

# 改进的 OFDM 双向中继功率分配策略

潘沛生 赵喜凤

(南京邮电大学通信与信息工程学院 南京 210003)

**摘要** 针对放大转发(AF)模式下正交频分复用(OFDM)双向中继网络如何提高系统总容量的问题,提出了一种低复杂度的以系统总速率最大化为目标的最优功率分配策略。该策略先建立用户与中继节点间的最优功率分配比例关系,将三层功率最优化问题简化为一层最优化问题,实现了将节点上的功率优化分配问题转化成一种易于处理的形式,以较小的复杂度获得了各节点上分配的功率占所在子载波对上分配的功率的比重;然后利用原对偶内点法求解各子载波间的功率分配问题;最终,求得各节点最优的功率分配。仿真实验表明,所提算法能显著提升系统总速率,且其性能随子载波数的增多而提升。

**关键词** 双向中继,正交频分复用,功率分配,子载波匹配,系统总速率,原对偶内点法

**中图分类号** TP929.53 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.7.031

## Improved Power Allocation Strategy in OFDM Two-way Relaying

PAN Pei-sheng ZHAO Xi-feng

(College of Communication & Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

**Abstract** In order to improve the system sum-capacity of amplify-and-forward scheme for two-way relaying over orthogonal frequency division multiplexing (OFDM), this paper developed a new power allocation strategy with low complexity to maximize the total system rate. This strategy firstly builds a linear power relation between S-R and R-S to simplify the optimization problem from three layers to a layer, so the power allocation problem can be reformulated into a more tractable form and the power proportion between each node and the sub-carrier is obtained with low complexity. Then under the total power constraint, it employs the primal-dual interior-point methods to obtain the power allocation of each sub-carrier pair, and finally it allocates the power of each sub-carrier pair to all nodes. Simulation results show that the proposed power allocation strategy can significantly improve the total system rate, and the performance is improved as the number of sub-carrier increases.

**Keywords** Two-way relaying, OFDM, Power allocation, Subcarrier matching, Total system rate, Primal-dual interior-point methods

## 1 引言

由于协作中继具有可以提高系统频谱效率、增大覆盖半径和节省无线资源等诸多优势,近年来将中继技术引入无线通信网络已经成为通信技术领域的研究热点<sup>[1]</sup>。相对于传统的中继技术,双向中继技术通过在中继节点上采用网络编码技术可实现将通信时隙数减少为2个时隙,使得系统性能将得到很大的改善<sup>[2]</sup>。2时隙的双向中继系统可实现两节点通过中间的一个半双工中继互换信息,两节点间无直达链路,在第一个时隙两节点同时往中继发送信号,中继对接收信号解码后采用 XOR 操作<sup>[3]</sup>或对接收信号采用合并放大操作;并在第二个时隙广播至两节点,两节点再分别利用自信息进行自干扰消除来获取所需信息。OFDM 技术能够很好地对抗无线传输环境中的频率选择性衰落,获得很高的频谱利用率,已被 3GPP LTE 作为主要的传输方式之一。因此基于 OFDM 的双向中继系统能够进一步提升系统性能。

在 OFDM 双向中继系统中,对资源进行合理分配是提升

系统性能的关键技术,其中子载波匹配与功率优化分配对提高系统资源利用率具有非常重要的作用。文献[4]证明了最优的子载波匹配算法,即对所有子载波的信道增益函数进行排序,然后按照好信道匹配好信道的原则进行一一匹配,但是缺少对功率分配问题的考虑。文献[5]研究了 OFDM 单向系统的功率优化分配问题,运用注水法求解如何最大化系统容量的问题。OFDM 也可以运用于双向中继系统来提升系统总速率<sup>[6-9]</sup>,文献[6]研究了解码转发(DF)中继系统的功率分配算法,但是其适用场景要求用户节点到中继节点的信道增益函数必须完全相同;文献[7]运用凸优化算法实现了中继和用户上的功率最优化分配,但是复杂度较高;文献[8]研究了子载波匹配和功率最优化分配问题,运用贪婪注水法求解功率分配问题,但是缺乏考虑资源分配的公平性;文献[9]提出子载波匹配联合拉格朗日次梯度法来处理对偶问题,显著提高了系统性能,但其求解节点上的功率分配问题较为复杂,并且次梯度算法在处理拉格朗日对偶问题时不具有快速收敛性<sup>[12]</sup>,在优化过程中容易出现振荡现象,效率较低。

