

OFDMA 中继系统中基于 QoS 保证的资源分配算法

赵翠茹, 李有明*

(宁波大学 通信技术研究, 浙江 宁波 315211)

摘要: 研究了 OFDMA 中继下行链路通信系统中的动态资源分配问题, 提出了一种可以保证用户最低 QoS 需求的资源分配算法. 首先在简化资源优化问题的过程中, 采用等功率分配方法以降低算法复杂度, 然后通过拉格朗日松弛优化方法推导出了子载波分配和中继选择最优解, 并在此基础上引入用户速率权衡因子, 根据速率权衡因子越大的用户, 越具有选择子载波和中继的优先权这一准则进行子载波分配和中继选择. 仿真结果表明: 新算法能够获得较高的系统容量, 同时也能很好地保证不同用户的最低速率需求.

关键词: 中继通信技术; 中继选择; 正交频分多址接入; 服务质量; 动态资源分配

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1001-5132 (2012) 04-0020-05

正交频分多址接入(Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA)系统将传输带宽划分成相互正交而且交错重叠的许多子载波, 将不同的子载波分配给不同的用户实现多址. 由于其具有传输速率高、资源分配灵活、能同时支持多个用户以及能对抗频率选择性衰落等优点, 被认为是下一代宽带无线接入方式的关键技术^[1]. 另外, 作为无线通信关键技术之一的中继技术近来备受关注, 将中继引入到传统 OFDMA 系统中能获得更高的峰值数据速率、频谱利用率、更好的小区边缘用户性能, 所以开展 OFDMA 技术和中继技术相结合的研究成为广大研究人员关注的焦点^[2-3]. 而 OFDMA 中继系统中的资源分配问题也逐渐成为现阶段的研究热点.

OFDMA 中继系统性能的优劣在很大程度上依赖于在有限系统资源条件下, 如何为用户提供高速数据传输和良好的 QoS 保证. 传统 OFDMA 蜂窝系统中基于保证不同用户服务质量需求的资源分配算法已有深入研究^[4-6]. 然而, 在传统 OFDMA 蜂窝系统中引入中继, 使得无线资源分配变得更加复杂. 在 OFDMA 中继系统中, 合理的资源分配

不仅包括如何最优地为每个用户分配子载波、功率、比特等无线资源, 而且还包括为每个用户选择最合适的中继. 因此传统 OFDMA 蜂窝系统中基于保证不同用户服务质量需求的资源分配算法并不能简单地应用到 OFDMA 中继系统中. 文献[7]考虑了一种次最优资源分配策略, 首先在等功率分配条件下进行子载波分配和中继选择, 然后进行子载波上的功率分配. 采用该算法能够明显改善系统性能, 但却忽略了用户间公平性原则. 文献[8]提出了一种上行链路 OFDMA 中继系统中带有公平性约束的资源分配算法, 通过给用户分配相同的子载波数目来实现用户间的公平性需求, 并按照等效信道增益来完成子载波的分配和中继选择. 然而, 在无线通信系统中, 不同用户对速率的需求往往是不同的, 那么所要求分配到的子载波数目也是不同的, 因此, 文献[8]中的资源分配算法限制了其在实际中的广泛应用.

在提出的新算法中, 用户的 QoS 通过最低速率需求来衡量, 首先给出了简化后的资源优化问题, 消除了问题中的非线性约束, 以降低算法复杂度, 然后由一阶 KKT 必要条件推导出子载波分配

收稿日期: 2012-07-30.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://3xb.nbu.edu.cn>

基金项目: 国家自然科学基金(60772126, 61071119); 浙江省自然科学基金(Y1091155); 浙江省科技厅科研项目(2009C34001).

