

OFDMA 中继网络变时域节能资源分配策略

黄博* 方旭明 陈煜

(西南交通大学信息编码与传输省重点实验室 成都 610031)

摘要: 现有正交频分多址接入(OFDMA)中继网络资源分配的研究均采用固定时域配置下的频域分配和功率分配,不能很好适应用户业务在时域上的变化。该文针对 OFDMA 中继网络提出一种可最优节能的资源分配策略和一种简化的节能资源分配策略,为资源分配问题建立一般化的模型,即动态分配时域资源、频域资源和功率资源,所建模型具有很强的灵活性和适应性,不仅适用于固定时域分配系统,也适用于非固定时域分配系统。此外针对非满负荷业务,在保证用户服务质量的情况下,以节能为目标对无线非协作中继网络的资源分配进行能效最大化建模,使用拉格朗日乘法对模型求解。考虑到算法复杂度,应用指派问题中的匈牙利算法设计出一种简化的资源分配策略。理论和仿真结果表明,最优节能资源分配算法能够得到能效的最大化,而简化节能资源分配算法与最优节能资源分配算法在能效上的差距不足 5%,但算法复杂度得到了显著降低。而且,动态分配时域资源比固定时域分配对用户分布不均或链路分布不均有更强的适应性。

关键词: 无线通信; 正交频分多址接入; 中继网络; 资源分配; 能效

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)05-1023-08

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01180

Variable Time-domain Energy Saving Resource Allocation for OFDMA Relay Networks

Huang Bo Fang Xu-ming Chen Yu

(Provincial Key Laboratory of Information Coding & Transmission, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The existing resource allocation research for OFDMA relay networks investigate only frequency-domain allocation and power allocation with fixed time-domain allocation, which can not fit the user service changes in time-domain. An optimal energy-efficient resource allocation strategy and its simplified version are proposed for OFDMA relay network. A generalized model for resource allocation issue, which dynamically allocates time-domain, frequency-domain resources and power resources, is established. Due to the strong flexibility and adaptability, the model may apply to not only the fixed time-domain allocation system, but also the non-fixed time-domain allocation system. For non-full-buffer traffic, to ensure the users' quality of service, an energy-efficiency maximization model is established for OFDMA non-cooperative relay networks by using the Lagrange multiplier algorithm to solve the issue. Taking into account the complexity of the algorithm, a simplified resource allocation strategy is proposed by using the Hungarian method. The theory and simulation results show that the optimal algorithm can get the energy-efficiency maximization, and the energy-efficiency difference between the simplified algorithm and the optimal algorithm is less than 5%, however, the complexity has been significantly reduced. Moreover, the dynamic time-domain allocation has more adaptive in uneven user distribution or link distribution than fixed time-domain allocation.

Key words: Wireless communication; OFDMA; Relay networks; Resource allocation; Energy-efficiency

1 引言

无线通信网络中,中继技术能够以低成本提供更广泛的信号覆盖,并提高小区边缘用户服务质量,已经成为近些年无线通信的研究热点^[1-3]。另外,正交频分多址接入(Orthogonal Frequency Division

Multiple Access, OFDMA)技术已经成为未来 4G 标准(3GPP LTE-Advanced 和 IEEE 802.16j/m)的主流多址接入方式。本文在保证用户服务质量的情况下对 OFDMA 中继网络节能资源分配进行研究,资源分配需要分配的资源有:时域资源、频域资源和功率资源。

OFDMA 中继网络资源分配的研究可以分为两类:满负荷业务、非满负荷业务。对于满负荷业务,研究的主要目标一般是吞吐量最大化,即在给定的最大功率下求解吞吐量的最大化^[4,5],此时吞吐量最

2012-09-10 收到, 2012-12-11 改回

国家 973 计划项目(2012CB316100)和国家自然科学基金(61071108)

资助课题

*通信作者: 黄博 bolshuo@163.com

大化既是谱效最大化也是能效最大化。由于满负荷业务下的功率和带宽固定，所以一定有部分用户的服务质量不能被满足，而吞吐量最大化算法会导致信号质量不好的用户一直不能被服务和分配资源，使用户间的资源分配不公平。为了均衡考虑公平性和系统吞吐量，文献[6-9]分别提出了考虑公平性的资源分配算法，其主要思想都是提高吞吐量和保证公平性的折中。对于非满负荷业务，研究的主要目标一般是满足所有用户的速率需求下能量的最小化，即能效的最大化，这也是近期全世界节能减排大环境下无线中继网络资源分配研究的热点和趋势，目前相关的文献较少。文献[10,11]针对传统 OFDMA 无中继网络，分别应用拉格朗日乘数法和整数规划法提出了节能的子载波、比特、功率分配方法。文献[12]则对 OFDMA 协作中继网络(目的节点同时接收源节点和中继节点的信号，并在接收端合并信号)中资源分配进行研究，以提高能效为目标提出一种简化的子信道和功率分配算法。而对于 OFDMA 非协作中继网络(目的节点只接收源节点或中继节点二者之一的信号)资源分配，目前的研究则很少涉及以节能为目标。因此，本文以节能为目标，提出一种 OFDMA 非协作中继网络资源分配策略。