到稿日期:2014-07-17 返修日期:2014-10-27 本文受南京邮电大学自然科学基金项目(NY211083)资助。

潘沛生(1966-),男,副教授,硕士生导师;赵喜凤(1989-),女,硕士生,主要研究方向为无线异构系统的干扰管理和资源管理、双向通信。

为进一步提高 OFDM 双向中继系统的功率分配效率,降低算法复杂度,本文所提出的功率分配策略先建立用户和中继节点的最优功率分配比例关系,将三层功率最优化问题简化为一层最优化问题,实现了将节点上的功率优化分配问题转化成一种易于处理的形式,以较小的复杂度获得了各节点上分配的功率占所在子载波对上分配功率的比重。进一步,利用原对偶内点法求解各子载波间的功率分配;最后,将各子载波上的功率最优分配到各节点上。对计算复杂度的分析结果表明,本文算法的计算复杂度相比以往算法明显降低。仿真结果表明,本文算法显著提升了系统总速率,且其性能随着子载波数的增多而提升。

## 2 系统模型与问题描述

### 2.1 系统模型

本文考虑 OFDM 双向中继网络,中继采用放大转发(AF)模式协作 2 个用户完成相互通信。图 1 示出了 OFDM 双向中继系统模型,系统由 2 个用户节点( $s_1, s_2$ )和一个中继节点  $r$  构成。用户之间不存在直传链路,用户和中继节点都配置单天线,并以半双工模式工作。假定信道是频率选择性且为块衰落的,即在多个时间区间内保持不变或缓变,设子载波个数为  $n$ ,每个方向上的传输都由 2 个时隙组成。如图 1 所示,时隙 1 中, $s_1$  和  $s_2$  在子载波  $i(1 \leq i \leq n)$  上同时向中继节点发送信息;在时隙 2 中,中继节点首先将第  $i$  个子载波上发送的 bits 信息映射到第  $i'(1 \leq i' \leq n)$  个子载波上,然后对信息放大后广播出去。 $h_{s_1}(i) \sim CN(0, \sigma_{s_1r}), h_{s_2}(i) \sim CN(0, \sigma_{s_2r})$  分别表示用户  $s_1$  和  $s_2$  发信息到中继节点  $r$  时在第  $i$  个子载波上的信道增益。 $h_{r-1}(i') \sim CN(0, \sigma_{r1}), h_{r-2}(i') \sim CN(0, \sigma_{r2})$  表示中继节点  $r$  广播信息到 2 个用户节点时在第  $i'$  个子载波上的信道增益。

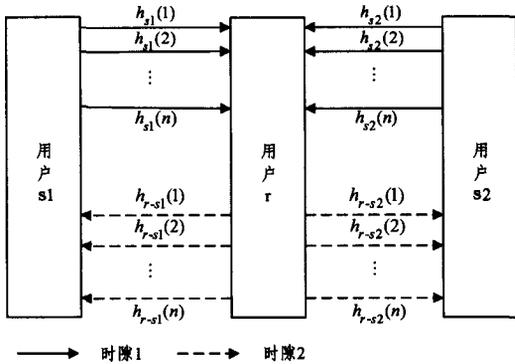


图 1 OFDM 双向中继系统模型

为简化分析,设每个节点具有完全信道状态信息(Channel State Information, CSI),信道为高斯白噪声信道(AWGN)。令用户节点在子载波  $i$  上的发送符号为  $x_k(i) (k \in \{1, 2\})$ ,  $E\{|x_k|^2\} = 1$ , 其中  $E\{\cdot\}$  表示数学期望,各节点的子载波上具有相同的噪声功率  $\sigma^2$ 。用户  $s_1$  和  $s_2$  收到中继节点  $r$  广播的信息后,根据自干扰消除技术(Self-Interference Cancellation, SIC),消除自身发送的信息后便能获得对方用户的发送信息<sup>[10]</sup>。设  $p_1(i)$  和  $p_2(i)$  分别代表用户  $s_1$  和  $s_2$  分配到第  $i$  个子载波上的发射功率, $p_r(i')$  为中继节点  $r$  分配到第  $i'$  个子载波上的发射功率。 $R_1(i), R_2(i)$  分别为传输链路  $s_1 \rightarrow r, s_2 \rightarrow r$  在第  $i$  个子载波上发送信息时所获得的信息速率, $R_1^2(i'), R_2^1(i')$  分别代表在第  $i'$  个子载波上链路  $r \rightarrow s_2, r \rightarrow s_1$  传

输信息所获得的信息速率。那么信息速率  $R_1(i), R_2(i), R_1^2(i'), R_2^1(i')$  的数学描述为:

$$\begin{cases} R_1(i) = \log_2(1 + |g_{s_1}(i)| p_1(i)) \\ R_2(i) = \log_2(1 + |g_{s_2}(i)| p_2(i)) \\ R_1^2(i') = \log_2(1 + |g_{r-2}(i')| p_r(i')) \\ R_2^1(i') = \log_2(1 + |g_{r-1}(i')| p_r(i')) \end{cases} \quad (1)$$

