

## 一种基于子载波合并的多播资源调度算法

王凡森 赵拯 陈志刚\*

(西安交通大学电子与信息工程学院 西安 710049)

**摘要:** 针对无线 OFDM 多播系统, 该文提出一种基于子载波合并的多播资源调度算法。该算法通过提前将子载波分组, 避免了不必要的子载波配对; 自适应地选择子载波合并\非合并, 在分集和复用两种模式中选择最优方案; 同时根据子载波功率分配的特点, 将其解耦为配对子载波集合内功率分配和集合间功率分配两个子问题, 进一步优化了算法性能。仿真结果表明, 与现有方案相比, 所提方案能够在复杂度较低的情况下, 较好地提升系统性能。

**关键词:** 无线通信; 资源调度; 多播系统; 子载波配对; 功率分配

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)05-1184-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.00981

## A Multicast Resource Scheduling Algorithm Based on Subcarrier Merger

Wang Fan-sen Zhao Zheng Chen Zhi-gang

(School of Electronic Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** This paper presents a novel subcarrier combining based multicast resource scheduling algorithm for wireless OFDM multicast systems. By dividing subcarriers into different groups in advance, the algorithm avoids invalid subcarrier pairing, and adaptively chooses the optimal scheme between subcarrier diversity and subcarrier multiplexing by deciding whether to combine subcarriers or not. Moreover, according to the characteristic of subcarrier power allocation, this scheme decouples the problem into two sub-problems of intra-subcarrier-pairing power allocation and inter-subcarrier-pairing power allocation, which further improves the performance of the system. Simulation results show that the proposed scheme properly improves the system performance with lower complexity compared with the existing schemes.

**Key words:** Wireless communication; Resource scheduling; Multicast system; Subcarriers pairing; Power allocation

### 1 引言

随着无线互联网时代的到来, 移动多媒体业务需求出现了井喷式的增长, 而现网的传输能力已无力承担未来多媒体通信的重任。考虑到多媒体业务要求为多个用户提供同一业务服务, 具有高频谱效率特点的无线多播技术, 成为无线多媒体通信的有效解决方案, 得到了大量研究<sup>[1-3]</sup>。

为了保证所有服务用户都能够正常接收数据, 无线多播业务速率受限于信道最差用户, 即受限于所有服务用户中接收信噪比最低的用户; 随着用户增多, 业务速率会出现较大恶化, 系统总体速率也将遇到瓶颈<sup>[4]</sup>。如何抑制多媒体多播系统容量受限于最差用户的问题, 成为无线多媒体多播技术研究的热点。现有针对该问题的研究, 主要可以分为以下

两类: 一类研究集中于尽可能提升最差用户的接收性能, 如 OFDM, MIMO, 协作等技术在多播系统中的应用<sup>[5,6]</sup>; 另一类研究的主要思想是差异化用户需求, 为各个用户提供与其信道状况相匹配的业务服务, 即在满足最差用户基本业务需求基础上, 尽量使资源更多地分配给信道条件较好的用户, 以提升总体速率, 如分层多播、多描述信源编码等<sup>[3,7,8]</sup>。

其中无线多播资源调度技术, 既可以通过灵活地调配资源用来提升最差用户的接收性能, 又能够根据用户信道状态信息分配资源提升系统总容量; 在无线多播技术研究中得到了广泛的关注<sup>[9]</sup>。目前已有文献针对 OFDM 多播系统中资源调度问题展开研究, 其中多数文献仅根据用户信道状况信息优化资源调度, 以提升系统总体速率, 但这样可能会使最差用户不能获得所需的数据服务<sup>[10,11]</sup>; 针对这一问题, 文献[12,13]借鉴了单播资源调度的比例公平算法, 保证了用户间一定的公平性, 然而对于一些多媒体多播业务对用户公平性要求较高的场景(如付费业务), 此类算法仍不能完全满足需求。

