

## 基于能效的解码转发中继 OFDM 链路自适应功率分配方案研究

陈煜 方旭明 赵越

(西南交通大学信息编码与传输省重点实验室 成都 610031)

**摘要:**在能效问题中,设备本身的电路功耗已成为不可忽略的一部分,故将中继引入无线网络之后势必会带来更严重的电路功耗。该文基于解码转发(DF)中继 OFDM 频率选择性链路,结合电路所耗功率,提出一种最优能效功率分配方法,求得 DF 中继链路能效上界,同时分析了速率和功率限制对能效的影响。仿真结果表明,该文所提基于能效的功率分配算法可求出最大化能效的最优功率解,并能在保证较高速率的同时获得最好的系统能效。

**关键词:**移动通信;能效;解码转发(DF)中继;功率分配;正交频分复用

中图分类号:TN929.5

文献标识码:A

文章编号:1009-5896(2013)02-0285-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.00813

## Energy Efficient Adaptive Power Allocation in OFDM-based Decode-and-forward Relay Link

Chen Yu Fang Xu-ming Zhao Yue

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

**Abstract:** Introducing relay to wireless networks results in severer energy consumption. The circuit power consumption of devices can not be neglected in energy efficient problem. In this paper, Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)-based frequency-selective channel is considered in Decode-and-Forward (DF) relay link. An optimal allocation method is proposed, in which the transmit power in each hop is adaptively allocated to maximize the energy efficiency. The effects of the rate and power constraints on energy efficiency are also analyzed. Simulation results show that the proposed energy efficient power allocation method can achieve the highest energy efficiency while ensuring the high data rate.

**Key words:** Mobile communication; Energy efficiency; Decode-and-Forward (DF) relay; Power allocation; OFDM

### 1 引言

下一代移动通信标准LTE-Advanced, 802.16m中为了提高边界覆盖率和边界速率而引入了中继技术,现有主要的中继技术包括放大转发(AF)中继和解码转发(DF)中继。业内关于中继链路或系统的资源分配问题的研究主要集中在以最大化吞吐率为目标的速率自适应(RA)优化问题上。文献[1]基于DF中继,通过优化载波和功率分配最大化吞吐率。文献[2]基于DF和AF中继,在限制总功率和独立功率的条件下,联合信道匹配和功率分配提升点到点的总速率。

随着“绿色通信”的提出,中继网络的节能问题渐渐成为热点。目前相关研究多为以最小化系统发射功率为目标的边际自适应(MA)优化问题。文献[3,4]分别基于离散调制和连续调制,提出了DF中

继系统的子帧划分和资源分配的联合算法,由此最小化系统发射功率。文献[5]基于DF中继OFDMA系统以及用户QoS需求,联合中继选择,自适应分配功率、子载波,来达到最小能耗。

基于能效的通信在保证速率的同时,不仅可以减小共道干扰,还可以减少散热和电路消耗达到节能目标,故无线通信系统中能效问题越来越引人关注。而以最小功率为目标的MA优化并不能提升系统速率,该情况下的能效并非最理想。目前基于OFDM链路能效问题的研究很少。文献[6-8]联合电路消耗,分析了OFDM链路和OFDMA系统的能效问题。文献[6]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[7]研究了下行OFDMA小区的能效资源分配,基于用户的QoS要求,最大化权重能效。文献[8]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。文献[9]基于OFDMA下行平坦衰落信道,对每个用户进行载波数和功率分配,从而最大化系统总能效。对于OFDM中继系统,文献[10]基于DF

2012-06-25 收到,2012-09-03 改回

国家重点基础研究发展计划项目(2012CB316100)和国家自然科学基金(61071108)资助课题

\*通信作者:陈煜 cherry1593@163.com

协作中继,在保证两跳速率相等的情况下,利用文献[8]的方法进行中继选择和资源分配。综上,在中继系统中,中继的引入虽能提升系统容量,但随着电力设备的增多可能使得耗能更为严重,而且鲜有中继系统的能效问题的研究,各种资源之间相互作用的深层次机理尚有待研究和发现。

本文以最大能效为目标,联合电路功率,研究了 DF 中继链路的功率分配问题。由于 DF 中继链路总速率受限于速率较小的那跳链路,故本文基于香农理论,在证明 DF 中继链路最优功率分配存在且唯一的情况下,提出一种分布式方法,求出 OFDM 频率选择性中继链路上各个载波的最优功率分配方案,从而最大化系统的总能效,并得到中继链路的理论能效上界,同时还分析了最小速率限制和最大功率限制对能效的影响。

### 2 系统问题建模

本文考虑由单源节点(SN)、单中继节点(RN)和单目标节点(DN)组成的中继链路,RN 位于 SN 与 DN 的连线上,如图 1 所示。RN 采用半双工 DF 模式。每个传输帧包含两个子帧,第 1,第 2 子帧分别分配给 SN-RN(第 1 跳),RN-DN(第 2 跳)链路。假设两跳链路分别有  $K_1, K_2$  个载波,每跳链路的总带宽为  $W$ 。数据在 OFDM 频选信道上进行传输,并假设一帧内信道状态保持不变。SN 收集所有的信道状态信息,并由此决定每个载波每跳的发射功率。

