



MIMO 中继系统中一种基于用户 QoS 的资源分配方法

郭 涛,李有明,雷 鹏,季 彪,李程程

(宁波大学通信技术研究 所 宁波 315211)

摘 要:针对基于 OFDMA 技术的 MIMO 中继通信系统下行链路中的动态资源分配问题,提出了一种保证最低用户服务质量(QoS)的资源分配方法。该方法采用一种低复杂度的次优算法,在假设等功率分配的前提下,根据用户的 QoS 定义选择优先性权衡因子,对权衡因子越大的用户越优先进行中继选择和子载波分配,在此基础上通过凸优化理论得到不同用户对应的子载波上的功率分配。仿真结果表明,本文提出的方法不但能够获得较高的系统容量,而且可以较好地保证每个用户的 QoS。

关键词:OFDMA;MIMO 中继下行系统;服务质量;凸优化

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2015088

A Resource Allocation Scheme Based on User's QoS in MIMO Relay System

Guo Tao, Li Youming, Lei Peng, Ji Biao, Li Chengcheng

(Institute of Communication Technology, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: For the resource allocation in OFDMA MIMO relay downlink system, a quality of service aware resource allocation scheme with low complexity under total power constraint was proposed. First, under the assumption of equal power allocation, a selective priority factor was chosen for the relay selecting and subcarrier allocation. The relay selection and subcarriers allocation were carried out depending on the priority factor. Then the optimal power allocation was implemented through convex optimization algorithm. Numerical results show that the proposed scheme can not only achieve the higher capacity of system, but also guarantee the quality of service for each user.

Key words: OFDMA, MIMO relay downlink system, quality of service, convex optimization

1 引言

近年来,多输入多输出(MIMO)技术获得了极大的关

注,通过在发射端和接收端布置多根天线,可以使系统获得更高的空间复用和空间分集增益,因而在相同的发射功率和误比特率限制下,该类系统能够获得比单输入单输出

收稿日期:2014-11-24;修回日期:2015-04-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No.61071119),宁波市自然科学基金资助项目(No.2012A610017),宁波市创新团队项目(No.2011B81002),宁波大学研究生科研创新基金资助项目(No.010-D00615148000)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61071119), Ningbo Natural Science Foundation (No.2012A610017), Ningbo Innovation Team Project (No.2011B81002), The Scientific Research Foundation of Graduate School of Ningbo University (No.010-D00615148000)

论文引用格式:郭涛,李有明,雷鹏等. MIMO 中继系统中一种基于用户 QoS 的资源分配方法. 电信科学, 2015088

Guo T, Li Y M, Lei P, et al. A resource allocation scheme based on user's QoS in MIMO relay system. Telecommunications Science, 2015088



(SISO)系统更高的系统容量^[1,2]。中继(relay)技术具有扩大基站覆盖范围、提高边缘用户服务质量(QoS)、提高系统容量等优点。基于中继的通信系统中的资源分配问题主要包括子载波分配、中继选择和基站及中继节点的功率分配,合理地进行自适应资源分配能够充分地保证系统的资源利用率,提高系统的吞吐量。基于正交频分多址(OFDMA)技术的中继系统中的资源分配问题已经获得了广泛的研究^[3-5]。参考文献[6~8]分别对中继系统下行链路中的单用户解码转发(DF)、多用户放大转发(AF)和上行链路中多用户DF的资源分配问题进行了研究。参考文献[9]研究了MIMO中继单用户系统中的资源分配策略,该工作不涉及中继的选择和子载波分配问题。参考文献[10]研究了MIMO中继多用户系统中总功率限制下的资源分配问题,利用詹森不等式简化优化问题,通过一种改进的迭代注水算法获得了高的系统输出,但没有考虑用户间的QoS要求。针对多跳中继系统中的中继选择问题,参考文献[11]通过对偶方法得到了优化问题的次优解,然而联合优化算法的计算复杂度较高,对系统实现的要求也较高。以上研究都是在系统功率和误比特率(BER)的限制下最大化系统容量,没有考虑每个用户的即时速率要求。

