

基于 SJNR 准则抑制多小区间干扰的自适应网络预编码研究*

屈刚, 谢显中, 王晶晶, 郑品莲

(重庆邮电大学个人通信研究所/计算机网络与通信信产部重点实验室, 重庆 400065)

摘要: 针对多输入多输出(MIMO)多小区协作系统中下行链路的同频干扰问题,利用基于 SJNR 准则的自适应网络预编码,通过基站协作有效地对抗小区间干扰。首先给出了基于 SJNR 准则的自适应预编码设计,该方案可以在各基站采用独立的线性预编码技术对小区间干扰进行有效抑制,然后分为市区和郊区两种情况分别得到基于 SJNR 准则的自适应网络预编码。仿真结果表明,采用该方案有效地抑制了小区间干扰,系统性能有明显改善,同时还降低了系统的复杂度。

关键词: 自适应预编码; 网络预编码; 多输入多输出; 小区间干扰; SJNR

中图分类号: TP309.7

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2010)07-2700-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2010.07.084

Research of adaptive network precoding based on SJNR for inter-cell interference mitigation

QU Gang, XIE Xian-zhong, WANG Jing-jing, ZHENG Pin-lian

(Institute of Personal Communication/MII Key Laboratory of Computer Network & Communication, Chongqing University of Posts & Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: Focusing on the problem that the co-frequency interference of the downlink channels in multi-cell of MIMO systems, this paper used the adaptive network precoding based on the SJNR to reduce the inter-cell interference. First of all, gave the adaptive precoding design based on the SJNR criteria. In this design, each base station used independent precoding approach to suppress adjacent inter-cell interference. And then in order to decrease the handling complex by the active way, attained the adaptive network precoding respectively in the urban and suburb area environments, obtained two adaptive network precoding based on SJNR respectively. Simulation results show that the inter-cell interference is obviously restrained and the system performance is improved after using the active network precoding basing on the SJNR, while it also reduce complexity of system.

Key words: adaptive precoding; network precoding; MIMO (multiple-out multiple-input); inter-cell interference; SJNR (signal to jamming and noise ratio)

0 引言

最近的一些无线通信系统新标准,如 IEEE 802.16d/e、3GPP LTE、IEEE 802.11n 等,都将 MIMO 作为提高系统容量的重要技术,这是因为在无线信道中,MIMO 系统能在不增加带宽的情况下显著提高通信系统的容量和频谱利用率。近年来,对单小区单用户(SCSU)的点对点 MIMO 系统的研究已经取得了很多卓有成效的成果,同时对于单小区多用户的通信系统也取得了积极的进展。随着下一代移动通信系统标准进一步制定,基于 MIMO 技术的多小区架构开始引起人们越来越多的注意^[1-4]。

在传统的小区中,每个基站独立地利用各自的信道信息给用户发送信息,系统性能没有得到有效利用。因此提出了基站

协作系统(也称为 Co-BS、network MIMO、Co-MIMO、Co-MP),该系统通过协调不同基站的天线,使基站间协作通信来增加系统吞吐量,实现高速传输。在这个基站协作系统中,多个基站协作组成了一个虚拟的 MIMO 发送束(也被称为 super eNB^[5]),系统信息(数据拥塞、信道信息、调度分配)在发送端共享。多小区系统采用频率复用技术,会产生同频干扰(CCI),这种自相邻小区用户的干扰(同频干扰)会急速恶化本小区用户的信号接收,特别是对多天线系统性能所带来的影响甚至超过了单天线系统,从而使得 MIMO 技术带来的高容量优势受限于小区间的干扰^[6]。因此在未来的通信系统中,如何有效地抑制小区间的干扰,成为了 MIMO 技术研究的一个重要方向。

当前,对于传统多小区系统的干扰抑制方法有很多^[7],大多集中在接收端进行处理。然而在接收端对干扰进行处理,不

收稿日期: 2009-12-18; 修回日期: 2010-02-01 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60572089,60872037);重庆市自然科学基金资助项目(2008BB2411);重庆市教委应用基础研究基金资助项目(KJ080508)

