

# AF 中继下行链路系统的能效资源分配方案

陈煜, 方旭明, 黄博

(西南交通大学 信息编码与传输省重点实验室, 四川 成都 610031)

**摘 要:** 为最大化放大转发中继系统的下行链路总能效, 结合系统的电路功率, 提出了一种基于能效的中继选择和功率分配联合方案。为降低复杂度, 采用分步式次优化方案, 利用虚拟直传信道增益得到中继选择方法, 并将中继系统转换为单跳系统; 然后利用凸规划得到最优功率分配。此外, 为适应不同的用户分布, 提出联合小区呼吸机制的分配方案。仿真结果表明, 所提次优联合方案逼近最优值, 联合小区呼吸的方案可适应不同的用户分布并进一步提升能效。

**关键词:** 放大转发中继; 能效; 资源分配; 小区呼吸

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)09-0122-11

## Energy efficient resource allocation scheme for AF relay downlink system

CHEN Yu, FANG Xu-ming, HUANG Bo

(Key Lab of Information Coding and Transmission, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** In order to maximize the total energy efficiency of amplify-and-forward relay downlink system, a joint scheme of relay selection and power allocation was proposed with the circuit power of the system. For reducing the computational complexity, a step-by-step suboptimal allocation scheme was provided. Firstly, the virtual direct channel gains were adopted to select appropriate transmission link. Meanwhile, relay system was converted to the single hop system. Then, the power allocation could be solved by convex optimization. Besides, in order to accommodate different user distributions, a resource allocation scheme based on cell zooming was also proposed. Simulations demonstrated that the solution of the proposed suboptimal scheme approaches the optimal solution. Additionally, the scheme with cell zooming is adaptable to different user distributions and further improves the total system energy efficiency.

**Key words:** AF relay; energy efficiency; resource allocation; cell zooming

### 1 引言

在下一代无线通信中, 为了提升系统容量、扩大覆盖范围、支持高速移动, IEEE 802.16j/m 和 LTE-Advanced 标准中都引入中继技术。现有主要的中继协议是放大转发中继协议 (AF, amplify and forward) 和解码转发中继协议 (DF, decode and forward)。目前, 中继系统资源分配问题的传统目标主要集中在系统吞吐率的提升和发射功率的降低。但是, 节约资源、提高资源的利用率已成为科

技经济发展的新趋势。虽然单纯提升系统吞吐率或降低系统发射功率也能提升系统的资源利用率, 但是却无法获得最优的资源利用率, 尤其是在限制条件比较宽松的情况下。由此可以看出资源分配问题的传统目标已不再适用于现在的无线通信系统。无线通信系统的资源管理目标应转为提升无线资源的利用率, 尤其是功率的利用率。因此, 文献[1,2]提出了能效通信的概念, 即以最大化每瓦特所支持的速率为目标的无线通信系统。

近几年, 无线通信的能效问题逐渐成为热点,

收稿日期: 2013-05-24; 修回日期: 2013-11-25

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(2012CB316100); 国家自然科学基金资助项目(61071108)

**Foundation Items:** The National Basic Research and Development Program of China (973 Program) (2012CB316100); The National Natural Science Foundation of China (61071108)

越来越多的研究投入到能效通信中。文献[3]基于 OFDMA 平坦衰落信道的下行链路系统提出了一个载波数和用户发射功率的联合分配方法,从而最大化每焦耳能量所支持的比特数,但文献[3]只考虑了发射功率对能效的影响,文献[2]指出发射功率只是整个无线通信系统所耗功率的小部分,若在能效问题中只考虑发射功率必然会导致误差甚至错误。为了更准确地分析无线网络的能效性能,接入网络所耗的整个电路功率对能效的影响应该予以考虑。文献[4,5]联合用户的电路功率分析了单跳 OFDM 链路和 OFDMA 系统的能效问题。文献[4]在 OFDM 链路上自适应地分配载波速率从而最大化系统能效。文献[5]基于 OFDMA 上行频率选择性衰落信道,提出了低复杂度的链路自适应算法。以上基于多用户系统的文献,都是以最大化所有用户的能效和作为目标,解决上行链路的资源分配问题。在下行链路中,基站的部分电路功耗与接入的用户数无关,若下行链路的能效问题也考虑基站的电路功耗,以用户能效和为目标则不妥。这种情况下应该以总的系统能效(即总吞吐率与总功率之比)作为下行链路能效问题的目标函数。文献[6]基于 OFDMA 下行系统,通过分别求解载波和功率分配从而最大化权重总能效,该文献对于功率分配提出了最优和次优 2 个算法,但是没有给出最优的载波分配方案,仅通过贪婪算法最大化目标函数的下边界。关于多用户小区下行链路的能效问题,现有研究成果很少。

对于中继系统,其能效问题则更为复杂。能效优化问题是在最大化系统吞吐率的同时最小化所需功率,比起单纯提升吞吐率或降低功率的问题,能效问题的求解更难。此外,由于中继技术的引入,功率分配的变量维度也增加了,所以中继系统的能效问题比单跳系统复杂。更困难的是,虽然中继技术的引入可以提升系统容量,但中继技术也相应地导致了发射功率和电路功耗的增加。因此,中继系统的能效问题是一个值得关注的新问题。然而现有关于中继系统能效问题的研究成果很少。文献[7]基于 DF 中继链路,提出了以最大能效为目标的功率分配方法。文献[8]基于 DF 协作中继上行链路系统,在保证两跳速率相等的情况下,提出了基于能效的资源分配方案。文献[9]基于多用户 DF 中继上行系统,提出了载波、比特、功率的联合分配方案。文献[8,9]都是以最大化所有用户的能效和为目标,但只考虑了每个用户的静态电路功耗,而忽略了放

大器的电路功耗,此部分功耗是随着发射功率的增加而增大的。此外,中继系统的能效问题研究大多集中于 DF 模式。众所周知,AF 中继系统的资源分配问题比起 DF 中继系统更为复杂,关于 AF 中继系统能效问题的研究大多被进行了简化。如文献[10],在保证速率的情况下通过最小化发射功率来提升能效。当然也有文献是通过调节吞吐率和功率来获得最优能效的。文献[11]利用多目标算法提出了一个用户选择和功率分配方案从而在最大化吞吐率的同时最小化发射功率。但是这些关于 AF 中继系统能效问题的研究没有考虑电路功耗对系统的影响。同样,中继系统能效问题的研究多集中于上行链路,目前鲜有论文研究中继系统下行链路的能效问题。

此外,关于中继系统的能效问题,都是基于用户均匀分布的场景。在中继系统中,在热点地区,尤其是热点区域,如办公区域、住宅区域等,这些区域中会固定放置一个中继来提升容量,但是这些区域并不会一直都存在大量用户,如办公区域内白天用户很多晚上用户很少,住宅区域则反之。所以在某些时刻,多数用户可能只集中于某些中继站附近,此时的负载是不平衡的。而在能效问题中中继站的电路功率不可忽略,为了支持少数用户的通信,而使低负载中继站保持工作,必然会导致能效的降低。所以下行链路的中继选择和功率分配需结合用户的分布情况进行合理的规划。为了节约能量,可以关闭较长时间处于低负载的站点,如白天住宅区域的站点或晚上工作区域的站点,让这些站点转为休眠模式。

