

基于能量效率的改进型 LDD 资源分配算法

周玲玲,解培中,李 汀

(南京邮电大学 通信与信息工程学院,江苏 南京 210003)

摘 要:无线通信系统巨大的能量消耗已经引起广泛关注,以能效为导向的绿色通信设计已成为一个热点研究方向。文中对正交频分多址接入(Orthogonal Frequency Division Multiple Access,OFDMA)多用户下行链路系统的高能效资源分配策略进行了研究。OFDMA 下行链路资源分配算法,一般以最大化用户和速率、最小化发射功率或用户和速率与发射功率的比值最大化为目标对子载波和功率进行分配。有别于传统方法,文中提出了一种基于能量效率最优的拉格朗日对偶分解(LDD)算法,并对目标函数进行改进,将分数规划问题转化为一般的凸规划问题进行求解,降低了计算的复杂度。该算法将优化问题分解为两个子问题:子载波调度和能效功率分配。算法首先采用迭代运算动态分配子载波和功率,然后用二分搜索算法得到能量效率的最优值。仿真结果表明,文中算法能有效提高 OFDMA 系统的能量效率,并大大地降低了计算的复杂度。

关键词:正交频分多址接入;资源分配;LDD;能量效率

中图分类号:TP301.6

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2016)07-0040-06

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2016.07.009

Advanced LDD Resource Allocation Algorithm Based on Energy-efficient

ZHOU Ling-ling, XIE Pei-zhong, LI Ting

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

Abstract: The enormous energy consumption of wireless communication systems has aroused universal concerns throughout the world. The energy-efficient oriented design for green communications has become a hot research direction. In this paper, the high energy-efficient resource allocation strategy is studied in multiuser for Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) downlink system. The main objective of the OFDMA downlink resource allocation focuses on three aspects: weighted sum rate maximization (WSR-max), weighted sum power minimization (WSPmin) or weighted the ratio of sum rate and sum transmission power maximization. In contrast to traditional methods, in this paper, Lagrangian dual decomposition algorithm of subcarrier and power allocation for OFDMA downlink system with advanced objective function is proposed. The energy-efficient resource allocation problem can be converted into a more tractable convex optimization, and the computational complexity has been greatly reduced. The optimization problem is divided into two subproblems: subcarrier scheduling and power allocation. First, the algorithm uses the iteration to dynamically allocate subcarrier and power, and conducts the bisection search method to get the optimal energy efficiency. Simulation shows that the proposed algorithm can improve energy efficiency significantly for OFDMA system, and reduce the computational complexity greatly.

Key words: OFDMA; resource allocation; Lagrangian dual decomposition; energy efficiency

1 概 述

随着信息及通信技术产业的飞速发展,人们对于移动通信的使用频率和依赖程度越来越高,无线通信系统的能量消耗也在不断增加。对于移动运营商而言,能量消耗所产生的费用已经成为财政支出的一个

主要部分^[1]。随着 4G 移动网络的普及,通信网的传输速率迅速提高,为此会大量增加小区的基站数以及核心网能量的消耗。其中,对于固定架构的蜂窝移动通信网络,随着基站数量的急剧增加,能量消耗问题显得尤为突出,大量的能量消耗使得经营成本急剧上升。

收稿日期:2015-10-22

修回日期:2016-01-27

网络出版时间:2016-06-22

基金项目:江苏省自然科学基金(BK20140881)

作者简介:周玲玲(1989-),女,硕士研究生,研究方向为 OFDMA 系统的能量效率研究;解培中,副教授,研究生导师,研究方向为电子系统和无线通信中的信号处理,包括故障诊断、智能天线、MIMO 技术、协作通信等。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20160622.0842.018.html>

能量的消耗除了带来巨大的成本和资源压力外,还会产生严重的环境问题^[2]。能量消耗所产生的二氧化碳,会导致温室效应的加重。在强烈的节能减排要求的驱动下,产生了一个新的概念—绿色通信。绿色通信是以节能减排为目标的移动通信,旨在保证用户传输质量和传输速率的同时,尽可能降低能耗,减少对环境的污染。