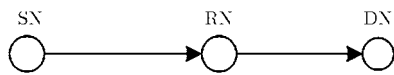


图 1 系统模型

定义第 1 跳链路载波  $i$  上的发射功率为  $p_i^s$ ,第 2 跳链路载波  $j$  上的发射功率为  $p_j^r$ ,则第 1,第 2 跳链路上所有载波的发射功率向量为

$$P_1 = [p_1^s, p_2^s, \dots, p_{K_1}^s]^T \quad (1)$$

$$P_2 = [p_1^r, p_2^r, \dots, p_{K_2}^r]^T \quad (2)$$

且  $P_1 \in R_+^{K_1}, P_2 \in R_+^{K_2}, R_+^n$  表示  $n$  维非负实数空间。假设噪声功率谱密度为  $N_0$ ,则每跳速率为

$$R_1(P_1) = \sum_{i=1}^{K_1} \frac{W}{2K_1} \log_2(1 + p_i^s g_i^s) \quad (3)$$

$$R_2(P_2) = \sum_{j=1}^{K_2} \frac{W}{2K_2} \log_2(1 + p_j^r g_j^r) \quad (4)$$

其中  $g_i^s = \frac{K_1 |H_i^s|^2}{N_0 W}, g_j^r = \frac{K_2 |H_j^r|^2}{N_0 W}$  分别表示两跳链路的信道增益,而  $|H_i^s|^2, |H_j^r|^2$  分别表示两跳链路的功

率增益。在统计概念下,可以得到 DF 中继链路的总速率为

$$Rt(P_1, P_2) = \min \{R_1(P_1), R_2(P_2)\} \quad (5)$$

传输数据时,设备都附加有电路功率,但此功率与系统的传输状态无关<sup>[6]</sup>。该电路功率包含了发射功率时所需的设备电力消耗,但不包含功率放大器的消耗。定义整个中继链路的电路功率为  $P_c$ ,功放效率为  $\varsigma$ ,则系统消耗的总功率为

$$P_{total} = P_c + P_T = P_c + \frac{1}{\varsigma} \left( \sum_{i=1}^{K_1} p_i^s + \sum_{j=1}^{K_2} p_j^r \right) \quad (6)$$

能效通信的目标是在一定能耗下最大化系统的总传输速率。由于半双工中继链路用两个子帧进行传输,故在  $2\Delta t$  时间内系统耗能为  $\Delta e = \Delta t \cdot P_{total}$ 。而 SN 通过合理分配每跳载波的发送功率,使得在  $2\Delta t$  时间内消耗  $\Delta e$  焦耳能量的同时尽可能传输最多的数据,从而最大化能效  $U(P_1, P_2)$ ,即

$$U(P_1, P_2) = \frac{Rt(P_1, P_2) \cdot 2\Delta t}{\Delta e} = \frac{2Rt(P_1, P_2)}{P_{total}} \quad (7)$$

亦即每单位焦耳所能传输的比特数,其单位是 bit/J。故本文的目标是自适应分配系统的功率从而最大化系统能效,即

$$(P_1^*, P_2^*) = \arg \max_{P_1, P_2} U(P_1, P_2) = \arg \max_{P_1, P_2} \frac{2Rt(P_1, P_2)}{P_c + P_T} \quad (8)$$

### 3 基于能效的功率分配

基于第 2 节所提问题,本节证明最优能效功率向量存在且唯一,并提出 DF 中继链路的最优能效功率分配方案。

#### 3.1 最优值的存在性

由文献[11]和式(5)可知,  $R_1(P_1), R_2(P_2)$  分别在  $P_1, P_2$  上是严格凹的,其变量维度分别为  $K_1, K_2$ ,但函数  $Rt(P_1, P_2)$  的变量维度为  $K_1 + K_2$ ,为了方便分析,在不改变原函数性质的条件下,将函数  $R_1(P_1), R_2(P_2)$  的变量扩展到  $K_1 + K_2$  维。设  $\bar{P} = \{p_1, p_2, \dots, p_{K_1+K_2}\} = \{P_1, P_2\}$  是  $K_1 + K_2$  维的变量,则

$$\tilde{R}_1(\bar{P}) = \sum_{i=1}^{K_1+K_2} \frac{W}{2} \log_2(1 + p_i \tilde{g}_i^s) \quad (9)$$

$$\tilde{R}_2(\bar{P}) = \sum_{i=1}^{K_1+K_2} \frac{W}{2} \log_2(1 + p_i \tilde{g}_i^r) \quad (10)$$

