组播 OFDM 系统中基于子载波成对调整的功率分配算法

沈 骏,吴 波,蒋 伟,尚 勇,项海格
(北京大学信息科学技术学院 北京 100871)

摘 要: 研究了在总功率的约束下,组播 OFDM 系统中最大化组播速率的功率分配问题.首先引入贪婪算法求解该问题以降低复杂度,但贪婪算法只执行预设的固定次数分配后即停止,其截止条件与功率分配过程中的状态无关,无法有效地提高系统性能;进而提出了两种基于子载波成对调整的功率分配算法,在初始功率分配的基础上选择子载波对交换功率,将功率重新分配给能够使组播速率提高得最多的子载波,并只在无法进一步提高组播速率时才停止调整.研究和仿真结果表明,所提出的两种调整算法能够有效地提高组播速率,性能接近根据凸函数优化方法求得的最优解,且显著降低了算法的复杂度.

关键词: 正交频分复用;组播;功率分配
中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 07-1693-06

Power Allocation Algorithm Based on Subcarrier Pairwise Exchange in Multicast OFDM System

SHEN Jun, WU Bo, JIANG Wei, SHANG Yong, XIANG Hai-ge
(*The School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing* 100871, *China*)

Abstract: The power allocation problem to maximize the multicast rate in one multicast group under the total power constrain is investigated in multicast Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) system. The greedy algorithm is applied to reduce the complexity. To improve the multicast rate, two power allocation algorithms based on subcarrier pairwise exchange are proposed. The proposed algorithms both have two steps: initial power allocation and adjustment. During the adjustment period, power is exchanged between subcarriers and the algorithms are terminated only when the multicast rate cannot be increased any more. Simulation results show that the proposed algorithms can achieve near optimal result with low complexity.

Key words: orthogonal frequency division multiplexing (OFDM); multicast; power allocation

1 引言

正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing,OFDM)技术由于其特有的抗频率选择性衰落、抗符号间干扰的能力,能够支持高速率传输,已成为下一代网络的核心技术之一.

在 OFDM 系统下行链路资源分配的研究[1~5]中,主要针对单播业务给出了基于信道状态的自适应分配方案,提高系统容量或降低发射功率.近年来,在 OFDM 系统资源分配的研究进一步扩展到了组播业务中.文献[6]研究了组播 OFDM 系统中的比特和功率分配问题,在总功率和总比特数的约束下,使所有组播用户的误比特数之和最小.文献[7]研究了在组播 OFDM 系统中使用层状编码时,不同类型编码的比例分配问题.文献[8]研究了组播 OFDM 系统的子载波与功率分配问题,在总功率约束下,最大化所有组播组的和速率,并给出了低复杂度的分配算法.文献[7]和[8]在建模组播组中不同用户在同一子载波上的速率时,使用了最差信道的方法,即使用同一个子载波的组播用户以相同的速率接收信息,该速率由组播组内在该子载波上信道条件最差的用户决定.该方法能够简化原有的复杂问题,但无法有效地利用信道条件好的用户提高资源分配效率.文献[9]在研究同时存在单播和组播业务的子载波分配问题时,通过在所有子载波上采用联合信道编码的方法,使组播速率不受限于各子载波上的最差用户,用户接收组播业务的速率由该用户在各子载波上的容量相加得到,可获得更高的组播速率.

当在所有子载波之间采用联合编码时,可以通过多个子载波的并行传输实现对多用户的组播,并在解码过程中联合使用不同子载波上传输的信息,利用好信道的信息恢复差信道的数据符号.尽管用户在不同子载波上能够可靠传输的信息量不同,但只要通过多载波获得的

收稿日期:2009-01-09;修回日期:2010-01-20

信息量的总和越高,采用联合解码的方法解调出相应组播数据的速率就越高.用户在一个子载波上的信道条件越好,那么在联合解码后就可得到更多的信息.在组播 OFDM 系统中,通过联合编码,每个用户可将各子载波上的信息量相加,作为用户所能获取的最大速率.

