BCM 的多阶段译码算法

任 杰 苗俊刚 张会生 陈正康

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191) (西北工业大学 电子信息学院, 西安 710072)

摘 要: 针对在某些通信系统中对译码速度较高的需求,基于分组编码调制(BCM, Block Coding Modulation)的多级结构,给出了一种多级 BCM 的多阶段译码算法:从 BCM 中第一级分量码开始,根据 BCM 的级数逐阶段进行译码,针对每级分量码,采用软判决最大似然译码,直到最后一级分量码,从而降低了译码复杂度. 仿真结果表明,与传统 Viterbi 译码算法相比,提出的多阶段译码算法的误码性能与其相当,信噪比较小时甚至更好,但译码复杂度远低于传统 Viterbi 译码方法.

关 键 词: 多级 BCM; 多阶段译码; 误码性能; 译码复杂度

中图分类号: TN 911.22

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2014)01-0131-04

Multistage decoding algorithm of block coding modulation

Ren Jie Miao Jungang

(School of Electronic and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Zhang Huisheng Chen Zhengkang

(School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Considering relatively higher requests of complexity of decoding algorithms due to the demand of higher decoding speed in some telecommunication systems, a multistage decoding algorithm was given based on the multilevel structure of block coding modulation (BCM). Each stage of the algorithm refers to decoding of each component code in BCM: From the first component code to the last one, each component code was decoded by a soft-decision decoder based on the judgment of the maximum likelihood progressively, thus the decoding complexity was decreased. As is illustrated in the results of the simulation, the error performance of the system applying this algorithm is approximately the same as the error performance of the system applying the Viterbi decoding algorithm, and the former is even much better than the latter when the signal-noise ratio is relatively lower, while the decoding complexity of the former is much lower than that of the latter.

Key words: multilevel structure of BCM (block coding modulation); multistage decoding algorithm; error performance; decoding complexity

分组编码调制(BCM, Block Coding Modulation)码是将编码与调制作为整体考虑的带宽有效码,可以明显地改善编码系统的性能. 系统传输误码率取决于信号之间的欧氏距离,而在 BCM 中,编码信号映射成多进制已调信号,从而使欧氏距离增加,改善系统误码性能. 对 BCM 译码技术的研究,其主要目的在于选择某种意义上的 BCM 最佳译码方案,使得系统误码性能达到最佳. 这一优势使 BCM 在通信可靠性研究中得以广泛应用[1-3].

一种常用的 BCM 译码方法是 Viterbi 译码算法. Viterbi 译码算法用于从离散无记忆信道上接收到序列,采用迭代方法处理该序列,找出通过网格图的最大似然路径,即幸存路径. 在每个时间单

收稿日期: 2013-03-18; **网络出版时间**: 2013-09-23 11:42

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20130923.1142.001.html

作者简介: 任 杰(1989-),女,河南濮阳人,硕士生,kellyrjp@gmail.com.

元,它把所有分支量度加到每个单元前面存储的路径量度上,比较进入每一状态的所有路径的量度,选择幸存路径,在每个状态的幸存路径就和其量度一起存储下来.在最后一个时间单元,只有一个状态,因而仅有一条幸存路径,此路径就是要求的最大似然路径[4-6].研究表明这种译码算法能使系统获得较好的编码增益,并且明显改善系统的误码性能.但因为每次只能对一个序列进行Viterbi译码,对于N级BCM,就要进行$(1+2+\cdots+N)$次Viterbi译码.对于较长的BCM,Viterbi译码算法往往过于复杂,工程上较难实现[7-8].

在某些通信系统中,对译码速度要求较高,译码算法就不能太复杂.针对这种应用情况,本文基于BCM的多级结构,给出了一种新的多阶段译码算法:算法从BCM中第一级分量码开始,根据BCM的级数逐阶段进行译码,针对每级分量码,采用软判决最大似然译码,直到最后一级分量码.如此,可降低译码复杂度.

1 BCM码的构造

BCM是一种多级分组调制,BCM构造旨在选择各级成分码,使所构造的BCM在码率、误码性能和译码复杂度之间达到最佳折衷[7,9].

在加性高斯白噪声(AWGN,Additive White Gaussian Noise)信道中,调制码的误码性能主要依赖于其最小平方欧氏距离与路径重数.多级编码能够系统地构造具有任意大距离参数的带宽有效调制码.它采用汉明距离分量码(即分组码),并通过信号集分割进行恰当的比特-信号映射,具有通过优化给定信道调制码的距离参数来得到最优性能的灵活性.因此适当的运用多级编码方法,可以使编码输出的信号点具有较大的最小平方欧氏距离,继而改善系统的误码性能[1,10].