其中, $g_{s_1}(i), g_{s_2}(i), g_{r-1}(i'), g_{r-2}(i')$ ,  $(i, i' \in \{1, 2, \dots, n\})$  分别代表用户  $s_1$  和  $s_2$  与中继  $r$  之间在第  $i$  个子载波上的信道比增益, $g(i) \triangleq \frac{h(i)}{\sigma^2}$ , 即信道增益与噪声功率的比例。已知子载波对间的匹配关系,设  $R_{12}(i, i'), R_{21}(i, i')$  分别代表传输链路  $s_1 \rightarrow r \rightarrow s_2, s_2 \rightarrow r \rightarrow s_1$  在子载波对  $(i, i')$  上获得的信息速率,其数学定义为:

$$R_{12}(i, i') = 1/2 \min\{R_1(i), R_2^2(i')\} \quad (2)$$

$$R_{21}(i, i') = 1/2 \min\{R_2(i), R_1^1(i')\} \quad (3)$$

### 2.2 问题描述

从理论上说,用户发送的 bits 信息在中继处能够以任意方式被重新分配到各子载波上发送出去,但是,为了简化本文系统结构,设中继将收到的某一个子载波上的 bits 信息重新分配到唯一的子载波上,只有一对一的子载波匹配是允许的,即不同子载波上的 bits 信息不被重新分配到同一个子载波上。本文把最佳的联合子载波匹配和功率分配的问题作为一个优化问题,最优化问题可表示为:

$$\begin{aligned} \max_{p_1, p_2, p_r, \rho_{i,i'}} & \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{1}{2} \min\{R_1(i), \sum_{i'=1}^n \rho_{i,i'} R_2^2(i')\} + \frac{1}{2} \min \right. \\ & \left. \{R_2(i), \sum_{i'=1}^n \rho_{i,i'} R_1^1(i')\} \right\} \\ \text{s. t.} & \sum_{i=1}^n (p_1(i) + p_2(i) + p_r(i)) \leq P_T^{\max} \\ & p_1(i), p_2(i), p_r(i) \geq 0, \forall i, i' \\ & \rho_{i,i'} \in (0, 1), \forall i, i' \\ & \sum_{i=1}^n \rho_{i,i'} = 1 \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $P_T^{\max}$  为系统总功率上限, $\rho_{i,i'} \in (0, 1)$  为子载波匹配参数,表明在第  $i$  个子载波上传输的信息是否被映射到第  $i'$  个子载波上进行传输。此式的目标函数为传输链路  $s_1 \rightarrow r \rightarrow s_2$  和  $s_2 \rightarrow r \rightarrow s_1$  在所有子载波对上获得的信息速率总和,即系统总速率;第一个约束为系统总功率受限约束条件;第二个约束表明本文允许一对一的子载波映射。文献[4]已经给出了最优的子载波匹配算法,基于该成果,优化变量简化为如何将功率最优分配到各节点( $s_1, s_2, r$ )以及所有的子载波对上,式(4)中的  $\rho_{i,i'}$  为常数,即  $\rho_{i,i} = 1, \rho_{i,i'} = 0 (i \neq i')$ , 则式(4)可以简化为不包含子载波匹配的形式:

$$\begin{aligned} R_{\text{sum}} &= \frac{1}{2} \max_{p_1, p_2, p_r} \left\{ \sum_{i=1}^n \left\{ \min\{R_1(i), R_2^2(i)\} + \min\{R_2(i), \right. \right. \\ & \left. \left. R_1^1(i)\} \right\} \right\} \\ \text{s. t.} & \sum_{i=1}^n (p_1(i) + p_2(i) + p_r(i)) \leq P_T^{\max} \\ & p_1(i), p_2(i), p_r(i) \geq 0, \forall i \end{aligned} \quad (5)$$

此功率分配优化问题为凸优化问题,证明如下。

“凸优化”定义为目标函数为凸函数且由约束条件得到的定义域为凸集的优化问题。设  $x = p_1(i) + p_2(i) + p_r(i)$ , 集合  $D = \{X \in \mathbb{R}^+ | x \geq 0\}$ , 对于任意点  $x, y \in D$  及实数  $\alpha \in [0, 1]$ , 都有  $\alpha x + (1-\alpha)y \in D$ , 可以得出集合  $D$  是凸集,由凸集推论<sup>[13]</sup>得出  $\sum_{i=1}^n D_i$  也是凸集,因而得出式(5)的定义域是凸集