随着无线通信的愈加普及,使用不同业务的用户对即时速率的要求是不同的,必须权衡所有用户的QoS要求,本文提出了MIMO中继系统中一种兼顾系统容量与用户QoS的资源分配方法。为了降低复杂度,将子载波分配、中继选择和功率分配的联合优化问题分两部分进行。首先,在进行中继选择和子载波分配时,基于用户的QoS要求设定优先选择因子,根据优先因子为相应的用户选择最优的中继和子载波;然后,在完成中继选择和子载波分配的基础上,将原始优化问题转化为凸优化问题,利用凸优化理论求得对应于每个子载波的优化功率分配。

2 系统模型

在单蜂窝两跳MIMO中继系统中包含一个基站,基站上安置了 N_t 根天线; K 个中继,每个中继上有 N_r 根天线; M 个用户,用户的终端受尺寸和功率的限制,只有一根天线。假设基站和用户之间的信道处于深衰落状态,不存在直传链路。当基站向用户发送信息时,需要通过中继转发给用户,中继采取DF策略,各链路的信道状态信息完全已知。数据传输通过两个时隙来完成:第一时隙,基站以广播方式向中继发送信息;第二时隙,中继将接收到的信息

解码转发给用户。假设系统的可用总带宽为 B ,子载波个数为 N 。

令 $H_{BS,k,n}$ 表示基站到中继 k 这条通信链路在子载波 n 上的信道增益矩阵,对应的发送功率为 $p_{BS,k,n}$; $H_{k,m,n}$ 表示中继 k 到用户 m 这条通信链路在子载波 n 上的信道增益矩阵,对应的发送功率为 $p_{k,m,n}$ 。分别如下所示:

$$H_{BS,k,n} = \begin{bmatrix} h_{1,1}^{BS,k,n} & h_{1,2}^{BS,k,n} & \dots & h_{1,N_r}^{BS,k,n} \\ h_{2,1}^{BS,k,n} & h_{2,2}^{BS,k,n} & \dots & h_{2,N_r}^{BS,k,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_t,1}^{BS,k,n} & h_{N_t,2}^{BS,k,n} & \dots & h_{N_t,N_r}^{BS,k,n} \end{bmatrix}$$

$$H_{k,m,n} = \begin{bmatrix} h_{1,1}^{k,m,n} & h_{1,2}^{k,m,n} & \dots & h_{1,N_r}^{k,m,n} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, $h_{N_t,N_r}^{BS,k,n}$ 、 $h_{N_r,N_r}^{k,m,n}$ 分别表示第一、第二时隙基站的第 N_t 根天线和中继的第 N_r 根天线之间的信道增益,由参考文献[2]可知,MIMO信道矩阵可以通过奇异值分解(SVD)转化为SISO信道,根据参考文献[3],对式(1)中的 $H_{BS,k,n}$ 和 $H_{k,m,n}$ 进行奇异值分解,可得:

$$H_{BS,k,n} = \sum_{i=1}^{N'} u_{BS,k,n}^i \sigma_{BS,k,n}^i (v_{BS,k,n}^i)^H$$

$$H_{k,m,n} = u_{k,m,n} \sigma_{k,m,n} (v_{k,m,n})^H \quad (2)$$

其中, $\sigma_{BS,k,n}^i (i=1,2,\dots,N')$ 、 $\sigma_{k,m,n}$ 分别是矩阵 $H_{BS,k,n}$ 和 $H_{k,m,n}$ 的奇异值,以降序排列, $u_{BS,k,n}^i (i=1,2,\dots,N')$ 、 $v_{BS,k,n}^i (i=1,2,\dots,N')$ 和 $u_{k,m,n}$ 、 $v_{k,m,n}$ 分别是 $H_{BS,k,n}$ 和 $H_{k,m,n}$ 的左、右奇异向量, N' 是矩阵 $H_{BS,k,n}$ 的秩。由参考文献[3]可知, $\sigma_{BS,k,n}^1$ 要远远大于 $\sigma_{BS,k,n}^\lambda (\lambda=2,3,\dots,N')$,传输功率主要集中于最大奇异值模式,进行如下定义:

$$G_{BS,k,n} = \frac{(\sigma_{BS,k,n}^1)^2}{\Gamma N_0 B / N} \quad (3)$$

$$G_{k,m,n} = \frac{(\sigma_{k,m,n})^2}{\Gamma N_0 B / N} \quad (4)$$

式(3)和式(4)分别是基站到中继 k 的通信链路在子载波 n 上的主信道增益值以及中继 k 到用户 m 的通信链路在子载波 n 上的主信道增益值。其中, N_0 为噪声功率谱密度, Γ 为信噪比裕量,与BER的关系为: $\Gamma = -\ln(5BER)/1.5$ 。在本文中,根据占优奇异向量配置天线加权,使信号通过最大奇异值模式传输。

