



一种能量有效的多用户 OFDM 资源分配方案^{*}

汪 照,李有明,邹 婷,刘小青,陈 斌

(宁波大学通信技术研究 所 宁波 315211)

摘 要:在无线环境下,随着用户数的增加和速率需求的提高,基站能量消耗越来越大。因此,无线网络中能量有效化的设计变得非常必要。本文研究了一种能量有效的多用户 OFDM 下行链路的资源分配方案。利用分布式方式,首先根据用户的平均信道增益和最低用户比特要求,结合提出的能量有效准则思想分配子载波数;然后按照各用户分配的子载波数分配信道条件较好的信道;再对每个用户所分配的信道按照最低比特要求平均分配比特数,并利用能量有效准则做最优调整,保证功率最小。仿真结果表明,在满足各用户的误比特率及速率要求的条件下,提出的算法与静态的频分多址资源分配方式相比,功率可减小 5~6 dB;同时与已有的一种经典分布式算法相比,功率可减小 2~4 dB。

关键词:能量有效;多用户 OFDM;功率最小;分布式算法

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2013.04.013

An Energy-Efficient Multi-User's Resource Allocation Scheme

Wang Zhao, Li Youming, Zou Ting, Liu Xiaoqing, Chen Bin

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

Abstract: In wireless environment, the increases in the number of users and the demand for a higher rate have triggered rapidly booming energy consumption at the base station. Therefore, energy efficient design in wireless network has become very essential. An energy efficient multi-user OFDM downlink resource allocation scheme was studied, using the distributed way. Firstly, according to user's average channel gain and the minimum requirements of user's bits, subcarriers were allocated, combined with the idea of proposed energy-efficient criterion. Then better channels were assigned to each user in accordance with each user's allocated subcarrier numbers. Again each user's average bits were assigned on the user's allocated subcarriers and optimal adjustment using energy-efficient criterion had to be made to ensure the minimum power. The simulation results show that under the conditions of satisfying bit-error rate and transmission rate for users, the power can be reduced by 5~6 dB in the proposed algorithm, compared with the power in the static frequency division multiple access resource allocation. Furthermore, the power can be reduced by 2~4 dB, compared with the power in a existing classical distributed algorithm.

Key words: energy efficient, multi-user OFDM, minimum power, distributed algorithm

^{*} 国家自然科学基金资助项目(No.60772126, No.61071119),浙江省自然科学基金资助项目(No.Y1091155, No.Y1110657),浙江省科技厅科研项目(No.2009C34001),宁波市自然科学基金资助项目(No.2012A610017)

1 引言

多用户正交频分多址接入(orthogonal frequency division multiple access, OFDMA)是下一代无线通信物理层首选的多址方式,是一种基于 OFDM 调制方式的无线接入方式,具有频谱利用率高、抗衰落能力强、传输速率高、资源分配灵活及同时支持多个用户等特点,被认为是下一代宽带无线接入方式的关键技术。OFDMA 系统将传输带宽划分成正交的互不重叠的一系列子载波集,将不同的子载波集分配给不同的用户实现多址,并根据信道状态,动态地把可用带宽资源分配给需要的用户,很容易实现系统资源的优化利用,因此它是保证用户服务质量、提高系统容量及频谱利用率的重要手段,因此成为国内外学者的研究热点之一。

在 OFDM 系统中,根据优化目标的不同,资源分配问题一般可以分为两种形式:基于速率最大化的 RA(rate adaptive)问题,它是在总功率固定的条件下,保证系统的容量达到最大化;基于发射功率最小化的 MA(margin adaptive)问题,它是在用户数据率固定的条件下,使总的发射功率达到最小化。针对 RA 问题,参考文献[1~3]从系统容量和用户公平性的不同侧重点研究了资源分配问题,在满足不同用户速率要求的同时,保证系统容量达到最大化。参考文献[4]最早对问题进行了研究,建立了在用户速率和误比特率约束条件下最小化基站总发送功率的非线性模型,提出了在找到最优解时,需对两个拉格朗日参量进行迭代搜索的算法,然而该算法复杂度高,不利于无线环境下数据的实时高速传输。为了减小复杂度,参考文献[5]将多用户的 MA 优化问题分成了两步,第一步根据用户在各子载波上的平均信噪比确定用户需要的子载波数目,第二步将具体的子载波及相应的功率分配给对应的用户。该算法获得相对较优的性能。同样采用近似平均信噪比的概念,参考文献[6]提出了一种有效的子载波、比特、功率的多用户资源分配算法,通过迭代方式保证了性能的逐步改善,从而最终收敛到一个稳定的次优解。为了保证各用户多级服务需求,参考文献[7]通过拉格朗日松弛方法及子载波共享因子,找到了一个较优的解,并用迭代算法找到了一个最优的功率消耗。参考文献[8]针对 OFDMA 中的功率最小化资源分配问题,提出了基于树搜索的动态规划及分支定界两种有效算法,从而找到一种较优解。参考文献[7,8]主要是集中研究在连续凹函数效用条件的资源分配。

