

多用户自适应调制 OFDM 系统的高效子载波分配方案¹

刘 培 葛建华 刘 刚

(西安电子科技大学 ISN 国家重点实验室 西安 710071)

摘 要: 为保证用户的子载波分配的实时高效, 该文给出了一种能够满足和适应未来移动多媒体通信要求的高效频带分配方案. 它是基于自适应调制的 OFDM 系统的. 该方案使用了一种基于贪婪算法的高效算法, 这种算法简单易于理解, 复杂度低, 仿真结果表明其性能优良, 接近于最优解.

关键词: 多媒体通信, 自适应调制, OFDM, 子载波分配

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)06-0871-05

An Efficient Sub-carrier Allocation Scheme for Multiuser OFDM Systems Using Adaptive Modulation

Liu Pei Ge Jian-hua Liu Gang

(National Key Lab. of ISN, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract In this paper, a sub-carrier allocation scheme is proposed for the future multiuser mobile multimedia communication systems, which is based on Orthogonal Frequency Division Multiplexing(OFDM) using adaptive modulation. This scheme uses an algorithm based on a rapacious optimal algorithm. Simulation result shows that this allocation algorithm is close to the optimum at effectiveness and efficiency with much fewer computations.

Key words Multimedia communication, Adaptive modulation, Orthogonal Frequency Division Multiplexing(OFDM), Sub-carrier allocation

1 前言

正交频分复用 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) 技术由于它具有很高的频带利用率和很强的抗多径干扰的能力, 已经被广泛应用于一些大容量的移动通信系统中, 如数字视频广播 (Digital Video Broadcasting, DVB)^[1] 等. 它之所以被选择应用于这些系统, 主要是因为 OFDM 系统可以获得很高的数据传输率, 且当每个载波的功率, 调制方案都分别可控时, OFDM 将允许有很高的频带利用率^[2-6]. 因此在未来的移动多媒体通信系统采用自适应调制的 OFDM 技术已经成为共识, 这样的系统将具有高灵活性和高效率^[7,8], 它将带来以下两个方面的特点: 一是提供了带分的概念, 它可以像时分那样将频带进行灵活的分割, 因此它能够完成高比特率传输和变频带传输, 且仍有可能保持与一般固定带宽传输方式的共性^[9]; 二是在移动信道下 OFDM 具有牢固性, 这是因为在时变和频率选择性信道下, OFDM 在信号分布方面提供了最好的基础.

不过, 在无线多媒体应用中, 多用户 OFDM 也面临着几方面的问题, 主要由于不同用户的信道不同, 要求通信的业务种类和服务质量 (QoS) 也各不相同, 因此, 为了满足不同用户的通信需求, 且保证各自的 QoS 要求, 系统必须根据用户的信道条件和所申请的通信业务种类以及 QoS 要求, 实时有效地分配给各个用户适当的载波数量, 每个 OFDM 符号携带的比特数目即调制方案以及功率等级等参数, 而这些参数都是通过自适应联合分配算法来获得的. 为了保证

¹ 2003-03-10 收到, 2003-06-23 改回

这种分配的实时性和有效性，本文提出了一种高效的分配算法，并对其有效性和效率等方面的性能进行了仿真比较。

2 多用户自适应调制 OFDM 系统

多用户自适应调制 OFDM 系统的基本结构如图 1。在该系统中，假定总共有 K 个用户， N 个载波，在发射端，来自 K 个用户的串行数据被送入载波进行调制。假定所有用户的所有载波的连续信道增益是已知的，则发射端根据每个用户的信道条件和通信要求，利用分配算法决定分配给每个用户的载波数量和在每个载波上的每个 OFDM 符号的比特数，再根据分配的比特数进行自适应调制。设 $b_{k,n}$ 为被分配给第 k 个用户的第 n 个载波的比特数，由于不允许多个用户同时使用同一载波，所以，对于每一个 n ，当 $b_{k,n} \neq 0$ 时，则对于所有的 $k' \in \{1, 2, \dots, K\}$ & $k' \neq k$ 有 $b_{k',n} = 0$ 。同时假定 L 为每个载波在一个 OFDM 符号中发送的最大比特数，则自适应调制器允许 $b_{k,n}$ 取集合 $D = \{0, 1, 2, \dots, L\}$ 中的任意值。