且当  $i = K_1 + 1, K_1 + 2, \dots, K_1 + K_2$  时,令  $\tilde{g}_i^s \rightarrow 0$ ,当  $j = 1, 2, \dots, K_1$ ,令  $\tilde{g}_j^r \rightarrow 0$ ,由此使其凹性不变,可得  $\tilde{R}_1(\bar{P}_1) > 0, \tilde{R}_1(\bar{P}_1) < 0, \tilde{R}_2(\bar{P}_2) > 0, \tilde{R}_2(\bar{P}_2) < 0$ ,且链路总速率为

$$Rt(\bar{P}) = \min \{ \tilde{R}_1(\bar{P}), \tilde{R}_2(\bar{P}) \} \quad (11)$$

其最优结果与式(5)相同,原目标函数重写为

$$(\tilde{\mathbf{P}}^*) = \arg \max_{\tilde{\mathbf{P}}} U(\tilde{\mathbf{P}}) = \arg \max_{\tilde{\mathbf{P}}} \frac{2Rt(\tilde{\mathbf{P}})}{P_c + P_T} \quad (12)$$

引理 1 若  $\tilde{R}_1(\tilde{\mathbf{P}}), \tilde{R}_2(\tilde{\mathbf{P}})$  是定义在  $\tilde{\mathbf{P}}$  上单调递增的严格凹函数, 则  $Rt(\tilde{\mathbf{P}}) = \min\{\tilde{R}_1(\tilde{\mathbf{P}}), \tilde{R}_2(\tilde{\mathbf{P}})\}$  是定义在  $\tilde{\mathbf{P}}$  上非减的严格凹函数。

证明 由于  $\tilde{R}_1(\tilde{\mathbf{P}}), \tilde{R}_2(\tilde{\mathbf{P}})$  是定义在  $\tilde{\mathbf{P}}$  上单调递增的严格凹函数, 由文献[11]可得

$$\tilde{R}_1(\theta \cdot \mathbf{a}_1 + (1-\theta) \cdot \mathbf{a}_2) > \theta \cdot \tilde{R}_1(\mathbf{a}_1) + (1-\theta) \cdot \tilde{R}_1(\mathbf{a}_2)$$

$$\tilde{R}_2(\theta \cdot \mathbf{b}_1 + (1-\theta) \cdot \mathbf{b}_2) > \theta \cdot \tilde{R}_2(\mathbf{b}_1) + (1-\theta) \cdot \tilde{R}_2(\mathbf{b}_2)$$

其中  $0 \leq \theta \leq 1, \mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2 \in \text{dom} \tilde{R}_1, \mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2 \in \text{dom} \tilde{R}_2$ 。

由式(12)可知,  $\text{dom} Rt = \text{dom} \tilde{R}_1 \cap \text{dom} \tilde{R}_2$  也是非空凸集。假设  $0 \leq \theta \leq 1$ , 任意变量  $\tilde{\mathbf{p}}_1, \tilde{\mathbf{p}}_2 \in \text{dom} Rt$ , 可得

$$\begin{aligned} & Rt(\theta \cdot \tilde{\mathbf{p}}_1 + (1-\theta) \cdot \tilde{\mathbf{p}}_2) \\ &= \min\{\tilde{R}_1(\theta \cdot \tilde{\mathbf{p}}_1 + (1-\theta) \cdot \tilde{\mathbf{p}}_2), \\ & \quad \tilde{R}_2(\theta \cdot \tilde{\mathbf{p}}_1 + (1-\theta) \cdot \tilde{\mathbf{p}}_2)\} \\ &> \min\{\theta \cdot \tilde{R}_1(\tilde{\mathbf{p}}_1) + (1-\theta) \cdot \tilde{R}_1(\tilde{\mathbf{p}}_2), \\ & \quad \theta \cdot \tilde{R}_2(\tilde{\mathbf{p}}_1) + (1-\theta) \cdot \tilde{R}_2(\tilde{\mathbf{p}}_2)\} \\ &\geq \theta \min\{\tilde{R}_1(\tilde{\mathbf{p}}_1), \tilde{R}_2(\tilde{\mathbf{p}}_1)\} + (1-\theta) \\ & \quad \cdot \min\{\tilde{R}_1(\tilde{\mathbf{p}}_2), \tilde{R}_2(\tilde{\mathbf{p}}_2)\} \\ &= \theta \cdot Rt(\tilde{\mathbf{p}}_1) + (1-\theta) \cdot Rt(\tilde{\mathbf{p}}_2) \end{aligned}$$

故  $Rt(\tilde{\mathbf{P}})$  是定义在  $\tilde{\mathbf{P}}$  上的非减严格凹函数。证毕

通过引理 1 的结果可知  $Rt'(\tilde{\mathbf{P}}) > 0, Rt''(\tilde{\mathbf{P}}) < 0$ , 可得如下结论。

