

OFDMA 上行无线网络中资源块和功率的分配

李小武¹ 肖孚安² 王 玲³

(1. 湖南科技学院 永州 425000; 2. 西安电子科技大学 西安 710071; 3. 湖南大学 长沙 410012)

摘 要: 正交频分复用多址接入 (OFDMA) 技术已经广泛应用于宽带无线网络, 比如 IEEE 802. 16 (WiMAX) 和 3GPP 长期演进技术 (LTE)。现有的提高系统吞吐量的主要方法是通过增加移动台的发射功率来提高移动台的传输速率。本文研究了在 OFDMA 无线网络上行传输中的资源块和功率联合分配问题。目标是满足基本传输要求前提下减少移动台的功率损耗。由于优化方程是 NP-hard 模型, 所以本文利用注水技术的优势提出了一个启发式算法。仿真结果表明启发式算法性能接近最优解, 特别是网络处于非饱和条件下。

关键词: 第三代合作伙伴计划长期演进技术; 能源节约; 正交频分多址; 资源管理; 全球微波互联接入

中图分类号: TN929 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2012)12-1745-06

On resource-and-energy allocation in uplink OFDMA wireless networks

LI Xiao-wu¹ XIAO Fu-an² WANG Ling³

(1. Hunan University of Science and Engineering, Yongzhou 425000, China;

2. Xi Dian University, Xi'an 710071, China; 3. Hunan University, Changsha 410012, China)

Abstract: The Orthogonal frequency division multiple access (OFDMA) technology has been widely applied to broadband wireless network, such as the IEEE 802. 16 (WiMAX) and 3GPP long term evolution (LTE). Existing studies have targeted at improving network throughput by increasing the transmission rates of mobile stations. In the letter, we consider the tile-and-energy joint allocation problem for uplink transmissions in an OFDMA wireless network. The goal is to reduce the power consumption of mobile station subject to satisfying their traffic demands. Because the optimization equation is an NP-hard model, We develop a heuristic algorithm taking advantage of the water-filling technique. The simulation results show that the heuristic algorithm performance is close to the optimal solution, especially when the network is under unsaturated condition.

Key words: 3rd Generation Partnership Project Long Term Evolution; energy conservation; Orthogonal Frequency-Division Multiple Access; resource management; Worldwide Interoperability for Microwave Access

1 引言

IEEE802. 16 (WiMAX) 和 3GPP 长期演进 (LTE) 采用了 OFDMA 技术。因为 OFDMA 支持多用户分集技术和动态功率自适应, 所以显著提高了频谱效率。OFDMA 网络中现有的提高吞吐量的方法 [1]-[7] 主要是多用户分集和功率分配, 但是都忽略了移动台的功率消耗问题。文献 [8] 为了减少移动台功率消耗问

题建立了一个多维背包模型, 但是没有考虑多用户分集和移动台的功率限制。本文研究了上行 OFDMA 传输中移动台的资源块和功率分配问题。目标是满足传输速率前提下减少移动台的功率消耗。由于提出的优化方程是 NP-hard 模型 [9], 于是本文提出了一个低复杂度、功率效率高的启发式算法。该算法首先以贪婪算法分配资源块给移动台以满足基本传输要求。其次, 如果还有资源块剩余, 采用本文提出的注水算法来

调整移动台的传输功率以节省功率。

2 系统模型

OFDMA 网络的资源帧是一个二维(子信道×时隙)阵列。每一个帧由上行子帧和下行子帧组成。分配给移动台的资源单元是资源块,它是某一个子信道上的一个时隙。用户在这个资源块上能以合适的功率传输数据。本文只研究上行子帧的资源分配。一个上行子帧由 N 和子信道和 M 个时隙组成,系统有 K 个移动台。对于每一个移动台 $MS_k, k=1..K$ 。在任意时刻最大发射功率上限为 $P_k^{MAX} mW$, 并且最小速率为 D_k 比特/帧。 $x_k^{i,j}$ 是一个 0-1 指示器, $x_k^{i,j}=1$ 说明第 j 个时隙中子信道 i (资源块 (i, j)) 分配给 MS_k 。

$$\sum_{k=1..K} x_k^{i,j} \leq 1, \forall i, j \quad (1)$$

假设 $p_k^{i,j}$ 是移动台在资源块 (i, j) 上加载的功率, 则有:

