选中的节点序号。每个候选节点最多只能充当一次协同节点。在第 $n + j + 1$ 个时隙,系统将把前一个时隙被选中的协同节点从 Φ_{n+j} 中去除,得到新的候选节点集合 Φ_{n+j+1} 。

本文在改进的 CNSBC 算法中加入了秩控制机制,其具体内容

(a)当 $N_c = 1$ 时,首先采用直接传输,如果目的节点接收失败,则仅在下一个时隙根据式(6)从 Φ 中选择一个协同节点进行转发,若再次接收失败,则认为此次传输不成功;

(b)当 $2 \leq N_c \leq N_{th}$ 时,在第 $n + 1$ 到第 $n + N_c - 1$ 个时隙内从 Ψ 中选择协同节点,并形成 $N_c \times N_c$ 的 V-MIMO 矩阵 \mathbf{H} 。判断 \mathbf{H} 是否满秩,若满秩则进入数据包分离阶段。若不满秩,则根据式(6)再次选择一个节点参与协同。更新 \mathbf{H} , 再次判断是否满秩。按此进行,直到 \mathbf{H} 满秩或者 Ψ 为空时才进入数据包分离阶段。

(c)当 $N_{th} \leq N_c < N$ 时,首先从 Ψ 中选择协同节点,如果 Ψ 为空,则从 Θ 中选择源节点重发数据包。形成 $N_c \times N_c$ 的 V-MIMO 矩阵 \mathbf{H} 之后,判断其是否满秩,若满秩则进入数据包分离阶段。若不满秩,则根据式(6)再次选择一个节点参与协同。更新 \mathbf{H} , 再次判断是否满秩。按此进行,直到 \mathbf{H} 满秩或者 Θ 为空时才进入数据包分离阶段。

(2)改进的 RSIN 算法:

原 RSIN 算法是从 Ψ 中随机选择节点充当协同,其余机制与 CNSBC 算法相似。因此,在保持原有 RSIN 算法的节点选择原则不变的基础上加入秩控制机制后,即可得到适用于 GHF-PCR 模型的改进 RSIN 算法。由于不需要获知信道状态信息以进行排名,故 RSIN 算法的复杂度远小于 CNSBC 算法的复杂度。

3.2 算法分析

为了衡量冲突节点数为 N_c 的情况下每次协同传输对 $\text{rank}(\mathbf{H})$ 的贡献,定义一个参数 $ef_{\text{rank}}(N_c)$ 为

$$ef_{\text{rank}}(N_c) = E[\text{rank}(\mathbf{H})/m] = E[\text{rank}(\mathbf{H})/m_0(N_c)] \quad (7)$$

其中 $\text{rank}(\cdot)$ 表示矩阵的秩, $E(\cdot)$ 表示统计均值。 $m_0(N_c)$ 是给定 N_c 时,方案所消耗时隙数 m 的统计均值。由定义可知, $ef_{\text{rank}}(N_c)$ 的取值范围为 $(0,1]$ 。

图1是在高斯信道条件下,改进 CNSBC、RSIN 算法与预定序列法^[2]的 $ef_{\text{rank}} - N_c$ 曲线 ($N = 10$)。如图所示,改进 CNSBC 算法和 RSIN 算法的性能曲线重合,表示这两种算法都能够保证 $ef_{\text{rank}}(N_c) = 1$, 而预定序列法的 $ef_{\text{rank}}(N_c)$ 随着 N_c 的增加而递减,需要 $m > N_c$ 个时隙才能得到列满秩的 \mathbf{H} 矩阵。

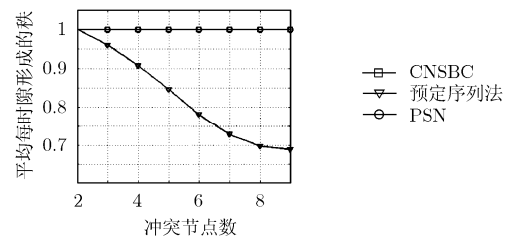


图1 ef_{rank} 与 N_c 的关系(高斯信道)

由两种改进算法可知 $m_1 + m_2 + 1 = m$, 且有 $0 \leq m_1 \leq N - N_c - 1$ 。出现 $m_1 = N - N_c - 1$ 的情况不外乎以下3种:第1种是当 $N_c < N_{th}$ 时,由于 \mathbf{H} 矩阵中各行向量之间的相关性导致 \mathbf{H} 不满秩,系统在秩控制机制的作用下增加 CTE 时隙。如果恰好将所有的空闲节点选为协同,则有 $m_1 = N - N_c - 1$, 此时 $m_2 = 0$ 。第2种是当 $N_c = N_{th}$ 时,必须选择全部空闲节点作为协同,故有 $m_1 = N - N_c - 1$, 此时 $m_2 = 0$ 。第3种是当 $N_{th} < N_c < N$ 时,空闲节点数量不够,需要部分源节点重发数据包,故有 $m_1 = N - N_c - 1$, 此时 $m_2 = m + N_c - N$, 且 $\min(m_2) = 2N_c - N$ 。