为有效解决离散凹函数条件下子载波、比特、功率分配问题,参考文献[9,10]进行了相关的研究。参考文献[11]以最小网络流模型代价函数分析资源分配问题,并采用对偶理论方法实现其最优的资源分配。为了求得一定复杂度条件下问题的近似解,参考文献[12,13]运用仿生的启发式算法解资源分配问题。参考文献[12]采用遗传算法,首先生成一定规模的初始种群(对应原优化问题的可行解);然后通过杂交、变异等运算使得初始种群不断进化,经过若干代,最终得到一个较好的次优解,从而确定系统的比特分配和最小发射功率。参考文献[13]将改进的粒子群算法(MPSO)用于多用户的子载波、比特分配,在保证一定误比特率的同时,优化了系统的总传输功率和传输速率。

本文针对 MA 问题,提出了一种能量有效的多用户 OFDM 下行链路的资源分配方案,先提出了基于比特在信道上分配时的能量有效准则概念,然后结合能量有效准则的思想分配子载波数、比特数。主要分为如下3步:

- (1) 根据用户的平均信道增益及用户的最低比特要求,并结合能量有效准则给各用户分配相应的子载波数;
- (2) 给每个用户分配较好的对应子载波数的信道;
- (3) 为每个用户所分配的信道按照最低比特要求平均分配比特数,然后利用能量有效准则做适当调整,保证功率最小。

2 系统的优化目标

在多用户 OFDM 的自适应资源分配系统中,假设各用户已通过反馈信道将信道状态信息反馈给基站,基站根据子载波和比特分配算法给不同用户的载波间进行相应的功率和比特分配。现假设系统中共有 K 个用户, N 个子载波,第 k 个用户要求最低比特数为 R_k bit/OFDM 符号,并定义 $c_{k,n}$ 为用户 k 在第 n 个子载波上的比特数, $c_{k,n}$ 的取值范围为 $D=\{0,1,2,\dots,M\}$,其中 M 为子载波调制允许的最大信息比特数。 N_0 为高斯白噪声的功率谱密度, $g_{k,n}$ 为第 k 个用户在第 n 个子载波上的信道增益幅度值。 $f_k(c)$ 为第 k 个用户的子载波接收 c bit 所需要的功率,由于不同用户具有不同的服务质量要求,采用不同的编码和调制方案,它需要的功率是不相同的。因此,接收端为达到指定的服务质量要求,对第 k 个用户在第 n 个载波上的接收功率必须满足:

$$P(c_{k,n})=f_k(c_{k,n})/g_{k,n}^2 \quad (1)$$

其中, $f_k(c_{k,n})=(2^{c_{k,n}}-1) \cdot \Gamma_k \cdot \delta^2$, Γ_k 代表了实际通信系统



传输速率和信道极限容量之间的差距, δ^2 为高斯白噪声功率;若考虑传输的误码率和物理层编码调制方式为 MQAM 与格雷码联合时, 则 $\Gamma_k = -\ln(5BER)/1.5$ 。

