



基于子载波配对的多用户协作中继系统资源分配算法^{*}

陈 斌,李有明,郭 涛,雷 鹏,刘小青

(宁波大学通信技术研究 所 宁波 315211)

摘 要:针对多用户协作中继系统中的功率最小化问题,提出了一种基于联合子载波配对及分配的资源分配算法。首先根据不同用户的目标速率要求及平均信道增益进行子载波数目的分配;然后以信道条件最佳为准则,提出了一种联合子载波配对及分配的多用户迭代算法,以实现对每个用户的中继链路和直传链路分别进行子载波配对及虚拟配对;最后利用注水算法对子载波进行功率分配,从而保证各用户以最小功率进行传输。仿真结果表明,该算法在满足用户目标速率的情况下,能够进行有效的子载波配对及分配,从而最小化系统的发射功率。

关键词:多用户协作中继;功率最小化;联合子载波配对及分配;资源分配

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2014.06.011

A Resource Allocation Algorithm Based on Subcarrier Pairing in Multi-User Cooperative Relay Communication

Chen Bin, Li Youming, Guo Tao, Lei Peng, Liu Xiaoqing

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

Abstract:For the power minimization problem in multi-user cooperative relay communications, a resource allocation algorithm based on joint subcarrier pairing and assignment was proposed. Firstly, according to the average channel gain and the target rates of user, the assignment of subcarrier numbers was addressed. Then, in order to choose the subcarrier with best channel condition, a multi-user iterative algorithm for joint subcarrier pairing and assignment was proposed, which could achieve the subcarrier pairing in the cooperative transmissions and virtual pairing in the direct transmission, respectively. Finally, the power allocation was conducted by the water-filling algorithm, so that each user could use the minimum power for transmission. The simulation results indicate that the proposed algorithm can conduct subcarrier pairing and assignment effectively to minimize the total transmission power while meeting the users' target rate requirement.

Key words: multi-user cooperative relay communication, power minimization, joint subcarrier pairing and assignment, resource allocation

1 引言

随着无线多媒体业务的飞速发展,现有的无线通信系统已经无法满足人们的日常生活需求。作为下一代无线通

信系统的关键技术之一,协作通信技术备受关注^[1,2]。协作通信技术充分利用了无线媒质的广播特性,既可以提高系统传输速率及传输可靠性,同时还可以增加系统的覆盖范围及系统顽健性。因此,协作通信系统中如何进行有效的

^{*} 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),宁波市科技创新团队项目(No.2011B81002),宁波大学校级研究生科研创新基金资助项目(No.010-D00615138000)



资源分配成为无线通信领域的研究热点^[3-5]。

近年来,协作通信系统中的资源分配研究主要集中在速率最大化的 RA(rate adaptive)算法方面^[6-8]。参考文献[6]研究了多用户协作上行链路中的速率最大化问题,并通过松弛将功率分配问题转换为凸优化问题以求得次优解;参考文献[7]研究了在多天线上引入波束成形技术下的系统加权合速率最大化问题;参考文献[8]在不完备信道信息情况下,通过基于 Lloyd 算法的联合功率分配算法最大化系统瞬时速率。以上工作均致力于最大化系统容量,但在现实生活中移动终端设备的电量是非常有限的,因此有必要研究功率最小化的 MA(margin adaptive)问题^[9-12]。根据拉格朗日乘数法,参考文献[9]在满足用户 QoS(quality of service, 服务质量)要求的情况下最小化系统总功率。然而,该文献研究的是一般的协作模型,而参考文献[10]在第二时隙中增加了直传链路,提出了一种改进的协作模型,可以提高系统传输效率。参考文献[11]提出了一种最优功率控制方法,以权衡能量有效性及各用户间的公平性。但是,由于中继链路在两个时隙信道衰落相互独立、差异较大,而在上述文献中占用相同子载波进行传输,从而限制了系统性能。于是,针对该问题,人们提出了子载波配对技术。在参考文献[12]中,Wang T 等人将子载波配对问题转换为一个最优指派问题,并采用 Hungarian 算法进行了最优子载波配对。然而,该算法研究的是单用户系统,故不存在为各用户进行子载波分配问题,且其计算复杂度较大。在多用户系统中,子载波配对的难点在于,进行子载波配对的同时还需要考虑如何为不同用户进行有效的子载波分配。

