



一种联合双时隙的资源分配算法

雷鹏, 李有明, 李婷, 周桂莉, 付彩梅

(宁波大学通信技术研究, 浙江 宁波 315211)

摘要:针对功率最小化问题,提出了一种联合双时隙的资源分配算法,利用相邻两个时隙信道状态整体一致而又具有差异的性质,根据第1时隙的信道状态,将信道状态好的用户的第2时隙的部分或全部速率提前分配,从而使信道增益大的子载波承载了较多的速率,最终降低了系统功率消耗。仿真结果表明,所提双时隙资源分配算法既能保证用户双时隙内的目标速率,又能够有效降低系统的功率消耗。

关键词:联合双时隙;速率分配;子载波分配;功率分配;功率最小化

中图分类号:TN92

文献标识码:A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016079

A resource allocation algorithm based on double slots

LEI Peng, LI Youming, LI Ting, ZHOU Guili, FU Caimei

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

Abstract: A resource allocation algorithm based on double slots was proposed to minimize the transmitting power in wireless communications. Being aware of the channel difference between the two adjacent slots, the second slot was allocated in advance partial of the data rate conventionally scheduled to the first slot when the corresponding user had perfect channel state. Consequently, most of the required data was loaded by the sub-carriers with fine channel gain and finally less transmitting power was needed. The simulation results indicate that the proposed algorithm can effectively decrease the transmitting power while meeting the users' target rate requirement.

Key words: double slots, rate allocation, sub-carrier allocation, power allocation, power minimization

1 引言

随着移动互联网和云技术的快速发展,越来越多的手机、可穿戴设备等移动端接入无线通信网,并时刻产生着巨大的数据流量。而无线频谱资源相比之下非常有限,因此如何对频谱资源进行管理和分配,获得更高的系统容量和频谱资源利用效率成为了人们关注的重点。与此同时,

整个通信系统的能源消耗也随着无线通信业务的扩大而变得越来越严重,而绝大多数接入无线通信网的移动终端本身存储的电量有限,功率消耗过大将会导致频繁充电或更换电池,给使用带来不便。因此,如何降低通信过程中的功率和能量消耗也是资源分配中的重点问题。

近年来,已经有较多的文献对多用户无线通信系统中的资源分配问题进行了研究^[1]。参考文献[2]根据注水算法

收稿日期:2015-09-13;修回日期:2016-02-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No.61571250);宁波市自然科学基金资助项目(No.2015A610121);宁波大学研究生科研创新基金资助项目(No.G15051)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(No.61571250), Ningbo Natural Science Foundation(No.2015A610121), The Graduate Students Innovation Foundation of Ningbo University(No.G5051)



提出了一种自适应功率分配算法,通过将子载波分配给信道增益最大的用户来获得最大的系统容量。然而,该算法不能保证用户的 QoS (quality of service, 服务质量),也不能保证用户间的公平性。参考文献[3]为了保证用户的 QoS,首先按照参考文献[2]的方法进行子载波的初步分配,然后在系统容量损失最小准则下将总速率裕量最大用户的子载波分配给总速率裕量最小的用户来完成子载波的再分配,最后用注水算法完成功率分配。该算法能够在保证用户 QoS 的同时获得较大的系统容量;但由于要反复迭代完成子载波的再分配,计算复杂度相对较高。参考文献[4]也将多用户的资源分配问题分解为分步的子载波分配和功率分配问题,并在子载波分配时优先分配子载波给平均信道增益最好的用户,然后反复迭代直到子载波全部分配,最后用注水算法完成功率分配。参考文献[5]将用户速率的上限也考虑了进来,并且在资源分配时,根据多用户的信道增益各自服从瑞利分布的特点,首先假设所有子载波分配相等的功率,然后根据用户的目标速率和信道增益将信道最佳的子载波优先分配,直到相应用户的目标速率得到满足;最后用注水算法完成了功率分配。参考文献[4]和参考文献[5]的方法都将信道最佳的子载波优先分配,从而可以获得较高的系统容量。参考文献[6]提出了一种基于效用最大化的资源分配算法,通过给具有实时性和非实时性要求的用户定义不同的效用函数来保证有不同通信业务需求的用户之间的公平性。参考文献[7]提出了一种基于比例公平的自适应资源分配算法,该算法能够保证用户间的比例公平性,并且具有较好的抗子载波间干扰性能。以上文献的研究都可以归结为提升频谱效率方面的研究;另外,还有基于能效考虑的资源分配研究^[8]和新型无线通信系统,如中继通信系统中的资源分配研究^[9]和认知无线电系统中的资源分配问题研究^[10]等。