本文针对 OFDM 系统中的单个组播业务,研究了在总功率约束下最大化组播速率的功率分配问题,通过在所有子载波之间采用联合编码,利用信道条件好的用户传输更多的组播信息,避免了最差信道方法的不足之处.所研究的功率分配问题可通过标准的凸函数优化方法求解,但该方法具有较高的复杂度.考虑到实际情况,本文引入了贪婪算法求解,以降低复杂度.但贪婪算法只执行预设的固定次数分配后即停止,其截止条件与分配的中间状态无关.在分配过程中,通过根据当前状态动态地判断是否满足截止条件的方式,能够进一步提高算法性能,因此本文提出了基于子载波成对调整的两种功率分配算法,功率分配分为初始分配与调整两个阶段,在调整过程中将功率分配给使组播速率提高得最多的子载波,在无法进一步提高组播速率时才停止调整,能够在降低算法复杂度的同时获得接近最优解的性能.

2 系统模型

本文研究的 OFDM 系统由一个基站和 K 个用户终端组成,子载波总数为 N.基站与用户之间的下行链路是慢衰落频率选择性信道,用户 k 在第 n 个子载波上的接收信号方程为:

$$Y_{k,n} = H_{k,n}X_n + Z_{k,n} \tag{1}$$

其中,$Y_{k,n}$是用户 k 在子载波 n 上的接收符号,X_n 是基站在子载波 n 上的发送符号,$H_{k,n}$是信道复增益,$Z_{k,n}$是复高斯噪声.假设基站通过用户反馈,可以获得信道状态信息 $H_{k,n}$.

基站发送的组播数据采用联合编码后在所有子载波上传输,用户以不同的速率接收不同子载波上的信息后解码获得组播数据,根据信息论,任意用户 k 能够可靠接收的速率上限为:

$$R_k = \sum_n c_{k,n} \tag{2}$$

其中,$c_{k,n}$为用户 k 在子载波 n 上的信道容量:

$$c_{k,n} = \log\left(1 + \frac{H_{k,n}^2 p_n}{\sigma_n^2}\right) = \log(1 + \alpha_{k,n}p_n) \tag{3}$$

其中,$\alpha_{k,n} = H_{k,n}^2/\sigma_n^2$,$\sigma_n^2$ 为子载波 n 上的噪声功率,p_n 是在子载波 n 上分配的功率.

为了确保系统中的所有用户都能够可靠接收组播数据,基站按所有用户能够可靠接收速率 R_k 中的最小值发送组播数据,即组播速率为:

$$R = \min_k R_k = \min_k \sum_n c_{k,n}, \forall k \tag{4}$$

功率分配的优化目标是在满足总功率约束的条件下,使组播速率最大,即:

$$\max_{p_n} \min_k \sum_n c_{k,n} \tag{5}$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_n p_n \leqslant P_T, \quad p_n \geqslant 0, \forall n \tag{6}$$

其中 P_T 为总功率.

在目标函数式(5)中,$c_{k,n}$是关于 p_n 的上凸函数,由于对上凸函数求和以及逐点求最小值都不改变凸性,所以目标函数式(5)为上凸函数,而式(6)是关于 p_n 的线性约束,因此问题(5)-(6)是关于 p_n 的凸优化问题.通过引入新的变量 T,可将(5)-(6)定义的最大最小(max-min)问题变为标准的凸函数优化问题如下:

$$\max_{p_n} T, \quad T \leqslant \sum_n c_{k,n}, \forall k \tag{7}$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_n p_n \leqslant P_T, \quad p_n \geqslant 0, \forall n \tag{8}$$

对于问题(7)-(8),通过内点法[10]可以求得最优解(在后续部分中简称为最优算法).该方法将式(8)的不等式约束作为惩罚项加到目标函数中,迭代求解无约束问题(9),并在迭代中逐渐增大惩罚项系数直至算法收敛,即:

$$\max_{p_n} g(\boldsymbol{P}) \tag{9}$$

其中

$$g(\boldsymbol{P}) = tT + \sum_k \log\left(\sum_n c_{k,n} - T\right) + \log\left(P_T - \sum_n p_n\right) + \sum_n \log p_n \tag{10}$$

t 为与不等式约束相关的惩罚项系数.虽然采用内点法可以在多项式时间的复杂度内求解凸优化问题(7)-(8),但仍具有较高的复杂度,算法的复杂度是 $O(KN^3)$[10].考虑到实际应用中的复杂度要求,下文给出了几种低复杂度的功率分配算法.