本文针对 AF 中继系统的下行链路,提出了基于能效的中继选择和功率分配联合方案(EJS, energy-efficient joint relay selection and power allocation scheme)。该方案兼顾了基站、中继站和终端设备的电路损耗,在满足最小速率要求和总发射功率有界的条件下,最大化系统总能效。此外,由于中继站的电路消耗相比发射功率是不可忽略的,对于用户非均匀分布的场景,接入用户较少的中继依然保持工作状态,必然降低了系统总能效,故本文将传统多小区的“小区呼吸”(CZ, cell zooming)<sup>[12,13]</sup>机制引入到中继系统,提出了结合用户分布的中继选择和功率分配联合策略。该策略扩大了高负载中继站和基站的覆盖范围,让低负载中继站转入休眠模式,从而提高了资源使用效率,进

一步提升系统容量。传统的小区呼吸机制大多仅仅考虑了站点的固定电路功率损耗，忽略了发射功率，本文的能效问题则同时涉及了固定电路损耗和发射功率损耗，提出了一个新的基于小区呼吸机制的中继选择方法，该方法兼顾了固定电路功率和发射功率。

## 2 系统问题建模

本文考虑由 1 个基站 (BS)、 $M$  个中继站 (RS)、 $K$  个用户 (MS) 组成的单小区模型，如图 1 所示。其中，RS 采用半双工 AF 模式。每个传输帧包含 2 个子帧，每个子帧的持续时间为  $T_s$ 。在奇数子帧内，BS-MS 和 BS-RS 链路进行传输（第一跳链路）；在偶数子帧内，RS-MS 链路进行传输（第二跳链路）。

假设每个接入用户分配一个信道，其带宽为  $W$ 。同时，本文所考虑是平坦衰落信道下的能效通信问题，而且假设 BS 收集所有的信道状态信息，并由此决定每个用户的中继选择和每跳的发射功率。本文考虑准静态的用户分布，即较长一段时间内用户基本不发生移动。

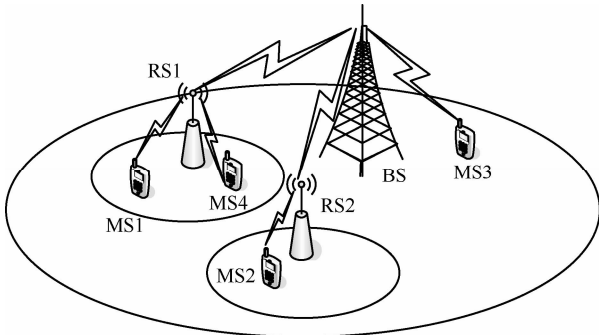


图 1 系统模型

若 MS  $k$  采用中继传输，定义 BS-RS  $m$ -MS  $k$  链路上，基站的发射功率为  $p_k^s$  W，中继站的发射功率为  $p_k^r$  W。假设噪声功率谱密度为  $N_0$  W/Hz。根据文献[14]可知，AF 中继链路中，MS  $k$  利用 RS  $m$  进行传输所得理论信噪比为

$$\varepsilon_{k,m} = \frac{p_k^s g_m^{BR} p_k^r g_{k,m}^{RM}}{p_k^s g_m^{BR} + p_k^r g_{k,m}^{RM} + 1} \quad (1)$$

其中， $g_m^{BR} = \frac{|H_m^{BR}|^2}{N_0 W}$ 、 $g_{k,m}^{RM} = \frac{|H_{k,m}^{RM}|^2}{N_0 W}$  分别表示 BS-RS

和 RS-MS 链路的信道衰耗； $|H_m^{BR}|^2$ 、 $|H_{k,m}^{RM}|^2$  分别表示 BS-RS 和 RS-MS 链路的功率衰耗。

在 AF 中继链路中，MS  $k$  利用 RS  $m$  进行传输所获得的最大信息传输速率为

$$R_{k,m}^R = \frac{W}{2} \text{lb}(1 + \varepsilon_{k,m}) \quad (2)$$

若 MS  $k$  采用直接传输，BS-MS  $k$  链路上，基站的发射功率为  $p_k^s$  W，则获得的最大信息传输速率为

$$R_k^B = W \text{lb}(1 + p_k^s g_k^{BM}) \quad (3)$$

其中， $g_k^{BM} = \frac{|H_k^{BM}|^2}{N_0 W}$  表示 BS-MS 链路的信道衰耗， $|H_k^{BM}|^2$  表示功率衰耗。文中  $\alpha_{k,m} \in \{0,1\}$  表示中继选择指示因子，直传路径的编号用“0”表示。当  $\alpha_{k,0}=1$  时，表示选择直传；当  $\alpha_{k,m}=1, m \neq 0$  时，表示通过第  $m$  个 RS 进行传输。

电路功率对系统能效的影响是不能忽略的，电路功率分为 2 部分：一部分是动态电路功率，其大小与发射功率值有关；另一部分是固定电路功率，是指除功率放大器以外其他电路所耗功率，主要包括数字信号处理电路、整流器、微波电路等。假设 BS 发射状态下的固定电路功耗为  $P_{ct}^B$  W（除功率放大器的功耗）；RS 接收状态的固定电路功耗为  $P_{cr}^R$  W，发射状态的固定电路功耗为  $P_{ct}^R$  W；MS 接收状态下的固定电路功耗为  $P_{cr}^M$  W。BS 发射端功率放大器的放大效率为  $\eta_B$ ；RS 发射端功率放大器的放大效率为  $\eta_R$ 。 $\eta_B, \eta_R \in [0,1]$  其值由功率放大器的设计所决定。本文以最大化中继小区下行链路的系统总能效为优化目标，系统的传输总比特数为

$$r_k(\alpha_{k,m}, p_k^s, p_k^r) = \alpha_{k,0} W \text{lb}(1 + p_k^s g_k^{BM}) \cdot T + \sum_{m=1}^M \alpha_{k,m} \frac{W}{2} \text{lb}(1 + \varepsilon_{k,m}) 2T \quad (4)$$

则系统的总能耗为

$$E(\alpha_{k,m}, p_k^s, p_k^r) = P_{ct}^B 2T + (P_{cr}^R T + P_{ct}^R T) M + \frac{\sum_{k=1}^K p_k^s T}{\eta_B} + \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \alpha_{k,m} p_k^r T}{\eta_R} \quad (5)$$

