

一种提高 SCCPM 系统迭代检测收敛性的方法

韩志学^① 毕文斌^② 张兴周^①

^①(哈尔滨工程大学信息与通信工程学院 哈尔滨 150001)

^②(中国舰船研究院 北京 100085)

摘要: 该文运用动力学原理对串行级联连续相位调制系统(SCCPM)迭代检测过程中存在的正反馈现象进行了分析,从正反馈的减少和检测两方面对迭代方法进行了改进。提出了一种加权外信息交换的迭代方法,有效改善了系统收敛的程度。设计了基于硬判决符号改变的动态迭代方法,在减少平均迭代次数的同时,能够通过对残存正反馈的检测来选择较小错误数的迭代。仿真结果表明所提出的改进方法能有效抑制 SCCPM 系统中存在的正反馈现象,提高系统性能。

关键词: 连续相位调制; 迭代方法; 收敛性; 外信息

中图分类号: TN911.22

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)02-0274-04

A Method to Improve the Iterative Detection Convergence of SCCPM

Han Zhi-xue^① Bi Wen-bin^② Zhang Xing-zhou^①

^①(College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

^②(China Ship Research and Development Academy, Beijing 100085, China)

Abstract: Convergence of Serially Concatenated Continuous Phase Modulation (SCCPM) is studied. Based on the theory of dynamic system, phenomena of positive feedback during iterative detection are analyzed, and improved methods are proposed from the views of decrease and detection of positive feedback. An iterative method based on weighed extrinsic information exchange is proposed, which can improve the convergence of SCCPM effectively. A dynamic iterative method based on the number of change of hard decision is designed; which can detect the positive feedback as well as reduce the average number of iteration. Simulation results show the proposed methods can decrease positive feedback and improve the performance of SCCPM effectively.

Key words: Continuous phase modulation; Iterative method; Convergence; Extrinsic information

1 引言

连续相位调制CPM(Continuous Phase Modulation)是一种具有恒定包络的先进调制技术,具有高效的频带利用率与功率利用率,在70年代末到80年代初有过大量的研究,80年代中期以来,卷积码被引入CPM^[1,2]。与TCM一样,CPM在发射信号中引入了记忆,从而使CPM可以像卷积码一样用有限状态机来描述。1993年随着Turbo码的出现,Turbo的概念被延伸到很多领域,很多学者对基于Turbo原理进行迭代检测的串行级联CPM系统SCCPM(Serially Concatenated Continuous Phase Modulation)进行了研究^[3,4]。本文结合具体的课题任务,从SCCPM的系统模型出发,针对SCCPM系统迭代检测过程中收敛性存在的问题,进行了迭代方法上的改进,仿真结果显示所提出的改进方法能够有效改善系统收敛性,提高系统性能。

2 SCCPM 系统模型

设 CPM 信号为 $s(t, a) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos(2\pi f_0 t + \varphi(t, a) + \varphi_0)$,

$t \geq 0$ 。其中 E 为符号能量, T 为符号周期, φ_0 为初始相位,

f_0 为载波频率, $\varphi(t, a) = 2\pi h \sum_{i=0}^{\infty} a_i q(t - iT)$, h 为调制指数。

$a_i \in \{\pm 1, \pm 3, \dots, \pm M - 1\}$, M 表示调制符号数,

$q(t) = \int_{-\infty}^t g(\tau) d\tau$, $g(t)$ 是频率脉冲函数,在 $0 \leq t \leq LT$ 内为非零值,当 $L = 1$ 时为全响应, $L > 1$ 时为部分响应。

令 $\phi(t, a) = \varphi(t, a) + \pi h(M - 1)t / T$, $U_i = (a_i + (M - 1)) / 2$, 得 $\phi(\tau + nT, U) = R_{2\pi} [2\pi h R_p \sum_{i=0}^{n-L} U_i + 4\pi h \sum_{i=0}^{L-1} U_{n-i} \cdot f(\tau + iT) + W(\tau)], 0 \leq \tau \leq T$ 。 $R_{2\pi}[\bullet]$ 和 $R_p[\bullet]$ 分别表示模 2π 和模 p 操作, $W(\tau) = \pi h(M - 1)\tau / T - 2\pi h(M - 1) \sum_{i=0}^{L-1} f(\tau + iT) + (L - 1)\pi h(M - 1)$, $0 \leq \tau \leq T$, 于是可以得到

$$s(\tau + nT, U) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos(2\pi f_1 t + \phi(t, a) + \varphi_0) \quad (1)$$

式中 $f_1 = f_0 - h(M - 1) / 2T$ 。从式(1)中可以看出,在任意符号区间内,CPM 信号可以由当前输入 U_n 和前 $L - 1$ 个输入

及它们的累加和 $V_n = R_p \left(\sum_{i=0}^{n-L} U_i \right)$ 完全确定, 因此可以把 CPM 分解为一连续相位编码 CPE(Continuous Phase Encode)和无记忆调制 MM(Memoryless Modulator)的组合^[5]。利用 CPE 的记忆特性和递归特性, 把 CPE 看作码率为 1 的卷积码, 结合外部的卷积码 CC(Convolutional Code)及交织器, 即构成串行级联的 CPM 系统。系统框图如图 1 所示。