合。\$R\_1(i), R\_2(i), R\_2^2(i), R\_1^1(i)\$ 为以 2 为底的对数函数, 是凸函数, 参考文献[12]得出 \$\min\{R\_1(i), R\_2^2(i)\}\$ 和 \$\min\{R\_2(i), R\_1^1(i)\}\$ 也是凸函数, 根据凸函数的性质[13]得出: \$\sum\_{i=1}^n \{\min\{R\_1(i), R\_2^2(i)\} + \min\{R\_2(i), R\_1^1(i)\}\}\$ 也是凸函数, 对凸函数求最优化问题即为凸优化问题。因此式(5)是凸优化问题。证毕。

式(5)涉及到总功率在用户节点、中继节点以及各子载波间的分配, 为了获得更高的系统总速率, 可在上述子载波配对的基础上再进行功率优化分配, 因此本文旨在如何简化功率分配方案。

### 3 功率分配算法

本文研究的目标: 在总功率受限的条件下, 实现以较低的复杂度将功率最优化分配, 使系统总速率最大化。将式(5)分解为子优化问题 M1 和 M2, 子优化问题 M1: 将子载波对 \$(i, i)\$ 上分配到的功率最优分配到用户、中继节点上; 子优化问题 M2: 求解子载波间的功率分配问题。

#### 3.1 节点功率分配算法

本节讨论问题 M1, 首先考虑子载波对 \$(i, i)\$ 上分配到的功率如何最优分配到各节点上。设 \$p\_t(i)\$ 为子载波对 \$(i, i)\$ 上分配的功率上限, 则子优化问题 M1 可描述为:

$$\frac{1}{2} \max_{p_1, p_2, p_r} \{\min\{R_1(i), R_2^2(i)\} + \min\{R_2(i), R_1^1(i)\}\} \quad (6)$$

$$\text{s. t. } p_1(i) + p_2(i) + p_r(i) = p_t(i)$$

由于式(6)无法直接求解封闭形式的表达式, 式(6)包含传输链路 \$s\_1 \rightarrow r \rightarrow s\_2\$ 和 \$s\_2 \rightarrow r \rightarrow s\_1\$ 上的功率分配, 因此可将优化问题 M1 分解为 2 个传输链路上的子优化问题 \$M\_{11}\$ 和 \$M\_{12}\$。设 \$p\_{11}(i), p\_{12}(i)\$ 分别为链路 \$s\_1 \rightarrow r \rightarrow s\_2\$ 和链路 \$s\_2 \rightarrow r \rightarrow s\_1\$ 在第 \$i\$ 个子载波上获得的功率上限值, 子优化问题 \$M\_{11}\$ 描述为:

$$R_{12}(i, i) = \frac{1}{2} \max_{p_1, p_r} \{\min\{R_1(i), R_2^2(i)\}\} \quad (7)$$

$$\text{s. t. } p_1(i) + p_r(i) = p_{11}(i)$$

子优化问题 \$M\_{12}\$ 描述为:

$$R_{21}(i, i) = \frac{1}{2} \max_{p_2, p_r} \{\min\{R_2(i), R_1^1(i)\}\} \quad (8)$$

$$\text{s. t. } p_2(i) + p_r(i) = p_{12}(i)$$

基于如下引理, 建立链路 \$s\_k \rightarrow r (k \in \{1, 2\})\$ 与 \$r \rightarrow s\_k\$ 之间的节点功率线性关系, 以降低求解子优化问题 \$M\_{11}\$ 和 \$M\_{12}\$ 的算法复杂度。

归纳引理 1: 当子载波对 \$(i, i)\$ 上节点功率分配方案 \$(p\_1^\*(i), p\_2^\*(i), p\_r^\*(i))\$ 满足如下比例关系时, 子优化问题 \$M\_{11}\$ 和 \$M\_{12}\$ 可获得最大的信息速率:

1) 子优化问题 \$M\_{11}\$ 满足

$$p_r^*(i) = \frac{g_1(i)}{g_2(i)} p_1^*(i), \text{ 即 } R_{12}^*(i, i) = R_1^*(i) = R_2^{2*}(i), \quad i=1, 2, \dots, n \quad (9)$$

2) 子优化问题 \$M\_{12}\$ 满足

$$p_r^*(i) = \frac{g_2(i)}{g_1(i)} p_2^*(i), \text{ 即 } R_{21}^*(i, i) = R_2^*(i) = R_1^{1*}(i), \quad i=1, 2, \dots, n \quad (10)$$