上述参考文献对多用户无线通信系统中的资源分配问题进行了较多的研究,然而它们大都是针对单个时隙进行的。就功率最小化问题而言,它们能够保证每一个单独的时隙内系统的功率消耗最小,但当联合两个甚至多个时隙来看时,由于其未能根据不同时隙信道的变化动态调配用户速率,所以总体上不一定是最优的。因此,本文提出了一种基于功率最小化的联合双时隙资源分配算法,利用相邻两个时隙信道状态整体一致而又具有差异的性质,在第1时隙进行资源分配时,将信道状态好的用户的第2时隙的部分或全部速率提前分配,并将信道差的用户第1时隙

的部分或全部速率预留到第2时隙进行分配,而在第2时隙为每个用户补充分配双时隙内剩余的速率。这样,既可以充分利用第1时隙的信道状态良好的子载波,使之承载较多的速率,又可以避免信道状态差的子载波承载过多的用户速率,从而降低系统功率消耗。仿真结果表明,所提双时隙资源分配算法既能保证用户双时隙内的平均速率,又能够有效降低系统的功率消耗。

2 系统模型

如图1所示,假设一个单蜂窝的无线通信系统由1个基站和 K 个用户组成,这里考虑其下行链路中的资源分配问题。假设基站和所有用户之间的信道都为相互独立的瑞利衰落信道,并且采用 OFDM (orthogonal frequency division multiplexing, 正交频分复用) 调制技术,系统总带宽为 B ,共有 N 个正交子载波。

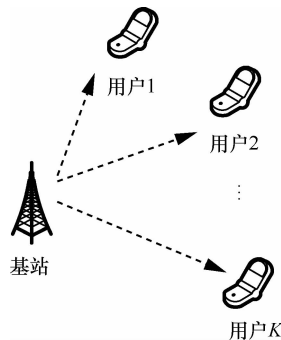


图1 单蜂窝下行链路无线通信系统模型

基站和用户之间的数据传输通常是以时隙的方式进行的。在某个时隙进行资源分配时,虽然可以认为该时隙内信道状态保持不变,但未来时隙的信道状态是无法得知的。因此,现有参考文献往往将每个时隙独立考虑进行资源分配。而本文考虑联合两个相邻时隙进行资源分配。假设第 m ($m=1$ 或 $m=2$) 时隙基站到第 k 个用户在第 n 个子载波上的信道增益为 $H_{m,k,n}$, 并且在单个时隙内保持不变,第 m 时隙基站到第 k 个用户的第 n 个子载波上加载的功率为 $P_{m,k,n}$, 那么基站到用户 k 在子载波 n 上的速率可以表示为 $r_{m,k,n} = \ln(1 + P_{m,k,n} H_{m,k,n})$, 并且第 m 时隙分配给用户 k 的速率可以表示为 $R_{m,k} = \sum_{n=1}^N r_{m,k,n}$ 。另外,用 R_k 表示第 k 个用户平均单个时隙的目标速率。这样,在保证满足用户双时隙内的平均速率条件下,基于功率最小化的双时隙联合资源分配问题可以表示为:

$$\begin{aligned}
\min_{\rho_{m,k,n}, P_{m,k,n}} P_T &= \min \sum_{m=1}^2 \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \rho_{m,k,n} P_{m,k,n} \\
\text{s.t. (C1)} \quad &\rho_{m,k,n} \in \{0, 1\}, \forall m, k, n; \\
\text{(C2)} \quad &\sum_{k=1}^K \rho_{m,k,n} = 1, \forall m, n; \\
\text{(C3)} \quad &P_{m,k,n} \geq 0, \forall m, k, n; \\
\text{(C4)} \quad &\frac{1}{2} \sum_{m=1}^2 \sum_{n=1}^N r_{m,k,n} \geq R_k, \forall k;
\end{aligned} \quad (1)$$