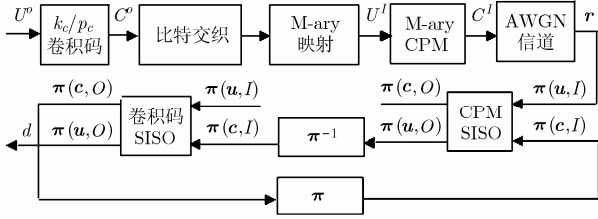


图1 SCCPM 系统模型

系统中, 卷积码码率为 $R_c = k_c / p_c$, 为便于多进制映射, 取 p_c 为 $n_{cpm} = \log_2 M$ 的整数倍, 卷积编码后的信息序列经比特交织、符号映射输入到 CPE, CPE 对输入信息进行连续相位编码后作为无记忆调制器的输入, 无记忆调制器选择一合适波形发送到信道。系统的解调与解码过程是通过两个基于 Log-MAP 算法的软输入软输出子系统迭代完成的, $\pi(c, O)$ 和 $\pi(u, O)$ 分别为码字和信息字输出概率, $\pi(c, I)$ 和 $\pi(u, I)$ 为先验概率。CPM 子系统的软输出经解交织后作为卷积码子系统的软输入, 卷积码子系统的软输出经交织后输入到 CPM 子系统, 反复迭代此过程数次, 最后一次迭代结果由卷积码子系统作硬判决输出。

3 SCCPM 系统迭代检测收敛性分析

3.1 SCCPM 系统的非线性表示

从 CPM 分解模型可知, 如果选择合适的调制指数, CPE 可以像卷积码一样用有限状态网格来描述, 如果再适当地选择分支度量, 可以用通常的基于 Log-MAP 算法的 SISO 模型进行检测^[6]。文献[7]提出了一种基于匹配滤波器的 CPM 分支度量计算方法, 并对多状态系统算法进行了简化。本文首先运用非线性动态系统的原理对 SCCPM 系统迭代检测算法进行分析, 然后针对其存在的问题, 提出了相应改进。

Richardson T 在文献[8]中用定义在连续集上的时间离散非线性动态系统描述 Turbo 码的迭代译码, SCCPM 系统的迭代检测同样能够从非线性动态系统观点来解释。设 $\pi_{cc}(l)$ 和 $\pi_{cpm}(l)$ 分别表示卷积码和 CPM 的外信息概率, 为 $2 \times n$ 维向量, n 为交织长度, l 为迭代次数, r 为解调器的软输出, 为 n 维向量, 在映射过程中为了与 $\pi_{cc}(l)$ 对应复制成 $2 \times n$ 维向量, 根据文献[8]所依据的原理, SCCPM 系统可表示为

$$\pi_{cpm}(l+1) = F_1[\pi_{cc}(l); r] \quad (2)$$

$$\pi_{cc}(l) = F_2[\pi_{cpm}(l)] \quad (3)$$

其中 F_1 和 F_2 为非线性动态系统函数, 取决于相应的 CPM 和卷积码。从式(2), 式(3)可以看出, SCCPM 的迭代检测过程可以由一确定在 $2 \times n$ 维映射上的非线性系统来表示。

3.2 短帧 SCCPM 系统的正反馈现象

图 2, 图 3 分别为帧长 128 和 256 的 2M2RC 系统在 AWGN 下的收敛性能曲线, 其中 CPM 调制指数为 1/2, 卷积码码率为 1/2, 其生成多项式为(7,5)。随机交织, 检测总帧数 10000 帧。

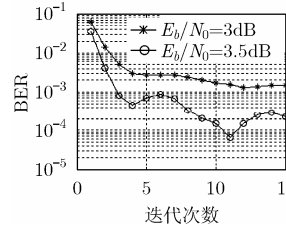


图2 帧长 128 时 2M2RC 系统收敛性能

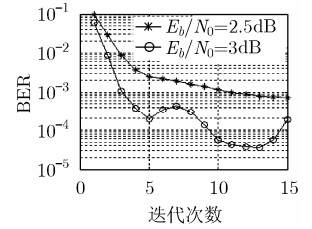


图3 帧长 256 时 2M2RC 系统收敛性能

从图中可以看出, 在两系统的瀑布区, 曲线均存在正反馈现象, 即随着迭代次数的增加, 误比特率性能反而变差, 通过对其它帧长系统进行仿真, 发现一定程度上均存在正反馈现象, 但在帧长较短时更严重。上面现象可以用非线性动态系统原理加以解释。同 Turbo 码类似, SCCPM 系统迭代检测的相位轨迹同样存在 3 种情况: 收敛到一个确定的不动点; 收敛到一个不确定的不动点; 进入一不变集合。大多数帧属于第 1 种和第 2 种情况, 而第 3 种情况主要发生在瀑布区, 这时收敛性虽然在 Lyapunov 大稳定性概念下认为是收敛的, 但存在较为严重的震荡现象。帧长较短时, 交织深度不够, 突发错误的可能性增大, 因此震荡现象要比长帧时严重。当采用固定次数迭代时, 最终硬判决有可能发生在误比特率较高的点上, 导致了一帧正反馈的发生, 当发生正反馈的帧数较多时, 就表现为误比特率的正反馈。因此如何减少震荡的发生及发生震荡时能够及时检测使迭代停止在震荡较小的位置上, 是减小正反馈、提高系统性能的主要途径。