现在的优化目标就是确定分配给每个用户的子信道及每个信道上的功率与比特数, 在满足每个用户比特要求和误码率要求的同时, 使所有用户的总功率最小。用式子可表示为:

$$\min_{c_{k,n} \in D} \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \frac{1}{g_{k,n}^2} f_k(c_{k,n}), \sum_{n=1}^N c_{k,n} \geq R_k, k=1, 2, \dots, K$$

$$\sum_{n=1}^N c_{k,n} c_{l,n} = 0, k, l=1, 2, \dots, K, k \neq l \quad (2)$$

其中, $\sum_{n=1}^N c_{k,n} \geq R_k$ 表示每个用户在每个 OFDM 符号需要达到的最低比特数, $\sum_{n=1}^N c_{k,n} c_{l,n} = 0$ 表示两个用户不能同时占用同一个子信道。

3 资源分配算法的实现

由于式(2)是带约束条件的非线性系统模型, 联合计算复杂度高, 所以本节针对多用户 OFDM 资源分配问题采用分布式方式, 分别进行子载波数目、子载波、比特和功率分配。在分配过程中, 需要对初始分配给各用户的子载波数目及子载波上的比特进行调整, 以使系统的总功率达到最小。为此, 先提出能量有效准则定义: 假设信道中比特分配矢量为 $b=[b_1 b_2 \dots b_N]$, $E(b_n)$ 为第 n 个信道中符号的能量, 每次加载的最小信息粒度为 β (单位为 bit), 记 $e(b_n) = E(b_n) - E(b_n - \beta)$, 如果信道中的比特分配满足:

$$\max_n [e(b_n)] \leq \min_m [e(b_m + \beta)] \quad (3)$$

则信道中的比特分布实现了能量有效性, 即信道中再也没有比特的交换能减少总的符号能量。

证明 假设有 N 个信道, 当前每个信道减少一个信息粒度 β 减少的能量为 $e(b_k) (k=1, 2, \dots, N)$, 每个信道增加一个信息粒度 β 增加的能量为 $e(b_k + \beta) (k=1, 2, \dots, N)$, 若式(3)成立, 则对于任意的 $i, j, m, n \in \{1, 2, \dots, N\}$, 将第 i 个信道中减少的一个信息粒度 β 加载到第 j 个信道中, 将会有 $e(b_i) < \max_n [e(b_n)] \leq \min_m [e(b_m + \beta)] < e(b_j + \beta)$, 信道中的比特再进行交换就会增加总的符号能量, 信道中再也没有比特的交换能减少总的符号能量, 因此信道中的比特分布已实现了能量有效性。反之, 若式(3)不成立, 信道中比特的交换就可以减少总的符号能量, 信道的分布未实现能量有

效性。

3.1 子载波数目分配方案

采用参考文献[5]中用户的等效信道平均增益方式, 即假设各用户的平均增益为 $g_k = \sum_{n=1}^N |g_{k,n}|^2 / N$ 。如果用户 k 被分配 m_k 个子载波, 则每个子载波上分配 R_k/m_k bit 为最优方式, 总的传输功率为 $\sum_{n=1}^N m_k f(R_k/m_k)/g_k$, 优化目标是找到集合 $\Omega = \{m_1, m_2, \dots, m_K\}$, 使它满足:

$$\min \sum_{k=1}^K \frac{m_k}{g_k} f\left(\frac{R_k}{m_k}\right), \sum_{k=1}^K m_k = N, \quad (4)$$

$$m_k \in \left\{ \left\lceil \frac{R_k}{M} \right\rceil, \dots, N \right\}, k=1, 2, \dots, K$$

其中, $\sum_{k=1}^N m_k = N$ 为总的子载波数应满足的条件, $m_k \in \left\{ \left\lceil \frac{R_k}{M} \right\rceil, \dots, N \right\}$ 为各用户需要的子载波数应满足的限制条件, $\lceil \cdot \rceil$ 为向上取整运算, M 为最大的调制比特数。

如果系统有足够的带宽资源满足用户的速率需求, 并且整个信道近似为平坦型衰落, 下面的算法将会得到理想的子载波数目分配。记:

$$\Delta e(m_k) = \frac{(m_k+1)}{g_k} f\left(\frac{R_k}{m_k+1}\right) - \frac{m_k}{g_k} f\left(\frac{R_k}{m_k}\right) \quad (5)$$

基于能量有效准则定义, 式(6)为最有效子载波分配:

$$\max_n [\Delta e(m_n)] \leq \min_l [\Delta e(m_l + 1)], \quad (6)$$

$$m_n, m_l \in \left\{ \left\lceil \frac{R_k}{M} \right\rceil, \dots, N \right\}, k=1, 2, \dots, K$$