2013-07-08 收到, 2013-11-17 改回

国家科技重大专项(2010ZX3003-004-02)和国家自然科学基金(60902045)资助课题

\*通信作者: 陈志刚 zgchen@mail.xjtu.edu.cn

针对这一场景,文献[14,15]在保证用户间充分公平性的前提下,提出了一种基于子载波协作的多播资源调度方法,该方法通过将用户自适应地调度到协作子载波配对上,并以调度后各协作子载波配对上的最差用户接收能力确定速率,用户选择在其信道条件较好的子载波上接收数据。这类算法的实质是子载波间的选择比合并方法,并不是性能最优的合并方法。

受文献[14,15]的启发,本文算法基于配对子载波间的最大比合并方法,并将配对子载波数目扩展到大于2的情况,并进一步利用多播系统子载波配对和功率分配的特点,提出了一种低复杂度的多播资源调度算法。该方法在已知信道状态信息的条件下,能够较好地解决传统多播在用户逐渐增多时,系统总体速率迅速达到瓶颈的问题;而实施本方法所要求的信道状态信息反馈条件,在新一代无线通信系统,如LTE-A系统中将能够得到较好的满足;同时所提算法主要针对子载波资源进行调度,能够较好地适用于现有的和新一代的无线通信系统。

## 2 系统模型

本文考虑一个具有 $N$ 个子载波和 $K$ 个用户的多播OFDM系统,基站总发射功率为 $P$ ,系统模型如图1所示。在该系统模型下,假设基站以最差用户的接收能力来确定多播业务的发送速率,所有多播用户都能够正确接收到所需的多播业务数据;本文提到的“最差用户”指在某个子载波或某配对子载波集合上,较其他服务用户接收信噪比最低的用户;此处“配对子载波集合”指两个或多个子载波配对合并组成的集合。在不考虑信道估计时延和量化误差的假设前提下,基站可以事先估计出用户采用子载波最大比合并方法接收所能获得的信道容量,并以其最差用户的信道容量来决定发送速率。以子载波1和子载波2进行协作合并为例,最大比合并前的多播发射速率 $R_1$ 为两子载波上的多播速率之和,即 $R_1=3\times 2+3\times 1=9$  bit/s,最大比合并后的多播总发射速率 $R_2=3\times 4.2479=12.7437$  bit/s,其中4.2479 bit/s是用户3(合并后的“最差用户”)对应的发射速率。

通过对比( $R_2>R_1$ ),可以看出子载波合并是可以带来性能提升的。考虑到两个以上的子载波合并可能会获得更好的性能增益,且不同子载波合并带来的性能增益也会不同,故需要优化子载波配对方案,来提升总体性能。同时在总功率一定的条件下,子载波间的功率分配也是要考虑的问题。

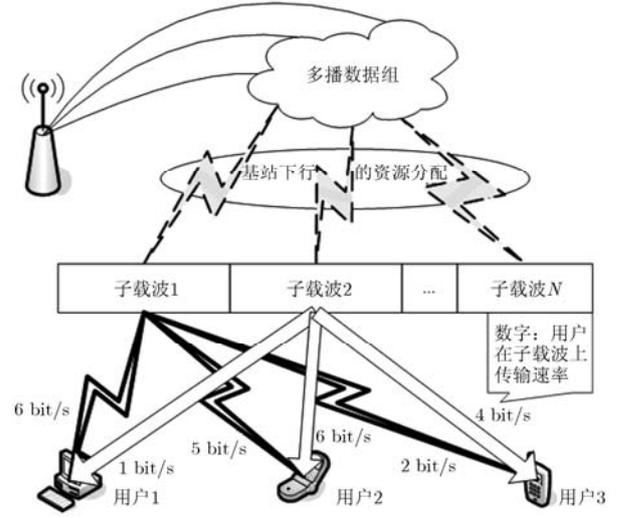


图1 多播系统中子载波合并示意图

我们将两个或多个子载波配对合并组成的集合称为一个配对子载波集合,第 $g$ 个配对子载波集合设为 $S_g$ , $|S_g|$ 代表 $S_g$ 中的子载波个数。 $G$ 代表配对子载波集合的总个数,则有 $\sum |S_g| = N$ 。本文所讨论的基于子载波合并的多播资源调度问题描述为:在总功率和带宽(子载波个数)一定的情况下,找寻最优的子载波配对优化方案和功率分配优化方案,实现最大化接收信噪比最低的用户传输速率的目标,即最大化多播系统容量,其数学模型可建立一个多变量非线性混合整数优化问题,具体如下:

$$C = \max_{\alpha_{n,g}, P_n \in \mathbb{R}^+} \sum_{g=1}^N \min_k \Delta f \log_2 \left( 1 + \sum_{n=1}^N \alpha_{n,g} \text{SNR}_{k,n} \right) \quad (1)$$

