

文章编号:1004-9037(2013)06-0300-04

非线性卫星信道中的 16APSK 联合处理算法

崔鹏辉 杨育红 朱义君 周慧琴

(信息工程大学信息工程学院, 郑州, 450002)

信息工程大学信息
系统工程学院

摘要: 16APSK 经过卫星信道时容易产生码间串扰, 接收的均衡、解调和译码是分别进行的, 本文将 Wiener 均衡应用于 BICM 卫星系统, 并提出一种基于有记忆非线性卫星信道的 16APSK 联合处理算法。该算法通过联合软判决反馈译码、迭代 Wiener 均衡及似然信息加权处理, 充分挖掘了信息之间潜在的关联性, 实现了均衡、解调和译码的多层次联合处理, 从而对 16APSK 的非线性失真进行补偿。仿真验证了算法的有效性, 且相比传统接收获得了更好的性能。

关键词: 非线性; 均衡; 联合

中图分类号: TN927

文献标志码: A

Associated Processing Algorithm for 16APSK over Nonlinear Satellite Channels

Cui Penghui, Yang Yuhong, Zhu Yijun, Zhou Huiqin

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

Abstract: To compensate the ISI of 16APSK over satellite channels, equalization is needed before demodulation and decoding. Conventional receivers execute equalization, demodulation and decoding independently. This paper applies Wiener equalization to BICM satellite system and proposes an associated processing algorithm for 16APSK over memory non-linearity satellite channels. The algorithm join soft-decision feedback decoding, iterative Wiener equalization and weighting likelihood information together, which deeply excavates the inherent relevance between information. Therefore, an associated processing among equalization, demodulation and decoding is achieved to compensate the nonlinear distortion of 16APSK. Simulation results show that the algorithm is validity and gets better performance.

Key words: non-linearity; equalization; association

引 言

比特交织编码调制(BICM)^[1]由编码器、交织器、调制器和调制器串行级联而成, 能够提高系统的分集增益和编码增益, 广泛地应用于卫星通信。随着卫星宽带业务的增加, 频谱资源十分紧张, 更高的幅度相位联合调制(APSK)^[2]成为 BICM 首选的调制方式。一方面由于信号幅度的变化, APSK 对卫星转发器的非线性极其敏感, 另一方面对于宽带应用, 卫星信道还表现出不可忽略的记忆效应, 使得 APSK 经过卫星信道时容易产生码间

串扰, 为保证通信性能, 必须对其进行均衡补偿。

文献[3]利用 DFE 均衡对非线性卫星信道进行补偿, 但没有考虑记忆效应; 文献[4, 5]采用 Volterra 滤波器模型实现对有记忆非线性卫星信道的补偿, 但 Volterra 滤波器计算复杂度高, 收敛速度慢; 文献[6~8]使用 Hammerstein-Wiener 模型替 Volterra 滤波器模型, 降低了计算复杂度和收敛时间; 这些文献中均衡、解调和译码均是相互独立的过程, 之间潜在的关联性。文献[9]将 Turbo 均衡算法应用到 BICM-ID 系统中,

Bit Interleaved Coded Modulation, BICM

Amplitude Phase Shift Keying, APSK

Bit Interleaved Coded Modulation with Iterative Decoding, BICM-ID

实现了均衡和解译的联合处理,但它们针对的都是衰落信道。

本文将 Wiener 均衡应用于 BICM 卫星系统,并提出一种基于有记忆非线性卫星信道的 16APSK 联合处理算法。该算法通过联合软判决反馈译码、迭代 Wiener 均衡及似然信息加权处理,充分挖掘了信息之间潜在的关联性,实现了均衡、解调和译码的多层次联合处理,对 16APSK 的非线性失真进行了有效补偿。