第一作者: 赵翠茹(1989-), 女, 山东菏泽人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 宽带资源分配. E-mail: pengpengyuagt@126.com

*通讯作者: 李有明(1963-), 男, 陕西扶风人, 博导/教授, 主要研究方向: 宽带接入技术. E-mail: liyouming@nbu.edu.cn

和中继选择最优解, 并在此基础上引入用户速率权衡因子, 根据速率权衡因子越大的用户, 越优先选择子载波和中继这一准则进行子载波分配和中继选择. 分析结果显示, 新算法在获得较高系统容量的同时能保证不同用户的最低速率需求.

1 系统模型

图1是1个单蜂窝OFDMA两跳中继下行链路通信系统的示意图. 假设系统中有1个位于中心的基站BS, 有 K 个中继RS和 M 个用户, 系统总的可用带宽为 B , 并且, 整个频段被划分成 N 个正交子载波. 假设基站和用户之间不存在直传链路, 当基站向用户发送信息时, 需要通过中继转发给用户, 其中, 中继采取解码转发策略, 且各链路的信道状态信息完全已知. 数据传输可看作是通过2个时隙来完成的: 第一时隙, 基站向每个中继发送信息; 第二时隙, 中继将接收到的信息解码转发给用户.

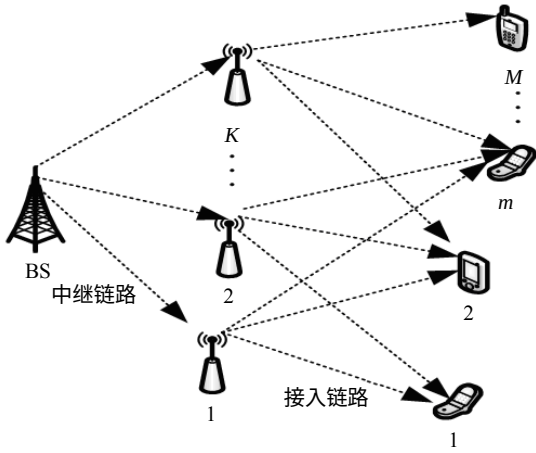


图1 单蜂窝 OFDMA 两跳中继下行链路通信系统

假设 $p_{S,k,n}, H_{S,k,n} (k \in \{1, 2, \dots, K\}, n \in \{1, 2, \dots, N\})$ 表示中继链路 $S-k$ 在子载波 n 上的发送功率和信道增益. $p_{k,j,n}, H_{k,j,n} (k \in \{1, 2, \dots, K\}, j \in \{1, 2, \dots, M\}, n \in \{1, 2, \dots, N\})$ 表示在接入链路 $k-j$ 在第 n 个子载波上的发送功率和信道增益. 则用户 j 通过中继 k 在子载波 n 上的瞬时速率可表示为:

$$R_{k,j,n} = \frac{1}{2} \min \{ \log 2(1 + p_{S,k,n} H_{S,k,n}), \log 2(1 + p_{k,j,n} H_{k,j,n}) \}. \quad (1)$$

文中 OFDMA 中继系统采用的资源分配模型是在发送功率一定的条件下, 最大化系统总容量,

同时还加入了不同用户最低速率要求约束, 此时的资源优化问题为:

$$\max \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^M \sum_{n=1}^N \rho_{k,j,n} R_{k,j,n},$$

使得

$$C1: \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N p_{S,k,n} \leq P_T,$$

$$C2: \sum_{j=1}^M \sum_{n=1}^N p_{k,j,n} \leq P_{k,T},$$

$$C3: \rho_{k,j,n} \in \{0, 1\}, \quad (2)$$

$$C4: \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^M \rho_{k,j,n} = 1,$$

$$C5: \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \rho_{k,j,n} R_{k,j,n} \geq Q_j,$$

其中, $C1$ 为基站处发送功率约束; $C2$ 为各中继站的发送功率约束; $\rho_{k,j,n}$ 为子载波中继分配因子, $\rho_{k,j,n} = 1$ 表示子载波 n 和中继 k 分配给用户 j , 否则表示子载波 n 和中继 k 未被用户 j 占用; $C3, C4$ 表示 1 个子载波最多只能被 1 个中继用户对占用; $C5$ 表示不同用户的最低速率需求.

