

比特交织编码调制迭代译码联合迭代载波相位和信道估计算法

崔鹏辉*, 杨育红, 曾祥峰

(信息工程大学 信息工程学院, 郑州 450002)

(* 通信作者电子邮箱 cuisean@163.com)

摘要:针对 16APSK 信号,提出一种比特交织编码调制迭代译码(BICM-ID)联合迭代载波相位和信道估计算法。该算法基于最大似然估计算法,利用 BICM-ID 译码产生的硬判决信息,通过迭代的方式在相位估计、信道估计和译码之间交换信息,从而实现相位估计、信道估计和译码的联合处理。在误码率为 10^{-4} 时,该算法与理想性能曲线仅相差 0.5 dB 左右;算法能够估计的相差范围为 $[-20^\circ, 20^\circ]$ 。

关键词:比特交织编码调制迭代译码;16APSK 信号;相位估计;信道估计;最大似然估计

中图分类号: TN911 **文献标志码:** A

Iterative carrier phase and channel estimation algorithm in BICM-ID

CUI Peng-hui*, YANG Yu-hong, ZENG Xiang-feng

(Institute of Information Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou Henan 450002, China)

Abstract: This paper proposed an iterative carrier phase and channel estimation algorithm for 16APSK in Bit-Interleaved Coded Modulation with Iterative Decoding (BICM-ID). The algorithm was based on Maximum Likelihood (ML) estimation, which made use of the decision information provided by the decoder and exchanged information between phase, channel estimation and decoder through iteration, so as to combine phase, channel estimation with decoder. The simulation results show the algorithm can get the performance only 0.5 dB lower than the ideal one, and can effectively estimate the phase difference from -20 degree to 20 degree.

Key words: Bit-Interleaved Coded Modulation with Iterative Decoding (BICM-ID); 16APSK signal; phase estimation; channel estimation; Maximum Likelihood (ML) estimation

0 引言

比特交织编码调制(Bit-Interleaved Coded-Modulation, BICM)^[1-2],通过在编码和调制之间引入比特交织器将纠错码和星座映射相结合,能够获取更高的分集度,改善比特误码率(Bit Error Rate, BER)性能。其译码采用比特交织编码调制迭代译码(Bit-Interleaved Coded Modulation with Iterative Decoding, BICM-ID)^[3-4]方案,BICM-ID 是利用软输入软输出(Soft Input Soft Output, SISO)^[5]和比特交织在解调和译码之间建立的迭代处理模型,进一步可以联合迭代同步算法^[6]、信道估计算法^[7-8],从而大幅度提升系统的可靠性。BICM-ID 由于复杂度低、灵活性强等优点受到广泛关注,如 4G、IEEE802.11n。

文献[9]研究了基于低密度奇偶校验码(Low Density Parity Check Code, LDPC)的迭代载波相位同步算法。文献[10]研究了基于块衰落信道的迭代盲信道估计算法。本文结合以上思想,针对幅度相位联合调制的 16APSK^[11-12]信号提出 BICM-ID 联合迭代载波相位和信道估计算法。

1 BICM-ID 方案

BICM-ID 译码方式有两种:一种是硬判决反馈译码;另一种是软判决反馈译码。硬判决反馈译码复杂度低,但存在反馈误差,会导致一定的性能损失。软判决反馈译码可以提高性能,但复杂度增加。本文采用硬判决反馈译码,结构如图 1

所示。

在 BICM-ID 译码阶段,由于存在比特交织器,真正的最大似然译码需要联合解调和译码,使得译码过程过于复杂而难以实现。BICM-ID 采取一种次佳的方法,即将解调和译码作为两个独立的步骤,然后利用比特交织在解调和译码间进行迭代处理。