其中, C1 表示在第 m 时隙子载波 n 是否分配给用户 k ; C2 表示在每一时隙一个子载波只能分配给一个用户; C3 表示发射功率 $P_{m,k,n}$ 是非负的; C4 表示分配给用户的两时隙内的平均速率不能低于其目标速率, 反映了不同用户的不同业务需求。

3 联合双时隙资源分配算法实现

在优化式(1)中, 在第 1 时隙进行资源分配时, 第 2 时隙的信道状态信息, 即 $H_{2,k,n}$ 是未知的, 所以该问题不能直接求解。而根据注水算法原理, 当给信道状态好的子载波上分配较多功率而给信道状态差的子载波上分配较少功率时, 可以使系统的总速率不变而功率消耗降低。另外, 由于所有信道是时变的, 两个时隙的信道增益不同; 而又由于不同用户和基站之间的信道相互独立, 并且每个用户和基站之间不同子载波的信道增益也都服从瑞利分布^[11], 因此相邻两个时隙的信道增益分布不变, 即两个时隙信道的整体状态是一致的。因此, 本文将式(1)分解为关联的第 1 时隙资源分配和第 2 时隙资源分配, 在第 1 时隙进行资源分配时, 将信道状态好的用户的第 1 时隙的部分或全部速率提前分配到第 1 时隙, 并将信道差的用户的第 1 时隙的部分或全部速率预留到第 2 时隙进行分配; 而在第 2 时隙, 则在优先分配信道状态好的子载波原则下, 为每个用户补充分配双时隙内剩余的速率。这样, 既保证了双时隙内用户的目标速率, 又使信道良好的子载波承载了较多的速率, 最终减小系统功率消耗。而在具体进行每个时隙内的资源分配时, 本文都将采用有效而复杂度低的分步式分配方法, 依次进行子载波数目分配、具体的子载波分配和功率分配; 最终完成双时隙内的资源分配^[12]。

3.1 第 1 时隙内资源分配

分步式资源分配方法可以取得性能和复杂度的良好折中^[12]。因此, 本文在单个时隙内进行资源分配时采取分步式分配的思想, 将并行的子载波和功率分配问题分解为

分步的子载波分配和功率分配问题。而在进行子载波分配时, 本文参考文献[9], 将子载波分配又分解为子载波数目分配和具体的子载波分配两步。

3.1.1 第 1 时隙子载波数目预分配

本文算法在第 1 时隙进行子载波数目分配时, 是根据用户的目标速率和用户第 1 时隙的平均信道增益进行的。具体的分配步骤如下。

首先, 根据用户的目标速率和该通信系统中允许的最大 OFDM 调制比特数 M , 进行子载波数目的初步分配:

$$m_k = \left\lceil \frac{R_k}{M} \right\rceil \quad (2)$$

其中, $\lceil \cdot \rceil$ 为向上取整运算。

然后, 进行剩余子载波数目的分配。根据用户的平均信道增益, 计算每个用户增加一个子载波后会节省的功率:

$$\Delta p_k = \frac{m_{1,k}}{H_{1,k}} (2^{\frac{R_k}{m_{1,k}}} - 1) - \frac{m_{1,k} + 1}{H_{1,k}} (2^{\frac{R_k}{m_{1,k} + 1}} - 1) \quad (3)$$

并给节省功率最多的用户分配的子载波数目增加 1; 如此循环进行, 直到剩余子载波数目分配完毕。

最终, 得到每个用户第 1 时隙预分配到的子载波数目分别为 $\{m_{1,k}, k=1, 2, \dots, K\}$ 。

3.1.2 第 1 时隙具体的子载波分配

第 3.1.1 节中给不同用户分配的子载波数目是在只考虑用户目标速率和第 1 时隙的信道状态下得到的; 而本文在进行具体的子载波分配时将联合双时隙考虑, 不仅要将信道状态好的子载波优先分配给相应用户, 直到满足信道状态好的用户第 1 时隙的目标速率; 而且更要将信道状态好的用户的第 2 时隙的部分或全部目标速率提前分配, 并将信道差的用户的第 1 时隙的目标速率预留到第 2 时隙进行分配。因此, 本文设计了如下的第 1 时隙子载波分配算法。