基于 OFDMA 的无线中继网络中，帧结构限制了资源的分配，由于各个标准中帧结构的不同而使资源分配的模型也不相同，现有资源分配的研究都只针对子载波和功率分配，而没有涉及时域资源的分配，鉴于 3GPP LTE-Advanced 标准已经支持中继系统中不同子帧分配给不同的链路(如 MBSFN 子帧只供 eNB-RN 链路^[13])，本文对无线中继网络的资源分配进行一般化的建模，不仅动态分配频域资源和功率资源，同时动态分配时域资源，不具体使用一种帧结构，但经过适当变化可以适用于目前 4G 标准(3GPP LTE-Advanced 和 IEEE 802.16j/m)中的各种帧结构。我们使用最优化理论的拉格朗日乘数法对模型求解，但这种算法的复杂度较高。为了降低算法复杂度，应用指派问题中的匈牙利算法提出了一种简化的资源分配策略。本文的主要贡献包括：(1)为 OFDMA 中继网络资源分配问题建立一般化的模型，动态分配时域资源、频域资源和功率资源，所建模型具有很强的灵活性和适应性，不仅适用于固定时域分配系统，也适用于非固定时域分配系统。(2)针对非满负荷业务，在保证用户服务质量的情况下，以节能为目标对无线非协作中继网络的资源分配建立能效最大化模型，并提出最优节能算法和简化节能算法。理论和仿真结果表明，最优节能资源分配算法能够得到能效的最大化，而简化节能资源分配算法与最优节能资源分配算法在能效上的差距不足 5%，但能显著降低算法复杂度。而且，

动态分配时域资源比固定时域分配对用户分布不均或链路分布不均有更强的适应性。

2 系统模型

假设无线中继网络中有一个源节点(Source Node, SN), S 个中继节点(Relay Node, RN)和 K 个目的节点(Destination Node, DN), SN 可以直接与 DN 通信，也可以通过 RN 转发与 DN 通信，如图 1(a)所示。我们用 $r(k)$ 表示 SN 与第 k 个 DN 的通信路径，即第 k 个 DN 的中继选择结果， $r(k)=0$ 表示直接通信，其中 $k \in \{1, 2, \dots, K\}$ 。本文不考虑节点的路径选择问题，假设系统已经为各个节点分配完接入路径。假设系统中有 K_d 个 SN-DN 链路直传通信的 DN, 有 K_r 个 SN-RN-DN 链路通过中继转发通信的 DN, 并且 $K_d + K_r = K$ 。源节点的最大发射功率为 P_s^{\max} , 中继节点的最大发射功率为 P_r^{\max} 。系统频域总带宽为 B , 我们在时域周期 T 内分析功率和带宽的分配，并假设周期 T 内各链路的信道状态已知且保持不变。 R_k 表示第 k 个 DN 的速率需求，我们的优化目标为保证所有 DN 速率需求的情况下，求取系统总能量的最小化。链路的速率函数为

$$r(p, w, g) = w \log_2 \left(1 + \frac{pg}{N_0 w} \right) \quad (1)$$

其中 p, w 分别为分配给该链路的功率和带宽。 g 为该链路的信道增益， N_0 为信道的功率谱密度。

OFDMA 中继网络的资源分配模型如图 1(b)所示。在时域上，假设分配 SN-RN 链路和 SN-DN 链路的时间为 T_0 , 分配 RN-DN 链路的时间为 T_1 。在频域上，整个带宽 B 分为 N 个正交的带宽相同的子载波(Sub-Carrier, SC)。为了方便讨论，不考虑相邻子载波之间的保护间隔带宽，每个子载波的带宽为 $B_{SC} = B/N$ 。OFDMA 多载波网络中，每条 SN-RN, SN-DN 或 RN-DN 链路在不同的子载波上的信道增益都不同。用 $\rho_{0,m,n} \in \{0, 1\}$ 表示 SN-RN/SN-DN 链路的子载波选择标识， $\rho_{0,m,n} = 1$ 表示 SN-RN _{m} /SN-DN _{m} 链路使用 SC _{n} 传输数据，其中 $m \in \{1, 2, \dots, M\}$ 。用

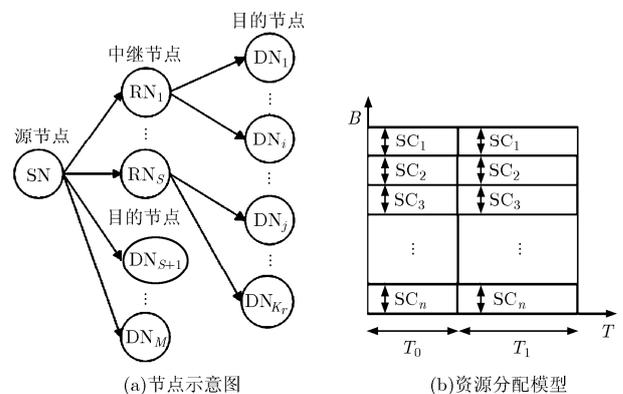


图 1 多中继多用户网络

$\rho_{r(k),k,n} \in \{0,1\}$ 表示 RN-DN 链路的子载波选择标识, $\rho_{r(k),k,n} = 1$ 表示 $\text{RN}_{r(k)}\text{-DN}_k$ 链路使用 SC_n 传输数据, 其中 $k \in \{1, 2, \dots, K_r\}$ 。则 OFDMA 中继网络节能资源分配的优化模型可以表示为

$$\min \left(\frac{T_0}{T} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \rho_{0,m,n} P_{0,m,n} + \frac{T_1}{T} \sum_{k=1}^{K_r} \sum_{n=1}^N \rho_{r(k),k,n} P_{r(k),k,n} \right) \quad (2a)$$