限制条件为

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^N P_n &= P, k = 1, 2, \dots, K; P_n \geq 0, n = 1, 2, \dots, N \\ \alpha_{n,g} &\in \{0, 1\}, \forall n \in \{1, 2, \dots, N\}, \forall g \in \{1, 2, \dots, N\} \\ \alpha_{n,g} + \alpha_{n,l} &\leq 1, g \neq l, \forall n \in \{1, 2, \dots, N\} \end{aligned}$$

其中 $\alpha_{n,g}$ 表示第 $n$ 个子载波是否划分到第 $g$ 个配对子载波集合的标识; $P_n$ 表示第 $n$ 个子载波上的功率; $\Delta f$ 为子载波间隔; $\text{SNR}_{k,n} = P_n |h_{k,n}| / \sigma^2$ 表示第 $k$ 个用户在第 $n$ 个子载波上的接收信噪比; $h_{k,n}$ 表示第 $k$ 个用户在第 $n$ 个子载波上的信道响应系数; $\sigma^2$ 表示高斯白噪声的平均功率。

## 3 基于子载波合并的两步法多播资源调度方案

在式(1)描述的多播资源调度问题中,仅子载波调度问题的最优遍历解法的复杂度就达到了 $O(N!)$ ,加之整体优化又是一个最大化最小问题,因而针对该问题采用最优的遍历法求解,复杂度会

非常高。考虑子载波调度与功率分配问题联合优化的复杂性,本文采用复杂度较低的次优的贪婪算法,将问题分解为子载波配对和功率分配两个步骤:

(1)先假设子载波功率均分,完成子载波配对的优化问题;

(2)在此基础上,继续完成功率分配优化问题。

### 3.1 子载波配对优化算法

假设子载波间功率均分,即  $P_n = P/N, \forall n$ , 以最大化多播系统总体容量为目标,此时子载波配对的优化模型为

$$C = \max_{\alpha_{n,g}, P_n \in R^+} \sum_{g=1}^N \Delta f \log_2 \left( 1 + \min_k \sum_{n=1}^N \alpha_{n,g} \frac{P |h_{k,n}|}{N\sigma^2} \right) \quad (2)$$

首先针对两个子载波配对情况,任意两个子载波  $n$  和  $m$ , 其上的最差用户分别为  $k_i$  和  $k_j$ ; 采用最大比合并后,最差用户变为  $k_x$ , 系统容量增益为

$$\begin{aligned} \Delta^{n,m} &= R_2^{n,m} - R_1^{n,m} \\ &= \Delta f \cdot \log_2 \left[ \frac{1 + \text{SNR}_{k_x,n} + \text{SNR}_{k_x,m}}{(1 + \text{SNR}_{k_i,n})(1 + \text{SNR}_{k_j,m})} \right] \quad (3) \end{aligned}$$

只有当子载波合并增益为  $\Delta^{n,m}$  大于零时,两个子载波合并才有意义,由此得出合并的条件为

$$\begin{aligned} \frac{1 + \text{SNR}_{k_x,n} + \text{SNR}_{k_x,m}}{(1 + \text{SNR}_{k_i,n})(1 + \text{SNR}_{k_j,m})} &> 1 \\ \Leftrightarrow (\text{SNR}_{k_x,n} - \text{SNR}_{k_i,n}) + (\text{SNR}_{k_x,m} - \text{SNR}_{k_j,m}) &> \text{SNR}_{k_i,n} \cdot \text{SNR}_{k_j,m} > 0 \quad (4) \end{aligned}$$

通过式(4)可以发现,如果某一用户在两个子载波上都是最差用户,那么这两个子载波的合并增益就一定为负。因此,在两个子载波合并的情况下,最差用户相同的子载波不必进行载波配对尝试,从而减小配对复杂度。现在将两个子载波合并的性质,扩展到  $N$  个子载波配对的情况下,得出如下推论:

(1)如果某用户在  $N$  个子载波中的任意一个接收信噪比与其他用户相比都是最低的,即这  $N$  个子载波上的最差用户都相同,若将这些子载波合并,不仅不会带来系统性能增益,反而会造成性能下降。

(2)对于贪婪算法,如果原配对子载波集合对应的最差用户在所要加入新子载波上的接收信噪比,较其他用户亦是最低,即原配对子载波集合的最差用户与新加入子载波上的最差用户相同,那么此次合并增益一定为负,此次配对尝试没有意义。

基于此,本文提出一种子载波分组方案,提前将子载波按对应最差用户分成不同的子载波分组(整个子载波集合被划分为对应  $K$  个不同用户的  $K$  个子载波分组),配对尝试时只选取对应不同最差用户的子载波分组内的子载波进行配对。

进行多轮子载波贪婪配对时,选定某一个配对子载波集合,从剩余的,且去除了该配对集合的“最差用户”所对应的子载波分组后的,子载波集合中找出一个能与该配对子载波集合合并后容量增益最大的子载波;若最大增益大于零,则将此子载波加入该配对集合。之后,进入下一轮子载波贪婪配对。

综合子载波配对的分组简化方法,结合贪婪算法给出本文详细的子载波配对步骤:

(1)初始化:令所有子载波集合为  $\Phi$ , 配对子载波集合编号  $g=1$ , 总的配对子载波集合数目  $G=0$ , 令以用户  $k$  为最差用户的子载波分组为  $\Psi_k, k = \{1, \dots, K\}$ , 即用户  $k$  在  $\Psi_k$  中任一子载波上的接收信噪比较其他服务用户最低;

(2)配对子载波集合初始化:从集合  $\Phi$  中任选一个子载波  $C_\phi$  作为每一轮子载波配对的初始值;设子载波  $C_\phi$  上的最差用户编号为  $k_{C_\phi}$ , 则以用户  $k_{C_\phi}$  为最差用户的子载波分组为  $\Psi_{k_{C_\phi}}$ , 将子载波  $C_\phi$  从  $\Psi_{k_{C_\phi}}$  和  $\Phi$  中去除,即  $\Psi_{k_{C_\phi}} = \Psi_{k_{C_\phi}} - \{C_\phi\}, \Phi = \Phi - \{C_\phi\}$ , 表示将会从子载波总集合余下的子载波中任意选取来进行子载波配对;初始化本轮配对子载波集合为  $S_g = \{C_\phi\}$  (其合并增益  $\Delta = 0$ ), 设配对子载波集合  $S_g$  中所有子载波合并后的最差用户为  $k_{S_g}$ , 以用户  $k_{S_g}$  为最差用户的子载波分组记为  $\Psi_{k_{S_g}}$ , 此时就有  $\Psi_{k_{S_g}} = \Psi_{k_{C_\phi}}$ ;

(3)可尝试配对的子载波选择:由上述子载波合并推论  $b$ , 令集合  $\Theta = \Phi - \Psi_{k_{S_g}}$  为可尝试配对的子载波集合,如果  $\Theta \neq \emptyset$ , 即不为空集,则继续步骤(4);否则结束循环,并将剩余的子载波集合  $\Phi$  中的  $|\Phi|$  个子载波各自单独化为  $|\Phi|$  个配对子载波集合,得到  $|\Phi|$  个  $S_g, g = g + |\Phi|$ ;

(4)子载波配对尝试:

(a)从可尝试配对的子载波集合  $\Theta$  中任取一个子载波  $C_\theta$ , 并将其从  $\Theta$  去除,即  $\Theta = \Theta - \{C_\theta\}$ , 得到新的可尝试配对子载波集合;令临时配对子载波集合  $\text{buf} = S_g \cup \{C_\theta\}$ , 其子载波合并增益为  $\Delta^{\text{bf}}$ ;

(b)如果  $\Delta^{\text{bf}} > \Delta$ , 记录会带来合并增益的备选子载波,并动态更新增益最大者,  $C_{\text{in}} = C_\theta, \Delta = \Delta^{\text{bf}}$ ;