步骤 1 初始化各用户第 1 时隙实际分配到的子载波数目: $m'_{1,k} = 0 (k=1, 2, \dots, K)$ 。

步骤 2 找到第 1 时隙的未分配的信道增益最大的用户—子载波对 $(k^*, n^*) ((k^*, n^*) = \arg \max H_{1,k,n})$, 并将子载波 n^* 分配给用户 k^* , 然后子载波 n^* 退出分配。

步骤 3 若用户 k^* 已经分配到的子载波数目达到了第 1 时隙预分配数目的 2 倍, 即 $m'_{1,k} \geq 2m_{1,k}$, 则用户 k^* 退出分配。

步骤 4 若所有子载波分配完毕, 则结束子载波分



配;否则返回到步骤2,继续向下执行。

最后得到第1时隙每个用户实际分配到的子载波数目分别为 $\{m'_{1,k}, k=1,2,\dots,K\}$ 。

从步骤2可以看出,该分配方法保证了优先将信道状态好的子载波分配给相应用户;从步骤3可以看出,用户对子载波信道状态越好,拥有的信道增益排名靠前的子载波数量越多,则第1时隙实际分配到的子载波数目也就越多。而第1时隙分配给用户的速率计算如下:

$$R_{1,k} = \frac{m'_{1,k}}{m_{1,k}} R_k \quad (4)$$

即,用户第1时隙实际分配到的子载波数目相对预分配的越多,则分配给用户第1时隙的速率也越多。这样就保证了用户在第1时隙信道状态好时承载较多的速率,而在信道状态差时承载较少的速率,从而可以在保证同样的平均速率下降低系统的功率消耗。

3.1.3 第1时隙功率分配

完成具体的子载波分配和第1时隙用户的速率分配之后,不同子载波上的功率分配问题便转化成了多个用户独立的功率分配问题,可以用注水算法实现。最后得到第1时隙用户 k 第 q 个子载波上分配的功率为:

$$p_{1,q}^k = \left[\lambda_{1,k} - \frac{\Gamma}{h_{1,k,q}} \right]^+ \quad (5)$$

其中, $\lambda_{1,k}$ 为第1时隙用户 k 的注水线, Γ 为信噪比差额, $h_{1,k,q}$ 为第1时隙子载波 q 上的信道增益, $[x]^+ = \max\{x, 0\}$ 。

3.2 第2时隙内资源分配

第1时隙进行资源分配时,根据实际信道条件,给信道状态好的用户预分配了第2时隙的速率,而将信道差的用户第1时隙的速率预留到了第2时隙。而为了满足每个用户双时隙内的目标速率,本文在第2时隙进行资源分配时,将补充分配用户剩余的速率;具体地,仍分为子载波数目分配、具体的子载波分配和功率分配3步。

第2时隙的子载波数目分配是根据用户的剩余速率和用户第2时隙的平均信道增益来进行的,而分配方法和第1时隙的分配方法相同。其中,第2时隙用户 k 的剩余速率为:

$$R_{2,k} = 2R_k - R_{1,k} \quad (6)$$

最终得到每个用户第2时隙预分配到的子载波数目分别为 $\{m_{2,k}, k=1,2,\dots,K\}$ 。

第2时隙具体的子载波分配方法和第1时隙相同,仍优先分配信道状态好的子载波和用户。不同之处是第2时

隙进行分配时,当用户实际分配到的子载波数目达到第2时隙预分配的子载波数目分配时,该用户就退出子载波分配。因此,第2时隙每个用户实际分配到的子载波数目和预分配的数目相同。

第2时隙的功率分配仍采用注水算法实现。最后得到第2时隙用户 k 第 q 个子载波上分配的功率为:

$$p_{2,q'}^k = \left[\lambda_{2,k} - \frac{\Gamma}{h_{2,k,q'}} \right]^+ \quad (7)$$

