doi:10.11959/j.issn.1000-436x.2015078

# OFDM 中继系统中能效优化的资源联合分配算法

李云[1]，段海霞[1]，苏开荣[1]，曹傧[2]
(1. 重庆邮电大学 移动通信技术重庆市重点实验室，重庆 400065；
2. 电子科技大学 通信抗干扰国家级重点实验室，四川 成都 611731)

**摘 要**：在协作正交频分复用系统中，合理的资源分配对于提高系统性能具有重要的意义。针对中继、子载波和功率的联合分配，对最大化系统能效为目标的分配算法进行研究，提出了一个最低容量限制下的最大能效次优化资源联合分配算法(JRAA, joint resource allocation algorithm)。该算法使用冲突图表示系统资源冲突关系，根据冲突图的最大独立集结果进行资源分配。经过仿真验证，该资源分配算法实现了中继—子载波和功率的联合分配，在能效性能方面优于现有的算法。

**关键词**：资源分配；能效；最大加权独立集；冲突图；正交频分复用
**中图分类号**：TN915 **文献标识码**：A

# Resource assignments algorithm based on energy efficiency optimization in OFDM relay networks

LI Yun[1], DUAN Hai-xia[1], SU Kai-rong[1], CAO Bin[2]
(1.Chongqing Key Lab of Mobile Communications Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;
2.National Key Laboratory of Science and Technology on Communications, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

**Abstract:** In cooperative orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) systems, the resource allocation rationally is significant to enhance the system performance. Aiming at maximizing the total system energy efficiency, the joint assignment problem of relay, sub-carrier and power among users is modeled. Since the joint assignment issue subject to each user's maximal energy efficiency under minimal capacity constraints can be modeled as a NP-hard problem, a suboptimal algorithm is proposed to solve this problem. The proposed algorithm uses the conflict graph (CG) to denote the possible resource conflict relations. Then, the resource is assigned using maximal weight independent set (MWIS) algorithm. Numerical results demonstrate that the proposed algorithm (JRAA) can improve the system energy efficiency by joint assignment of relay,sub-carrier and power.

**Key words:** resource allocation; energy efficiency; maximum weight independent set; conflict graph; OFDM

## 1 引言

近年来，中继作为 LTE-A 系统的关键技术，能够为用户提供可靠服务，提高系统覆盖和系统容量。平坦衰落信道下的协作系统资源分配是诸多学者的研究对象，然而在未来的宽带无线传输系统中，信道却是具有宽带频率选择性的。正交频分复用技术(OFDM)能够有效地降低频率选择性衰落，它在频域上将总带宽分成多个正交的子载波，每个子载波的带宽足够小，从而避免了因频率选择性衰落带来的符号间干扰[1]。在宽带中继系统中结合 OFDM 传输技术研究资源分配，包括中继节点分配、子载波分配和功率分配，能进一步提高系统性能。中继与子载波分配是紧密耦合的，不同的中继分配结果

**收稿日期**：2013-12-25；**修回日期**：2014-03-07
**基金项目**：国家自然科学基金资助项目(61071118)；重庆市杰出青年科学基金资助项目(CQCSTC)；重庆邮电大学移动通信技术重庆市重点实验室基金资助项目(CSTC)
**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China(61071118); The Natural Science Foundation Project of CQCSTC; The Special Fund of Chongqing Key Laboratory (CSTC)

会带来不同的子载波分配，反之亦然[2]，不同的子载波上分配的功率也有所不同，因此 OFDM 中继系统资源联合分配是一个值得关注的问题。

文献[3~5]研究了在功率限制下为单用户进行子载波、中继和功率的联合优化分配算法。文献[6~12]研究了多用户多中继系统的资源分配问题。针对最大化总吞吐量为目标的资源分配问题，文献[6]提出了中继选择、子载波和功率分配子优化算法，该算法虽然复杂度低，但是源用户选择距离自己最近的用户作为中继，针对整个系统而言这样的中继选择方法并非全局最优。文献[7]在多用户多中继协作 OFDM 系统中提出最小化系统总功率为目标的中继分配和子载波联合分配方法，然而该系统假设移动终端与基站之间无直传链路，缺乏研究的合理性。文献[8]研究 LTE-A 网络上行最大容量的中继选择、子载波分配、功率分配优化机制，网络中用户可以选择直传模式或者协作模式与基站进行通信。文献[9]提出了以最小化总能耗为目标的自适应资源分配算法，该算法首先为所有用户选择最佳中继，然后选择传输功耗节省最大的子载波分配给对应的用户，但该算法将中继选择、子载波和功率分开进行分配。文献[10,11]提出了最小化总发送功率的三者联合分配方法。文献[12]基于网络流提出最小费用网络流(MCNF, minimum cost network flow)算法，该算法解决了最大系统吞吐量的子载波分配、中继选择和子载波分配的联合优化问题，同时考虑到了传输模式的选择，但是没有考虑网络负载对子载波分配的影响。

以上工作在节能资源分配方面缺少对容量和功率的综合考虑，往往只从系统容量最大化或者功率最小化单方面研究资源的联合分配问题，而且没有针对不同的系统负载分析用户子载波分配问题。因此，本文考虑 OFDM 两跳中继系统，针对最大化系统能效的资源联合分配问题，提出了一个次优化的资源联合分配算法。该算法采用最大权独立集(MWIS)方法解决用户资源冲突问题，最终获得中继、子载波和功率的次优化分配结果。