$$\sum_{i=1..N} p_k^{i,j} \leq P_k^{MAX}, \forall k, j \quad (2)$$

假设信道状况在一帧内保持不变, $G_k^i > 0$ 与 $N_k^i > 0$ 分别代表在子信道 i 上移动台 MS_k 到基站的信道增益和噪声功率。这里假设背景噪声为加性高斯白噪声。给定子信道的带宽为 B (Hz)。根据香农公式, 移动台 MS_k 在资源块 (i, j) 上可以传输的速率为 $x_k^{i,j} B \log_2(1 + p_k^{i,j} \cdot G_k^i / N_k^i)$ 。下面令 $f_k^i = G_k^i / N_k^i$ 等于信道增益和噪声的比率。为了满足移动台 MS_k 的基本速率要求, 可以得出

$$\sum_{i=1..N} \sum_{j=1..M} x_k^{i,j} B \log_2(1 + p_k^{i,j} \cdot G_k^i / N_k^i) \geq D_k, \forall k \quad (3)$$

令 $E_k = \sum_{i=1..N} \sum_{j=1..M} x_k^{i,j} \cdot p_k^{i,j} \cdot T_s$ 代表移动台 MS_k 在所有资源块上能量消耗的总和。其中 T_s 代表每一秒中时隙长度。本文目标函数是减少移动台 MS_k 的能量消耗。并得出以下优化方程

$$\min \sum_{i,j,k} E_k \quad (4)$$

约束条件:

$$\sum_{k=1..K} x_k^{i,j} \leq 1, \forall i, j$$

$$\sum_{i=1..N} p_k^{i,j} \leq P_k^{MAX}, \forall k, j$$

$$\sum_{i=1..N} \sum_{j=1..M} x_k^{i,j} B \log_2(1 + p_k^{i,j} \cdot G_k^i / N_k^i) \geq D_k, \forall k \quad (5)$$

由上面方程(4)可知可知目标函数是一个混合整数问

题(NP-hard), 并且很难求解。

3 启发式能源效率算法

本文提出的启发式算法分为两个步骤。第一步, 为了减少上行帧的使用, 选择最好的资源块和功率尽快满足用户的基本传输速率要求。第二步, 如果第一步完成后还有空闲资源块剩余, 就把它们分配给移动台 MS_k , 这样就能减少移动台 MS_k 的传输速率并最终降低能量消耗。

A. 第一步, 满足移动台 MS_k 基本传输速率要求

为了满足移动台 MS_k 基本传输速率要求, 在第一步中令移动台 MS_k 采用最大功率传输, 可以得出对于时隙 j 只要 $\sum_i x_k^{i,j} \geq 1$ 就满足 $\sum_{i=1..N} x_k^{i,j} \cdot p_k^{i,j} = P_k^{MAX}$ 。本文定义一个收益函数来计算把分配资源块给移动台 MS_k 能获得的利益。用户通过贪婪算法来迭代竞争资源块。在上面迭代过程, 定义二进制标志 Γ_k 为移动台 MS_k 基本传输速率要求是否已经得到满足。如果移动台 MS_k 没有得到满足, 就称为饥饿用户。 $d_k^{i,j}$ 为用户移动台 MS_k 在资源块 (a, b) 上传输的数据。

1) 初始化, 令所有用户的 $\Gamma_k = 0, d_k^{i,j} = 0, x_k^{i,j} = 0$ 。

2) 为了分配资源块 (a, b) 给移动台 MS_k , 定义一个收益函数:

$$\omega((a, b), k) = \frac{\Delta R((a, b), k)}{A(b, k)} \quad (6)$$

其中 $A(b, k)$ 代表在时隙 b 时所有的资源块都分配给移动台 MS_k 时, 移动台 MS_k 它的最大传输速率。并且

$$\begin{aligned} A(b, k) &= \sum_{i=1..N} B \log \left(1 + p^{-i,b} \cdot \frac{G_k^i}{N_k^i} \right) \\ &= \sum_{i=1..N} B \log(1 + p^{-i,b} \cdot f_k^i) \end{aligned} \quad (7)$$