3 基于贪婪算法的功率分配

对于式(5)-(6)定义的最优化问题,基于贪婪算法(greedy algorithm)[11]的思想,可以得到一种低复杂度的次优算法,即在优化问题中的每一步面临选择时,都做眼前最有利的选择,而不考虑本次的选择对后续步骤是否有不良影响.该算法通过每一次局部的最优选择来降低复杂度.在组播 OFDM 系统功率分配问题中应用贪婪算法时,需要将总功率分为多份,逐步分配到各子载波上,每一步将一份功率分配给在当前状态下能够使组播速率的增加量最大的子载波,直到分配完所有的功率.

定义 M 为决定功率分配颗粒度的调整参数:

$$M = \frac{P_T}{N\Delta p} \tag{11}$$

即每一份功率为 Δp,总功率平均分为 $M \times N$ 份,算法每一步分配功率 Δp,共执行 $M \times N$ 步.

当在中间某一步各子载波上已分配的功率矢量为 $p = [p_1, p_2, \cdots, p_N]$时,在任意子载波 n 上增加 Δp 的功率,相应组播速率的增量为:

$$\Delta R_n = \min_k R_k(p_1, p_2, \cdots, p_n + \Delta p, \cdots, p_N) - \min_k R_k(p_1, p_2, \cdots, p_n, \cdots, p_N) \tag{12}$$

在所有 N 个分配方案中,选择使组播速率的增量最大的分配方案,即功率 Δp 分配给子载波:

$$n^* = \arg\max_n \Delta R_n \tag{13}$$

调整参数 M 决定了功率分配的精细程度与算法复杂度,M 越大,每一次分配的功率 Δp 就越小,算法执行的总次数越多.在每一步分配中,需要按式(12)计算在 N 种功率分配下 K 个用户的最小速率,并与分配前的组播速率比较,其复杂度为 $O(KN)$.基于贪婪算法的功率分配共需执行 $M \times N$ 步,总复杂度为 $O(MKN^2)$.

4　基于子载波成对调整的功率分配算法

贪婪算法通过每一步的局部最优选择获得了较低的复杂度和较好的性能,但其分配次数与截止条件是预先已确定了的,与功率分配过程中的状态无关,其性能不一定最佳;如果功率分配能够根据分配过程中的状态动态地判断是否满足截止条件,将获得更好的性能.为此,下文提出基于子载波成对调整的功率分配算法,在子载波之间多次调整功率,并只在无法进一步提高组播速率时才停止调整,从而在组播 OFDM 功率分配问题中获得更好的性能.

基于子载波成对调整的功率分配算法(以下简称为调整算法)的基本思想是将功率分配分为初始分配与调整两个阶段.在初始阶段,各子载波分配相等的功率,即:

$$p_n = \frac{P_T}{N}, \forall n \tag{14}$$

在调整阶段,每一步选出一对子载波,使在该子载波对之间交换 Δp 的功率时,能够得到更高的组播速率,重复该步骤直到无法进一步提高组播速率时停止调整.下文提出了两种选择子载波对的方案,根据所使用方案的不同,将调整算法分为调整算法 1 和调整算法 2 两种.

4.1　调整算法 1

选择子载波对时,遍历所有可能的 $N(N-1)$个子载波对,从中选择交换 Δp 功率后,组播速率的增加量最大的子载波对.在每一步调整中,当各子载波上已分配的功率为 $p = [p_1, p_2, \cdots, p_N]$时,在任意子载波 i 和 j 之间交换 Δp 功率时,组播速率的改变量为

$$\Delta R_{i,j} = \min_k R_k(p_1, p_2, \cdots, p_i - \Delta p, \cdots, p_j + \Delta p, \cdots, p_N) - \min_k R_k(p_1, p_2, \cdots, p_N) \tag{15}$$

每次调整时,在所有满足 $\Delta R_{i,j} > 0$ 的交换组合中,选择最大值对应的子载波对,即:

$$[i^*, j^*] = \arg\max_{i,j} \Delta R_{i,j}, \Delta R_{i,j} > 0 \tag{16}$$

将子载波 i^* 上的一部分功率 Δp 重新分配给子载波 j^*,并进入下一步调整.若所有的子载波对均满足 $\Delta R_{i,j} \leqslant 0$,则停止调整.