为最大化系统总容量, 需满足以下等式:

$$p_{S,k,n} H_{S,k,n} = p_{k,j,n} H_{k,j,n},$$

由此可计算出中继链路的等效信道增益为:

$$H_{k,j,n}^{\text{equ}} = \frac{H_{S,k,n} H_{k,j,n}}{H_{S,k,n} + H_{k,j,n}}. \quad (3)$$

此时(1)式可变换成:

$$R_{k,j,n} = \frac{1}{2} \log 2(1 + p_{S,k,n} H_{S,k,n}) = \frac{1}{2} \log 2(1 + p_{k,j,n} H_{k,j,n}). \quad (4)$$

2 资源分配算法

2.1 优化问题简化及推导

考虑到(2)式是一个含整型变量的非线性优化问题, 得其最优解需要很高的复杂度. 为此提出将整型因子 $\rho_{k,j,n}$ 松弛为一个在 $[0, 1]$ 之间的实变量, 并采用等功率分配方法来降低算法复杂度. 此时, 资源优化问题可简化为:

$$\max_{\rho_{k,j,n}} \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^M \sum_{n=1}^N \rho_{k,j,n} R_{k,j,n},$$

使得

$$\begin{aligned}
D1: & \rho_{k,j,n} \in \{0,1\}, \\
D2: & \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^M \rho_{k,j,n} = 1, \\
D3: & \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \rho_{k,j,n} R_{k,j,n} \geq Q_j.
\end{aligned} \quad (5)$$

构造相关的拉格朗日方程如下:

$$\begin{aligned}
L(\rho_{k,j,n}, \beta_n, \delta_{k,j,n}, \mu_j) = & \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^M \sum_{n=1}^N \rho_{k,j,n} R_{k,j,n} + \\
& \sum_{n=1}^N \beta_n (1 - \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^M \rho_{k,j,n}) + \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^M \sum_{n=1}^N \delta_{k,j,n} \rho_{k,j,n} + \\
& \sum_{j=1}^M \mu_j (\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \rho_{k,j,n} R_{k,j,n} - Q_j),
\end{aligned}$$

其中, β, δ, μ 为约束条件 D1~D3 的拉格朗日算子.

将 $L(\rho_{k,j,n}, \beta_n, \delta_{k,j,n}, \mu_j)$ 对 $\rho_{k,j,n}$ 进行求导, 得到相应的一阶 KKT 必要条件为:

$$R_{k,j,n} - \beta_n + \delta_{k,j,n} + \mu_j R_{k,j,n} = 0, \quad (6a)$$

$$\delta_{k,j,n} \rho_{k,j,n} = 0, \quad (6b)$$

$$\mu_j (Q_j - \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \rho_{k,j,n} R_{k,j,n}) = 0. \quad (6c)$$

由(6b)式可得到:

$$\rho_{k,j,n} \begin{cases} > 0, & \text{if } \delta_{k,j,n} = 0, \\ = 0, & \text{if } \delta_{k,j,n} > 0. \end{cases} \quad (7)$$

由(6a)式可得到:

$$\delta_{k,j,n} = \beta_n - (1 + \mu_j) R_{k,j,n}. \quad (8)$$

根据(7)式和(8)式可推出:

$$\beta_n = (1 + \mu_j) R_{k,j,n}. \quad (9)$$

因此, 对于 1 个特定的用户 j , 要为其分配最好的子载波 n^* 和选择最合适的中继 k^* , 此时 k^*, n^* 应满足:

$$(k^*, n^*) = \arg \max (1 + \mu_j) R_{k,j,n}. \quad (10)$$

根据(1)式、(3)式和(4)式推出(10)式等效为:

$$(k^*, n^*) = \arg \max (1 + \mu_j) H_{k,j,n}^{\text{equ}}. \quad (11)$$

为得到最优解, 还需找到最优的拉格朗日算子 μ_j , 可通过迭代搜索方法得到最优的 μ_j , 但这种方法的计算复杂度较高. 在此, 可由上面推导出的一阶 KKT 必要条件来获取. 由(6c)式可得到:

$$\mu_j \begin{cases} = 0, & \text{if } \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \rho_{k,j,n} R_{k,j,n} > Q_j, \\ > 0, & \text{if } \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \rho_{k,j,n} R_{k,j,n} = Q_j. \end{cases} \quad (12)$$

从(12)式可看出, 当满足最低速率时, 该用户

对应的 μ_j 值大于 0, 否则 μ_j 等于 0; 在此基础上引入用户速率权衡变量 w_j , 其中 $w_j = Q_j - R_j$, 表示各用户所要达到的最低速率与现有实际速率的差值. w_j 的值越大, 该用户 j 越优先选择子载波和中继.

2.2 新算法具体实现流程

新算法中子载波分配和中继选择的具体实现流程如下.

2.2.1 初始化设置

设置子载波集合 $\Omega_N = \{1, 2, \dots, N\}$; 用户集合 $\Omega_M = \{1, 2, \dots, M\}$; 中继集合 $\Omega_K = \{1, 2, \dots, K\}$; 每个子载波上分配的平均功率大小为 $p = P_T / N$, 其中 P_T 为发送总功率; 用户实际速率为 R_j , 令 $R_j = 0$; 子载波和中继分配因子 $\rho_{k,j,n}$, 令 $\rho_{k,j,n} = 0$.

2.2.2 为各用户分配子载波

通过下式

$$(k^*, n^*) = \arg \max_{k \in \Omega_K, n \in \Omega_N} H_{k,j,n}^{\text{equ}},$$

为用户 j 从所有中继中找出能获得信道增益最大的子载波 n^* 和相对应的中继 k^* . 将子载波 n^* 分配给用户 j , 并将该子载波从子载波集 Ω_N 中删去, 同时更新用户速率 R_j . 即:

$$\rho_{k^*, j, n^*} = 1,$$

$$\Omega_N = \Omega_N / \{n^*\}, R_j = R_j + \frac{1}{2} \log 2(1 + p H_{k^*, j, n^*}).$$

2.2.3 剩余子载波分配

(1) 根据公式 $j^* = \arg \max w_j$ 找出所要达到的最低速率和实际速率差值最大的用户 j^* , 然后判断相应的 w_{j^*} 是否大于 0, 若 $w_{j^*} > 0$, 执行(2); 否则, 跳转到(3).

(2) 对于找到了的用户 j^* , 找出满足 $(k^*, n^*) = \arg \max_{k \in \Omega_K, n \in \Omega_N} H_{k,j,n}^{\text{equ}}$ 的子载波 n^* 和相应的中继 k^* . 将子载波 n^* 分配给用户 j^* , 并将该子载波从子载波集 Ω_N 中删去, 同时更新用户速率 R_{j^*} . 令

$$\rho_{k^*, j^*, n^*} = 1,$$

$$\Omega_N = \Omega_N / \{n^*\}, R_{j^*} = R_{j^*} + \frac{1}{2} \log 2(1 + p H_{k^*, j^*, n^*}),$$

然后执行(4).

(3) 将剩余的子载波分配给各个用户: 对于剩余的子载波, 分别找出信道增益最大的用户. 根据 $(k^*, j^*) = \arg \max_{k \in \Omega_K, j \in \Omega_M} H_{k,j,n}^{\text{equ}}$ 为特定的子载波 n 找出信

道增益最大的用户 j^* 和相应的中继 k^* . 将该子载波 n 分配给用户 j^* , 并将该子载波从子载波集 Ω_N 中删去, 同时更新用户速率 R_{j^*} . 令

$$\rho_{k^*, j^*, n} = 1,$$

$$\Omega_N = \Omega_N / \{n\}, R_{j^*} = R_{j^*} + \frac{1}{2} \log 2(1 + p H_{k^*, j^*, n}),$$

然后执行(4).