因此,本文针对多用户协作中继系统,提出了一种基于联合子载波配对及分配的资源分配算法。根据等效信道增益将多用户协作中继模型转换为多用户直传链路模型后,首先根据不同用户目标速率要求及平均信道增益进行子载波数目的分配;然后以信道条件最佳为准则,提出了一种联合子载波配对及分配的多用户迭代算法,以实现每个用户的中继链路和直传链路分别进行子载波配对及虚拟配对;最后根据注水算法对子载波进行功率分配。仿真结果表明,本文算法在满足用户目标速率的情况下,能够进行有效的子载波配对及分配,从而显著降低系统的发射功率。

2 系统模型

假设一个多用户协作中继系统由源节点 S 、中继节点

R 和目的节点 D 3 种终端组成。其中,源节点中共有 K 个用户,中继节点中共有 L 个中继,目的节点为一个基站。假设所有节点间的信道都为瑞利衰落信道,并采用 OFDM(orthogonal frequency division multiple, 正交频分复用)调制技术,该系统总带宽为 B Hz,且被划分为 N 个子载波。在一般的协作中继传输模型中,中继策略为 DF(decode and forward, 译码转发)。传输过程可分为两个时隙:在第一时隙,源节点向中继节点和目的节点广播其信号,中继节点和目的节点进行接收并分别独立解码;在第二时隙,中继节点将解码后的信号转发至目的节点,目的节点采用 MRC(maximum ratio combining, 最大比合并)接收并解码经中继节点转发的信号。但在实际情况中,中继节点在第二时隙并未占用所有的子载波或者其所占用的某些子载波并不利于信号传输,从而导致这些相应的子载波处于空闲状态。这些情况便造成了频谱资源的浪费,为此本文考虑在第二时隙中,当某些子载波处于空闲状态时,源节点可以占用这些子载波发射新的信号,即在第二时隙中增加了直传链路(如图 1 所示),如此便可充分利用频谱资源,并有效提高系统传输效率。

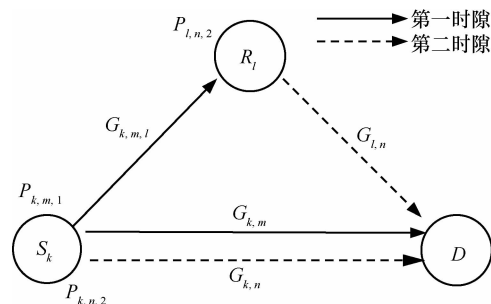


图 1 多用户协作中继系统改进模型

假设 $p_{k,m,1}$ 表示第一时隙中用户 k 在子载波上的发射功率; $p_{k,n,2}$ 、 $p_{l,n,2}$ 分别表示第二时隙中用户 k 和中继 l 在子载波 n 上的发射功率。第一时隙中用户 k 到中继 l 和基站在子载波 m 上的信道增益分别为 $G_{k,m,l}$ 、 $G_{k,m}$;第二时隙中用户 k 和中继 l 到基站在子载波 n 上的信道增益分别为 $G_{k,n}$ 、 $G_{l,n}$ 。此外,定义用户 k 的目标速率为 R_k bit/(s·Hz)。由于两个时隙的信道衰落相互独立,从而导致其信道增益可能相差较大,那么在两个时隙中选择相同的子载波便会限制系统性能。因此,本文考虑在中继链路上两个时隙的子载波 m 和 n 可以不相同,这便涉及子载波配对问题。

若用户 k 所占子载波集合为 Ω_k , 且 $\Omega_k = \Omega_k^D + \Omega_k^R$ ($i=1,2$), 其中 Ω_k^D 、 Ω_k^R 分别表示第 i 时隙用户 k 在直传链路

和中继链路上的子载波集。根据参考文献[10],第二时隙中子载波集 $\Omega_k^{D_2}, \Omega_k^{R_2}$ 需满足以下条件:

$$\begin{aligned}\Omega_k^{D_2} &= \{n | \min\{G_{k,l,m}, G_{l,n}\} \leq G_{k,m}\} \\ \Omega_k^{R_2} &= \{n | \min\{G_{k,l,m}, G_{l,n}\} > G_{k,m}\}\end{aligned}\quad (1)$$