通过合理的中继选择和功率分配从而最大化系统的总能效，本文研究的问题可建模为

$$P1: U1 = \max_{\alpha_{k,m}, p_k^s, p_k^r} \frac{\sum_{k=1}^K r_k(\alpha_{k,m}, p_k^s, p_k^r)}{E(\alpha_{k,m}, p_k^s, p_k^r)} = \max_{\alpha_{k,m}, p_k^s, p_k^r} \frac{W \sum_{k=1}^K \left[ \alpha_{k,0} \text{lb}(1 + p_k^s g_k^{BM}) + \sum_{m=1}^M \alpha_{k,m} \text{lb}(1 + \varepsilon_{k,m}) \right]}{2P_{ct}^B + (P_{cr}^R + P_{ct}^R)M + 2KP_{cr}^M + \frac{\sum_{k=1}^K p_k^s}{\eta_B} + \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \alpha_{k,m} p_k^r}{\eta_R}} \quad (6)$$

s.t. C1:  $p_k^s, p_k^r \geq 0$

C2:  $\alpha_{k,m} \in \{0, 1\}$

$$\sum_{m=0}^M \alpha_{k,m} \leq 1, \forall k$$

C3:  $\sum_{k=1}^K p_k^s + p_k^r \leq P_{\max}$

C4:  $\sum_{m=1}^M r_k(\alpha_{k,m}, p_k^s, p_k^r) \geq R_{\min}, \forall k$

约束条件意义如下。

1) C1 表示所有用户所分配的功率应非负值。

2) C2 表示每个用户只能选择一条链路进行传输, BS-MS 链路或 BS-RS-MS 链路。

3) C3 表示所有用户的发射功率之和小于系统的最大发射功率限制  $P_{\max}$ 。

4) C4 表示每个用户的传输速率必须满足最小的速率要求  $R_{\min}$ 。

### 3 基于系统总能效的联合中继选择和功率分配方案

本节对问题 P1 进行求解。由目标函数 (6) 可知, 问题 P1 是非凸非凹问题, 最优联合解较难获得, 因此采用分步式次优算法对本问题进行求解。该算法将中继选择和功率分配分步进行求解, 具体解法如下。

#### 3.1 基于虚拟链路增益的中继选择

从文献[14]可知, 用式(1)表示 SNR 不利于数学处理和理论推导, 但可以利用式(1)的紧密上界进行理论分析和数学处理, 该紧密上界表示为

$$\hat{\varepsilon}_{k,m} = \frac{p_k^s g_m^{BR} p_k^r g_{k,m}^{RM}}{p_k^s g_m^{BR} + p_k^r g_{k,m}^{RM}} \quad (7)$$

从式(7)可以看出, 式(7)较式(1)更容易进行数学上的推导和变换, 式(7)是式(1)的紧密上界, 尤其是在高 SNR 的情况下, 定义虚拟直传路径是 BS-RS-MS 链路上的一个传输路径, 其 SNR 与中继链路的 SNR 相等。由此, 可利用式(7)对中继链路进行直传虚拟化, 从而得到中继链路的虚拟直传信

道增益。若分配给中继链路 BS-RS  $m$ -MS  $k$  的总发射功率为  $\hat{p}_k$ , 则通过求解下面这个最大化问题便能得到虚拟直传信道增益  $\hat{g}_{k,m}$

$$\hat{P}_{k,m} \hat{g}_{k,m} = \max_{p_k^s, p_k^r} \hat{\varepsilon}_{k,m}(p_k^s, p_k^r) = \max_{p_k^s, p_k^r} \frac{p_k^s g_m^{BR} p_k^r g_{k,m}^{RM}}{p_k^s g_m^{BR} + p_k^r g_{k,m}^{RM}} \quad (8)$$

s.t.  $\hat{p}_{k,m} = p_k^s + p_k^r$   
 $p_k^s, p_k^r \geq 0$

由式(8)可知, 由 BS-RS  $m$ -MS  $k$  链路所得的直传虚拟链路等于在给定发射功率  $\hat{p}_k$  时的最优中继传输, 其信道增益为  $\hat{g}_{k,m}$ , 便可得引理 1。

**引理 1** 虚拟直传信道增益由信道增益  $g_m^{BR}$ 、 $g_{k,m}^{RM}$  所决定, 与总发射功率  $\hat{p}_k$  无关, 且虚拟直传信道增益为

$$\hat{g}_{k,m} = \frac{d_{k,m}}{d_{k,m} + 1} \frac{g_m^{BR} g_{k,m}^{RM}}{g_m^{BR} + g_{k,m}^{RM}} \quad (9)$$

其中,  $d_{k,m} = \sqrt{\frac{g_{k,m}^{RM}}{g_m^{BR}}}$ 。虚拟直传信道增益与中继选择、功率分配相独立, 以最大化信噪比所得的虚拟增益则最大化了能效。

**证明** 式(8)的海瑟尔矩阵如下

$$\varepsilon_i''(p_k^s, p_k^r) = 2 \begin{bmatrix} \frac{(g_m^{BR})^2 (g_{k,m}^{RM})^2 (p_k^r)^2}{(p_k^s g_m^{BR} + p_k^r g_{k,m}^{RM})^3}, & \frac{(g_m^{BR})^2 (g_{k,m}^{RM})^2 p_k^s p_k^r}{(p_k^s g_m^{BR} + p_k^r g_{k,m}^{RM})^3} \\ \frac{(g_m^{BR})^2 (g_{k,m}^{RM})^2 p_k^s p_k^r}{(p_k^s g_m^{BR} + p_k^r g_{k,m}^{RM})^3}, & \frac{(g_m^{BR})^2 (g_{k,m}^{RM})^2 (p_k^s)^2}{(p_k^s g_m^{BR} + p_k^r g_{k,m}^{RM})^3} \end{bmatrix} \quad (10)$$

可以得到  $\varepsilon_i''(p_k^s, p_k^r)$  是负半定矩阵, 因此, 式(8)是凹的且具有唯一的最优解。利用拉格朗日乘子可得

$$L(p_k^s, p_k^r) = \frac{p_k^s g_m^{BR} p_k^r g_{k,m}^{RM}}{p_k^s g_m^{BR} + p_k^r g_{k,m}^{RM}} - \lambda(p_k^s + p_k^r - \hat{p}_k) \quad (11)$$

其中,  $\lambda$  是非负的拉格朗日乘子。对  $p_k^s$ 、 $p_k^r$  分别求导并使其等于 0, 然后联立消除  $\lambda$  可得

$$p_k^s = \sqrt{\frac{g_{k,m}^{RM}}{g_m^{BR}}} p_k^r \quad (12)$$

$$p_k^r = \frac{\hat{p}_k}{1 + d_{k,m}} \quad (14)$$

由式(12)、式(8)便得到式(9)。证毕。

由式(12)、式(8)还可得

$$p_k^s = \frac{d_{k,m} \hat{p}_k}{1 + d_{k,m}} \quad (13)$$

直传链路的直传虚拟路径为其本身，即  $\hat{g}_{k,0} = g_k^{BM}$ ，将式(13)、式(14)代入式(6)，原能效问题可变为

$$\begin{aligned} \dot{P}1: \dot{U}1 = \max_{\alpha_{k,m}, \hat{p}_k} & \frac{W \sum_{k=1}^K \sum_{m=0}^M \alpha_{k,m} \text{lb}(1 + \hat{p}_k \hat{g}_{k,m})}{2P_{ct}^B + (P_{cr}^R + P_{ct}^R)M + 2KP_{cr}^M + \frac{\alpha_{k,0} \sum_{k=1}^K \hat{p}_k}{\eta_B} + \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \frac{\eta_R d_{k,m} + \eta_B}{(1 + d_{k,m}) \eta_R \eta_B} \alpha_{k,m} \hat{p}_k} \end{aligned} \quad (15)$$

s.t.C1':  $\hat{p}_k \geq 0$

C2':  $\alpha_{k,m} \in \{0,1\}$ ;

$$\sum_{m=0}^M \alpha_{k,m} \leq 1, \forall k$$

C3':  $\sum_{k=1}^K \hat{p}_k \leq P_{\max}$

C4':  $\sum_{m=0}^M \alpha_{k,m} \log_2(1 + \hat{p}_k \hat{g}_{k,m}) \geq R_{\min}, \forall k$