在频率选择性信道中，由于不同的载波经历的信道增益是不同的，为此假定第 k 个用户的第 n 个载波的信道增益的振幅为 $\alpha_{k,n}$ ，所有载波和用户的单边噪声功率谱密度均为 1，且进一步假设当信道增益等于单位值 1 时，在一个载波中要可靠地传送每符号 b 比特的信息所需要的功率为 $f(b)$ ，即每发送符号的能量。可见， $f(b)$ 是依赖于 k 的。因此，不同的用户允许有不同的服务质量 (Quality of Service, QoS) 要求，或者说可以采用不同的编码和调制方案。为了在接收端保证用户所需的 QoS，则分配给第 k 个用户的第 n 个载波的发射功率必须为

$$P_{k,n} = f_k(b_{k,n}) / \alpha_{k,n}^2 \tag{1}$$

因此，载波、比特数以及功率的联合分配算法的目标就是分配给 $b_{k,n}$ 一个最佳值，从而对于给定的用户及其 QoS 要求，使所有用户的载波在总体上发射功率达到最小。

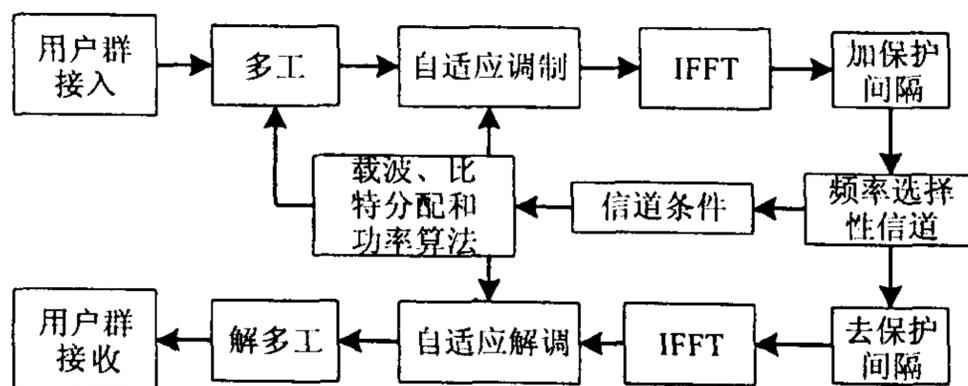


图 1 多用户自适应调制 OFDM 系统框图

3 高效子载波分配算法

以上给出了采用自适应调制时单个用户单载波的发射功率，对于多用户时，载波分配的目标就是在保证任意的第 k 个用户的比特率的条件下为该用户分配载波，约束条件就是总的发射功率为最小，即

$$P_T^* = \min \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N P_{k,n} = \min \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \frac{f_k(b_{k,n})}{\alpha_{k,n}^2}, \quad k \in [1, K], n \in [1, N] \tag{2}$$

可见，这是一个经典的非线性整体规划问题，变量很多，求解是相当困难的。对于这类问题，也曾经有许多文献给出了解决方法，但比较著名的是 Hungar 方法^[10]，它采用贪婪算法获

取最优解,其基本思想是:对于每个用户先给每个子载波分配的比特数都为零,然后对比特一个一个地进行分配,分配条件是费用最小,即总的发射功率增长最小.当最后的条件满足时,最后的分配也就完成了.在这种算法中,由于每次都需要计算满足用户所要求的传输的比特率时功率的增量,并进行比较.当载波数目很大时,其计算复杂度非常高,这在实际应用中,将会导致系统的实现复杂,且性能下降,对于多用户时是很难满足实时性要求的.

为了将以上问题简化,本文给出一种新的求解思路.它首先是将载波进行分类,使具有的比特数为 m 的载波分在一组,记为 D_m , 即 $D_m = \{n : b_n = m\}$, $m \in D$. 这样,对 $n \in D_m$ 且 $m \neq L$, 可定义功率增量:

$$\Delta P_n = [f(m+1) - f(m)]/\alpha_n^2 \quad (3)$$

对 $n \in D_L$, 即对那些已经携带了系统允许的最高比特数的载波,则 ΔP_n 为一个足够大的实数.