与此同时,引入子载波配对因子 $\alpha_{m,n}^{R_k} \in \{0,1\}$ 及虚拟子载波配对因子 $\alpha_{m,n}^{D_k} \in \{0,1\}$ 。若子载波 $m \in \Omega_k^{D_1}$ 与子载波 $n \in \Omega_k^{R_1}$ 进行配对,则 $\alpha_{m,n}^{R_k}=1$ 且 $\alpha_{m,n}^{D_k}=0$;反之,若子载波 $m \in \Omega_k^{D_1}$ 与子载波 $n \in \Omega_k^{R_2}$ 进行虚拟配对,则 $\alpha_{m,n}^{D_k}=1$ 且 $\alpha_{m,n}^{R_k}=0$ 。只要第一时隙中子载波 m 与第二时隙中子载波 n 进行了配对,便记为子载波对 (m,n) 。

因此,用户 k 在子载波对 (m,n) 上的速率 $r_{m,n}^k$ 可表示为:

$$r_{m,n}^k = \begin{cases} \text{lb}(1 + P_{k,m,1}G_{k,m}) + \text{lb}(1 + P_{k,n,2}G_{k,n}), & \alpha_{m,n}^{D_k} = 1 \\ \min\{\text{lb}(1 + P_{k,m,1}G_{k,l,m}), \text{lb}(1 + P_{k,m,1}G_{k,m} + P_{l,n,2}G_{l,n})\}, & \alpha_{m,n}^{R_k} = 1 \end{cases}\quad (2)$$

综上所述,本文多用户协作中继系统的功率最小化优化问题可表示为:

$$\begin{aligned}\min & \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \left\{ (\alpha_{m,n}^{D_k} + \alpha_{m,n}^{R_k}) P_{k,m,1} + \alpha_{m,n}^{D_k} P_{k,n,2} + \sum_{l=1}^L \alpha_{m,n}^{R_k} P_{l,n,2} \right\} \\ \text{s.t. } & C1: \alpha_{m,n}^{D_k}, \alpha_{m,n}^{R_k} \in \{0,1\}, \forall k, m, n; \\ & C2: \sum_{m=1}^N (\alpha_{m,n}^{D_k} + \alpha_{m,n}^{R_k}) = 1, \forall k, n; \sum_{n=1}^N (\alpha_{m,n}^{D_k} + \alpha_{m,n}^{R_k}) = 1, \forall k, m; \\ & C3: P_{k,m,1} \geq 0, P_{k,n,2} \geq 0, P_{l,n,2} \geq 0, \forall k, m, n; \\ & C4: \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N r_{m,n}^k \geq R_k, \forall k\end{aligned}\quad (3)$$

其中,C2保证了两个时隙中每个子载波只能与唯一的一个子载波进行配对;C3表示发射功率 $p_{k,m,1}, p_{k,n,2}$ 和 $p_{l,n,2}$ 都是非负的;C4保证了每个用户必须满足其目标速率要求,反映了各种无线通信业务对速率的不同要求。

3 资源分配算法实现

式(3)所示的优化问题是一个混合整数优化问题,要获得最优解需要很高的复杂度。因此,为了降低计算复杂度,本文先根据等效信道增益,将中继链路转换为虚拟直传链路,从而将图1所示多用户协作中继模型转换为多用户直传链路模型。在此基础上,本文采用分步的方式,依次进行子载波数目分配、子载波配对及分配和功率分配。

在进行资源分配之前,先考虑如何处理模型中的中继

链路,即 $\alpha_{m,n}^{R_k}=1$ 时。从式(2)中可以看出,若要最大化用户 k 在中继链路上的速率 $r_{m,n}^k$,则需满足以下条件:

$$P_{k,m,1}G_{k,l,m} = P_{k,m,1}G_{k,m} + P_{l,n,2}G_{l,n}\quad (4)$$

从式(4)可以得到:

$$P_{k,m,1} = \frac{G_{l,n}}{G_{k,l,m} - G_{k,m}} P_{l,n,2}\quad (5)$$

另一方面,假设用户 k 及中继 l 在子载波对 (m,n) 上消耗的总功率为 $P_{m,n}^{k,l} = P_{k,m,1} + P_{l,n,2}$,将式(5)代入该等式得:

$$P_{m,n}^{k,l} = \left(1 + \frac{G_{l,n}}{G_{k,l,m} - G_{k,m}} \right) P_{l,n,2}\quad (6)$$