(c)如果  $\Theta \neq \emptyset$ , 可尝试配对的子载波集合不为空,则跳转至步骤(a), 否则跳转至步骤(5);

(5)配对子载波集合更新:如果  $\Delta > 0$ , 子载波  $C_{\text{in}}$  从其所在的子载波分组  $\Psi_{k_{C_{\text{in}}}}$  和  $\Phi$  中去除,得到新的配对子载波集合  $S_g = S_g \cup \{C_{\text{in}}\}$ , 并更新  $S_g$  上的最差用户  $k_{S_g}$ , 并跳转到步骤(6);否则记录  $S_g, g = g + 1$ , 子载波总集合中重新选择子载波,进行新一轮配对,跳转至步骤(2);

(6)如果  $\Phi \neq \emptyset$ , 跳转至步骤(3), 否则结束循环, 子载波总集合没有剩余子载波, 并记录  $S_g, g = g + 1$ ;

最后, 所得到的  $G = g$  个载波配对子载波集合  $S_g$ , 即为所需的子载波配对的结果, 且满足  $\bigcup_{g=1}^G S_g = \Phi$ 。

对于子载波配对优化问题, 如果采用最优遍历算法进行求解, 问题可以抽象为  $N$  个可区分球(子载波)放入  $N$  个不可区分的盒子(配对子载波集合)里, 并允许有空盒子的数学分装问题, 其复杂度为  $\sum_{n=1}^N 1/n! \sum_{i=0}^n (-1)^i C_n^i (n-i)^N$ 。在本文所提出的子载波分组算法中, 若  $N$  个子载波按最差用户被分为  $T$  组, 复杂度减少约为  $O((N/T)^2)$ 。特别地, 当  $T$  为 1 的时候, 即所有子载波上最差用户都相同, 此时配对算法已经不能带来性能的提升, 也就没有必要进行配对, 此时子载波分组所能带来的复杂度的减少量为最大, 为  $O(N^2)$ 。可以看出, 子载波分组所能带来的复杂度的减少的实质, 就是减少那些不能带来性能增益的无效配对尝试。

本文提出的子载波配对优化算法, 相比文献[15]能够较大地降低子载波配对的复杂度, 但也有子载波配对类算法固有的局限性, 即当多播系统中所有用户均具有高接收信噪比时, 算法增益较小。这主要由于本文引入的最大比合并方法, 是利用子载波合并带来的子载波“分集”增益, 而未做合并前则体现子载波“复用”增益。在信道条件较好(高信噪比)时, “复用”获得的增益较大。虽然, 本文在子载波“分集”和“复用”间做了自适应的选择, 使得性能始终比单独一种方法要好; 但当“复用”从统计意义上, 始终要好于“分集”时, 所提的算法对多播系统容量增加较小。故在高信噪比时, 本文算法的复杂度相对较低信噪比时没有减少, 而带来的性能提升量却下降明显。

### 3.2 子载波功率分配优化算法

在子载波配对优化完成的基础上, 以最大化多播总容量为目标, 子载波间功率分配的优化模型为

$$C = \max_{P_n \in R^+} \sum_{g=1}^G \min_k \Delta f \log_2 \left( 1 + \sum_{n=1}^{N_g} \frac{P_n |h_{k,n}|}{\sigma^2} \right) \quad (5)$$

式中所用参数物理意义与系统模型中所述相同。将第  $k$  个用户在第  $g$  个配对子载波集合的等效接收信噪比改写为矩阵形式为

$$\begin{aligned} \text{SNR}_{k,g} &= \sum_{n=1}^{N_g} \frac{P_n |h_{k,n}|}{\sigma^2} = P_g \mathbf{V}_g^T \mathbf{H}_{k,g} \\ &= P_g \left[ \frac{P_{1g}}{P_g}, \dots, \frac{P_{N_g}}{P_g} \right] \left[ |h_{k,1}|, \dots, |h_{k,N_g}| \right]^T \end{aligned} \quad (6)$$