## 2　系统模型和问题描述

### 2.1　系统模型

考虑上行多用户 OFDM 解码转发中继系统，如图 1 所示。假设小区包括一个位于小区中心的基站，$m$ 个源用户，集合为 $M=\{1,2,\cdots,m\}$，$n$ 个空闲用户作为中继。系统总带宽被分为 $l$ 个正交子载波，集合为 $K=\{1,2,\cdots,l\}$，图 1 中用户之间连线上的数字表示子载波序号。由于协作传输在信道衰落基础上并不总是优于直接传输，假设直传用户集合 $M_1=\{d_1,d_2,\cdots,d_{m_1}\}$，协作用户集合 $M_2=\{1,2,\cdots,m_2\}$，此时 $m_1+m_2=m$。假设 $R_i$ 表示源 $i$ 的候选中继集合，则系统中继集合为 $R=\{R_1\cup R_2\cup\cdots\cup R_{m_2}\}$。

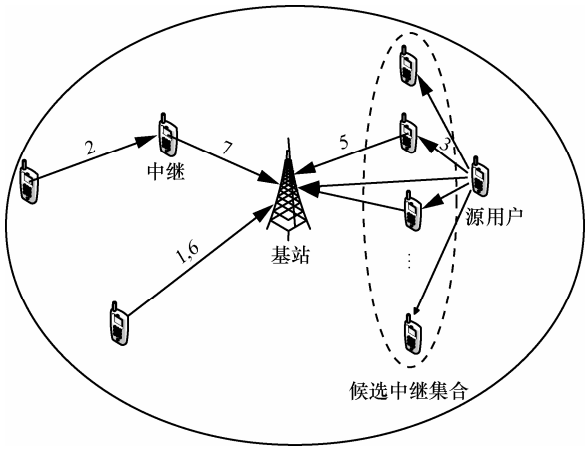



图 1　OFDM 中继系统模型

直传链路信道容量为

$$C=W\mathrm{lb}\left(1+\frac{P_i^k\left|h_{id}\right|^2}{n_1^2}\right) \tag{1}$$

解码转发模式下协作链路信道容量为

$$C=\frac{W}{2}\min\left\{\mathrm{lb}\left(1+\frac{P_i^k\left|h_{ij}^k\right|^2}{n_0^2}\right),\mathrm{lb}\left(1+\frac{P_i^k\left|h_{id}^k\right|^2+P_j^{k'}\left|h_{jd}^{k'}\right|^2}{n_1^2}\right)\right\} \tag{2}$$

其中，$W$ 是子载波带宽，$1/2$ 取决于通信模式下 2 个时隙各占用的时间，$k,k'$ 分别表示第一时隙和第二时隙子载波索引。$P_i^k,P_j^{k'}$ 分别表示源用户和中继的发送功率。$n_0^2$ 和 $n_1^2$ 分别表示中继和基站端的加性白高斯噪声(AWGN)，均服从正态分布。$\left|h_{id}^k\right|^2$、$\left|h_{ij}^k\right|^2$、$\left|h_{jd}^k\right|^2$ 分别是源与基站、源与中继、中继与基站之间在第 $k$ 个子载波上的信道增益，它们都是相互独立的零均值循环对称复高斯随机变量。假设系统中任意信道都是相互独立的频率选择瑞利衰落信道，基站可以获得完全信道状态信息。

### 2.2　问题描述

能效指标定义为单位发送功率的系统容量，即

$\eta = C/P$，其中，$C$表示信道容量，$P$表示发送功率。首先定义系统能效为

$$\eta = \sum_{x=1}^{m_1} \frac{C_{d_x}}{P_{d_x}} + \sum_{y=1}^{m_2} \frac{C_y}{(P_y + P_{r_y})} \tag{3}$$

其中，$C_{d_x}$表示第$x$个直传链路容量，$C_y$表示第$y$个协作链路容量。$P_{d_x}$表示第$x$个直传链路源用户发送功率，$P_y, P_{r_y}$分别表示第$y$个协作链路源用户和中继发送功率。

定义二元变量$x_i^{k,k'}$和$x_{i,j}^{k,k'}$。$x_i^{k,k'}=1$表示源$i$在子载波对$k$上直传；$x_{i,j}^{k,k'}=1$表示中继$j$在子载波对$(k,k')$上协助源$i$传输。由于每个子载波操作在直传模式或者协作模式，因此二元变量必须满足以下限制

$$\sum_{i\in M}\sum_{k'\in K} x_i^{k,k'} + \sum_{k'\in K}\sum_{i\in M}\sum_{j\in R} x_{i,j}^{k,k'} \leqslant 1, \quad \forall k \in K \tag{4}$$

$$\sum_{i\in M}\sum_{k\in K} x_i^{k,k'} + \sum_{k\in K}\sum_{i\in M}\sum_{j\in R} x_{i,j}^{k,k'} \leqslant 1, \quad \forall k' \in K \tag{5}$$