定理 1 若  $Rt(\tilde{\mathbf{P}})$  是定义在  $\tilde{\mathbf{P}}$  上的严格凹函数, 则  $U(\tilde{\mathbf{P}})$  是定义在  $\tilde{\mathbf{P}}$  上的严格拟凹函数, 且对于公式(12)存在唯一的全局最优功率分配向量  $\tilde{\mathbf{P}}^*$ 。

证明 其证明方法与文献[6]中定理 1 证明类似, 这里不再赘述。

### 3.2 最优功率分配方法

由于 DF 中继链路中链路总速率受限于两跳链路中较小的速率, 为了节约资源, 令两跳链路速率相等, 则原始优化问题式(8)转变为

$$\begin{aligned} \max_{\tilde{\mathbf{P}}} U(\tilde{\mathbf{P}}) &= \frac{2(\tilde{R}_1(\tilde{\mathbf{P}}) + \tilde{R}_2(\tilde{\mathbf{P}}))}{2(P_c + P_T)}, \\ \text{s.t. } R_1(\tilde{\mathbf{P}}) &= R_2(\tilde{\mathbf{P}}) \end{aligned} \quad (13)$$

由于  $\tilde{R}_1(\tilde{\mathbf{P}}_1), \tilde{R}_2(\tilde{\mathbf{P}}_2)$  保持原函数  $R_1(\mathbf{P}_1), R_2(\mathbf{P}_2)$  的性质不变, 则公式(13)可变为

$$\begin{aligned} \max_{\tilde{\mathbf{P}}} U(\tilde{\mathbf{P}}) &= \frac{2R_1(\mathbf{P}_1)}{\left(P_c + \frac{1}{\varsigma} \left(\sum_{i=1}^{K_1} p_i^s + \sum_{j=1}^{K_2} p_j^r\right)\right)} \\ &\stackrel{\text{或}}{=} \frac{2R_2(\mathbf{P}_2)}{\left(P_c + \frac{1}{\varsigma} \left(\sum_{i=1}^{K_1} p_i^s + \sum_{j=1}^{K_2} p_j^r\right)\right)}, \\ \text{s.t. } R_1(\mathbf{P}_1) &= R_2(\mathbf{P}_2) \end{aligned} \quad (14)$$

则最优能效为

$$\begin{aligned} U^*(\tilde{\mathbf{P}}^*) &= \max_{\mathbf{P}_1} \frac{2R_1(\mathbf{P}_1)}{\left(P_c + \frac{1}{\varsigma} \left(\sum_{i=1}^{K_1} p_i^s + \min_{\mathbf{P}_2} \sum_{j=1}^{K_2} p_j^r\right)\right)} \\ &\stackrel{\text{或}}{=} \max_{\mathbf{P}_2} \frac{2R_2(\mathbf{P}_2)}{\left(P_c + \frac{1}{\varsigma} \left(\min_{\mathbf{P}_1} \left(\sum_{i=1}^{K_1} p_i^s\right) + \sum_{j=1}^{K_2} p_j^r\right)\right)}, \\ \text{s.t. } R_1(\mathbf{P}_1) &= R_2(\mathbf{P}_2) \end{aligned} \quad (15)$$

由于直接求解算法复杂度较高, 故采用分布式方法求解。先求出其中某一跳链路能效最大时该链路的功率向量, 再根据其功率分配结果所得的速率, 求出另一跳链路在等于该速率时使得总功率最小的功率向量。最后比较基于各跳链路所求出的结果, 能效最大的结果为问题式(15)的最优解。具体方法如下:

步骤 1 求解第 1 跳链路的基于能效的最优功率向量:  $\mathbf{P}_1^* = \arg \max_{\mathbf{P}_1} \left[ R_1(\mathbf{P}_1) / \left( P_c + \frac{1}{\varsigma} \sum_{i=1}^{K_1} p_i^s \right) \right]$ 。

由文献[6]可知, 该能效函数也是拟凹函数, 且存在一个全局最优解, 故采用文献[6]中的基于二分搜索的上升(BSAA)算法来求解。

步骤 2 利用步骤 1 所得的功率向量求出第 1 跳链路的速率, 在两跳速率相等的条件下, 以最小发送总功率为目标, 求出第 2 跳的功率向量:  $\mathbf{P}_2^* = \arg \min_{\mathbf{P}_2} \sum_{i=1}^{K_2} p_i^r, \text{ s.t. } R_2(\mathbf{P}_2) = R_1(\mathbf{P}_1^*)$ 。

引入拉格朗日乘子  $\lambda$ , 将有约束条件问题变为无约束条件问题  $L(\mathbf{P}_2, \lambda)$ , 关于  $p_i^r, i=1, \dots, K_2$ , 对  $L(\mathbf{P}_2, \lambda)$  进行求导并令其为 0, 然后联合限制条件构成  $K_2+1$  个等式, 利用文献[12]的牛顿算法求最优解  $(\mathbf{P}_2^*, \lambda^*)$ , 从而得出第 2 跳功率分配向量  $\mathbf{P}_2^*$ 。