由引理 1 可知，虚拟直传信道增益与功率分配、中继选择相独立，而式(7)是式(1)的紧上界，故问题  $\dot{P}1$  的最优解是问题 P1 的近似最优解。通过式(15)可知，问题  $\dot{P}1$  是非凹非凸问题，因此，从数学上进行求解较为困难。由于式(15)考虑了功率放大器对发射功率的放大效果，这使得每个用户的中继选择结果不是相互独立，且问题  $\dot{P}1$  的中继选择问题与功率分配问题也不是相互独立的。但是由于虚拟直传链路增益与放大系数的值不在一个数量级上，虚拟直传链路增益对能效的影响远大于放大系数，为了方便对问题  $\dot{P}1$  进行解耦，本文在中继丢失中忽略放大系数对能效的影响，使中继选择和功率分配相互独立，并且每个用户的中继选择相互独立，从而可以分步进行求解，由此所得到的次优中继选择方法，联合最优功率分配方法，便能得到原始问题 P1 的次优解。为了最大化系统能效，本文根据用户的虚拟直传信道增益进行中继选择，即尽可能地在最小功率的情况下获得最大速率。

若分配给 MS  $k$  的资源一定，则决定每条链路速率大小的主要因素是信道增益。由于虚拟直传信道增益与其分配的功率独立，所以，本文用每条链路的虚

拟直传信道增益作为选择标准( $\hat{g}_{k,m}, m = 0, 1, \dots, M$ )，每个用户选择虚拟直传信道增益最大的链路进行传输，即

$$m_k^* = \max_m \{ \hat{g}_{k,m} \} \quad (16)$$

基于虚拟直传链路增益，得到了中继选择结果，即  $\alpha_{k,m_k^*} = 1$ ；中继链路的功率分配问题转换为单跳系统的功率分配问题。

### 3.2 基于能效的功率分配方案

令

$$\beta_{k,m} = \begin{cases} 1, & m = 0 \\ \eta_B, & \\ \frac{\eta_R d_{k,m} + \eta_B}{(1 + d_{k,m}) \eta_R \eta_B}, & m = 1, 2, \dots, M \end{cases} \quad (17)$$

基于 3.1 节所获得的中继选择的结果，问题  $\dot{P}1$  可以转换为

$$\begin{aligned} \ddot{P}1: \ddot{U}1 = \max_{\hat{p}_k} & \frac{W \sum_{k=1}^K \text{lb}(1 + \hat{p}_k \hat{g}_{k,m_k^*})}{2P_{ct}^B + (P_{cr}^R + P_{ct}^R)M + 2KP_{cr}^M + \sum_{k=1}^K \beta_{k,m_k^*} \hat{p}_k} \\ \text{s.t.C1}', \text{C3}', \text{C4}'': & \text{lb}(1 + \hat{p}_k \hat{g}_{k,m_k^*}) \geq R_{\min}, \forall k \end{aligned} \quad (18)$$

由式(18)可知，该问题  $\ddot{P}1$  具有以下几个特性。

- 1)  $\ddot{U}1(\{\hat{p}_k\})$  在  $\{\hat{p}_k\}$  上是严格拟凸的。
- 2)  $\ddot{U}1(\{\hat{p}_k\})$  在  $\hat{p}_k$  上是先严格递增然后严格递减的，且起点为  $\hat{p}_k = (2^{R_{\min}/W} - 1) / \hat{g}_{k,m_k^*}$ 。
- 3) 令  $\hat{r}_k = \text{lb}(1 + \hat{p}_k \hat{g}_{k,m_k^*})$ ，则

$$\begin{cases} > 0, U1''(\{\hat{p}_k\}) < \max_k \frac{1}{\beta_{k,m_k^*}} \frac{d\hat{r}_k}{d\hat{p}_k} \\ = 0, U1''(\{\hat{p}_k\}) = \max_k \frac{1}{\beta_{k,m_k^*}} \frac{d\hat{r}_k}{d\hat{p}_k} \\ < 0, U1''(\{\hat{p}_k\}) > \max_k \frac{1}{\beta_{k,m_k^*}} \frac{d\hat{r}_k}{d\hat{p}_k} \end{cases} \quad (19)$$

$$\hat{p}_k^* = \hat{p}_k + \left[ \mu - \left( \frac{1}{\hat{g}_{k,m_k^*}} + \hat{p}_k \right) \right]^+ \quad (22)$$

$$\sum_{k \in \{k \in K | \hat{p}_k^* > \hat{p}_k\}} \left( \mu - \frac{1}{\hat{g}_{k,m_k^*}} - \hat{p}_k \right) = P - \sum_{k=1}^K \hat{p}_k \quad (23)$$

#### 4 结合小区呼吸机制的能效联合方案

问题 P1 中的电路功率是恒定的, 该问题可视为单跳下行链路的能效问题。文献[6]中提出了基于二分法的功率自适应方法 (BPA, bisection-based power adaptation algorithm), 该方法在考虑用户最小速率限制和最大功率限制的情况下求出了最优解。所以本文基于式(19)的关系, 用 BPA 方法来求解问题 P1。但是文献[6]的 BPA 算法是基于频率选择性信道, 而本文基于平坦衰落信道, 没有考虑载波分配, 所以本文使用 BPA 方法中的一般注水算法和多级注水算法 (multilevel Water-filling) 所求得的用户功率时, 方法中所用公式需改为

$$\hat{p}_k = \left[ \lambda_k - \frac{1}{\hat{g}_{k,m_k^*}} \right]^+ \quad (20)$$

$$\text{lb}(\lambda_k \hat{g}_{k,m_k^*}) = R_{\min} / W \quad (21)$$

$$\text{P2: } U2 = \max_{\alpha_{k,m}, \hat{p}_k^r, P_k^r} \frac{W \sum_{k=1}^K \sum_{m=0}^M \alpha_{k,m} \text{lb}(1 + \hat{p}_k \hat{g}_{k,m})}{2P_{ct}^B + (P_{cr}^R + P_{ct}^R) \sum_{m=1}^M \text{sgn}(\sum_{k=1}^K \alpha_{k,m}) + P_{cs} \sum_{m=1}^M (1 - \text{sgn}(\sum_{k=1}^K \alpha_{k,m})) + 2KP_{cr}^M + \sum_{k=1}^K \sum_{m=0}^M \beta_{k,m} \alpha_{k,m} \hat{p}_k} \quad (24)$$

s.t. C1' ~ C4'

其中,  $\text{sgn}(x)$  表示阶跃函数, 若  $x > 0$ , 则  $\text{sgn}(x) = 1$ , 否则  $\text{sgn}(x) = 0$ 。同理, 可将中继选择和功率分配分步求解。

