

# 多载波通信系统的实用功率分配算法

郑紫微<sup>1</sup>, 朱义胜<sup>1</sup>, 杨知行<sup>2</sup>

(1. 大连海事大学信息工程学院, 辽宁大连 116026; 2. 清华大学微波与数字通信国家重点实验室, 北京 100084)

**摘 要:** 本文利用多载波通信系统的误码率、比特位数与信噪比之间的关系提出了性能良好的快速表查询法. 在噪声干扰、信道衰减和一定频段上功率谱密度对子信道最大传输位数限制的条件下, 得到了一种实用的离散多音频多载波通信系统的功率分配和数据位加载算法. 在系统初始化过程中, 该算法使系统能在满足各种约束条件下达到最优功率分配和数据位加载, 比其他算法具有更高的计算效率和更大的系统性能裕量. 在信道特性变化时, 该算法使系统在不增加硬件的情况下能进行快速跟踪和自适应位交换.

**关键词:** 多载波通信系统; 离散多音频调制; 位加载; 功率分配; 自适应位交换

**中图分类号:** TN911 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 06-0800-04

## A Practical Power Allocation Algorithm for Multicarrier Communication Systems

ZHENG Zi-wei<sup>1</sup>, ZHU Yi-sheng<sup>1</sup>, YANG Zhi-xing<sup>2</sup>

(1. College of Information Engineering, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning 116026, China;

2. State Key Lab on Microwave & Digital Communications, Tsinghua Univ, Beijing 100084, China)

**Abstract:** In this paper, an efficient table look up method is proposed by using the relationship among bit error rate, bits and signal to noise. Considering the aggregate spectral density of all the channel impairments, the channel attenuation and the constraint of power spectral density to the maximum bit rates of subchannels, a bit loading and power allocation algorithm is proposed for DMT-based multicarrier communication system. During initialization, the proposed algorithm enables the system with optimal power allocation and bit loading within all constraints. The proposed algorithm converges faster to the optimal solution than some of the existing techniques because of more efficient computation. The system performance margin is improved by the constraint of power spectral density to the maximum bit rates of subchannels. For tracking scenarios, the proposed algorithm makes the system with ability of fast adaptive bit swap without additional system hardware.

**Key words:** multicarrier communication systems; DMT; bit loading; power allocation; adaptive bit swap

## 1 引言

在目前高速数据传输的各种数字用户环路技术(xDSL)的实际应用中, 离散多音频调制(DMT)是被采用的多载波调制方式中的一种. 一些研究者从不同的角度提出了多种DMT调制的功率分配和位加载方法. 这些方法包括位添加法<sup>[1]</sup>, 寻找最优系统性能裕量法<sup>[3]</sup>, 最小误码率法<sup>[4]</sup>, 最大数据传输率和最小发射功率法<sup>[5]</sup>, 位去除法<sup>[6]</sup>, 最大噪声域法<sup>[7]</sup>等. 在这些方法中, 有些仅是进行了次优化<sup>[1, 3, 4]</sup>; 有些虽采取了最优化, 但是没有考虑各种干扰和信道衰减的影响<sup>[5]</sup>; 有些虽考虑了各种噪声干扰的影响, 却没能使得性能和传输速率同时得到最优化<sup>[6, 7]</sup>. 在xDSL的实际应用环境中, 除了存在AWGN的噪声外, 还存在如背景噪声、脉冲噪声、近端干扰(NEXT)、远端干扰(FEXT)等其他干扰. 在下文中, 我们将以M-ary QAM

调制解调方式为例推导得到多载波通信系统误码率、比特位数与信噪比之间的数量关系, 利用该数量关系构造性能良好的快速表查询方法, 在考虑所有噪声干扰、信道衰减特性和一定频段上的功率谱密度对各子信道最大传输位数限制等情况下, 从系统初始化和系统性能域跟踪两个方面给出一种实用的多载波通信系统的最优功率分配和数据位加载算法.

## 2 实用功率分配算法

对于各种不同调制解调系统, 其接收机的误码率 $p_e$ 只取决于调制解调方式和接收机每比特的信噪比( $\text{SNR}/b$ ), 而与信号和噪声的具体特性无关<sup>[10]</sup>. 若以M-ary QAM调制解调方式为例, 则由文献[10]可以推导出误码率 $p_e$ 、比特位 $b$ 与信噪比 $\text{SNR}$ 如下的数量关系

$$p_e = 1 - \left[ 1 - 2 \left\{ 1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right\} \operatorname{erfc} \left\{ \sqrt{\frac{3 \log_2 M}{2(M-1)}} \operatorname{SNR} \right\} \right]^2$$

$$= 1 - \left[ 1 - 2 \left\{ 1 - \frac{1}{\sqrt{2^b}} \right\} \operatorname{erfc} \left\{ \sqrt{\frac{3b}{2(2^b-1)}} \operatorname{SNR} \right\} \right]^2 \quad (1)$$

其中, 补余误差函数  $\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2} dt$ .