步骤 3 同理, 先求解第 2 跳链路的基于能效的最优功率分配及速率, 再基于此求出第 1 跳链路的功率向量:  $\mathbf{P}_2^{**} = \arg \max_{\mathbf{P}_2} \left[ R_2(\mathbf{P}_2) / \left( P_c + \frac{1}{\varsigma} \sum_{i=1}^{K_2} p_i^r \right) \right]$ ,

$\mathbf{P}_1^{**} = \arg \min_{\mathbf{P}_1} \sum_{i=1}^{K_1} p_i^s, \text{ s.t. } R_1(\mathbf{P}_1) = R_2(\mathbf{P}_2^{**})$ 。具体解法如步骤 1 和步骤 2。

步骤 4 基于第 1 跳链路(步骤 1、步骤 2)所得总能效与基于第 2 跳链路(步骤 3、步骤 4)所得总能效不同, 由于本文目标是最优能效, 故需要取其中较大的值, 而相应的功率分配结果则是最优发送功率向量。故可得最优能效为

$$U^* = \max \left\{ \frac{2R_1(\mathbf{P}_1^*)}{P_c + \frac{1}{\varsigma} \left( \sum_{i=1}^{K_1} p_i^{s*} + \sum_{i=1}^{K_2} p_i^{r*} \right)}, \frac{2R_2(\mathbf{P}_2^{**})}{P_c + \frac{1}{\varsigma} \left( \sum_{i=1}^{K_1} p_i^{s**} + \sum_{i=1}^{K_2} p_i^{r**} \right)} \right\}$$

若

$$U^* = \frac{2R_1(\mathbf{P}_1^*)}{P_c + \frac{1}{\varsigma} \left( \sum_{i=1}^{K_1} p_i^{s*} + \sum_{i=1}^{K_2} p_i^{r*} \right)}, \quad \tilde{\mathbf{P}}^* = (\mathbf{P}_1^*, \mathbf{P}_2^*)$$

否则,  $\tilde{\mathbf{P}}^* = (\mathbf{P}_1^{**}, \mathbf{P}_2^{**})$ 。

由文献[6]可知, 每跳链路的能效函数是个先递增再递减或一直递减的严格拟凹函数, 故步骤 1 和步骤 3 采用 BSAA 方法寻求最优解时通过很少的迭代次数就能寻找到最优解。而步骤 2 和步骤 4 所用的牛顿算法每次迭代的算法复杂度分别为  $O(K_1)$ ,  $O(K_2)$ 。

#### 4 有限制条件的情形

本节联合最小速率限制或最大功率限制, 研究基于能效的链路功率分配问题。若无限制条件问题式(8)的最优解满足限制条件, 则这个最优解也是有限制条件问题的解; 若不满足, 则有限制条件的能效问题可以转化为 MA 或 RA 优化问题。

##### 4.1 最小速率限制情形

假设最小速率限制为  $R_r$ , 若无限制条件问题式(8)的最优解不能满足限制条件, 则最大能效问题转化为 MA 优化问题。

$$\begin{aligned} (\tilde{\mathbf{P}}^*) &= \arg \min_{\tilde{\mathbf{P}}} \sum_{i=1}^{K_1} p_i^s + \sum_{j=1}^{K_2} p_j^r, \\ \text{s.t. } R_1(\mathbf{P}_1) &= R_2(\mathbf{P}_2) = R_r \end{aligned} \quad (16)$$

在 DF 中继链路中, 由于 DF 中继会进行解调制再编码调制, 在已知速率的情况下可以分别求两跳链路的功率分配, 如下所示:

$$(\mathbf{P}_1^*) = \arg \min_{\mathbf{P}_1} \sum_{i=1}^{K_1} p_i^s, \quad \text{s.t. } R_1(\mathbf{P}_1) = R_r \quad (17)$$

$$(\mathbf{P}_2^*) = \arg \min_{\mathbf{P}_2} \sum_{j=1}^{K_2} p_j^r, \quad \text{s.t. } R_2(\mathbf{P}_2) = R_r \quad (18)$$

通过 3.2 节步骤 2 的解法可得最优功率向量  $(\mathbf{P}_1^*, \mathbf{P}_2^*)$ 。

##### 4.2 最大功率限制情形

假设 SN 的最大发射功率限制为  $P_S$ , RN 的最大发射功率限制为  $P_R$ , 若无限制条件问题式(8)的最优

解不能满足限制条件, 则最大能效问题转化为 RA 优化问题:

$$\begin{aligned} (\tilde{\mathbf{P}}^*) &= \arg \max_{\tilde{\mathbf{P}}} Rt(\tilde{\mathbf{P}}), \\ \text{s.t. } \sum_{i=1}^{K_1} p_i^s &= P_S, \quad \sum_{i=1}^{K_2} p_i^r = P_R \end{aligned} \quad (19)$$

