

## 离散多音调制中一种改进的动态能量分配方法\*

高峰 孙玲芬 陈显治

(国防科技大学电子工程学院 长沙 410073)

**摘要** 本文探讨了离散多音调制(DMT)中的动态能量分配的特点和应用范围,并分析了几种典型的动态能量分配方法。在此基础上,本文提出了一种改进的分配方法。计算机模拟结果表明,该方法不仅降低了运算复杂度,而且性能近于最优。文章最后还探讨了动态能量分配中尚待进一步解决的问题。

**关键词** 离散多音调制, 动态能量分配, 子信道(子带)

**分类号** TN911.3

## An Improved Method of Dynamical Energy Allocation in Discrete Multitone Modulation Systems

Gao Feng Sun Lingfeng Chen xianzhi

(Institute of Electronic Engineering, NUDT, Changsha, 410073)

**Abstract** This paper presents briefly the features and the application range of dynamical energy allocation (DEA) at first. Then it proposes an improved DEA scheme based on the analysis of some typical DEA schemes and gives computer simulation results. Finally, some problems which remain to be further studied are discussed.

**Key words** discrete multitone modulation, dynamical energy allocation, sub-channel

离散多音调制(Discrete Multitone Modulation)是不对称数字用户环路(ADSL)传输设备中优先使用的一种比较优秀的调制方式<sup>[1-3]</sup>。该方式将信道频谱分为 $N$ 个子带,各个子带可以认为是QAM调制的,子带的信息速率可以不一样,即每个子带符号可以使用不同的星座图,并含有不同的信息比特数。因此,我们可以根据信道特性的优劣或者实际情况(如与HDSL,DSL等传输设备的频谱兼容性),动态地给各个子带分配不同的信号功率。对于频谱特性较好的子带,分配较多的信号功率,使之传输较高的信息速率;相反,对较为恶劣的子带,分配较低的信号功率,从而保证系统能具有最佳的性能。这就是所谓的基于DMT的动态能量分配。

## 1 动态能量分配的理论依据和几种不同的分配方案

如果信号功率是受限的,我们可以通过选用适当的信号频谱,使得系统能达到相对较高的传输速率,或者具有较佳的系统性能。对DMT而言,就是合理安排各个子信道的信号功率以达到上述目的<sup>[3]</sup>。设第 $i$ 个子带符号所携带的信息量为 $b_i$ 个比特,能量为 $E_i$ ,噪声功率为 $\sigma^2$ ,信道增益为 $H_i$ ,符号宽度为 $T$ ,则有

$$b_i = \log_2 \left( 1 + \frac{E_i H_i^2}{\sigma^2 \Gamma_i T} \right) \quad (1)$$

我们定义 $E1_i = \Gamma_i \frac{\sigma^2}{H_i^2} T$ ,它是第 $i$ 个子带在每赫兹频带上传输一个比特所需的能量,对上式进行化简得到: $b_i = \log_2(1 + E_i/E1_i)$ 。(1)式中 $\Gamma_i$ 是信噪比带,给定误码率和调制方式等之后 $\Gamma_i$ 是确定的。

\* 1997年9月12日收稿

第一作者: 高峰, 男, 1973年生, 助教

如对  $Pe = 1 \times 10^{-7}$  的 QAM 系统, 不考虑编码增益, 有  $\Gamma_i = 9.72$ . 一般而言, 各个子带均使用相同的编码器, 而且误码率必须相同才可能有最佳性能<sup>[4]</sup>, 因此  $\Gamma_i$  可以看作是一个常数  $\Gamma$ .

从(1)式可得到:

$$E_i = (2^{b_i} - 1) T \Gamma \sigma^2 / H_i^2 = (2^{b_i} - 1) E_{1i} \tag{2}$$

设 
$$E_i = E, \quad b_i = B, \quad i = 1, \dots, N \tag{3}$$

即发送信号总功率是受限的, 且每个 DMT 符号的总比特数为  $B$ , 故对各个子信道发送能量  $E_i$  的优化选择转化为一个给定条件下式(3)求极值( $B$  最大)的问题. 也就是说怎样确定各个子带的发送能量, 使得总的比特数最大, 传输速率最高.