传统的小区呼吸机制大多只考虑了站点的固定电路功率损耗, 没有考虑发射功率所带来的功率损耗。由于本文的能效问题不仅仅涉及固定电路损耗也涉及发射功率的损耗, 所以本文所提基于小区呼吸机制的中继选择方法同时考虑了固定电路功率和发射功率。为了节约能量, 同时提升系统能效, 需要在不会很大程度降低系统速率也不会提升较大发射功率的情况下, 让用户尽可能集中接入, 从而节省中继站的电路功耗。由于本文只考虑总功率的限制, 并没考虑各个基站的发射功率限制, 所以, 功率限制是个较为宽泛的限制, 从前期研究成果中

在能效通信问题中, 电路功率消耗已成为不可忽略的问题<sup>[2]</sup>。在下行链路中, 中继站的电路功耗对系统能效的影响明显, 尤其是在用户非均匀分布的场景。由于本文基于准静态用户分布, 在该分布情况下, 某些 RS 会长时间处于低负载状态, 所以为进一步提升系统能效, 本文将传统蜂窝小区系统中的小区呼吸机制引入到中继系统中, 得到了一个结合小区呼吸机制的能效联合方案 (EJSC, energy-efficient joint-relay-selection-and-power-allocation scheme with cell-zooming), 该方案关闭低负载的中继站, 使其转入休眠模式; 同时, 扩大高负载中继站的覆盖范围, 将休眠中继站服务的用户转移到高负载的中继站。假设休眠模式下中继站的电路功耗为  $P_{cs}$  W, 基于 3.1 节的中继链路虚拟化, 联合小区呼吸机制, 以总能效最大为目标的中继选择和功率分配问题为

可以看出, 能效最优时的系统总速率往往偏低, 一旦最小速率要求稍微偏高, 最优能效问题等同于最小发射功率问题的概率就大大提高。

本文所提的联合小区呼吸机制的中继选择方法, 以满足用户最小速率要求时所消耗的功率作为选择的条件。由于转移休眠基站所接入的用户必然会提升发射功率, 若发射功率提升过高则导致能效的下降, 因此, 本文引入一个判决系数  $\gamma \in (0, 1]$  来避免这种情况。将 RS  $m$  的用户转移后, 转移用户的所需发射功率与总发射功率之比大于  $\gamma$ , 则不关闭 RS  $m$ , 使其保持工作状态。方法简单概括为如下步骤。

**第 1 步** 每个用户基于最小速率要求, 计算所需的基站发射机放大器输入功率  $\bar{p}_k$ , 由此选择放大器输入功率最小的链路, 初步求解用户接入指示因

子  $\{\alpha_{k,m}\}$ 、接入每个站点的用户集合  $\Psi_m, m = \{0, 1, \dots, M\}$  以及工作状态中继站集合  $\Gamma$ ；再基于所得  $\{\alpha_{k,m}\}$  计算总功率，若总功率大于最大功率限制，表示接入用户数过多，排除高功耗用户后退出程序并输出  $\{\alpha_{k,m}\}$  和  $\Gamma$ ，则为最后结果。

**第 2 步** 关闭无用户接入的中继站，转入休眠模式，得到剩下可关闭的中继站集合  $\Pi$ 。

**第 3 步** 联合小区呼吸机制，计算 RS  $m^*$  休眠后总发射功率、用户转移后所耗的发射功率和放大器输入功率，若转移用户后放大器输入功率较大，或转移用户的发射功率与总发射功率之比大于  $\gamma$ ，则 RS  $m^*$  不休眠，否则休眠，从而更新  $\{\alpha_{k,m}\}$ 。具体流程如下。

while  $\Pi \neq \emptyset$

$m^* = \arg \min_{m \in \Pi} \text{card}(\Psi_m)$ ；//选出接入用户最少的

RS， $\text{card}(\cdot)$  为计算集合中的元素个数

$Pa_{m^*} = \sum_{k \in \Psi_{m^*}} \bar{p}_k$ ；//RS  $m^*$  的放大器输入功率

$P_{tt} = P_{\text{total}} - \sum_{k \in \Psi_{m^*}} \bar{p}_k / \beta_{m^*}$ ；//除 RS  $m^*$  用户外，

其他用户所需发射功率之和

$P_{\text{change}} = 0$ ；//放大器输入功率

$Pt_{\text{change}} = 0$ ；//用户转移后所需发射功率

$\bar{\Psi}_m = \Psi_m, m = \{0, 1, \dots, M\}$ ； $\bar{\alpha}_{k,m} = \alpha_{k,m}, \forall k, m$ ；

for  $k \in \Psi_{m^*}$

$\tilde{p}_k = \min_{\substack{n \in \Gamma \cup \{0\}, \\ n \neq m^*}} \beta_{k,n} (2^{\frac{R_{\min}-1}{W}}) / \hat{g}_{k,n}$ ；

$n_k = \arg \min_{\substack{n \in \Gamma \cup \{0\}, \\ n \neq m^*}} \beta_{k,n} (2^{\frac{R_{\min}}{W}} - 1) / \hat{g}_{k,n}$ ；

$P_{tt} \leftarrow P_{tt} + \tilde{p}_k / \beta_{n_k}$ ； $P_{\text{change}} \leftarrow P_{\text{change}} + \tilde{p}_k$ ；

$Pt_{\text{change}} \leftarrow Pt_{\text{change}} + \tilde{p}_k / \beta_{n_k}$ ；

$\bar{\Psi}_{m^*} \leftarrow \bar{\Psi}_{m^*} - \{k\}$ ； $\bar{\Psi}_{n_k} \leftarrow \bar{\Psi}_{n_k} + \{k\}$ ； $\bar{\alpha}_{k,n_k} = 1$ ；

$\bar{\alpha}_{k,m^*} = 0$ 。

end for

if  $P_{tt} > P_{\max}$ ，then break while；

else if  $P_{\text{change}} > Pa_{m^*} + P_{cr}^R + P_{ct}^R - P_{cs}$  ||  $Pt_{\text{change}} >$

$\gamma \cdot P_{tt}$ ，then  $\Pi \leftarrow \Pi - \{m\}$ ；

else  $\Gamma \leftarrow \Gamma - \{m\}$ ； $\Pi \leftarrow \Pi - \{m\}$ ； $\Psi_m = \bar{\Psi}_m$ ；

$\alpha_{k,m} = \bar{\alpha}_{k,m}, \forall k, m$ ；

end if

end while

根据最后所得的  $\{\alpha_{k,m}\}$  和  $\Gamma$ ，问题 P2 可以转

换为

$$\begin{aligned} \text{P2: } \dot{U}1 = \max_{\hat{p}_k} & \frac{W \sum_{k=1}^K \text{lb}(1 + \hat{p}_k \hat{g}_{k,m_k^*})}{2P_{ct}^B + (P_{cr}^R + P_{ct}^R) \text{card}(\Gamma) + P_{cs} (M - \text{card}(\Gamma)) + 2KP_{cr}^M + \sum_{k=1}^K \beta_{m_k^*} \hat{p}_k} \quad (25) \\ & \text{s.t. C1', C3', C4'} \end{aligned}$$