作者简介: 屈刚(1984-),男,硕士研究生,主要研究方向为个人通信技术(pecial_man@163.com);谢显中(1966-),男,四川人,教授,博士,主要研究方向为移动通信技术、通信信号处理和通信应用软件;王晶晶(1983-),女,山西人,硕士,主要研究方向为数据和交换;郑品莲(1984-),女,福建人,硕士研究生,主要研究方向为个人通信技术。

但受限于硬件成本和处理复杂度,而且还受限于额外接收自由度的影响。因此,将多小区系统的干扰处理集中在下行链路的发送端进行处理,成为了当前的一个热点,并且理论上采用多小区联合预编码的方式也是最佳的。现在大多数干扰处理方式是在各基站间共享数据信息,然后进行联合编码后再发送^[7-9],虽然这种多小区协作系统可以有效提高系统的频谱效率,但在实际系统中,却存在联合编码复杂度高,协作同步难,实时数据交换量大等问题。

本文首先给出采用多小区协作的自适应预编码系统模型,然后提出一种改进的基于SJNR准则的具有低复杂度的自适应网络预编码方案,其预编码矩阵的选择跟信道信息以及各基站与用户的相对路径衰落同时结合起来,并且预编码过程是在各个基站独立完成,大大降低了复杂度;最后通过在TD-LTE系统环境下的仿真,对SIR(信干比)和 d (基站与用户的距离)设定门限值,来达到自适应网络预编码,结果显示系统性能得到明显提高。

1 多小区协作系统模型

本文采用多小区多天线的系统模型,如图1所示,系统的频率复用因子为1。在多小区协作系统中,小区用户所受到的干扰信号的能量,绝大部分来自于最近的两个或三个相邻小区,这样就可以在发送端,集中处理干扰强度最大的几个干扰链路,从而有效抑制干扰的同时降低系统复杂度。在本文中考虑三个小区的模型^[10],主要分析小区1受干扰情况。

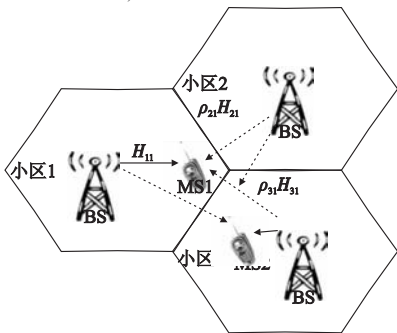


图1 多小区协作系统模型(虚线表示干扰)

在小区1内,基站1的下行数据只传送到本小区内的用户1(移动台1),基站和移动台分别配置有 N_t 根发射天线和 M_r 根接收天线($N_t > M_r$), H_{11} 表示基站1到用户1之间 $M_r \times N_t$ 维的信道矩阵; H_{21} 和 H_{31} 为相邻小区2、3基站与用户1之间的干扰信道,维数为 $M_r \times N_t$ ($N_t \times M_r$)。 ρ_{k1} 表示相邻基站对本小区用户1归一化的相对路径衰落,如 $\rho_{k1} = \alpha_{k1}/\alpha_{11}$ 。其中 $\alpha_{k1} = \sqrt{1/d_{k1}}$ (d_{k1} 表示两者间的距离, γ 表示路径衰落因子)表示相邻基站与用户1之间的平均路径损耗。

设 w_k 是基站 k 的发送端预编码矩阵,它是一个 $N_t \times L_t$ 的矩阵(L_t 则表示基站的数据子流个数即层数, $L_t \leq \min(N_t, M_r)$),根据不同的设计, w_k 可以有不同的功能(如功率分配、天线选择或波束成型等),而本文将它用作干扰抑制。用 s_k 表示基站 k 发送的 $L_t \times 1$ 维下行数据信号矢量,满足功率约束为 $E\{s_k^H s_k\} \leq P_k$ 。小区基站对 L_t 个数据流进行预编码,然后扩展到 N_t 根发射天线上进行发送。则用户1的接收信号就可以表示为

$$y_1 = H_{11} w_1 s_1 + \rho_{21} H_{21} w_2 s_2 + \rho_{31} H_{31} w_3 s_3 + n$$

$$\text{即为} \quad y_1 = H_{11} w_1 s_1 + \sum_{k=2}^3 H'_{k1} w_k s_k + n \quad (1)$$