两个时隙的瞬时速率可以表示为^[4]:

$$R_{BS,k,n} = \frac{B}{N} \log(1 + p_{BS,k,n} G_{BS,k,n}) \quad (5)$$

$$R_{k,m,n} = \frac{B}{N} \log(1 + p_{k,m,n} G_{k,m,n}) \quad (6)$$

通过中继传输时,整个系统的瞬时速率取决于两个时隙的最小值^[5],即:

$$R_{BS,k,m}^n = \min\{R_{BS,k,n}, R_{k,m,n}\} \quad (7)$$

因此,为了保证整个系统的容量最大,应有:

$$R_{BS,k,n} = R_{k,m,n} \quad (8)$$

即:

$$p_{BS,k,n} G_{BS,k,n} = p_{k,m,n} G_{k,m,n} \quad (9)$$

从而将两个时隙的等效信道增益定义为:

$$G_{BS,k,m}^n = \frac{G_{BS,k,n} G_{k,m,n}}{G_{BS,k,n} + G_{k,m,n}} \quad (10)$$

此时用户的瞬时速率可以表示为:

$$R_{BS,k,m}^n = \frac{B}{2N} \log(1 + p_{BS,k,m}^n G_{BS,k,m}^n) \quad (11)$$

式(11)中,等号右侧的值除以 2 是因为一次传输由两个时隙完成,其中:

$$p_{BS,k,m}^n = p_{BS,k,n} + p_{k,m,n} \quad (12)$$

在系统总功率限制下的基于速率最大化准则的资源分配问题可以表示为:

$$\begin{aligned} & \max \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \rho_{k,m,n} R_{BS,k,m}^n \\ & \text{s.t.} \begin{cases} A1: \rho_{k,m,n} \in \{0,1\}, \forall k,m,n \\ A2: \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \rho_{k,m,n} = 1, \forall n \\ A3: \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N p_{BS,k,m}^n \leq P_T \\ A4: \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \rho_{k,m,n} R_{BS,k,m}^n \geq Q_m, \forall m \\ A5: p_{BS,k,m}^n \geq 0, \forall k,m,n \end{cases} \end{aligned} \quad (13)$$

其中, $\rho_{k,m,n}$ 是中继和子载波选择因子, $\rho_{k,m,n}=1$ 表示第 n 个子载波和第 k 个中继被用户 m 使用,否则 $\rho_{k,m,n}=0$, Q_m 为每个用户的即时速率要求。约束条件 A2 表示每个子载波最多只能被一个中继和用户使用,以避免干扰;约束条件 A3 表示系统的总发送功率约束;约束条件 A4 用于保证每个用户都要满足其 QoS 要求。

3 资源优化分配

式(13)所示的优化问题是一个涉及子载波分配、中继选择和功率分配,包含离散变量和连续变量的混合整数型优化问题,要获得其最优解需要非常高的复杂度。本文采取了一种分步的资源分配方法,在假设功率平均分配的前提下进行用户的中继选择和子载波分配,在此基础上完成

每个子载波上的功率优化分配。

在进行中继选择和子载波分配时,必须充分考虑用户的 QoS 要求和链路增益,本文引入一个选择优先性权衡变量 w_m , 令 $w_m=Q_m-R_m$, R_m 为假设等功率分配时用户获得的速率。用户 m 的 w_m 越大,越优先选择中继和子载波。具体步骤如下。

(1) 初始化 $R_m=0, w_m=0, m \in \{1,2,\dots,M\}$ 子载波集合 $\Omega_N=\{1,2,\dots,N\}$, 首先对用户的目标速率进行降序排列,按照目标要求速率从大到小的顺序依次为每个用户分配一个最优的中继和子载波。将已分配子载波从子载波集合 Ω_N 中删除,剩余可用子载波集合表示为 Ω_N' , 并计算 R_m 和 w_m , 其中 $R_m=R_m+\frac{B}{N} \log(1+p_{BS,k,m}^n G_{BS,k,m}^n)$ 。