调整算法 1 的具体步骤为:

步骤 1　初始化功率分配矢量 $p_n = P_T/N$,初始化调整参数 $M \geqslant 1$,功率调整量 $\Delta p = P_T/(MN)$;

步骤 2　根据式(15)计算在所有子载波对之间交换 Δp 功率时,组播速率的增加量 $\Delta R_{i,j}$;

步骤 3　若 $\Delta R_{i,j} > 0$,按式(16)选择 $\Delta R_{i,j}$的最大值对应的子载波对 i^* 与 j^*,将子载波 i^* 上的功率 Δp 重新分配给子载波 j^*,并更新功率分配矢量,$p_{i^*} = p_{i^*} - \Delta p$,$p_{j^*} = p_{j^*} + \Delta p$,返回步骤 2;若所有子载波对的速率增量都满足 $\Delta R_{i,j} \leqslant 0$,停止调整,算法结束.

4.2　调整算法 2

将寻找子载波对的过程分为单独的两步,首先在 N 个子载波中选出一个子载波,使得在该子载波上减小 Δp 功率后,相应的组播速率的减小量在所有 N 个子载波中最小;再将 Δp 功率重新分配给一个子载波,使得在该子载波上增加 Δp 功率后,相应组播速率的增加量在所有 N 个子载波中最大.所选出的这两个子载波即为需要交换 Δp 功率的子载波对.

在每一步调整中,当在各子载波上已分配的功率为 $p = [p_1, p_2, \cdots, p_N]$时,首先考虑在任意子载波 n 上减小 Δp 功率时,组播速率的减小量为

$$\Delta R_n^- = \min_k R_k(p_1, p_2, \cdots, p_n, \cdots, p_N) - \min_k R_k(p_1, p_2, \cdots, p_n - \Delta p, \cdots, p_N) \tag{17}$$

在所有 N 个子载波中,选择子载波 i^* 为对应的组播速率减小量最小的子载波,即:

$$i^* = \arg\min_n \Delta R_n^- \tag{18}$$

将子载波 i^* 上的功率减小 Δp,更新为

$$p' = [p_1, p_2, \cdots, p_{i^*} - \Delta p, \cdots, p_N] \tag{19}$$

基于已更新的功率分配 p',考虑在任意子载波 n 上增加功率 Δp 时,组播速率的增量为

$$\Delta R_n^+ = \min_k R_k(p_1', p_2', \cdots, p_n' + \Delta p, \cdots, p_N') - \min_k R_k(p_1', p_2', \cdots, p_N') \tag{20}$$

选择子载波 j^* 为对应的组播速率增加量最大的子载波,即:

$$j^* = \arg\max_n \Delta R_n^+ \tag{21}$$

将子载波 j^* 上的功率增加 Δp，更新为

$$p'' = [p_1', p_2', \cdots, p_{j^*}' + \Delta p, \cdots, p_N'] \tag{22}$$

调整前后组播速率的改变量为

$$\Delta R_{i^*,j^*} = \min_k R_k(p'') - \min_k R_k(p) \tag{23}$$

若 $\Delta R_{i^*,j^*} > 0$，将功率分配 p'' 确定为本次调整的结果，基于该功率分配矢量进行下一轮调整；反之，则算法结束.

调整算法 2 的具体步骤为：

步骤 1 初始化功率分配矢量 $p_n = P_T/N$，初始化调整参数 $M \geqslant 1$，功率调整量 $\Delta p = P_T/(MN)$；

步骤 2 根据式(17)计算在不同子载波上减小 Δp 功率时组播速率的减小量，选择其中最小值对应的子载波 i^*；根据式(20)计算在不同子载波上增加 Δp 功率时组播速率的增加量，选择其中的最大值对应的子载波 j^*；

步骤 3 按式(23)计算本次调整前后组播速率的改变量，若 $\Delta R_{i^*,j^*} > 0$，将功率分配矢量 p'' 确定为本次调整的结果，返回步骤 2；反之，则算法结束.