无线通信网络系统结构主要分为三部分:用户端、接入端、核心网络。在整个通信网络中,接入网的损耗占总能耗的比重最大,这是因为接入网设备数量最多,只要在单个设备上节省一定的能量,再乘以一个巨大的基数,就可以在网络整体获得可观的节能效果。因此,在基站数量众多的蜂窝无线通信系统中,提高基站的能量效率便成为了节能重点。

正交频分多址 (OFDMA) 系统利用子载波的正交特性来实现用户多址接入,避免了一个用户在整个频带内发送,从而保证子载波都被对应信道较优的用户使用,获得了频率上的分级增益。它不仅很好地对抗无线传输环境中的多径衰落,也可以获得很高的频谱利用率。目前,OFDMA 已经成为 4G 系统的物理层核心技术之一,被广泛应用在移动通信和移动互联网标准中,具有抗符号间干扰和抗频率选择性衰落等特性。

OFDMA 系统中的资源分配涉及子载波分配、功率分配、自适应调制、比特率分配,几种资源的联合优化是一个复杂度极高的问题。已有研究中,主要采用分步优化的方法达到资源分配的目的。第 1 步,分配子载波;第 2 步,确定各子载波的功率、调制方式和加载比特数。既可以直接根据信道增益和用户需求将子载波分配给用户,也可以先确定各用户可分的子载波数,再根据信道增益和用户需求进行分配。功率分配也是 OFDMA 系统资源调度中的一个重要研究问题,注水功率分配算法是理论上界,但其复杂度高。文献[3]对 MISO-OFDM 系统下行链路的资源分配算法进行了研究,其针对用户数远小于子载波数量的场景,提出了功率在子载波上平均分配,子载波以不同的数目组成子信道分配给用户的资源分配算法。文献[4]针对 OFDMA 上行链路提出了一种基于功率效率最优的联合子载波和功率分配算法。其先使用 KKT 最优化条件得出子载波的分配方案,再对每个用户分配的子载波进行功率注水,以获得最大的传输速率。但就每个用户来说,功率注水算法对其功率效率并不一定是最优的。文献[5]基于 OFDMA 系统提出了一种线性注水功率分配算法,迭代次数较少,可快速完成功率注水。但其要在 SNR 较高时,系统总吞吐量才能接近迭代注水时的结果。文献[6]采用速率自适应 (RA) 最

大化系统吞吐量和边缘自适应 (MA) 最小化系统发射功率的方法来提高系统能效。文献[7]基于协助 OFDMA 蜂窝系统,考虑每个天线的功率约束,用 LDD 算法得到系统最大和速率。文献[8]基于 OFDM 频率选择性信道,以系统吞吐量和传输功率的比值来衡量系统的能量效率。其证明了在能效注水算法中,全局最优解普遍存在,而注水线只与电路功率和信道状态有关,和总发射功率无关。而在用经典的注水算法得到最大和速率时,总发射功率起到了很重要的作用^[5]。大多数关于能量效率优化的文章都以系统总吞吐量和总传输功率的比值来衡量系统的能量效率,得到一个分数规划问题。在分数规划中,分子分母通常是可微的,然而这种优化问题常常难以求解。文献[9-10]将分数规划问题转化为等效的凸规划问题,可以更有效地解决优化问题。文献[11]用迭代运算得到拉格朗日对偶因子,研究了瑞利衰落信道下的用户最大和速率。这些文章大都基于最大化用户和速率、最小化发射功率以及用户和速率与发射功率的比值最大化为目标对子载波和功率进行分配。

与上述文献给出的算法不同,文中没有单独考虑优化用户的发射功率或传输速率,而是考虑最优化各用户的能量效率。算法基于拉格朗日对偶分解给出了子载波和功率的分配方法,采用迭代运算求得收益最优时子载波和功率如何分配。对目标函数进行改进,将分数规划问题转化为一般的凸规划问题进行求解,利用二分搜索算法求得系统的能量效率,大大地降低了计算复杂度。