4 PCR 方案性能分析

结合理论分析模型,本文提出两种新的 GHF-PCR 方案,其分别采用改进 CNSBC 算法和改进 RSIN 算法,支持对 $N_c \in [1, N - 1]$ 的情况进行冲突解析,下面对其性能进行分析。如果 N 节点网络中有 N_c 个节点发生了冲突 ($N_c = 1, 2, \dots, N - 1$), 在 CTE 中按照 CNS 算法选择协同节

点,从而得到V-MIMO矩阵 \mathbf{H} ,然后可得到PCR方案的时隙平均容量为

$$C_s(N_c) = \frac{1}{N_c} C_{\text{avg}}(N_c) = \frac{1}{N_c} E \left[\log_2 \det(\mathbf{I} + \mathbf{H}\mathbf{H}^H) \right] \quad (8)$$

式中 $\det(\cdot)$ 表示求行列式, $(\cdot)^H$ 表示矩阵共轭转置。在两种改进CNS算法作用下,当 $2 \leq N_c \leq N_{\text{th}}$ 时,仅由空闲节点充当协同, $\mathbf{H} = [\mathbf{A} \ \mathbf{B}]^T$ 。当 $N_{\text{th}} < N_c < N-1$ 时,除所有空闲节点之外还有部分源节点充当协同, $\mathbf{H} = [\mathbf{A} \ \mathbf{B} \ \mathbf{C}]^T$ 。当 $N_c = N-1$ 时,网络中不存在空闲节点, \mathbf{B} 矩阵完全消失,此时 $\mathbf{H} = [\mathbf{A} \ \mathbf{C}]^T$ 。

如果规定网络中传输的数据包长度为固定值,那么对于一个数据包而言,当误比特率小于等于目标误比特率时,可认为该数据包成功接收。反之,则认为其接收失败。定义 $P_{\text{num}_{\text{err}}}$ 为目的节点接收失败的数据包数目均值, $P_{\text{num}_{\text{total}}}$ 为系统中发送的数据包数目均值,则由此可定义冲突节点数目为 N_c 时,系统丢包率为

$$Pr_{\text{lost}}(N_c) = P_{\text{num}_{\text{err}}} / P_{\text{num}_{\text{total}}} \quad (9)$$

当节点发送概率均为 p 时,可知 i 个节点发生冲突的概率为 $Pr_c(i) = \binom{i}{N-1} p^i (1-p)^{N-1-i}$ 。由此可以定义系统的时隙等效吞吐量为

$$S(p) = \sum_{i=1}^{N-1} \frac{Pr_c(i)[1 - Pr_{\text{lost}}(i)]}{m_0(i)} \quad (10)$$

其中 $m_0(i)$ 为解析 i 个节点冲突所消耗的时隙数目均值。由此可知,最大时隙等效吞吐量 $S_{\text{max}} = \max\{S(p)\}$,与之对应的节点最佳发送概率 $p_{\text{op}} = \arg \max\{S(p)\}$ 。

5 仿真结果

考虑一个总节点数 $N=10$ 的全连通网络,各节点在地理上随机分布。所有噪声方差归一化为1,每时隙的系统总发射功率限制为10 dBm,所有节点在发送数据包时均服从时隙总功率约束并采用平均功率分配。数据包长度规定为424 bit,也即ATM数据包的标准长度。数据采用BPSK调制,目标误比特率设置为0.005。在进行数据包分离时,参考了文献[5]中提出的信号检测算法。在下文及各图中,方案1, 2, 3分别表示采用改进CNSBC算法、改进RSIN算法及预定序列法的GHF-PCR方案,方案4表示发生冲突后采用TDMA方式进行冲突解析的传统方案。

图2和图3分别是在高斯信道、Markov块衰落信道条件下对4种方案进行的时隙平均容量比较。从两图中可发现,方案1的容量曲线在 $N_c=5$ 处出现明显的凹陷,而且除了 $N_c=1$ 的情况外,方案1和方案2的容量均在 $N_c=5$ 时最为接近。其原因在于GHF-PCR方案在MAC层采用了混合转发机制,这表示由空闲节点充当的协同节点在放大并转发混合数据包的同时,也放大了噪声。这是混合转发机制的固有缺陷。此时有 $N_{\text{th}}=5$,而 $N_c=N_{\text{th}}$ 时CNSBC和

RSIN两种算法最后选定的协同节点集合都一样,其性能差距不大。尤其是在高斯信道下,信道系数不随时间发生变化,因此两种方案在 $N_c=5$ 时形成的V-MIMO矩阵是行等价的,导致方案1和方案2的容量相等。图4是Markov块衰落信道条件下 $Pr_{\text{lost}}(N_c) - N_c$ 曲线。图5是由 $Pr_{\text{lost}}(N_c)$ 计算得到的 $S(p) - p$ 曲线。从此两图中可发现,方案1的丢包率及等效吞吐量性能是最优的,而方案3的性能是三者中最差的。