选择协作模式时，每个中继分配到至多一个源用户，每个源用户至多请求一个中继为其转发数据。因此，引入以下限制条件

$$\sum_{k\in K}\sum_{k'\in K}\sum_{i\in M} x_{i,j}^{k,k'} \leqslant 1, \quad \forall j \in R \tag{6}$$

$$\sum_{k\in K}\sum_{k'\in K}\sum_{j\in R} x_{i,j}^{k,k'} \leqslant 1, \quad \forall i \in M \tag{7}$$

本文的目标是设计出一种资源联合分配算法，找到用户最好的传输模式，以实现系统能效最大化。选择协作模式时，在保证信道容量请求基础上，需要考虑哪一个中继参加协作，该协作链路操作在哪一对子载波上以及在该子载波对上分别分配多少功率。直传模式时，同样需要考虑链路操作在哪一个子载波及该子载波上分配的功率。因此目标问题可以描述为如下约束条件的最大化问题P1。

目标函数P1：

$$\max \quad \eta = \sum_{k'\in K}\sum_{k\in K}\sum_{i\in M}\sum_{j\in R}\left(x_{i,j}^{k,k'}\eta_{(i,j)}^{k,k'} + x_i^{k,k'}\eta_{(i,d)}^{k,k'}\right)$$

约束条件：式(4)~式(7)

(a1) $0 < P_i^k \leqslant P_{\max},\ 0 < P_j^{k'} \leqslant P_{\max}$

(b1) $aP_i^k \geqslant \gamma,\ bP_i^k + cP_j^{k'} \geqslant \gamma$

(c1) $x_{i,j}^{k,k'} \in \{0,1\},\ i \in M, j \in R$

$x_i^{k,k'} \in \{0,1\},\ i \in M$

约束条件(a1)指所有源用户和中继的发送功率为正且不能超过最大发送功率$P_{\max}$，所有用户的最大发送功率受自身电池电量的限制；(b1)保证了协作链路最低信道容量$\gamma$，变量$a = \left|h_{ij}^k\right|^2 / n_0^2$，$b = \left|h_{id}^k\right|^2 / n_1^2$，$c = \left|h_{jd}^{k'}\right|^2 / n_1^2$；(c1) 表示如果中继$j$在子载波对$(k,k')$上协助源用户$i$传输数据则$x_{i,j}^{k,k'}=1$，否则$x_{i,j}^{k,k'}=0$；同理，如果源用户$i$在子载波对$(k,k')$上直传则$x_i^{k,k'}=1$，否则$x_i^{k,k'}=0$。目标函数中$\eta_{(i,j)}^{k,k'}$表示中继$j$在子载波对$(k,k')$上协助源用户$i$的协作链路能效，$\eta_{(i,d)}^{k,k'}$表示源用户$i$在子载波对$(k,k')$上的直传链路能效。

子载波配对在两跳通信系统中能够提高系统性能。但是系统高负载时，子载波配对在某种情况下不能保证每个用户都分配到子载波。例如假设系统中只有2个可分配子载波，2个用户请求数据传输。在相同的子载波对上传输数据，用户1可以比用户2获得更高的性能，如果分配此子载波对给用户1，则对用户2是不公平的。此时，2个时隙使用相同的子载波对，即$k=k'$，可以保证每个用户分配到子载波资源。

系统高负载时，目标问题描述为如下约束条件的最大化问题P2。

目标函数P2：

$$\max \quad \eta = \sum_{k\in K}\sum_{i\in M}\sum_{j\in R}\left(x_{i,j}^{k}\eta_{(i,j)}^{k} + x_i^{k}\eta_{(i,d)}^{k}\right)$$

约束条件：

(a2) $0 < P_i^k \leqslant P_{\max},\ 0 < P_j^k \leqslant P_{\max}$

(b2) $aP_i^k \geqslant \gamma,\ bP_i^k + cP_j^k \geqslant \gamma$

(c2) $x_{i,j}^{k} \in \{0,1\},\ i \in M, j \in R$

$x_i^{k} \in \{0,1\},\ i \in M$

(d2) $\sum_{i\in M} x_i^k + \sum_{i\in M}\sum_{j\in R} x_{i,j}^k \leqslant 1, \quad \forall k \in \mathrm{K}$

(e2) $\sum_{k\in K}\sum_{i\in M} x_{i,j}^k \leqslant 1, \quad \forall j \in R$

$\sum_{k\in K}\sum_{j\in R} x_{i,j}^k \leqslant 1,\ \forall i \in M$

## 3 资源联合分配算法

前面的最大化问题是一个非确定性多项式困难问题(NP-hard)。求解该问题的关键是找到变量$x_i^{k,k'}$和$x_{i,j}^{k,k'}$的值。通过穷举的方法求解该问题，时间复杂度会随着二元变量的增长成指数增长。本文