注意: $p^{-i,b} = (\lambda - 1 / f_k^i)^+$ 通过速度最优注水算法得出[10], 其中 $z^+ = \max\{z, 0\}$, λ 是注水线常量且限制条件为 $\sum_{i=1..N} p_k^{-i,j} = P_k^{MAX}$ 。分子 $\Delta R((a, b), k)$ 等于在时隙 b 时刻把资源块 (a, b) 分配给移动台 MS_k 时能增加的传输速率。由于开始时移动台 MS_k 没有资源块, 可以得出 $\Delta R((a, b), k) = B \log(1 + P_k^{MAX} \cdot f_k^a)$ 。因为 $\omega((a, b), k)$ 代表资源块 (a, b) 对移动台 MS_k 的重要性, 所以 $\frac{\Delta R((a, b), k)}{A(b, k)}$ 越大, 代表资源块 (a, b) 对移动

台 MS_k 越重要。

3) 对每一个资源块都要比较 $\omega((a, b), k)$ 的大小, 把空闲资源块 (a, b) 分给 $\omega((a, b), k)$ 最大的移动台。其中每一次都要对各获得资源块的移动台的功率进行更新。

对于每一个空闲资源块 (a, b) 和饥饿用户 MS_k , 比较效益函数 $\omega((a, b), k)$ 值得大小。选择最大的 $\omega((\hat{a}, \hat{b}), \hat{k})$, 并把资源块 (\hat{a}, \hat{b}) 分配给用户 $MS_{\hat{k}}$, 同时设定 $x_{\hat{k}}^{\hat{a}, \hat{b}} = 1$, 注意: 这次分配意味着移动台 $MS_{\hat{k}}$ 需要在时隙 \hat{b} 把总功率 P_k^{MAX} 重新分配到移动台 $MS_{\hat{k}}$ 所有的资源块上。这里可以通过注水技术获得功率更新。因此意味着必须对所有 $p_{\hat{k}}^{*, \hat{b}}, d_{\hat{k}}^{*, \hat{b}}$, 进行更新。如果移动台 $MS_{\hat{k}}$ 基本速率以及得到满足, 则必须更新 Γ_k 。

4) 当 $MS_{\hat{k}}$ 在时隙 \hat{b} 得到资源块 (\hat{a}, \hat{b}) , 需要对所有移动台 MS_k 收益函数的分子部分进行更新。

a) 所有的移动台只要 $MS_k \neq MS_{\hat{k}}$, 设置 $R((\hat{a}, \hat{b}), k) = 0$ 。

b) 对于 $MS_{\hat{k}}$, 因为在时隙 \hat{b} 对功率重新进行了分配。对于移动台 $MS_{\hat{k}}$, 由于其功率分布在时隙 \hat{b} 已经改变, 我们需要通过找出移动台 $MS_{\hat{k}}$ 可传输的额外速率, 对每一个的空闲资源块 (a, \hat{b}) 重新计算 $R((a, \hat{b}), \hat{k})$, $a \neq \hat{a}$ 。上面的更新会改变移动台 $MS_{\hat{k}}$ 的收益函数。但是在整个过程等式(5)中的分母是不变的。

5) 如果还有资源块剩余或者还有饥饿用户, 跳到第 3 步继续执行。否则终止第一步。

B. 第二步: 减少移动台 MS_k 能量消耗

上面第一步中目标是减少帧的使用。如果完成第一步后还有剩余的空闲资源块, 接下来就把已经分配的资源块上传的数据扩展到这些空闲资源块上。这样可以降低移动台 MS_k 的传输速率, 最终降低能量的消耗。为了达到目标, 本文定义另外一个能量效益函数用来竞争空闲资源块。第二步会重复持续下去直到所有的空闲资源块分配完。

首先, 建立效益模型。对于任意空闲资源块 (a, b) 和移动台 MS_k 。假设参数 $x_k^{i, j}, p_k^{i, j}$ 和 $d_k^{i, j}$ 反映了移动台 MS_k 资源分配情况。把资源块 (a, b) 分配给移动台 MS_k 的能量收益函数定义如下:

$$e((a, b), k) = \max \{ E_{st}((a, b), k), E_{ch}((a, b), k) \} \quad (8)$$

$E_{st}((a, b), k)$ 和 $E_{ch}((a, b), k)$ 分别表示把移动台 MS_k 在时隙 b 和子信道 a 内传输的数据扩展到资源块 (a, b) 节省的能量, 就是相当于对时频域的扩展。把资源块分配给 $e((a, b), k)$ 最大的用户。 $E_{st}((a, b), k)$ 和 $E_{ch}((a, b), k)$ 分别可以表示如下:

$$E_{st}((a, b), k) = \left(\sum_{i=1..N} x_k^{i, b} \cdot p_k^{i, b} \right) - (p_k^{-a, b} + \sum_{i=1..N} x_k^{i, b} \cdot p_k^{-i, b}) \quad (9)$$

$$E_{ch}((a, b), k) = \left(\sum_{j=1..M} x_k^{a, j} \cdot p_k^{a, j} \right) - (p_k^{-a, b} + \sum_{j=1..M} x_k^{a, j} \cdot p_k^{-a, j}) \quad (10)$$