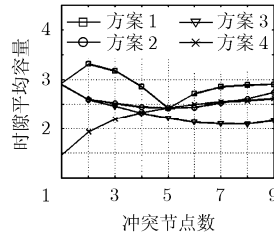


图2 时隙平均容量(高斯信道)

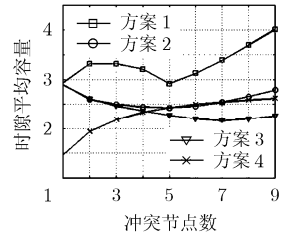


图3 时隙平均容量(Markov块衰落信道)

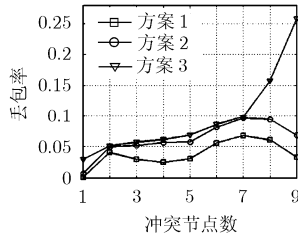


图4 系统丢包率(Markov块衰落信道)

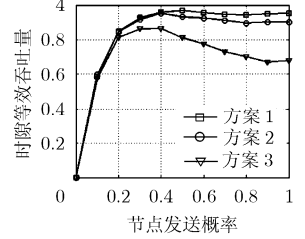


图5 时隙等效吞吐量(Markov块衰落信道)

此外,当 $N_c > N_{\text{th}}$ 时,各种方案的容量都有所回升,然而这并不意味着PCR方案的性能当 p 较大时会变得更好。如图2所示,在高斯信道下 $N_c > N_{\text{th}}$ 时的容量低于 $N_c < N_{\text{th}}$ 时的容量。而且由图4可知,即使是在Markov块衰落信道下, $N_c < N_{\text{th}}$ 时的丢包率仍然高于 $N_c < N_{\text{th}}$ 时的丢包率。此外,如果将 p 设置得较大从而导致冲突经常出现,则系统的控制开销将变得很大,得不偿失。

总的来说,在3种GHF-PCR方案中,方案1的性能是最优的,方案2次之,方案3最差。但是,CNSBC算法的复杂度较高,且随着冲突节点增多,其控制开销必然迅速增大。由此可见,方案1的实用性不高,但其可以在理论上为设计新的PCR方案提供性能参照。而RSIN算法无需在发送端知晓信道状态信息,实现相对简单,且方案2的各方面性能均优于方案3及传统方案(方案4),与方案1的差距也不大。因此,采用RSIN算法的GHF-PCR方案具有较高实用价值。

6 结束语

本文的贡献在于建立了GHF-PCR方案的一种结构清晰、便于分析的理论分析模型,提出了适用于GHF-PCR方

案的 CNS 算法, 并且结合理论分析模型和 CNS 算法对方案性能进行了讨论。仿真结果表明, 所提方案与传统方案及其它同类方案相比, 可获得较为显著的性能提升。此外, 由于所提方案支持对 $N_c \in [1, N-1]$ 的情况进行冲突解析, 因此应用范围更广泛。但是, 由于需要进行协同节点选择, 所以与传统方案相比, 所提方案会增加一定系统开销和运算复杂度。

致谢 李子博士提供了大量帮助, 特此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Sendonaris A, Erkip E, and Aazhang B. User cooperation diversity-part I & II [J]. *IEEE Trans. on Communication*, 2003, 51(11): 1927-1948.
- [2] Lin R and Petropulu A P. A new wireless network medium access protocol based on cooperation [J]. *IEEE Trans. on Signal Process*, 2005, 53(12): 4675-4684.
- [3] Michail K T, Zhang R, and Banerjee S. Network assisted diversity for random access wireless data networks [J]. *IEEE Trans. on Signal Process*, 2000, 48(3): 702-711.
- [4] 周尧, 蔡跃明, 潘成康. 一种新的基于 V-MIMO 技术的包冲突解析方案 [J]. *军事通信技术*, 2007, 28(3): 20-26.
Zhou Y, Cai Y, and Pan C. A new packet collision resolution scheme based on virtual MIMO techniques [J]. *Journal of Military Communication Technology*, 2007, 28(3): 20-26.
- [5] Murugan A D, Gamal H E, Damen M O, and Caire G. A unified framework for tree search decoding: rediscovering the sequential decoder [J]. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2006, 52(3): 933-953.
- 周 尧: 男, 1983 年生, 硕士生, 研究方向为移动通信、无线协同通信。
- 蔡跃明: 男, 1962 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为移动通信、信号处理、B3G 移动通信技术等。
- 胡均权: 男, 1973 年生, 讲师, 研究方向为数字通信技术。
- 潘成康: 男, 1978 年生, 博士生, 研究方向为多用户信息理论、无线资源管理、协同通信。