提出一个基于图论方法的次优化算法，在多项式时间内求解资源联合分配问题。

OFDM 中继系统中，根据现有信道估计方法得到各节点之间的信道增益，信道估计方法参考文献[13]。如果源用户—中继、中继—基站之间的信道质量均满足最低容量要求，则得到源 $i$ 的候选中继集合 $R_i$。依据子载波增益降序排列所有源 $i$ 和中继 $j$ 之间信道质量满足要求的子载波，构建第一时隙子载波降序集合 $\boldsymbol{K}_{i,j}$。同理得到第二时隙中继 $j$ 和基站之间的子载波降序集合 $\boldsymbol{K}'_{i,j}$，源 $i$ 直传链路第一时隙子载波降序集合 $\boldsymbol{K}_i$ 和第二时隙子载波降序集合 $\boldsymbol{K}'_i$。

系统低负载时，选择 $\boldsymbol{K}_{i,j}$ 中的第一位子载波配对 $\boldsymbol{K}'_{i,j}$ 中的第一位子载波，$\boldsymbol{K}_{i,j}$ 中的第二位子载波配对 $\boldsymbol{K}'_{i,j}$ 中的第二位子载波，以此类推。如果 $k\in\boldsymbol{K}$ 并且 $k'\in\boldsymbol{K}$，定义中继 $j$ 在子载波对 $(k,k')$ 上协助源 $i$ 传输的资源元组为 $\Psi(i)=\left(j,(k,k')\right)$，源 $i$ 的直传链路资源元组为 $\Psi(i)=\left(0,(k,k')\right)$。值得注意的是前者 $(k,k')$ 来自集合 $\boldsymbol{K}_{i,j}$ 和 $\boldsymbol{K}'_{i,j}$，后者来自集合 $\boldsymbol{K}_i$ 和 $\boldsymbol{K}'_i$。系统高负载时，源 $i$ 的协作链路资源元组为 $\Psi(i)=\left(j,(k)\right)$。由于解码转发机制取决于源和中继的信道质量，所以此时 $k$ 来自 $\boldsymbol{K}_{i,j}$。

分析目标函数 P1，其包括直传链路和协作链路能效。容易发现协作链路能效 $\eta_{(i,j)}^{k,k'}$ 是关于发送功率的二元变量函数，其定义为

$$\eta_{(i,j)}^{k,k'}\left(P_i^k,P_j^{k'}\right)=\frac{\dfrac{W}{2}\min\left\{\mathrm{lb}\left(1+\dfrac{P_i^k\left|h_{ij}^k\right|^2}{n_0^2}\right),\mathrm{lb}\left(1+\dfrac{P_i^k\left|h_{id}^k\right|^2+\left|h_{jd}^{k'}\right|^2}{n_1^2}\right)\right\}}{P_i^k+P_j^{k'}} \tag{8}$$

如果分配中继 $j$ 给源 $i$，在容量和发送功率约束条件下可以建立如下最大化问题 P3。

目标函数 P3：$\eta_{(i,j)}^{k,k'}=\max\ \eta_{(i,j)}^{k,k'}(P_i^k,P_j^{k'})$

约束条件：(a1)(b1)(c1)

基于相应的信道增益值，通过文献[14]中的能效优化功率注水思想求解 P3，得到协作链路最大能效 $\eta_{(i,j)}^{k,k'}$、子载波对 $(k,k')$ 上的发送功率 $P_i^k,P_j^{k'}$。

如果直传模式优于协作模式或者源用户无法选择协作模式，直传链路能效值计算如下

$$\eta_{(i,d)}^{k,k'}=\frac{\dfrac{1}{2}W\mathrm{lb}(1+\gamma)\left(\left|h_{id}^k\right|^2+\left|h_{id}^{k'}\right|^2\right)}{\gamma n_1^2} \tag{9}$$

分析发现系统中可能存在 0 个，1 个或者多个中继协作源用户传输，源用户在不同中继协作下存在不同的能效。定义

$$\eta_i=\max_{j\in R_i}\left\{\eta_{(i,j)}^{k,k'},\eta_{(i,d)}^{k,k'}\right\} \tag{10}$$

表示为源 $i$ 搜索最优传输链路。式(10)中源 $i$ 取得最大能效值的中继和子载波对为 $j^*$ 和 $(k,k')^*$。此处 $\eta_{(i,j)}^{k,k'}$ 和 $\eta_{(i,d)}^{k,k'}$ 中的 $(k,k')$ 同上，来自不同的子载波降序集合。

从图论的角度，OFDM 中继系统可以看作一个无向图。通过源用户能效 $\eta_i$ 对应的资源元组，构建加权冲突图 $G=(M,E,w)$，其中 $M$ 是源用户集合，$E$ 是任意 2 个节点资源冲突的边集合。如果 2 个不同的源用户在同一时隙竞争相同的资源，则产生一条资源冲突边。图 2 解释了资源冲突图，它是一个包括 6 个用户，4 个可用子载波，3 个中继的小系统。图中用户 1 资源元组为中继 1 和子载波对 $(1,2)$，然而用户 6 和用户 1 竞争中继 1，因此他们存在一条冲突边。用户 1 与用户 2 竞争第一时隙子载波 1，用户 1 和用户 5 竞争第二时隙子载波 2，因此存在冲突边。用户 4 直接与基站通信，仍因为与其他 3 个用户竞争相同的子载波存在冲突边。$w$ 是冲突图节点的权，如果 $x_{i,j}^{k,k'}=1$，则 $w(i)=\eta_{(i,j)}^{k,k'}$，否则 $w(i)=\eta_{(i,d)}^{k,k'}$。通过求解冲突图的 MWIS 得到源用户的资源分配结果，这里采用一种改进的置信传播（BP）算法[15]来求解 MWIS。BP 算法适用于一般图，能够达到近似最优的权重和性能，算法复杂度为 $O(m^3)$。