通过迭代更新直到所有资源分配完。也就是把资源分配已有的用户, 增加单用户带宽, 降低每个子载波的传输速率进而节省功率。其中 $p_k^{-i, b}, i=1..N, p_k^{-a, j}, j=1..M$ 分别代表把空闲资源块 (a, b) 分配给移动台 MS_k 后在时隙 b 内和子信道 a 内传输数据所需要分配的功率。 $p_k^{-i, b}$ 和 $p_k^{-a, j}$ 由本文提出的能量最优注水技术得出, 其中

$$p_k^{-i, b} = \begin{cases} x_k^{i, b} \cdot \left(\lambda - \frac{1}{f_k^i} \right)^+, & \forall i=1..N, i \neq a \\ \left(\lambda - \frac{1}{f_k^i} \right)^+, & i = a \end{cases} \quad (11)$$

约束条件为: $\sum_{i=1..N} x_k^{i, b} \cdot d_k^{i, b} = (B \log_2(1 + p_k^{-a, b} \cdot f_k^a) + \sum_{i=1..N} x_k^{i, b} \cdot (B \log_2(1 + p_k^{-i, b} \cdot f_k^i)))$ 。在这部分的结尾本文将证明当把一个空闲资源块分配给移动台 MS_k 后, 采用本文提出的能量最优注水技术可以节省最多的能量。注意: 功率进行重新分配后可能会大于原来的功率。尤其不是用空闲资源块 (a, b) 用来扩展数据的时候。为了防止此情况的发生, 需要把这个空闲资源块删除并从新计算 $E_{ch}((a, b), k)$ 和 $p_k^{-i, b}$ 。

下面是第二步的详细步骤:

1) 对于每一个移动台 MS_k , 由空闲资源块 (a, b) 计算 $e((a, b), k)$ 。

2) 通过步骤 1) 得到的 $e((a, b), k)$, 选出最大的 $e((\hat{a}, \hat{b}), \hat{k})$, 并把空闲资源块 (\hat{a}, \hat{b}) 分配给 $MS_{\hat{k}}$ 。

a) 令 $x_{\hat{k}}^{\hat{a}, \hat{b}} = 1$ 。更新已经分配的功率 $(p_{\hat{k}}^{*, \hat{b}}, p_{\hat{k}}^{\hat{a}, *})$ 和传输数据 $d_{\hat{k}}^{*, \hat{b}}, d_{\hat{k}}^{\hat{a}, *}$ 。最后, 对于所有移动台 MS_k 令 $e((\hat{a}, \hat{b}), k) = 0$, 并且分别重新计算在子信道 \hat{a} 和时隙 \hat{b} 上的空闲资源块的 $e((a, \hat{b}), \hat{k})$ 和 $e((\hat{a}, b), \hat{k})$ 。

b) 如果还有空闲资源块剩余, 跳到 2)。否则, 终

止第二步。

接下来将证明两个关键点:首先证明本文注水技术可以减少移动台 MS_k 在一个时隙内传输一定数据需要的总功率。其次,将已分配的资源块上的数据扩展到空闲资源块上传输可以进一步降低移动台 MS_k 消耗的总功率。基于上面两点,在某一个时隙内给移动台 MS_k 一个附加的空闲资源块可以降低传输总功率。