式中  $P_g$  表示第  $g$  个配对子载波集合中所有子载波上的总功率;  $\mathbf{V}_g$  表示第  $g$  个配对子载波集合中的子载波间的功率分配矢量;  $\mathbf{H}_{k,g}$  表示第  $k$  个用户在第  $g$  个配对子载波集合中各子载波上的信道矢量。通过式(6)可知, 配对子载波集合内的最差用户, 由集合内的各个子载波功率的相对大小确定, 而与集合总功率无关, 即  $\{P_g\}$  的分配关系不影响  $\{\mathbf{V}_g\}$  的确定; 而  $\{P_g\}$  的优化过程要受到  $\{\mathbf{V}_g\}$  的影响。式(5)可改为

$$C = \max_{P_g \in R^+} \sum_{g=1}^G \Delta f \log_2 \left( 1 + P_g \max_{\mathbf{V}_g \in R_1^+ \times N_g} \min_k \mathbf{V}_g^T \mathbf{H}_{k,g} \right) \quad (7)$$

故上述功率分配问题, 可分解为: 先完成各个配对子载波集合内的功率比例分配  $\{\mathbf{V}_g\}$  子问题; 再在此基础上, 完成配对子载波集合间的功率分配  $\{P_g\}$  子问题。两个子问题具体实现如下:

(1)配对子载波集合内功率分配 对于第  $g$  个配对子载波集合, 其配对子载波集合内功率分配问题的优化模型如式(8)所示, 其中  $H_g$  为第  $g$  个配对子载波集合的等效信道增益。

$$\left. \begin{aligned} H_g &= \max_{\mathbf{V}_g \in R_1^+ \times N_g} \min_k \mathbf{V}_g^T \mathbf{H}_{k,g} \\ \sum_{n_g=1}^{N_g} v_{n_g} &= 1, v_{n_g} = P_{n_g}/P_g \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

此问题是一个线性凸优化问题, 可以采用各种成熟的凸优化方法来解决, 在此不再赘述。

(2)配对子载波集合间功率分配 在配对子载波集合内功率分配完成的基础上, 配对子载波集合内的所有子载波作为一个整体参与子载波对间的功率分配, 其优化模型如式(9):

$$\left. \begin{aligned} \max_{P_g \in R^+} \sum_{g=1}^G \Delta f \log_2 (1 + P_g H_g) \\ \sum_{g=1}^G P_g &= P \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

利用拉格朗日极值法, 可以求得各个配对子载波集合上的最优功率分配结果。

$$P_g = P \cdot \left[ \frac{\sum_{g=1}^G \frac{1}{H_g} + 1}{G} - \frac{1}{H_g} \right]^+ \quad (10)$$

功率分配算法中, 我们将整个子载波间功率分配过程, 分解为配对子载波集合内的功率分配和配对子载波集合间的功率分配。对于只有两个子载波的配对子载波集合, 集合(对)内功分的复杂度约为  $C_K^2$ ; 对于有多个子载波的配对子载波集合, 复杂度与具体的凸优化方法有关。配对子载波集合间的功率分配采用了注水算法[16], 子载波配对后得到  $G$  个配对子载波集合, 注水算法的复杂度为  $O(G)$ 。

## 4 仿真结果分析

### 4.1 仿真模型

在仿真中,我们考虑的是典型的多播 OFDM 系统场景,小区内有多用户同时订阅了某一多播业务,并假设各自的信道状态信息通过上行链路完美反馈给基站。在系统场景设置中,采用与文献[15]相似的系统参数配置,即存在路径损耗和多径瑞利衰落的频率选择性信道。仿真结果由 10000 次信道实现平均得到。具体的仿真参数如表 1。

表 1 仿真场景配置

主要参数	具体配置
小区半径	500 m
用户分布	均匀分布
路径损耗	$35 \times \lg(d) + 40$
系统带宽	1 MHz
子载波数	20
多径数目	6
发射总功率	1 W
噪声单边功率谱密度	-90 dBW/Hz

### 4.2 子载波配对优化算法仿真分析

图 2 对比了本文提出的子载波配对优化算法与文献[15]所提算法的系统总体频谱效率;为了与文献[15]最多两个子载波合并的方案对比,此处本文算法也采用最大子载波合并数为 2 的设定。