其中: $H'_{k1} = \rho_{k1} H_{k1}$ 。

分析式(1),右边第一项是本小区用户1接收的有效数据信号,第二项表示来自相邻小区的干扰信号(其中 k 表示相邻小区),而第三项 n 是加性噪声,其分布满足 $n \sim CN(0, \sigma^2 I)$ 。同样,矩阵 H_{11} 和 H_{k1} 的元素是独立同分布,且均满足均值为0,方差为1复高斯随机分布。对于干扰信道信息 H_{k1} 的获取,是通过基站间协作利用一个初始联合训练过程,并相互共享。

2 自适应网络预编码的设计

本文在发送端利用预编码进行干扰抑制,其目的是使发送信号经过预编码后对相邻小区的干扰减小,从而提高各小区接收机的信干噪比。在本系统中,要让基站根据信道信息自适应地改变预编码矩阵,就必须选取合适的准则。这决定系统在不同的情况下,选择不同的准则,从而形成不同的预编码矩阵。在典型的干扰受限系统中,用户1的接收信号与干扰和噪声的比率可以表示为

$$\text{SINR}_1 = \frac{s_1^H w_1^H H_{11}^H H_{11} w_1 s_1}{\sum_{k=2}^3 s_k^H w_k^H H'_{k1} H'_{k1} w_k s_k + M_r \sigma^2} \quad (2)$$

其中: $s_1^H w_1^H H_{11}^H H_{11} w_1 s_1$ 表示用户1接收有效信号的功率, $\sum_{k=2}^3 s_k^H w_k^H H'_{k1} H'_{k1} w_k s_k$ 表示相邻小区对用户1产生的干扰功率, σ^2 表示噪声的方差。为了提高系统的性能,需要将每个用户的信噪比(SINR)最大化,但是从上式看出,每个用户的SINR都不是独立的,预编码矩阵的选取不仅与本小区基站的预编码有关,而且还取决于相邻小区中的预编码矩阵,一旦改变任何一个用户的预编码,都会影响到全部用户的SINR,因此这是一个联合优化的问题,很难直接优化SINR。这就对优化选取 w_k 带来了很大的困难,为了能够解决这个问题,需要从另一个角度来看待这个问题。

$\sum_{k=2}^3 s_k^H w_k^H H'_{k1} H'_{k1} w_k s_k$ 衡量的是其他小区对本小区用户的干扰,而其中的互干扰项 $s_k^H w_k^H H'_{k1} H'_{1k} w_1 s_1, k=2,3$ 不仅表现了用户 k 受到的干扰。而且表现了用户1对其他小区的干扰。因此,本文采用另一种干扰的概念,即目标用户的数据对其他用户数据的干扰,在本文中,将它称之为“jamming”或者J干扰^[11],J干扰刚好与之前定义的SINR干扰相反。用户1对其他小区的J干扰功率,即它对其他小区所有用户的接收信号产生的干扰功率,其表达式为

$$J_1 = \sum_{k=2}^3 s_k^H w_k^H H'_{k1} H'_{1k} w_1 s_1 \quad (3)$$

由于不能直接优化SINR,本文转而考虑优化SJNR,即在给定发射功率的前提下最大化SJNR。最大化SJNR准则要考虑小区间同频干扰和噪声的影响,由于每个用户的SJNR都是独立的,改变一个用户的预编码矩阵不会影响其J干扰,使得最大化SJNR准则在数学上更易实现,各基站预编码矩阵的选取需要满足:

$$w_k = \arg \max_{w_k \in T(N_t, L_t)} \{ \text{SJNR}_k \}; k=1,2,3 \quad (4)$$

其中: k 表示多小区系统中小区数目, $T(N_t, L_t)$ 表示具有单位正交列的 $N_t \times L_t$ 维矩阵的集合,这保证了经过预编码后的信号其发射功率保持不变。