根据第  $i$  个子信道所采用的  $M$ -ary QAM 调制解调方式和第  $i$  个子信道所要求接收机的误码率  $p_{e,i}$ , 为使第  $i$  个子信道在一个码元周期上传送  $b_i$  位, 接收机必需的信噪比  $\operatorname{SNR}(p_{e,i}, b_i)$  可以由式(1)确定. 在进行系统设计时, 利用式(1)事先建立相应的  $b_r \operatorname{SNR}(p_{e,i}, b_i)$  表. 在实际应用过程中, 多载波通信系统的各子信道都采用相同的调制解调方式, 各子信道具有相同的  $b_r \operatorname{SNR}$  特性, 所以我们只需要一个公共的存储表, 从而可以大大降低系统所需的存储容量.

如果考虑第  $i$  个子信道的所有噪声  $N_i$ 、信道衰减  $g_i$  和要求的误码率  $p_{e,i}$ , 则第  $i$  个子信道在一个码元周期上传送  $b_i$  位时, 发射机的发射功率必需为

$$P_i [b_i \text{ bits}] = \frac{\operatorname{SNR}(p_{e,i}, b_i) \cdot N_i}{g_i} \quad (2)$$

因此, 可以得到第  $i$  个子信道在一个码元周期上传送位数从  $b_i$  增加一位时, 发射机需额外增加的发射功率为

$$\Delta P_i = P_i [(b_i + 1) \text{ bits}] - P_i [b_i \text{ bits}] \quad (3)$$

同样可以根据式(3)得到第  $i$  个子信道在一个码元周期上传送位数从  $(b_i + 1)$  减少一位时发射机节省的发射功率.

多载波通信系统的最优化功率分配和数据位加载的设计约束条件可表述如下:

(1) 发射机可供分配的总功率一定. 设子信道总数为  $N$ , 则对于  $\forall i$ , 应满足:

$$\sum_{i=1}^N P_i = P_{\text{budget}} \quad (4)$$

(2) 分配给各子载波信道的发射功率的功率谱密度不得超过该子信道对应频段下的最大允许功率谱密度.

(3) 各子载波的误码率满足一定要求, 即

$$p_{e,i} \leq p_{\text{error}} \quad (5)$$

(4) 系统的数据传输率满足要求, 即

$$\sum_{i=1}^N R_i = R_{\text{target}} \quad (6)$$

(5) 系统的性能裕量  $r_{\text{margin}}$  最大.

在系统初始化的过程中, 我们提出如下的多载波通信系统的最优功率分配和数据位加载算法:

(1) 发射机分别以各子信道最大允许的功率谱密度在各子信道上发射预先设定的伪随机训练序列(此时各子信道的功率为  $P_{\max,i}$ ), 从接收机测出各子信道相应的信噪比  $\operatorname{SNR}_i$ , 则式(2)中的比值  $N_i/g_i$  可按式(7)计算

$$\frac{N_i}{g_i} = \frac{P_{\max,i}}{\operatorname{SNR}_i} \quad (7)$$

(2) 按照各子信道以最大允许的功率谱密度发射时所测试到的信噪比  $\operatorname{SNR}_i$ , 查询表  $b_r \operatorname{SNR}(p_{e,i}, b_i)$  得到在该信噪比下为满足误码率要求各子信道可加载的位数  $b_i$ .

(3) 计算发射机需要的发射总功率

$$P = \sum_{i=1}^N P_i \quad (8)$$

(4) 若  $P \leq P_{\text{budget}}$ , 则转到第 5 步; 否则, 按式(3)结合查询表  $b_r \operatorname{SNR}(p_{e,i}, b_i)$  和式(2)、式(7), 计算当前状态下各子信道数据位数减少一位发射机所能节省的能量  $\Delta P_i$ , 将能够使得发射机节省最大能量的子信道上的位数减少一位, 重新查询表  $b_r \operatorname{SNR}(p_{e,i}, b_i)$ , 找到接收机在该子信道所需的信噪比  $\operatorname{SNR}_i$ , 按式(2)和式(7), 算出发射机在该子信道当前状态所需的发射功率  $P_i$ , 返回第 3 步.