比较式(18)和式(25)可知，问题  $\dot{P}1$  的功率分配求解方法同样适用于问题  $\dot{P}2$ ，在此不再赘述。

## 5 仿真与性能分析

假设类型相同且优先级相同的用户分布在整个小区。由于本文所提系统总能效的相关研究成果很少，因此，本节在不同用户分布的场景下，将所提 EJS 方案与穷举法所得到的最优方案进行性能比较。此外，为了分析小区呼吸机制所带来的效益，本文比较了不同用户分布场景下，EJSC 方案、EJS 方案和结合休眠的 EJS 方案的性能。仿真模型与参数如表 1 所示。

图 2 为 4 种典型场景的用户分布。仿真场景是一个包含 6 个 RS 的单小区，6 个中继均匀分布在离基站距离为小区半径的 2/3 处，如图 1 所示。后续仿真分析都是基于这 4 种场景。

由于穷举法的算法复杂度较高且随着用户数的增大而呈指数增长。图 3 的仿真结果给出了  $K=10$ 、 $\gamma=0.5$  的情况下，不同  $R_{\min}$  值时的系统总能效。从图中可以看出，4 种场景中，EJS 方案和穷举法方案对  $R_{\min}$  的变化不敏感，随着  $R_{\min}$  增大能效基本保持不变。EJS 方案比穷举法方案所降低的能效分别为 0.48%、0.3%、0.51%、0.54%。故 EJS 方案逼近最优的穷举法方案，本文所提的基于虚拟链路增益的

表 1 仿真参数

参数	参数值	参数	参数值
BS 间距离	1 000 m	BS-RS 链路信道损失	802.16j EVM Type D
载波频率	2.5 GHz	BS / RS 的天线高度	32 m
系统带宽	10 MHz	MS 的天线高度	1.5 m
BS-RS / RS-MS 链路对数正态阴影衰落	3.4/8 dB	热噪声密度	-174 dBm·Hz <sup>-1</sup>
载波数	200	功放效率 $\eta_B / \eta_R$	0.5/0.3
FFT 采样点数	1 024	BS 发射状态的电路功耗 $P_{cr}^B$	100 W
最大功率限制	78 W	RS 各个状态的电路功耗 $P_{cr}^R / P_{cr}^R / P_{cr}^R$	50 W/30 W/5 W
RS-MS 链路信道损失	Baseline test scenario	MS 接收状态的电路功耗	1 W

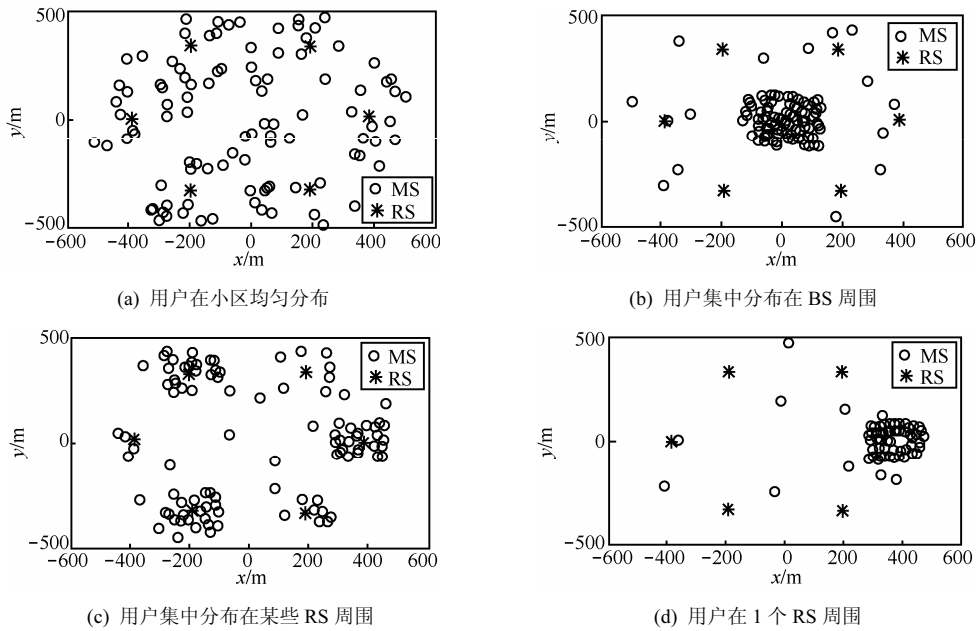


图 2 4 种用户场景分布

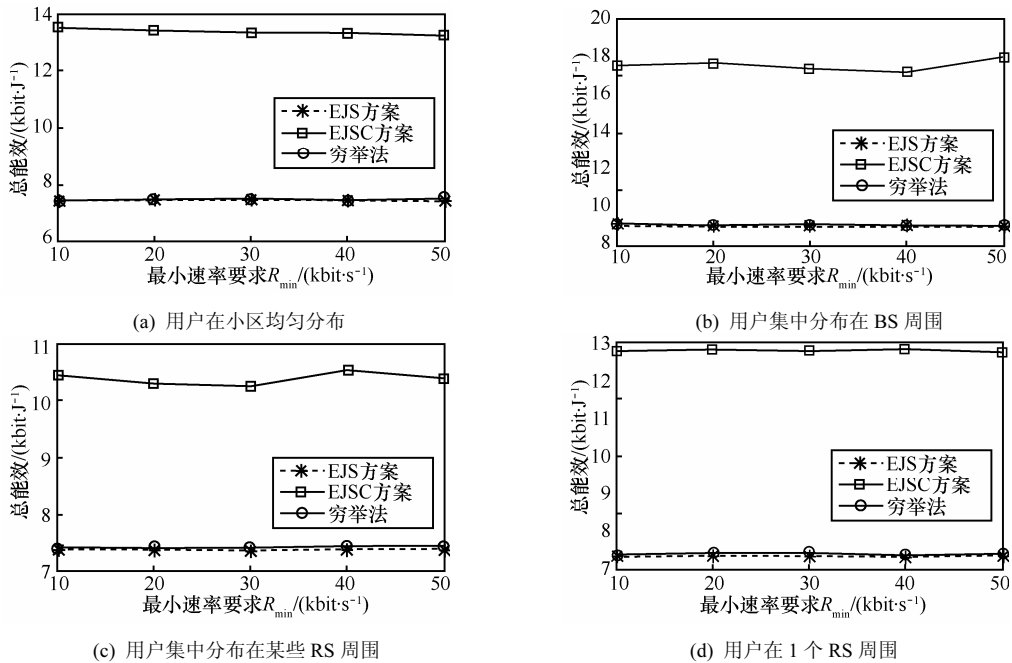


图 3 EJS 方案、EJSC 方案、穷举法的系统总能效

中继选择方法可近似获得中继选择的最优解，尤其是用户集中分布在 RS 周围与穷举法相比，复杂度大大降低。对于 EJSC 方案，能效会随着  $R_{\min}$  的变化而轻微波动。其原因是随着  $R_{\min}$  的增大，所需发射功率增大，当发射功率大于中继的固定电路功率时，需要开启一个中继站来负载过多的业务量，而此时增加了电路功率，必然会引起能效的降低。但是，EJSC 方案所获得的能效依然大于 EJS 方案和基于穷举法的方案所得能效，这说明在各种场景中，结合小区呼吸机制的联合资源分配方案都可以进一步地提升系统的能效。