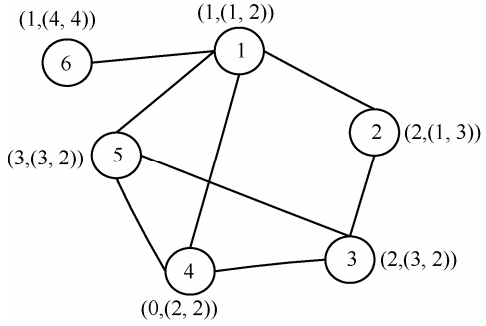



图 2　冲突图

根据冲突图的 MWIS 结果，分配对应资源 $j^*$、

$(k,k')^*$、$P_i^k, P_j^{k'}$给集合中的顶点。然后从子载波集合$K$中删除$(k,k')^*$，中继集合$R$中删除$j^*$，源用户集合$M$中删除独立集中的用户。如果$M \neq \varnothing$且$K \neq \varnothing$且$R \neq \varnothing$，则剩余用户可以请求分配资源，但是系统必须通过下一轮的MWIS结果分配资源，最终实现系统能效最大。本文资源联合分配算法复杂度为$O(mnl+m^3)$，其中$l$是子载波数，$m$是用户数，$n$是中继数。

资源联合分配算法(JRAA)

输入：$K_1=K_2=K=\{1,2,\cdots,l\}$，$M=\{1,2,\cdots,m\}$，$K_{i,j}$，$K'_{i,j}$，$K_i$，$K'_i$，$R_i$

输出：$P_i^k, P_{j^*}^{k'}$，$(k,k')^*$，$j^*$

1) if $l/m \geqslant 2$（低负载）
2) for $i=1:m$
3) for $index_1=1:l$
4) $\Psi(i)=\left(0,(k,k')_{index_1}\right)$;
5) if $k \in K_1$ and $k' \in K_2$
6) $\eta_{(i,d)}^{k,k'}$;
7) $\eta_i=\eta_{(i,d)}^{k,k'}$;
8) break;
9) end if
10) end for
11) for $j \in R_i$
12) for $index_2=1:l$
13) $\Psi(i)=\left(j,(k,k')_{index_2}\right)$;
14) if $k \in K_1$ and $k' \in K_2$
15) $\eta_{(i,j)}^{k,k'}$;
16) break;
17) end if
18) end for
19) if $\eta_i < \eta_{(i,j)}^{k,k'}$
20) $\eta_i=\eta_{(i,j)}^{k,k'}$;
21) end if
22) end for
23) return $\eta_i$ and $\Psi(i), P_i^k, P_{j^*}^{k'}$;
24) end for
25) else（高负载）
26) 步骤同2)~4)
27) if $k \in K$ and $k' \in K$
28) $\eta_{(i,d)}^k$;
29) 步骤同7)~13)
30) if $k \in K$ and $k' \in K$
31) $\eta_{(i,j)}^k$;
32) 步骤同16)~23)
33) end if
34) 构建$G=(M,E,w)$;
35) 求解$G$的MWIS;
36) 分配$P_i, P_{j^*}^{k'}$，$j^*$，$(k,k')^*$到用户$i$;
37) $K_1=K_1-k$，$K_2=K_2-k'$（低负载），
38) $K=K-k$（高负载），$M=M-i$，
39) $R=R-j^*$;

上面给出了算法的伪码。步骤2)~24)考虑低负载系统，步骤3)~10)表示$K_i$的第$index_1$个子载波匹配$K'_i$的第$index_1$个子载波得到了源$i$直传链路资源元组，通过式(9)得到直传链路能效。步骤11)~18)得到源$i$的协作链路资源元组，通过求解P3得到协作链路能效。步骤19)~21)通过获得最大能效$\eta_i$选择最优的传输模式。步骤26)~33)考虑高负载系统，最大化问题为P2模型，算法步骤跟低负载系统基本一致，不同的是此时$\eta_{(i,d)}^k$和$\eta_{(i,j)}^k$中的子载波$k$分别来自集合$K_i$、$K_{i,j}$。步骤34)基于能效$\eta_i$和对应的资源元组构建加权冲突图$G=(M,E,w)$。步骤35)通过改进的BP算法求解该图的MWIS。步骤36)系统返回资源分配结果到源用户和中继。步骤37)更新子载波、源用户、中继集合。

图3解释了基于冲突图的资源分配过程。根据前面的能效运算，得到10个源用户资源元组和对应的能效。图3(a)给出根据资源元组得到10个源用户的资源冲突图，求解该图的MWIS，系统第一次分配相应的资源给用户1、4、6、10，更新子载波、源用户、中继集合。假设第二次资源分配循环中，请求发送数据的用户数没有增加，根据新的资源元组得到图3(b)，分配对应资源给用户3、5、9。图3(c)给出第三次分配对应资源给用户8，图3(d)给出第四次分配资源给用户7，图3(e)给出最后分配资源给用户2。最终为所有用户分配他们所需的资源结果如表1所示。