(5) 计算所有子信道上数据传输率的总和

$$R_{\text{total}} = \sum_{i=1}^N R_i = \sum_{i=1}^N b_i \quad (9)$$

(6) 若  $R_{\text{total}} = R_{\text{target}}$ , 则转到第 7 步; 若  $R_{\text{total}} > R_{\text{target}}$ , 则按式(3)结合表  $b_r \operatorname{SNR}(p_{e,i}, b_i)$  和式(7), 计算当前状态下各子信道减少一位发射机所能节省的能量  $\Delta P_i$ , 将能够使得发射机节省最大能量的子信道上的位数减少一位, 转回第 5 步.

(7) 根据此时各子信道上的位数  $b_i$ , 从表  $b_r \operatorname{SNR}(p_{e,i}, b_i)$  上查到在各子信道接收机所需的信噪比  $\operatorname{SNR}_i$ , 按式(2)进行功率分配. 将最优的功率分配和位加载方案信息返回给发射机, 进行各子信道实际的功率分配和位加载. 此时系统具有最

大的系统性能裕量为  $r_{\text{margin}} = P_{\text{budget}} \setminus \sum_{i=1}^N P_i$ .

在实际的多载波通信系统中, 信道特性往往会随时间而缓慢变化, 因此, 要求系统对各子信道的信道特性进行跟踪, 并对各子信道的位数进行相应的调整, 以确保整体传输性能最优化, 即所谓的自适应位交换问题<sup>[9]</sup>.

为了符合实际系统设计情形, 不考虑初始化结束时仍未被使用的子信道是否会由于信道性能发生重大变化而有能力承载数据位的情况(实际上, 对于 xDSL 这样短距离传输的有线信道来说, 其信道特性通常不会发生很大的变化), 而仅考虑初始化结束时已被使用的子信道之间数据位的交换问题. 各子信道数据位数  $b_i$  的自适应调整方案如下:

(1) 发射机定期(由系统根据码元周期的间隙设定)分别以各子信道最大允许的功率谱密度  $P_{\max,i}$  在各子信道上发射预先设定的伪随机训练序列, 进行各子信道的特性跟踪, 从接收机测出各自的信噪比  $\operatorname{SNR}_i^p$ , 并将该信噪比与初始化各子信道的信噪比(或前一次进行自适应位交换时各子信道的信噪比)  $\operatorname{SNR}_i^0$  进行比较( $\operatorname{SNR}_i^0$  存放在一个独立的查询表中, 并在每一次自适应位交换时进行数据更新), 计算各子信道的变化值  $(\operatorname{SNR}_i^p - \operatorname{SNR}_i^0)$ ;

(2) 对于采用  $M$ -ary QAM 调制解调方式的各子信道而言, 为保证子信道在信道特性变化前后具有相同的误码率  $p_{e,i}$ , 当子信道上数据位增加一位( $b_i + 1$ )或减少一位时( $b_i - 1$ ), 都要求接收机所需的信噪比增加或减少  $3\text{dB}^{[9]}$ ; 因此, 以接收机测得的信噪比变化是否超过  $3\text{dB}$  作为是否进行位交换的门限值. 对于所有已使用的子信道, 若都满足  $(\operatorname{SNR}_i^p - \operatorname{SNR}_i^0) < 3\text{dB}$ , 则不进行位交换, 返回第 1 步; 若第  $i$  个子信道  $(\operatorname{SNR}_i^p - \operatorname{SNR}_i^0) \geq 3\text{dB}$ , 则转到第 3 步, 进行自适应位交换;

(3) 找出各已用子信道中变化值  $(SNR_i^O - SNR_i^P)$  最小的子信道 (设为第  $j$  个子信道) 将第  $i$  个子信道上的位数减少一位 ( $b_i - 1$ ), 而将第  $j$  个子信道上的位数增加一位 ( $b_j + 1$ ); 从而完成位的自适应交换, 转回第 1 步。

3 模拟仿真

文献[5]以八种载波服务区(CAS)的 ADSL 典型环路作为仿真环境, 进行了数据位加载和功率分配研究, 并从优化过程的计算效率和优化后的系统性能方面与文献[3, 4]等所给出的算法进行了对比。为了便于比较, 采用与文献[5]设计示例相同的信道特性仿真环境, 并将本文算法与文献[5]算法进行比较。该仿真信道为 ADSL 标准测试环路 # 9, 输入功率为 100mW, 具有 49 个 ADSL FEXT 干扰源, 噪声类型为 AWGN。具体设计条件为: 接收机测得的各子信道相应的信噪比分布如图 1(a) 所示; 每个子信道都采用正交调幅调制方式(QAM), 其有效信号星座为 0~ 10bits/symbol; 误码率要求为  $10^{-7}$ ; 目标