本文以3级8相相移键控(8PSK,8 Phase Shift Keying)BCM为对象,给出了BCM的构造流程图如图1所示.

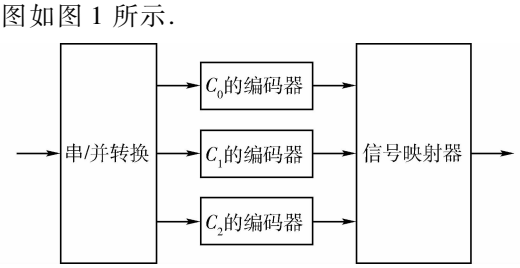


图1 BCM的构造流程

在图1所示的BCM构造中,编码方式是对信源输出进行串/并转换后,采用多级编码技术,依次进行线性分组码编码,并采用8PSK信号映射[6,9].图2示出了8PSK分割链及其信号标记.

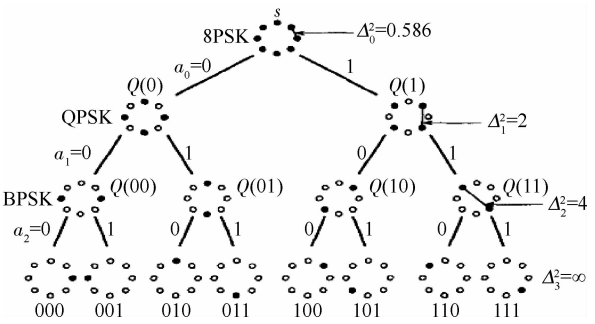


图2 8PSK分割链与信号标记

对于比特-信号映射,每个8PSK信号集由一个3 bit的基于三级二进制分割链8PSK/QPSK/BPSK/{0}的序列标记.s中标签第一位是a_0的信号点组合构成一个四相相移键控(QPSK,Quadrature Phase Shift Keying);s中标签前两位是a_0a_1的信号点组合构成一个二进制相移键控(BPSK,Binary Phase Shift Keying).由此,信号集分割和信号标记过程定义了一个一一映射,它把每个标签映射成相应的信号点s.考虑到系统误码性能的改善需要BCM编码过程提供信号点间较大的最小平方欧式距离,在选择C_0,C_1,C_2 3种分量码时,需要保证3种码的纠检错性能逐一下降.

为了降低线性分组码编码的译码复杂度,分别将3个线性分组码选择为:

C_0:由全零和全一向量组成的(8,1,8)重复码;

C_1:由所有偶数重量的8维向量组成的(8,7,2)单奇偶校验码;

C_2:由所有8维向量构成的(8,8,1)普通码.

在这组线性分组码中,C_0具有最理想的纠检错性能,C_1次之,C_2再次之.

2 多级BCM的多阶段译码方法

为降低译码复杂度,本文基于BCM的多级结构,提出一种新型多阶段译码算法.对应第1节中构造的三级BCM,提出的多阶段译码算法分为三阶段,即构成三级BCM的三阶段译码器.每次一个分量码,逐阶段进行.在每级分量码,即线性分组码的译码时,采用软判决最大似然译码方法.每一阶段的译码信息传递到下一阶段.译码过程从第一级分量码开始,最后一级分量码结束.

前节构造的长度为n的三级8PSK BCM码表示为:$C=f[C_0\times C_1\times C_2]$.

令$r=(r_0,r_1,\cdots,r_{n-1})$为8PSK调制器输出

端的接收序列,其中

$$r_i = (x_i, y_i) \in \mathbf{R}^2 \quad 0 \leqslant i < n \tag{1}$$

2.1　第 1 阶段译码

令 $v_0 = (v_{0,0}, v_{0,1}, \cdots, v_{0,n-1})$ 是 C_0 的一个码字, $d_E^2[r_i, Q(v_{0,i})]$ 是第 i 个接收信号和 $Q(v_{0,i})$ 中信号点之间的最小平方欧氏距离.

接收序列 r 和码字 v_0 之间的平方欧氏距离定义为

$$d_E^2[r, v_0] = \sum_{i=0}^{n-1} d_E^2[r_i, Q(v_{0,i})] \tag{2}$$

对每个码字 $v_0 \in C_0$,计算距离 $d_E^2[r, v_0]$,并把 r 译成使 $d_E^2[r, \hat{v}_0]$ 最小的码字 $\hat{v}_0 = (\hat{v}_{0,0}, \hat{v}_{0,1}, \cdots, \hat{v}_{0,n-1})$,即 C_0 的译码.

