

网格编码调制在数字通信中的应用

杜兴民, 蒋旭宇

(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要:回顾了网格编码调制技术产生的历史背景,阐述了网格编码调制原理,给出了多维 TCM 编码调制系统的实例 ABB128 TCM,简要叙述了“实用化 TCM”方案及 Q1875 专用芯片,论述了 TCM 的发展趋势。

关键词:网格编码调制;多维 TCM;卷积码

中图分类号:TN911 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2003)01-0043-03

1948年,Shannon发表了题为“通信的数学理论”的论文^[1],提出了著名的Shannon定理,为通信的可靠性研究指出了方向,奠定了纠错编码理论与技术研究的基础。该定理指出,在高斯信道中,只要信息的传输速率不超过信道容量,总可以找到一种编码方法,使信息的传输速率任意逼近信道容量,而传输的错误概率任意趋近于零,或者传输的失真度能够逼近给定的要求。在这之后的30年中,纠错编码技术从理论研究到工程应用都取得了重大进展,大大提高了通信传输的可靠性。但是,Shannon定理并没有给出具体的编码方法和码的结构。长期以来,人们都在努力的探索能够逼近Shannon极限的编码技术。

由于一般的纠错编码技术对信息传输性能的改善是建立在带宽扩展的基础上的,因此,在带宽受限的信道中,依靠传统的纠错编码技术是难于提高信道利用率的。以一个话音频带的电话信道为例^[2],根据测试,其振幅相位平坦处大约只有2400Hz的带宽,但其信噪比较高,典型值是28dB。根据Shannon信道容量

公式 $C = W \log_2(1 + \frac{P_s}{WN_0})$ 可知,当 $\frac{P_s}{WN_0} = \frac{S}{N} = 28 \text{ dB}$, $W = 2400 \text{ Hz}$ 时, C 大约为 22.3 kbit/s,但是事实上远达不到该理想的信息传输速率。

1974年Messy根据Shannon信息理论最早证明了将编码与调制作为一个整体考虑时的最佳设计,就可大大改善系统的性能。Ungerboeck、今井秀树等人在70年代后期进行了这方面的研究。1982年,Ungerboeck在IEEE Trans Information Theory上发表题为“Channel coding with multilevel/phase signals”的论文^[3],正式宣布了人们研究多年的调制编码相结合的“网格编码调制”(TCM)技术的诞生。该技术把信道编码和调制结合在一起进行设计,可以在既不增加信道频带宽度、也不降低信息传输速率的情况下,获得3~6dB的编码增益,宣告了一个划时代的、新的纠错编码技术的开始,成为继Shannon奠基以来信道编码技术发展的一个新的里程碑。随后,对TCM技术进行研究的热潮迅速的在全球范围内兴起,TCM研究领域取得了众多令人瞩目的成就,使得TCM技术从理论研究阶段逐步进入实用阶段^[4]。1984年,L. F. Wei针对信道中的各种干扰因素对相位的影响^[5-6],提出了克服相位模糊的旋转不变码,为8状态、16状态以及更为复杂的情况下相位模糊问题的解决提供了规则和方法。由他提出的方案已分别被CCITT的V.32、V.33标准采用,并于1984年和1985年分别被用于有线高速语音9.6 kbit/s Modem (TC-32QAM)和14.4 kbit/s Modem (TC-128QAM)上,并且进入了市场^[7-8]。可以证明^[9],在AWGN环境下,应用TCM技术的Modem在2400 Hz通带内其信息传输速率达19.2 kbit/s,其频率利用率可达8 bit/s/Hz,大大提高了信道频带利用率。目前,该技术已经逐渐应用到了无线通信、微波通信、卫星通信以及移动通信等各个领域中,应用前景非常广阔。