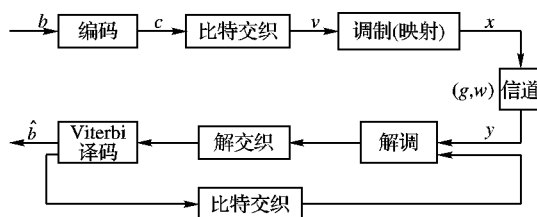


图1 BICM-ID 硬判决反馈

对接收到的信号 y , 首先利用最大后验概率(Maximum A Posteriori probability, MAP) 准则计算编码比特矩阵 \mathbf{A} , 如式(1)^[3] 所示:

$$\mathbf{A}(v^i = b) = \log \sum_{x \in \chi(i, b)} P(x | y) \sim \log \sum_{x \in \chi(i, b)} P(y | x) P(x) \quad (1)$$

其中: $P(y | x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(y-x)^2}{2\sigma^2}\right)$; 信号集为 $\chi(i, b) = \{\mu([v^1, v^2, v^3, v^4]) | v^i = b\}$, 对 16 APSK 而言, 星座如图 2 所示, 每个接收信号需要计算 8 个比特矩阵。在首轮译

码中,假设发送符号等概率,将每比特的2个软信息值 $\lambda(v^i = b)$ 解交织后,送入维特比译码器进行译码,至此首轮译码结束。然后将译码输出重新编码、交织、映射作为先验信息反馈至解调端,更新比特矩阵从而进行迭代处理。

例如,为了计算 $\lambda(v^1 = 1)$,对任何 $x = \mu(v^1 = 1, v^2, v^3, v^4) \in \chi(1, 1)$,有:

$$P(x) = \begin{cases} 1, & \text{若 } v^1 = 1, v^2 = \hat{v}^2, v^3 = \hat{v}^3, v^4 = \hat{v}^4 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

其中 \hat{v}^2, \hat{v}^3 和 \hat{v}^4 是前一轮的判决,更新比特矩阵如下:

$$\lambda(v^1 = 1) = -\|y - g \cdot \mu(1, \hat{v}^2, \hat{v}^3, \hat{v}^4)\|^2 \quad (3)$$

这里,假设先前译码结果都是正确的。

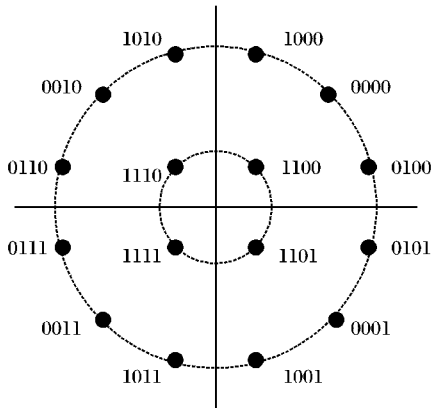


图2 16APSK映射

2 BICM-ID 联合迭代算法

如图3所示,发送端,信源 b 经过卷积编码成 c ,比特交织后映射为16 APSK符号 x ,送入信道。在传输过程中发生衰减和相移,同时受到加性高斯白噪声的干扰。 g 为衰落系数, $g = [g_1, g_2, \dots, g_N]$ 独立同分布于Rayleigh分布,且 $E[g_i^2] = 1$, φ 为相差, w 为0均值,方差 σ^2 的高斯白噪声。接收端,接收数据 y 解调出比特概率软信息解交织后输入SOVA译码器,译码产生的软信息经硬判决后重新编码、交织、映射成符号 \tilde{x} 和接收数据 y 通过本文算法进行迭代相位和信道估计,迭代一定次数后硬判决输出译码结果 \hat{b} 。

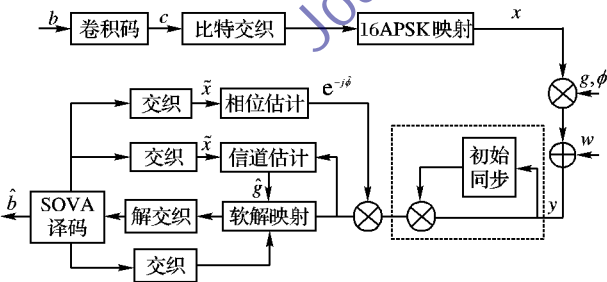


图3 BICM-ID 联合迭代

假设在接收端,接收到信号序列为:

$$y = gx e^{j\varphi} + w \quad (4)$$

其中 $\theta = (\varphi, g)$ 为待估参数。最大似然(Maximum Likelihood, ML)估计 $\hat{\theta}$ 可表示为^[9]:

$$\hat{\theta} = \arg \max_{\theta} \ln p(y | \theta) \quad (5)$$

其中 $p(y | \theta) = \int_x P(x) p(y | \theta, x) dx$ 为似然函数,根据文献[13],式(5)可以写成:

$$\int_x P(x | y, \theta) \frac{\partial}{\partial \theta} \ln p(y | \theta, x) dx \Big|_{\theta=\hat{\theta}} = 0 \quad (6)$$

采用迭代算法进行求解:

$$\int_x P(x | y, \theta^{(k-1)}) \frac{\partial}{\partial \theta} \ln p(y | \theta, x) dx \Big|_{\theta=\hat{\theta}^{(k)}} = 0 \quad (7)$$

该算法和EM算法^[14-15]等效,收敛于ML估计。由式(6)知, y 服从高斯分布,均值为 $gx e^{j\varphi}$,方差为 $\sigma^2 I$,得到:

$$\ln p(y | \theta, x) = -\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^N |g x_i e^{j\varphi} - y_i|^2 \quad (8)$$

其中 N 为接收数据长度,将式(8)代入式(7),根据EM算法推导得:

$$\hat{\varphi}^{(k)} = \arg \left(y^T \tilde{x} \left(\hat{\varphi}^{(k-1)}, \hat{g}^{(k-1)} \right) \right) \quad (9)$$

$$\hat{g}^{(k)} = \frac{\text{Re} \left(\tilde{x} \left(\hat{\varphi}^{(k-1)}, \hat{g}^{(k-1)} \right) \cdot y e^{-j\hat{\varphi}^{(k)}} \right)}{\tilde{x} \left(\hat{\varphi}^{(k-1)}, \hat{g}^{(k-1)} \right) \cdot \tilde{x} \left(\hat{\varphi}^{(k-1)}, \hat{g}^{(k-1)} \right)}, \quad (10)$$

该算法在BICM-ID解调译码联合处理的基础上,只需对发端符号估计 \tilde{x} 和接收信号 y 进行简单的相关运算,在复杂度增加不大的情况下,使相位估计和信道估计参与解译联合迭代处理过程,对相差和衰落系数进行有效补偿。相比传统分层接收,该算法无需单独的相位估计和信道估计模块,复杂度降低,而且能够利用译码的纠错性能,更加充分地挖掘信息之间潜在的关联性,从而获得更好的性能。

3 仿真分析

为了验证算法的有效性,采用Matlab7.0进行仿真实验。仿真条件:发送端BICM方案采用码率为1/2的非系统卷积码,生成多项式 $g = [171; 133]$,Gray映射,16APSK调制,随机交织,帧长为32400。通过瑞利衰落信道引入幅度衰减和相位偏移。接收端采用本文提出的BICM-ID联合迭代载波相位和信道估计算法,通过在相位、信道估计和译码之间进行迭代处理实现对衰落系数和相差的补偿。其中:CSI表示信道状态信息, θ 表示相差, iter 表示迭代次数。

图4为 $\text{iter} = 5$ 时, $\theta = 0^\circ, 10^\circ$ 和CSI已知、CSI未知对BICM-ID方案性能的影响比较。可以看出,相对CSI已知, $\theta = 0^\circ$ 的理想情况,当CSI已知, $\theta = 10^\circ$ 时,BER性能有所下降;当CSI未知, $\theta = 0^\circ$ 时,BER性能显著下降;当CSI未知, $\theta = 10^\circ$ 时,BER性能几乎完全消失。因此,需要在接收端对相差和衰落系数进行补偿以提高方案性能。