$$\text{SJNR}_1 = \frac{s_1^H w_1^H H_{11}^H H_{11} w_1 s_1}{\sum_{k=2}^3 s_k^H w_k^H H'_{k1} H'_{k1} w_k s_k + M_r \sigma^2} =$$

$$\frac{\|H_{11} w_1\|^2}{(\sum_{k=2}^3 \|H'_{1k} w_1\|^2) + M_r \sigma^2 / P_1} \quad (5)$$

$k = 2, 3, s. t. s_1^H s_1 = P_1$ 。将式(5)代入(4),得

$$w_1 = \arg \max_{w_k \in T(N_r, T_r)} \frac{\|H_{11} w_1\|^2}{\rho_{12} H_{12} w_1\|^2 + \rho_{13} H_{13} w_1\|^2 + M_r \sigma^2 / P_1} = \max \text{ generalized eigenvector}(H_{11}^H H_{11}, \sum_{k=2}^3 H'_{1k}^H H'_{1k} + M_r \sigma^2 / P_1) \quad (6)$$

这就是一个 Rayleigh 商问题,最大化 SJNR 的最优解就是式(6)的最大广义特征值所对应的广义特征向量。当 $\sum_{k=2}^3 H'_{1k}^H H'_{1k} + M_r \sigma^2 / P_1$ 可逆时,可以表示为

$$w_1 = \max \text{ eigenvector}((\sum_{k=2}^3 H'_{1k}^H H'_{1k} + M_r \sigma^2 / P_1)^{-1} H_{11}^H H_{11}) \quad (7)$$

从式(7)可以看到,预编码矩阵 w_1 的确定,涉及到了 ρ_{1k} 这个参量,充分考虑到了移动中用户和小区边缘用户选取更加合理的预编码矩阵,有效地抑制了多小区间的干扰,提高了系统性能。

3 采用基于 SJNR 准则的自适应网络预编码抑制小区间的干扰

在网络预编码中,系统信息在多个基站共享,再通过预编码来消除干扰,这些不同小区的信号有助于其他小区通信,而不是被视为对终端的干扰。协作基站同时为多个用户发送数据,每个用户同时为多个基站服务。因此,通过基站协作和预编码可以消除小区间干扰,从而提高系统的吞吐量。但是这将会增加系统的开销。因此,可将小区用户分为边缘用户和中心用户来考虑。在位于小区边缘时,用户会收到邻近小区的干扰信号,此时小区间用户干扰比较严重,但是位于小区中心用户收到的邻近小区干扰信号则非常微弱,此时可以忽略小区间干扰。由于网络预编码会增加系统的开销,当用户受到的干扰比较微弱时,就没有必要通过增加系统开销来抑制微弱的小区间干扰。根据应用环境,本文分为郊区和市区两种应用情况分析基于 SJNR 准则的自适应网络预编码。

3.1 市区内的自适应网络预编码

在市区应用环境,用户通过计算接收到的 SIR 来衡量小区间干扰的严重程度,从而判断是否需要使用网络预编码来抑制小区间的干扰。SIR 越大说明用户受到的干扰越小,否则小区间的干扰就越严重。此时采用 SJNR 准则的网络预编码来抑制小区间的干扰,在图 1 中,用户 1 的 SIR 通过式(8)得到:

$$SIR_1 = \frac{\|H_{11} w_1\|^2 P_1}{\|H'_{21} w_2\|^2 P_2 + \|H'_{31} w_3\|^2 P_3} \quad (8)$$