定理 1:假设移动台 MS_k 在时隙 b 加载在所有资源块上的数据是 D ,则按本文提出的注水技术分配功率可以获得最少能量消耗。

证明:为了不失一般性,假设移动台 MS_k 在时隙 b 获得了 n 个资源块,信噪增益和噪声的比为 $f_k^i, i=1..n$,分配给每个资源块的功率为 $p_k^{i,b}$ (为了简化书写, f_k^i 和 $p_k^{i,b}$ 分别缩写为 $f^{(i)}$ 和 $p^{(i)}$)。在时隙 n 获得最少功率消耗的限制条件是在时隙 b 的传输速率 D ,可以表示成 $\min_{p^{(i)}} \sum_{i=1..n} p^{(i)}$ 其限制条件: $\sum_{i=1..n} B(1 + p^{(i)} \cdot f^{(i)}) = D$ 。通过拉格朗日乘子算法,令 y 代表拉格朗日乘子并重写优化方程: $\min_{p^{(i)}} L(y, p^{(1)}, \dots, p^{(n)}) = \sum_{i=1..n} p^{(i)} + y \cdot (D - \sum_{i=1..n} B \log_2(1 + p^{(i)} \cdot f^{(i)}))$ 。对优化方程 $L(y, p^{(1)}, \dots, p^{(n)})$ 中变量 y 和 $p^{(i)}, i=1..n$ 求导并且令其结果等于 0,可以得出 $p^{(i)} = (\lambda - \frac{1}{f^{(i)}}), i=1..n$ 。其中 λ 是注水线常量, $D = \sum_{i=1..n} B \log_2(1 + p^{(i)} \cdot f^{(i)})$ 。

定理 2:基于本文提出的注水技术,假设在时隙 b 时传输速率不变,可以通过把现有资源块上的数据扩展到附加空闲资源块上来节省移动台 MS_k 的能量消耗。

证明:不失一般性,信噪增益和噪声的比为 $f_k^i, i=1..n$ (为了简化书写, f_k^i 缩写为 $f^{(i)}$) 时,假设移动台 MS_k 在时隙 b 获得了 n 个资源块。分配给每一个资源块 (i, b) 的功率假设为 $(\lambda_A - 1/f^{(n+1)}) > 0, i=1..n$ 。其中 λ_A 是当前注水线,并由本文提出的注水技术决定。现在假如有多个空闲资源块 $(n+1)$,在时隙 b 时移动台 MS_k 的信噪增益和噪声的比为 $f^{(n+1)}$ 。假设这个资源块的信噪比不错,例如 $(\lambda_A - 1/f^{(n+1)}) > 0$; 否则不会对此资源块进行功率分配并且总功率会保持不变。令 λ_B 代表对 $(n+1)$ 个资源块采用本文提出注水技术注水后得

到的新注水线。 ΔE 是通过把数据从当前 n 个资源块扩展到 $(n+1)$ 个资源快上可以节省的能量,可以表示为

$$\Delta E = \sum_{i=1..n+1} (\lambda_A - \frac{1}{f^{(i)}} - \sum_{i=1..n+1} \lambda_B - \frac{1}{f^{(i)}}) \quad (12)$$

因为传输的总速率不变,可以得出 $\sum_{i=1..n} B \log_2(1 + (\lambda_A - 1/f^{(i)}) \cdot f^{(i)}) = \sum_{i=1..n+1} B \log_2(1 + (\lambda_B - 1/f^{(i)}) \cdot f^{(i)})$ 。这个等式可以得出 $\lambda_B = \sqrt[n+1]{\frac{(\lambda_A)^n}{f^{(n+1)}}}$,代入等式 (12),可以得出:

$$\Delta E = \frac{1}{f^{(n+1)}} \cdot (n \cdot \lambda_A \cdot f^{(n+1)} - (n+1) \sqrt[n+1]{(\lambda_A)^n \cdot (f^{(n+1)})^n} + 1) \quad (13)$$

令 $x = \lambda_A \cdot f^{(n+1)}$ (因此 $x > 0$)。等式 (13) 可以进一步推导为

$$\begin{aligned} \Delta E &= \frac{1}{f^{(n+1)}} \cdot (n \cdot x - (n+1)x^{\frac{n}{n+1}} + 1) \\ &= \frac{1}{f^{(n+1)}} (x^{\frac{1}{n+1}} - 1) (n \cdot x^{\frac{n}{n+1}} - x^{\frac{n-1}{n+1}} - x^{\frac{n-2}{n+1}} - \dots - 1) \\ &= \frac{1}{f^{(n+1)}} (x^{\frac{1}{n+1}} - 1) (x^{\frac{n-1}{n+1}} \cdot (x^{\frac{1}{n+1}} - 1) + \dots + (x^{\frac{1}{n+1}} - 1) \\ &\quad (x^{\frac{n-1}{n+1}} + x^{\frac{n-2}{n+1}} + \dots + 1)) \\ &= \frac{1}{f^{(n+1)}} (x^{\frac{1}{n+1}} - 1)^2 ((x^{\frac{n-1}{n+1}} + x^{\frac{n-2}{n+1}} \cdot (x^{\frac{1}{n+1}} + 1) + \dots + \\ &\quad (x^{\frac{n-1}{n+1}} + x^{\frac{n-2}{n+1}} + \dots + 1)) > 0 \end{aligned} \quad (14)$$