根据式(5)和式(6),速率 $r_{m,n}^k$ 可表示为:

$$r_{m,n}^k = \begin{cases} \text{lb}(1 + P_{k,m,1}G_{k,m}) + \text{lb}(1 + P_{k,n,2}G_{k,n}), & \alpha_{m,n}^{D_k} = 1 \\ \text{lb}\left(1 + \frac{G_{k,l,m}G_{l,n}}{G_{k,l,m} - G_{k,m} + G_{l,n}} P_{m,n}^{k,l}\right), & \alpha_{m,n}^{R_k} = 1 \end{cases}\quad (7)$$

从式(7)可以看出,当 $\alpha_{m,n}^{R_k}=1$ 时,用户 k 及中继 l 在子载波对 (m,n) 上的等效信道增益可表示为:

$$G_{m,n}^{k,l} = \frac{G_{k,l,m}G_{l,n}}{G_{k,l,m} - G_{k,m} + G_{l,n}}\quad (8)$$

于是,根据等效信道增益,本文将中继链路转换为虚拟直传链路,以便接下来进行资源分配。

3.1 子载波数目分配

由于中继链路第一时隙在各子载波上的信道增益(如 $G_{k,l,m}$)是一个三维变量,而其他链路每个时隙在各子载波上的信道增益都是二维变量,自由度较低。因此,以信道条件最佳为准则,在中继链路上进行中继选择,满足 $l^* = \arg \max_{1 \leq l \leq L} G_{k,l,m}$,从而降低中继链路第一时隙在各子载波上信道增益的自由度。

在此基础上,根据用户目标速率要求及该系统OFDM调制允许的最大调制比特数 M ,进行子载波数目的初步分配:

$$m_k = \left\lceil \frac{R_k}{M} \right\rceil\quad (9)$$

其中, $\lceil \cdot \rceil$ 为向上取整运算。

然后,根据平均信道增益 H_k ,运用功率最小化准则,计算每个用户增加一个子载波需要的额外功率:

$$\Delta p_k = \frac{m_k + 1}{H_k} (2^{\frac{R_k}{m_k + 1}} - 1) - \frac{m_k}{H_k} (2^{\frac{R_k}{m_k}} - 1)\quad (10)$$

寻找用户 k^* ,使得 $k^* = \arg \max_{1 \leq k \leq K} \Delta p_k$,则 $m_k^* = m_k + 1$,从而完成子载波数目的再分配。



最后,得到每个用户分配的子载波数目分别为 $\{m_k, k=1, 2, \dots, K\}$ 。

3.2 子载波配对及分配

由于本文针对的是多用户协作中继系统,因此在进行子载波配对的同时,还需要考虑子载波分配问题。为此,提出了一种联合子载波配对及分配的迭代算法。首先,进行中继链路上的子载波配对及分配;其次,进行直传链路上的子载波分配。

在该算法中,首先根据式(1),判断用户 k 能否进行子载波配对。对于中继链路上第一时隙的每个子载波 m ,以信道条件最佳为准则,在第二时隙中选出最优配对子载波 $n^*(n^* = \arg \max_{1 \leq n \leq N} G_{k,m,n}^{k,l})$,从而确定一个子载波对 (m, n^*) 。在确定子载波对 (m, n^*) 后,应判断子载波 m 和 n^* 是否相同,若相同,则表示为用户 k 只分配了1个子载波,否则表示为用户 k 分配了两个子载波。如此循环,便可以为每个用户选择出所有的子载波对,但在这期间必须保证每个子载波只能与唯一的1个子载波进行配对。在完成子载波配对的同时,也为用户进行了初步的子载波分配。由于用户在两个时隙中所占用的子载波集必然相同,因此,确定子载波配对后可以知道子载波 m 将会出现在该用户第二时隙直传链路上,同理,子载波 n^* 也将出现在该用户第一时隙直传链路上。接下来,只需考虑两个时隙中都在直传链路上的子载波。首先确定各用户仍需分配的子载波数目,然后剔除已参加配对的子载波,并采用子载波选择用户的形式,进行剩余子载波的分配及虚拟配对,从而有效避免1个子载波分配给多个用户,且大大提高了算法检索效率。最后,便可确定各用户所占用的子载波集。

综上所述,可得联合子载波配对及分配迭代算法具体描述如下。

(1) 初始化: $\Omega = \{1, 2, \dots, N\}, \Omega_k^D = \emptyset, \Omega_k^R = \emptyset (i=1, 2), c_k=0, n_k=0$ 。