2.2　第 2 阶段译码

第 1 阶段译码的译码信息序列 $\hat{v}_0$ 传递到第 2 阶段.

令: $v_1 = (v_{1,0}, v_{1,1}, \cdots, v_{1,n-1})$ 表示 C_1 中的一个码字, $d_E^2[r_i, Q(\hat{v}_0, v_{1,i})]$ 表示第 i 个接收信号 r_i 和 $Q(\hat{v}_0, v_{1,i})$ 中信号点之间的最小平方欧氏距离.

对 $v_1 \in C_1$ 的每个码字,计算距离:

$$d_E^2(r, \hat{v}_0 \times v_1) = \sum_{i=0}^{n-1} d_E^2[r_i, Q(\hat{v}_{0,i} v_{1,i})] \tag{3}$$

把 r 译成 C_1 中使 $d_E^2(r, \hat{v}_0 \times v_1)$ 最小的码字 $\hat{v}_1$, 即 C_1 的译码.

2.3　第 3 阶段译码

第 1 阶段和第 2 阶段的译码信息 $\hat{v}_0$ 和 $\hat{v}_1$ 传递给第 3 阶段译码.

对满足 $v_2 \in C_2$ 的每个码字,计算距离:

$$d_E^2(r, \hat{v}_0 \times v_1 \times v_2) = \sum_{i=0}^{n-1} d_E^2[r_i, Q(\hat{v}_{0,i} \hat{v}_{1,i} \hat{v}_{2,i})] = \sum_{i=0}^{n-1} d_E^2[r_i, f(\hat{v}_{0,i} \hat{v}_{1,i} \hat{v}_{2,i})] \tag{4}$$

把 r 译成使 $d_E^2(r, \hat{v}_0 \times v_1 \times v_2)$ 最小的码字 $\hat{v}_2 \in C_2$,即 C_2 的译码.

$\{\hat{v}_0, \hat{v}_1, \hat{v}_2\}$ 构成了译码组合.

对于 N 级 BCM,不同于 Viterbi 译码算法要进行 $(1 + 2 + \cdots + N)$ 次译码,采用多阶段译码算法只需进行 N 次译码. 因此对于长 BCM,和 Viterbi 译码算法相比,多阶段译码算法明显降低了译码复杂度.

3　仿真结果及分析

本节以 MatLab 为平台,分别对采用 Viterbi 译码算法、多阶段译码算法以及不经过 BCM 编译码,即只经过 QPSK 数字调制与解调的通信系统进行了仿真.

仿真环境:信道假设为 AWGN 信道,即只考虑加性高斯白噪声带来的影响;所用编码为长度 $n = 8$ 的三级 8PSK BCM 码 $C = f[C_0 \times C_1 \times C_2]$,其中

C_0 :由全零和全一向量组成的(8,1,8)重复码;

C_1 :由 GF(2)域上所有偶数重量的 8 维向量组成的(8,7,2)单奇偶校验码;

C_2 :由 GF(2)域上所有 8 维向量组成的(8,8,1)普通码.

总的信息位数目是 $k = 1 + 7 + 8 = 16$. 因此, C 的频谱效率 $\eta[C] = 16/8 = 2$ bit/符号.

对译码结果与原信源输出进行对比求得误比特率,绘出误比特率与对应信噪比间的关系曲线[3].

仿真结果如图 3 所示.

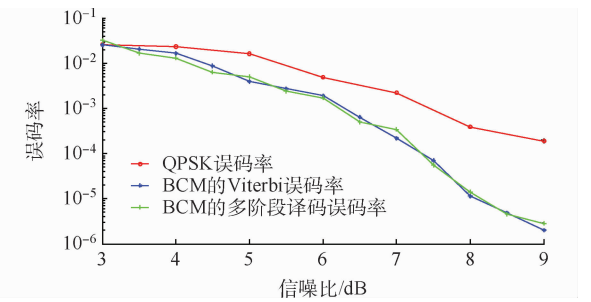


图 3　3 种系统误码率对比图

由仿真结果可见: 相对非编码的 QPSK,在所有信噪比情况下,多阶段译码算法与 Viterbi 译码算法都可获得比 QPSK 更大的编码增益;而采用多阶段译码算法与 Viterbi 译码算法获得的编码增益则呈现如下情况.