1 系统模型

系统模型如图 1 所示。发送端采用 BICM 方案,信源通过卷积编码、随机交织,经平方根升余弦(SRRC)成形滤波后形成发送信号 $x(n)$ 。

系统模型如图 1 所示。删除掉该段,信源通过卷积编码、随机交织和 16APSK 映射,经平方根升余弦(SRRC)成形滤波后形成发送信号 $x(n)$ 。

信号 $x(n)$ 经过卫星高功放(HPA),当 HPA 工作在接近饱和点的区域时,其非线性会对信号造成幅度和相位失真,对于宽带应用,HPA 还表现出一定的记忆效应。HPA 的有记忆非线性可以采用 Hammerstein 模型结构模拟, $g(\cdot)$ 为非线性函数,表示 HPA 的非线性失真, H 为 FIR 滤波器,表示 HPA 的记忆效应,表征如下

$$x_2(n) = g(x(n)) = g_1x(n) + g_2x^2(n) + \dots + g_{m_g}x^{m_g}(n) \tag{1}$$

$$s(n) = H(z^{-1})x_2(n) = h_0(n)x_2(n) + h_1(n)x_2(n-1) + \dots + h_{n_h}(n)x_2(n-n_h) \tag{2}$$

其中, m_g 表示非线性函数的阶数, n_h 表示滤波器的记忆长度。

接收端,信号经 SRRC 匹配滤波后形成接收信号 $r(n)$ 。对 $r(n)$ 进行 Wiener 均衡,通过 NCRLS^[8]非线性信道均衡算法调整滤波器的抽头系数,使其收敛, W 表示均衡器的线性部分, $f(\cdot)$ 表示均衡器的非线性部分,表征如下

$$r_2(n) = W(z^{-1})r(n) = w_0(n)r(n) + w_1(n)r(n-1) + \dots + w_{n_w}(n)r(n-n_w) \tag{3}$$

$$y(n) = f(r_2(n)) = f_1(n)r_2(n) + f_2(n)r_2^2(n) + \dots + f_{m_f}(n)r_2^{m_f}(n) \tag{4}$$

式中: n_w 和 m_f 分别表示 Wiener 均衡线性部分和非线性部分参数向量的维数。

最后,对均衡输出信号 $y(n)$ 进行解映射、解交织和译码从而恢复原始信号。该模型的接收处理方式完全按照通信信号设计的逆过程进行,即逐层次的信号处理,均衡、解调和译码是完全独立的过程,本文记为分层算法。

性卫星信道中的 16APSK 联合处理算法

由于发端采用了 BICM 方案,使得要处理的信息之间存在着关联性,而逐层分离的处理技术难以有效利用这种关联性。为充分挖掘信息间潜在的关联性,提高系统的性能,本节提出一种非线性卫星信道中的 16APSK 联合处理算法:

(1)解调译码联合处理。为了充分利用比特交织的优势,采用 BICM-ID 软判决反馈译码,在解映射和译码间建立迭代处理模型。SISO 解调器根据均衡信号 y 计算编码比特矩阵 λ ,公式如下

$$\lambda(v^i = b) = \log \sum_{x \in \chi(i,b)} P(x|y) \sim \log \sum_{x \in \chi(i,b)} P(y|x)P(x) \tag{5}$$