约束条件为

$$\rho_{0,m,n} \in \{0,1\}, \forall m \in \{1, 2, \dots, M\}, \forall n \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (2b)$$

$$\sum_{m=1}^M \rho_{0,m,n} = 1, \quad \forall n \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (2c)$$

$$\rho_{r(k),k,n} \in \{0,1\}, \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, K_r\}, \forall n \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (2d)$$

$$\sum_{k=1}^{K_r} \rho_{r(k),k,n} = 1, \quad \forall n \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (2e)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \rho_{0,m,n} P_{0,m,n} \leq P_s^{\max} \quad (2f)$$

$$\sum_{k=1}^{K_r} \sum_{n=1}^N \rho_{s,k} P_{r(k),k,n} \leq P_r^{\max}, \quad \forall s \in \{1, 2, \dots, S\} \quad (2g)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \rho_{0,m,n} B_{\text{SC}} \leq B \quad (2h)$$

$$\sum_{k=1}^{K_r} \sum_{n=1}^N \rho_{r(k),k,n} B_{\text{SC}} \leq B \quad (2i)$$

$$T_0 + T_1 = T \quad (2j)$$

$$\frac{T_0}{T} \sum_{n=1}^N \rho_{0,m,n} r(P_{0,m,n}, B_{\text{SC}}, g_{0,m,n}) \geq R^m, \quad \forall m \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (2k)$$

$$\frac{T_1}{T} \sum_{n=1}^N \rho_{r(k),k,n} r(P_{r(k),k,n}, B_{\text{SC}}, g_{r(k),k,n}) \geq R_k, \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, K_r\} \quad (2l)$$

其中, 式(2c)表示在时域 T_0 每个 SC 只能分配给一条 SN-RN/SN-DN 链路, 式(2e)表示在时域 T_1 每个 SC 只能分配给一条 RN-DN 链路。 $P_{0,m,n}$ 表示 SN-RN_m/SN-DN_m 链路在 SC_n 的发射功率, $P_{r(k),k,n}$ 表示 RN_{r(k)}-DN_k 链路在 SC_n 的发射功率, 式(2f)和式(2g)是功率限制条件。式(2h)和式(2i)是带宽限制条件, 式(2j)是时间限制条件。 $g_{0,m,n}$ 表示 SN-RN_m/SN-DN_m 链路在 SC_n 上的信道增益, $g_{r(k),k,n}$ 表示 RN_{r(k)}-DN_k

链路在 SC_n 上的信道增益, 式(2k)和式(2l)是速率限制条件。

3 OFDMA 中继网络最优节能资源分配策略

在本节中, 我们研究优化问题式(2)的求解。式(2)中既有连续函数也有离散函数, 既有线性函数也有非线性函数, 此混合非线性优化问题为 NP-hard 问题, 找不到复杂度低于穷举法的解决方案。所以对式(2)进行适当的变化, 使其变成一个可解的非线性优化问题。根据文献[10], 放松对离散变量 $\rho_{0,m,n}$ 和 $\rho_{r(k),k,n}$ 的要求, 使其满足 $\rho_{0,m,n} \in [0,1]$, $\rho_{r(k),k,n} \in [0,1]$ 。并且, 令 $q_{0,m,n} = \rho_{0,m,n} P_{0,m,n}$, $q_{r(k),k,n} = \rho_{r(k),k,n} P_{r(k),k,n}$ 分别表示有效的功率值。同时令 $T_0 = t$, $t \in [0, T]$ 。则优化问题式(2)可以变化为

$$\min \left(\frac{t}{T} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N q_{0,m,n} + \frac{(T-t)}{T} \sum_{k=1}^{K_r} \sum_{n=1}^N q_{r(k),k,n} \right) \quad (3a)$$

约束条件为

$$\sum_{m=1}^M \rho_{0,m,n} \leq 1, \quad \forall n \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (3b)$$

$$\sum_{k=1}^{K_r} \rho_{r(k),k,n} \leq 1, \quad \forall n \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (3c)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N q_{0,m,n} \leq P_s^{\max} \quad (3d)$$

$$\sum_{k=1}^{K_r} \sum_{n=1}^N \rho_{s,k} q_{r(k),k,n} \leq P_r^{\max}, \quad \forall s \in \{1, 2, \dots, S\} \quad (3e)$$

$$\frac{t}{T} \sum_{n=1}^N \rho_{0,m,n} r \left(\frac{q_{0,m,n}}{\rho_{0,m,n}}, B_{\text{SC}}, g_{0,m,n} \right) \geq R^m, \quad \forall m \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (3f)$$

$$\frac{(T-t)}{T} \sum_{n=1}^N \rho_{r(k),k,n} r \left(\frac{q_{r(k),k,n}}{\rho_{r(k),k,n}}, B_{\text{SC}}, g_{r(k),k,n} \right) \geq R_k, \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, K_r\} \quad (3g)$$

变量有 $t, \rho_{0,m,n}, \rho_{r(k),k,n}, q_{0,m,n}, q_{r(k),k,n}$, 其中, 功率限制条件式(2f)和式(2g)变换为式(3d)和式(3e), 带宽限制条件式(2h)和式(2i)可以根据式(3b)和式(3c)去除, 速率限制条件式(2k)变换为式(3f), 式(2l)变换为式(3g)。

建立拉格朗日函数为

$$\begin{aligned} L = & \frac{t}{T} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N q_{0,m,n} + \frac{(T-t)}{T} \sum_{k=1}^{K_r} \sum_{n=1}^N q_{r(k),k,n} + \sum_{n=1}^N \lambda_{0,n} \left(\sum_{m=1}^M \rho_{0,m,n} - 1 \right) + \sum_{n=1}^N \lambda_{1,n} \left(\sum_{k=1}^{K_r} \rho_{r(k),k,n} - 1 \right) \\ & + \eta_0 \left(\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N q_{0,m,n} - P_s^{\max} \right) + \sum_{r=1}^R \eta_r \left(\sum_{k=1}^{K_r} \sum_{n=1}^N \rho_{s,k} q_{r(k),k,n} - P_r^{\max} \right) - \sum_{m=1}^M \mu_{0,m} \left(\frac{t}{T} \sum_{n=1}^N \rho_{0,m,n} r \right. \\ & \left. \cdot \left(\frac{q_{0,m,n}}{\rho_{0,m,n}}, B_{\text{SC}}, g_{0,m,n} \right) - R^m \right) - \sum_{k=1}^{K_r} \mu_k \left(\frac{(T-t)}{T} \sum_{n=1}^N \rho_{r(k),k,n} r \left(\frac{q_{r(k),k,n}}{\rho_{r(k),k,n}}, B_{\text{SC}}, g_{r(k),k,n} \right) - R_k \right) \end{aligned} \quad (4)$$

