



基于多中继解码转发的 OFDM 系统资源分配算法

郭涛, 李有明, 李婷, 闫玉芝

(宁波大学通信技术研究, 浙江 宁波 315211)

摘要:针对 OFDM 解码转发中继系统中的速率最大化问题, 提出了一种基于多中继转发的资源分配算法。在该算法中, 同一子载波能够被多个中继转发, 并且在第二时隙, 基站能够利用未被中继占用的子载波传输额外信息。为了降低计算复杂度, 算法首先确定信息传输模式及中继模式下每个子载波的最优转发中继集合, 然后将原始优化问题转化为对偶问题求解, 实现了子载波配对与功率分配的联合优化。仿真结果表明, 所提算法能使系统获得更高的系统容量。

关键词: OFDM; 中继; 资源分配; 子载波配对

中图分类号: TN92

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016081

Resource allocation algorithm based on the multi-relay decoding-and-forwarding in OFDM system

GUO Tao, LI Youming, LI Ting, YAN Yuzhi

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

Abstract: For the rate maximization problem in OFDM decode-and-forward relay system, a resource allocation algorithm based on the multi-relay forwarding was proposed. In the algorithm, the same subcarrier could be forwarded by multiple relays, and the base station could use the subcarriers that are not occupied by relays to transmit new symbols in the second phase. To reduce the computational complexity, the information transmission mode and the optimal relay set that assisting the transmission under relay mode were determined first, then the original problem was transformed into a dual problem to achieve the joint optimization solution of subcarrier-pairing and power allocation. Simulation results show that the proposed algorithm can achieve a higher system capacity.

Key words: OFDM, relay, resource allocation, subcarrier pairing

1 引言

OFDM(orthogonal frequency division multiplexing)技术具有频谱利用率高、抗衰落能力强、资源分配灵活及传输

速率高等优点, 已经成为当前和未来移动通信的关键技术。同时, 中继技术作为 LTE-Advanced(以下简称 LTE-A)的关键技术, 能够保证通信系统的高覆盖率以及小区边缘用户的服务质量^[1,2]。在基于 OFDM 的中继通信系统中研究

收稿日期: 2015-08-29; 修回日期: 2016-02-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.61571250); 浙江省教育厅资助项目(No.Y201224625); 宁波市自然科学基金资助项目(No.2015A610121)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61201099), Scientific Research Fund of Zhejiang Provincial Education Department (No.Y201224625), Ningbo Natural Science Foundation(No.2015A610121)

资源分配问题主要涉及中继选择、子载波分配和功率分配,合理的资源分配算法能够有效提高系统资源的利用效率。因此,基于 OFDM 的中继通信系统资源分配问题得到了广泛关注。

中继的转发方式主要有放大转发 (AF)、解码转发 (DF) 和编码协作 (CC)。参考文献[3,4]分别针对 AF 协议下多中继—单用户和单中继—多用户系统中的中继选择、用户选择、子载波配对以及功率分配问题,通过对偶求解方法得到了联合资源分配问题的渐进最优解。AF 方式实现比较简单,但在放大信号的同时,也会放大噪声。因此,针对 DF 中继的研究得到了更加广泛的关注^[5-11]。

参考文献[5]中提出并证明了通过分别对源节点—中继节点、中继节点—目的节点的链路信道增益排序,将相同排名序号的子载波进行配对是最优的配对方案。然而这种最优配对是限定在没有直传链路的情形下的,即通信过程只有在中继转发下才能实现时,实际中许多情形并非如此。参考文献[6]中以最大化用户效用为目标,提出了一种基于多维离散粒子群优化的渐进最优资源分配算法,以多维离散粒子群算法实现子载波和中继分配,其最优解取决于粒子群规模与迭代次数,同时该算法没有考虑直传用户的影响。参考文献[4-6]都是基于传统型中继 (conventional relay) 资源分配问题的研究,即在第二时隙中继转发过程中,源节点保持静默,不继续传输信息。为了提高频谱的利用率,后来提出了改进型中继 (improved relay) 通信的概念,在第二时隙中继转发过程中,源节点能够利用未被中继占用的空闲子载波继续向目的用户传输信息。参考文献[7,8]分别针对改进型中继模型下的点对点通信和多用户通信系统资源分配问题,提出了网络总功率限制条件下的中继选择、用户选择以及子载波配对的联合问题解决算法。