由图 2 可以看到,随着用户数的增多,3 种算法系统总体频谱效率均有提升。传统多播的系统总体频谱效率随用户数增加,迅速达到了一个平台;而本文和文献[15]中的算法则有一个近似斜线的增长趋势,且本文算法曲线更陡。这是因为,本文所采用的最大比合并方法要优于文献[15]所采用的选择比合并方法,但是也带来了比后者更高的复杂度。

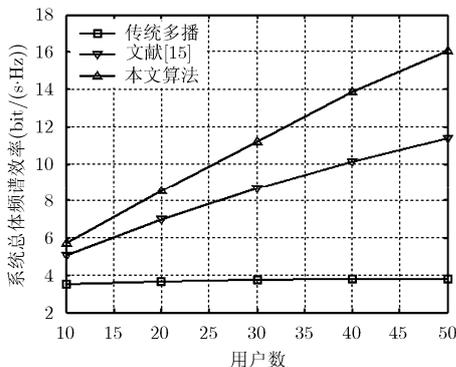


图 2 不同方案的系统频谱效率对比

图 3 对比了本文算法在用户数为 30 时,不同最大子载波合并数设定下的系统总体频谱效率。最大子载波合并数目较大的方案,在低 SNR 下确实有较好的性能;可是随着 SNR 的增加,就逐渐呈现出现劣势。虽然从最优遍历方案上来讲,最大子载波合并数目越大,其性能就会越好;但由于本文算法采用了复杂度较低的贪婪算法,使得结果有所不同。首先,从复杂度上讲,不同的最大子载波合并数目的贪婪配对方案复杂度都为  $O(N^2)$ ,而最优遍历算法的复杂度则是随着最大子载波合并数目增加而增加的。其次,从贪婪算法的机制上讲,贪婪算法是一种只考虑到“眼前”最优的次优方案,当一个子载波和某几个子载波合并后,也就丧失了与可能获得更好性能的,较低阶的子载波配对的尝试机会。

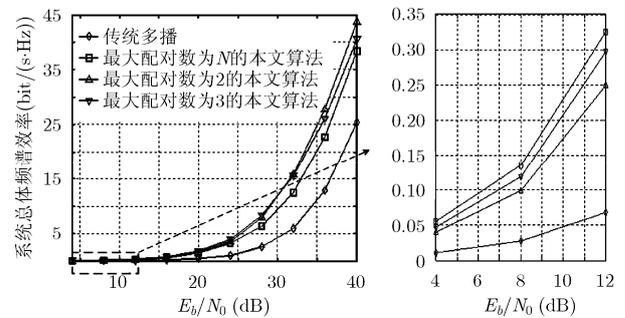


图 3 不同最大合并数设定下的性能对比

### 4.3 子载波配对优化算法和功率分配优化算法的总体性能仿真分析

图 4 对比了在最大子载波合并数为 2 时,所提出子载波配对优化方案 and 不同的功率分配优化方案间的组合总体的算法性能表现。与传统多播结合功率分配的方案相比,本文提出的子载波配对优化和不同功率分配优化的组合方案均有不同程度上的性能提升。图 4 中还给出了进行子载波配对的同时结合对内功率分配和对间注水的方案,此方案复杂度极高,因为此时功率分配方案复杂度与子载波配对优化算法复杂度是一个乘性叠加的关系,但其性能相比于本文提出的子载波配对后再进行功率分配的加性方案,仅有略微的提升;高复杂度的付出,并没有带来良好的性能提升。故实际应用中,可以采用复杂度合理且性能良好的折中方案。