在满足约束条件的情况下, 式(6)将是子载波数目分配的一个最优方案, 能使式(4)达到最小。按照式(6)准则, 算法流程如下。

(1) 确定每个用户初始分配的子载波数目以及未被分配的子载波数目

假设 K 个用户在每个 OFDM 符号内要求的最低比特数目为 $R_1, R_2, \dots, R_K$ 那么各用户初始分配的子载波数目为 $n_k = \left\lfloor NR_k / \sum_{i=1}^K R_i \right\rfloor$, $\lfloor \cdot \rfloor$ 为向下取整。则初始未被分配的载波数目为 $N^* = N - \sum_{k=1}^K n_k$ 。

(2) 将剩余的 N^* 个子载波再随机地分配给 K 个用户, 用户 k 的子载波数目由 n_k 变为 $m_k (k=1, 2, \dots, K)$ 。

(3)调整用户间的子载波数目,具体方案如下。

①找 $\Delta e(m_i+1)$ ($i=1,2,\dots,K$) 中的最小 i 给 $l, l \leftarrow \arg\{\min_{1 \leq i \leq K} \Delta e(m_i+1)\}$;

②找 $\Delta e(m_j)$ ($j=1,2,\dots,K$) 中最大的 j 给 $n, n \leftarrow \arg\{\max_{1 \leq j \leq K} \Delta e(m_j)\}$;

③用户子载波数目交换,达到最优分配,算法步骤如下:

```
While  $\Delta e(m_l+1) < \Delta e(m_n)$ 
    if  $m_n > \lceil R_n / M \rceil, m_l = m_l + 1, m_n = m_n - 1$ ;
End if
UPDATING $_{(m_l, m_n)}$ 
 $l \leftarrow \arg\{\min_{1 \leq i \leq K} \Delta e(m_i+1)\}, n \leftarrow \arg\{\max_{1 \leq j \leq K} \Delta e(m_j)\}$ 
While  $m_n = \lceil R_n / M \rceil, \Delta e(m_n) = \min_{1 \leq j \leq K} \Delta e(m_j), n \leftarrow \arg\{\max_{1 \leq j \leq K} \Delta e(m_j)\}$ 
End while
```

End while

上述算法中,函数 UPDATING $_{(m_l, m_n)}$ 是根据式(5)对 $\Delta e(m_n), \Delta e(m_l), \Delta e(m_n+1), \Delta e(m_l+1)$ 的更新。

3.2 子载波分配方案

本小节将根据 3.1 节中分配给各用户 k 的子载波数目(假设根据能量有效准则思想调整后,用户的子载波数目由 m_k 变为 $m'_k, k=1,2,\dots,K$)进行相应的子载波分配。在满足各用户的目标比特数和误比特率要求的同时,为了使总的传输功率最小,应该尽量为每个用户选增益较大的信道。在权衡各用户所需要的载波数目及对子载波的竞争情况下,提出了以下方案。

(1)对用户 $k(k=1,2,\dots,K)$,依次找前 m'_k 个最大的信道增益所对应的子载波。不同的用户可能会出现对同一个子载波的共享,现假设用户 k 唯一占有的子载波集合为 $C_k(C_k \subset \{1,2,\dots,N\})$,以 $\#C_k$ 表示其集合的个数。则将 C_k 所对应的子载波分给用户 k ,该用户占有了 $\#C_k$ 个子载波,同时用户 k 还需要的子载波个数为 $m'_k - \#C_k$ 。

(2)对剩下的多个用户同时占有或未被任何一个用户占有的子载波 $n(n \notin C_k, n=1,2,\dots,N, k=1,2,\dots,K)$,依次找该子载波 n 中最大信道增益 $g_{k,n}$ 所对应的用户 k ,然后将该子载波分配给用户 k ,若用户 k 分配的子载波个数达到 m'_k ,用户 k 将不再要求额外的子载波。下面是算法的步骤:

```
For  $n=1,2,\dots,N$  do
    if  $n \notin C_k(k=1,2,\dots,K), k \leftarrow \arg \max_{1 \leq k \leq K} |g_{k,n}|^2$ ;
```