以上参考文献在选择转发中继时,都只考虑一个子载波/对只选择一个最优中继进行转发的情形,参考文献[9-12]的研究工作表明,在存在多个可用中继的情况下,一个子载波/对通过多个中继转发时能够充分利用空间分集提高系统容量。其中,参考文献[9,10]在资源分配问题中,没有考虑中继传输时前后两个时隙的子载波配对问题,即源节点和中继使用同一子载波进行信号传输,然而对于同一用户而言,某一子载波在第一时隙是最优的,在第二时隙却不一定是最优的。参考文献[11]和参考文献[12]分别提出了 AF 和 DF 模式下的多中继资源分配算法,研究中均通过柯西—施瓦兹不等式化简信号信噪比,并利用匈牙利算法实

现前后两个时隙的子载波配对,但是没有考虑第二时隙未被中继占用的空闲子载波的利用问题。参考文献[13]提出了一种多播网络中的协作公平子载波分配算法,以第一时隙直传用户作为传统中继,向没有接收到数据的用户转发数据,实现了多中继转发下的协作多播子载波分配和功率分配算法,但同样没有考虑第二时隙基站的静默时间和空闲子载波利用问题。

本文基于改进型中继系统和多中继转发资源分配问题的研究现状,考虑 OFDM 下行通信链路,提出了一种基于子载波配对的改进型多中继转发资源分配模型,并将直传—中继模式选择、中继选择、子载波配对以及功率分配问题联合考虑,提出了相应的资源分配问题算法。

2 系统模型与问题描述

2.1 系统模型

考虑基于 OFDM 的多中继通信下行链路,如图 1 所示,系统包含一个源节点 S、K 个中继节点 R、一个目的节点 D。假设可用带宽被分成 N 个子载波,所有的信道具有相同的带宽并且经历独立的频率选择性瑞利衰落,源节点可以获得完全的信道信息,并且在一次信息传输过程时间内信道状态不发生改变。系统工作在半双工模式,一次通信过程分成两个时隙完成。第一时隙, S 以广播形式向中继节点 R 和目的节点 D 发射信号;第二时隙, 中继通过 DF 信号到达目的节点, 在接收端采用最大比合并 (MRC) 方式接收信号。同时在第二时隙,当某些子载波没有被中继节点占用时,允许 S 继续利用这些子载波向 D 传输其他信息,从而提高频谱的利用率。如果第一时隙 S 发出的信号通过子载波 i 传到中继后,在子载波 j 上转发到目的节点,称 (i, j) 为一个子载波对。

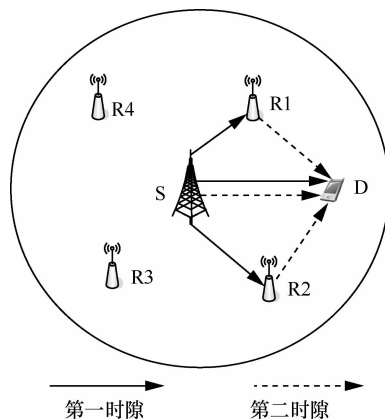


图 1 OFDM 多中继系统模型



定义 $h_{i,k}^{SR}$ 、 h_i^{SD} 、 $h_{j,k}^{RD}$ 分别表示 S-R(k)、S-D 链路在子载波 i 和 R(k)-D 链路在子载波 j 上的信道系数, $\sigma_{i,k}^{SR}$ 、 σ_i^{SD} 、 σ_j^{RD} 分别表示对应信道上的加性高斯白噪声功率, $p_i^{S,1}$ 、 $p_j^{S,2}$ 、 $p_j^{k,2}$ 分别表示第一时隙 S 在子载波 i , 第二时隙 S、R(k) 在子载波 j 上的发射功率, k 代表中继序号。此处, 与以往一个子载波对只选择一个最优中继进行转发不同的是, 允许一个子载波对通过多个中继进行转发, 从而增加了空域自由度, 能够获得更大的分集增益。因此, 多中继解码转发模式下子载波对 (i, j) 的速率可以表示为^[7]:

$$R_{(m,n)} = \begin{cases} \frac{1}{2} \log(1 + \gamma_i^{SD,1}) + \frac{1}{2} \log(1 + \gamma_j^{SD,2}), & \text{直接传输} \\ \frac{1}{2} \min\{\log(1 + \gamma_{i,\varphi}^{SR}), \log(1 + \gamma_i^{SD,1} + \gamma_j^{RD})\}, & \text{中继传输} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\gamma_i^{SD,1} = \frac{p_i^{S,1} |h_i^{SD}|^2}{\sigma_i^{SD}}$ 、 $\gamma_j^{SD,2} = \frac{p_j^{S,2} |h_j^{SD}|^2}{\sigma_j^{SD}}$ 分别表示