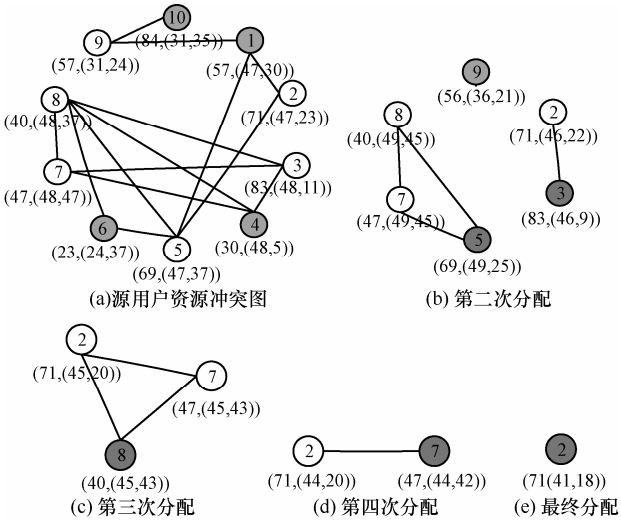



图 3　MWIS 结果

**表 1**　　**最终资源分配结果**

| 源用户 ID | 中继 | 第一时隙子载波 ID | 第二时隙子载波 ID |
|---|---|---|---|
| 1 | 57 | 47 | 30 |
| 2 | 71 | 41 | 18 |
| 3 | 83 | 46 | 9 |
| 4 | 30 | 48 | 5 |
| 5 | 69 | 49 | 25 |
| 6 | 23 | 24 | 37 |
| 7 | 47 | 44 | 42 |
| 8 | 40 | 45 | 43 |
| 9 | 56 | 36 | 21 |
| 10 | 84 | 31 | 35 |

这一节仿真验证提出的 JRAA 算法，并与文献[12]中的 MNCF 算法进行性能比较。为了比较的公平性，本文考虑设置 MNCF 算法的每个用户传输至多借助 1 个中继。由于文献[12]中考虑的是固定中继，用户与中继可以是多对多的关系，本文考虑移动中继的功率，设置用户与中继一对一的关系不影响算法的性能。MNCF 是在容量和散度限制下寻求源点到终端的最小费用流，其算法复杂度为 $O\left(2lm+l^2nm+8(l+1)^4\right)$。为了研究方便，考虑一个半径为 1 km 的蜂窝小区，假设源用户随机分布在某个扇区边缘，100 个中继用户随机分布，子载波数为 50，路径损耗模型参考文献[16]。仿真参数设置如表 2 所示。

**表 2**　　**仿真参数设置**

| 参数名称 | 参数值 |
|---|---|
| 子信道带宽 $B$ | 15 kHz |
| 热噪声 $n_0^2=n_1^2$ | −128.95 dBw |
| 信号载频 $f$ | 2 GHz |
| 最大发送功率 $P_{\max}$ | 5 dBw |
| 最低信噪比 $\gamma$ | 5 dB |

## 4　仿真结果及分析

图 4 给出了 JRAA 算法中 3 种不同的指标作为优化目标的性能比较。针对某一个源用户，以最大化能效作为优化目标将比以最大容量和最小发送功率为目标获得更高的能源使用效率。

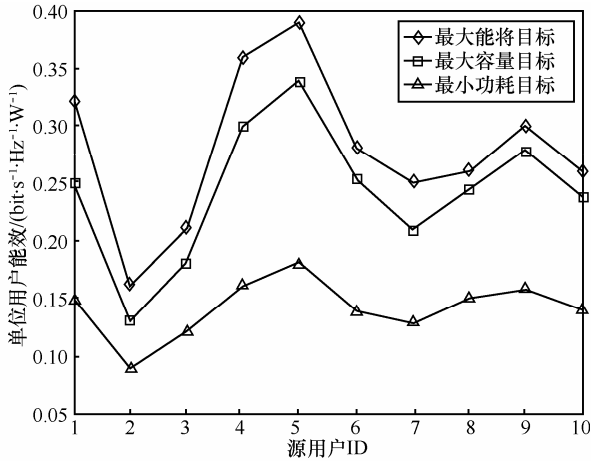



图 4　链路能效随用户节点变化

图 5 分析了低负载系统能效随中继数变化的情况，系统能效随着中继数的增加而增加。增长趋势显示中继数为 10~50 时能效增长速度较快，为 50~80 时速度放缓，然后保持平衡。因为系统中源用户周围的中继节点越多，系统可以搜寻到能效更高的中继为源用户转发数据，但是中继数达到一定时对系统能效的增加没有帮助。在低负载系统中，采用子载波配对能获得更好的系统性能，JRAA 和 MNCF 算法均考虑了子载波配对，2 种算法的能效相差较小。

图 6 分析了高负载系统能效随中继数变化的情况。JRAA 算法在高负载系统中不考虑子载波配对来保证尽量多的用户分配到子载波，MNCF 算法无论系统负载情况如何都考虑子载波配对。在高负载系统中，JRAA 算法与 MNCF 算法的能效性能差距较大，随着中继数增加 2 种算法的性能差距越来越