4.3 算法复杂度分析

调整算法 1 在功率调整过程中需要遍历所有可能的子载波交换组合，并对每一种组合计算交换后 K 个用户的速率，选择其中的最小值，与交换前 K 个用户速率中的最小值进行比较，当子载波数为 N 时，共有 $N(N-1)$ 种子载波组合，其复杂度为 $O(KN^2)$. 算法执行调整步骤的总数是不确定的，考虑到在极端情况下，功率调整的结果是将所有 $(N-1)$ 个子载波上的功率重新分配到一个子载波上，在初始等功率分配后，最多需要调整的次数为 $M(N-1)$，而最好情况下调整次数为 0；因此，可以估算调整算法 1 的调整次数为 $O(MN)$. 综合考虑调整次数和每次调整中的复杂度，调整算法 1 的总复杂度为 $O(MKN^3)$. 若忽略调整参数 M，则调整算法 1 与凸优化算法中的内点法的复杂度相当.

调整算法 2 在每一步调整中，需要分别计算在 N 个子载波上减小以及增加 Δp 功率后 K 个用户中的最小速率，共需要的计算次数为 $2N$，复杂度为 $O(KN)$. 在调整次数方面的分析与调整算法 1 相同，可估算为 $O(MN)$，总复杂度为 $O(MKN^2)$，是调整算法 1 复杂度的 $1/N$.

调整算法 1 和调整算法 2 两者的主要区别在于选择子载波对的方案不同. 调整算法 1 遍历了所有可能的子载波组合，调整算法 2 则把挑选子载波对的过程改为单独的两步，降低了复杂度. 在相同条件下，比较两种算法所选出的子载波对所对应的组播速率增量，调整算法 2 小于等于调整算法 1. 从总体上看，调整算法 2 的性能将略低于调整算法 1.

5 仿真结果

仿真环境为多用户组播 OFDM 系统，系统带宽 8MHz，信道模型为 COST 259 中的典型城区信道模型 (Typical Urban channel model)[12]. 仿真中比较了等功率分配、贪婪算法、两种调整算法、基于最差信道的功率注水分配以及最优算法的性能，其中，基于最差信道的功率注水分配是根据文献[7]和[8]中的方法，在每个子载波上选择各用户中最低的信道增益，将问题简化为单用户功率分配问题，采用经典的注水算法[13]得到此问题的最优解，并根据该最优功率分配，与其他算法同样按式(3)计算组播速率.

图 1 是子载波数 $N = 16$、总用户数 $K = 8$ 时，组播速率随着信噪比的变化曲线. 由于仿真结果中调整算法 1 与调整算法 2 两条性能曲线较为接近，为了便于观察，图 1 中没有给出调整算法 1 的曲线，将单独在图 2 中比较两种调整算法. 当信噪比由 1dB 增加到 6dB 时，图 1 中各算法的组播速率也相应增加，图中曲线由上到下依次为最优算法、调整算法 2、贪婪算法、等功率分配和最差信道注水. 当信噪比为 5dB 时，五种算法的组播速率由高到低分别为 1.222、1.213、1.191、1.097 和 0.901，调整算法 2 和贪婪算法分别是最优算法的 99.3% 和 97.5%，调整算法 2 的性能比贪婪算法提高了 1.8%，更接近最优解.

图 1 中的最差信道注水所能获得的组播速率是所有算法中最低的，这是由于该算法只考虑每个子载波上信道条件最差的一个用户，把问题简化成单用户的情况，由于没有利用其他用户的信道条件，该算法不能够获得较高的组播速率. 等功率分配没有考虑用户在不同子载波上的信道特性，同样无法获得较好的性能.