由于在集合 D_m 中的比特分配都是一样的,所以如果给这个集合分配一个比特,无疑应当分配给具有最小费用增量的载波,即信道增益最大的载波.因此,如果定义:

对 $n \in D_m$, $n(m) = \max(\alpha_n^2)$, 那么

$$\Delta P_{n(m)} = \min_{n \in D_m} \Delta P_n \quad (4)$$

其中 $\Delta P_{n(m)}$ 表示集合 D_m 增加一个比特所需要的费用即功率增量,与该比特对应的载波为该集合的“队首”.这样比较费用将在小数目集合间进行,费用最少的集合对应的载波将优先分配比特.为了进一步降低得到“队首”序列的时间,在比特分配之前首先按递减的顺序对载波的功率增益排队.由于载波的信道增益与传输的比特数目是成正比的,因此这一过程实际是将信道进行了重新的安排.所以,实际上集合 D_m 最好的载波即为“队首”.该算法的具体步骤如下:

第1步 根据子载波的信道增益、递减排序,得到新的载波信道增益序列 $\{G_j\}_{j=1}^N$, 这里

$$\forall i < j, i, j \in [1, N], \text{ 存在 } G_i \leq G_j;$$

第2步 初始化所有集合的“队首” $J(m)$,

$$J(m) = N_{\text{Null}}, m \in D, J(0) = 1; N_{\text{Null}} = \text{const}, N_{\text{Null}} > N;$$

第3步 对 $J(m) \neq N_{\text{Null}}$, 计算费用 $\Delta P_{J(m)}$, 找到 $n^* = \min_{\substack{m \in D \\ J(m) \neq N}} \Delta P_{J(m)}$;

第4步 更新“队首”, $J(n^*) = J(n^*) + 1, \forall n \leq n^*, J(n^* - n) \neq N_{\text{Null}}, J(n^*) \leq J(n^* - n)$, 否则, $J(n^*) = N_{\text{Null}}$; 若 $n^* < D_L, J(n^* + 1) \equiv N_{\text{Null}}$, 则 $J(n^* + 1) = J(n^* + 1) + 1$;

第5步 若式(2)满足,跳到下一步,否则,转到第3步;

第6步 得到集合: $D_m = \{j : \forall l < m, J(l) \neq N_{\text{Null}}, J(l) \leq j < J(l)\}$.

将以上得到的集合反映射即可得到所需要的载波比特分配.

4 性能比较

4.1 复杂度

在多用户的情况下,对于式(2)进行最优化求解是极其复杂和困难的,因为不允许多个用户同时使用同一载波,这种约束关系使得任何一种贪婪算法都很难获得最优解,而且即使得到最优解,这个最优解也很可能无法将比特分配给最优的载波.因此现在较为常见的方法都是放宽对式(2)的约束条件,将问题转换为最优化问题,再利用 Lagrange 因子法进行求解^[2], 即

在这样的条件下, 采用著名的 Hungar 算法, 其计算复杂度为 $O(n^4)^{[10]}$, 因此, 在载波数量较大时, 计算复杂度是非常高的, 这种载波比特分配算法在未来的多媒体移动通信系统中是无法满足高速信息传输的要求, 更无法根据信道条件的变化进行实时的载波比特分配。

在本文给出的高效载波比特分配算法中, 由于每次分配都需要对所有载波的信道增益的振幅 α_n 进行排队, 为此需要进行 n 次计算; 每次的载波比特分配只在子载波集合之间进行, 最多需要比较 $D_L + 1$ 次, 计算量变为 $O((D_L + 1)^4)$, 所以总的计算量为 $[n + O((D_L + 1)^4)]$, 功率增量的计算与此数量级相同。显然, 与原始的贪婪算法相比, 可以大大降低计算量, 尤其是在载波数目远大于最大调制制度时候, 计算复杂度的降低显得更加突出, 而这一点在实际应用中几乎都是可以满足的。而且此时每个用户都分别在给定的资源中使用最优比特分配, 即对每一用户而言, 都是最优分配, 同时所有用户互不干扰, 从而可得到最优的系统性能。

