

多载波格状编码调制的实现和性能分析¹

刘丹谱 乐光新

(北京邮电大学电信工程学院 北京 100876)

摘要 本文综合考虑复杂度、时延和实时性等因素,讨论了格状编码应用在多载波调制系统中的具体实现方案,并在 ADSL DMT 环境下对其性能进行了模拟分析。结果显示,格状编码用于多载波调制系统时仍然能够获得大部分理论编码增益。

关键词 多载波调制, 格状编码调制, 维特比译码, 编码增益

中图分类号 TN914.3

1 前言

任何一种高性能的数字通信系统总需要采用某种形式的编码,多载波调制也不例外。随着近年来多载波调制的主要形式——离散多频(DMT)调制在不对称数字用户线(ADSL)和移动通信中的应用,多载波的格状编码调制(TCM)已成为一个颇受关注的研究课题。

早期在多载波调制中使用 TCM 的方法是对每个子信道独立进行格状编码和译码^[1,2]。如果整个系统有 N 个子信道,就需要 N 个编码器和 N 个译码器。但是对于实用化的 ADSL DMT 系统, $N = 256$, 显然令数百个编/译码器同时工作是极不现实的。因此理想的情况是只使用一个公共格状编/译码器依次对所有子信道进行编码和译码,以降低复杂度和译码时延,本文就将讨论这种方案的具体实现,并对其性能进行分析。

2 多载波格状编码调制系统的基本结构

图 1 所示为一个多载波格状编码调制系统的基本结构框图。在发送端,速率为 R (bit/s) 的输入比特流被分为 $b_{\text{tot}} = RT$ 一组,其中 T 是一个多载波符号周期。比特分配器根据信道特性把这 b_{tot} 个比特分配到 N 个子信道上,其中子信道 i 上携带 b_i 个比特,而且 $b_{\text{tot}} = \sum_{i=0}^{N-1} b_i$ 。格状编码器从零状态开始,依次对各子信道上的信息比特进行编码,生成对应的 N 个二维子星座符号 X_i ,再由调制器调制成信道实际发送的信号 $x(t)$ 。调制器可以采用 DMT 或矢量编码结构,具体选择哪种调制方式并不影响 TCM 的实现和性能。

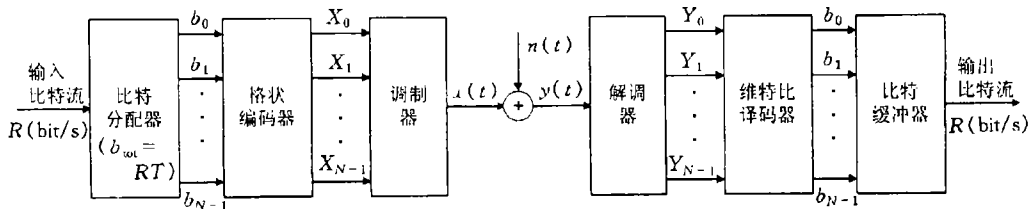


图 1 多载波格状编码器调制系统的基本结构

在接收端,接收信号经过解调以后,由维特比(Viterbi)译码器对接收信号序列 $\{Y_i\} (i = 0, \dots, N-1)$ 进行译码,依次恢复子信道 i 上的 b_i 个比特,经比特缓冲器缓冲,输出译码后的比特流。

¹ 1997-09-11 收到, 1998-04-24 定稿
国家教委博士点基金资助项目(97001301)

2.1 比特分配 由于格状编码调制引入了冗余信号点, 这势必导致星座扩张。从抵抗与信号有关的失真的角度来说, 星座扩张的程度越小越好。格状编码器的编码效率一般为 $m/(m+1)$, 每个子信道发送 b_i 个信息比特需要的二维星座规模将从 2^{b_i} 扩大到 2^{b_i+r} , 其中 r 是编码器的二维归一化冗余度。对于二维格状编码器, $r=1$, 星座扩大了一倍; 对于 $2n$ 维格状编码器, $r=1/n$, 因此使用多维格状编码不但能提高编码增益, 还有利于减小星座扩张程度。星座扩张意味着每个子信道实际能够传送的比特数应该是 b_i+r , 相应地, 一个多载波符号传送的总比特数就是 $b_{\text{tot}}+[rU]$, 其中 $U(U \leq N)$ 是实际可用信道 ($b_i > 0$) 的总数。因此, 在多载波调制系统中引入格状编码技术以后, 需要对初始化过程中计算最佳比特分配方案的原始比特分配算法作一些改动, 以 $b'_{\text{tot}} = b_{\text{tot}}+[rU]$ 为待分配的总比特数, 并确保分配到子信道 i 上的比特数 b'_i 满足 $b'_i = b_i+r$, 其中 b_i 仍代表该子信道携带的信息比特数。