直传时两个时隙的信噪比 (SNR), $\gamma_{i,\varphi}^{SR} = \frac{p_i^{S,1} |h_{i,\varphi}^{SR}|^2}{\sigma_{i,\varphi}^{SR}}$ 、

$\gamma_j^{RD} = \frac{(\sum_{k \in \Phi_{(i,j)}} \sqrt{p_j^{k,2}} |h_{j,k}^{RD}|)^2}{\sigma_j^{RD}}$ 分别表示中继传输时两个

时隙 R 和 D 接收信号的信噪比, $\Phi_{(i,j)}$ 表示对应于子载波对 (i, j) 的转发中继集合, φ 对应于这个集合中 $h_{i,\varphi}^{SR}$ 最小的中继序号。乘以 1/2 是因为一次传输需要两个时隙完成。

2.2 问题描述

为了便于得到每个中继转发时发送的功率, 利用柯西-施瓦兹不等式将 γ_j^{RD} 化简, 可以得到:

$$\gamma_j^{RD} \leq \frac{(\sum_{k \in \Phi_{(i,j)}} p_j^{k,2}) (\sum_{k \in \Phi_{(i,j)}} |h_{j,k}^{RD}|^2)}{\sigma_j^{RD}} \quad (2)$$

当且仅当:

$$\sqrt{p_j^{k,2}} = \mu |h_{j,k}^{RD}|, \forall k \in \Phi_{(i,j)} \quad (3)$$

成立时, 等号成立。

令 $\sum_{k \in \Phi_{(i,j)}} p_j^{k,2} = p_j^{R,2}$, 则 $p_j^{R,2}$ 表示第二时隙所有转发中继在子载波 j 上转发时的总功率。为了简化分析, 如参考文献[10,11]中处理, 令 $\sigma_{i,k}^{SR} = \sigma_i^{SD} = \sigma_j^{RD} = \sigma$ 。当子载波对 (i, j) 上的信息通过中继转发时, 为使速率最大, 需满足:

$$\gamma_{i,\varphi}^{SR} = \gamma_i^{SD,1} + \gamma_j^{RD} \quad (4)$$

令 $p_{(i,j)}^R = p_i^{S,1} + p_j^{R,2}$, 可以得到:

$$\alpha_{(i,j)}^R = \frac{|h_{i,\varphi}^{SR}|^2 \sum_{k \in \Phi_{(i,j)}} |h_{j,k}^{RD}|^2}{\sum_{k \in \Phi_{(i,j)}} |h_{j,k}^{RD}|^2 + |h_{i,\varphi}^{SR}|^2 - |h_i^{SD}|^2} \quad (5)$$

其中, $\alpha_{(i,j)}^R$ 是中继链路的等效信道增益。因此, 总功率限制条件下的资源分配问题可以描述为如下优化问题(P1):

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k \in \Phi_{(i,j)}} \frac{\rho_{(i,j)}}{2} \{ \phi_{(i,j)} \log(1 + \alpha_{(i,j)}^R p_{(i,j)}^R) + \\ & (1 - \phi_{(i,j)}) [\log(1 + \gamma_i^{SD,1}) + \log(1 + \gamma_j^{SD,2})] \} \\ \text{s.t.} \quad & \text{(A1)} \sum_{i=1}^N \rho_{(i,j)} = 1, \sum_{j=1}^N \rho_{(i,j)} = 1, \forall i, j \\ & \text{(A2)} \rho_{(i,j)} \in \{0, 1\}, \phi_{(i,j)} \in \{0, 1\}, \forall i, j \\ & \text{(A3)} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k \in \Phi_{(i,j)}} \rho_{(i,j)} [p_i^{S,1} + \phi_{(i,j)} p_{(i,j)}^R + \\ & (1 - \phi_{(i,j)}) p_j^{S,2}] \leq P \\ & \text{(A4)} p_i^{S,1}, p_{(i,j)}^R, p_j^{S,2} \geq 0 \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $\rho_{(i,j)}$ 是子载波配对因子, $\rho_{(i,j)}=1$ 表明子载波 i 与 j 配对, $\rho_{(i,j)}=0$ 则不配对; $\phi_{(i,j)}$ 是传输模式选择因子, $\phi_{(i,j)}=1$ 表明选择中继模式, $\phi_{(i,j)}=0$ 则表明选择直传模式。限制条件 A1 和 A2 表明一个子载波对只能与另一个子载波对配对以避免干扰, A3 是系统总功率限制, A4 是两个时隙源节点和中继节点的发送功率取值限定, i, j 表示不同的子载波序号。