大。由图 5 和图 6 可知，JRAA 算法能够根据不同的负载情况进行合理的资源分配，从而获得更高的系统能效。

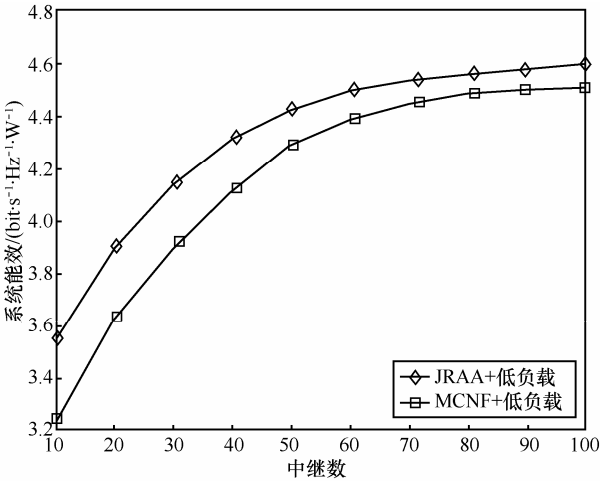



图 5 低负载系统系统能效随中继数变化

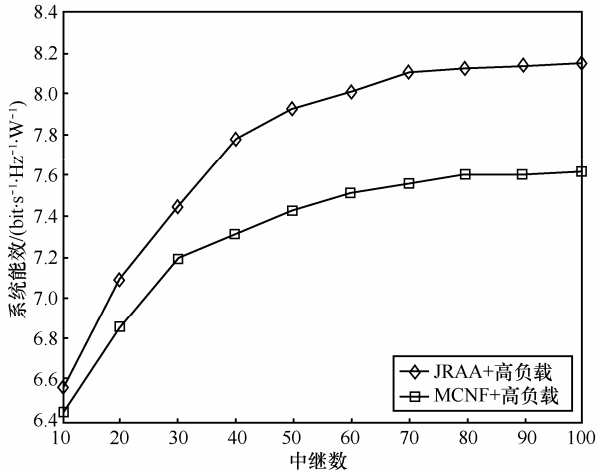



图 6 高负载系统系统能效随中继数变化

图 7 描述了系统容量随最大发送功率 $P_{\max}$ 变化而变化的过程，2 种算法系统容量均随着中继数的增加而增加。由香农公式可知，系统容量随着发送功率的增加而增加。MNCF 算法以系统容量最大化为目标，仅仅考虑容量最大而忽略了发送功率，最终的资源分配结果在系统容量上比 JRAA 算法略高，优势仅在 5%以内。

图 8 描述了系统能效随最大发送功率变化先增加后减少。分析可知，当节点最大发送功率较小时，不能满足链路对容量的要求，在限制条件下无法通过中继为源用户转发数据，则用户只能选择直传模式传输数据。直传模式下为了满足容量要求，源用户将增大发送功率进行通信，系统能效较低。随着最大发送功率的增加，在限制条件下部分源用户能够通过中继来通信，因此系统能效会随之增加。当发送功率增加到一定值时，通过相应的算法能够为尽量多的用户找到最优中继为用户转发数据，继续增加发送功率，系统能效反而随着发送功率的增加而减少。因为由香农公式知链路容量随着节点发送功率的增加而增加，然而链路能效 $\eta = C/P$ 中，分母增加速度比分子快。MNCF 算法在系统容量方面有很小的优势，在系统能效方面 JRAA 算法的优势更加明显。同 MNCF 相比，JRAA 增加的能效达到 20%以上。