End if

While $N_{C_k} = m'_k, |g_{k,n}|^2 > 0, k \leftarrow \arg \max_{1 \leq k \leq K} |g_{k,n}|^2$

End While

$C_k \leftarrow C_k \cup \{n\}$;

End for

3.3 比特分配及调整

本小节将根据 3.2 节分配给各用户的子载波进行相应的比特分配及调整,对用户 $k(k=1,2,\dots,K)$,在 m'_k 个被分配的子载波上初始分配比特数: $\lfloor R_k / m'_k \rfloor$,剩下的 $(R_k - m'_k \lfloor R_k / m'_k \rfloor)$ bit 在该用户被分配的未超过最大调制比特数 M 的子载波上随机分配,然后基于能量有效准则在用户分配的子载波上的比特进行调整。具体步骤如下。

步骤 1 初始化

- 在用户 $k(k=1,2,\dots,K)$ 最终的子载波集合 C_k 上平均分配比特: $\lfloor R_k / m'_k \rfloor$ 。
- 剩下的 $(R_k - m'_k \lfloor R_k / m'_k \rfloor)$ bit 在该用户分配的未超过最大调制比特数 M 的子载波上随机分配,将用户 k 被分配的 m'_k 子载波上分配的比特记为 $R_k^i(i \in C_k, k=1,2,\dots,K)$ 。

步骤 2 比特调整

(1)由式(1)记 $e_k^i(R_k^i) = P(R_k^i) - P(R_k^i - 1)$,计算由 $e_k^i(R_k^i), e_k^i(R_k^i+1), e_k^i(R_k^i), e_k^i(R_k^i+1)$ 分别构成的矢量集 $e_k(R_k), e_k(R_k+1)$,其中 $i \in C_k, k=1,2,\dots,K$ 。

(2)找 $e_k(R_k+1)$ 中最小的值所对应的索引 $m, m \leftarrow \arg\{\min_{1 \leq i \leq K} e_k(R_k+1)\}$ 。

(3)找 $e_k(R_k)$ 中最大的值所对应的索引 $n, n \leftarrow \arg\{\max_{1 \leq i \leq K} e_k(R_k)\}$ 。

(4)For $k=1,2,\dots,K$

While $e_k^m(R_k^m) < e_k^n(R_k^n+1)$

if $R_k^m < M$ & $R_k^n > 0, R_k^m = R_k^m + 1, R_k^n = R_k^n - 1$

End if

UPDATING $_{(R_k^m, R_k^n)}$

$m \leftarrow \arg\{\min_{1 \leq i \leq K} e_k(R_k+1)\}, n \leftarrow \arg\{\max_{1 \leq j \leq K} e_k(R_k)\}$

While $R_k^m = M, e_k(m) = \max e_k(R_k), m \leftarrow \arg\max_{1 \leq i \leq K} e_k(R_k+1)$

End While

While $R_k^n = 0, e_k(n) = \min e_k(R_k+1), n \leftarrow \arg\{\max_{1 \leq i \leq K} e_k(R_k)\}$

End While

End for



上述算法中函数UPDATING (R_k^m, R_k^n) , 是根据本节步骤 2 中(1)对 $e_k^m(R_k^m)$ 、 $e_k^n(R_k^n)$ 、 $e_k^m(R_k^m+1)$ 、 $e_k^n(R_k^n+1)$ 的更新。

4 仿真结果及分析

对本文的自适应分配算法进行仿真分析, 为了便于比较, 实现了另外 3 种分配方式:

- BABS-ACG^[5], 同时每个用户的比特采用最佳分配(贪婪算法);
- OFDM-FDMA-OBA, 即载波以 FDMA 方式分配, 每个用户的比特实行最佳分配(贪婪算法);
- 参考文献[12]的遗传算法。

4.1 仿真结果

仿真环境选取 6 径频率选择性瑞利衰落信道, 最大多普勒频移为 30 Hz, 时延扩展为 50 μ s, 子载波个数为 256, 带宽为 1 MHz, 噪声平均功率为 1 dB, 每个 OFDM 符号中传输的总比特数为 1 024 (在各个用户上比特采取平均分配)。采用 MQAM 调制, 用户数为 4~10 个, 遗传算法中种群大小为 50, 遗传代数为 100, 交叉概率为 0.8, 变异概率为 0.05。