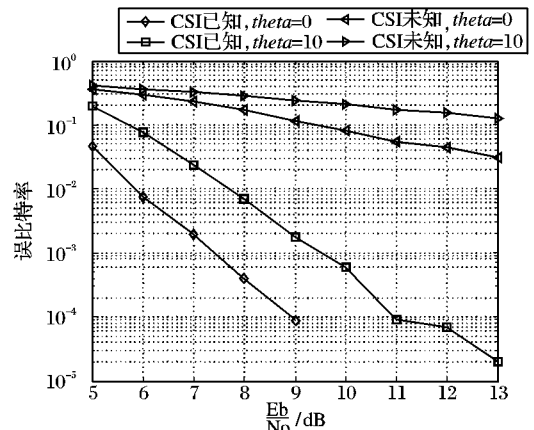


图4 θ 和CSI对方案性能的影响($\text{iter} = 5$)

图5为 $\theta = 10^\circ$,CSI未知时,本文联合迭代算法在迭代次数分别为1~5时的系统性能曲线。可以看出,随着迭代

次数和信噪比的增加,系统的性能逐渐提升,且开始时迭代增益较高,但随着迭代次数的增加,增益逐渐平缓,经过约5次迭代,BER性能基本在同一数量级上作小幅度变化。

图6为 $\theta = 10^\circ$,CSI未知时,联合迭代算法在 $iter = 5$ 时,与文献[10]中传统信道估计算法的性能比较。可以看出,在误比特率为 10^{-3} 时,本文算法较传统算法约有1.6 dB的增益,而且随着信噪比的增加,本文算法性能逐渐逼近理想性能,在误比特率为 10^{-4} 时,与理想性能曲线仅相差约0.5 dB,这是由于传统算法只能对衰落系数进行补偿而无法对相差进行补偿,而本文算法则能够对衰落系数和相差同时进行有效补偿。

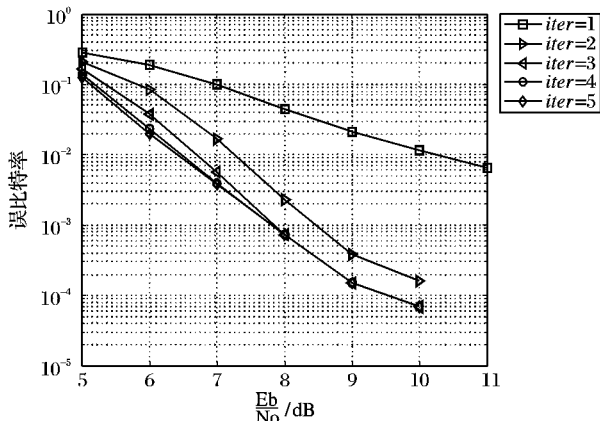


图5 $\theta = 10^\circ$, CSI未知, $iter = 1 \sim 5$ 时的算法性能比较

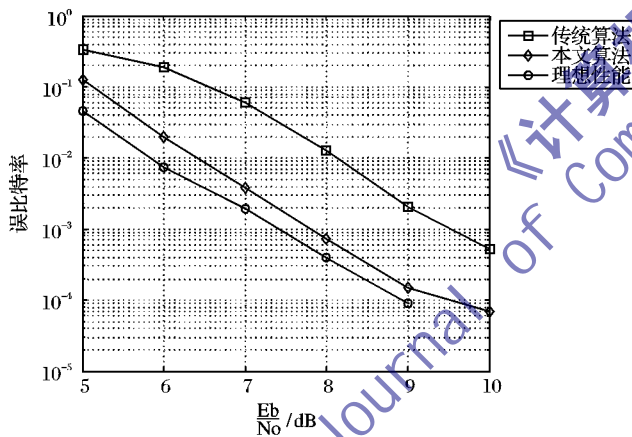


图6 本文算法与传统算法性能比较

图7为 $iter = 5$,CSI未知时,在不同的信噪比下本文算法能够估计的相差范围。可以看出,相差估计范围约为 $[-20^\circ, 20^\circ]$,超出该范围需要在接收端首先进行初始同步模块(比如用锁相环),如图3虚线框所示,使残余相差落入算法适用范围之内,再用本文算法作进一步估计。