对 L 函数中的各个变量求偏导, 得到优化问题解决的条件为

$$\frac{\partial L}{\partial q_{0,m,n}} = \frac{t}{T} + \eta_0 - \frac{\mu_{0,m} t \rho_{0,m,n} B_{\text{SC}} g_{0,m,n}}{T(N_0 B_{\text{SC}} \rho_{0,m,n} + q_{0,m,n} g_{0,m,n})} \begin{cases} < 0, & q_{0,m,n} = 0 \\ = 0, & q_{0,m,n} > 0 \end{cases} \quad (5a)$$

$$\frac{\partial L}{\partial q_{r(k),k,n}} = \frac{(T-t)}{T} + \eta_r - \frac{\mu_k (T-t) \rho_{r(k),k,n} B_{\text{SC}} g_{r(k),k,n}}{T(N_0 B_{\text{SC}} \rho_{r(k),k,n} + q_{r(k),k,n} g_{r(k),k,n})} \begin{cases} < 0, & q_{r(k),k,n} = 0 \\ = 0, & q_{r(k),k,n} > 0 \end{cases} \quad (5b)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \rho_{0,m,n}} = \lambda_{0,n} - \mu_{0,m} \frac{t}{T} \left(B_{\text{SC}} \log_2 \left(1 + \frac{q_{0,m,n} g_{0,m,n}}{N_0 B_{\text{SC}} \rho_{0,m,n}} \right) - \frac{B_{\text{SC}} q_{0,m,n} g_{0,m,n}}{N_0 B_{\text{SC}} \rho_{0,m,n} + q_{0,m,n} g_{0,m,n}} \right) \begin{cases} < 0, & \rho_{0,m,n} = 0 \\ = 0, & \rho_{0,m,n} > 0 \end{cases} \quad (5c)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \rho_{r(k),k,n}} = \lambda_{1,n} - \mu_k \frac{(T-t)}{T} \left(B_{\text{SC}} \log_2 \left(1 + \frac{q_{r(k),k,n} g_{r(k),k,n}}{N_0 B_{\text{SC}} \rho_{r(k),k,n}} \right) - \frac{B_{\text{SC}} q_{r(k),k,n} g_{r(k),k,n}}{N_0 B_{\text{SC}} \rho_{r(k),k,n} + q_{r(k),k,n} g_{r(k),k,n}} \right) \begin{cases} < 0, & \rho_{r(k),k,n} = 0 \\ = 0, & \rho_{r(k),k,n} > 0 \end{cases} \quad (5d)$$

$$\frac{\partial L}{\partial t} = \frac{1}{T} \begin{pmatrix} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N q_{0,m,n} - \sum_{k=1}^{K_r} \sum_{n=1}^N q_{r(k),k,n} \\ - \sum_{m=1}^M \mu_{0,m} \sum_{n=1}^N \rho_{0,m,n} B_{\text{SC}} \log_2 \left(1 + \frac{q_{0,m,n} g_{0,m,n}}{N_0 B_{\text{SC}} \rho_{0,m,n}} \right) \\ + \sum_{k=1}^{K_r} \mu_k \sum_{n=1}^N \rho_{r(k),k,n} B_{\text{SC}} \log_2 \left(1 + \frac{q_{r(k),k,n} g_{r(k),k,n}}{N_0 B_{\text{SC}} \rho_{r(k),k,n}} \right) \end{pmatrix} \begin{cases} < 0, & t = 0 \\ = 0, & 0 < t < T \\ > 0, & t = T \end{cases} \quad (5e)$$

通过式(5a)和式(5b)可以得到源节点和中继节点有效的发射功率 $q_{0,m,n}$ 和 $q_{r(k),k,n}$ 为

$$q_{0,m,n} = B_{\text{SC}} \rho_{0,m,n} \left(\frac{\mu_{0,m} t}{t + T \eta_0} - \frac{N_0}{g_{0,m,n}} \right)^+ \quad (6)$$

$$q_{r(k),k,n} = B_{\text{SC}} \rho_{r(k),k,n} \left(\frac{\mu_k (T-t)}{(T-t) + T \eta_r} - \frac{N_0}{g_{r(k),k,n}} \right)^+ \quad (7)$$

其中, $(x)^+$ 的定义为 $(x)^+ = \max(0, x)$ 。把式(6)和式(7)分别代入式(5c)和式(5d)中, 为方便后文算法表述, 定义函数如下:

$$H_{0,m,n}(\mu_{0,m}, \eta_0) = \mu_{0,m} \frac{t}{T} B_{\text{SC}} \left[\left(\log_2 \left(\frac{\mu_{0,m} t g_{0,m,n}}{N_0 (t + T \eta_0)} \right) \right)^+ - \left(1 - \frac{N_0 (t + T \eta_0)}{\mu_{0,m} t g_{0,m,n}} \right)^+ \right] \begin{cases} < \lambda_{0,n}, & \rho_{0,m,n} = 0 \\ = \lambda_{0,n}, & \rho_{0,m,n} > 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$H_{r(k),k,n}(\mu_k, \eta_r) = \mu_k \frac{(T-t)}{T} B_{\text{SC}} \left[\left(\log_2 \left(\frac{\mu_k (T-t) g_{r(k),k,n}}{N_0 ((T-t) + T \eta_r)} \right) \right)^+ - \left(1 - \frac{N_0 ((T-t) + T \eta_r)}{\mu_k (T-t) g_{r(k),k,n}} \right)^+ \right] \begin{cases} < \lambda_{1,n}, & \rho_{r(k),k,n} = 0 \\ = \lambda_{1,n}, & \rho_{r(k),k,n} > 0 \end{cases} \quad (9)$$

