

一种 OFDM 系统动态子载波比特和功率分配联合算法

高欢芹, 鄞广增, 朱琦

(南京邮电大学通信与信息工程学院, 南京 210003)

[摘要] 提出一种多用户 OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) 系统下行链路, 具有信道变化实时性的动态子载波、比特和功率分配联合算法 (UA), 在满足各个用户数据速率和 BER 要求的同时使总的发送功率最小。提出的算法与动态子载波分配算法 (WSA) 相比, 计算复杂度相当, 在移动信道环境下仿真结果表明性能有一定的改善。

[关键词] OFDM; 动态子载波分配算法 (WSA); 联合子载波比特和功率分配算法 (UA)

[中图分类号] TN929.5 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742 (2006) 03-0062-04

1 引言

在多用户 OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) 系统中, 不同用户的衰落参数是相互独立的, 对于某一用户来讲是深衰落的子载波对于其他用户来讲不一定也是深衰落的, 某个子载波对于所有用户都是深衰落的情况出现的概率非常小。因此, 如何为每个用户分配系统的子载波, 进而在所分得的子载波上分配比特和发送功率成了研究热点。根据各个用户对于各个子载波的瞬时信道信息, 为每个用户自适应地分配子载波、比特和功率能够充分利用宝贵的系统资源。

文献 [1] 讨论了子载波分配问题的最优方案, 放松对整数变量的要求, 假设变量可以为任意实数, 这样所得到的最优解在实际中并不实用, 而且计算复杂度很高, 因此, 提出一些具有实用性的子载波分配算法。文献 [2] 提出的子载波分配算法具有实用性, 并且仿真结果表明其性能接近最优方案。在此算法中, 为每个用户分配的子载波个数假定是事先给定的, 为定值, 然后在分配好的子载波上进行比特和功率分配。而实际中移动信道快速变

化, 为了降低计算复杂度, 为每个用户分配固定数目的子载波并不是一个理想的方案, 根据瞬时信道情况, 对子载波个数和比特个数及功率联合进行自适应分配, 将进一步降低所需的发送功率。

笔者主要研究多用户 OFDM 系统下行链路传输中一种动态的子载波、比特和功率分配联合算法。假设基站知道所有用户对应于所有子载波的信道增益, 在满足每个用户的数据速率和系统误比特率的条件下使总的发送功率最小。联合算法进行子载波、比特和功率分配, 在分配过程中, 每个用户所使用的子载波序号以及所使用的子载波个数根据信道情况进行自适应调整, 在满足各个用户数据速率要求的条件下, 每个子载波上承载的比特个数与所需发送功率也进行相应的调整。与动态子载波分配方案算法 (WSA) 相比, 性能有一定改善, 计算复杂度相当。

2 系统模型

采用 TDD 方式的多用户 OFDM 系统, 基站根据上行传输链路中的信息估计所有用户的瞬时信道信息, 根据所有用户的瞬时信道信息通过某种优化

[收稿日期] 2004-12-29; **修回日期** 2005-03-02

[基金项目] 江苏省高校自然科学基金计划资助项目 (05KJB510090)

[作者简介] 高欢芹 (1980-), 女, 江苏淮安市人, 南京邮电大学助教, 研究方向为移动通信与无线技术

算法为所有用户的下行传输分配发送功率、子载波和信息比特。传送子载波和比特功率分配信息的控制信令通过一条独立的控制信道来传输。假定信道估计是理想的，所用的系统参数如表 1 所示。

表 1 系统参数

Table 1 System parameter

N	子载波数
K	用户数
h_{nk}	瞬时信道增益
γ	每个 OFDM 符号所含比特数
R_k	每个 OFDM 符号期间第 k 个用户的数据速率
$f_k(\gamma)$	一定的比特错误率条件下所需的接收功率

$\gamma_{nk} \in \{0, 1, 2, \dots, M\}$ 表示第 k 个用户在第 n 个子载波上的比特个数， M 表示每个符号期间每个子载波上能够传输的最大比特数。 γ_{nk} 的数目决定了每个子载波上的自适应调制方式，或者为 BPSK，或者为 QPSK，或者为 xQAM。在频率选择性衰落信道中，不同用户具有不同的信道增益。 $h_k = [h_{1k}, h_{2k}, \dots, h_{Nk}]^T$ 表示第 k 个用户对应于 N 个子载波的信道增益，在一定的比特错误率条件下 f_k 仅是 γ_{nk} 的函数。如果第 k 个用户使用第 n 个子载波，在一定的比特错误率条件下，在每个符号期间第 n 个子载波上传送 γ_{nk} 个比特所需要的发送功率为

$$P_{nk} = f_k(\gamma_{nk})/h_{nk}^2 \quad (1)$$

在多用户 OFDM 系统中，不允许多个用户同时使用同一个子载波，即某个时间内某个子载波只能被某一个用户使用。定义参数

$$\rho_{nk} = \begin{cases} 1, & \text{若 } \gamma_{nk} \neq 0 \\ 0, & \text{若 } \gamma_{nk} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