2.2 编码器 由于多载波调制系统每个子信道传递的比特数 b_i 不定, 这个公共格状编码器的结构应该与 b_i 无关。它将只使用 b_i 中的 c 个低位比特, 因此要求 $b_i \geq c$, 其余 $b_i - c$ 个比特则用于符号映射。一个子信道就等效于一个二维正交幅度调制 (QAM) 系统。如果采用二维格状编码方案, 即对每个子信道都单独进行一次编码和二维符号映射, 编码器的结构很简单。它对子信道 i 编码后的状态再作为当前状态对下一个子信道进行编码, 这一过程一直进行到 U 个所用子信道都经过编码为止。如果采用 4 维码, 编码器每次就要对两个子信道上的信息比特联合进行一次编码和四维符号映射。它对子信道 $2i$ 和 $2i+1$ 编码后的状态再作为当前状态对下面的两个子信道进行编码, 这一过程要进行 $[U/2]$ 次。

在多载波格状编码调制系统中, 还应该保持每个多载波符号编码的独立性, 上一个符号的编码状态不能影响下一个符号的编码过程, 这样接收端才有可能在一个符号周期内独立完成译码。因此, 对一个符号编码完成时, 编码器应该回到一个已知状态 (通常为零), 再开始对下一个符号的编码。为此, 需要固定最后被编码的几个子信道上的编码比特, 这种方法称作码字嵌入 (code tailing)。嵌入的比特数取决于编码器的记忆长度, 例如, 对于 2 维 4 状态 Ungerboeck 码^[3], 应该置最后两个子信道的最低位比特为零。

2.3 译码器 在接收端, 假定经过频域均衡和自动增益控制之后, 各子信道接收符号之间的最小距离 d_{min}^2 已归一化为 1, 这时采用极大似然序列估计的维特比译码器就可以对解调后的接收序列 $\{Y_i\}(i=0, \dots, N-1)$ 进行译码。该译码过程包括三个基本步骤: (1) 计算接收符号与每个子集中距离最近点的欧氏距离; (2) 根据维特比算法进行最大似然序列估计, 寻找与接收序列最接近的码序列; (3) 根据译码后的码序列和比特分配表恢复原始信息比特流。为了不增加实现复杂度, 在计算接收符号 Y_i 与各子集距离最近点的欧氏距离时, 可以不考虑 b_i 的大小, 而假定星座包含无穷个点。只是在第 (3) 步时才利用比特分配方案来确定原始信息比特。与在第 (1) 步时考虑 b_i 的最佳算法相比, 这种方法几乎不会带来性能损失。

传统的维特比译码算法为了保证译码的正确性, 都引入了一个译码时延 δ , 它通常是卷积码记忆长度的 4 到 5 倍。对于多载波格状编码调制而言, 这意味着一个符号最后几个子信道上的数据要等下一个符号前几个子信道上的数据出现之后才能译出, 而理想的情况应该是各个符号的译码保持独立, 互不影响, 在一个符号间隔内就能译出该符号传送的所有数据。为此, 对每个符号最后 $n\delta$ (n 为格状编码维数) 个子信道的译码只能提前进行。当译码路径扩展至第 U 个子信道时, 根据编码过程中采取的码字嵌入方法, 此时译码器应该处于

起始状态, 选择量度最小的路径作为判决路径, 据此确定信道 $U - n\delta - 1$ 至 $U - 1$ 上的数据。经过这种处理之后, 最后 $n\delta$ 个子信道中, 除带有嵌入比特的子信道之外, 其余子信道的编码增益将会有所降低。

对经过 $2n$ 维格状编码调制的多载波符号进行维特比译码, 整个过程的译码时延 δ 仅为 nT/N 的 4 到 5 倍。以符号速率为 4kBaud, $N = 256$ 的 DMT 系统为例, 采用 4 维 16 状态 Wei 码^[4] 时, δ 将小于 $20\mu\text{s}$, 完全能够满足交互型语音、图象时延不能超过 1ms 的要求。但是, 维特比译码的运算量很大, 仍以 4 维 Wei 码为例, DMT 系统所需运算量将为上千个 MIPS, 而普通数字信号处理器的运算能力一般都在 100MIPS 以下, 根本无法满足要求。目前实用的方法是采用专门进行维特比译码的维特比信号处理器 VSP^[5]。例如, 采用 $0.8\mu\text{mBiCMOS}$ 门阵列工艺的 VSP, 其指令周期为 10ns 时可以实现对符号速率高达 3.03MHz 的 4 维 16 状态 Wei 码流进行译码, 而 DMT 系统中译码时的等效符号速率将不会超过 1.0MHz, 所以完全能够做到实时处理。

3 性能分析

在多载波调制系统中, “SNR 差额” Γ 和系统性能容限 γ_m 是分析性能时通常使用的参数, Γ 和比特分配方案的关系是

$$b_i = \log_2(1 + \text{SNR}(i)/\Gamma), \quad (1)$$

$$b_{\text{tot}} \approx U \log_2(1 + \overline{\text{SNR}}/\Gamma), \quad (2)$$

其中平均信噪比 $\overline{\text{SNR}}$ 是各子信道信噪比 $\text{SNR}(i)$ 的几何平均值。对于未编码系统来说, $\gamma_{m,0} = \Gamma_0 - 9.8$ 。加入编码以后, “SNR 差额” 也会有所变化, $\gamma_m = \Gamma - 9.8 + \text{gain}$, 其中 gain 是完全与系统无关的所用编码方案的增益。因此系统实际所获得的编码增益 γ_{cs} 应该是编码前后性能容限的差额:

$$\gamma_{cs} = \gamma_m - \gamma_{m,0} = (\Gamma + \text{gain}) - \Gamma_0. \quad (3)$$