3 资源联合分配算法

优化问题 P1 是一个离散整数优化问题, 通过穷举搜索得到离散变量最优解需要很高的计算复杂度, 因此, 本文采用一种次优的方法, 首先基于信道信息确定传输策略及中继传输时的转发中继集合, 然后通过对偶问题求解方法实现子载波配对及优化功率分配。

$$\text{令 } \alpha_i^{SD} = \frac{|h_i^{SD}|^2}{\sigma_i^{SD}}, \alpha_{i,k}^{SR} = \frac{|h_{i,k}^{SR}|^2}{\sigma_{i,k}^{SR}}, \alpha_j^{RD} = \frac{(\sum_{k \in \Phi_{(i,j)}} |h_{j,k}^{RD}|^2)}{\sigma_j^{RD}},$$

当满足式(7)时, 采用中继模式比直传模式能获得更高的系统容量^[14]:

$$\alpha_{i,k}^{SR} > \alpha_i^{SD} \quad \& \quad \alpha_j^{RD} > \alpha_i^{SD} \quad (7)$$

假设 $\alpha_{i,k}^{SR}$, $k \in \{1, 2, \dots, K\}$ 是关于 k 的增函数, 由前述 φ 是对应于集合 $\Phi_{(i,j)}$ 中 $h_{i,\varphi}^{SR}$ 最小的中继可知, α_j^{RD} 是关于 φ 的减函数

数。因此,当满足式(7)时,中继集合 $\Phi_{(i,j)} = \{\varphi, \varphi+1, \dots, K\}$,而最优的 φ 选择使得等效信道增益 $\alpha_{(i,j)}^R$ 最大的中继,即 $\varphi = \arg \max \alpha_{(i,j)}^R$ 。当信道条件不满足式(7)时,子载波对 (i,j) 采用直传方式。

确定了传输模式及转发中继集合后,通过对偶方法求解子载波配对问题及相应子载波上分配的功率^[15],优化问题P1的拉格朗日函数可以表示如下:

$$L(\rho, \phi, p, \lambda) = R - \lambda \left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k \in \Phi_{(i,j)}} \rho_{(i,j)} \left[\phi_{(i,j)} p_{(i,j)}^R + (1 - \phi_{(i,j)}) (p_j^{S,2} + p_i^{S,1}) \right] - P \right) \quad (8)$$

其中, R 表示P1中的目标函数, λ 是对应于约束条件A3的拉格朗日乘子。于是对偶目标函数为:

$$\begin{aligned} g(\lambda) &= \max L(\rho, \phi, p, \lambda) \\ \text{s.t. } &A1, A2, A4 \end{aligned} \quad (9)$$

对偶问题为:

$$\begin{aligned} \min g(\lambda) \\ \text{s.t. } \lambda \geq 0 \end{aligned} \quad (10)$$

对偶函数可以通过依次对单一变量取最优得到最优值,因此,式(8)分别对 $p_i^{S,1}$ 、 $p_{(i,j)}^R$ 、 $p_j^{S,2}$ 求导,并令其等于0,可以得到:

$$\begin{cases} p_i^{S,1*} = \rho_{(i,j)} (1 - \phi_{(i,j)}) \left[\frac{1}{2\lambda} - \frac{1}{\alpha_i^{SD}} \right]^+ \\ p_{(i,j)}^R = \rho_{(i,j)} \phi_{(i,j)} \left[\frac{1}{2\lambda} - \frac{1}{\alpha_{(i,j)}^R} \right]^+ \\ p_j^{S,2*} = \rho_{(i,j)} (1 - \phi_{(i,j)}) \left[\frac{1}{2\lambda} - \frac{1}{\alpha_j^{SD}} \right]^+ \end{cases} \quad (11)$$