2 系统模型与问题描述

2.1 系统模型

考虑一个单小区下行链路多用户 OFDMA 无线通信系统,见图 1。下行链路是指信号从基站到移动台的物理信道。一个基站 (BS) 与 M 个用户共享 N 个子载波。则基站的第 n 个子载波和第 m 个用户的信道增益矩阵 $\mathbf{H}_{m,n}$, 可以表示为:

$$\mathbf{H}_{m,n} = [h_{m,1}, h_{m,2}, \dots, h_{m,N}] \quad (1)$$

其中, $h_{m,n}$ 服从指数分布。

则在下行链路中,第 m 个用户的接收信号可以表示为:

$$y_{m,n} = \mathbf{H}_{m,n} \mathbf{s}_{m,n} + n_{m,n} \quad (2)$$

其中, $\mathbf{s}_{m,n}$ 表示基站天线的发射信号; $n_{m,n}$ 表示零均值、协方差矩阵为 $\sigma^2 \mathbf{I}$ 的复高斯噪声。

将信道增益矩阵 $\mathbf{H}_{m,n}$ 进行奇异值分解,得:

$$\mathbf{H}_{m,n} = \mathbf{U}_{m,n} \mathbf{\Lambda}_{m,n} \mathbf{V}_{m,n}^* \quad (3)$$

其中, $\mathbf{U}_{m,n}$ 和 $\mathbf{V}_{m,n}^*$ 都是酉矩阵; $\mathbf{\Lambda}_{m,n}$ 是对角矩阵,主对角元素为非负实数,其他元素为零。

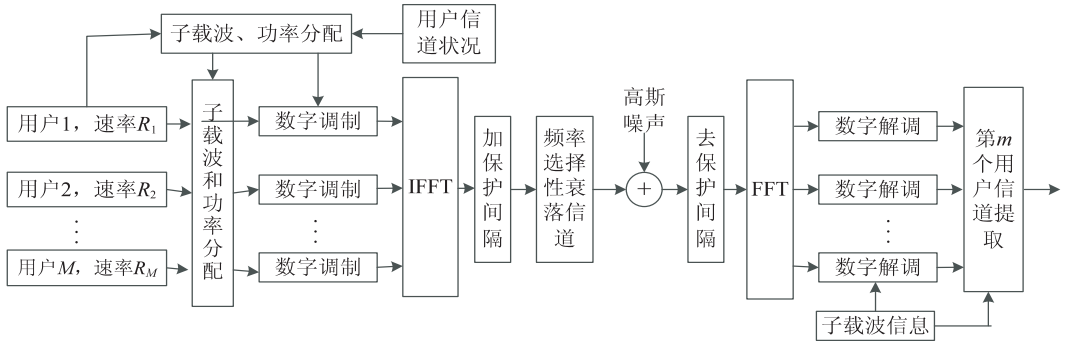


图1 OFDMA系统框图

分别用 $\mathbf{V}_{m,n}$ 和 $\mathbf{U}_{m,n}$ 对发射器和接收器做预处理和后处理,可得:

$$\tilde{y}_{m,n} = \mathbf{U}_{m,n}^* \mathbf{y}_{m,n} = \mathbf{U}_{m,n}^* \mathbf{H}_{m,n} \tilde{s}_{m,n} + \mathbf{U}_{m,n}^* \tilde{n}_{m,n} = \mathbf{A}_{m,n} \tilde{s}_{m,n} + \tilde{n}_{m,n} \quad (4)$$

其中, $\tilde{s}_{m,n}$ 是第 m 个用户接收到的在第 n 个子载波上的发射信号, $\tilde{s}_{m,n} = \mathbf{V}_{m,n} \tilde{s}_{m,n}$; $\mathbf{U}_{m,n}^*$ 是一个酉矩阵; $\tilde{n}_{m,n}$ 是和 $n_{m,n}$ 同分布的复高斯白噪声。

2.2 问题描述

文中以蜂窝系统的能量效率最优为目标进行资源分配。考虑一个蜂窝小区,有 M 个用户 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_M\}$, 共享 N 个子载波,则第 n 个子载波分配给用户 m 的最大传输速率可以表示为:

$$R_{m,n} = B \log_2 \left(1 + \frac{p_{m,n} \cdot |h_{m,n}|^2}{\sigma_0^2} \right) \quad (5)$$