编码之后, 有三个因素导致了 Γ 的变化: (1) 编码所带来的星座扩张使每个多载波符号传递的总比特数增加了 $\lfloor rU \rfloor$; (2) 译码部分对每个符号最后 $n\delta$ 个子信道数据的提前判决损失了一部分编码增益; (3) 码字嵌入引入了冗余比特。码字嵌入引入的冗余比特很少, 所以前两个因素的影响是主要的。另外, 对每个子信道 i 而言, 编码等效于使该子信道的信噪比 $\text{SNR}(i)$ 增加了 gain(dB)。这样, 就可以在比特分配算法中综合考虑以上几个方面对性能的影响, 根据增加后的总比特数和等效 $\text{SNR}(i)$ 计算编码后的系统性能容限, 从而得出编码增益 γ_{cs} 。

我们在四条用户环路上分别对 1.6Mb/s 和 6.4Mb/s 的 2 维 Ungerboeck 码和 4 维 Wei 码 DMT 系统的性能进行了模拟。这里采用文献 [6] 中提出的比特分配算法, 假定噪声类型为加性白高斯噪声 (AWGN) 和 49 个 ADSL 远端串话 (FEXT) 干扰源, 其中 AWGN 功率谱密度是 -143dBm/Hz (双边); 所要求的误码率是 10^{-7} , DMT 符号速率为 4kBaud, 输入功率是 20dBm, 带宽下限设置为 50kHz。模拟结果如表 1 所示。在单载波系统中, 误码率为 10^{-7} 时, 4 状态 Ungerboeck 码的理论编码增益是 2.88dB, 16 状态 Wei 码的理论编码增益是 3.91dB。从表中可以看出, 在多载波系统中, 可以获得大部分编码增益, 而且速率越高, 所得到的增益与理论值的差距也越小。这是因为速率高时, 每个符号传送的信息比特数增多, 冗余比特所占数量相对减小, 这一部分性能损失相应地得到降低。

表 1 DMT 格状编码系统的编码增益 γ_{cs} (dB)

	2 维 Ungerboeck 码		4 维 Wei 码	
	1.6Mb/s	6.4Mb/s	1.6Mb/s	6.4Mb/s
环路 1	2.31	2.72	3.24	3.44
环路 3	2.31	2.71	3.22	3.42
环路 7	2.31	2.71	3.22	3.43
环路 12	2.34	2.64	3.25	3.47

4 结 论

格状编码调制技术应用到多载波系统中会在实现上遇到许多具体问题, 本文详细讨论了其中的多载波格状编码器和译码器的结构、时延和复杂度等问题, 并在此基础上以用于 ADSL 的 DMT 系统为例对性能进行了模拟分析。模拟结果表明, 格状编码调制用在多载波系统中仍能获得大部分理论编码增益, 是实际应用中值得考虑的一种改善系统性能的有效方法。

参 考 文 献

- [1] Hirosaki B, Hasegawa S, Sabato A. Advanced group-band modem using orthogonally multiplexed QAM technique. IEEE Trans. on Comm., 1986, COM-34(6): 587-592.
- [2] Ruiz A, Cioffi J. A frequency domain approach to combined spectral shaping and coding. IEEE Int. Conf. Comm. Rec., Seattle WA: June, 1987, 1711-1715.
- [3] Ungerboeck G. Channel coding with multilevel/phase signals. IEEE Trans. on Inform. Theory, 1982, IT-28(1): 55-67.
- [4] Wei L F. Trellis-coded modulation with multidimensional constellations. IEEE Trans. on Inform. Theory, 1987, IT-33(4): 483-501.
- [5] Lou H, Cioffi J M. A programmable parallel processor architecture for viterbi detection. In Global Comm. Conf'90., San Diego CA: 1990, 1333-1337.
- [6] 刘丹谱, 乐光新. DMT 信道上的一种改进的实用比特分配算法. 通信学报, 已录用.

THE REALIZATION AND PERFORMANCE ANALYSIS OF MULTI-CARRIER TRELLIS-CODED MODULATION

Liu Danpu Yue Guangxin

(Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing100876)

Abstract Taking account of the complexity, delay and realistic, this paper has discussed the realization arrangement of the trellis-coded modulation applied to the multi-carrier modulation system. The simulation analysis has been taken in the ADSL DMT environments. According to the simulation results, the trellis-coded modulation can also obtain nearly the theoretical gain when used in the multi-carrier modulation system.

Key words Multi-carrier modulation, Trellis-coded modulation, Viterbi decoding, System performance margin

刘丹谱: 女, 1972 年生, 博士, 讲师, 主要从事多载波编码调制理论、成形技术和高速信息网方面的研究。

乐光新: 男, 1937 年生, 教授, 博士生导师, 校学术委员会主任。主要研究方向为通信理论、数字通信、信息处理及高速信息网。