数据传输率为 500bits/symbol, 对应于码元速率为 4kHz 的多载波调制系统的速率为 2Mbps。对于该模拟仿真, 为了与文献[5]一致, 假设只进行各子信道数据位的优化加载和功率的优化分配, 而不考虑目标数据率  $R_{target}$  的影响, 则根据各子信道的信噪比, 采用本文算法可以很快完成各子信道的数据位加载和功率分配。各子信道相应的数据位加载和功率分配如图 1(b) - (c) 所示。

因为加法(或减法)相对于乘法(或除法)来说, 其运算量是可以忽略的, 所以, 在比较算法的运算复杂度时不考虑加法(或减法)的影响。我们将实数的一次乘法(或除法)运算看作一次浮点运算(Floating Octal Point)。设子信道总数为  $N$ , 为了达到收敛, 文献[5]算法进行了 14 次迭代, 每迭代一次算法的运算复杂度为  $O(N \log_2 N)$ 。采用本文算法, 总共进行了 10000 次仿真, 平均每次去除 6.0135 位, 每去除一位算法的运算复杂度为  $O((\log_2 N)^2)$ 。由此可见, 本文算法比文献[5]算法具有更高的计算效率。

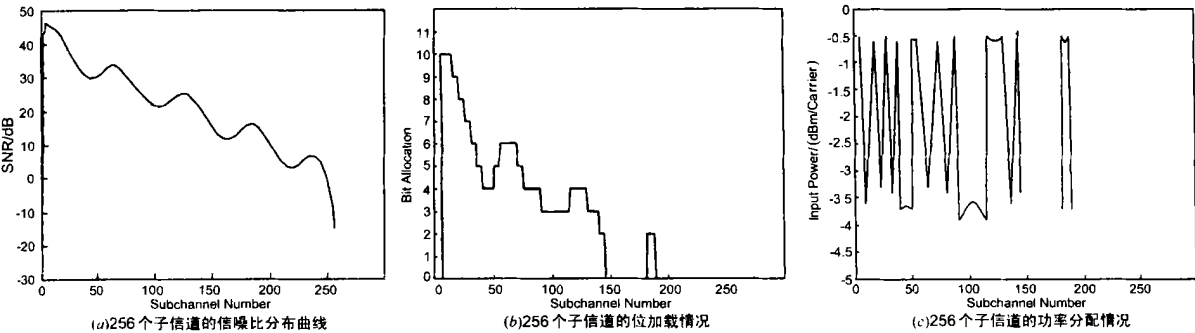


图 1 初始化阶段子信道的信噪比分布、位加载、功率分配

对应于 3、0、- 3 和 - 6dB 这些不同的 AWGN 功率谱密度情形, 在系统经过初始化后, 本文算法与文献[5]算法的系统性能裕量  $r_{margin}$  比较结果如表 1 所示。由于本文算法在每一步都能够保证系统在最大化数据传输率下使得功率最小化, 所以, 经过初始优化后, 系统能够获得最大的性能裕量  $r_{margin}$ 。文献[5]采用对分法逼近, 得到的是近似解。在表 1 中对应于不同的噪声影响情况的系统性能裕量  $r_{margin}$  的比较结果正好与此相吻合。

本文算法是在各子信道满足最大功率谱约束条件下进行的, 而[5]等文献算法没有考虑最大功率谱受限子各子信道带宽而导致的各子信道最大允许传输位数受限的要求。

表 1 系统性能裕量比较

位加载算法	系统性能裕量 $r_{margin}$ (dB)			
	+ 3dB	0dB	- 3dB	- 6dB
本文算法	9.8058	12.8058	15.8058	18.8058
文献[5]算法	9.4636	12.4636	15.4636	18.4636

对于系统信道特性的跟踪问题, 假设子信道上随机噪声的方差  $\sigma^2$  的变化范围为  $[- 6, + 6]$  (dB), 概率分布密度函数为  $f(x) = 1/8 \exp(-(x - 2)/4)$ 。经过 10000 个码元周期后, 固定初始化时的位分配方案和采用本文所给出的自适应位交换方案, 系统各子信道的性能裕量  $r_{margin, i} = P_{max} / P_i$  的星座分布图有较大的差别, 如图 2 所示。