该问题可采用分布式的算法进行求解, 先基于每跳链路的功率限制, 求出该跳可支持的最大速率, 由于 DF 中继链路的总速率受限于速率较小的链路, 故需降低速率较大链路的功率, 使得两跳链路速率相等。具体方法如下:

步骤 1 基于 SN, RN 的功率限制  $P_S$ ,  $P_R$ , 分别求出第 1, 第 2 跳链路所能得到的最大速率  $C_1$ ,  $C_2$ , 以及此时所对应的功率向量  $\mathbf{P}_1^*$ ,  $\mathbf{P}_2^*$ :  $C_1 = \max_{\mathbf{P}_1} R_1(\mathbf{P}_1)$ ,  $\mathbf{P}_1^* = \arg \max_{\mathbf{P}_1} R_1(\mathbf{P}_1)$ , s.t.  $\sum_{i=1}^{K_1} p_i^s = P_S$ ;  $C_2 = \max_{\mathbf{P}_2} R_2(\mathbf{P}_2)$ ,  $\mathbf{P}_2^* = \arg \max_{\mathbf{P}_2} R_2(\mathbf{P}_2)$ , s.t.  $\sum_{j=1}^{K_2} p_j^r = P_R$ 。解法如 3.2 节的步骤 2。

步骤 2 由于 DF 中继链路的总速率等于较小链路的速率, 故中继链路的总速率为:

$C^* = \min\{C_1, C_2\}$ ; 若总速率等于第 1 跳链路的速率, 则需降低第 2 跳链路速率。在速率等于  $C^*$  的情况下, 以该跳总发送功率最小为目标, 更新第 2 条链路的功率向量, 即: 若  $C^* = C_1$ ,

$$\mathbf{P}_2^* = \arg \min_{\mathbf{P}_2} \sum_{i=1}^{K_2} p_i^r, \quad \text{s.t. } R_2(\mathbf{P}_2) = C^*$$

同理, 若总速率等于第 2 跳链路的速率, 更新第 1 跳链路的功率分配向量, 即: 若  $C^* = C_2$ ,  $\mathbf{P}_1^* = \arg \min_{\mathbf{P}_1} \sum_{i=1}^{K_1} p_i^s$ , s.t.  $R_1(\mathbf{P}_1) = C^*$ 。由此得最优功率分配:  $\tilde{\mathbf{P}}^* = (\mathbf{P}_1^*, \mathbf{P}_2^*)$ 。

#### 5 仿真验证

由于本文是特定中继场景下的链路仿真分析, 其参数不完全对等于 LTE 或 WiMAX 系统设计中实际仿真参数, 所以只有部分参数参考了文献[13], 具体参数见表 1。本节仿真主要分析速率限制和功率限制对能效的影响。比较基于能效的功率分配问题和 MA, RA 优化问题。主要比较以下几个方案: 方案 1: 无限制时基于能效的功率分配; 方案 2: 速率受限时基于能效的功率分配; 方案 3: 功率受限时基于能效的功率分配; 方案 4: 速率受限时最小总发射功率的功率分配(MA 优化); 方案 5: 功率受限时最大总吞吐率的功率分配(RA 优化)。