ρ_{nk} 值为 1 或 0，对于任一个固定的 n ，其和等于 1，意味着某个时刻只有一个用户可以使用第 n 个子载波。所需要的总的发送功率为

$$P_{nk} = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K (f_k(\gamma_{nk})/h_{nk}^2) \rho_{nk} \quad (3)$$

假设每个用户的数据速率为 $\{R_1, R_2, \dots, R_K\}$ 。在一定的 QoS 要求下，使得发送功率最小的子载波、比特和功率分配为

$$\begin{aligned} & \min_{\gamma_{nk}, \rho_{nk}} \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K (f_k(\gamma_{nk})/h_{nk}^2) \rho_{nk}, \\ \text{s.t. } & \sum_{k=1}^K \rho_{nk} = 1, (n = 1, 2, \dots, N), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \rho_{nk} = N, \gamma_{nk} \in \{0, 1, 2, \dots, M\}, \\ & R_k = \sum_{n=1}^N \gamma_{nk}, (k = 1, 2, \dots, K) \quad (4) \end{aligned}$$

3 多用户系统的子载波分配算法

Hungarian 算法^[3]是对多用户系统子载波分配的最优算法，其算法复杂度达到 $O(N^4)$ 。Wong 提出子载波分配的试探 (Heuristic) 算法，称为 WSA (Wong's subcarrier allocation) 算法^[2]，计算复杂度比最优 Hungarian 算法降低了很多，能够很快完成子载波分配，并且性能接近 Hungarian 算法。

3.1 WSA 算法^[2]

WSA 算法是一种动态子载波分配方案，分两步进行，初始分配阶段先根据各用户的信道特性初步给出子载波的分配矩阵 ρ ；迭代逼近阶段通过迭代交换不断地逼近最终结果，以尽可能地减小发送总功率。算法简要描述如下：

Step 1 建设性的初始分配阶段 (CIA, constructive initial assignment) 假设为第 k 个用户所分配的子载波数为 S_k 。

1) 首先根据每个用户对各子载波的信道增益分别按从高到低的顺序排列，将按这种顺序的各子信道序号组成一个 $K \times N$ 矩阵 N_{sort} 。

2) 然后从矩阵 N_{sort} 的第一列子载波序号开始，依次给每个用户分配子载波。如果该子载波还未分配，并且该用户还没得到所需的子载波数，则将此子载波分配给该用户。如果某个子载波在两个用户中的排序相同，则将它分配给信道增益较大的那个用户。

3) 完成一列的分配后转向下一列，直到所有子载波分配完毕，所有 S_k ($k = 1, 2, \dots, K$) 都已经满足，分配过程结束。

Step 2 迭代优化过程 定义功率减小因子

$$P_{ij} = \Delta P_{ij} + \Delta P_{ji} \quad (5)$$

对每一组用户组合 (i, j) , $i, j = 1, 2, \dots, K$, 且 $i \neq j$, ΔP_{ij} 表示暂时分配给用户 i 的子载波重新分配给用户 j 所带来的功率减小量，然后找出使减小量 ΔP_{ij} 最大的那一个子载波 n_{ij} ，由最大的 ΔP_{ij} 与最大的 ΔP_{ji} 形成 P_{ij} 。在所有组合 (i, j) 中，找出功率减小因子最大的那一个 \hat{P}_{ij} ，以及相应的用户 (\hat{i}, \hat{j}) 和子载波 \hat{n}_{ij} 和 \hat{n}_{ji} 。若 $\hat{P}_{ij} > 1$ ，则进行 \hat{n}_{ij} 和 \hat{n}_{ji} 子载波在用户 (\hat{i}, \hat{j}) 之间交换，

