

一种构造 BCM 码的新方法

骆亚娟¹, 张 伟², 鞠德航²

(1. 西安电子科技大学通信工程学院, 西安 710071; 2. 航天总公司 504 所, 西安 710000)

摘 要: 由 Imai 与 Hirakawa 提出的多级编码方法, 可用来构造具有任意大最小平方欧氏距离的分组调制 (BCM) 码。一个 BCM 码的性能主要取决于构成它的各个成分码, 恰当地选择成分码是构造一个好的 BCM 码的关键。文章给出了一种新方法, 通过选用不同长度的成分码来构造 BCM 码。仿真结果表明用此方法构造出的 BCM 码较传统的 BCM 码在性能与复杂度上有明显的改善。

关键词: BCM; 欧氏距离; 多级级连译码

中图分类号: TN911.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2000) 01-0142-03

A New Method for Constructing BCM Codes

LUO Ya-juan¹, ZHANG Wei², JU De-hang²

(1. School of Communication Engineering, Xidian Univ., Xi'an 710071, China;

2. Xi'an Institute of Space Radio Technology, Xi'an 710000, China)

Abstract: Multilevel coding technique proposed by Imai and Hirakawa can be used to construct BCM code with arbitrarily large minimum squared Euclidean distance. The performance and complexity of a BCM code mainly depend on its component codes. To construct good BCM codes, a proper selection of component codes is of great importance. The paper presents a new method to construct BCM codes in which variant length block codes are used as component codes. Simulation results show BCM codes constructed by this method have better performance and complexity than conventional ones.

Key words: BCM; euclidean distance; multistage decoding

1 引言

BCM 码是由 Imai 与 Hirakawa 于 1977 年首次提出。对于这种码的构造是采用一种多级编码方法, 将二进制分组码与一调制信号集相匹配来实现。运用这种编码方案, 1986 年 Sayegh 在加性白高斯噪声 (AWGN) 信道上设计了一种最小欧氏距离意义上的最佳 BCM 码。随后, 许多在 AWGN 信道^[1]及衰落信道^[2]上的好码相继被构造出。夏威夷大学的 S. Lin 教授领导的研究小组还构造出了多维 BCM 码以及将 BCM 码作为内码与各种外码相级连的级连码^[3], 所有这些码有一个共同的特点, 那就是构成它的成分码的长度要求是相同的。而码长相同的二进制线性分组码并不能在码率、误码性能及复杂度方面提供很大的自由度。从而限制了 BCM 码性能与复杂度的进一步改善。本文给出了一种新的方法来构造 BCM 码, 在这种方法中, 用以构造 BCM 码的成分码可选用不同长度的二进制分组码, 构造出的 BCM 码 (GBCM 码) 较传统的 BCM 码在误码性能与复杂度上有较大的改善, 而且 GBCM 码更适合于采用多级级连译码方法进行译码。

2 BCM 码的构造

一个基于 8PSK 调制的通用 BCM 码编码器如图 1 所示。在此编码器中, 输入消息首先被分成三组, 每一组包括 k_i bit (1

$\leq i \leq 3$), 每一组 u_i 通过一个 (n, k_i) 编码器进行编码, 输出一个 n 长的二进制码字, 这些二进制码字 (称为成分码) 与 8-PSK 信号序列进行匹配后得到的 n 长的序列就是一个 8-PSK BCM 码。下面首先给出 BCM 码的一些距离参数的定义, 然后具体介绍一下这一构造过程。设 C 是一个 n 长的 BCM 码, 其码元取自于一个特定的调制信号空间 S , C 的误码率取决于以下几个距离参数:

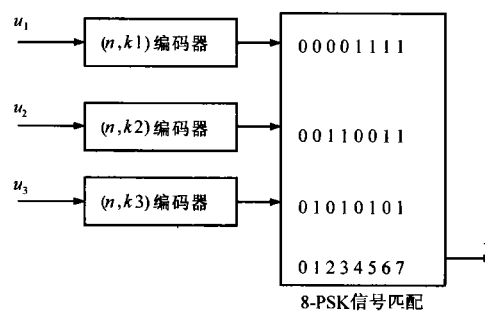


图 1 8-PSK BCM 编码器

(1) 最小平方欧氏距离 $d_{E[C]}^2 = \min\{d^2(x, y) : x, y \in C \text{ 且 } x \neq y\}$, 其中 $d^2(x, y)$ 表示两个码序列的平方欧氏距离。

(2) 最小汉明距离 $\delta_H[C]$ 定义为码字 C 中任意两个序

收稿日期: 1998-12-15; 修订日期: 1999-09-07

列汉明距离的最小值,其中汉明距离指的是两个序列中对应位不同的个数.