其中, $(x)^+ = \max(0, x)$ 。类似于参考文献[8],定义不同子载波对 (i,j) 对于拉格朗日函数(8)的速率贡献,将式(11)代入式(8)得:

$$\begin{cases} L_{(i,j)} = \frac{1}{2} \lg(1 + p_i^{S,1*} \alpha_i^{SD}) + \frac{1}{2} \lg(1 + p_j^{S,2*} \alpha_j^{SD}) - \lambda (p_i^{S,1*} + p_j^{S,2*}), & \text{直接传输} \\ L_{(i,j)} = \frac{1}{2} \lg(1 + p_{(i,j)}^R \alpha_{(i,j)}^R) - \lambda p_{(i,j)}^R, & \text{中继传输} \end{cases} \quad (12)$$

定义一个 $N \times N$ 的矩阵:

$$L = \begin{bmatrix} L_{(1,1)} & \dots & L_{(1,N)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{(N,1)} & \dots & L_{(N,N)} \end{bmatrix} \quad (13)$$

从矩阵 L 中,每一行每一列选择一个数值使得所选数值相加最大,这是一个典型的二维指派问题,可以通过匈牙利算法得到最优解,也即实现子载波配对,其计算复杂度为 $O(N^3)$ 。当子载波配对确定后,相应的分配功率也可以由式(11)和式(3)获得。 λ 通过迭代搜索获得:

$$\lambda^{i+1} = \lambda^i - \beta^i \left\{ P - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k \in \Phi_{(i,j)}} \rho_{(i,j)} \left[\phi_{(i,j)} p_{(i,j)}^{R*} + (1 - \phi_{(i,j)}) (p_i^{S,1*} + p_j^{S,2*}) \right] \right\} \quad (14)$$

其中, i 代表迭代次数, β 代表迭代步长。每一次更新 λ ,功率分配按照式(11)更新,同时,子载波配对方案也会根据式(13)更新。当 $\lambda \geq 0$ 并且 $0 \leq P - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k \in \Phi_{(i,j)}} \rho_{(i,j)} \left[\phi_{(i,j)} p_{(i,j)}^{R*} + (1 - \phi_{(i,j)}) (p_i^{S,1*} + p_j^{S,2*}) \right] \leq \varepsilon$ 时停止迭代, ε 代表一个非常小的正数。

综上所述,本文所提联合资源分配算法具体描述如下。

(1)初始化: $L, \lambda, \Phi_{(i,j)}$ 。

(2)根据式(7)确定子载波对 (i,j) 选择中继模式还是直传模式。

(3)当选择中继模式时,根据等效信道增益确定子载波对 (i,j) 的最优转发中继集合。

(4)根据式(11)计算不同传输模式不同时隙相应子载波上的分配功率,根据式(13)计算 L ,并利用匈牙利算法得到最优配对方案。

(5)根据式(14)更新 λ ,判断是否满足迭代终止条件,若满足,迭代终止;若不满足,继续执行步骤(4)。

(6)根据不同链路的信道增益和分配功率计算系统容量。

本文所提算法的运算过程主要包括传输模式选择、中继选择、子载波配对与功率分配4部分,其中传输模式选择过程的运算量为 $O(KN^2)$,中继选择过程中计算等价信道增益时的运算量为 $O(kN^2)$, $1 \leq k \leq K$;子载波配对与功率分配过程中的主要运算量来自于利用匈牙利算法计算最优子载波配对,其为 $O(IN^3)$,其中, I 表示总的迭代次数。因此本文算法的复杂度为 $O(IN^3 + KN^2 + kN^2)$, $1 \leq k \leq K$,与参考文献[12]中的多中继转发模型算法的复杂度相同。相对于穷



举搜索算法的运算复杂度 $O(N! K^{N/2})$ 来说,当子载波个数 N 较大时,能够明显降低算法复杂度。

4 仿真结果及分析

本文通过计算机仿真验证了所提模型和算法的可行性及优越性,仿真时信道采用六径瑞利衰落信道,蒙特卡洛仿真次数为 1 000 次。为了便于比较,本文同时对另外 3 种模型的资源分配算法进行了仿真。在仿真图例中, IDF w/o SP 为参考文献[10]中提出的未进行子载波配对的改进型多中继模型的算法, conventional DF 为参考文献[12]中提出的传统型 DF 多中继转发模型的算法, single relay 为参考文献 [3] 中的单中继转发模型资源分配算法, proposed 为本文所提模型的算法。