(2) 找到最大的 w_m 所对应的用户 m , 对于用户 m , 选择中继 k 和子载波 n 满足 $G_{BS,k,m}^n \geq G_{BS,k',m}^n, G_{BS,k,m}^n \geq G_{BS,k,m}^{n'}$, $k, k' \in \Omega_K, n, n' \in \Omega_N, \Omega_K$ 为中继集合。将子载波 n 从剩余子载波集合 Ω_N' 中删除,并更新 R_m 和 w_m 。

(3) 继续执行步骤(2),直到所有用户的服务质量都达到 QoS 要求,即 $\max w_m \leq 0$ 。

(4) 对于剩余未被分配的子载波,按照系统容量最大化进行分配,根据 $(k^*, m^*) = \arg \max_{k \in \Omega_K, m \in \Omega_M} G_{BS,k,m}^n$ 为用户集合,分别找到对应于该剩余子载波 n 最大的用户 m^* 和中继 k^* ,将子载波 n 分配给用户 m^* 。按照步骤继续执行,直到所有的子载波被分配完毕。

在完成中继和子载波的分配后,原优化问题式(13)中的离散二进制整数变量就可以消除,可以简化如下:

$$\begin{aligned} & \min \sum_{m=1}^M \sum_{k \in S_m} \sum_{n \in C_k} -\frac{B}{N} \log(1 + p_{BS,k,m}^n G_{BS,k,m}^n) \\ & \text{s.t.} \begin{cases} B1: \sum_{m=1}^M \sum_{k \in S_m} \sum_{n \in C_k} p_{BS,k,m}^n - P_T = 0 \\ B2: Q_m - \sum_{k \in S_m} \sum_{n \in C_k} \frac{B}{2N} \log(1 + p_{BS,k,m}^n G_{BS,k,m}^n) \leq 0, \forall m \\ B3: p_{BS,k,m}^n \geq 0, \forall k,m,n \end{cases} \end{aligned} \quad (14)$$

其中, S_m 为用户 m 分配的子载波传输时使用的中继集合, C_k 为中继 k 转发的子载波集合。可以看出,此时的优化问题已经转化为一个标准的凸优化功率分配问题,凸优化问题的最优解不但一定满足 Karush-Kuhn-Tucker (KKT) 条件,而且满足 KKT 条件的解也一定是最优解,因此通过该问题的 KKT 条件求得功率分配的最优解,原优化问题



的拉格朗日方程可以表示为:

$$L(p_{BS,k,m}^n, \lambda, \mu) = \sum_{m=1}^M \sum_{k \in S_m} \sum_{n \in C_k} -\frac{B}{2N} \ln(1 + p_{BS,k,m}^n G_{BS,k,m}^n) + \lambda \left(\sum_{m=1}^M \sum_{k \in S_m} \sum_{n \in C_k} p_{BS,k,m}^n - P_T \right) + \sum_{m=1}^M \mu_m \left(Q_m - \sum_{k \in S_m} \sum_{n \in C_k} \frac{B}{2N} \ln(1 + p_{BS,k,m}^n G_{BS,k,m}^n) \right) \quad (15)$$

KKT 条件如下:

$$\frac{\partial L}{\partial p_{BS,k,m}^n} = -\frac{B}{2N \ln 2} (1 + \mu_m) \frac{G_{BS,k,m}^n}{1 + p_{BS,k,m}^n G_{BS,k,m}^n} + \lambda = 0 \quad (16)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{k \in S_m} \sum_{n \in C_k} p_{BS,k,m}^n - P_T = 0 \quad (17)$$

$$\mu_m (Q_m - \sum_{k \in S_m} \sum_{n \in C_k} \frac{B}{2N} \ln(1 + p_{BS,k,m}^n G_{BS,k,m}^n)) = 0 \quad (18)$$

$$Q_m - \sum_{k \in S_m} \sum_{n \in C_k} \frac{B}{2N} \ln(1 + p_{BS,k,m}^n G_{BS,k,m}^n) \leq 0 \quad (19)$$

由式(18)和式(19)可得:

$$\begin{cases} \mu_m = 0, Q_m - \sum_{k \in S_m} \sum_{n \in C_k} \frac{B}{2N} \ln(1 + p_{BS,k,m}^n G_{BS,k,m}^n) < 0 & (20a) \\ \mu_m > 0, Q_m - \sum_{k \in S_m} \sum_{n \in C_k} \frac{B}{2N} \ln(1 + p_{BS,k,m}^n G_{BS,k,m}^n) = 0 & (20b) \end{cases}$$