图 1 是在仿真次数为 200, 误比特率为 10^{-4} 时, 本文算法、BABS-ACG、OFDM-FDMA-OBA 及参考文献[12]遗传算法在不同用户数量下传输功率的比较。从图中可以看出, 本文提出的算法得到的传输总功率比 BABS-ACG 少了 2~4 dB, 比 OFDM-FDMA-OBA 少了 5~6 dB, 较参考文献[12]的遗传算法低 1~2 dB, 并且在数量变化时并没有显著的变化。

图 2 是本文算法、BABS-ACG、OFDM-FDMA-OBA 及参考文献[12]的遗传算法在仿真次数为 200、用户数为 8 时, 误

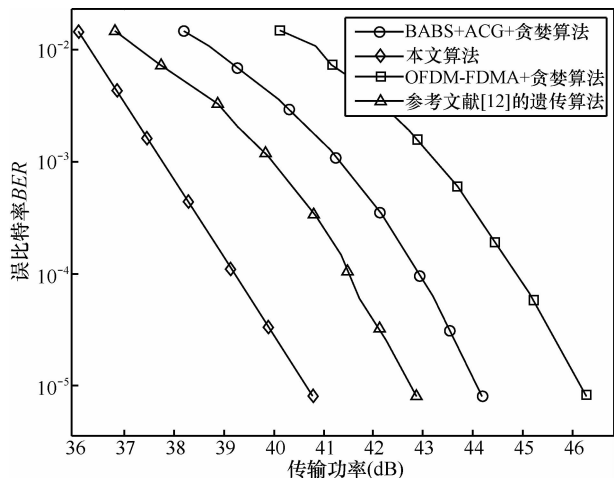


图 2 不同传输功率下误比特率曲线比较

码率随传输功率的变化曲线。从图中可以看出, 随着误比特率的增加, 传输功率随之减少。在给定不同误码率的情况下, 本文的算法较 BABA-ACG 算法有 2~4 dB 性能的提升, 与参考文献[12]的遗传算法相比, 有 1~2 dB 的差异。

4.2 算法复杂度

本文算法复杂度主要分为 3 部分: 子载波数目调整、子载波分配、各用户子载波上的比特调整。其中子载波数目调整主要为 N 次迭代、 K 次比较、复杂度为 $O(KN)$, 同理各用户子载波上的比特调整为 $K \cdot O(KN)$, 子载波分配从横向、纵向寻找最优子载波, 约为 $K \cdot O(\frac{N}{K} \lg N)$, 所以总的复杂度近似为 $(K+1) \cdot O(KN) + K \cdot O(\frac{N}{K} \lg N)$ 。参考文献[5]

中 BABS 复杂度近似为 $O(KN)$, ACG 复杂度近似为 $O(KN)$, 若采用贪婪算法进行比特分配复杂度近似为 $O(KN)$, 总的复杂度近似为 $(K+2) \cdot O(KN)$ 。参考文献[12]中若遗传代数为 T , 群体个数为 W , 则总的复杂度近似为 $T[W O(N) + O(W^2)]$, 要保证得到较优的解, 需要的遗传代数、群体个数一般相对较大, 复杂度也相对较高。通过 4 种算法相比较, 可以看出, 本文提出的算法复杂度相对较低。

5 结束语

本文研究了一种能量有效的多用户 OFDM 资源分配方法, 提出了在满足各用户的误比特率及最低比特速率要求条件下, 分配子载波、比特、功率的方案。该方案根据提出的能量有效准则思想对各用户分配的子载波数、比特进行最佳调整, 同时为各用户选择较优的信道, 而使得系统总的发射总功率最小。实验表明, 该算法与