其中, $\lambda_{2,k}$ 为第2时隙用户 k 的注水线, $h_{2,k,q'}$ 为第2时隙子载波 q' 上的信道增益。

4 算法复杂度分析

本节对所提算法的复杂度进行了分析,并和参考文献[3]、参考文献[4]和参考文献[5]中算法的复杂度进行了对比。

所提算法在进行第1时隙资源分配时,分别进行了子载波数目分配、子载波具体分配和功率分配。在分配子载波数目时,进行子载波数目的初步分配后若子载波数目有剩余,则每个剩余的子载波需要进行 K 次比较来找到最佳的分配用户,因此子载波数目分配的计算复杂度小于 $O(KN)$ 。在进行具体的子载波分配时,每次要将信道增益最大的子载波进行分配,直到分配完所有子载波,

需要进行 $K \sum_{n=1}^N n \approx \frac{1}{2} N^2 K$ 次比较,因此子载波数具体分配

的计算复杂度为 $O\left(\frac{1}{2} N^2 K\right)$ 。在功率分配时采用注水算

法,算法复杂度与具体的迭代次数有关,将 K 个用户总的复杂度记作 $K \cdot T_{wf}$,其中 T_{wf} 表示平均每个用户实现注水算法时的迭代次数^[4]。因此,所提算法第1时隙

的复杂度为 $O\left(2KN + \frac{1}{2} N^2 K + KT_{wf}\right)$ 。而根据本文第3.2节

可知,所提算法第2时隙的复杂度与第1时隙相同。因此,所提双时隙联合资源分配算法平均单位时隙的

算法复杂度为 $O\left(2KN + \frac{1}{2} N^2 K + KT_{wf}\right)$ 。而同等条件下,

参考文献[3]、参考文献[4]和参考文献[5]的算法复杂度分别为 $O(3KN + 2N^2 + KT_{wf})$ 、 $O(N^3 + KN \ln N + K \ln K + KT_{wf})$

和 $O(KN + 2KT_{wf})$ 。通常情况下,子载波数目要远多于用户个数,即 $N \gg K$ ^[12],因此,4种算法复杂度分别近似为

$O\left(2N + \frac{1}{2} N^2 + KT_{wf}\right)$ 、 $O(3N + 2N^2 + KT_{wf})$ 、 $O(N^3 + KN \ln N + KT_{wf})$

和 $O(N+2KT_{WF})$ 。对比可知,当注水算法的迭代次数较低,即 T_{WF} 较小时,所提算法的复杂度明显比参考文献[3]和参考文献[4]中的算法低,而比参考文献[5]中的算法高。

5 仿真及分析

为了进一步验证所提联合双时隙资源分配算法的有效性,本文对其进行了仿真,并在相同条件下和其他单时隙资源分配算法进行了对比。

算法1 根据参考文献[3],首先在无用户目标约束下进行子载波的初步分配,然后在系统容量损失最小准则下将总速率裕量最大用户的子载波分配给总速率裕量最小的用户来完成子载波的再分配;最后用注水算法完成功率分配。

算法2 根据参考文献[4],首先计算每个用户的平均信道增益,然后根据用户目标速率给平均信道增益最好的用户分配一定数目的子载波,并反复如此操作直到子载波分配完毕;最后用注水算法完成功率分配。

算法3 根据参考文献[5],首先假设所有子载波分配相等的功率,然后根据用户的目标速率和信道增益将信道最佳的子载波优先分配,直到相应用户的目标速率得到满足;最后用注水算法完成功率的最终分配。

在仿真中,基站到所有用户均采用6径的频率选择性瑞利衰落信道,最大多普勒频移为50 Hz,时延扩展为50 μ s,子载波个数为256,系统总带宽为1 MHz,每个时隙含有1个OFDM符号,整个系统带宽内噪声总功率为0 dBw,最大调制比特数为4,目标误比特率为 10^{-3} 。另外,所有实验结果均是经1000次 Monte-Carlo 实验后取平均得到的。