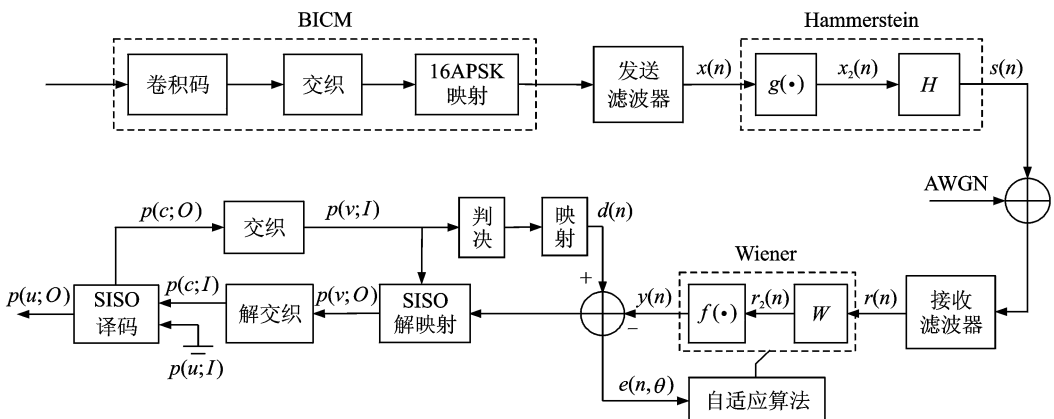


图 1 系统模型

式中: $P(y|x) = 1/\sqrt{2\pi}\sigma e^{-(y-x)^2/2\sigma^2}$, 信号集为 $\chi(i,b) = \{\mu([v^1, v^2, v^3, v^4]) | v^i = b\}$ 。对 16APSK 而言, 每个接收信号需要计算 8 个比特矩阵, 然后计算每比特 2 个软信息值的似然比。在首轮译码中, 假设发送符号等软输入软输出(Soft In Soft Out, SISO)解交织后, 采用 SISO 译码生成编码比特及信息比特的后验概率 $P(c;O), P(u;O)$ 。编码比特后验概率 $P(c;O)$ 经比特交织后反馈, 作为解调器的先验概率 $P(v;I)$, 计算映射符号的先验概率 $P(x)$ 如下

$$P(x) = P(\mu([v^1(x), v^2(x), v^3(x), v^4(x)])) = \prod_{j=1}^4 P(v^j = v^j(x); I) \quad (6)$$

更新迭代解调后验比特概率 $P(v;O)$ 如下

$$P(v^i = b; O) = \frac{P(v^i = b | y)}{P(v^i = b; I)} = \frac{\sum_{x \in \chi_b^i} P(y|x)P(x)}{P(v^i = b; I)} = \frac{\sum_{x \in \chi_b^i} P(y|x) \prod_{j \neq i} P(v^j = v^j(x); I)}{P(v^i = b; I)} \quad (7)$$

$P(v;O)$ 解交织后作为编码比特先验概率 $P(c;I)$ 送入 SISO 译码器, 如此构成解调和译码的联合处理过程, 迭代一定次数后, 硬判决输出译码结果。

(2) 均衡和解译联合处理。实际系统中期望信号 $d(n)$ 往往未知或是训练序列长度较短难以使 NCRLS 算法收敛, 此时, $d(n)$ 可直接用滤波器的实际输出 $y(n)$ 代替^[11], 通过自适应算法完成均衡后再进行解调译码。该过程均衡和解译是分别进行的, 并没有充分利用译码的纠错能力, Wiener 均衡若能参与解译联合处理, 利用译码的纠错能力, 来调整自身的权值系数, 则有可能带来性能增益。将“Turbo 原则”^[12-13] 引入 Wiener 均衡, 解调器的先验概率 $P(v;I)$ 经判决后映射成符号 $\bar{d}^{(p)}(n)$, 作为期望信号 $d(n)$ 的估计。其中, p 表示第 p 次迭代输出, 通过迭代不断优化 Wiener 均衡器的权值向量, 进一步提高判决的可靠度, 从而实现 Wiener 均衡和解译的联合优化。

(3) 似然信息加权处理。编码比特的后验概率 $P(c;O)$ 经交织后, 一方面反馈到 SISO 解调器作为先验信息, 更新编码比特矩阵 λ , 另一方面经判决后映射为均衡器的期望信号, 更新权值系数, 在整个联合处理过程中 $P(c;O)$ 是决定迭代性能的关键因素。文献[10]对硬判决 BICM-ID 系统中解调器输出的比特概率信息进行了加权处理, 并取得较好的效果。受此启示, SISO 译码输出的编码比特后验概率 $P(c;O)$ 不直接送入解调和均衡模块,

而是首先进行非线性加权处理, 即

$$P'(c;O) = \Psi(P(c;O)) \cdot P(c;O) \quad (8)$$

其中, ψ 为加权系数, $\Psi(P) = \alpha \cdot \exp(-\beta|P|)$, α, β 为参数, 根据交织长度、信噪比等通过实验确定^[14], 一般 $\alpha \in [0.8, 1], \beta \in [0.001, 0.01]$ 。可以看出, 当似然信息值较小时, 加权系数影响较小, 但当似然信息值较大时, 加权系数能够有效地减少波动, 从而进一步提高系统性能。