其中, σ_0^2 是子载波的高斯白噪声功率; $h_{m,n}$ 是分配给用户 m 的子载波 n 的信道状态信息(CSI)。

则OFDMA下行链路的能效优化问题可以表示为:

$$\begin{aligned} \max EE &= \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N x_{m,n} \cdot R_{m,n}}{\varepsilon_0 \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N x_{m,n} \cdot p_{m,n} + P_0} \\ \text{s. t. } &\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M p_{m,n} \cdot x_{m,n} \leq P_T, \\ &\sum_{m=1}^M x_{m,n} \leq 1, \forall n \\ &x_{m,n} \in \{0, 1\}, \forall m, n \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $x_{m,n}$ 表示第 n 个子载波分配给用户 m ; $p_{m,n}$ 表示分配给该子载波的功率; P_0 表示系统电路功率; P_T 表示最大发射功率。

3 能效资源分配

由上述分析可知,式(6)描述的是一个分数优化问题。其中,分子是凸函数,分母是仿射函数,目标函数是拟凹的。在无线通信场景下解决能量效率最大化问题都是用分数规划来解决。分数规划是非线性规

划,求解此类问题,最简单的方法是对目标函数求微分,要求分子分母是连续可微的^[11-15]。由于目标函数是拟凹函数,则局部最优点就是全局最优点。文中研究的能量效率子信道和功率动态分配,假设给定子信道分配变量 $x_{k,m}$,则上述优化问题变为一个NP问题,使得问题的解更加复杂。因此,文中将分数规划转化为凸规划问题求解^[16]。

3.1 问题等价

问题(6)目标函数可以等价于:

$$\begin{aligned} \max_{x,p} q \\ \text{s. t. } &\frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N x_{m,n} \cdot R_{m,n}}{\varepsilon_0 \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N x_{m,n} \cdot p_{m,n} + P_0} - q \geq 0 \end{aligned} \quad (7)$$

其中,参数 $q \in R$ 为目标函数(6)的最优值,表示能量效率。

式(7)整理约束条件得:

$$\begin{aligned} \max_{x,p} q \\ \text{s. t. } &\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N x_{m,n} \cdot R_{m,n} - q \cdot (\varepsilon_0 \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N x_{m,n} \cdot p_{m,n} + P_0) \geq 0 \end{aligned} \quad (8)$$

由于问题(6)中分子是凸函数,分母是仿射函数,故上式约束条件是凸函数。给定一个固定值 q ,可以得出优化问题的可行解。如果给定某个 q 值满足:

$$\max_{x,p} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N x_{m,n} \cdot R_{m,n} - q \cdot (\varepsilon_0 \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N x_{m,n} \cdot p_{m,n} + P_0) \geq 0 \quad (9)$$

则可以用二分法求解参数 q 的最优解。考虑函数

$$F(q) = \max_{x,p} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N x_{m,n} \cdot R_{m,n} - q \cdot (\varepsilon_0 \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N x_{m,n} \cdot p_{m,n} + P_0) \quad (10)$$

显然, $F(q)$ 是随 q 严格递减的连续凸函数。由文献[12]可知

$$F(q) > 0 \Leftrightarrow q < q^*$$

$$F(q) = 0 \Leftrightarrow q = q^*$$

$$F(q) < 0 \Leftrightarrow q > q^*$$

因此,求解问题(6)等价于求解非线性函数 $F(q)$

的根,则最优优化条件是:

$$F(q^*) = \max_{x,p} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N x_{m,n} \cdot R_{m,n} - q^* \cdot (\varepsilon_0 \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N x_{m,n} \cdot p_{m,n} + P_0) \quad (11)$$

然后,能量效率优化问题被转化为更易求解的形式。由定理可知,当 $F(q) = 0$ 时, q 即为能量效率的最优解。

3.2 拉格朗日对偶分解

文中采用 Lagrange 对偶分解的方法解决多约束的能效优化问题。Lagrange 函数可以表示为:

$$\begin{aligned} L(\mathbf{X}, \mathbf{P}, \mu) = & \left[\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N x_{m,n} \cdot R_{m,n} - \right. \\ & \left. q(\varepsilon_0 \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N x_{m,n} \cdot p_{m,n} + P_0) \right] + \\ & \mu(P_T - \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N x_{m,n} \cdot p_{m,n}) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N x_{m,n} \cdot R_{m,n} - \\ & q\varepsilon_0 \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N x_{m,n} \cdot p_{m,n} - q \cdot P_0 + \mu P_T - \\ & \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \mu \cdot x_{m,n} \cdot p_{m,n} = \sum_{n=1}^N \left[\sum_{m=1}^M x_{m,n} \cdot R_{m,n} - \right. \\ & \left. \sum_{m=1}^M (q\varepsilon_0 + \mu) x_{m,n} \cdot p_{m,n} \right] + \mu P_T - qP_0 \quad (12) \end{aligned}$$