1) 信噪比 $4.8 < E_s/N_0 < 6.7$ 及 $7.3 < E_s/N_0 < 8.5$时,采用多阶段译码算法与 Viterbi 译码算法获得的编码增益基本相同;

2) $3 < E_s/N_0 < 4.8$ 时,采用多阶段译码算法比采用 Viterbi 译码算法获得更大的编码增益:如误码率为 10^{-2} 时,采用多阶段译码算法获得将近 1.5 dB 的编码增益,而 Viterbi 译码算法仅能获得将近 1dB 的编码增益;

3) $6.7 < E_s/N_0 < 7.3$ 时,采用 Viterbi 译码算法比采用多阶段译码算法能获得更大的编码增益.

但总的来说,采用多阶段译码算法与 Viterbi 译码算法获得的编码增益大致相当,误码性能差

不太多. 笔者尝试其他分量码组合在 AWGN 信道中进行仿真,仿真结果大致相同,证明此译码算法稳定性较强[8,11-12].

4 结束语

本文基于 BCM 的多级结构提出了 BCM 的多阶段译码算法. 对于 N 级 BCM,采用多阶段译码算法只需进行 N 次译码;而 Viterbi 译码算法需进行$(1+2+\cdots+N)$次译码. 且仿真结果表明,该算法与传统 Viterbi 译码算法误码性能大致相当. 因此针对长 BCM,虽然信噪比较高($6.7 < E_s/N_0 < 7.3$)时使用多阶段译码算法的系统误码性能略差于 Viterbi 译码算法;但在保证误码性能的前提下,该算法复杂度较低,更易于工程实现. 本文构造的是 $N=3$ 的 BCM,若 N 更大,多阶段译码算法将大幅度减少译码次数,从而大大降低译码复杂度. 因此,针对长 BCM,尤其信噪比较低情况下,多阶段译码算法具有重要的应用价值.

参考文献 (References)

[1] 林舒,Costello D J. 差错控制编码[M]. 2 版. 北京:机械工业出版社,2007:267-296,703-720
Lin Shu, Costello D J. Error control coding [M]. 2 nd ed. Beijing: China Machine Press, 2007: 267-296, 703-720 (in Chinese)

[2] Wu T M, Hou Y F. Noncoherent UWB with block coded modulation in cooperative communications systems [C]//Digest of Technical Papers-IEEE International Conference on Consumer Electronics. Piscataway, NJ: IEEE, 2012: 1-4

[3] Simões Jr R R, Gomes G G R. Low complexity BCM for wireless applications with different codeword lengths [C]//SympoTIC'06-Joint IST Workshop on Sensor Networks and Symposium on Trends in Communications. Piscataway, NJ: IEEE, 2006: 20-23

[4] 张昊. LDPC 码及其在编码调制系统中的研究与应用[D]. 上海:复旦大学,2008
Zhang Hao. Study and application on LDPC codes in coding modulation systems[D]. Shanghai: Fudan University, 2008 (in Chinese)

[5] 王俊萍. 分组编码调制技术译码算法的研究[D]. 大连:大连理工大学,2010
Wang Junping. Study on decoding algorithm of block coded modulation [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010 (in Chinese)

[6] Liang H. Combining block-coded modulation codes and improved constellation extended schemes to reduce peak-to-average power ratio in orthogonal frequency-division multiplexing systems[J]. Communications, IET, 2012, 6(16): 2705-2714

[7] 张霖. 基于迭代系统的 LDPC 码编译码器的设计与实现[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011
Zhang Lin. Study and implementation on LDPC coder and decoder based on iterated systems [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011 (in Chinese)

[8] 曾雷杰,孔庆芸,秦晓红,等. Matlab 基础教程[M]. 2 版. 北京:清华大学出版社,2011:22-203
Zeng Leijie, Kong Qingyun, Qin Xiaohong, et al. Matlab fundamental tutorial[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2011: 22-203 (in Chinese)

[9] 罗晶文. LTE 系统中 Turbo 码的研究与实现[D]. 北京:北京邮电大学,2010
Luo Jingwen. Study and implementation on Turbo code in LTE systems[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunication, 2010 (in Chinese)

[10] 樊昌信,曹丽娜. 通信原理[M]. 6 版. 北京:国防工业出版社,2006:151-163
Fan Changxin, Cao Lina. Communication theories[M]. 6th ed. Beijing: China Machine Press, 2006: 151-163 (in Chinese)

[11] Kasami T, Lin S. On the probability of undetected error for the maximum distance separable codes [J]. IEEE Communications Society IEEE Trans Commun, 1984: 998-1006

[12] van Nobelen R, Taylor D P. Analysis of the pairwise error probability of noninterleaved codes on the Rayleigh-fading channel [C]//IEEE Transactions on Communications. Piscataway, NJ: IEEE, 1996, 44(4): 456-463