式(8), 式(9)中, t 是连续变量, 无法求得 t 的最优化取值。由于目前多载波系统的时域分配都是离散型的帧、子帧、时隙, 所以令 t 取离散型值 $t \in \{1, 2, \dots, T\}$, 使用遍历的方法确定 t 的值。对于每一个确定的 t 值, 进行子载波和功率的分配。对于任意给定的子载波 n^* , SN-RN/SN-DN 链路存在一条链路 SN-RN $_{m^*}$ /SN-DN $_{m^*}$, RN-DN 链路存在一条链路 RN $_{r(k^*)}$ -DN $_{k^*}$, 使得

$$(0, m^*) = \arg \max_m H_{0,m,n^*}(\mu_{0,m}, \eta_0) \quad (10)$$

$$(r(k^*), k^*) = \arg \max_{(r(k),k)} H_{r(k),k,n^*}(\mu_k, \eta_r) \quad (11)$$

则在时域 t , 分配子载波 n^* 给链路 SN-RN $_{m^*}$ /SN-DN $_{m^*}$ 。在时域 $T-t$, 分配子载波 n^* 给链路 RN $_{r(k^*)}$ -DN $_{k^*}$ 。由于前文放宽了 $\rho_{0,m,n}$ 和 $\rho_{r(k),k,n}$, 重新限制

$\rho_{0,m,n}$ 和 $\rho_{r(k),k,n}$ 。当 $\rho_{0,m,n} > 0$ 时, 令 $\rho_{0,m,n} = 1$, 当 $\rho_{r(k),k,n} > 0$ 时, 令 $\rho_{r(k),k,n} = 1$ 。则得到

$$\rho_{0,m^*,n^*} = 1, \quad \rho_{0,m,n^*} = 0, \quad \forall m \neq m^* \quad (12)$$

$$\rho_{r(k^*),k^*,n^*} = 1, \quad \rho_{r(k),k,n^*} = 0, \quad \forall k \neq k^* \quad (13)$$

这样就可以逐个把 n 个子载波分配出去, 通过式(6)和式(7)计算得到每个子载波上分配的功率值。具体的算法见表 1。另外, 要求得式(10)和式(11), 则需要得到式(8)和式(9)中拉格朗日乘数的值。本文参照文献[14]使用快速迭代法求拉格朗日乘数值。快速迭代法首先为各个拉格朗日乘数预设一个初始值, 此初始值与其约束的约束条件有关, 然后再通过多次调整修正到合理的偏差区间。例如, η_0 可以通过式(14)进行修正:

表1 最优节能资源分配策略

For $t=1:T$
For $n=1:N$
使用式(10)和式(11)得到链路 $(0,m^*)$ 和链路 $(r(k^*),k^*)$
根据式(12)和式(13)得到 $\rho_{0,m,n}$ 和 $\rho_{r(k),k,n}$
根据式(6)和式(7)计算 $q_{0,m,n}$ 和 $q_{r(k),k,n}$
End for
$P(t) = \frac{t}{T} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N q_{0,m,n} + \frac{(T-t)}{T} \sum_{k=1}^{K_r} \sum_{n=1}^N q_{r(k),k,n}$
End for
$t^* = \arg \min_t P(t)$

$$\eta_0(i+1) \leftarrow \eta_0(i) + \frac{1}{\sqrt{i}} \mu \left(P_s^{\max} - \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N q_{0,m,n} \right) \quad (14)$$

μ 是调整步长, 满足 $\mu \in (0,1)$ 。 η_0 经过多次调整直到 $P_s^{\max} - \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N q_{0,m,n}$ 调整到合理的偏差区间 $[-\varepsilon, \varepsilon]$ 。 其他的参数可以通过类似方法得到, 详细的快速迭代法可参照文献[14], 本文不再赘述。

4 OFDMA 中继网络简化节能资源分配策略

上一节的资源分配算法的复杂度较高, 可以表示为 $O(TNSKI)$, 其中, I 是求取拉格朗日乘数值的快速迭代法的迭代次数, 其他参数参照前文所述。 为了降低算法复杂度, 并且保证优化的性能, 本节提出一种简化的资源分配策略。 算法可分成两步, 先求解时域上 T_0 和 T_1 的分配, 再求解各个时域上子载波和功率的分配。

4.1 求解时域 T_0 和 T_1 的分配

对于时域 T_0 和 T_1 的分配, 我们假设每条链路在不同的子载波上的信道增益相同, 则建立时域分配的简化模型为

$$\min \left(\frac{T_0}{T} P_0 + \frac{T_1}{T} P_1 \right) \quad (15a)$$

约束条件为

$$T_0 + T_1 = T \quad (15b)$$

$$\frac{T_0}{T} r(P_0, B, \bar{g}_{0,m}) \geq \sum_{m=1}^M R^m \quad (15c)$$

$$\frac{T_1}{T} r(P_1, B, \bar{g}_{r(k),k}) \geq \sum_{k=1}^{K_r} R_k \quad (15d)$$

其中 $\bar{g}_{0,m} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M g_{0,m}$ 表示 SN-RN/SN-DN 链路的平均信道增益, $\bar{g}_{r(k),k} = \frac{1}{K_r} \sum_{k=1}^{K_r} g_{r(k),k}$ 表示 RN-