图2给出了用户数量固定为10时,不同算法的总发射功率—合目标速率性能,其中合目标速率为所有用户目标速率的加和,且每个用户的目标速率为随机分配的不同数值。从图2中可以看出,当系统的合目标速率增加时,4种算法对应的系统总发射功率都随之增大;但在同一合目标速率下,本文算法所消耗的系统功率明显比另外3种算法小。与算法1相比,所提算法消耗的功率要低约1.8 dB;与算法2相比,所提算法的总功率要低约1.1 dB;与算法3相比,所提算法的总功率要低约0.9 dB。因此,图2表明在合目标速率一定下,所提算法将会消耗最少的功率。

图3给出了4种算法下系统总发射功率随用户数量的变化情况,其中每个用户的目标速率为1~10 bit/s的不同数值而所有用户的平均目标速率不变。图中显示,当用户数量增大时,由于系统合目标速率增大,系统的总发射

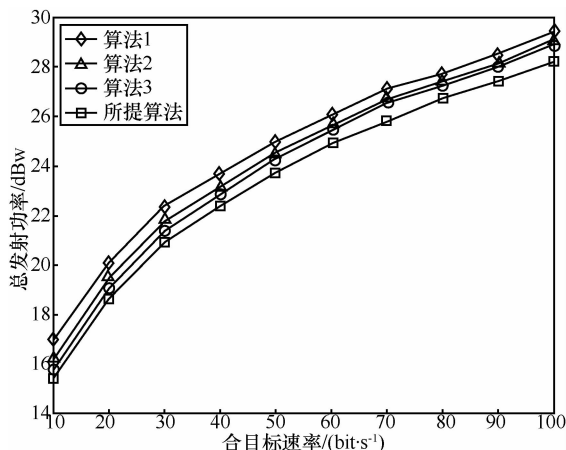


图2 不同合目标速率下的总发射功率比较(用户总数 $K=10$)

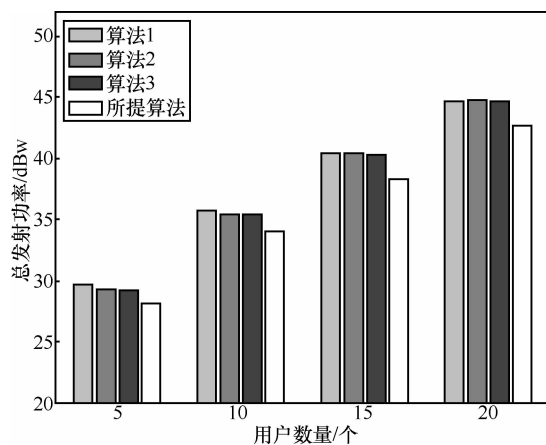


图3 不同用户数量下的总发射功率比较

功率也逐渐增大。而当用户数量固定时,所提双时隙联合资源分配算法消耗的总功率始终是最小的。因此,图3表明在不同的用户数量情况下,本文的算法都会消耗最少的功率。

图4验证了不同算法下用户实际分配到的速率是否和用户的目标速率一致。从图4中可以看出,本文所提

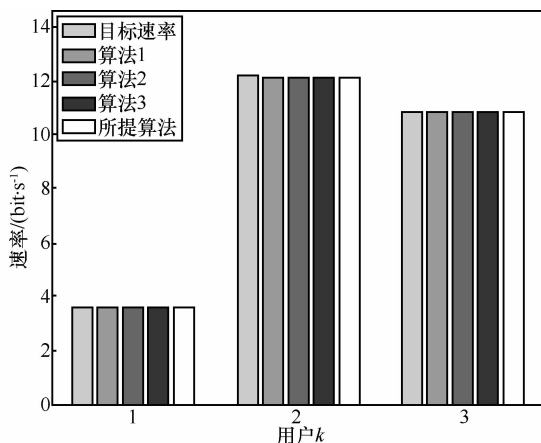


图4 不同算法用户实际分配到的速率与目标速率比较



双时隙联合资源分配算法与另外3种算法都能够很好地满足不同用户的目标速率需求,验证了所提算法的有效性。

综合图2、图3和图4分析,算法1、算法2和算法3都只考虑了单时隙内的资源分配,而本文算法联合相邻两个时隙进行资源分配,根据信道情况将两个时隙的目标速率进行有差别的分配,给信道增益大的子载波分配较多的速率,同时给信道增益小的子载波分配较少的速率,从而能够获得更低的功率消耗。