调整算法 2 和贪婪算法都基于所有用户在各子载波上的信道条件进行功率分配，可以获得较高的组播速率. 其中，贪婪算法的分配次数与截止条件是预先确定的，算法执行有限次数的步骤后即停止；而调整算法 2 需要反复调整子载波对之间的功率分配，算法能够根据调整过程中的状态动态地判断是否满足截止条件，直到无法继续提高组播速率才停止. 虽然在复杂度上与贪婪算法相当，但相比较而言，调整算法 2 可以获得更接近最优解的性能.

图 2 是图 1 在信噪比为 3 – 5dB 范围的局部放大，具体比较了调整算法 1 与调整算法 2 的性能. 在相同信噪比下，调整算法 1 获得的组播速率略高于调整算法 2，如信噪比为 5dB 时，调整算法 1 和调整算法 2 的组播速率分别为 1.216 与 1.213，分别是最优解的 99.5% 和 99.3%，两者之间的差别为 0.2%. 调整算法 1 通过在选

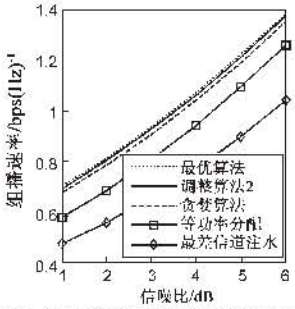

图1　组播速率与信噪比关系曲线(子载波数N=16, 用户数K=8, 调整参数M=10)

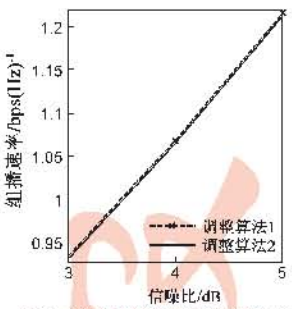

图2　组播速率与信噪比关系曲线(调整算法1与调整算法2)

择子载波对时采用遍历的方式,能够获得比调整算法 2 更高的性能,但其性能优势并不明显,两种调整算法的性能非常接近.图 3 是子载波数 $N=16$、信噪比为 5dB 时,组播速率随着用户数的变化曲线.当用户数由 1 增加到 16 时,各算法的组播速率都随着用户数的增加而下降,这是由于系统的组播速率由系统中速率最低的用户决定,当用户数越多,出现信道条件非常差、速率很低的用户的概率就越高,因此从平均角度来看,系统的组播速率具有下降的趋势.

图 4 是信噪比为 5dB、用户数 $K=8$ 时,在不同子载波数下的组播速率曲线.当系统中可供分配的子载波数由 4 增加到 32 时,图中各算法的组播速率也相应增加,各算法的性能排序与图 1 中的顺序一致.由于信道具有频率选择性衰落的特性,使得各子载波上用户的信道条件具有明显差异,当系统中可供分配的子载波数增加时,这种差异越明显.可以看出,调整算法可以灵活地根据各子载波上用户的信道状态分配功率,从而能够更为有效地利用各子载波的信道差异提高组播速率.

图 5 是当信噪比为 5dB、用户数 $K=8$、子载波数 $N=16$ 时,调整算法 1、2 与贪婪算法在不同功率调整参数 M 下的性能比较.当参数 M 取值从 1 逐渐增加时,相应的功率调整量 Δ_p 减小,即功率分配的颗粒度更细,各算法的组播速率都有所提高.但随着 M 的进一步

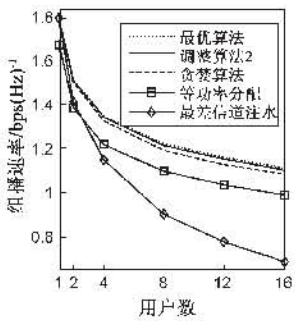

图3　组播速率与用户数关系曲线(信噪比SNR=5dB, 子载波数N=16)

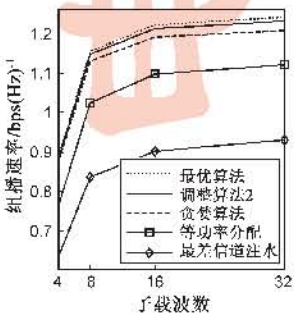

图4　组播速率与子载波数关系曲线(信噪比SNR=5dB, 用户数K=8)

增加,各算法的性能趋于稳定.在相同的调整参数 M 下,调整算法 1、2 的性能比较接近,均高于贪婪算法.考虑到调整算法 1 的复杂度为 $O(MKN^3)$,调整算法 2 与贪婪算法的复杂度均为 $O(MKN^2)$,在三个算法中,调整算法 2 是综合考虑性能和复杂度时的较好选择.