DN 链路的平均信道增益。 式(15)是简单的优化问题, 可以参照式(3)的求解, 本文不再赘述。

4.2 求解各个时域上子载波和功率分配

用 T_0^* 和 T_1^* 表示上一步的时域分配的结果, 分别在 T_0^* 和 T_1^* 确定每条链路需要的子载波和功率。 用 $N_{0,m}$ 表示 SN-RN/SN-DN 链路第 m 个节点需要的子载波个数, 用 $N_{1,k}$ 表示 RN-DN 链路第 k 个节点需要的子载波个数, 则

$$N_{0,m} = \left\lceil \frac{R^m}{(T_0^*/T) r(P_0^*, B_{SC}, g_{0,m})} \right\rceil \quad (16)$$

$$N_{1,k} = \left\lceil \frac{R_k}{(T_1^*/T) r(P_1^*, B_{SC}, g_{r(k),k})} \right\rceil$$

其中 P_0^* 和 P_1^* 分别表示 SN 和 RN 的最大发射功率平分到各个子载波的功率, $g_{0,m}$ 表示 SN-RN _{m} /SN-DN _{m} 链路在各个子载波上信道增益的平均值, $g_{r(k),k}$ 表示 RN _{$r(k)$} -DN _{k} 链路在各个子载波上信道增益的平均值, 则有

$$g_{0,m} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N g_{0,m,n}, \quad g_{r(k),k} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N g_{r(k),k,n} \quad (17)$$

本文使用指派问题中的匈牙利算法求解功率最小化问题, 功率作为指派问题中的费用, 可以通过式(18)求得

$$\left. \begin{aligned} (T_0^*/T) r(P_{0,m,n}, B_{SC}, g_{0,m,n}) \cdot N_{0,m} &= R^m \\ (T_1^*/T) r(P_{r(k),k,n}, B_{SC}, g_{r(k),k,n}) \cdot N_{1,k} &= R_k \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

则分别对 SN-RN/SN-DN 和 RN-DN 链路建立指派问题的费用系数矩阵为

$$\mathbf{c}_{N \times M'}^0 = \begin{pmatrix} p_{0,1,1}^1 & p_{0,1,1}^2 & \cdots & p_{0,1,1}^{N_{0,1}} & \cdots & p_{0,M,1}^{N_{0,M}} \\ p_{0,1,2}^1 & p_{0,1,2}^2 & \cdots & p_{0,1,2}^{N_{0,1}} & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{0,1,N}^1 & p_{0,1,N}^2 & \cdots & p_{0,1,N}^{N_{0,1}} & \cdots & p_{0,M,N}^{N_{0,M}} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{c}_{N \times K_r'}^1 = \begin{pmatrix} p_{r(1),1,1}^1 & p_{r(1),1,1}^2 & \cdots & p_{r(1),1,1}^{N_{1,1}} & \cdots & p_{r(K_r),K_r,1}^{N_{1,K_r}} \\ p_{r(1),1,2}^1 & p_{r(1),1,2}^2 & \cdots & p_{r(1),1,2}^{N_{0,1}} & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{r(1),1,N}^1 & p_{r(1),1,N}^2 & \cdots & p_{r(1),1,N}^{N_{1,1}} & \cdots & p_{r(K_r),K_r,N}^{N_{1,K_r}} \end{pmatrix} \quad (19)$$

其中 M' 是预先计算的 SN-RN/SN-DN 链路 M 个节点需要的总的子载波个数, K_r' 是 RN-DN 链路 K_r 个节点需要的总的子载波个数, 可以表示为

$$M' = \sum_{m=1}^M N_{0,m}, \quad K_r' = \sum_{k=1}^{K_r} N_{1,k} \quad (20)$$

并且, 在费用系数矩阵中, 元素 $p_{0,m,n}^1 = p_{0,m,n}^2 = \cdots = p_{0,m,n}^{N_{0,m}} = p_{0,m,n}$, $p_{r(k),k,n}^1 = p_{r(k),k,n}^2 = \cdots = p_{r(k),k,n}^{N_{1,k}} = p_{r(k),k,n}$ 。 使用指派问题中的匈牙利算法^[15]求解, 表

示为

$$\text{Hungarian}(c) \quad (21)$$

为了使以上指派问题有解, 根据文献[16]假设 $M' \leq N$, $K'_r \leq N$, 即需求的子载波数少于系统的子载波数。当 $M' > N$ 或 $K'_r > N$ 时, 可以根据用户的优先级或服务类型等降低部分用户的速率需求 R_k 直到满足 $M' \leq N$, $K'_r \leq N$ 。如果 $N - M' > 0$ 或 $N - K'_r > 0$, 即系统执行匈牙利算法后还有剩余的子载波, 那么逐个分配剩余的子载波给能节省最多功率的链路, 直到所有子载波全部分配完成。具体的算法见表 2。由于匈牙利算法的复杂度为 $O(N^3)$, 所以简化节能资源分配的算法复杂度为 $O(N^3)$, 其中 N 为子载波个数。可以看到, 当 $N^2 \leq TRKI$ 时, 简化节能资源分配复杂度比最优节能资源分配复杂度低。由于求取拉格朗日乘数的迭代次数 I 显著高于其他参数, 所以简化节能资源分配相比最优节能资源分配算法复杂度有显著降低。

5 性能评价

本文在中继蜂窝网络中对所提算法进行仿真验证。假设单个小区中作为 SN 的基站在小区中心位置, 小区半径 1 km, 周围均匀分布多个 RN, RN 在

表 2 简化节能资源分配策略

STEP 1: 求 T_0, T_1
 求解优化问题式(15), 得到优化的时域分配 T_0^*, T_1^*

STEP 2: 求 T_0^*/T_1^* 时域上的子载波和功率分配
 For $m = 1 : M/k = 1 : K_r$
 使用式(16)计算 $N_{0,m} / N_{1,k}$
 使用式(18)计算 $P_{0,m,n} / P_{r(k),k,n}$, 得到费用系数矩阵 $c_{N \times M}^0 / c_{N \times K'_r}^1$, 使用匈牙利算法求解 Hungarian ($c_{N \times M}^0$) / Hungarian ($c_{N \times K'_r}^1$)
 End for