6 结束语

本文提出了一种联合双时隙的资源分配算法,在保证用户目标速率的条件下最小化系统的功率消耗。该算法利用相邻两个时隙信道状态整体一致而又具有差异的性质,在第1时隙进行资源分配时,将信道状态好的用户的第2时隙的部分或全部目标速率提前分配,并将信道差的用户第1时隙的部分或全部目标速率预留到第2时隙进行分配,从而使信道增益大的子载波承载了较多的速率,最终降低了系统功率消耗。

参考文献:

- [1] FARSHAD S, BACCI G, LUISE M, et al. A survey on resource allocation techniques in OFDM (A) networks [J]. Computer Networks, 2014(65): 129-150.
- [2] KIVANC D, LI G Q. Computationally efficient bandwidth allocation and power control for OFDMA [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2003, 2(6): 1150-1158.
- [3] ZHANG Y J, KHALED L. Multiuser adaptive subcarrier-and-bit allocation with adaptive cell selection for OFDM systems [J]. Wireless Communications, IEEE Transactions on, 2004, 3 (5): 1566-1575.
- [4] HHUANG J, SUBRAMANIAN V G, AGRAWAL R, et al. Joint scheduling and resource allocation in uplink OFDM systems for broadband wireless access networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2009, 27(2): 226-234.
- [5] CHEN S Z, REN Z Y, HU B, et al. Resource allocation in downlink OFDM wireless systems with user rate allowed regions. Wireless Personal Communications, 2015, 80(1): 429-445.
- [6] KATOOZIAN M, NAVAIE K, YANIKOMEROGLU H. Utility-based adaptive radio resource allocation in OFDM wireless networks with traffic prioritization[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(1): 66-71.
- [7] FANG M, SONG G. Adaptive resource allocation schemes for OFDMA systems with proportional rate constraint[C]//ICT and

Energy Efficiency and Workshop on Information Theory and Security, July 5-6, 2012, Dublin, Ireland. New Jersey: IEEE Press, 2012: 106-110.

- [8] HE C L, LI Y, ZHENG F C, et al. Energy-efficient resource allocation in OFDM systems with distributed antennas[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63 (3): 1223-1231.
- [9] CHEN B, LI Y M, GUO T, et al. Power minimization based on subcarrier pairing for multi-user cooperative relay networks[J]. ICIC Express Letters, 2015, 9(8): 2113-2117.
- [10] AHMAD A, AHMAD S, REHMANI M H, et al. A survey on radio resource allocation in cognitive radio sensor networks[J]. IEEE Communications Society, 2015, 17(2): 888-915.
- [11] SADR S, ANPALAGAN A, RAAHEMIFAR K. Radio resource allocation algorithms for the downlink of multiuser OFDM communication systems[J]. Communications Surveys & Tutorials, IEEE, 2009, 11(3): 92-106.
- [12] BOHGE M, GROSS J, WOLISZ A, et al. Dynamic resource allocation in OFDM systems: an overview of cross-layer optimization principles and techniques [J]. Network, IEEE, 2007,21(1): 53-59.
- [13] AFOLABI R O, ARESH D, KISEON K Multicast scheduling and resource allocation algorithms for OFDMA-based systems: A survey[J]. Communications Surveys & Tutorials, IEEE, 2013, 15(1): 240-254.

[作者简介]



雷鹏(1990-),男,宁波大学硕士生,主要研究方向为无线电系统中的资源分配技术、认知无线电技术。

李有明(1963-),男,宁波大学教授、博士生导师,主要研究方向为宽带通信、电力线通信、协作中继、认知无线电等。

李婷(1991-),女,宁波大学硕士生,主要研究方向为认知无线电系统中的资源分配技术。

周桂莉(1992-),女,宁波大学硕士生,主要研究方向为电力线中资源分配技术和认知无线电技术。

付彩梅(1990-),女,宁波大学硕士生,主要研究方向为电力线中资源分配技术和认知无线电技术。