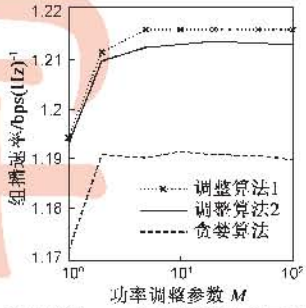

图5　调整算法1、2与贪婪算法在不同功率调整参数M下的性能比较(信噪比SNR=5dB, 用户数K=8, 子载波数N=16)

6　结论

本文研究了当组播 OFDM 系统所有子载波之间采用联合信道编码时,在总功率约束下使所有用户中的最小速率最大化的功率分配问题.考虑到实现复杂性,本文将贪婪算法引入到所研究的功率分配问题中,以满足实际应用中的低复杂度要求.进而本文提出了两种基于子载波成对调整的功率分配算法,将分配算法分为初始分配与调整两个阶段,通过在子载波之间多次调整功率,并只在无法进一步提高组播速率时才停止调整的方式,获得了接近最优解的性能.在信噪比为 5dB、用户数为 8、子载波数为 16 时,两种调整算法获得的组播速率分别是最优解的 99.5% 与 99.3%.综上所述,在组播 OFDM 系统的功率分配问题中,本文所提出的两种调整算法能够获得接近最优解的性能,其中调整算法 2 具有低复杂度的优势,有效地提高了组播 OFDM 系统的功率分配效率.

参考文献:

[1] WONG CY, et al. Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit, and power allocation [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1999, 17(10): 1747 – 1758.

[2] JANG J, LEE K B. Transmit power adaptation for multiuser OFDM systems [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2003, 21(2): 171 – 178.

[3] SONG G C, LI Ye. Cross-layer optimization for OFDM wireless networks-part I: Theoretical framework [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005, 4(2): 614 – 624.

[4] SONG G C, LI Ye. Cross-layer optimization for OFDM wireless networks-part II: Algorithm development [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005, 4(2): 625 – 634.

[5] SHEN Z K, et al. Adaptive resource allocation in multiuser OFDM systems with proportional rate constraints [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005, 4(6): 2726 – 2737.

[6] DEMAREZ A, et al. Adaptive bit and power-loading for multicast OFDM transmissions in rayleigh fading channels[A]. The 3rd International Symposium on Wireless Communication Systems[C]. Valencia Spain, 2006. 378 – 382.

[7] KWACK S, et al. Suitability-based subcarrier allocation for multicast services employing layered video coding in wireless OFDM systems[A]. Proceedings of 66th Vehicular Technology Conference[C]. Dublin, Ireland, 2007. 1752 – 1756.

[8] LIU J, et al. Dynamic power and sub-carrier allocation for OFDMA-based wireless multicast systems[A]. Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Communications [C]. Beijing China, 2008. 2607 – 2611.

[9] SEO H, et al. Channel structuring and subchannel allocation for efficient multicast and unicast services integration in wireless OFDM systems [A]. Proceedings of the 2007 IEEE Global Telecommunications Conference [C]. Washington, DC, USA, 2007. 4488 – 4493.

[10] BOYD S, VANDENBERGHE L. Convex Optimization [M]. UK: Cambridge University Press, 2004.

[11] Greedy Algorithm [DB/OL]. http://en.wikipedia.org/wiki/Greedy Algorithm, 2008.

[12] Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) Deployment aspects (3GPP TR 25.943 version 7.0.0 Release 7) [R]. FRANCE: 3rd Generation Partnership Project, 2007.

[13] COVER T M, THOMAS J A. Elements of Information Theory [M]. USA: Wiley-Interscience, 2006.

作者简介：

沈 骏 男，1979 年生，博士生，研究方向为无线网络资源管理

E-mail: shenjun@pku.edu.cn

项海格 男，1941 年生，教授，博士生导师，研究方向为通信与信息系统.