图 4 比较了不同用户分布场景下，用户数对 EJSC 方案、EJS 方案和结合休眠的 EJS 方案性能的影响。结合休眠的 EJS 方案是指基于 EJS 方案的结果，关闭无用户接入的 RS 使其进行休眠。图 4 中，每个用户的最小速率要求为 50 kbit/s。由图 4 可以看出，在 4 种场景中，EJSC 方案能提升系统能效，当用户数较小时，结合休眠的 EJS 方案较纯 EJS 方案好。随着用户数的增加，4 种场景的 EJSC 方案、EJS 方案和结合休眠的 EJS 方案所得到的系统能效较之前增大，且 EJSC 方案与结合休眠的 EJS 方案

的差距也随之增加，但是 EJS 方案与结合休眠的 EJS 方案差距则随之减小并逐渐重合。其原因是，随着用户数的增加，每个 RS 周围的用户数相应增加，EJS 方案所得的空闲 RS 减少，图 4 (a) 和图 4 (c) 的用户集中在多个站点周围，所以，EJSC 方案与结合休眠的 EJS 方案的曲线重合较快；而图 4 (b) 和图 4 (d) 的用户集中在一个站点周围，EJSC 方案与结合休眠的 EJS 方案的曲线重合较慢。

从联合 CZ 中继选择方法的流程可知，判决系数  $\gamma$  和 RS 的电路功率都决定是否关闭 RS，而 RS 的关闭会对系统能效产生影响。图 5 分析了不同  $P_c^R$  和不同判决系数  $\gamma$  对能效的影响。令  $P_c^R = P_{cr}^R + P_{ct}^R$  表示 RS 一帧内消耗的电路功率，小区中分布的用户数  $K=100$ 。由图 5 可知，当  $P_c^R$  较小且  $\gamma$  值偏大时，EJSC 方案所得到的能效都要低于 EJS 方案。EJSC 的中继选择方案是在保证用户最小速率的情况下，采用用户集中接入，从而减小总功耗。但是， $\gamma$  值偏大表示允许用户以提升较大的发射功率为代价来降低总功耗； $P_c^R$  较小则说明 RS 的电路功率在总功耗中的影响不再是绝对位置，发射功率对能

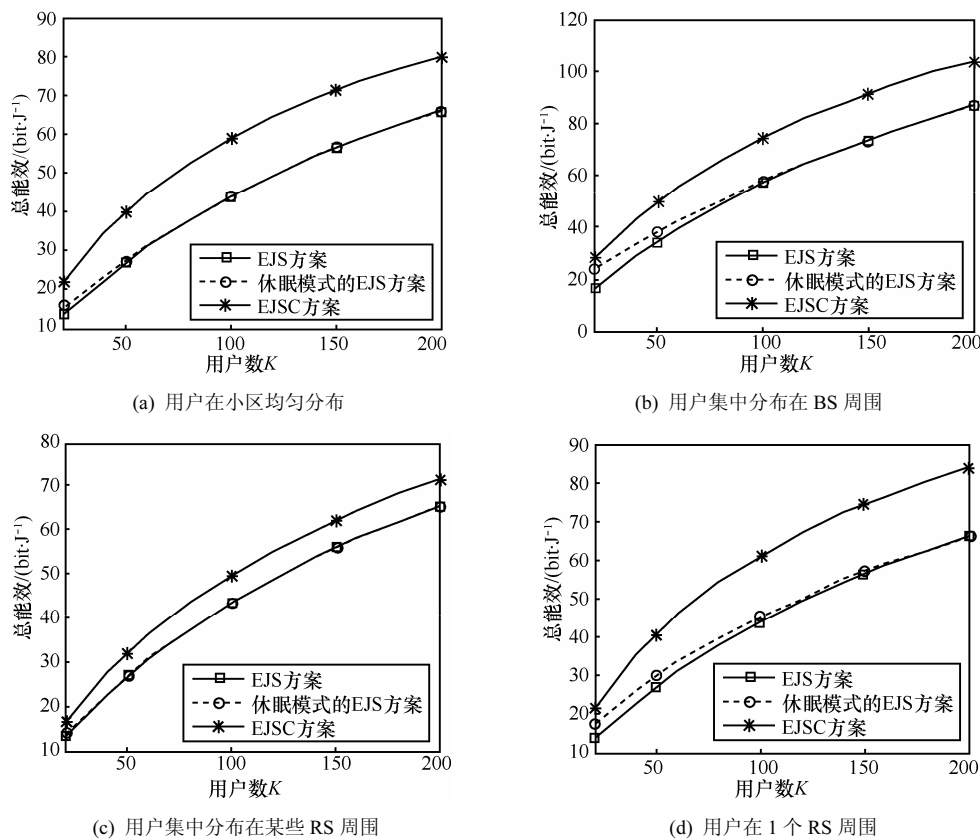


图 4 用户数对不同方案的性能影响

效的影响增大。由于最大发射功率的限制,此时集中接入降低了较少的功耗,但是却以损失了较大的系统吞吐率为代价,从而导致用系统能效的降低。所以当  $P_c^R$  较小时,为了降低用户的集中性,EJSC 方案中  $\gamma$  取较低值可以获得的能效略大于 EJS 方案,图 5 (a) 和图 5 (c) 中  $\gamma$  大概需要小于 0.2,而图 5 (d) 中  $\gamma$  大概只需小于 0.8。随着  $P_c^R$  的增加,用户集中接入所增加的发射功率在系统总功耗中所占比例逐渐减小,对能效的影响也减小,反而电路功率对系统的能效影响增大,因此,EJSC 方案比 EJS 方案能获得较高的能效。其中,在图 5 (a) 和图 5 (d) 中,EJSC 方案所获能效随着  $\gamma$  的增大而增大,而图 5 (c) 中,当  $\gamma > 0.5$  时,能效的增加减缓。图 5 (b) 中,用户大多集中于基站,采用集中接入带来的吞吐率损失较小,无论  $P_c^R$  和  $\gamma$  的取值如何(除了  $P_c^R$  最小,  $\gamma$  最大的那个点),EJSC 方案都优于 EJS 方案。当  $P_c^R$  偏小时,随着  $\gamma$  值的增大,EJSC 方案所获能效略有降低;当  $P_c^R$  足够大时,EJSC 方案所获能效随着  $\gamma$  值的增大而增大,且增幅随着  $P_c^R$  的增大而增大。然而无论哪种场景,RS 功率的增大必然会导致系统能效的降低,其中

的 EJS 方案能效降低得更快。综上所述,在合理的  $\gamma$  取值下,EJSC 方案比 EJS 方案可以更进一步提升系统总能效。

### 6 结束语

本文针对固定 AF 中继系统下行链路,提出了联合中继选择和功率分配方案,从而最大系统的总能效。此外,为了兼顾用户的分布情况,引入了小区呼吸机制,在提升能效的条件下,集中接入用户。本文采用分布式方法解决该联合问题。仿真结果表明,与穷举算法得到的最优结果相比,本文所提算法较好地逼近了最优解,得到了总能效的下边界。此外,结合了小区呼吸的联合问题,可以适应不同的用户分布,更进一步地提升系统能效。本文考虑的是平坦衰落信道,在后续研究中,将关注 AF 和 DF 频率选择性信道下中继小区的资源分配问题,深入研究中继系统下行链路的能效问题。