## 5 结束语

本文提出了一种低复杂度的基于子载波合并的无线资源调度算法,该算法采用了子载波配对和功率分配的两步次优解法;在子载波配对算法中,根

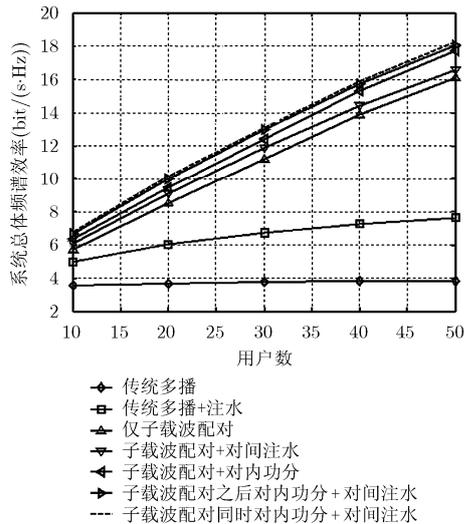


图4 不同的子载波配对和功率分配的组合方案之间的性能对比

据子载波合并特性，提出了一种避免子载波无效配对尝试的简化算法；同时在不影响性能的前提下，将功率分配问题分解为依次的配对子载波集合内的功率比例分配和配对子载波集合间的功率分配两个子过程。仿真结果表明，与现有方案相比，所提方案在复杂度较低的情况下，能较好地提升系统性能。

### 参考文献

- [1] Jean-Marie Vella and Saviour Zammit. A survey of multicasting over wireless access networks[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2013, 15(2): 718-753.
- [2] Gruber M and Zeller D. Multimedia broadcast multicast service: new transmission schemes and related challenges[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2011, 49(12): 176-181
- [3] Lecompte D and Gabin F. Evolved multimedia broadcast/multicast service in LTE-advanced: overview and Rel-11 enhancements[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2012, 50(11): 68-74.
- [4] Suh C and Mo J. Resource allocation for multicast services in multicarrier wireless communications[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(1): 27-31.
- [5] Sidiropoulos N D, Davidson T D, and Luo Z Q. Transmit beam-forming for physical-layer multicasting[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2006, 54(6): 2239-2251.
- [6] Kam C, Kompella S, Nguyen G D, et al. Wireless multicast with cooperative relaying[C]. Military Communications Conference, Orlando, 2012: 1-6.
- [7] Xu W, Niu K, Lin J, et al. Resource allocation in multicast OFDM systems: lower/upper bounds and suboptimal algorithm[J]. *IEEE Communications Letters*, 2011, 15(7): 722-724.
- [8] Chen L, Wang X, and He G. A layered-based resource allocation algorithm for multicast services in OFDMA system[C]. IEEE International Conference on Communications (ICC), Nanjing, 2012: 5493-5497.
- [9] Afolabi R O, Dadlani A, and Kim Kiseon. Multicast scheduling and resource allocation algorithms for OFDMA-based systems: a survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2013, 15(1): 240-254.
- [10] Liu J, Chen W, Cao Z, et al. Dynamic power and sub-carrier allocation for OFDMA-based wireless multicast systems[C]. IEEE International Conference on Communications, Beijing, 2008: 2607-2611.
- [11] Tan C, Chuah T, and Tan S. Adaptive multicast scheme for OFDMA based multicast wireless systems[J]. *Electronics Letters*, 2011, 47(9): 570-572.
- [12] Won H, Cai H, Guo K, et al. Multicast scheduling in cellular data networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(9): 4540-4549.
- [13] Low Tze-ping, Hong Y W P, and Kuo C C J. Opportunistic multicast scheduling with multiple multicast groups[C]. IEEE Global Telecommunications Conference, Houston, 2011: 1-5.
- [14] Shrestha N, Saengudomlert P, and Ji Y. Dynamic subcarrier allocation with transmit diversity for OFDMA-based wireless multicast transmissions[C]. IEEE Telecommunications and Information Technology, Chaing Mai, 2010: 410-414.
- [15] Li M, Wang X, Zhang H, et al. Resource Allocation with subcarrier cooperation in OFDM-based wireless multicast system[C]. IEEE Vehiculatt Technology Conference, Budapest, 2011: 1-5.
- [16] Jang J and Lee K B. Transmit power adaptation for multiuser OFDM systems[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2003, 21(2): 171-178.

王凡森：男，1988年生，硕士生，研究方向为无线多播系统资源调度相关技术。

赵拯：男，1990年生，硕士生，研究方向为无线通信系统大规模MIMO、微微小区信道估计技术等。

陈志刚：男，1977年生，讲师，主要从事宽带无线通信信号处理、如高速移动环境下OFDM系统信道均衡、异构网小区间干扰抑制、软件无线电平台开发等研究。