4.2 动态性能

为了获得该算法在动态条件下的有效性和效率方面的性能, 下面分别将其应用于纯粹的 OFDM 系统——ORG-OFDM(ORiGinal-OFDM, 采用等比特分配方式) 以及 3 种混合多用户 OFDM 系统, 对它们的性能进行仿真。

3 种混合多址方式为

OFDM-TDMA: 每个用户按预定的时隙分配资源, 给定时隙内, 某一用户独占载波资源。

OFDM-FDMA: 每个用户预分配频带资源, 在每个符号周期这些用户独占指定频带。

Inter-OFDM-FDMA: 本质上和上一种一致, 只是频域分配采用了交织的方法, 以减少同一用户相邻信道间的强相关性。

3 种混合多址方式的时频方案如图 2, 此时假定用户数为 3。

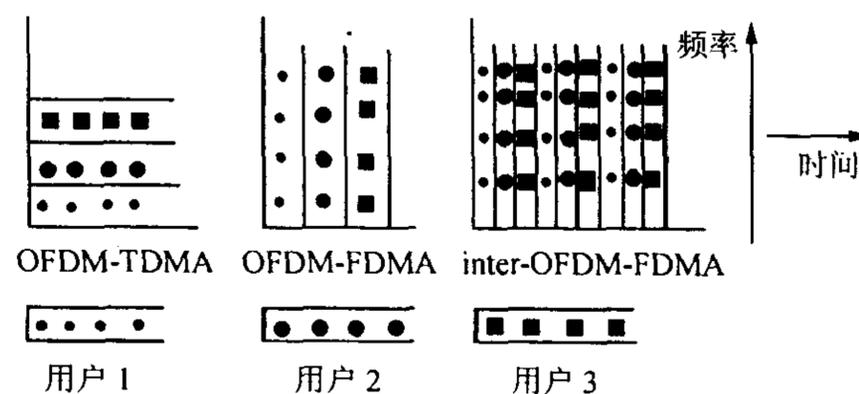


图 2 3 种混合多用户多址方式的时频方案

仿真时假定每个用户信道特性相互独立, 信道模型选用 5 径的幅值服从瑞利分布的选择性信道^[11], 所有用户的信道白噪声功率谱相等, 信道增益的均值为 1, 平均每个载波携带 4 bit 信息, 采用 128 个载波, 一次传输 512 bit, 使用了从 0 到 64 QAM 的调制方法, 即每次每载波传输比特数为 0 到 6。在给定的误符号率前提下一个符号的能量为传输相应比特数的最小功率^[12]:

$$f(m) = (N_0/3)[Q^{-1}(P_e/4)]^2(2^m - 1) \quad (5)$$

其中 $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt$ 。显然, $f(m)$ 满足上面提出的要求。

图 3 描绘了在平均误比特率为 10^{-4} 时的时延均方值 (RMS) 与比特平均信噪比 (SNR) 的曲线。从图可以看出, 一方面采用高效算法的 OFDM-TDMA 和 Inter-OFDM-FDMA 的性能与采用 Hungar 算法的最优解非常接近, 只相差约 0.6dB; 另一方面, OFDM-TDMA 和 Inter-OFDM-FDMA 的性能相差不大, 且优于 OFDM-FDMA, 但所有混合系统均优于纯粹的 OFDM。另外, 随着时延均方值的增加, 混合方式性能更好一些, 而纯多用户 OFDM 的性能几乎无变化。这是因为时延均方值的增加对混合方式而言有分集效果, 而纯粹的多用户 OFDM 则不会带来好处。

5 结论

本文提出了一种能够适应未来的多用户移动多媒体通信的系统的高效子载波分配方法。它是基于自适应调制的 OFDM 系统的,使用了一种基于贪婪算法的高效分配算法,通过将其应用于不同的多址系统,并对其系统性能进行了仿真研究。结果表明,这种算法简单易于理解,复杂度低,性能优良,非常接近于贪婪算法的最优解,很好地解决了多用户 OFDM 系统中载波分配的实时性和有效性。不过,它必须是建立在准确获取信道特征的前提下。