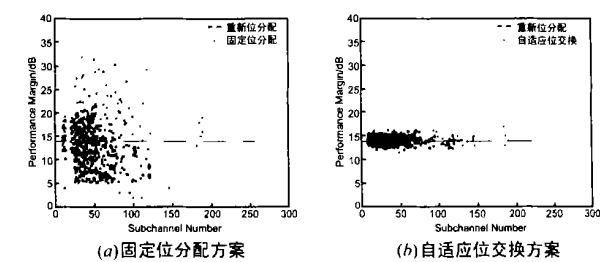


图 2 不同位分配方案对系统性能裕量的影响

从图 2 可以看出, 随着系统各子信道特性的缓慢变化, 不同位分配方案会对系统性能裕量产生不同的影响。对于固定位分配方案, 随着有些子信道信道特性的变差, 如保持其位数不变, 将使其上的性能裕量减少, 而整个系统的性能受着性能裕量最小的子信道的制约, 从而使系统的性能恶化; 对于自适应位交换方案, 由于将信道特性变差的子信道的位相应减少, 而把该位加载到信道特性较好的子信道上, 各子信道间的性能裕量不会发生超过 3dB 的变化, 从而能够使得系统整体保持较好的性能裕量。而且, 本文所给出的自适应位交换算法在不增加系统硬件的情况下完全可由软件设计来实现。

4 结论

本文在考虑了各种噪声干扰和信道衰减影响以及一定频

段上的功率谱密度对子信道最大传输位数的限制等的情况下,从系统初始化过程和系统信道特性跟踪两个方面,提出了一种实用的 DMT 多载波调制系统的功率分配和位加载算法.模拟仿真结果表明,在系统初始化过程中,该算法使系统能在满足各种约束条件下达到最优功率分配和位加载,并且比其他算法具有更高的计算效率和更大的系统性能裕量.在信道特性变化的情况下,该算法使系统在不增加硬件的情况下能进行快速跟踪和自适应位交换.

#### 参考文献:

- [ 1 ] J A C Bingham. Multicarrier modulation for data transmission: An idea whose time has come [ J ]. IEEE Comm Mag, 1990, 28( 5 ): 5- 14.
- [ 2 ] I Kalet. Multitone channel [ J ]. IEEE Trans Comm, 1989, 37( 2 ): 119- 124.
- [ 3 ] P S Chow, J M Cioffi, J A C Bingham. A practical discrete multitone transceiver loading algorithm for data transmission over spectrally shaped channels [ J ]. IEEE Trans Comm, 1995, 43: 773- 775.
- [ 4 ] R F H Fischer, J B Huber. A new loading algorithm for discrete multitone transmission [ A ]. Proc IEEE Globecom [ C ]. 1996. 724- 728.
- [ 5 ] B S Krongold, K Ramchandran, D L Jones. Computationally efficient optimal power allocation algorithm for multicarrier communication systems [ A ]. ICC [ C ]. 1998. 1018- 1022.
- [ 6 ] R Sonalkar, R Shively. An Efficient bit loading algorithm for DMT ap-

plications [ A ]. Proc IEEE Globecom [ C ]. 1998. 2683- 2688.

- [ 7 ] J Campello. A practical bit loading for DMT [ A ]. ICC [ C ]. 1999. 801- 805.
- [ 8 ] R G Gallager. Information Theory and Reliable Communication [ M ]. New York: Wiley, 1968.
- [ 9 ] P S Chow. Bandwidth optimized digital transmission techniques for spectrally shaped channels with impulsive noise [ D ]. Stanford, CA: Stanford Univ, 1993.
- [ 10 ] J Proakis. Digital Communication, 3rd Ed [ M ]. New York: McGraw-Hill, 1995.

#### 作者简介:

郑紫微 男, 1975 年出生于福建永春, 分别于 1997 年和 2000 年在大连海事大学获得学士和硕士学位, 现在为大连海事大学博士研究生, 目前主要研究兴趣为: 移动通信中的空时处理技术, 智能计算, 网络优化, 数据融合.

朱义胜 男, 1945 年出生于山东, 大连海事大学信息工程学院教授, 博士生导师, IEEE 高级会员, 主要研究兴趣为: 电网络理论, 宽带匹配, 微波数字通信.

杨知行 男, 1946 年出生于湖南, 清华大学电子工程系教授, 博士生导师, 微波与数字通信国家重点实验室常务副主任, 主要研究兴趣为: 宽带传输技术的理论与实现.