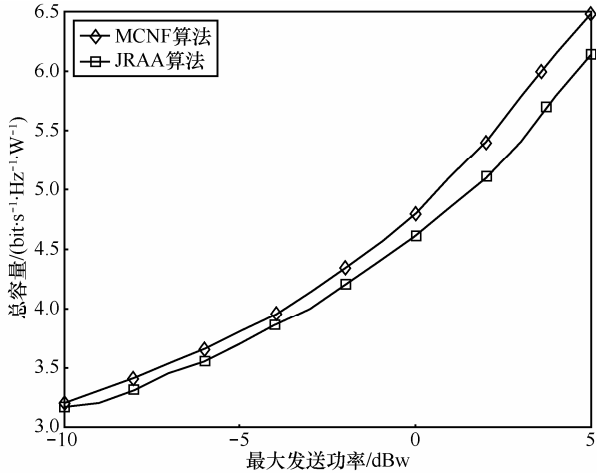



图 7 系统容量随最大发送功率变化

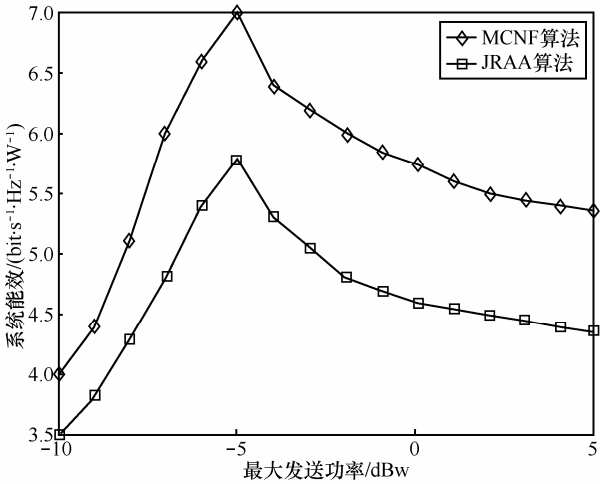



图 8 系统能效随最大发送功率变化

## 5 结束语

本文提出了 OFDM 中继系统中有效且可行的资源联合分配次优化算法(JRAA)。JRAA 算法联合中继—子载波分配和功率分配，以最大化上行链路

能效为目标，基于源用户的资源元组构建资源冲突图，链路能效作为节点的权。通过改进的 BP 算法求解该冲突图的 MWIS。仿真验证该算法可以让系统获得较高的能效。

## 参考文献：


[1] 李佳宁, 官磊, 张建华. OFDM 多跳中继系统的子载波功率分配[J]. 北京邮电大学学报, 2008,31(2):59-63.
LI J N, GUAN L, ZHANG J H. Subcarrier power allocation in OFDM multi-hop relaying system[J].Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2008, 31(2): 59-63.

[2] LIU Y M, TAO M X. Optimal channel and relay assignment in OFDM-based multi-relay multi-pair two- way communication networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2012, 60(2): 317-321.

[3] MU H, TAO M X, DANG W B, XIAO Y. Joint subcarrier-relay assignment and power allocation for decode- and-forward multi-relay OFDM Systems[A]. Fourth International Conference on Communications and Networking[C]. Xi'an, China, 2009.1-6.

[4] SHASHIKA B, UPUL G, RANJITH L. Selective sub-carrier relaying and power allocation for multi-relay-assisted cooperative OFDM systems[A]. Communications Theory Workshop (AusCTW)[C]. Australian, 2011. 164-169.

[5] MAHDI H, DONG M, LIANG B. Optimal channel assignment and power allocation for dual-hop multi-channel multi-user relaying[A]. Proceedings of IEEE INFOCOM[C]. Shanghai, China, 2011.76-80.

[6] TANG Z H, WEI G, ZHANG C, ZHANG J. A New resource allocation scheme for decode and forward cooperative transmission over multi-user OFDM networks[A]. IEEE 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications[C].Tokyo, Japan, 2009.712-716.

[7] GAYAN M, DHAMMIKA J. Subcarrier pairing and relay assignment with improved user fairness in a multi-user cooperative OFDM system[A]. Telecommunication Networks and Applications Conference[C]. Australasian, 2012.1-4.

[8] MD B A, JON W M, SHEN X M. Relay selection and resource allocation for multiple user cooperative LTE-A uplink[A].IEEE International Conference on Communications (ICC)[C]. Ottawa, Ontario, Canada, 2012. 5092-5096.

[9] HUANG B, FANG X M, CHEN Y. An energy saving radio resource allocation in OFDMA based cellular relay networks[A]. Fifth International Workshop on Signal Design and its Applications in Communications (IWSDA)[C]. Guilin, China, 2011.189-192.

[10] SONG G J, LIU H W. A low complexity resource allocation method for relay OFDMA systems[A].IEEE Information Theory and Information Security (ICITIS)[C]. Beijing, China, 2010.1054-1057

[11] LIU C, ZHANG S H, QIN X W, ZHOU W Y. Utility-based resource allocation in OFDMA relay networks with service differentiation[A]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)[C]. 2011. 72-77.

[12] TAO M X, LIU Y. A network flow approach to throughput maximization in cooperative OFDMA networks[J].IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(3): 1138-1148.

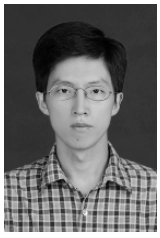
[13] BERTRAND P. Channel gain estimation from sounding reference signal in LTE[A].2011 IEEE Vehicular Technology Conference[C]. Budapest, 2011.1-5.

[14] 许杰.基于能量效率的自适应多天线传输技术研究[D]. 安徽:中国科学技术大学,2012.
XU J. Multi-Antenna Transmission Technology Based on the Energy Efficiency of the Adaptive[D].Anhui: China University of Science and Technology,2012.

[15] 王向阳，张源.一种改进的分布式最大权独立集算法[J].电子与信息学报, 2012,34(3): 689-693.
WANG X Y, ZHANG Y. An improved distributed algorithm for maximum weight independent set (MWIS) problem[J].Journal of Electronics & Information Technology,2012, 34(3): 689-693.

[16] GITANJALI C, SOUMENDRA N D, SASWAT C. Relay assisted cellular system for energy minimization[A].India Conference[C]. India, 2010.1-4.


## 作者简介：




**李云**（1974-），男，四川西充人，博士，重庆邮电大学教授，主要研究方向为无线移动通信。

**段海霞**（1988-），女，重庆人，重庆邮电大学硕士生，主要研究方向为无线移动通信。

**苏开荣**（1963-），男，陕西礼泉人，博士，重庆邮电大学教授，主要研究方向为现代通信网及通信技术应用。

**曹傧**（1983-），男，重庆人，博士，电子科技大学讲师，主要研究方向为协作通信、软件定义网络和无线网络虚拟化。