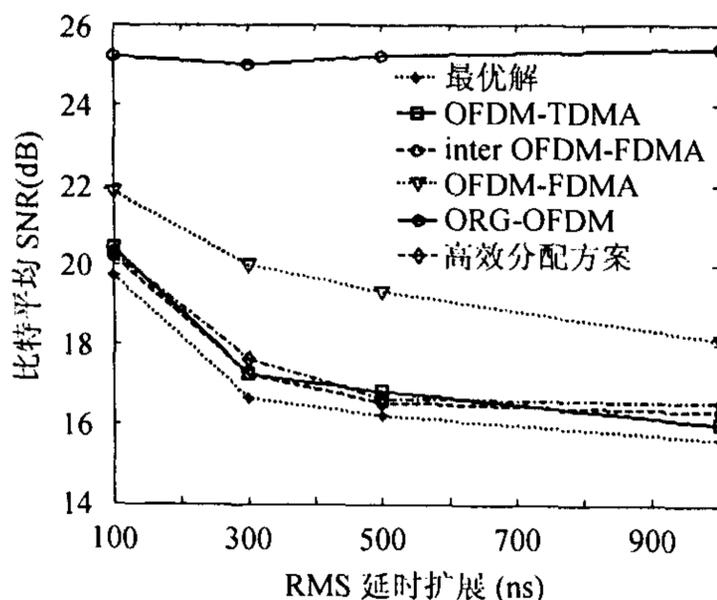


图3 时延均方值与平均信噪比曲线

参 考 文 献

- [1] Reimers U. Digital video broadcasting. *IEEE Commun. Mag.*, 1998, 36(6): 104-110.
- [2] Wang C Y, Cheng R S, Letaief K B, Murch R D. Multiuser sub-carrier allocation for OFDM transmission using adaptive modulation. *Proc. IEEE Vehicular Technology Conf. (VTC'99)*, Houston, TX, 1999: 479-483.
- [3] Czulwik A. Adaptive OFDM for wideband radio channels. *Proc. IEEE Global Telecommunications Conf. (GLOBECOM'96)*. London, U.K., 1996: 713-718.
- [4] Webb W T, Steele R. Variable rate QAM for mobile radio. *IEEE Trans. on Commun.*, 1995, COM-43(7): 2223-2230.
- [5] Rohling H, Grunheid R. Performance comparison of different multiple access schemes for the downlink of an OFDM communication systems. *Proc. IEEE Vehicular Technology Conf. (VTC'97)*. Phoenix, AZ, 1997: 1365-1369.
- [6] Lai S K, Cheng R S, Letaief K B, Murch R D. Adaptive trellis coded MQAM and power optimization for OFDM transmission. *Proc. IEEE Vehicular Technology Conf. (VTC'99)*. Houston, TX, 1999: 290-295.
- [7] Wahlqvist M, Ostgerg C, Beek J, Edfors O, Borjesson P. A conceptual study of OFDM-based multiple access schemes. Technical Report Tdoc 117/96, ETSI STCSMG2 meeting no.18, Helsinki, Finland, May 1996, Part I.
- [8] Cimini L J Jr., Sollenberge N R. OFDM with diversity and coding for high-bit-rate mobile data applications. *Mobile Multimedia Commun.*, 1997, 1(2): 247-254.
- [9] Mitsuhiro S, Ralf B, Kazuyuki S. Band Division Multiple Access (BDMA) system: a novel approach for next generation mobile telecommunication system, based on OFDM and SFH-TDMA. *Proc. IEEE Vehicular Technology Conf. (VTC'98)*. Ottawa, Canada, 1998: 1326-1330.
- [10] Khun H W. The Hungarian method for the assignment problem. *Naval Research Logistics Quarterly*, 1955, 2(1): 83-97.
- [11] Erceg V, et al.. Channel models for fixed wireless applications. IEEE 802.16a cont. IEEE802.16. 3c-01/29r1 Feb. 23, 2001.
- [12] Proakis J G. *Digital Communications*, 3rd. ed.. New York: McGraw-Hill, 1995: 281-290.

刘培: 男, 1968年生, 博士生, 主要从事数字移动多媒体通信、通信信号处理等领域研究。

葛建华: 男, 1961年生, 教授, 博士生导师, 主要从事 HDTV、数字多媒体系统以及数字通信网中的安全保密技术等领域的研究。承担国家重大科研项目多项。