$P_k (k = 1, 2, 3)$ 是第 k 小区的发射功率,具体步骤如下:

a) 每个基站只服务本小区的用户,终端用户计算接收到的 SIR;

b) 设定 SIR 的门限值 SIR_0 , 当用户收到的 $SIR_1 > SIR_0$ 时,说明用户受到的小区间干扰比较微弱,可以不采用网络预编码,令 $w_1 = I$;

c) 当用户计算的 $SIR_1 < SIR_0$ 时,受到小区间干扰较大,采用基于 SJNR 准则的网络预编码;同时相邻基站进行协作,共享发射数据和 CSI。

根据式(7),在市区内采用基于 SJNR 准则的自适应网络预编码来抑制干扰时, w_1 可以表示为

$$w_1 = \begin{cases} I & ; SIR_1 \geq SIR_0 \\ \max \text{ eigenvector}((\sum_{k=2}^3 H'_{1k}^H H'_{1k} + M_r \sigma^2 / P_1)^{-1} H_{11}^H H_{11}) & ; SIR_1 < SIR_0 \end{cases}$$

3.2 郊区的自适应网络预编码

对于郊区通信环境,通过基站与本小区用户的距离来判断用户是否位于小区边缘,无须用户计算和反馈 SIR,只需基站检测到用户的距离即可,降低了用户的复杂度。当用户位于小区边缘时受到的小区间干扰比较严重,此时采用基于 SJNR 准则的自适应网络预编码来抑制小区间干扰。具体步骤如下:

a) 设定基站和本小区用户的门限距离 d_0 , 当用户离本小区基站的距离 $d < d_0$ 时,小区干扰较弱,对用户的接收影响较小,可以不采用网络预编码,此时令 $w_1 = I$;

b) 用户到本小区基站距离 $d > d_0$ 时,采用网络预编码来抑制小区间干扰,邻近小区间进行协作,共享发射数据和 CSI,通过 SJNR 准则的自适应网络预编码来抑制小区间干扰。

在郊区采用基于 SJNR 准则的自适应网络预编码来抑制干扰时, w_1 可以表示为

$$w_1 = \begin{cases} I & ; d \leq d_0 \\ \max \text{ eigenvector}((\sum_{k=2}^3 H'_{1k}^H H'_{1k} + M_r \sigma^2 / P_1)^{-1} H_{11}^H H_{11}) & ; d > d_0 \end{cases}$$

4 性能仿真和分析

本文利用 MATLAB 仿真 TD-LTE 系统下行链路,并且假设信道估计为理想信道估计。采用式(1)所示的模型,即为三个小区,各个小区基站配置四根天线,用户配置两根天线,路径衰落因子为 $\gamma = 3.8$,采用 LTE-EPA 信道^[12]。不失一般性,本文考查用户 1 的性能,其中 LTE 系统的主要参数为^[13]:基带信号传输带宽 $B = 5$ MHz;物理资源块个数 PRB 为 25;射频载波频率 $f_c = 2$ GHz;每个时隙长度为 0.5 ms;一个时隙包含的 OFDM 符号数 $N = 7$,每个 OFDM 符号总长为 71.43 μs ;循环前缀 CP 种类为短 CP;IFFT/FFT 长度为 512。分别仿真了各种干扰抑制方法的比较、市区内采用 SJNR 准则的自适应网络预编码前后性能对比、郊区采用 SJNR 准则的自适应网络预编码前后性能对比。具体仿真结果分别如图 2 ~ 5 所示。

从图 2 可以看出,在多小区情况下,对干扰不作任何预处理(no processing),系统会很快受限于干扰;而基于 MMSE 联合检测(MMSE MUD)的接收端处理方法,受限于接收天线只有两根,没有多余的自由度来抑制干扰,在高信噪比的情况下,系统性能依然很差,仅仅比未经任何干扰处理的稍好;而对于基于迫零准则的预编码(ZF)方式,由于三小区消除干扰至少需要 6 的发送自由度,因此干扰抑制效果有限。对于本文采用的 SJNR 准则的预编码方法,可以看到抑制干扰效果相对其他几种有非常明显的提升。这主要是因为基站间相互协作,数据和 CSI 共享,整体地考虑到协作小区间的相互干扰,这无疑会带来较好的系统性能。