即将原先分配给用户 i 的子载波 \hat{n}_{ij} 分配给用户 j ，而原先分配给用户 j 的子载波 \hat{n}_{ji} 分配给用户 i 。交换后，更新功率减小因子 $\{P_{ij}\}$ 并进行下一步迭代。直到所有的功率减小因子均小于 0，说明系统总功率已不能再减小，结束分配。

WSA 算法的 Step 1 中计算复杂度为 $O(KN \lg N)$ ；Step 2 中的主要计算量为计算功率减小因子，计算复杂度为 $O(C_2^k (N/K)^2) \approx O(N^2)$ ，总的复杂度为 $O(KN \lg N + N^2)$ 。

3.2 UA 算法 (联合子载波比特功率分配算法)

WSA 算法中每个用户所用的子载波序号是根据移动信道的变化来自适应调整的，但是每个用户所用的子载波个数 S_k 是固定的。如果在分配过程中，在满足各个用户数据速率要求的条件下， S_k 值也能够根据信道情况进行自适应调整，一步减小所需的总发送总功率。假设以帧为单位，每帧中对每个用户所使用的子载波序号以及所使用的子载波的个数进行调整，则在不同帧中同一个用户所用的子载波序号可能是不同的，所用的子载波的个数也可能是变化的。此算法简称为 UA 算法。

根据图 1，UA 算法的 Step 1 中，根据每个用户所需的数据速率为每个用户分配一定的子载波数。例如有 3 个用户、8 个子载波的系统，每个用户的数据速率为 $R_1 : R_2 : R_3 = 3 : 2 : 3$ ，可以初始化，令 $(S_1, S_2, S_3) = (3, 2, 3)$ 。UA 算法中增加了一个功率减小因子 P'_{ij} 。在 Step 1 (CIA 阶段) 中分配给用户 i 的某个子载波在 Step 2 (迭代优化过程) 中重新分配给用户 j (而不是 2 个用户相互交换子载波)，与 Step 1 子载波分配后的结果相比，用户 j 所用的子载波多了一个，而用户 i 所用的子载波少了一个，同时还必须满足每个用户的数据速率 $\{R_i, R_j\}$ ，用户 i 和 j 所用的子载波上的比特和功率必须进行重新分配，见表 2。在重新分配时，在用户 i 所使用的信道增益最大的子载波上增加传输比特，在用户 j 所用的信道增益最小的子载波上减少传输比特。

用户 k 需要的数据速率为 R_k ，所使用的子载波数为 S_k ，所需的发送功率为 $P(S_k)$ 。对于任意一组用户 (i, j) ，定义由于再分配带来的功率减小因子为：

$$P'_{ij} = \Delta P'_{ij} + \Delta P'_{ji} \quad (6)$$

$$\Delta P'_{ij} = P(S_i) - P(S_i - 1) \quad (7)$$

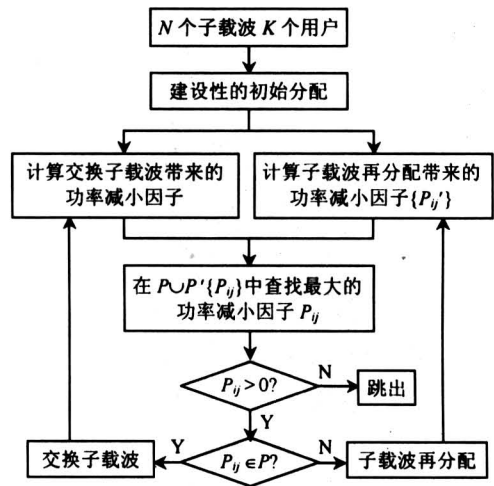


图 1 UA 算法框图

Fig.1 The block diagram of the UA algorithm

表 2 子载波再分配前后情况

Table 2 The situation of before subcarriers reallocated and after reallocated

	i 所用的子载波 (按照信道增益由大到小) 及对应的传 递比特数					j 所用的子载波 (按照信道增益由大到小) 及对应的传 递比特数				
再分配前后	S_{i1}	S_{i2}	S_{i3}	S_{i4}	S_{i5}	S_{j1}	S_{j2}	S_{j3}	S_{j4}	S_{j5}
再分配前	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
再分配后	4	2	2	2		2	2	2	2	1 1

$$\Delta P'_{ij} = P(S_i) - P(S_i + 1) \quad (8)$$

由于增加了一个功率减小因子，完整的功率减小因子变为

$$P_r = P \cup P' = \left\{ P_{12}, P_{13}, \dots, P_{21}, \dots, P_{ij}, \dots \right\} \cup \left\{ P'_{12}, P'_{13}, \dots, P'_{21}, \dots, P'_{ij}, \dots \right\} \quad (9)$$