收稿日期:2002-06-18

作者简介:杜兴民(1941-),男,安徽涡阳人,教授,主要从事通信与信息系统研究。

1 网格编码调制原理

传统方法是将调制与信道编码、解调与信道译码分开独立考虑设计。系统的误码率决定于信号序列之间的自由欧氏距离,编码的作用就是使该距离增加,但要通过引入冗余的比特来实现。由于解调器是在译码之前首先对接收信号进行独立的“硬”判决,于是必然会损失掉一部分信息,而损失的信息恰恰影响了系统可靠性的进一步提高。我们可以采用软判决译码,即译码器直接对调制信道的软输出抽样进行处理,以最小欧氏距离 $|r_n - \hat{a}_n|^2 = \min_{\{a_n\} \in C} \sum |r_n - a_n|^2$ 为度量进行 Viterbi 译码。其中的 $\{r_n\}$ 是接收信号序列的采样, $\{a_n\}$ 是发送序列, C 是所有编码信号序列组成的码字空间。译码就是在码字空间中确定一组编码信号序列 $\{\hat{a}_n\}$,使其最接近于接收到的序列 $\{r_n\}$ 。但是,由于 Hamming 距离与欧氏距离之间并不一定存在一一对应的单调映射关系,所以当一码字具有最大 Hamming 距离时并不一定具有最大的欧氏距离。最佳的编码调制系统应该按编码序列的欧氏距离为调制设计的量度。因此,应该将编码器和调制器当作一个整体进行综合设计,将冗余度映射至与频谱展宽不直接联系的调制信号参数扩展中,使得编码器和调制器级联后产生的编码信号具有最大的欧氏自由距离。从信号空间的角度看,这种最佳编码设计实际上是一种对信号空间的最佳分割。

TCM 是通过扩充调制信号集来提供纠错编码所需的冗余,从而避免了信息传输速率因其增加纠错编码而降低。TCM 通常是将信号集扩展,为纠错编码提供所需的冗余,以避免因编码而导致的信号带宽的增加。然后根据信号星座的对称性,把信号集分割为若干个子集。当数字信号输入时,在每一个编码调制间隔内,设有 m 个待传输的信息比特输入,其中的 $\bar{m} \leq m$ 比特通过一个码率为 $(\bar{m}/m + 1)$ 的二进制卷积编码器扩展成 $\bar{m} + 1$ 比特,这 $\bar{m} + 1$ 比特用来选择 $2^{\bar{m}+1}$ 个调制信号子集中的一个,剩下的 $m - \bar{m}$ 个未编码比特用来在所选定的子集中选择 $2^{m-\bar{m}}$ 个信号中的某一个,然后送入信道。TCM 编码器通用结构参见文献[3]。TCM 中,集分割是其核心。集分割通过不断地把信号集分割成较小的子集,使每个子集内的最小空间距离得到最大的增加。每一次分割都是把一个较大的信号集一分为二,各子集中信号点之间的 Euclid 距离随着分割次数的增加而加大, $\Delta_0 < \Delta_1 < \Delta_2 < \dots$, 经过 $\bar{m} + 1$ 次分割,直到 $\Delta_{\bar{m}+1}$ 大于或等于所需的自由距离为止。

2 多维 TCM 编码调制系统结构

1984 年 L. F. Wei 提出了克服相位模糊的旋转不变码后,人们对 TCM 的研究又转向了多维的领域。由信号设计的基本理论可知,多维编码调制是趋向 Shannon 极限的有效途径,因为在多维信号空间中有更多的设计自由度,容易提高其设计对称性,并且可以通过集分割来获得更精细的、合理的子集结构,从而既有利于进一步提高功率/频谱的利用率,又有利于旋转不变码的设计。

多维星座集的划分是基于重复划分串联的 2D 星座。4D 星座划分也是建立在此基础上的。4D 星座是由时间上串联的 2 个 2D 星座组成。每个 2D 星座 (MSED = d_0^2) 首先划分成 B_0 和 B_1 子集 (MSED = $2d_0^2$), 然后 B_0 和 B_1 再划分成 A 、 B 、 C 、 D 子集 (MSED = $4d_0^2$)。由这 4 个子集组成 16 个 4D 类型 (A 、 A), (A 、 B), \dots , (D 、 D), 每个 4D 类型的 MSED = $4d_0^2$ 。16 个 4D 类型可以组成 8 个 4D 子集: 0, 1, \dots , 7 (MSED = $4d_0^2$)。采用这种集划分结构能使格状编码器相对简单,同时可简化接收端的最大似然解码器,并能产生旋转不变码。

ABB128 TCM 调制系统就采用 4D 编码调制。它在每两个调制间隔传送 13 bit, 经 8 状态 2/3 卷积编码变成 14 bit, 其符号速率为 $155.52/13/2 \approx 23.92$ (Mbit/s)。编码调制结构框图见文献[11]。