(3) 码字的最小乘积距离 $\Delta_p^2[C]$ 定义为汉明距为 $\delta_H[C]$ 的任意两个码字间乘积距离的最小值.

$$\text{乘积距离 } \Delta_p^2[x, y] = \prod_{\substack{k=1 \\ x_k \neq y_k}}^n d^2(x_k, y_k)$$

其中 $x, y \in C$, $d^2(x_k, y_k)$ 是 x 与 y 的第 k 个码元 x_k, y_k 的平方欧氏距离. 具体的讲, 一个 BCM 码的构造可分为 5 个步骤: (1) 选择调制信号集 S ; (2) 对 S 进行分割并用标记串对信号集进行标记; (3) 选择成分码; (4) 将成分码与 (2) 中信号标记所代表的集合对应起来; (5) 通过标记与信号点的匹配形成 BCM 码. 对信号集 S 的划分一般按照 Ungerboeck 提出的集分割规则^[4]进行, 经过集分割后, 2^m -PSK 信号集中的任何一个信号点都可用一个长为 m 的特定序列 $b(a_1, a_2, \dots, a_m)$ 来表示. 设在码的构造过程中采用分组码, 对于 $1 \leq i \leq m$, 让 A_i 表示一个长为 n 的线性分组码 (n, k_i, δ_i) , 维数为 k_i , 最小汉明距为 δ_i . 设

$$v^{(1)} = (v_1^{(1)}, v_2^{(1)}, \dots, v_n^{(1)}) \quad v^{(2)} = (v_1^{(2)}, v_2^{(2)}, \dots, v_n^{(2)}) \\ v^{(m)} = (v_1^{(m)}, v_2^{(m)}, \dots, v_n^{(m)})$$

分别是 A_1, A_2, \dots, A_m 中的 m 个码字, 构造下述 n 维码

$$v^{(1)} * v^{(2)} * \dots * v^{(m)} = (v_1^{(1)}, v_1^{(2)}, \dots, v_1^{(m)}, v_2^{(1)}, v_2^{(2)}, \dots, v_2^{(m)}, \dots, v_n^{(1)}, v_n^{(2)}, \dots, v_n^{(m)})$$

对于 $1 \leq j \leq n$, 取 $v_j^{(1)} v_j^{(2)} \dots v_j^{(m)}$ 为 2^m -PSK 信号集中信号点的标号, 用 $\lambda(\cdot)$ 表示标号与相应信号点间的匹配, 即 $\lambda(v_j^{(1)} v_j^{(2)} \dots v_j^{(m)}) = s_j$, 则

$$\lambda(v^{(1)} * v^{(2)} * \dots * v^{(m)}) = (\lambda(v_1^{(1)} v_1^{(2)} \dots v_1^{(m)}), \lambda(v_2^{(1)} v_2^{(2)} \dots v_2^{(m)}), \dots, \lambda(v_n^{(1)} v_n^{(2)} \dots v_n^{(m)}))$$

是一个 n 长的 2^m -PSK 信号序列.

设 $C = \lambda[A_1 * A_2 * \dots * A_m] = \{\lambda(v^{(1)} * v^{(2)} * \dots * v^{(m)}) : v^{(1)} \in A_1, v^{(2)} \in A_2, \dots, v^{(m)} \in A_m\}$, 则

C 是一个长为 n 的 m 级 2^m -PSK 分组调制码, 维数为 $k_1 + k_2 + \dots + k_m$.