综上, 本文联合处理算法在分层算法的基础上, 通过增加 BICM-ID 软判决反馈译码、迭代 Wiener 均衡和似然信息加权 3 个联合处理模块, 充分利用了译码的纠错能力, 深入挖掘了解映射和译码、均衡和译码之间信息潜在的关联性, 从而实现了均衡、解调和译码的多层次联合处理, 对 16APSK 的非线性失真进行了有效补偿。联合算法的复杂度主要体现在软判决反馈译码, 该模块较为成熟且相比 Volterra 滤波其复杂度极大地降低, 迭代 Wiener 均衡和似然信息加权处理的复杂度均增加不大。

3 仿真与性能分析

仿真条件: 参照 DVB 标准, 选取帧长为 32 400, [171, 133] 卷积码, 随机交织和 16APSK 映射, SRRC 滤波器滚降系数为 0.5, 每个符号 8 个采样点; 为方便对比, 参照文献[6~8]选取如下参数, 有记忆非线性 Hammerstein 模型分别取三阶、五阶, $\mathbf{H} = [0.75 \ 0.375 \ -0.15], [g_1 \ g_2 \ g_3] = [1 \ 0.5 \ 0.25], [g_1 \ g_2 \ g_3 \ g_4 \ g_5] = [1 \ 0.5 \ 0.25 \ 0.125 \ 0.0625]$, Wiener 均衡线性部分和非线性部分参数向量 $\theta_w(0) = (1 \ 0 \ \dots \ 0)^T, \theta_f(0) = (1 \ 0 \ \dots \ 0)^T$, 维数分别设为 $n_w = 11, m_f = 9$, NCRLS 算法初始化 $\mathbf{P}(0) = 10\mathbf{I}, \lambda = 0.99$ 。

图 2 为 NCLMS (Nonlinear Channel Least Mean Squares) 和 NCRLS 非线性均衡算法的性能比较图, 采用归一化均方误差 (Normalized Mean Squared Error) 由图可知, NCLMS 算法收敛到 -22 dB, NCLMS Newton 算法在迭代约 500 次后收敛到 -28 dB, NCRLS 算法在迭代约 400 次后收敛到 -28 dB, 可见, 本文选取的 NCRLS 算法无论在均衡效果还是收敛速度方面均优于 NCLMS 和 NCLMS Newton 算法。

图 3 为三阶 Hammerstein 模型下, 16APSK 信号的 Wiener 均衡星座图。由图可知, 理想星座经过卫星 HPA 后, 由于 Hammerstein 模型非线性

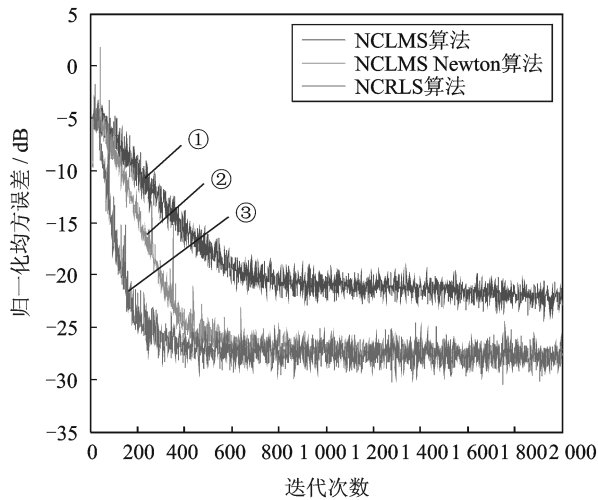


图2 非线性均衡算法性能比较

和记忆效应的影响,接收信号的幅度和相位均发生了严重扭曲,必须对其进行均衡补偿。应用 Wiener 均衡,能够较好地校正接收信号幅度和相位的扭曲现象,均衡效果良好。