因此,可以确定在时隙 b 时把当前资源块上的传输数据扩展到附加空闲资源块上可以节省移动台 MS_k 的能量消耗。

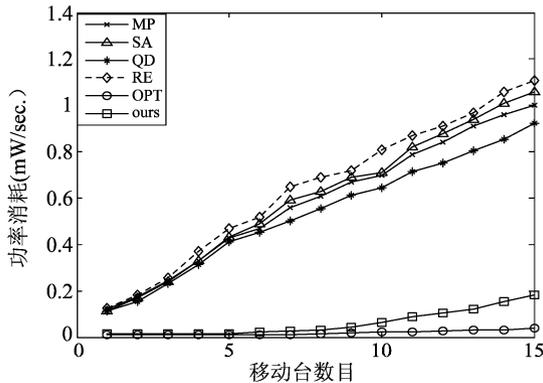
以上的两个特性可以应用于资源块在同一个子信道 a 的情况,因为对于资源块在同一个子信道上的信道增益和噪声比相同,如 $f^{(1)} = f^{(2)} = \dots = f^{(n)} = f^{(a)}$,这是定理 1 和 2 的一个特殊情况。

4 仿真结果与分析

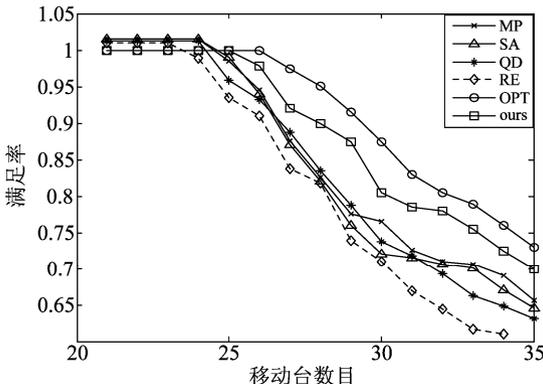
在仿真过程中,我们认为此场景和 [1] 中相似,也就是单小区 OFDMA 上行网络。小区半径为一千米,而移动台 MS_k 均匀地分布在小区内。特别的是,上行子帧的持续时间为 2.5 毫秒,该子帧包含 15 个子信道和 15 个时隙。子信道带宽 B 为 180KHz。路径损耗遵循的是改良的 Hata 城市传播模型,它包括了频率相关

和多径衰落。每一个移动台 MS_k 传输速率要求为平均每秒 512Kbits[4], 以及一个时隙内最大的发射功率为 $P_k^{MAX} = 50\text{mW}$ 。

通过比较本文提出的注水技术和 maximal-rate pair (MP) [1], sequential-allocation (SA) [2], quota-determination (QD) [3], the resource-efficient (RE) scheme [4], optimal (OPT)。**MP** 方法通过迭代方式求出最大速率移动台子信道对, 然后分配子信道。**SA** 方法连续把每一个子信道分配给在子信道上具有最大增值传输速率的饥饿移动台。**QD** 方法基于一个移动台需求子信道数目来分配一定额度的子信道。也就是说, **QD** 方法为分配一个子信道给在子信道上增益最好的移动台。**RE** 方法动态地调整分配给移动台的子信道数达到节约资源目的。**OPT** 方法利用 Lingo software [8] 软件来发现最优结果, 但是计算量变大。注意: 不能和文献 [5] 中的方法作比较, 因为它忽略了功率限制。图 1 (a) 比较了所有方案在移动台数目不相同情况下传输每一帧的能量消耗。