(2) 根据式(1),判断用户 k 能否进行子载波配对,若能,执行(3),否则执行(5)。

(3) 对于每个子载波 $m \{m \in \Omega\}$,确定子载波对 (m, n^*) ,其中 $n^* = \arg \max_{1 \leq n \leq N} G_{k,m,n}^{k,l}$ 。然后更新 $\Omega_k^{R1} = \Omega_k^{R1} + \{m\}, \Omega_k^{R2} = \Omega_k^{R2} + \{n^*\}$ 。

(4) 若 $m=n^*$,则 $c_k=c_k+1$,否则 $c_k=c_k+2$,且 $\Omega_k^D = \Omega_k^D + \{n^*\}, \Omega_k^D = \Omega_k^D + \{m\}$;若 $c_k < m_k$,则返回(3),否则执行(5)。

(5) $n_k = m_k - c_k$ 且更新 $\Omega = \Omega - \Omega_k^D - \Omega_k^{R1}$ 。

(6) 对于每个子载波 $m \{m \in \Omega\}, k^* = \arg \max_{1 \leq k \leq K} G_{k,m}$,然后

更新 $\Omega_k^{D1} = \Omega_k^{D1} + \{m\}, \Omega_k^{R2} = \Omega_k^{R2} + \{m\}$ 。

(7) 完成子载波配对及分配,确定子载波集合 $\Omega_k^{D1}, \Omega_k^{D2}, \Omega_k^{R1}, \Omega_k^{R2}$ 。

本文提出的联合子载波配对及分配迭代算法适用于多用户情况。该算法首先进行中继链路上的子载波配对及分配,在完成子载波配对的同时,也进行了初步的子载波分配;然后,在确定各用户仍需分配的子载波数目后,在直传链路上继续进行剩余子载波分配及虚拟配对。从图2可以清楚地看出,当 $K=3, N=32$ 时,两个时隙的子载波配对及分配情况(黑色表示子载波配对,白色表示虚拟子载波配对,圆圈标记用户1占用,星号标记用户2占用,方块标记用户3占用)。

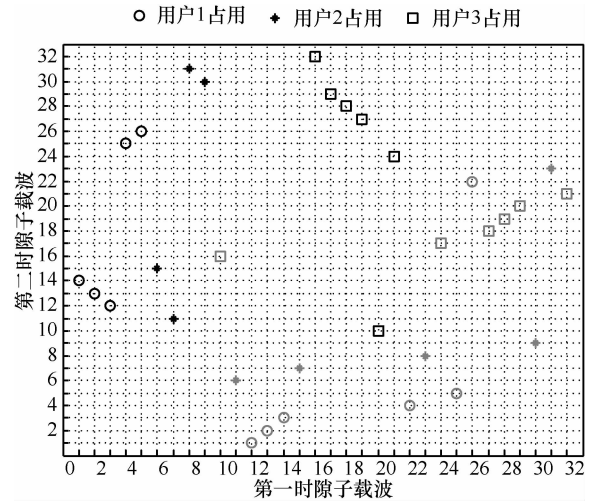


图2 $K=3, N=32$ 时,两个时隙的子载波配对及分配情况示例

3.3 功率分配

完成子载波配对及分配后,由于每个子载波上分配的功率可以不同,因此,接下来要进行子载波上的功率分配。本文运用功率最小化准则下的注水算法,进行功率分配,以保证系统总功率最小。

根据注水算法,在直传链路的子载波及中继链路的子载波对上进行功率分配:

$$p_m^k = \left[\lambda_k - \frac{\Gamma}{h_{k,m}} \right]^+ \text{ 或 } p_m^{k,l} = \left[\lambda_k - \frac{\Gamma}{h_{k,m}} \right]^+ \quad (11)$$

其中, $p_m^k, p_m^{k,l}$ 分别表示用户 k 在第 m 个子载波上的功率和用户 k 及中继 l 在第 m 个子载波对上的功率, λ_k 为注水线的值, Γ 为信噪比差额, $h_{k,m}$ 为第 m 个子载波或者子

载波对上的信道增益, $[x]^+ = \max\{x, 0\}$ 。

4 仿真结果及分析

通过 MATLAB 对本文提出的自适应资源分配算法进行仿真分析, 为了便于比较, 本文同时仿真了另外 3 种不同算法。

算法 1 先按照本文所提方法为各用户进行子载波数目分配, 然后按子载波顺序进行子载波分配, 从而将多用户系统转换为多个单用户系统, 最后按照参考文献[12]中的 Hungarian 算法进行子载波配对及功率分配。