图 2 给出了系统容量随总功率大小变化时的仿真曲线。其中,仿真取子载波数目 $N=16$, 中继数目 $K=4$, 噪声功率为 $\sigma=1$ dBm。可以看出,随着系统总功率的增加,每个子载波分配的功率增加,使得系统容量也会相应地增加。其中,单中继转发模型因其分集增益最小,系统容量最低, IDF w/o SP 方法和本文方法均采用改进型中继通信,提高了频谱利用率,因此系统容量均高于 conventional DF 方法,而本文方法由于利用信道差异实现了子载波配对,能够获得相对最高的系统容量。从图 2 可以看出,在信噪比为 10 dB 时,所提算法相对于另外 3 种算法系统容量分别提升 3.7%、7.7%、16.7%。

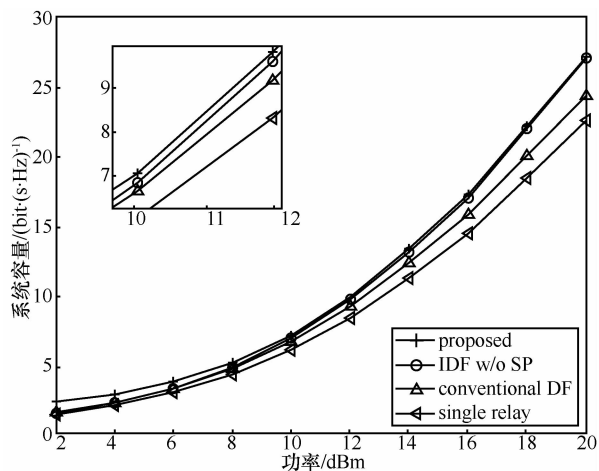


图 2 不同总功率时系统容量比较

图 3 给出了系统容量随中继数目大小变化时的仿真曲线。其中,本次仿真中取子载波数目 $N=16$, 系统总功率 $P=10$ dBm, 噪声功率 $\sigma=1$ dBm。可以看出,随着中继数目

的增加,空域自由度增大,系统中可用于转发源节点信息的中继数目也相应增加,从而使得空间分集增益增大,系统容量相应提升,而且本文提出的算法相对其他算法始终具有较优的性能。

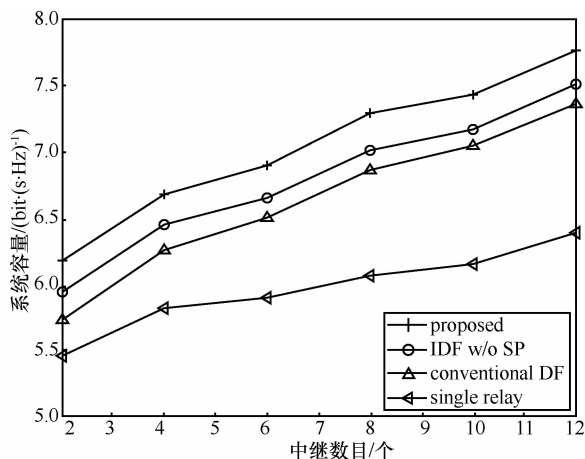


图 3 不同中继数目时系统容量比较

图 4 是系统容量随子载波数目变化时的仿真曲线。其中,仿真中取中继数目 $K=4$, 系统总功率 $P=10$ dBm, 噪声功率 $\sigma=1$ dBm。可以看出,随着子载波数目的增加,频率分集增益增大,同时子载波配对的自由度增加,系统容量相应提升,本文提出的算法在子载波数目变化时能够获得比其他方法更高的系统容量。

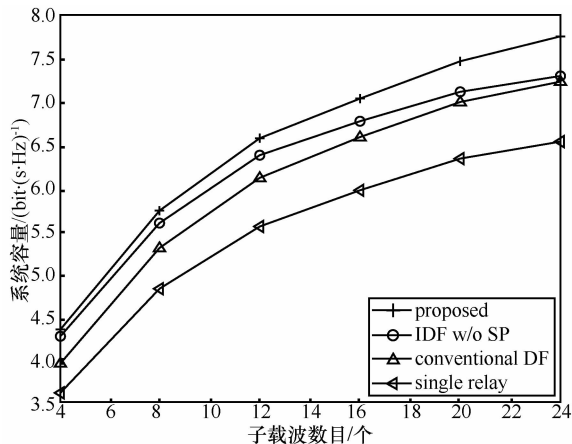


图 4 不同子载波数目时系统容量比较

5 结束语

本文提出了一种基于子载波配对的改进型多中继转发通信系统下行链路的资源分配算法。该算法以系统总功率限制条件下的容量最大化为目标,基于不同链路的信道信息确定了直传—中继模式选择及转发中继集合,同时将