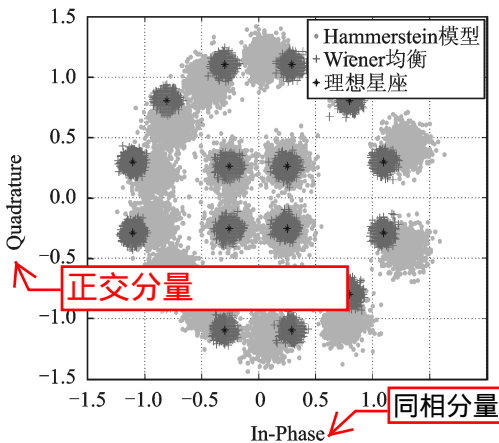


图3 16APSK 均衡星座

图4为期望信号已知, Hammerstein 模型分别取三阶、五阶时,即不同程度非线性信道下 Wiener-NCRLS 均衡算法的 BER 性能,并同 DFE-NCRLS 均衡算法下性能作了比较。由图可知, Wiener 均衡和 DFE 均衡的性能随着信道非线性程度的增加而降低,卫星信道的有记忆非线性使传统 DFE 均衡技术性能下降,在不同程度非线性信道下 Wiener 均衡的性能均优于 DFE 均衡。

图5为期望信号未知时,不同程度非线性信道下联合算法和分层算法的性能比较,迭代次数为6。由图可知,联合算法和分层算法下系统的性能随着非线性程度的增加而降低,在不同程度非线性信道下,联合算法的系统性能均有所提高。三阶模

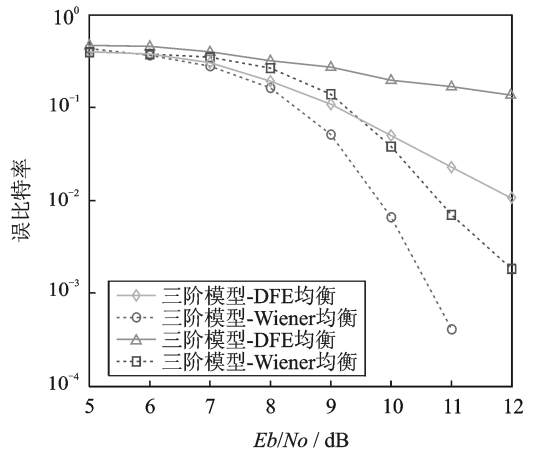


图4 不同程度非线性信道的 Wiener 均衡性能

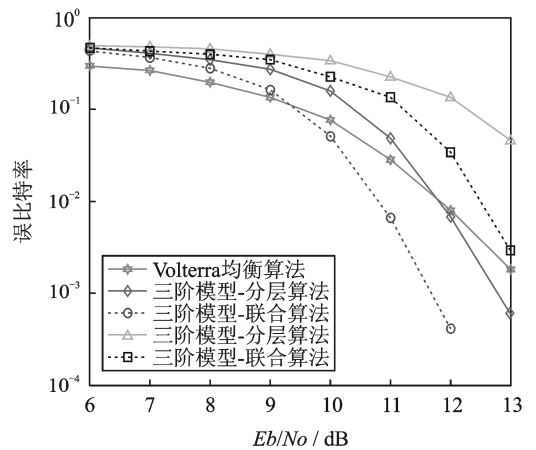


图5 不同程度非线性信道的联合算法性能

型下,在误比特率为 10^{-3} 时,联合算法较分层算法有约 1.1 dB 的性能增益,另外,在信噪比门限大于 9.2 dB 时,联合算法的性能均优于 Volterra 均衡,这是由于联合算法充分挖掘了处理信息间潜在的关联性,从而带来性能增益。

4 结束语

本文将 Wiener 均衡应用于 BICM 卫星系统,并提出一种基于 Hammerstein 模型的 16APSK 联合处理算法。通过仿真验证了算法的有效性,并得出结论:(1) Wiener 均衡选取性能优良的 NCRLS 算法,能够对 16APSK 的有记忆非线性失真进行有效补偿,且较 DFE 均衡获得了更佳的性能。(2) 相比分层算法,联合算法充分挖掘了处理信息间潜在的关联性,在不同程度非线性信道下联合算法的系统性能均有显著提高。