式(9)、式(10)中的 \$p\_r^\*(i)\$ 为同一值, 并且 \$(p\_1^\*(i), p\_2^\*(i), p\_r^\*(i))\$ 必须满足子载波对上的功率受限约束条件:

$$p_1(i) + p_2(i) + p_r(i) = p_t(i).$$

证明: 首先假设节点功率分配方案 \$(p\_1^\*(i), p\_2^\*(i))\$ 不是子优化问题的最优解, 那么存在最优的解决方案设为 \$(p\_1'(i), p\_2'(i), p\_r'(i))\$, \$R\_{12}'(i, i)\$ 为问题 \$M\_{11}\$ 获得的最大信息速率, 满足 \$R\_{12}'(i, i) = \frac{1}{2} \min\{R\_1'(i), R\_2^{2'}(i)\}\$。那么建立一种新的节点功率分配方案 \$(p\_1^\*(i), p\_2^\*(i))\$, 此方案满足 \$p\_1^\*(i) = \frac{2^{R\_{12}'(i, i)} - 1}{g\_1(i)}\$ 和 \$p\_r^\*(i) = \frac{2^{R\_{12}'(i, i)} - 1}{g\_2(i)}\$, 那么此关系式满足式(9), 同时也满足: \$R\_{12}'(i, i) = R\_1^\*(i) = R\_2^{2\*}(i)\$。因此 \$R\_{12}^\*(i, i) = R\_{12}'(i, i)\$, 新的解决方案并没有改变问题 \$M\_{11}\$ 的最优解, 所以当子优化问题 \$M\_{11}\$ 满足式(9)时即为子优化问题 \$M\_{11}\$ 的最优解。此外由功率定义可知: \$p\_1^\*(i) \leq p\_1'(i)\$ 和 \$p\_r^\*(i) \leq p\_r'(i), \forall 1 \leq i \leq n\$。同理可证明式(10)。证毕。

引用以上节点功率线性关系, 可获得各节点上分配的功率占所在子载波对上分配的功率的比重, 具体描述如下: 由于子优化问题 \$M\_{11}, M\_{12}\$ 必须满足 M1 中子载波对上的功率受限约束条件: \$(p\_1(i) + p\_2(i) + p\_r(i) = p\_t(i))\$, 将式(9)、式(10)代入此限制条件得:

$$\frac{g_2(i)}{g_1(i)} p_r^*(i) + \frac{g_1(i)}{g_2(i)} p_r^*(i) + p_r^*(i) = p_t(i) \quad (11)$$

因此, 用户节点和中继节点上分配的功率占各子载波对上分配功率 \$p\_t(i)\$ 的比重为

$$\begin{cases} p_1^*(i) = \frac{g_1(i)g_2(i)p_t(i)}{g_1^2(i) + g_2^2(i) + g_1(i)g_2(i)} \\ p_2^*(i) = \frac{g_2^2(i)p_t(i)}{g_1^2(i) + g_2^2(i) + g_1(i)g_2(i)} \\ p_r^*(i) = \frac{g_1^2(i)p_t(i)}{g_1^2(i) + g_2^2(i) + g_1(i)g_2(i)} \end{cases} \quad (12)$$

由式(12)可知, 要求解最优的 \$(p\_1^\*(i), p\_2^\*(i), p\_r^\*(i))\$, 还需知道各子载波对上分配的 \$p\_t(i)\$ 值。引用以上引理, 子优化问题 M1 可以简化为链路 \$s\_k \rightarrow r (k \in \{1, 2\})\$ 上的功率分配问题或者相反。将式(9)、式(10)、式(12)代入式(7)、式(8)求得链路 \$s\_1 \rightarrow r \rightarrow s\_2, s\_2 \rightarrow r \rightarrow s\_1\$ 在子载波对 \$(i, i)\$ 上获得的信息速率 \$R\_{12}^\*(i, i), R\_{21}^\*(i, i)\$, 其数学表示为:

$$\begin{cases} R_{12}^*(i, i) = R_1^*(i) = \log_2(1 + p_1^*(i)g_1(i)) = \\ \log_2(1 + \frac{p_t(i)g_2(i)b}{a+b}) \\ R_{21}^*(i, i) = R_2^*(i) = \log_2(1 + p_2^*(i)g_2(i)) = \\ \log_2(1 + \frac{p_t(i)g_1(i)b}{a+b}) \\ a = g_1^2(i) + g_2^2(i) \\ b = g_1(i)g_2(i) \end{cases} \quad (13)$$

结合式(13)可将式(5)中的优化变量 \$(p\_1(i), p\_2(i), p\_r(i))\$ 减少为优化变量 \$p\_t(i)\$, 因此, 可建立子载波对上 \$p\_t(i)\$ 分配的最优化问题:

$$\begin{cases} R_{sum} = \frac{1}{2} \max_{p_t} \sum_{i=1}^n \{R_1^*(i) + R_2^*(i)\} \\ \text{s. t. } \sum_{i=1}^n p_t(i) \leq P_t^{max} \\ p_t(i) \geq 0 \end{cases} \quad (14)$$