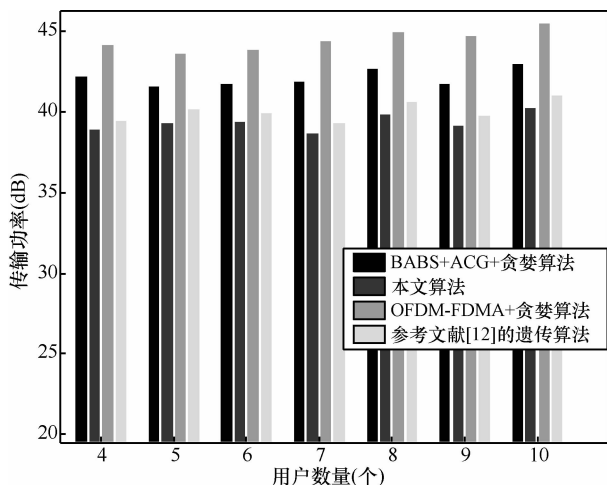


图 1 不同用户数量下传输功率的比较

传统的 OFDM-FDMA-OBA 及 BABS-ACG 相比,在性能上得到了很大的改善;与参考文献[12]的遗传算法相比,性能降低 1~2 dB,并且复杂度明显降低。因此,本文算法很好地解决了多用户 OFDM 资源分配中的 MA 问题,它为无线系统中的资源分配问题提供了一条有效的途径。

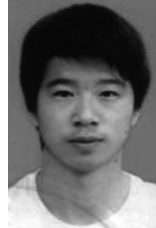
参考文献

- 1 Jang J, Lee K B. Transmit power adaptation for multi-user OFDM system. *Journal on Selected Areas in Communications*, 2003, 21(2): 171~178
- 2 Shen Z, Andrews J G, Evans B L. Adaptive resource allocation in multiuser OFDM systems with proportional rate constraints. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2005, 4(6): 2726~2737
- 3 Wong I C, Evans B L. Optimal downlink OFDMA resource allocation with linear complexity to maximize ergodic rates. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(3): 962~971
- 4 Wong C Y, Cheng R S, Letaief K B, *et al.* Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit, and power allocation. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1999, 17(10): 1747~1758
- 5 Kivanc D, Li G, Liu H. Computationally efficient bandwidth allocation and power control for OFDMA. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2003, 2(6): 1150~1158
- 6 Liang C, Brian K. An iterative resource allocation algorithm for multiuser OFDM with fairness and QoS constraints. *Proceedings of IEEE 65th Vehicular Technology Conference, VTC2007-Spring*, Dublin, Ireland, 2007: 2985~2989
- 7 Lee J S, Lee J Y, Lee S, *et al.* Resource allocation for multiclass services in multiuser OFDM systems. *IEEE 5th Consumer Communications and Networking Conference*, Las Vegas, NV USA, 2008: 907~911
- 8 Lin Y B, Chiu T H, Su Y T. Optimal and near-optimal resource allocation algorithms for OFDMA networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(8): 4066~4077
- 9 Wong I, Evans B. Optimal downlink OFDMA resource allocation with linear complexity to maximize ergodic rates. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(3): 962~971
- 10 Zhu H, Wang J. Chunk-based resource allocation in OFDMA systems-part II: joint chunk, power and bit allocation. *IEEE Transactions on Communications*, 2012, 60(2): 499~509
- 11 Zaki A, Fapojuwo A. Optimal and efficient graph-based resource allocation algorithms for multiservice frame-based OFDMA networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2011, 10(8): 1175~1186
- 12 Ahmadi H, Chew Y H. Adaptive subcarrier and bit allocation in multiclass multiuser OFDM systems using genetic algorithms. *Proceedings of IEEE 20th International Symposium on Personal,*

Indoor and Mobile Radio Communications, Tokyo, Japan, 2009: 1883~1887

- 13 Sadeque S. Impact of individual and joint optimizations in multi-user OFDM resource allocation by modified PSO. *Proceedings of Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, Niagara Falls, Ontario, Canada, 2011: 1233~1237

[作者简介]



汪照,男,宁波大学硕士研究生,主要研究方向为无线通信中多用户 OFDM 及认知无线电资源分配等。



李有明,男,宁波大学通信技术研究所以博士生导师、教授,主要研究方向为无线和有线宽带通信技术中的干扰抑制、动态资源分配、MIMO-OFDM、协作中继、认识无线电等。



邹婷,女,宁波大学硕士研究生,主要研究方向为电力线通信中的资源分配等。



刘小青,男,宁波大学硕士研究生,主要研究方向为智能电网等。



陈斌,男,宁波大学硕士研究生,主要研究方向为协作中继中的资源分配等。

(收稿日期:2013-03-16)