图 2, 图 3 分析限制条件对能效的影响, 并对能效问题与 RA, MA 优化进行了比较。假设 SN 与

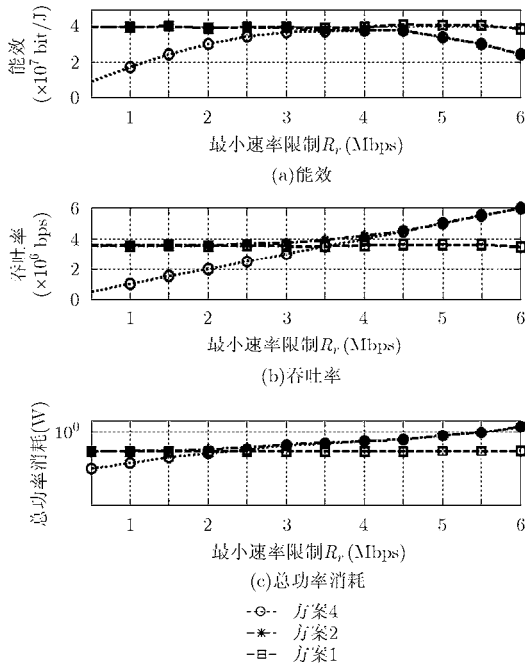


图2 速率限制对能效、吞吐率、总功率消耗的影响

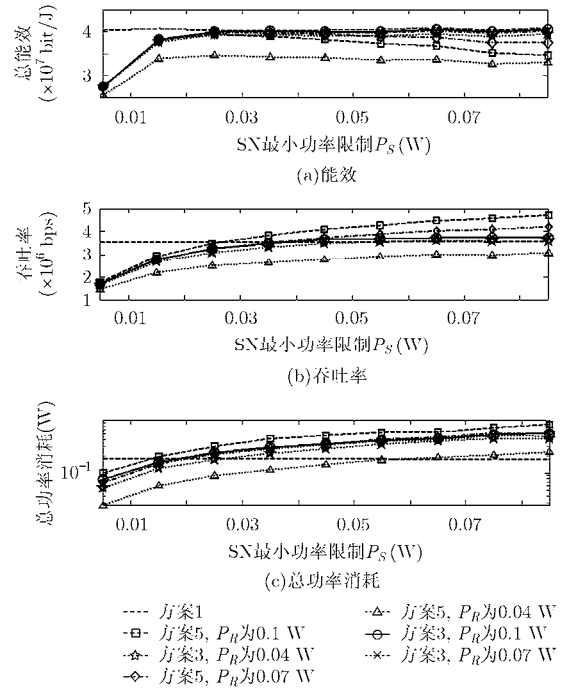


图3 功率限制对能效、吞吐率、总功率消耗的影响

表1 仿真参数

参数	假设值
载波频率	2.5 GHz
系统带宽	2 MHz
SN-RN /RN-DN 链路 对数正态阴影衰落	3.4/8 dB
SN-RN /RN-DN 链路的载波数	128/256
多径数	3
RN-DN 链路信道损失	Baseline test scenario
SN-RN 链路信道损失	802.16j EVM Type D
SN 和 RN 的天线高度	32 m
DN 的天线高度	1.5 m
热噪声密度	-174 dBm·Hz <sup>-1</sup>
功放效率	0.5
总的电路功耗	0.1 W

RN 的距离是 1000 m, RN 与 DN 的距离是 500 m。图 2 分析了速率限制的影响。从图 2(a)可知由于方案 1 是无限制时的功率分配, 速率限制对其没有影响, 故能效一直保持不变。而在方案 4 中随着速率限制增大, 能效先增大后减小, 在速率为 3.5 Mbps 左右达到最优, 且该方案的最大值与方案 1 的值重合, 由此可证方案 1 所得为最优值。方案 2 的能效前半段结果与方案 1 一致, 后半段结果与方案 4 一致。这是由于在限制速率较小时, 基于无限制条件能效问题求出的最优解满足速率限制条件, 则该最优解也是速率限制能效问题的最优解。但是随着速

率限制的增大, 最优解不再满足限制条件, 则速率限制能效问题的最优解则是 MA 优化的最优解。从图 2(b)和图 2(c)中可以看出速率限制能效问题所得到的吞吐率和总功耗大于或等于 MA 优化。

图 3 分析功率限制对能效的影响。从图 3(a)中可以看出在中继链路中, SN 和 RN 的功率限制同时影响了能效。当 RN 的功率限制  $P_R$  很小时, 随着 SN 的功率限制  $P_S$  增大, 由式(5)和 4.2 节步骤 2 可知, 若 SN 的功率限制变大, 总吞吐率也仅与较小的那跳速率有关, 且总功率与 SN 功率限制的相关性越小, 此时方案 5 的发送功率、吞吐率增长缓慢, 从而导致了能效后半段基本不变。随着 RN 的增大, 方案 5 的发送功率和吞吐率都随着  $P_S$  增加而增加, 但是当  $P_S$  超过一定值后, 由于功率增长速率快于吞吐率的增长速率, 导致了能效的减小。方案 3 中随着  $P_R$  的增加总功耗和吞吐率先增加达到一定值后保持不变, 而随着  $P_S$  的增加总功耗一直增加, 吞吐率趋于平缓; 但能效则随着  $P_R$  和  $P_S$  的增加而增加, 当达到一定值后保持不变与方案 1 所得结果相同, 由此可知, 即使功率限制足够大, 为保证高能效, 也应该采用低功率发送。

图 4, 图 5 分析限制条件对最优能效中继位置的影响。SN 到 DN 的距离为 1500 m。由于两跳链路采用不同的路径衰落模型, 第 1 跳仅有视距传输, 而第 2 跳考虑了非视距传输, 多次求均值后, 仿真得出无限制时最优能效的中继位置接近 1100 m。从图 4 中可以看出, 速率限制的不同, 只对系统能效大小有影响, 而对最优能效中继位置没有影响, 且