多维 TCM 编码与二维 TCM 编码相比较,不仅减少了冗余比特的数量和 2D 星座的大小,而且使多维星座容易在每个调制间隔传送非整数的信息比特。

3 实用化 TCM (Pragmatic TCM) 方案

1989 年, Viterbi 和 Wolf 等人提出了“实用化 TCM” (Pragmatic TCM)。多数 TCM 码在设计方案时,为避

免过分复杂的结构,都选用了较小的状态数(4状态、8状态),而且不同的信号构造需要不同的TCM编译码器,没有通用的规范性,为此,Viterbi提出了统一实现不同 M 值的MPSK TCM方案($M=4,8,16$)。

这种P-TCM方案的主要优点有二:一是可以大大简化结构,使MPSK TCM的编译码过程规范化,有利于形成硬件芯片和工业标准;二是P-TCM码在AWGN上的性能与标准TCM相比下降很少。在 $P_e=10^{-5}$ 时,64状态的Ungerboeck TCM-8PSK获编码增益为3.6 dB,而64状态的P-TCM 8PSK方案获3.2 dB。

美国的Qualcomm公司于1992年率先生产出了基于P-TCM思想的实用化芯片——Q1875。该芯片内部包括了P-TCM编译码器,而且在编码器中使用了约束长度 $K=7$,编码率为 $1/2$ 的工业标准化的 $(2,1,7)$ 卷积码编码器^[10]。其一出现,便在直播卫星系统、微波点对点数据链路、高效宽带数字通信系统等获得了广泛应用。

4 TCM发展趋势

伴随着20世纪90年代以后先进的蜂窝数字移动、微蜂窝数字移动通信系统、个人通信技术、多媒体通信技术和CDMA技术的发展,TCM技术迎来了新一轮的发展势头,出现了许多新的研究领域和新的发展趋势。其中包括:BCM(Block-Coded Modulation)分组编码调制;TCM与扩频码分多址相结合;Ungerboeck TCM码在AWGN信道中研究的日趋完善;关于多重TCM在衰落的卫星、陆地等典型衰落信道中的研究等等。这些研究热点几乎主导了TCM应用研究的整个市场。

TCM是20世纪80年代在数字编码通信领域中取得的重大成果之一,对于高效可靠地进行信息传输具有划时代的意义。纵观TCM技术二十多年的发展历程,我们可以得到这样的启示:通过系统内部的组合优化,可以使系统的整体性能得到极大的提高。TCM对数字通信领域变革的影响广阔深远。TCM技术方兴未艾,正在迈向新的高峰。

参考文献:

- [1] Shannon C E, Weaver W. The Mathematical Theory of Communication[M]. University of Zuinois Press, 1949.
- [2] 王新梅, 肖国镇. 纠错码—原理与方法[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 1991.
- [3] Ungerboeck G. Channel coding with multilevel/phase signals [J]. IEEE Trans Information Theory, 1982, 28: 55-67.
- [4] Ungerboeck G. Trellis coded modulation with redundant signal sets - part I: introduction [J]. IEEE Communication Magazine, 1987, 25(2): 5-11.
- [5] Wei L F. Rotationally invariant convolutional channel coding with expanded signal space - Part I: 180 degrees [J]. IEEE SAC -2, 1984(5): 659-671.
- [6] Wei L F. Rotationally invariant convolutional channel coding with expanded signal space - Part II: Nonlinear codes [J]. IEEE SAC -2, 1984(5): 672-686.
- [7] V32. 1984. CCITT Rec[S].
- [8] V33. 1985. CCITT Rec[S].
- [9] 胡健栋. 一种提高信道利用率的高效编码调制方案—网格编码调制(TCM)[J]. 电信科学, 1994, 10(12): 16-19.
- [10] 和宏海. 格状编码调(TCM)技术[J]. 微波与卫星通信, 1997, (1): 49-52.

(编辑:姚树峰)

Application of Trellis - Coded Modulation on Digital Communication

DU Xing - min, JIANG Xu - yu

(The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China)

Abstract: This thesis reviews the historical background of the technology of Trellis - Coded Modulation, explains the theory and principle of TCM, puts forward the example of Multi - dimension TCM System which is named ABB128 TCM, briefly relates the theory of "Pragmatic TCM" and discusses the trend of the development of TCM.

Key words: Trellis - Coded Modulation; Multi - dimension TCM; Convolutional code