(a) 功率消耗
(a) energy consumption



(b) 满足率
(b) satisfaction ration

图 1 在以移动台数目为变量时的仿真结果

本文提出的启发式注水技术能够近似 **OPT** 方法而且与 **MP**, **SA**, **QD** 和 **RE** 方法比较能够平均节约 70% 的能量, 因为本文提出的方法把当前资源块上的传输数据扩展到附加空闲资源块上, 这样可以降低移动台 MS_k 的传输能量消耗。而这通常被上述其他方法所忽视。图 1(b) 研究了移动台满足率数目, 其中满足率是在每帧中被满足移动台数目与总的移动台数目的比。因为本文根据计算所有移动台能够增加的速率和移动台的最大速率来分配子信道, 所以本文提出的方法有更高的满意率。这能够利用每个移动用户 MS_k 在不同的子载波上有不同的传输效果来更进一步利用多用户分集技术来满足更多移动台 MS_k 的需求。

5 总结

本文讨论了在 OFDMA 无线网络中上行传输中的节省能量问题。这个问题可以描述成一个 MIP 问题, 文中提出一种高效的启发式注水方法来满足移动台 MS_k 的传输要求。通过使用多用户分集技术以及对空闲资源块进行有效的功率分配, 仿真结果表明: 和已经存在的方法相比, 本文的启发式注水方法方法能够节省移动台更多的能量并且提高了它们的满意率。

参考文献

- [1] Jaehak Chung, Chan-Soo Hwang, Kiho Kim, et al. A random beamforming technique in MIMO systems exploiting multiuser diversity[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2003, 21(5): 848-855.
- [2] Yaacoub, E.; Dawy, Z. "A Survey on Uplink Resource Allocation in OFDMA Wireless Networks" Communications[J]. IEEE Transactions on. 2012, Volume: 60, Issue: 5; 1291-1304.
- [3] Andargoli, S. M. H. Resource allocation for downlink multicell OFDMA systems by interference limitation[C]. Electrical Engineering (ICEE), 2011 19th Iranian Conference on, 2011:1-6.
- [4] Alavi, S. M. Low Complexity Resource Allocation Algorithm for IEEE 802.16 OFDMA System[C]. Communications, 2009. ICC'09. IEEE International Conference on, 2009, Page(s): 1-5.
- [5] L. Gao and S. Cui, Efficient subcarrier, power, and rate allocation with fairness consideration for OFDMA uplink

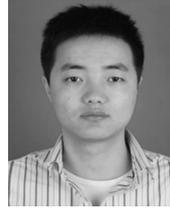
- [J]. IEEE Trans. Wireless Commun., 2008, 7(5): 1507-1511.
- [6] S. Alavi, C. Zhou, and Y. Cheng, Low complexity resource allocation algorithm for IEEE 802.16 OFDMA system[C]. in Proc. IEEE International Conference on Communications, 2009:1-5.
- [7] G. Theodoridis and F.-N. Pavlidou; A novel radio resource management scheme for maximizing uplink capacity in M-WiMAX[C]. in Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2010:1-6.
- [8] J. P. Yoon, W. J. Kim, J. Y. Baek, and Y. J. Suh, Efficient uplink resource allocation for power saving in IEEE 802.16 OFDMA systems[C]. in Proc. IEEE Vehicular Technology Conference, 2008:2167-2171.
- [9] O. A. Nasr, M. Van Der Schaar, B. Daneshrad. A unique beamforming-based equilibrium in multi-user random access SIMO networks[J]. IEEE Transactions on Communications Letters, 2010, 14(2): 160-162.
- [10] T. Cover, J. Thomas, and J. Wiley, Elements of Information Theory, Vol. 1. Wiley Online Library, 1991.
- [11] Yang Hong-Chuan, Lu Peng, Sung Hyung-Ki, et al. Ex-

act sum-rate analysis of MIMO broadcast channels with random unitary beamforming[J]. IEEE Transactions on Communications, 2011, 59(11): 2982-2986.

作者简介



李小武(1979-),男,硕士,目前主要研究方向:现代通信与网络技术,嵌入式系统。E-mail: lixiaowu555@163.com



肖孚安(1986-),男,硕士生,研究方向:认知无线电、MIMO-OFDM中的波束赋形技术。E-mail: fuanxiao@gmail.com

王玲(1962-),女,博士,教授,博士生导师,中国高等电子教育学会理事,主持、参与科研项目10余项,发表论文70余篇。目前主要研究方向:现代通信与网络技术,信息安全技术,语音图像传输处理技术。
E-mail: wl_hunu@163.com