在满足每个用户速率要求的前提下, 取 $\mu_m=0$ 代入式(16), 可以得到:

$$p_{BS,k,m}^n = \frac{B}{2N \ln 2 \cdot \lambda} - \frac{1}{G_{BS,k,m}^n} \quad (21)$$

对于式(20b), 将其代回式(15), 通过对 $p_{BS,k,m}^n$ 求导并令其等于 0, 得到:

$$p_{BS,k,m}^n = \frac{B}{2N \ln 2 \cdot \lambda} - \frac{1}{G_{BS,k,m}^n} \quad (22)$$

式(22)中得到的为取最大值时的功率分配。根据限制条件 B3, 得到用户 m 通过中继 k 在子载波 n 上传输时的功率分配为:

$$p_{BS,k,m}^{n*} = \left[\frac{B}{2N \ln 2 \cdot \lambda} - \frac{1}{G_{BS,k,m}^n} \right]^+ \quad (23)$$

其中同, $(x)^+ = \max(0, x)$, 当相应的子载波 n 上的等效信道增益较小时, 将有限的功率分配给更好的子信道能够获得更高的传输速率, 根据式(17)的总功率限制, 通过迭代便可以得到每个用户相应子载波上的分配功率^[12]。根据式(9)和式(12)可得到对应于基站和中继的功率分配。

可用式(24)表示分配方案的用户 QoS 满足程度, 如下:

$$E = \frac{\sum_{m=1}^M (C_m - Q_m)^2}{\sum_{m=1}^M Q_m^2} \quad (24)$$

其中, C_m 为每个用户获得的即时速率。E 越小, 说明用户的 QoS 满足程度越大。

如果对原优化问题进行联合求解以获得用户的中继选择和子载波及功率分配, 需要采用穷举搜索法, 其计算复杂度约为 $O(K^M)$, 当用户数或子载波数较大时, 其计算复杂度是相当大的。而本文方法的运算复杂度主要由 3 部分组成: 第 1 部分是计算等效信道增益, 其运算量为 $O(KMN)$; 第 2 部分为根据用户优先性进行中继选择和子载波分配, 其运算量约为 $O(KMN) + O(KN)$; 第 3 部分是功率分配, 其运算量约为 $O(N)$, 总的计算复杂度约为 $O(KMN) + O((K+1)N)$, 极大地降低了问题复杂度。

4 仿真结果与分析

为了验证本文提出的算法, 利用 MATLAB 对本文提出的方法进行仿真分析, 蒙特卡罗仿真次数为 1 000 次, 仿真信道采用六径瑞利衰落信道, 最大多普勒频移为 30 Hz, 中继数目为 4 个, 用户数目为 10 个, 系统总功率为 80 W, 系统总可用带宽为 5 MHz, 子载波个数为 256 个, 最大误比特率为 10^{-3} , 基站和中继处天线数目均为 2 个。从用户 QoS 和系统容量方面, 将本文方法与另外两种方法进行比较分析。仿真结果中, proposed 表示本文提出的子载波分配、中继选择和功率分配方法; static 表示等功率分配方案, 即为每个用户分配固定的子载波数目(即传统的 OFDM-FDMA), 按照就近原则进行中继选择; choptimal 表示基于信道最优分配方案, 根据信道增益选择最优的用户和中继, 采用参考文献[12]中的线性注水功率分配方案进行功率分配。

在信噪比为 20 dB 时, 3 种资源分配方法对应的每个用户的即时速率比较结果如图 1 所示。其中, $Q_{\min}$ 为每个用户的最低要求速率, E1、E2、E3 分别表示 proposed、static、choptimal 3 种方案的用户 QoS 满足程度。可以看出, 本文提出的资源分配方案可以很好地满足每个用户的最小速率要求, 而且 E 值最小, 说明能够最大程度地满足用户的 QoS 要求。另外两种方案只能满足部分低速率用户的速率要求。