STEP 3: 剩余子载波的再分配
 if $N - M' > 0 / N - K'_r > 0$, then
 for $n = 1 : N$
 If $\text{mark}_n = 0$ (未分配的子载波) then
 For $m = 1 : M / k = 1 : K_r$
 $\Delta P_{0,m} = P_{0,m,\text{old}} - P_{0,m,\text{new}} / \Delta P_{r(k),k}$
 $= P_{r(k),k,\text{old}} - P_{r(k),k,\text{new}}$
 End for
 $m^* = \arg \max_m \Delta P_{0,m} / k = \arg \max_k \Delta P_{r(k),k}$
 If $\Delta P_{0,m^*} > 0 / \Delta P_{r(k^*),k^*} > 0$, then
 分配子载波 n 给节点 m^* / 分配子载波 n 给节点 k^*
 End if.
 End if.
 End for
 End if

距离 SN 小区半径 2/3 处, 即 SN-RN 距离为 $1 \times 2/3$ km^[17]。50 个 DN 均匀分布在小区内部, 使用基于信道状况的大尺度路径选择算法为 DN 选择接入路径。SN 最大发射功率 46 dBm, 每个 RN 最大发射功率 36 dBm。时域 T 取值 10 ms。载波频率 3.5 GHz, 系统共有 128 个子载波, 每个子载波带宽为 15 kHz。路径损耗(path loss)和阴影衰落(shadow fading)采用文献[18]所介绍的模型。

本文分别对配置 3 个 RN 和 6 个 RN 的简化节能资源分配策略和配置 6 个 RN 的最优节能资源分配策略进行仿真验证。图 2 是 3 种不同场景和算法随着 DN 的速率需求 R_k 增大的总功率变化图, 从图中可以看到各种算法的总功率都是随着速率需求的增大而增大。其中, 6 个 RN 的简化节能资源分配算法比 3 个 RN 的简化节能资源分配算法消耗更少的功率资源, 而比 6 个 RN 的最优节能资源分配算法消耗更多的功率资源, 但最优算法与简化算法的功率消耗的差别不大。图 3 是 3 种不同场景和算法随着链路的平均 SNR 的增大的能效变化图, 横坐标链路平均 SNR 是系统中所有链路的平均 SNR 水平, 假设 DN 速率需求为 1 Mbps。随着链路平均 SNR 的增大, 各条链路保持相同的传输速率所需要的功率随之降低, 所以每种算法的能效都随之提高。其中, 6 个 RN 最优节能资源分配的能效最高, 3 个 RN 简化节能资源分配的能效最低, 而 6 个 RN 的最优算法和简化算法的能效差距不足 5%。

图 4 是 6 个 RN 简化节能资源分配算法中不同节点的发射功率随着时域 T_0 的增大的变化图, 其中 RN 功率为所有 RN 的发射功率之和, 假设 DN 速率需求仍为 1 Mbps。此图的仿真中, 我们不按照简化节能资源分配算法中的 STEP1 来求解 T_0 , 而是动态地给 T_0 分配值。可以看到, 随着 T_0 的增大, SN-RN/SN-DN 链路在传输总速率不变的情况下, 增加了时域资源, 所以 SN 功率下降。相反, 随着 T_0 的增大, T_1 随之减少, RN-DN 链路在传输总速率不变的情况下, 减少了时域资源, 所以 RN 功率上升。而 SN 与 RN 的总功率则先降低再升高, 在 $T_0=6$ ms 左右达到最低点。图 5 是采用 6 个 RN 简化节能资源分配算法不同用户分布总功率随时域分配变化图, 其中, 用户集中基站分布场景为 80% 分布在基站周围, 20% 用户分布在小区边缘, 用户集中小区边缘分布场景为 20% 用户分布在基站周围, 80% 用户分布在小区边缘。从图中可以看到, 用户集中基站分布场景总功率最低值在 3 种场景中最小, 这是由于用户分布越靠近小区中心, 其信道条件越好, 消耗的总能量也随之降低。用户集中基站分布场景在 T_0/T_1 为 7/3 时总功率达到最低值, 相