与式(5)相比, 式(14)包含的优化变量数明显变少, 即实现了三层最优化问题简化为一层最优化问题, 极大地降低了算法复杂度。

#### 3.2 子载波对上的功率分配问题

由上节的描述可知, 式(14)为非线性凸规划问题, 文献

[12]中的原对偶内点法是求解非线性凸规划问题的优秀算法,具有收敛性好、计算速度快、鲁棒性好等优势。因此本文采用原对偶内点法求解子载波对上的功率分配问题,其描述如下。

1)引入非负的拉格朗日对偶算子 $\lambda$ ,运用拉格朗日对偶算法将式(14)转化为非约束问题:

$$\begin{aligned} \max_{p_i(i)} \min_{\lambda} L(p_i(i), \lambda) \\ = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \{R_1^*(i) + R_2^*(i)\} - \lambda (P_T^{\max} - \sum_{i=1}^n p_i(i)) \end{aligned} \quad (15)$$

s. t.  $\lambda \geq 0$

2)再利用对偶分解方法将以上拉格朗日对偶函数分解成 $n$ 个独立的子问题函数:

$$f(i) = \max_{p_i} \left\{ \frac{1}{2} (R_1^*(i) + R_2^*(i)) + \lambda p_i(i) \right\} \quad (16)$$

则式(15)的对偶问题可描述为:

$$\min h(\lambda) = \{-\lambda P_T^{\max} + \sum_{i=1}^n f(i)\} \quad (17)$$

s. t.  $\lambda \geq 0$

3)式(16)的每个子问题都是关于 $p_i(i)$ 的凸函数,由 $\frac{\partial f(i)}{\partial p_i(i)}$ 可求得最优的功率分配值 $p_i(i)$ :

$$\left\{ \begin{aligned} p_i(i) &= \frac{T1 + T2}{2\lambda b^2} \\ T1 &= -2\lambda b (g_1(i) + g_2(i)) - \lambda (g_1^3(i) + g_2^3(i)) + b^2 \ln 2 \\ T2 &= \sqrt{-2\lambda^2 b^3 + (\ln 2)^2 b^4 + \lambda^2 b^5} \end{aligned} \right. \quad (18)$$

基于得到的子载波对上的功率分配值 $p_i(i)$ ,拉格朗日算子 $\lambda$ 通过运用内点法迭代求解式(17)求得。由求得的最优 $\lambda$ 值求得功率分配值 $p_i(i)$ ,再将 $p_i(i)$ 代入式(12)求得各节点最优的功率分配值( $p_1^*(i)$ ,  $p_2^*(i)$ ,  $p_3^*(i)$ )。

总结以上功率分配方案:通过引用引理1不仅求得了节点上分配的功率占所在子载波对上分配的功率的比重,而且实现了将三层最优化问题简化为一层最优化问题;在此基础上通过运用原对偶内点法求解了子载波间的功率分配问题,最终获得了各节点上的最优功率分配。

## 4 仿真结果与分析

本文中每个子载波经历独立的瑞利衰落信道,由 Jacks 模型产生。文献[8]中双向中继系统的中继节点的最佳位置是在两个用户节点的中间,此时双向中继系统的总速率达到最大。取 $\sigma_{s1r} = \sigma_{s2r} = \sigma_{r1} = \sigma_{r2} = 1$ 。图2显示了系统总速率与总功率的变化比例关系,子载波数 $n=16$ 。此图中的6种对比算法如下:

1)子载波随机匹配联合子载波间功率均分:子载波匹配采用随机配对,所有的子载波对上分配相同的功率,即 $p_i(i) = P_T^{\max}/n$ ,各节点上的功率分配采用本文的功率分配算法(表示为RD)。

2)子载波匹配联合子载波间功率均分:子载波匹配采用最优匹配算法,所有的子载波对上分配相同的功率,即 $p_i(i) = P_T^{\max}/n$ ,各节点上的功率分配采用本文的功率分配算法(表示为优化SM)。

3)子载波随机匹配联合次梯度功率优化:子载波匹配采用随机配对,子载波间采用次梯度算法优化功率分配,各节点上的功率分配采用本文的功率分配算法(表示为RD&次梯

度法功率优化)。

4)子载波匹配联合次梯度功率优化:子载波匹配采用最优匹配算法,子载波间采用次梯度算法优化功率分配,各节点上的功率分配采用本文的功率分配算法(表示为SM&次梯度法功率优化)。

5)子载波随机匹配联合原对偶内点法功率优化:子载波匹配采用随机配对,子载波间采用原对偶内点法进行功率分配,各节点上的功率分配采用本文的功率分配算法(表示为RD&原对偶内点法功率优化)。

6)子载波匹配联合原对偶内点法功率优化:子载波匹配采用最优匹配算法,子载波间采用原对偶内点法进行功率分配,各节点上的功率分配采用本文的功率分配算法(表示为SM&原对偶内点法功率优化)。