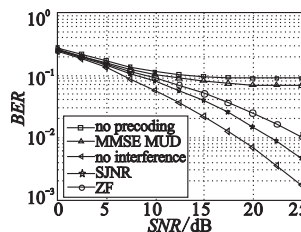


图2 各基站四根发射天线、用户两根接收天线时各干扰抑制方法的比较

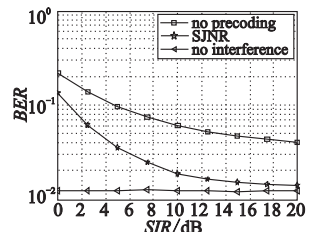


图3 各基站四根发射天线、用户两根接收天线时SJNR的性能比较

图 3 显示的是系统在信噪比 $SNR = 10$ dB 时,误比特率 BER 随信干比 SIR 变化的情况。从图中可以看到,当 SIR 大于

10 dB时,本文采用的SJNR预编码方法已经开始趋于接近没有干扰(no interference)的情况(单小区)。因此可以选取 $SIR_0 = 10$ dB作为市区内自适应预编码的门限值。

图4显示的是市区内采用基于SJNR准则的自适应网络预编码前后的性能对比。从图中可以看到,在 SIR 为0~7.5 dB时本文采用SJNR准则的自适应预编码误比特率明显降低,系统性能得到了改善;当 SIR 大于门限值10 dB时,不采用预编码的BER曲线变化平缓,性能已经接近采用基于SJNR准则的自适应网络预编码 $SIR = 4$ dB的情况,就没有必要来增加系统开销来获得性能提升,因此两曲线在10 dB以后重合。随着 SIR 门限值的增大,系统的性能虽有改善,但却增加了系统开销,所以只需在系统性能比较差的时候采用网络预编码,在系统性能较好时没必要增加系统开销来获得微弱的性能改善。

图5是郊区采用SJNR准则自适应网络预编码前后的性能对比。假设小区半径为5 km, $SNR = 15$ dB。本文分别仿真了门限 d_0 为3.5 km和4 km,当用户距离本小区基站大于 d_0 时采用网络预编码。因此采用网络预编码后系统性能得到明显提高。

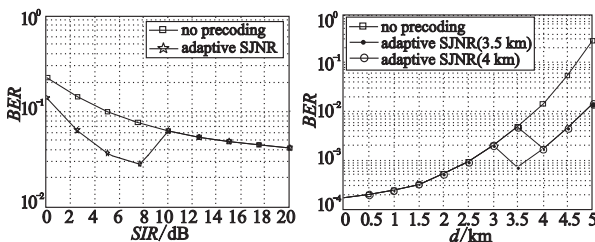


图4 市区内SJNR准则自适应网络预编码前后性能对比

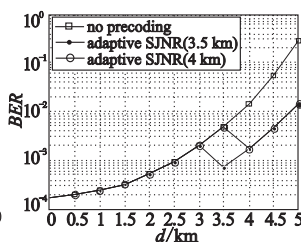


图5 $d_0=3.5$ km和4 km时郊区采用SJNR准则自适应网络预编码前后性能对比

5 结束语

在多小区环境中,来自其他小区的干扰对MIMO系统影响更是超过了单天线系统,本文研究了LTE系统中三小区三用户MIMO的相邻小区同频干扰问题。针对当前采用多基站协作的联合预编码解决干扰问题而存在的高复杂度特点,本文提出了基于SJNR准则的自适应预编码算法。各基站间相互协作采用独立的预编码技术,降低了复杂度,同时对小区间干扰也有很好的抑制作用。随后引入小区中心用户 SIR_0 和小区边缘距离 d 的门限值,通过对它们的判决来达到降低系统开销和抑制干扰的良好平衡。这种思考模式下,改进判决值的选取,以

及更快更准确地找到门限值,将是今后需要进一步研究的方向。

参考文献:

- [1] 3GPP. R1-082492, Network MIMO in LTE-Advanced [S]. Jeju, South Korea; 3GPP TSG RAN WG1 Meeting #54, 2008.
- [2] 3GPP. R1-082886, Inter-Cell interference mitigation through limited coordination [S]. Jeju, Korea; 3GPP TSG RAN WG1 Meeting #54, 2008.
- [3] KARAKAYALI M K, FOSCHINI G J, VALENZUELA R A, *et al.* Network coordination for spectrally efficient communications in cellular systems [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2006, 13(4): 56-61.
- [4] VENKATESAN S, LOZANO A, VALENZUELA R. Network MIMO: overcoming intercell interference in indoor wireless systems [C] // Proc of the 41st IEEE Conference Record of Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. 2007: 83-87.
- [5] 3GPP. R1-082497, Network MIMO precoding [S]. Warsaw, Poland; 3GPP TSG RAN WG1 #53bis, 2008.
- [6] CATREUX S, DRIESSEN P F, GREENSTEIN L J. Attainable throughput of an interference-limited multiple-input multiple-output (MIMO) cellular system [J]. *IEEE Trans on Communications*, 2001, 49(8): 1307-1311.
- [7] 谢显中, 雷维嘉. 抑制MIMO蜂窝系统中小区间干扰的多基站联合处理算法研究进展 [J]. *数字通信*, 2009, 36(3): 13-19.
- [8] ZHANG Hong-yuan, DAI Huai-yu. Cochannel interference mitigation and cooperative processing in downlink multicell multiuser MIMO networks [J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2004, 2004(2): 222-235.
- [9] NG B L, EVANS J S, HANLY S V, *et al.* Transmit beam-forming with cooperative base stations [C] // Proc of IEEE International Symposium on Information Theory. 2005: 1431-1435.
- [10] DAI Huai-yu, MOLISEN A F, POOR H V. Downlink capacity of interference-limited MIMO systems with joint detection [J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2004, 3(2): 442-453.
- [11] WU Yong-le, ZHANG Jin-fan, XU Ming-guang, *et al.* Multiuser MIMO downlink precoder design based on the maximal SJNR criterion [C] // Proc of IEEE GLOBECOM '05. 2005: 2694-2698.
- [12] 3GPP. TS 36.104, Base station (BS) radio transmission and reception [S]. 2010.
- [13] 3GPP. TS 36.211, Physical channels and modulation [S]. 2009.

(上接第2699页)

- [2] RANKOV B, WITTNEBEN A. Spectral efficient protocols for halfduplex fading relay channels [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2007, 25(2): 379-389.
- [3] KNOPP R. Two-way wireless communication via a relay station [C] // Proc of GDRIS Meeting. 2007.
- [4] HUANG Wan-jen, HONG Yao-wen, KUO C C J. Power allocation for lifetime maximization in cooperative networks [C] // Proc of IEEE Vehicular Technology Conference. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2007: 581-585.
- [5] HUI Hui, ZHU Shi-hua, LI Guo-bing. Distributed power allocation schemes for amplify-and-forward networks [C] // Proc of IEEE Wireless Communications and Networking Conference. 2009: 1-6.
- [6] SHIN W, LEE N, LIM J B, *et al.* An optimal transmit power allocation for the two-way relay channel using physical-layer network coding [C] // Proc of IEEE International Conference on Communications

Workshops. 2009: 1-6.

- [7] JIANG Bin, GAO Fei-fei, GAO Xi-qi, *et al.* Channel estimation for amplify-and-forward two-way relay network with power allocation [C] // Proc of IEEE International Conference on Communications. 2009: 1-5.
- [8] POPOVSKI P, YOMO H. Physical network coding in two-way wireless relay channels [C] // Proc of IEEE International Conference on Communications. 2007: 707-712.
- [9] 陈书平, 王文博, 张兴. 解码转发中继网络多用户分集 [J]. *北京邮电大学学报*, 2009, 32(1): 95-98, 107.
- [10] PHAN K T, THO L N, VOROBYOV S A, *et al.* Power allocation in wireless multi-user relay networks [J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2009, 8(5): 2535-2545.
- [11] HANSA M O, ALOUINI M S. Optimal power allocation for relayed transmissions over rayleigh-fading channels [J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2004, 3(6): 1999-2004.