其中, μ 为基站功率约束的对偶变量; \mathbf{P} 和 \mathbf{X} 是 2 维矩阵,其元素分别是 $p_{m,n}$ 和 $x_{m,n}$,它们具有相同的信道状态信息。

其拉格朗日对偶函数为

$$g(\mu) = \begin{cases} \max_{\mathbf{X}, \mathbf{P}} L(\mathbf{X}, \mathbf{P}, \mu) \\ \text{s. t. } \sum_{m=1}^M x_{m,n} \leq 1, \forall n \in \{1, 2, \dots, N\} \\ x_{m,n} \in \{0, 1\}, \forall m, n \end{cases} \quad (13)$$

则对偶问题是

$$\min_{\mu \geq 0} g(\mu)$$

拉格朗日松弛变量消除了不同子载波间的耦合,对偶问题可以分解为 N 个子问题,并可在每个子载波独立解决。对第 n 个子载波有:

$$\begin{aligned} \max_{x_{m,n}} L_n(\mathbf{X}_n, \mathbf{P}_n, \mu) = & \sum_{m=1}^M x_{m,n} [R_{m,n} - (q\varepsilon_0 + \mu) \cdot \\ & p_{m,n}] \\ \text{s. t. } \sum_{m=1}^M x_{m,n} \leq & 1; x_{m,n} \in \{0, 1\}, p_{m,n} \geq 0, \forall m \end{aligned} \quad (14)$$

其中, \mathbf{X}_n 和 \mathbf{P}_n 是由 $x_{m,n}$ 和 $p_{m,n}$ 组成的矢量。

由式(14)约束条件可以看出,当子载波 n 分配给用户 m 时, $x_{m,n}$ 为 1,其余为零,则

$$T_{m,n} = \max R_{m,n} - (q\varepsilon_0 + \mu) \cdot p_{m,n}$$

$$\text{s. t. } \sum_{m=1}^M x_{m,n} \leq 1; x_{m,n} \in \{0, 1\}, p_{m,n} \geq 0, \forall m \quad (15)$$

由于每个子载波分配给一个用户,可得最优子信道分配策略:

$$x_{m,n} = \begin{cases} 1, (m^*, n^*) = \arg \max_{m,n} T_{m,n} \\ 0, \text{else} \end{cases} \quad (16)$$

因此,第 n 个子载波的功率分配为:

$$p_{m,n} = \begin{cases} \left(\frac{\beta}{(q\varepsilon_0 + \mu) \cdot \ln^2 - |h_{m,n}|^2} \right)^+ (m, n) = (m^*, n^*) \\ 0, \text{else} \end{cases} \quad (17)$$

其中, $(x)^+$ 表示 $\max(x, 0)$ 。

此外,使用梯度算法可以求得对偶问题的解。对偶变量可以表示为:

$$\mu(t+1) = [\mu(t) + \alpha(t) \cdot \left(\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M p_{m,n} \cdot x_{m,n} - P_T \right)]^+ \quad (18)$$

其中, t 是迭代数; $\alpha(t)$ 是步长。

通过迭代得到一个收敛值。改进型拉格朗日对偶分解算法的子载波和功率分配算法描述如下:

- (1) 变量初始化。 $q_u = 0, q_l \gg 0$ 且满足 $F(q_l) < 0$ 。
- (2) 更新 $q_{\text{tmp}} = (q_u + q_l)/2$ 。
- (3) 初始化 $\mu(0)$ 。
- (4) 迭代。给定 $\mu(t)$, 对第 n 个子载波, 分别根据式(16)和式(17)计算子载波分配变量 $x_{m,n}$ 和最佳功率 $p_{m,n}$ 。
- (5) 对基站的 $\mu(t)$ 按照式(18)迭代, 得到对偶变量。
- (6) 返回步骤(4)进行迭代, 直到收敛。
- (7) 如果 $F(q_{\text{tmp}}) > 0, q_u = q_{\text{tmp}}$, 否则 $q_l = q_{\text{tmp}}$ 。
- (8) 当 $|F(q_{\text{tmp}})| < \delta$, (e. g. $\delta = 10^{-2}$), $q_0 = q_{\text{tmp}}$ 。