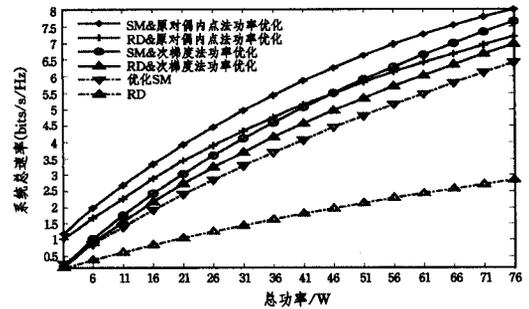


图2 系统总速率与总功率的关系

首先比较各算法开销,假设由 $s1$ 来处理数据,由于每个节点都已知所有信道状态信息(CSI), $s1$ 获取信道增益信息需要做 $2n$ 次计算,计算复杂度为 $O(2n)$ ,而通常的冒泡排序法的计算复杂度为 $O(n^2)$ ;分析本文算法 $p_i(i)$ 的计算复杂度为 $O(n^2 + l)$ , $l$ 为迭代次数,一般小于200,本文总共做了 $n$ 次搜索为求解最优的 $\lambda$ ,所以本文的计算复杂度为 $O(n^3)$ ,而文献[9]中 $p_i(i)$ 的计算复杂度为 $O(n^{16} + l)$ ,总的计算复杂度为 $O(n^{17})$ ,因此本文算法在功率分配计算复杂度方面相比文献[9]降低了4个数量级。

下面根据仿真结果对各算法进行性能评估。在总功率相等的情况下,本文提出的算法即SM&原对偶内点法功率优化算法在系统总速率上要优于SM&次梯度法功率优化算法,也优于RD&原对偶内点法功率优化算法。本文算法比SM&次梯度法功率优化算法总速率平均提高了约0.8bit/s/Hz。当总功率小于46W时,RD&原对偶内点法功率优化算法要优于SM&次梯度法功率优化算法;总功率大于46W时,SM&次梯度法功率优化算法优于RD&原对偶内点法功率优化算法。在RD情况下,系统总速率相比其他几种情况最差。

图3和图4显示了系统总速率与子载波数目之间的比例关系,系统总功率分别为60W和10W。在两幅图中最差的情况为:优化SM在高总功率下当子载波数超过144时,系统总速率基本不再增长;在低总功率下当子载波数超过48时,系统总速率基本不再增长。当系统功率较低时,优化SM的系统性能和本文的最优算法相比差距很大。在高总功率条件下,本文提出的SM&原对偶内点法功率优化算法比RD&原对偶内点法功率优化算法平均提高了0.2bit/s/Hz。当子载波数为256时,本文算法比优化SM算法提高了约2.2bit/s/Hz。从而得出,SM&原对偶内点法功率优化算法能够显著提高系统总速率,且性能随子载波数的增多而提升。

(下转第169页)

[7] 杨明, 郝亮, 徐殿国. 基于自适应陷波滤波器的在线机械谐振抑制[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, 46(4): 63-69  
 Yang Ming, Hao Liang, Xu Dian-guo. Online suppression of mechanical resonance based on adapting notch filter[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2014, 46(4): 63-69

[8] 王瑞, 马艳. 基于分数阶傅里叶变换的线性调频脉冲信号波达方向估计[J]. 兵工学报, 2014, 35(3): 421-427  
 Wang Rui, Ma Yan. DOA Estimation of Wideband Linear Frequency Modulated Pulse Signals Based on Fractional Fourier Transform[J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(3): 421-427

[9] 欧世峰, 高颖, 赵晓晖. 自适应组合型盲源分离算法及其优化方案[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(5): 1243-1247  
 Ou Shi-feng, Gao Ying, Zhao Xiao-hui. Adaptive Combination

Algorithm and Its Modified Scheme for Blind Source Separation [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(5): 1243-1247

[10] 刘遯, 郭立红, 肖辉, 等. 基于参数动态调整的动态模糊神经网络的软件可靠性增长模型[J]. 计算机科学, 2013, 40(2): 186-190  
 Liu Luo, Guo Li-hong, Xiao Hui, et al. Software Reliability Growth Model Based on Dynamic Fuzzy Neural Network with Parameters Dynamic Adjustment [J]. Computer Science, 2013, 40(2): 186-190

[11] 方科. 高动态扩频信号捕获的多普勒补偿[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(7): 122-124  
 Fang Ke. Research on Doppler Compensation in Acquisition of High Dynamic Spread Spectrum Signals [J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2013, 34(7): 122-124

(上接第 145 页)