令 
$$G = B + \lambda (E - \sum_i E_i)$$

并且 
$$\begin{cases} \partial G / \partial E_i = 0, \quad i = 1, \dots, N \\ \partial G / \partial \lambda = 0 \end{cases}$$

解之得 
$$\frac{1}{\lambda} = \frac{E}{N} + \frac{1}{N} \sum_i E_{1i} \tag{4a}$$

$$E_i = \frac{E}{N} + \frac{1}{N} \sum_i E_{1i} - E_{1i} \tag{4b}$$

从式(4b)可以看出, 当  $E$  增大时, 式中第一项变大并且后两项保持不变. 而当线路噪声功率减小, 信道增益变大时, 根据  $E_{1i}$  定义可知后两项会变小, 但第一项不变. 故  $E$  大到一定程度以上或者信道条件较好到一定程度, 上式中的后二项可以忽略, 因此有:

$$E_i = E / N \tag{5}$$

即各子带能量平均分配, 而不存在所谓的动态分配了. 换句话说, 当信号总功率相对不太大, 信道条件较为恶劣, 或信噪比不太大时, 应用动态比特分配效果较为明显. 所以可以通过应用动态能量分配, 使得在较小的信号功率下获得较佳的性能, 从而带来设备成本下降, 对外串音减小, 信号非线性失真小等一系列好处. 图1给出了在24号线规, 5.4km 上传输1.6Mb/s 的 ADSL 系统的系统裕量指标, 图中可以体现动态能量分配的优势. 目前主要有以下几种分配方案:

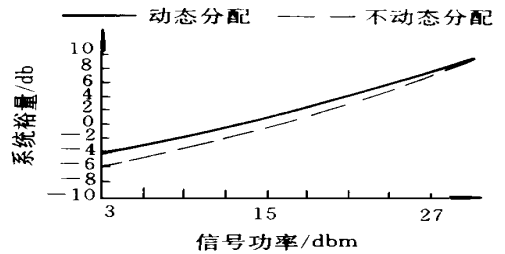


图1 动态分配与否的系统指标

### 1.1 平均分配能量的分配方案(方案1)

从上面分析可以看出, 如信号功率较大, 实际应用和计算机模拟表明, 对一般双绞线电话信道, 信号功率在20dbm 以上, 噪声在-110dbm 以下时, 动态分配效果将不再明显. 此时, 可以将信号功率平均分配到各个子带去, 即  $E_i = E / N$ . 这种方法最为简单. 缺点是当信道条件较为恶劣, 或信号功率不能太高时, 不能达到较佳的系统性能.

### 1.2 基于理论的分配方案<sup>[5]</sup>(方案2)

式(4)给出了理论上的最佳能量分配方案, 它满足最佳传输所要求的信号频谱的所谓“注水分布”. 按照(4)式的结果, 应该会使信号的传输速率最大. 其实现步骤为:

- (a) 将各子带按  $E_{1i}$  的大小从小到大排序;
- (b) 计算各子带的能量及比特数;
- (c) 如果第  $N$  个子带比特数小于0, 则关闭该子带. 令  $N = N - 1$ , 再转到(a), 否则结束.

该方法从理论上讲是最优的, 但事实上由于 QAM 星座图上的点数不可能是无限多, 因此不可能实现任意非整数的比特的调制, 一般只对每个子带所传的比特数取整, 其运算复杂度近似于  $O(N^2/3)$ .

### 1.3 快速收敛的分配方法(方案3)

文献[6]给出了一种能快速收敛的分配方案. 其基本思想是不断改变系统容量, 使各子带所传的比

特总数(即一个 DMT 符号所传比特数) 满足实际要求, 而不去考虑能否达到最大的传输速率。该方法收敛速度很快, 算法复杂度较第二种方法大大下降, 为  $O(K \times N)$ , 其中  $K$  为一个常数。不足之处在于能量分配不够精确, 不能达到最优分配。