一个 m 级 2^m -PSK 分组调制码 $C = \lambda[A_1 * A_2 * \dots * A_m]$ 的距离参数可以由其成分码的最小汉明距离来表示, 取 $d_E^2[C]$ 、 $\delta_H[C]$ 、 $\Delta_p^2[C]$ 分别表示码字 C 的最小平方欧氏距离、最小汉明距离、最小乘积距离, 则

$$(1) d_E^2[C] = \min\{\delta_i d_i : 1 \leq i \leq m\}.$$

$$(2) \delta_H[C] = \min\{\delta_i : 1 \leq i \leq m\}.$$

(3) 设 k 是集合 $I = \{1, 2, \dots, m\}$ 中满足 $\delta_k = \delta_H[C]$ 的最小正整数, 则

$$\Delta_p^2[C] = (d_k)^{\delta_k}$$

其中 d_1, d_2, \dots, d_m 分别为分割链 2^m -PSK/ 2^{m-1} -PSK/ \dots /QPSK/BPSK 的集内距离

(4) 编码效率 $R[C]$ 定义为每维信号所传送的平均信息

$$R[C] = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^m k_i$$

对于 (1) 的证明可在文 [5] 中得到. 以上这些距离参数为在

AWGN 信道及衰落信道中好的 BCM 码的构造提供了一种构造准则. 在 AWGN 信道中, 由于一个 BCM 码的误码性能主要取决于它的最小平方欧氏距离, 此时 (1) 提供了好码的构造准则. 在瑞利衰落信道中, BCM 码的误码性能主要由最小乘积距离和最小汉明距离决定, 因此要求这两个距离要尽可能大. 对于一个给定的距离参数, 构造的关键就是要选择各级成分码, 使构造的 BCM 码具有尽可能大的编码效率、小的译码复杂度以及路径复杂度.

3 GBCM 码的构造

设 C_1, C_2, \dots, C_l 是具有不同码长的 l 个线性分组码 $(n_1, k_1, \delta_1), (n_2, k_2, \delta_2), \dots, (n_l, k_l, \delta_l)$. 取 $N = \text{LCM}(n_1, n_2, \dots, n_l)$ 由 C_i 中的 N/n_i 个码字相级连构成一个 N 长的二进制序列

$$v_N^{(i)} = (v_{i1}, \dots, v_{in_i}, v_{i(n_i+1)}, \dots, v_{i(2n_i)}, \dots, v_{i(N-n_i+1)}, \dots, v_{iN})$$

设 C_i^N 表示所有码序列的集合 $\{v_N^{(i)}\}$, 则 C_i^N 可看作是一线性分组码 $(N, N \cdot (k_i/n_i), \delta_i)$, 它是由 (N/n_i) 个 C_i 中的码字级联得到. 一个长为 N 的多级 BCM 码 C^N 可由组成它的 l 个二进制线性分组码 $C_1^N, C_2^N, \dots, C_l^N$ 按 $C^N = C_1^N + 2C_2^N + \dots + 2^{l-1}C_l^N$ 构成, 其中任一个码字

$$v_N = v_N^{(1)} + 2v_N^{(2)} + \dots + 2^{l-1}v_N^{(l)}$$

设 $S_{2^l\text{-PSK}}^N$ 为 $S_{2^l\text{-PSK}}$ 上的所有 N 维向量之集合, 则多码级 C 是 $S_{2^l\text{-PSK}}^N$ 的一个子集, 其信息位 $K = N \sum_{i=1}^l \frac{k_i}{n_i}$. 编码效率

$$R[C] = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^l \frac{k_i}{n_i}. \text{ 最小汉明距 } \delta_{\min} = \min\{\delta_i, 1 \leq i \leq l\}. \text{ 最小平方欧氏距 } d_{\min} = \min\{\delta_i d_{i-1}, 1 \leq i \leq l\}.$$

对于 GBCM 的译码有两种方法: 最大似然译码 (MLVD) 与多级级联译码 (MSSD). 采用 MLVD 时, 译码是基于每一级的序列长度为 N 时的 BCM 码的网格图, 由于 N 大于等于任何一个成分码的码长, 因而译码器所需的存储器数加大, 复杂度增加. 当选用 MSSD 时, 由于译码器对于 BCM 码的译码是分级进行的, 第 i ($1 \leq i \leq l$) 级的译码是基于本级成分码的网格图, 每执行一次译码操作, 将译得的信息及二进制码字存储, 直到 N 长的接收序列全部译完, 将得到的二进制码字连同上 $i-1$ 级译码得到的二进制码字送入下一级进行译码, 因而如果恰当地选择每一层成分码, 则可保证译码复杂度减小, 同时误码性能不是太差, 第 i 级译码得到的二进制序列为:

$$v_N^{(i)} = (v_{i1}, \dots, v_{in_i}, v_{i(n_i+1)}, \dots, v_{i(2n_i)}, \dots, v_{iN})$$

由于成分码采用线性码, 所以对于它的分解是唯一的. 采用 MSSD 方法时的译码复杂度定义为:

$$\Gamma = \sum_{i=1}^l M_i \cdot 2^{S_i} \cdot N_u^{(i)}.$$

其中: M_i 表示第 i 个成分码的译码深度, 当成分码采用线性分组码 (n_i, k_i, δ_i) 时, $M_i = n_i$; $N_u^{(i)}$ 为第 i 个成分码的状态个数; 2^{S_i} 表示在第 i 个成分码的网格图中从一个状态出发的不同分支数.