子载波配对与功率分配问题联合优化。通过仿真表明,本文提出的算法能够使通信系统获得更高的系统容量。

参考文献:

- [1] NICHLAS L J, TSE D N. Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2004, 50(12): 3062-3080.
- [2] NOSRATINIA A, HUNTER T E, HEDAYAT A. Cooperative communication in wireless networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2004, 42(10): 74-80.
- [3] DANG W B, TAO M X, MU H, et al. Subcarrier-pair based resource allocation for cooperative multi-relay OFDM systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(5): 1640-1649.
- [4] SIDHU G A S, GAO F F, CHEN W, et al. A joint resource allocation scheme for multiuser two-way relay networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 2011, 59(11): 2970-2975.
- [5] WANG Y, QU X C, WU T, et al. Power allocation and subcarrier pairing algorithm for regenerative OFDM relay system [C]// IEEE Vehicular Technology Conference, April 22-25, 2007, Dublin, Ireland. New Jersey: IEEE Press, 2007: 2727-2731.
- [6] 李为,熊春林,王德刚,等. 基于多维离散粒子群优化的协同 OFDMA 系统跨层资源分配[J]. 通信学报, 2014, 35(4): 17-24.
LI W, XIONG C L, WANG D G, et al. Multi-values discrete particle swarm optimization for cross layer resource allocation in cooperative OFDMA systems [J]. Journal on Communications, 2014, 35(4): 17-24.
- [7] HSU C N, SU H J, LIN P H. Joint subcarrier pairing and power allocation for OFDM transmission with decode-and-forward relaying [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(1): 399-414.
- [8] IU Y, CHEN W. Adaptive resource allocation for improved DF aided downlink multi-user OFDM systems [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2012, 1(6): 557-560.
- [9] VANDENDORPE L, LOUVEAUX J, OGUZ O, et al. Rate-optimized power allocation for OFDM transmission with multiple DF/regenerative relays and an improved protocol [C]// IEEE Wireless Communications and Networking Conference, April 5-8, 2009, Budapest. New Jersey: IEEE Press, 2009: 1-6.
- [10] WANG T, VANDENDORPE L. WSR maximized resource allocation in multiple DF relays aided OFDMA downlink transmission [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(8): 3964-3976.
- [11] ZHOU Z K, ZHU Q. Joint optimization scheme for power allocation and subcarrier pairing in OFDM-based multi-relay networks [J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(6): 1039-1042.
- [12] LI X Y, ZHANG Q, ZHANG G C, et al. Joint resource allocation with subcarrier pairing in cooperative OFDM DF multi-relay networks [J]. IET Communications, 2014, 9(1): 78-87.
- [13] 陈雷,王洪玉,牛芳琳. 基于 OFDMA 的无线协作多播网络资源分配算法[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(9): 2129-2134.
CHEN L, WANG H Y, NIU F L. Resource allocation in OFDMA-based cooperative wireless multicast networks [J]. Systems Engineering and Electronics, 2015, 37(9): 2129-2134.
- [14] VANDENDORPE L, DURAN R T, LOUVEAUX J, et al. Power allocation for OFDM transmission with DF relaying [C]// IEEE International Conference on Communications, Nov 15, 2007, Delft: Netherland. New Jersey: IEEE Press, 2007: 1-6.
- [15] YU W, LUI R. Dual methods for non-convex spectrum optimization of multicarrier systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 2006, 54(7): 1310-1322.

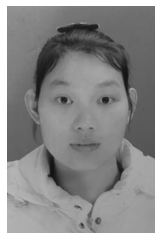
[作者简介]



郭涛(1990-),男,宁波大学硕士生,主要研究方向为中继通信系统中的资源分配。



李有明(1963-),男,宁波大学教授、博士生导师,主要研究方向为宽带通信、电力线通信、协作中继、认知无线电等。



李婷(1991-),女,宁波大学硕士生,主要研究方向为认知无线电系统的频谱检测与资源分配。



闫玉芝(1991-),男,宁波大学硕士生,主要研究方向为压缩感知技术、认知无线电频谱检测技术。