## 2 一种改进的动态能量分配方法(方案4)

根据能量分配最省的原则, 我们提出了一种较为实用的方法。其主要思想是: 先假设整个 DMT 符号所含的比特数为 0, 每次分配部分能量到某个子带, 使得该子带符号刚好可以增加一个比特, 而这个子带必须是在所有子带中再增加一个比特所需能量最小的。其关键是在每分配一个比特的能量之前, 怎样找出一个所需能量最省子带, 并将能量赋给该子带。由(1)式可以推出: 对第  $i$  个子带, 从每个子带符号含  $(b_i - 1)$  个比特到  $b_i$  个比特所需增加的能量为  $2^{b_i - 1} E_{1i}$ 。下面给出这种方法的实现步骤:

- (a) 初始化各子带, 使  $E_i$  和  $b_i = 0, i = 0, \dots, N - 1$ ;
- (b) 将各子带再增加 1 比特所需的能量从小到大排序;
- (c) 给最小的子带分配可多传 1 比特所需的能量  $2^{b_i - 1} E_{1i}$ ;
- (d)  $E_i = E_i + 2^{b_i - 1} E_{1i}, b_i = b_i + 1$ ;
- (e) 重新计算该子带再增加 1 比特所需的能量;
- (f) 总能量减去这次分配的能量, 若总能量用尽则结束, 否则转向步骤(b)。

该方法的优点在于绝对不会有大于传送一个比特(即在一个 DMT 符号中增加一个比特)所需能量的浪费, 它总是将能量分配给最恰当的子带。另外一个重要的特点是整个分配过程中只需做一次从乱序到有序的排序运算。从步骤(b)可看出, 各个子带一旦排好后, 以后每次从(f)转向(b)时, 执行(b)所要做的只是将一个数插入一个有序序列, 因而可以用二分法等快速插入方法, 整个算法的复杂度只有  $O(K \times N \log N)$ , 从而大大降低了运算复杂度,  $K$  是一个与  $N$  无关的常数。该方法不仅速度快, 而且可以达到相对最高的传输速率。

下面以一个应用 DMT 技术的典型 ADSL 传输系统为例来比较不同方案之间的差别。该系统信号发送功率为 20dbm, 噪声功率为 -110dbm/Hz, 有远端串音存在, 要求比特率为 1.6Mb/s, 误码率小于  $10^{-7}$ , 环路采用 24 号线规、5.4km 的铜线, DMT 子带数为 256。图 2 给出了不同方案的能量分配结果。

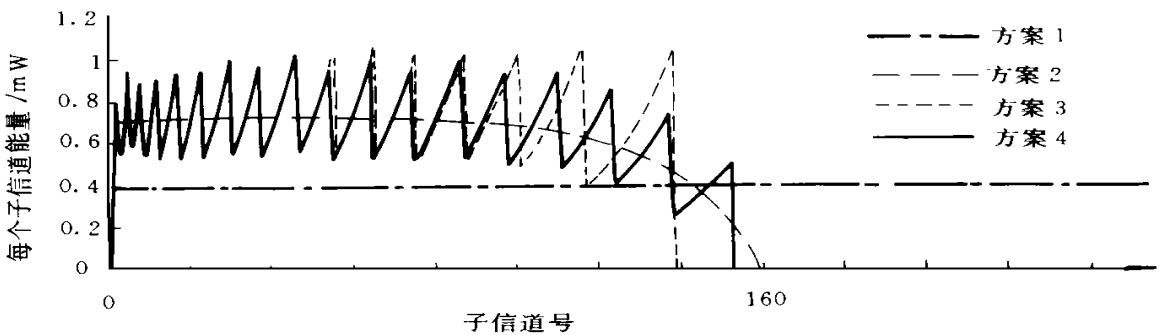


图 2 不同方案的分配结果

表 1 给出了不同方案的比较结果(指标要求同上)。

表 1 不同分配方案的差别

	系统裕量 db	比特数/DMT 符号	运算复杂度
方案 1	1.004	910	—
方案 2(理想)	3.006	1100	$O(N^2)$
方案 2(实际)	3.006	1017	$O(N^2)$
方案 3	2.405	1033	$O(K \times N)$
方案 4	2.941	1093	$O(K \times N \lg N)$