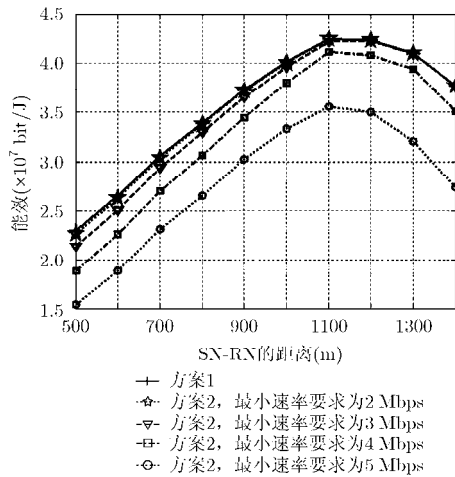


图4 速率限制对最优能效中继位置的影响

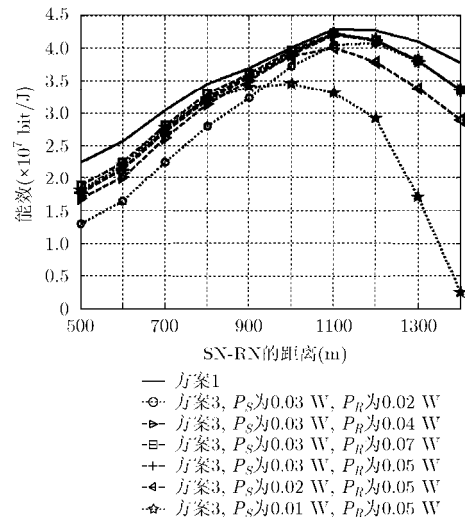


图5 功率限制对最优能效中继位置的影响

速率限制越小能效越大。而从图5可以看出,功率限制不仅仅对系统能效大小有影响,而对最优能效中继位置也有影响。当 $P_R$ 恒定时,最优能效中继位置随着 $P_S$ 的增大而右移,而最优能效随之增大;当 $P_S$ 恒定时,最优能效中继位置随着 $P_R$ 的增大而左移,而最优能效也随之增大。

## 6 结束语

本文基于DF中继OFDM链路联合电路功耗,以能效最大为目标,进行功率分配。本文提出了一种分布式功率分配方法。分别基于每跳链路求出系统总能效,取能效较大的分配方案为最优的分配结果。对于含限制条件的情形,若原目标函数的最优解不满足限制条件,则含限制条件的能效问题则变为MA或RA优化问题。仿真结果显示,本文所得解是最优的功率分配方案并且在能效上得到了较大提升。本文所提方法对于只有2跳的中继系统,算法复杂度较低,只需计算两次,若为 $N$ 跳链路,则需进行 $N$ 次计算才能得结果。

## 参考文献

- [1] Wang Tao and Vandendorpe L. Sum rate maximized resource allocation in multiple DF relays aided OFDM transmission[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2011, 29(8): 1559-1571.
- [2] Hajiaghayi M, Dong Min, and Liang Ben. Jointly optimal channel pairing and power allocation for multichannel multihop relaying[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, 59(10): 4998-5012.
- [3] Muller C, Klein A, Wegner F, et al. Dynamic subcarrier, bit and power allocation in OFDMA-based relay networks[C]. 12th International OFDM Workshop, Hamburg, Germany, August 29-30, 2007: 1-5.
- [4] Girici T. Joint power, subcarrier and subframe allocation in Multihop relay networks[J]. *International Journal of Communication Systems*, 2009, 22(7): 835-855.
- [5] Huang Bo, Fang Xu-ming, and Chen Yu. An energy saving

radio resource allocation in OFDMA-based cellular relay networks[C]. 2011 Fifth International Workshop on Signal Design and Its Application in Communications, Guilin, China, Oct. 10-14, 2011: 189-192.

- [6] Miao Guo wang, Himayat N, and Li G Y. Energy efficient link adaptation in frequency selective channel[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2010, 58(2): 545-554.
- [7] Xiong Cong, Li G Y, Zhang Shun-qing, et al. Energy-efficient resource allocation in OFDMA networks[C]. IEEE Globecom, Houston, Texas, USA, December 5-9, 2011: 1-5.
- [8] Miao Guo-wang, Himayat N, Li G Y, et al. Low complexity energy-efficient scheduling for uplink OFDMA[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2012, 60(1): 112-120.
- [9] Akbari A and Hoshyar R. Energy efficient resource allocation in wireless OFDMA system[C]. 21st Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communication, Istanbul, Turkey, September 26-29, 2010: 1731-1735.
- [10] Chieh Yuan-ho and Ching Yao-huang. Energy efficient subcarrier power allocation power allocation and relay selection scheme for OFDMA based cooperative relay networks[C]. IEEE International Conference on Communications, Kyoto, Japan, June 5-9, 2011: 1-6.
- [11] Boyd S and Vandenberghe L. Convex Optimization[M]. United Kingdom: Cambridge University Press, 2004, Chapter 3-4.
- [12] 张光澄. 非线性最优化计算方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005, 第4章.  
Zhang Guang-cheng. Nonlinear Optimization Method[M]. Beijing: High Education Press, 2005, Chapter 4.
- [13] IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group. IEEE 80216m-08\_004r5. IEEE 802.16m Evaluation Methodology Document (EMD)[S]. 2009.

陈煜: 女, 1986年生, 博士生, 研究方向为无线多跳中继网络的资源管理。

方旭明: 男, 1962年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为无线接入控制、无线资源管理、无线多跳中继技术等。

赵越: 男, 1983年生, 博士生, 研究方向为下一代无线通信网络的资源管理。