$$P = \{P_{12}, P_{13}, \dots, P_{ij}, \dots\},$$

$$P' = \{P'_{12}, P'_{13}, \dots, P'_{21}, \dots, P'_{ij}, \dots\},$$

在 P_r 中选择最大的 P_{ij} ，如果最大值 P_{ij} 属于集合 P ，且为正，则在用户 i 与 j 之间进行子载波交换；如果最大值 P_{ij} 属于集合 P' ，且为正，则将对应的原先分配给用户 i 的某个子载波重新分配给用户 j 并且对 2 个用户的子载波上的传输比特和功率进行重新分配；子载波交换或者再分配完成以后更新功率减小因子。重复上述过程直到所有的功率减小因子均为负值，总的发送功率无法再减小了。

UA 算法中由于引进了一个新的功率减小因子，使计算量增大，增加的计算量主要取决于每次迭代中需要重新分配的子载波数。增加的计算量为 $O(2C_2^k N/K) \approx O(NK)$ ，总的计算量为 $O(KN \lg N + N^2 + NK) \approx O(KN \lg N + N^2)$ ，与 WSA 算法的计算量相当。

4 仿真结果

仿真采用 ITU - R M.1225^[4] 中提出的 Vehicular Test A 模型为移动信道模型。总的子载波个数 256，总的传输比特速率 768 b/symbol，每个子载波上所能允许传输的最大比特数为 8 b。假定信道估计是理想的，每个用户的数据速率要求都相同，系统中未采用信道编码技术。

图 2 为系统有 2 个用户时两种算法对应的误比特率 BER 和平均比特信噪比 SNR 关系曲线。WSA 算法中，每个用户在各自分得的子载波上采用自适应比特、功率分配算法。从图 2 中可以看出，为达到相同 BER，采用 UA 算法与采用 WSA 算法相比，可以节省平均比特信噪比 2 dB 左右。

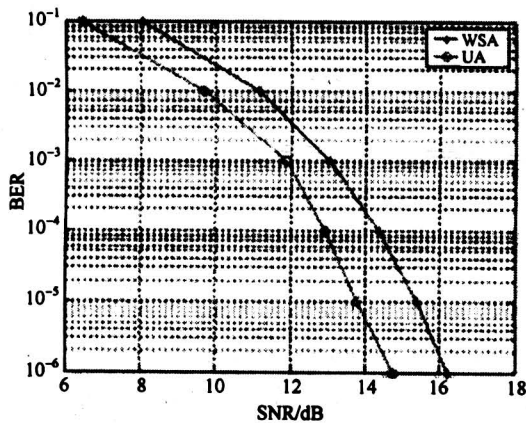


图 2 平均比特信噪比与 BER 的关系

Fig.2 Performance of BER with average SNR

图 3 为系统中所有用户为达到 $p_e = 10^{-4}$ 的误比特率性能的前提下，采用 WSA 算法和 UA 算法所需平均比特 SNR 与系统中用户数的关系曲线。可以看出，采用两种算法所需平均比特 SNR 随着用户数的增加而下降，这是因为，系统中的用户数越大，即参与分配的用户越多，一个子载波作为良好子载波而被利用的概率也就越大，从而节省总的发送功率；同时 UA 算法比 WSA 算法所能节省的平均比特信噪比也随着用户数的增加而有所增大，2

个用户的系统，节省的平均比特信噪比多于 1 dB，8 个用户的系统，节省的平均比特信噪比已经大于 2.5 dB；可见，随着用户数目的增加，UA 算法的优越性体现得越明显。

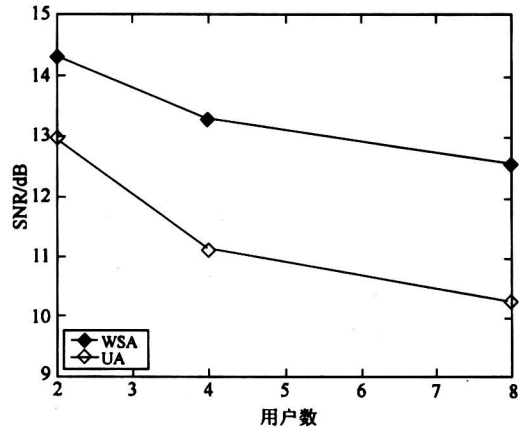


图 3 用户数与所需平均比特 SNR 的关系

Fig.3 Performance of average SNR with number of users

5 结论

提出了一种具有实时性的子载波、比特和功率分配算法 (UA)，能够对付信道的瞬时变化。该算法对子载波、比特和功率进行联合分配与动态子载波分配算法 (WSA) 相比，计算复杂度相当，在移动信道环境下仿真结果表明，为达到相同的 BER 能够每比特信噪比节省 2 dB 左右；随着系统用户数目的增加，能够节省的发送功率越多。