参考文献:

- [1] Gaudenzi R D, Fabregas G. Performance analysis of turbo-coded APSK modulations over nonlinear satel-

- lite channels[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2006,5(9):2396-2407.
- [2] 代宜君. 卫星高效编码调制体制设计[D]. 西安:西安电子科技大学,2010.
Dai Yijun. Efficient coding and modulation design in satellite system[D]. Xian: Xi'an Electronic and Science University, 2010.
- [3] Yoichi S, Akinori H, Masaaki K. A study of adaptive equalizer for APSK in the advanced satellite broadcasting system[C]//IEEE Global Telecommunications Conference. [S. l.]: IEEE, 2009:1-6.
- [4] 崔霞霞,潘申富,张俊祥. 非线性卫星信道均衡[J]. 无线电工程,2004,34(10):49-51.
Cui Xiaxia, Pan Shenfu, Zhang Junxiang. Equalization over nonlinear satellite channels[J]. Radio Engineering, 2004,34(10):49-51.
- [5] 许光飞,张邦宁,郭道省. 卫星信道中高阶APSK调制的非线性失真补偿算法[J]. 电讯技术,2010,50(4):69-73.
Xu Guangfei, Zhang Bangning, Guo Daoxing. Non-linear distortion compensation algorithm for high-level APSK modulations over satellite channels[J]. Telecommunication Engineering, 2010,50(4):69-73.
- [6] Li Gan, Emad A E. Adaptive predistortion of IIR Hammerstein systems using the nonlinear filtered-x LMS algorithm[J]. IEEE CNSDSP, 2008:702-705.
- [7] 刘顺兰,蒋树南. 非线性信道的LMS Newton均衡算法的研究[J]. 电路与系统学报,2011,16(1):108-115.
Liu Shunlan, Jiang Shunan. A study of LMS Newton equalization algorithm in nonlinear channel[J]. Journal of Circuits and Systems, 2011,16(1):108-115.
- [8] 刘顺兰,蒋树南. 非线性信道的均衡算法研究[J]. 电子学报,2010,38(10):2219-2223.
Liu Shunlan, Jiang Shunan. A study on equalization technique for nonlinear channel[J]. ACTA Electronica Sinica, 2010,38(10):2219-2223.
- [9] Li Xiaodong, Chindapol A, Ritcey J A. Bit-interleaved coded modulation with iterative decoding and 8PSK signaling[J]. IEEE Trans Commun, 2002,50(8):1250-1257.
- [10] 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.
Zhao Chunhui, Lv Qiang, Bi Wenbin. Turbo equalization and its improvement in BICM-ID based on hard-decision[J]. Journal on Communications, 2009,30(5):42-47.
- [11] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京:清华大学出版社,2002:188-192.
Zhang xianda. Modern signal processing[M]. Beijing: Publishing House of Tsinghua, 2002:188-192.
- [12] Christophe L, Alain G, Joel L. Turbo equalization: adaptive equalization and channel decoding jointly optimized[J]. IEEE Journal Selected Areas in Communications, 2001,19(9):1744-1752.
- [13] 钟华,郑林华. FMT系统中的子信道Turbo迭代均衡[J]. 数据采集与处理,2011,26(1):36-40.
Zhong Hua, Zheng Linhua. Sub-channel turbo iterative equalization in FMT systems[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2011,26(1):36-40.
- [14] Kocarev L, Tasev Z, Vardy A. Improving turbo codes by control of transient chaos in turbo-decoding algorithms[J]. Electronic Letters, 2002,38(2):1184-1186.

博士生

作者简介:崔鹏辉(1988-),男,硕士生,研究方向:卫星通信信号处理,E-mail:cuissean@163.com;杨育红(1964-),女,副教授,研究方向:卫星通信网络安全;朱义君(1978-),男,副教授,研究方向:宽带无线通信;周慧琴(1957-),女,高级实验师,研究方向:卫星通信信令分析。