例 1 三级成分码 C_1, C_2, C_3 分别为 $(8, 1, 8), (8, 7, 2),$

(8,7,2)的8状态8-PSK BCM码的编码效率 $R[C] = 0.9375$ 。为了避免带宽扩展,可用(8,2,4)码作为第一级成分码,此时构造的 BCM码的编码效率 $R[C] = 1$ 但其译码复杂度却增加了一倍。当第一级成分码用(4,1,4)重复码时上述问题得到解决。得到的 GBCM码编码效率为1,最小平方欧氏距为2.344。

表1列出了所构造的 GBCM码及其性能指标,并将它们同 BCM码进行了比较。图2表示对这些码在 AWGN信道中进行仿真时所得结果。由图可见, M_1 码与 M_2 码的误码率曲线很接近,这是因为这两个码有相同的最小平方欧氏距,但 M_2 码的译码复杂度小于 M_1 码。 M_4 码的误码性能明显优于 M_3 码,且其译码复杂度小。

表 1

码字 C	二进制成分码	N	$d^2(C)$	$R[C]$	Γ	Φ
M_1	(8,2,4)(8,7,2)(8,7,2)	8	2.344	1	128	45°
M_2	(4,1,4)(8,7,2)(8,7,2)	8	2.344	1	90	45°
M_3	$RM_{4,1}(16,15,2)(16,16,1)$	16	4.688	1.125	352	45°
M_4	(16,1,16)(8,7,2)(8,7,2)	16	8	0.9063	192	45°

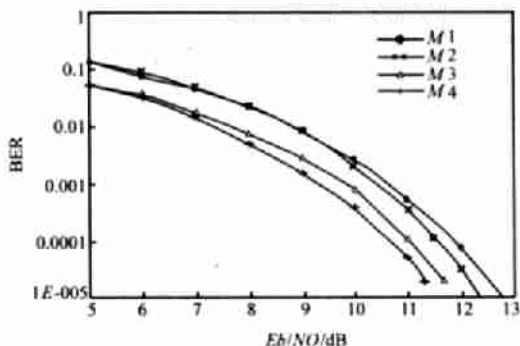


图 2

4 结论

本文提出了一种新方法构造 BCM码。在 AWGN信道中的仿真结果表明 GBCM码在性能与复杂度上较传统的 BCM码有较大的改善。

参考文献

- [1] T. Kasama, T. Takata and S. Lin. On multilevel block modulation codes. IEEE Trans. Inform. theory, Vol IT-37, Jul. 1991
- [2] L. Zhang and B. Vucetic. Bandwidth efficient block codes for Rayleigh fading channels. Electronics Letters, IEE, 1st March 1990, 26(5)
- [3] T. Kasami, T. Takata, T. Fujiwara, and S. Lin. A concatenated coded modulation scheme for error control. IEEE Trans. Commun., June 1990, 38(6):752~763
- [4] G. Ungerboeck. Channel coding with multilevel/phase signal. IEEE Trans. Inform. Theory, 1982, IT-28:55~67
- [5] T. Kasami, T. Takata, T. Fujiwara and S. Lin. IEICE Trans. Fundamentals electronics, Commun. Comput. Sciences, Sept. 1993, E76-A(9): 1411~1421



骆亚娟 1975年生,1995年在西安电子科技大学获得学士学位,同年开始通信与电子系统的硕博连读,主要研究领域为信道编码中的编码调制一体化技术。



张伟 1956年生,1992年获华南理工大学工学博士学位,1994年~1996年在加拿大 McMaster大学通信实验室作博士后研究,现任航天工业总公司第五研究院第504研究所所长,主要研究领域为信息传输与处理。



鞠德航 1933年生,研究员,博士生导师,西安电子科技大学、哈尔滨工业大学兼职教授,主要从事卫星通信、遥感和测控工程方面的科研工作。