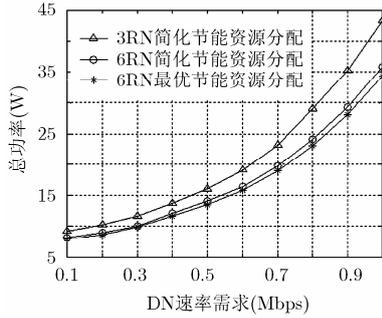


图 2 3种场景算法消耗总功率比较图

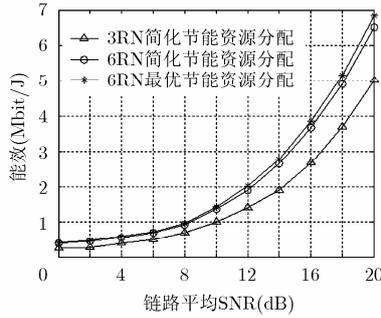


图 3 3种场景和算法能效比较图

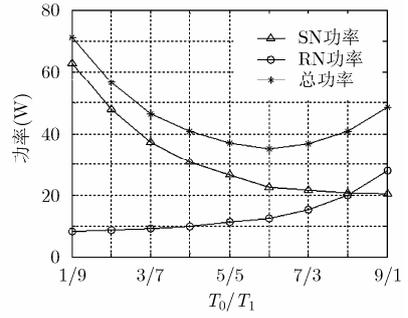


图 4 6RN 简化节能分配策略各节点功率随时域分配变化图

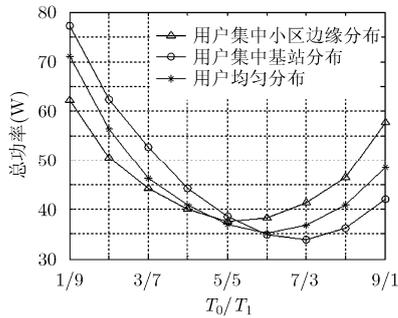


图 5 不同用户分布总功率随时域分配变化图

比于固定时域分配 5/5 有 15%左右的降低, 说明动态分配时域资源比固定分配时域资源对用户分布不均或者链路分布不均有更强的适应性。

6 结论

本文针对 OFDMA 中继网络提出一种最优节能资源分配策略和一种简化节能资源分配策略。基于 OFDMA 的无线中继网络中, 帧结构限制了资源的分配, 由于各个标准中帧结构的不同而使资源分配的模型也不相同, 本文为 OFDMA 中继网络资源分配问题建立一般化的模型, 动态分配时域资源、频域资源和功率资源, 所建模型具有很强的灵活性和适应性, 不仅适用于固定时域分配系统, 也适用于非固定时域分配系统。针对非满负荷业务, 在保证用户服务质量的情况下, 以节能为目标对无线非协作中继网络的资源分配进行能效最大化建模, 使用最优化理论的拉格朗日乘数法对模型求解, 但这种算法的复杂度较高。为了降低算法复杂度, 本文应用指派问题中的匈牙利算法提出了一种简化的资源分配策略。理论和仿真结果表明, 最优节能资源分配算法能够得到能效的最大化, 而简化节能资源分配算法与最优节能资源分配算法在能效上的差距不足 5%, 但算法复杂度得到了显著降低。而且, 动态分配时域资源比固定时域分配对用户分布不均或链路分布不均有更强的适应性。

参考文献

- [1] Pabst R, Walke B, Schultz D, *et al.* Relay-based deployment concepts for wireless and mobile broadband cellular radio [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2004, 42(9): 80-89.
- [2] Salem M, Adinoyi A, Yanikomeroglu H, *et al.* Opportunities and challenges in OFDMA-based cellular relay networks: a radio resource management perspective[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010, 59(5): 2496-2510.
- [3] Salem M, Adinoyi A, Rahman M, *et al.* An overview of radio resource management in relay-enhanced OFDMA-based networks[J]. *IEEE Communications Survey & Tutorials*, 2010, 12(3): 422-438.
- [4] Wang W Y, Yan S F, and Yang S Y. Optimally joint subcarrier matching and power allocation in OFDM multihop system[J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2008: 1-8.
- [5] Fallgren M. An optimization approach to joint cell, channel and power allocation in multicell relay networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2012, 11(8): 2868-2875.
- [6] Tang M W, Wang X X, Wang Y L, *et al.* Dynamic resource allocation with threshold in OFDMA-based relay networks [C]. 2010 IEEE Vehicular Technology Conference Spring (VTC 2010-Spring), Taipei, 2010: 1-5.
- [7] 陈瑾平, 何世文, 杨绿溪. 多小区 OFDMA 解码转发中继通信系统的分布式资源分配算法[J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(4): 787-794.
- Chen Jin-ping, He Shi-wen, and Yang Lv-xi. Distributed resource allocation for multi-cell OFDMA decode-and-forward relaying networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(4): 787-794.
- [8] Park C W, Lee H J, and Lim J T. Fair semi-distributed resource allocation scheme over relay-enhanced OFDMA networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2012, 16(8): 1188-1191.

- [9] 黄高飞, 郑晖, 严一尔, 等. OFDMA 中继系统资源分配算法研究[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2012, 11(2): 59-64.
Huang Gao-fei, Zheng Hui, Yan Yi-er, *et al.* Study of resource allocation algorithm for downlink channel in OFDMA relay system[J]. *Journal of Guangzhou University (Natural Science Edition)*, 2012, 11(2): 59-64.
- [10] Wong C Y, Cheng R S, Lataief K B, *et al.* Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit, and power allocation[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1999, 17(10): 1747-1758.
- [11] Kim I, Park I, and Lee Y. Use of linear programming for dynamic subcarrier and bit allocation in multiuser OFDM [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2006, 55(4): 1195-1207.
- [12] Joung J and Sun S. Power efficient resource allocation for downlink OFDMA relay cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2012, 60(5): 2447-2459.
- [13] 3GPP TR36.814 v9.0.0. Further Advancements for E-UTRA Physical Layer Aspects (Release 9)[S]. March 2010.
- [14] Nassar K, Pascal B, Philippe C, *et al.* Resource allocation for downlink cellular OFDMA systems-part I: optimal allocation [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010, 58(2): 720-734.
- [15] 陈宝林. 最优化理论与算法[M]. 第 2 版, 北京: 清华大学出版社, 2005: 444-450.
- [16] Xiong C, Li G Y, Zhang S Q, *et al.* Energy- and spectral-efficiency tradeoff in downlink OFDMA networks [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(11): 3874-3886.
- [17] Wang B, Wen X, Su D, *et al.* User satisfaction based resource allocation for OFDMA relay networks in the resource-constrained system[C]. 2010 IEEE Second International Conference on Future Networks (ICFN'10), Sanya, China, 2010: 304-308.
- [18] IEEE 802.16 Working Group. IEEE 802.16j-06/013r3. Multi-hop Relay System Evaluation Methodology (Channel Model and Performance Metric)[S]. New York: IEEE Press, February 2007.
- 黄 博: 男, 1984 年生, 博士生, 研究方向为无线中继通信网络。
方旭明: 男, 1962 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为下一代无线通信网络、高移动性无线通信。
陈 煜: 女, 1986 年生, 博士生, 研究方向为无线中继通信网络。