算法 2 在本文所提的多用户协作中继系统改进模型上, 根据参考文献[11], 用户在中继链路上传输信息时, 两个时隙所占用的子载波相同, 即不考虑子载波配对问题, 然后以信道条件最佳为准则进行子载波分配及功率分配。

算法 3 在参考文献[9]所提的多用户协作中继系统一般模型上, 考虑子载波配对问题, 并按照本文所提出的基于子载波配对算法进行资源分配。

在该仿真环境中, 假设所有节点间信道都是相互独立的, 且每个信道选取 6 径频率选择性瑞利衰落信道, 最大多普勒频移为 30 Hz, 时延扩展为 50 μ s, 中继数为 3, 子载波个数为 256, 带宽为 1 MHz, 噪声功率为 -36 dB, 最大调制比特数为 4。为了获得比较稳定可靠的仿真结果, 该仿真结果经 1 000 次 Monte-Carlo 仿真取平均得到。

图 3 比较了不同用户数量下的系统总发射功率。为了反映各种无线通信业务对速率的不同需求, 每个用户的目标速率为 1~10 bit/(s·Hz) 的不同数值。从图中可以看出, 对于一个固定的用户数量, 采用本文算法的系统总发射功率消耗最小, 算法 1 次之, 算法 3 消耗最大; 而随着用户数

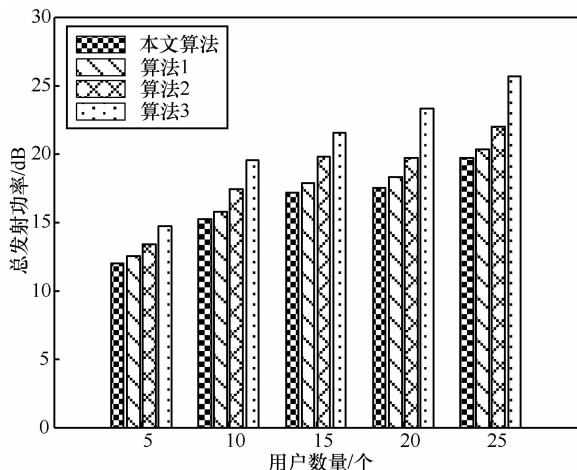


图3 不同用户数量下的总发射功率比较

量的不断增加, 各算法下的系统总发射功率消耗都呈上升趋势, 但是, 相对而言, 采用本文算法的系统总发射功率消耗增长幅度最小。因此, 图 3 表明在不同用户数量情况下, 本文算法都能获得最小的系统总发射功率。

图 4 比较了不同合目标速率下的系统总发射功率。该仿真过程中, 用户数量为 10, 在确定各用户合目标速率的条件下, 对各用户目标速率进行等速率分配。从图中可以看出, 对于一个固定的合目标速率, 采用本文算法的系统总发射功率消耗最小, 算法 1 次之, 算法 3 消耗最大; 而对于合目标速率的不断增长, 各算法下的系统总发射功率消耗都有所增加, 但是采用本文算法的总发射功率曲线始终位于最下方。因此, 图 4 表明在不同合目标速率情况下, 本文算法都可以获得最小的系统总发射功率。