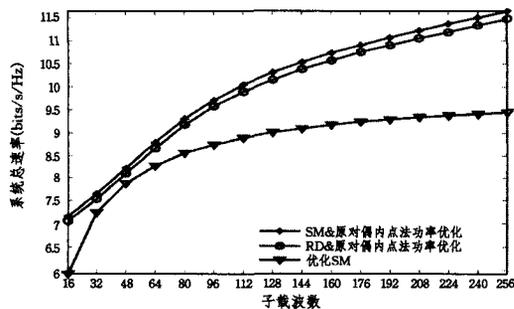


图3 高总功率下系统总速率与子载波数的关系

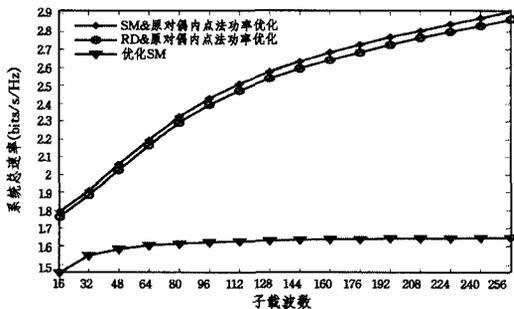


图4 低总功率下系统总速率与子载波数的关系

**结束语** 本文主要研究了 AF 模式下正交频分(OFDM)双向中继系统的功率分配优化问题, 将功率优化问题分为两层优化问题, 即子载波间、各节点上的功率优化分配问题。运用最优子载波匹配算法以及建立用户和中继节点间的最优功率分配比例关系来简化系统模型, 较大程度地降低了算法的复杂度。然后, 在求得的最优节点功率比例的基础上, 利用原对偶内点法的迭代算法求解各个子载波对上的功率分配问题。本文提出的算法可以显著提升系统总功率, 且复杂度明显低于其它对比算法。

### 参考文献

[1] 王东, 冯文江, 衡玉龙. OFDMA 协同通信系统资源分配算法 [J]. 计算机科学, 2012, 39(5): 86-90  
 Wang Dong, Feng Wen-jiang, Heng Yu-long. Resource allocation algorithm for OFDMA-based cooperative communication systems [J]. Computer Science, 2012, 39(5): 86-90

[2] Hammerstrom I, Kuhn M, Esli C, et al. MIMO two-way relaying with transmit CSI at the relay[C]//IEEE 8th Workshop on Sig-

nal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC 2007). IEEE, 2007: 1-5

[3] Wu Yun-nan, Chou P A, Kung S Y. Information exchange in wireless networks with network coding and physical-layer broadcast[R]. MSR-TR-2004, 2005

[4] Fan Bin, Wang Wen-bo, Lin Yi-cheng, et al. Subcarrier allocation for OFDMA relay networks with proportional fair constraint[C]//IEEE International Conference on Communications (ICC'09). IEEE, 2009: 1-5

[5] Wang Wen-yi, Wu Ren-biao. Capacity maximization for OFDM two-hop relay system with separate power constraints[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(9): 4943-4954

[6] Shim Y, Park H, Kwon H M. Optimal power allocation for Two-way decode-and-forward relay networks with equal transmit power at source nodes [C]//2013 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). IEEE, 2013: 3335-3340

[7] Ho C K, Zhang Rui, Liang Ying-chang. Two-way relaying over OFDM: optimized tone permutation and power allocation[C]//IEEE International Conference on Communications (ICC'08). IEEE, 2008: 3908-3912

[8] Vu H N, Kong H Y. Joint subcarrier matching and power allocation in OFDM two-way relay systems[J]. Journal of Communications and Networks, 2012, 14(3): 257-266

[9] 唐伦, 刘进, 陈前斌, 等. OFDM 双向中继子载波配对与功率联合优化[J]. 北京邮电大学学报, 2011, 34(s1): 85-89  
 Tang Lun, Liu Tong, Chen Qian-bin, et al. Joint Optimization for Sub-Carrier Pair and Power in OFDM-Based Two-Way Relaying [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2011, 34(s1): 85-89

[10] Guo Hui, Ge Jian-hua, Ding Hai-yang. Symbol error probability of Two-way amplify-and-forward relaying[J]. Communications Letters, IEEE, 2011, 15(1): 22-24

[11] Tse D N. Optimal power allocation over parallel Gaussian broadcast channels[C]//IEEE International Symposium on Information Theory. Institute of Electrical Engineers Inc(IEEE), 1997: 27-27

[12] Boyd S, Vandenberghe L. Convex optimization[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2009: 1-623

[13] 解可新, 韩立兴, 林友联. 最优化方法[M]. 天津: 天津大学出版社, 1997: 28-36  
 Xie Ke-xin, Han Li-xing, Lin You-lian. Optimization methods [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1997: 28-36