(4) 判断 Ω_N 是否为空集, 若 Ω_N 为非空集, 返回执行步骤(1), 直到为空集, 子载波分配和中继选择结束.

3 仿真结果及分析

仿真环境选择单蜂窝5个中继的OFDMA下行链路通信系统模型. 仿真信道采用6径频率选择性瑞利衰落信道, 假设最大的多普勒频谱偏移为30 Hz, 系统总的可用带宽为1 MHz, 且整个频段被分成256个正交子载波, 高斯白噪声功率谱密度为 $N_0 = 10^{-8}$. 以下则是从系统容量、用户获得的速率与最低速率需求之间的比较来分析提出算法的性能.

Proposed: 子载波和中继按照笔者提出的新算法进行分配和选择.

Static: 即静态资源分配算法, 每个用户分配固定的子载波数目, 并按照就近原则进行中继选择.

Greedy: 将子载波分别分配给信道增益最大的用户-中继对.

图2是3种算法关于系统总容量的比较. 由图可看出, 本算法获得较静态资源分配算法更高的系统容量, 较 Greedy 算法略微小的系统容量. 这是由于本算法是一种自适应的动态资源分配算法, 且考虑了不同用户的最低速率需求.

图3和图4是关于用户所获得的速率和所要求达到的最低速率的比较, 其中 Q-Rmin 为设定的不同用户最低速率需求值. 为凸显本算法的优越性, 分别考虑了不同用户数目下用户所获速率与所要达到的最低速率的比较情况. 仿真结果是经过1000次重复试验得到的平均值. 从图中可以看到, 新算法能够使各用户达到其最低速率的需求, 而 greedy 算法和静态资源分配算法只能使个别用户达到所要求的速率.

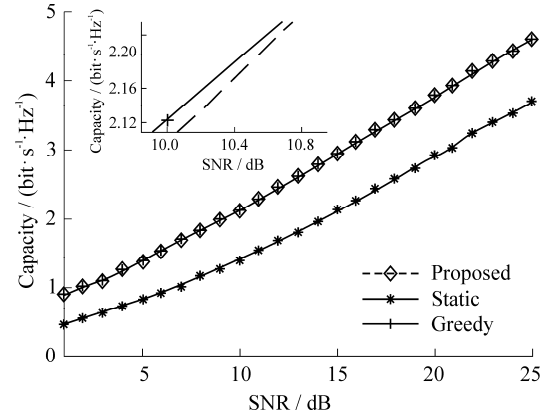


图2 系统总容量随平均信噪比的变化关系(用户数为6)

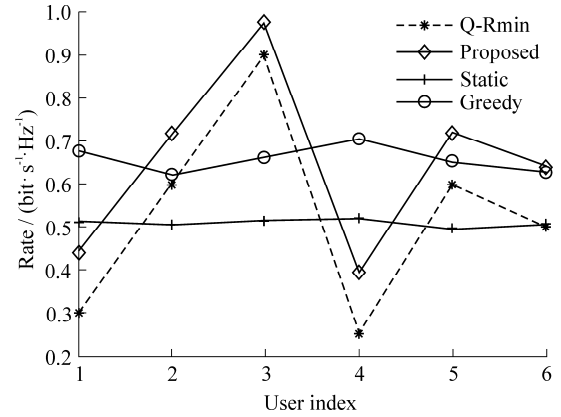


图3 用户获得速率与最低速率要求的比较(用户数为6, 中继数为5, 系统平均信噪比为20 dB)