4 仿真分析

考虑一个六边形单蜂窝 OFDMA 系统, 蜂窝小区半径设为 500 m。假设系统中用户随机分布在小区中, 基站分布在小区的中央, 每个子载波的带宽为 10 kHz, 共 32 个子载波, 因此系统带宽为 320 kHz, 高斯噪声的功率谱密度为 -135 dBm/Hz。基站有 3 个扇区, 每个扇区有 2 根天线, 功率放大系数 $\varepsilon_0 = 10.6$, 电路功率 $P_0 = 100$ W, 基站的发射功率为 1.5 W。

为了与设计的改进型 LDD 算法进行比较, 考虑文献[17]提出的一种次优的能效优化算法和文献[18]提出的 WSRmax 算法。文献[17]所提算法在迭代过

程中,如果对偶因子 μ 初始值设定不当,可能会阻碍收敛过程。因此首先用联合子载波与功率分配算法(SCPA)得到固定的功率值,然后用该功率值得到系统的能量效率,从而降低算法的复杂度。文献[18]是基于最大和速率的子载波分配与功率注水算法。文中所提算法在迭代的过程中,对偶因子 μ 可达到很好的收敛效果,初始值 μ_0 的设定对收敛过程影响不大,收敛速度由迭代步长决定。如果迭代步长 $\alpha(t)$ 太小,则收敛速度太慢;如果迭代步长 $\alpha(t)$ 太大,则随着迭代系数的增加,对偶变量可能不收敛。

图2为LDD对偶因子 μ 的收敛情况,收敛速度由迭代步长决定。当迭代步长为0.05时,迭代2000次就能达到收敛值。当其他参数相同时,不同的初始值最终都收敛于同一个收敛值,对偶因子的初始值对迭代收敛没有影响。