从表中可以看出, 当系统保持总传输比特数一定时, 不同的分配方案有不同的系统裕量, 方案 2、4 效

果最佳。若保持系统裕量一定(一般为6db),则不同方案可以传输不同的信息速率,其中方案4有最大的传输速率。另外,当系统的信噪比增加时,也即误码率超过预定情况时,DMT系统的系统裕量(给定比特率)与信息速率(给定系统裕量)均会下降,但各种方案之间的性能差距的格局不会发生改变<sup>[7]</sup>。

总而言之,上述几种方法各有优劣,当信道特性很好,信号速率要求不高,从简化设备、降低成本的角度可选用方案1,即平均分配能量。方法2理论是最优的,但实际上尚不尽人意,主要是星座图的尺寸不能选得太大。

方法3、4的能量分布情况比较相似。它们的共同特点是对衰减比较大的子信道不分配能量。方法3的运算复杂度最低,缺点是对能量的分配仍不太准确,与方案2和4相比仍有一定距离。整体而言第4种方法综合指标最好,它能达到较高的比特速率,并十分接近理想分配的结果,而运算复杂度却相对很低。当信号功率受限不能太大,且信道条件较差时,其优越性更为明显。

### 3 尚存在的问题与研究方向

在DMT技术中应用动态能量分配,虽然可取得较好的效果,但是仍然存在一些尚未解决的问题。根据我们的分析,至少有下列三个方面的问题需要解决。

(1) 如果考虑到噪声中包含有串音以及由于对输出信号进行限幅所带来的噪声,则显然方程(1)中的噪声功率不能用一个与信号功率无关的符号来表示。也就是说,一旦我们用前面的任意一种方案计算出各子带的信号功率后,此时各子带的噪声又会相应发生改变。这要求我们重新进行一次能量分配,同样又会引起噪声功率变化,如此形成一种递归的关系。因此只对子带能量分配一次是不能达到实际上的最佳效果的。而且即使运算速度足够快,最终能否收敛到一个固定的结果也不能够肯定。运用第4种方案虽然可以部分地解决这个问题,但这样将大大增加运算量,达不到实用化的要求。

(2) 动态能量分配的过程为发送端先发送一种收发双方均预知的随机序列,接收端根据接收信号计算各子带的衰减,再根据上述的任意一种方案确定各子带的发送功率,并将其传回发送端。一旦通信建立,则不再改变分配的结果,因此,这种方式对随时间变化较大的信道则不太适应。有必要找到一种速度更快,更简单的分配方案,以实现实时跟踪信道的变化。或找到一种方案,这种方法的特点是当一次分配完成后,只需对少数变化较大的子信道的能量进行相应调整,而无需对所有子带重新进行分配,从而实现名副其实的动态能量分配。

(3) 前面讨论的各种方案,均建立在式(3)的基础上,即信号总功率一定,而实际系统往往是峰值功率受限,不同时刻发送出的DMT符号并非都是相同功率的,所以用(3)式来描述信号功率尚有不足之处。峰值功率受限情况下如何最佳分配信号功率,也是一个需要解决的问题。

### 4 结束语

本方在分析几种常用的动态能量分配方法的基础上,提出了一种改进的分配方案。理论分析和计算机模拟结果表明,该方案不仅运算复杂度适中,而且性能接近理想分配方案。今后的任务应该是如何进一步使动态能量分配实用化,解决尚存的一些问题,让它的优势充分体现出来。

### 参考文献

- 1 Ruiz A, Cioffi J M. Discrete Multiple Tone Modulation with Coset Coding for the Spectrally shaped Channel. IEEE Transactions on Communications, 1992, 40(6)
- 2 Kalet I. The Multitone Channel. IEEE Transaction on Communication, 1989, 37(2)
- 3 Chow J S, Cioffi J M. A Discrete Multitone Transceiver system for HDSL Application. IEEE Journal on Selected Areas, 1991, 9(6)
- 4 Chow J S. A multichannel Transceiver system for ADSL, GLOBECOM '91, 3
- 5 Tu J C, Cioffi J M. A Loading Algorithm for the Concatenation of Coset Codes with Multichannel Modulation Methods, GLOBECOM '90
- 6 Chow P S. A Practical Discrete Multitone Transceiver Loading Algorithm for Data Transmission over Spectrally Shaped Channels. IEEE Transaction on Communications, 1995, 43(2, 3, 4)