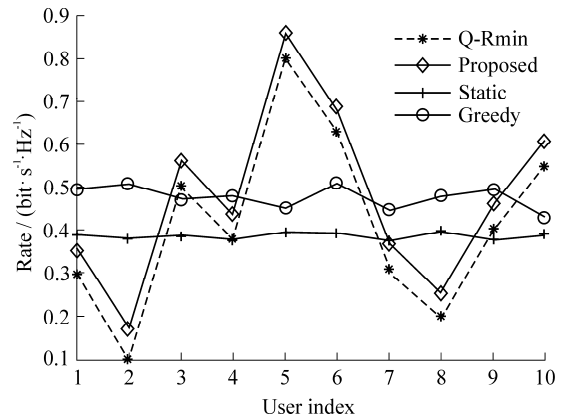


图4 用户获得速率与最低速率要求的比较(用户数为10, 中继数为5, 系统平均信噪比为25 dB)

4 结语

提出了一种 OFDMA 中继系统中基于 QoS 保证的资源分配算法. 首先在简化资源优化问题的过程中采用了等功率分配方法, 有效降低了算法复杂度, 然后通过拉格朗日松弛优化方法推导出

了子载波分配和中继选择最优解,在此基础上引入用户速率权衡因子,根据速率权衡因子越大的用户,越优先选择子载波和中继这一准则进行子载波分配和中继选择。仿真结果表明,本算法在获得较高系统容量的同时能保证不同用户的最低速率需求,即保证各用户的 QoS。

参考文献:

- [1] Rappaport T S, Annamalai A, Buehrer R M, et al. Wireless communications: Past events and a future perspective[J]. IEEE Communication Magazine, 2002, 40: 148-161.
- [2] Genc V, Murphy S, Yu Y, et al. IEEE 802.16j relay-based wireless access networks: A novel view[J]. IEEE Wireless Comm, 2008, 15:56-65.
- [3] Pabst R, Walke B, Schultz D, et al. Relay-based deployment concepts for wireless and mobile broadband radio[J]. IEEE Comm Magazine, 2004, 42(9):80-89.
- [4] Ergen M, Coleri S, Varaiya P. QoS aware adaptive resource allocation techniques for fair scheduling in OFDMA based broadband wireless access systems[J]. IEEE Trans Broadcasting, 2003, 49(4):362-370.
- [5] Shen Z, Andrews J G, Evans B L. Adaptive resource allocation in multiuser OFDM systems with proportional rate constraints[J]. IEEE Trans Wireless Comm, 2005, 4(6):2726-2737.
- [6] Pischella M, Belfiore J C. Resource allocation for QoS-aware OFDMA using distributed network coordination[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2009, 58(4):1766-1775.
- [7] Huang Lei, Rong Mengtian, Wang Lan, et al. Resource allocation for OFDMA based relay enhanced cellular networks[C]. VTC April IEEE 65th, 2007:3160-3164.
- [8] You Lei, Song Mei, Song Junde. Uplink resource allocation in OFDMA relay-assisted cellular network with fairness[C]. IET Conference on Mobile and Sensor Networks, 2007:24-27.

QoS Aware Resource Allocation Algorithm in OFDMA Relay Systems

ZHAO Cui-ru, LI You-ming^{*}

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

Abstract: The problem of dynamic resource allocation for downlink orthogonal frequency-division multiple-access (OFDMA) relay systems is studied, and a new resource allocation with quality of service (QoS) constraints is proposed in this paper. Firstly, in order to reduce the complexity, the algorithm uses equal power allocation in the process of simplifying resources optimization problem. Then, the subcarrier allocation and relay selection scheme is derived through Lagrangian relaxation optimization method, based on which each user is assigned a weight factor. The users with higher weight are given higher priority to select their best subcarriers and relays. The simulation results demonstrate that the algorithm can not only obtain high system capacity, but also guarantee the minimum rate requirements of different users.

Key words: relay communications technology; relay selection; OFDMA; QoS; dynamic resource allocation

(责任编辑 章践立)