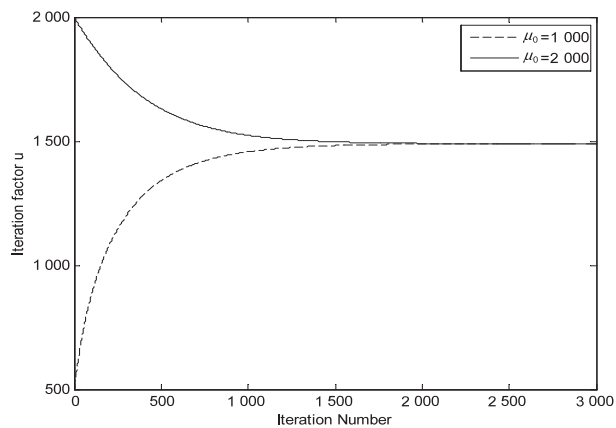


图2 LDD对偶因子 μ 收敛曲线

图3给出了在子载波数相同、用户数不同的情况下,文中提出算法系统能量效率的比较。

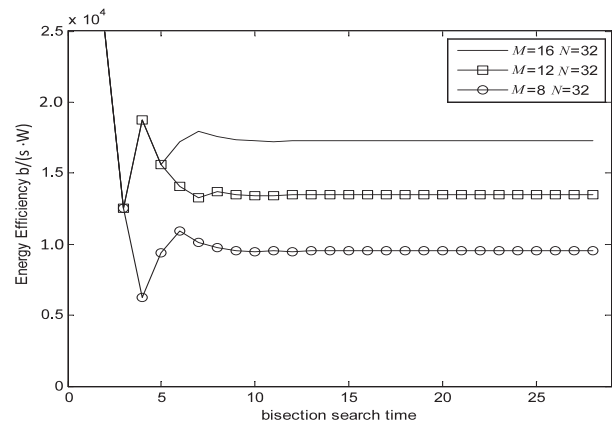


图3 能量效率与搜索次数的关系

从图中可以看到,OFDMA系统中子载波数量一定、用户数不同时,能量效率随着系统中用户数的增加而增加。

同时,当精度 $\delta = 0.01$ 时,文中算法可在搜索次数小于30的情况下得到能量效率的最优值。

图4为蜂窝系统中能量效率随用户数变化的关系

曲线。

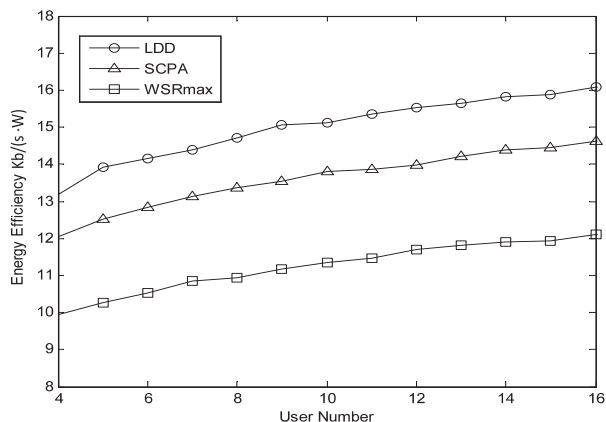


图4 能量效率与用户数的关系

由图中可以看出,文中提出的改进型LDD子载波和功率分配算法与联合子载波与功率分配算法相比较,能量效率提高了将近14%,与最大和速率子载波分配与功率注水算法相比较,能量效率提高了约40%。仿真结果表明文中算法的能量效率较高,性能较好。

图5给出了不同信噪比条件下系统能量效率的比较。

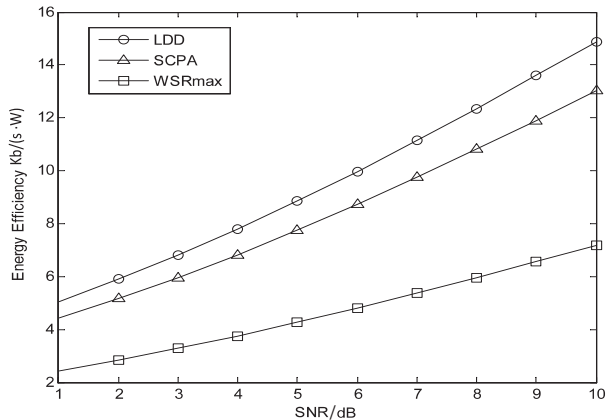


图5 能效与信噪比关系曲线

从图中可以看到,文中所提算法与SCPA算法^[17]和WSRmax算法^[18]相比较,性能有较大的提升。

5 结束语

针对OFDMA下行链路系统,文中提出了一种改进型LDD资源分配算法,并对目标函数进行改进,将分数规划问题转化为多项式形式,转化为一般的凸规划问题进行求解,大大地降低了计算的复杂度。首先采用LDD算法动态分配子载波和功率,得到对偶因子,获得能量效率最优时子载波和功率的分配算法。这个算法是一个迭代过程,在每次迭代的过程中,用户都能分配到一个子载波,并利用相应的功率分配机制对其进行功率分配,直到对偶变量达到收敛值,用户在这些子载波上进行功率调整。然后用二分法对目标函

数进行搜索,得到能量效率的最优值。仿真结果表明,该算法切实可行,能有效提高系统的能量效率,降低了算法的复杂度。

参考文献:

[1] Malta V. Telecommunication support for the protection of the environment[C]//Proc of world telecommunication development conference. [s. l.]:[s. n.],1998.

[2] Fettweis G P,Zimmermann E. ICT energy consumption trends and challenges[C]//Proc of 11th international symposium on wireless personal multimedia communication. [s. l.]:[s. n.],2008:1-4.

[3] Ge Xiaohu,Hu Jinzhong,Wang Chengxiang,et al. Energy efficiency analysis of MISO-OFDM communication systems considering power and capacity constraints[J]. Mobile Networks and Applications,2012,17(1):29-35.

[4] 喻的雄,蔡跃明,吴 丹,等. OFDMA 上行链路中基于博弈论的子载波和功率分配算法[J]. 电子与信息学报,2010,32(4):775-780.

[5] 张冬梅,徐友云,蔡跃明. OFDMA 系统中线性注水功率分配算法[J]. 电子与信息学报,2007,29(6):1286-1289.

[6] Bohge M,Gross J,Meyer M,et al. Dynamic resource allocation in OFDM systems: an overview of cross-layer optimization principles and techniques[J]. IEEE Network Magazine,2007,21(1):53-59.