参考文献

- [1] Cheong Y W, Cheng R S, Lataief K B, et al. Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit, and power allocation [J]. IEEE J Selected Areas Comm, 1999, 17(Oct): 1747 ~ 1758
- [2] Wong C Y, Tsui C Y, Cheng R S, et al. A realtime sub-carrier allocation scheme for multiple access downlink OFDM transmission [R]. IEEE VTC '99, 1999
- [3] Khun H W. The Hungarian method for the assignment problem [J]. Naval Research Logistics, 1955, (2): 83 ~ 97
- [4] Recommendation ITU - R. M. 1225. Guidelines for Evaluation of Radio Transmission Technologies for IMT - 2000 [S]. Recommendation ITU - R M 1225, 1997

(cont. on p.69)

况，具有环向减锭减纱的优点。整个编织过程中，运动平面上的纱锭数量不减少，不影响机械化编织，且减细的纱锭进入织物内部时，使织物结构单元尺寸变小，从而起到了减小锥体直径的作用。因此，减细纤维束减纱工艺优于减锭减纱工艺。减细纤维束减纱工艺还可与环向减锭减纱工艺进行结合，形成减环减细组合减纱工艺，具有更大的灵活性，满足锥体织物截面变化的要求。

减细纤维束减纱编织的锥体织物单元数不变、结构完整，但编织单元由不同粗细纱束组成，使单元结构构造、尺寸、纤维含量的计算变得较为复

杂，给锥体织物的纱线系统设计、计算、编织质量控制等带来了一系列新的研究内容。

参考文献

- [1] 朱建勋, 蒋云, 等. 三维编织机锭子、轨道及锭结构尺寸的选择[J]. 宇航材料工艺, 1998, (3): 49~53
- [2] Chou T W, Kc F K. Textile Structural Composites[M]. Netherlands, 1989. 129~171
- [3] 朱建勋, 蒋云, 等. 管状三维四向织物编织密度均匀性分析[J]. 宇航材料工艺, 1999, (3): 34~37
- [4] 道德锃, 吴明心, 李兴江. 立体织物与复合材料[M]. 上海: 中国纺织大学出版社, 1999. 62~169

Reducing Fiber Technic for 3D Braiding Hollow Coneshaped Fabric

Zhu Jianxun

(Sinoma Science & Technology Co., Ltd., Nanjing 210012, China)

[Abstract] Reducing-fiber technics of 3D hollow coneshaped fabric braided from big end are researched, including row-directional reducing-fiber technic, annulus-directional reducing-fiber technic, reducing-fiber technic by thinning fiber and combination of these technics. Their effects on fabric structure, operation and mechanisation are analyzed and compared. Reducing-fiber technic by thinning fiber is a kind of special annulus-directional reducing-fiber technic, which may keep structure of fabric complete, make operation simple and make motion of carrier mechanised. However, the unit structure may become complecaled with the change of the dimeter of the fiber bundle.

[Key words] 3D braiding; hollow coneshaped fabric; reducing-fiber technic by reducing carrier; reducing-fiber technic by thinning carrier; unit structure

(cont. from p.65)

United Algorithm for Dynamic Subcarrier, Bit and Power Allocation in OFDM System

Gao Huanqin, Feng Guangzeng, Zhu Qi

(Communication and Information Engineering Institute, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

[Abstract] A realtime united algorithm for dynamic subcarrier, bit and power allocation according to the change of channel (UA) is presented in this paper, which can be used into the down-link of multi-user orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) system. With the algorithm the total transmission power is the minimum while the data rate of each user and the required BER performance can be achieved. Comparing to the subcarrier allocation algorithm (WSA), the simulation results show that the algorithm presented in this paper has better performance while both have equal calculating complexity.

[Key words] OFDM; Wong's subcarrier allocation (WSA); UA