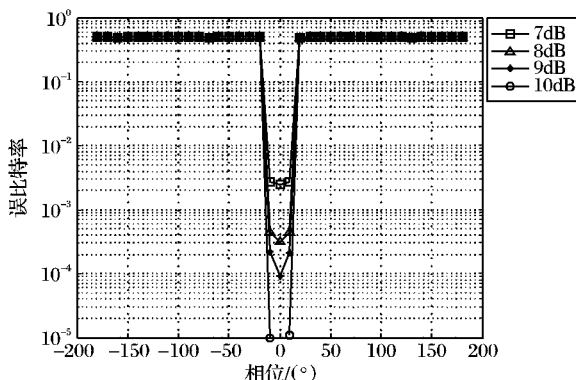


图7 $iter = 5$, CSI未知,不同信噪比下相差估计范围比较

4 结语

本文提出 BICM-ID 联合迭代载波相位和信道估计算法,通过在相位、信道估计和译码之间进行迭代处理实现对相差和衰落系数的补偿。仿真结果表明:1)相差和 CSI 对 BICM-ID 性能影响很大,需要在接收端对相差和衰落系数进行估计和补偿;2)在 $BER = 10^{-4}$ 时,该算法与理想性能曲线仅相差约0.5 dB;3)本文算法能够估计的相差范围约为 $[-20^\circ, 20^\circ]$,若超出此范围需要在接收端首先进行初始同步。

参考文献:

- [1] 李琳. 编码调制与星座映射相关技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2011.
- [2] 吕强. 基于比特交织编码调制的短波瞬间通信系统关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.
- [3] 邹雪兰, 刘伟彦, 鄢广增. 基于混沌交织的比特交织编码调制及迭代译码系统性能分析[J]. 中国科学: 信息科学, 2011, 41(1): 112-120.
- [4] 赵春晖, 吕强, 毕文斌. 基于硬判决的 BICM-ID 的 Turbo 均衡及其改进[J]. 通信学报, 2009, 30(5): 42-47.
- [5] 郭锐, 汪立新. 软输入软输出 LDPC 码译码算法[J]. 飞行器测控学报, 2011, 30(4): 52-55.
- [6] GAPPMAIR W, HOLZLEITNER J. Detector characteristic for decision-directed carrier phase recovery of 16/32-APSK[J]. IEEE Electronics Letters, 2006, 42(25): 1464-1466.
- [7] JOONBEOM K. Iterative channel estimation for wireless communications[D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2006.
- [8] OTNES R, TUCHLER M. Iterative channel estimation for turbo equalization of time-varying frequency-selective channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2004, 3(6): 1918-1923.
- [9] STEENDAM H, NOELS N, MONENCLAEY M. Iterative carrier phase synchronization for low density parity check coded systems [EB/OL]. [2011-07-01]. <http://telin.ugent.be/~nnoels/full/c6.pdf>.
- [10] 吕强, 朱明骏, 曹桂兴, 等. 一种 BICM-ID 系统中的迭代盲信道估计算法[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(13): 3359-3362.
- [11] GAUDENZI R D, FABREGAS G. Performance analysis of turbo-coded APSK modulations over nonlinear satellite channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 5: 2396-2407.
- [12] CLEVORN T, OLDEWURTEL F. Iterative demodulation for DVB-S2[EB/OL]. [2011-07-01]. http://www.inets.rwth-aachen.de/fileadmin/templates/images/users/fo/Iterative_PIMRC05.pdf.
- [13] NOELS N. Blind ML synchronization and channel gain estimation for iterative (Turbo) receivers[EB/OL]. [2010-05-01]. <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/8564/27117/04203994.pdf>.
- [14] NOELS N, HERZET C, DEJONGHE A. Turbo synchronization: An EM algorithm interpretation[C]// IEEE International Conference on Communications. [S.l.]: IEEE, 2003: 2933-2937.
- [15] HERZET C, RAMON V, VANDENDORPE L. EM-algorithm-based timing synchronization in turbo receivers[C]// IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. [S.l.]: IEEE, 2003: 612-615.