[7] Jia Yizhen, Wang Youzheng, Lu Jianhua. Joint allocation of frequency and space resources for a cooperative OFDMA cellular system[C]//Proc of international conference on wireless communications,networking and mobile computing. [s. l.]:[s. n.],2009.

[8] Miao Guowang,Himayat N,Li G Y. Energy-efficient link adaptation in frequency-selective channels[J]. IEEE Transactions on Communications,2010,58(2):545-554.

[9] Christian I,Fettweis G P. Energy-efficient link adaptation with transmitter CSI[C]//Proc of wireless communications and networking conference. [s. l.]:IEEE,2011:1381-1386.

[10] Christian I,Chong Zhijiat,Jorswieck E,et al. Framework for link-level energy efficiency optimization with informed transmitter[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications,2012,11(8):2946-2957.

[11] Schaible S. Fractional programming[J]. European Journal of Operations Research,1983,27(1):39-54.

[12] Schaible S,Ibaraki T. Fractional programming[J]. European Journal of Operational Research,1983,12(4):325-338.

[13] Dinkelbach W. On nonlinear fractional programming[J]. Management Science,1967,13(7):492-498.

[14] Ibaraki T. Parametric approaches to fractional programs[J]. Mathematical Programming,1983,26(3):345-362.

[15] Schaible S. Fractional programming II: on Dinkelbach's algorithm[J]. Management Science,1976,22(8):868-873.

[16] Boyd S, Vandenberghe L. Convex optimization[M]. Cambridge:Cambridge University Press,2004.

[17] Xiao Xiao,Tao Xiaoming,Jia Yizhen,et al. An energy-efficient hybrid structure with resource allocation in OFDMA networks[C]//Proc of wireless communications and networking conference. [s. l.]:IEEE,2011:1466-1470.

[18] Seong K,Mohseni M,Cioffi J M. Optimal resource allocation for OFDMA downlink systems[C]//Proc of IEEE international symposium on information theory. [s. l.]:IEEE,2006:1394-1398.

(上接第 39 页)

[2] Elgammal A M,Harwood D,Davis L S. Non-parametric model for background subtraction[C]//Proceedings of the 6th European conference on computer vision. Berlin,BE,GER:Springer-Verlag,2000:751-767.

[3] Liu Y,Yao H,Gao W,et al. Nonparametric background generation[J]. Journal of Visual Communication & Image Representation,2007,18(3):253-263.

[4] Comaniciu D,Meer P. Mean Shift;a robust approach toward feature space analysis[C]//Proc of IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. Piscataway,NJ,USA:IEEE Computer Society,2002:603-619.

[5] Kim K,Chalidabhongse T H,Harwood D,et al. Real-time foreground-background segmentation using codebook model[J]. Real-time Imaging,2005,11(3):172-185.

[6] Barnich O,Vanogenbroeck M. ViBe;a universal background subtraction algorithm for video sequences[J]. IEEE Transactions on Image Processing,2011,20(6):1709-1724.

[7] 严红亮,王福龙,刘志煌. 基于 ViBe 算法的改进背景减去

法[J]. 计算机系统应用,2014,23(6):130-134.

[8] 胡小冉,孙 涵. 一种新的基于 ViBe 的运动目标检测方法[J]. 计算机科学,2014,41(2):149-152.

[9] 赵光明,韩 光,李晓飞,等. 基于融合帧间差的改进 Vibe 方法[J]. 计算机技术与发展,2015,25(3):76-80.

[10] 吴剑舞,翁玲瑜,童 怀. 一种基于改进 ViBe 的运动目标检测方法[J]. 计算机与现代化,2015(7):50-54.

[11] 王 辉,宋建新. 一种基于阈值的自适应 Vibe 目标检测算法[J]. 计算机科学,2015,42(6A):154-157.

[12] 周 晓,赵 锋,朱艳林. 基于 ViBe 的室外动态背景闪烁像素噪声消除方法[J]. 计算机应用,2015,35(6):1739-1743.

[13] 吕嘉卿,刘立程,郝禄国,等. 基于视觉背景提取的自适应运动目标提取算法[J]. 计算机应用,2015,35(7):2029-2032.

[14] Lucia M,Alfredo P. A self-organizing approach to background subtraction for visual surveillance applications [J]. IEEE Transactions on Image Processing,2008,17(7):1168-1177.