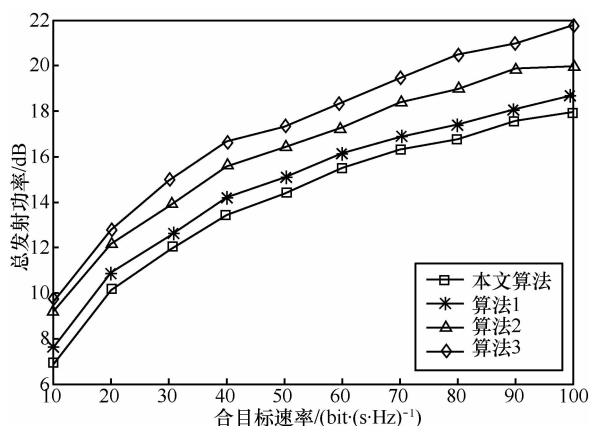


图4 不同合目标速率下的总发射功率比较

从图 3、图 4 中可以看出, 算法 1 性能与本文算法最接近。由于算法 1 只是简单地将单用户系统中的子载波配对算法扩展到多用户系统, 而未同时考虑为各用户进行子载波分配问题, 因此导致整个系统发射功率有所增加。算法 2 在中继链路上并未考虑子载波配对问题, 这样便会使得第一时隙中信道条件好的子载波匹配第二时隙中信道条件差的子载波, 从而整个系统需要消耗更多的能量。算法 3 在多用户协作中继系统一般模型上按照本文所提出的基于子载波配对算法进行资源分配。因此, 与算法 3 对比, 可以验证本文研究的多用户协作中继系统改进模型可以提高系统传输效率并降低总发射功率。

5 结束语

本文提出了一种多用户协作中继系统中基于联合子载波配对及分配的资源分配算法。该算法在根据等效信道

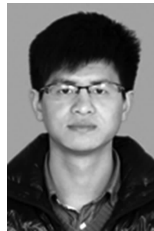


增益将多用户协作中继模型转换为多用户直传链路模型的基础上,将系统发射功率最小化问题分成3个步骤进行求解:首先根据不同用户目标速率要求及平均信道增益进行子载波数目的分配;然后以信道条件最佳为准则,提出了一种联合子载波配对及分配的迭代算法,从而实现对每个用户的中继链路和直传链路分别进行子载波配对及虚拟配对;最后根据注水算法对子载波进行功率分配。本文算法以较低的复杂度进行了有效的子载波配对及分配,实现了在满足用户目标速率情况下系统发射功率的最小化。

参考文献

- 1 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
- 2 Ng D W K, Lo E S, Schober R. Energy-efficient resource allocation in multi-cell OFDMA systems with limited backhaul capacity. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2012, 11(10): 3618~3631
- 3 Joung J, Sun S. Power efficient resource allocation for downlink OFDMA relay cellular networks. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2012, 60(5): 2447~2459
- 4 Thai Chan Dai Truyen, Popovski P, Sun F. Diversity-multiplexing trade-off for coordinated direct and relay schemes. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(7): 3289~3299
- 5 Zhang G P, Yang K, Chen H H. Resource allocation for wireless cooperative networks: a unified cooperative bargaining game theoretic framework. *IEEE Wireless Communications*, 2012, 19(2): 38~43
- 6 Wang T, Glineur F, Louveaux J, *et al.* Weighted sum rate maximization for downlink OFDMA with subcarrier-pair based opportunistic DF relaying. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2013, 61(10): 2512~2524
- 7 Sun F, de Carvalho E, Popovski P, *et al.* Coordinated direct and relay transmission with linear non-regenerative relay beamforming. *IEEE Signal Processing Letters*, 2012, 19(10): 680~683
- 8 Liu Y, Chen W. Limited-feedback-based adaptive power allocation and subcarrier pairing for OFDM DF relay networks with diversity. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2012, 61(6): 2559~2571
- 9 Vardhe K, Reynolds D, Woerner B D. Joint power allocation and relay selection for multiuser cooperative communication. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9(4): 1255~1260
- 10 Vandendorpe L, Louveaux J, Oguz O, *et al.* Improved OFDM transmission with DF relay and power allocation for a sum power constraint. *Proceedings of the 3rd International Symposium on Wireless Pervasive Computing*, Santorini, Greece, 2008: 665~669
- 11 Wang D, Wang X, Cai X D. Optimal power control for multi-user relay networks over fading channels. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(1): 199~207
- 12 Wang T, Fang Y, Vandendorpe L. Power minimization for OFDM transmission with subcarrier-pair based opportunistic DF relaying. *IEEE Communications Letters*, 2013, 17(3): 471~474

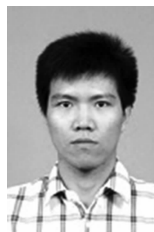
[作者简介]



陈斌,男,宁波大学硕士生,主要研究方向为多用户协作中继通信中的资源分配。



李有明,男,宁波大学通信技术研究教授,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、认识无线电等。



郭涛,男,宁波大学硕士生,主要研究方向为认知无线电中的资源分配。



雷鹏,男,宁波大学硕士生,主要研究方向为认知无线电中的频谱感知。

刘小青,男,宁波大学硕士生,主要研究方向为压缩感知技术及其应用。

(收稿日期:2014-03-14)