### 参考文献:

[1] EARTH. EU funded research project FP7-ICT-2009-4-247733-EARTH[EB/OL]. <https://www.ict-earth.eu.2012>.  
 [2] COREIA M L, ZELLER D, BLUME O, *et al.* Challenges and enabling

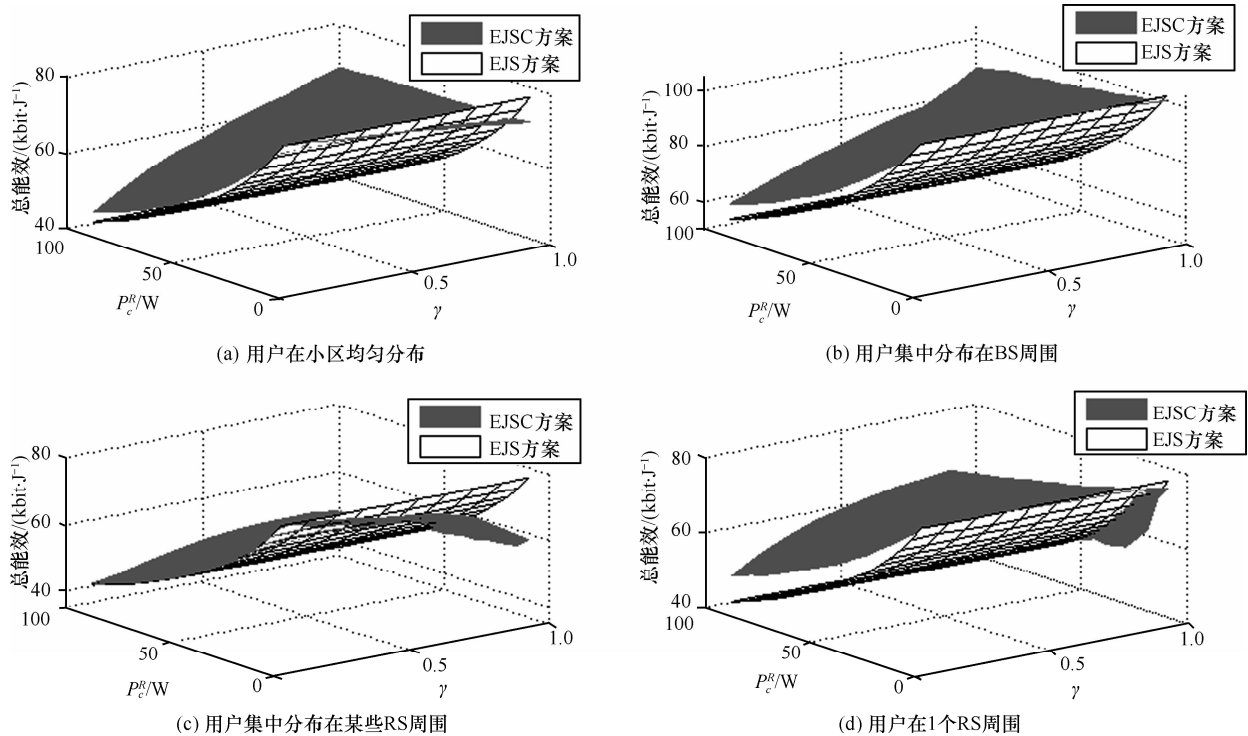
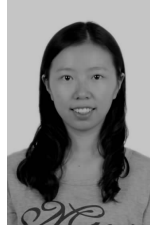


图 5 不同  $P_c^R$  和不同判决系数  $\gamma$  对能效的影响

- technologies for energy aware mobile radio networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2010, 48(11): 66-72.
- [3] AKBARI A, HOSHYAR R. Energy efficient resource allocation in wireless OFDMA system [A]. 21st Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communication[C]. Istanbul, Turkey, 2010.1731-1735.
- [4] MIAO G, HIMAYAT N, LI G Y. Energy efficient link adaptation in frequency selective channel [J]. IEEE Transaction on Communications, 2010, 58(2): 545-554.
- [5] MIAO G, HIMAYAT N, LI G Y, *et al.* Low complexity energy-efficient scheduling for uplink OFDMA [J]. IEEE Transaction on Communications, 2012, 60(1): 112-120.
- [6] XIONG C, LI G Y, ZHANG S, *et al.* Energy-efficient resource allocation in OFDMA networks[A]. IEEE Global Communications Conference (IEEE GLOBECOM) [C]. Houston, Texas, USA, 2011.
- [7] 陈煜, 方旭明, 赵越. 基于能效的 DF 中继 OFDM 链路自适应功率分配[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(2): 285-290.  
CHEN Y, FANG X M, ZHAO Y. Energy efficient adaptive power allocation in OFDM-based decode-and-forward relay link[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(2): 285-290.
- [8] HO C Y, HUANG C Y. Energy efficient subcarrier power allocation and relay selection scheme for OFDMA based cooperative relay networks[A]. Proc IEEE International Conference on Communications (IEEE ICC)[C]. Kyoto, Japan, 2011.
- [9] JIANG Y, ZHANG J, LI X, *et al.* Energy-efficient resource optimization for relay-aided uplink OFDMA systems[A]. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Spring)[C]. Yokohama Japan, 2012.
- [10] ZHOU M, CUI Q, JANTTI R, *et al.* Energy-efficient relay selection and power allocation for two-way Relay channel with analog network coding[J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(6): 816-819.
- [11] DEVARAJAN R, JHA C S, PHUYAL U, *et al.* Energy-aware resource allocation for cooperative cellular network using multi-objective optimization approach[J]. IEEE Transaction on Wireless Communications, 2012, 11(5): 1797-1807
- [12] NIU Z, WU Y, GONG J, YANG Z. Cell zooming for cost-efficient green cellular networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2010, 48(11): 74-79.
- [13] BADIC B, *et al.* Energy efficient radio access architectures for green radio: large versus small cell size deployment[A]. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC'09 Fall)[C]. Anchorage, Alaska, USA, 2009.
- [14] HASNA M O, ALOUINI M S. End-to-end performance of transmission systems with relays over Rayleigh fading channel[J]. IEEE Transaction on Wireless Communication. 2003, 2(6): 1126-1131.
- [15] IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group. IEEE 80216m-08\_004r5. IEEE 802.16m Evaluation Methodology Document (EMD)[S]. 2009.

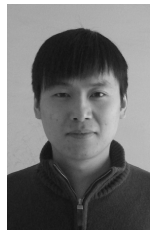
#### 作者简介:



陈煜 (1986-), 女, 湖南郴州人, 西南交通大学博士生, 主要研究方向为下一代通信系统的资源管理、基于能效的资源分配等。



方旭明 (1962-), 男, 浙江义乌人, 博士, 西南交通大学教授、博士生导师, 主要研究方向为无线宽带接入控制、无线资源管理、多跳中继网络、高铁宽带无线接入。



黄博 (1984-), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 西南交通大学博士生, 主要研究方向为下一代无线通信网络。