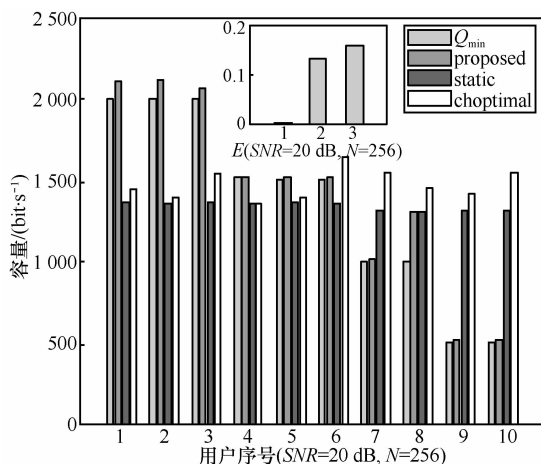


图1 不同用户对应的即时速率比较

在不同的信噪比(SNR)下,3种方法获得的系统容量的比较结果如图2所示。可以看出,由于不受用户速率要求的限制,choptimal方法基于最优信道进行分配,能够获得最大的系统容量;而static方法由于不能根据用户信道增益自适应调整用户的子载波数量和分配方案,系统容量最低;本文方法的系统容量虽然在一定程度上稍有损失,但却达到了最好的用户QoS要求。

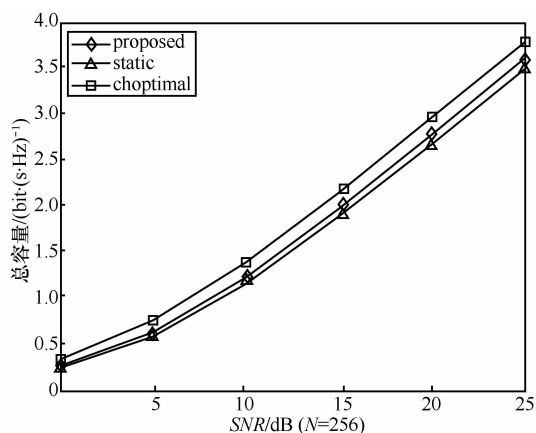


图2 不同信噪比下系统容量比较

图3反映了基站—中继不同天线数目下系统容量随SNR的变化趋势。可以看出,随着基站—中继天线数目的增加,空间传输的自由度增大,系统获得的分集复用增益相应增大,系统容量也相应有所提高。这充分体现了MIMO技术对于提高系统吞吐量、保证系统高速数据传输起到的重要作用。

5 结束语

本文提出了一种基于用户QoS的MIMO中继资源分配方法。该方法在基于速率最大化准则下的资源分配问题

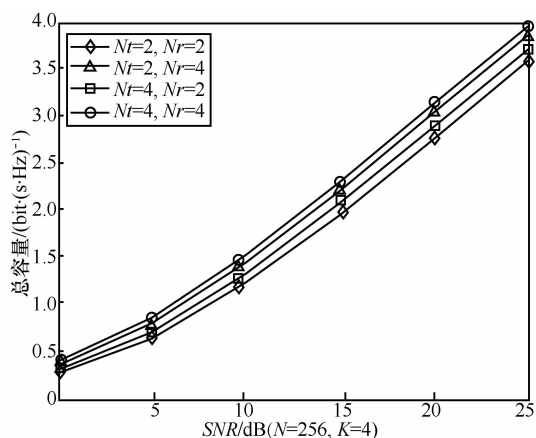


图3 不同数目基站—中继天线对下系统容量比较

中引入了用户最低要求速率的限制条件,根据该限制条件设定用户的选择优先性因子,并且在每个可用于载波的分配过程中都会自适应地调整用户的选择优先性因子的值,从而能够保证不同业务用户的不同传输速率要求;在满足用户的最低要求速率的前提下,剩余的可用于载波倾向于分配给能够使总系统容量提高最大的用户,从而提高了整个MIMO中继系统的频谱效率,避免了频谱资源的浪费。MIMO技术和协作中继技术相结合是适应未来通信系统大容量、高速率发展的重要方式,相信未来对这两种技术结合下的关键问题的研究会更加深入。

参考文献

- 1 Chang T S, Feng K T, Lin J S, *et al.* Green resource allocation for MIMO-OFDM relay networks. *Proceedings of Wireless Communications and Networking Conference*, Paris, France, 2012: 1386~1391
- 2 Telatar E. Capacity of multi-antenna Gaussian channels. *European Transactions on Telecommunications*, 1999(10): 585~595
- 3 Zhang Y J A, Letaief K B. An efficient resource allocation scheme for spatial multiuser access in MIMO/OFDM systems. *IEEE Transactions on Communications*, 2005, 53(1): 107~116
- 4 Qiu X X, Chawla K. On the performance of adaptive modulation in cellular systems. *IEEE Transactions on Communications*, 1999, 47(6): 884~895
- 5 Wang Y, Qu X C, Wu T, *et al.* Power allocation and subcarrier pairing algorithm for regenerative OFDM relay system. *Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference*, Baltimore, MD, USA, 2007: 2727~2731
- 6 Hsu C N, Su H J, Lin P H. Joint subcarrier pairing and power allocation for OFDM transmission with decode-and-forward relaying



IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(1): 399~414

- 7 Zhang H, Lin Y, Tao M X. Resource allocation with subcarrier pairing in OFDM two-way relay networks. IEEE Wireless Communications Letters, 2012, 1(2): 61~64
- 8 Alam M S, Mark J W, Shen X M. Relay selection and resource allocation for multi-user cooperative OFDMA networks. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(5): 2193~2205
- 9 Li T, Yu H, Liu S. Adaptive power allocation for decode-and-forward MIMO-OFDM relay system. Proceedings of 5th International Conference on Wireless Communications, Beijing, China, 2009: 1~4
- 10 Zu L J, Ji Y S, Wang L P, *et al.* Joint optimization in multi-user MIMO-OFDMA relay-enhanced cellular networks. Proceedings of Wireless Communications and Networking Conference, Istanbul, Turkey, 2011: 13~18
- 11 Lin Y B, Wu W H, Su Y T. Optimal and suboptimal resource allocation for multi-hop MIMO-OFDMA networks. Proceedings of Personal Indoor and Mobile Radio Communications, Sydney, Australia, 2012: 502~506
- 12 张冬梅, 徐友云, 蔡跃明. OFDMA 系统中线性注水功率分配算法. 电子与信息学报, 2007, 29(6): 1286~1289
Zhang D M, Xu Y Y, Cai Y M. Linear water-filling power allocation in OFDMA system. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(6): 1286~1289

2015088-6

(上接 2015048-8)

- 5 Carroll T E, Grosu D. Incentive-compatible online scheduling of malleable parallel jobs with individual deadlines. Proceedings of the 39th International Conference on Parallel Processing, San Diego, CA, USA, 2011: 418~425
- 6 师雪霖, 徐格. 云虚拟机资源分配的效用最大化模型. 计算机学报, 2013, 36(2): 252~262
Shi X L, Xu K. Utility maximization model of virtual machine scheduling in cloud environment. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(2): 252~262
- 7 罗贺, 孙锦波, 胡笑旋等. 云商务环境下的多源信息服务资源分配模型. 计算机集成制造系统, 2013, 19(10): 137~142
Luo H, Sun J B, Hu X X, *et al.* Resource allocation model for multi-sources information service in cloud business. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19(10): 137~142
- 8 Zaman S, Grosu D. Combinatorial auction-based dynamic vm provisioning and allocation in clouds. Proceedings of IEEE 3rd International Conference on Cloud Computing Technology and Science (CloudCom), Athens, Greece, 2011: 107~114
- 9 Zaman S, Grosu D. A combinatorial auction-based mechanism for

[作者简介]



郭涛,男,宁波大学通信技术研究所以硕士生,主要研究方向为中继通信系统中的资源分配等。



李有明,男,宁波大学通信技术研究所以教授,主要研究方向为无线和有线宽带通信技术,包括干扰抑制、动态资源分配、MIMO-OFDM、协作中继等。

雷鹏,男,宁波大学通信技术研究所以硕士生,主要研究方向为认知无线电中的频谱感知与资源分配等。

季彪,男,宁波大学通信技术研究所以硕士生,主要研究方向为水声通信中的多普勒补偿技术等。

李程程,男,宁波大学通信技术研究所以硕士生,主要研究方向为水声通信信道估计等。

dynamic VM provisioning and allocation in clouds. IEEE Transactions on Cloud Computing, 2013,1(2): 129~141

- 10 Mu'alem A, Nisan N. Truthful approximation mechanisms for restricted combinatorial auctions. Proceedings of the 18th National Conference on Artificial Intelligence, Edmonton, Alberta, Canada, 2002: 379~384
- 11 Lublin U, Feitelson D G. The workload on parallel supercomputers: modeling the characteristics of rigid jobs. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2003, 63(11): 1105~1122

[作者简介]



张丽敏,女,西安外事学院现代教育技术中心讲师,主要研究方向为云计算、网络安全、计算机仿真。

2015048-9