4 改善 SCCPM 系统迭代检测收敛性的方法

4.1 基于加权外信息交换的迭代检测

在迭代检测中, 外信息是单个 SISO 子系统译码得到的额外信息, 与系统信息和先验信息无关。外信息经过交织(或解交织)后送到另一子系统作为先验信息, 迭代过程通过外信息的交换来提高译码性能。因此外信息是决定迭代检测性能的关键因素。有文献提出在串行级联卷积码中基于平均外信息交换减少正反馈的方法, 在本文所设计的系统中尝试效果不明显^[9]。Kocarev L 等人对 Turbo 码中外信息似然比进行了加权处理, 并取得了较好的效果^[10], 受此启示, 本文设计了下面的基于加权外信息概率的迭代检测方法。

按文献[6]提供的 SISO 算法计算 CPM 子系统与卷积码

子系统的码字位概率 $\pi_{k,j}(c^j, O)$ 和信息字位概率 $\pi_{k,j}(u^j, O)$

$$\pi_{k,j}(c^j, O) = \log \left\{ \sum_{c: C_k^j = c^j} \exp \left[\pi_k(c; O) + \sum_{i=1, i \neq j}^{n_0} \pi_{k,j}(c^i; I) \right] \right\} \quad (4)$$

$$\pi_{k,j}(u^j, O) = \log \left\{ \sum_{u: U_k^j = u^j} \exp \left[\pi_k(u; O) + \sum_{i=1, i \neq j}^{k_0} \pi_{k,j}(u^i; I) \right] \right\} \quad (5)$$

其中 k 和 j 分别表示当前时刻和当前位, n_0 和 k_0 为码字和信息字数。CPM 子系统输出的外信息位概率不直接传给卷积码子系统,而是要经过加权处理,同样,卷积码子系统输出的外信息位概率也要经过加权处理,即

$$\pi'(c^j, O) = \psi(\pi(c^j, O)) \cdot \pi(c^j, O) \quad (6)$$

$$\pi'(u^j, O) = \psi(\pi(u^j, O)) \cdot \pi(u^j, O) \quad (7)$$

其中 ψ 为加权系数,为 $2 \times n$ 维向量, \cdot 表示取点乘积。为了能够根据位概率的大小自动调整输出的位概率,取 ψ 为输出位概率的函数为

$$\psi(\pi) = \partial \pi \cdot \exp(-\beta |\pi|) \quad (8)$$

∂ 和 β 为参数,根据交织长度、信噪比等参数通过实验确定。从式(8)可以看出,当外信息概率值较小时,加权系数影响很小,但当外信息概率值较大时,加权系数能够有效地减少波动。与文献[10]相比,本文直接用外信息概率作为参数对其自身进行非线性加权处理,能够更有效地控制系统中波动过大的位概率,同时该算法避免了在 SISO 子系统算法实现过程中从概率到似然比及其逆转换的过程,减少了算法实现复杂度,提高了系统实时性。

4.2 基于 HDA 的 SCCPM 系统动态迭代方法

图 4 是迭代方法改进前后帧长 256 的 2M2RC 系统在 $E_b/N_0=2.5\text{dB}$ 时正反馈情况对比,检测总帧数为 10000 帧。从图中可以看出,加权外信息概率方法能够有效地减少 SCCPM 系统正反馈现象,在不同迭代次数上正反馈情况均有明显降低。但正反馈现象在一定程度上仍然存在,因此如果能够检测到正反馈的发生,使迭代停止在较小误码率的位置上,可进一步抑制正反馈对系统性能的影响。

图 5 为帧长 256 的 2M2RC 系统采用改进迭代方法时在不同信噪比下迭代次数与误帧率关系曲线,检测总帧数为 10000 帧。从图中曲线可以看出,在迭代 3 次时,在两种信噪比下分别有 67% 和 98% 的帧达到零错误,可见及时停止这些帧的迭代可以节省大量的检测时间,对于慢收敛或者存在正反馈的帧,可以加大迭代次数,选择较小错误数的迭代来

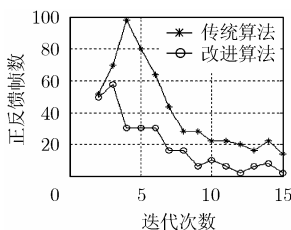


图4 传统方法与改进方法正反馈比较

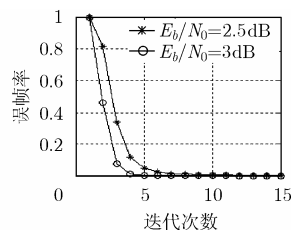


图5 改进方法迭代次数与误帧率关系

提高系统性能。

通过上面分析可以看出,设计一种合适的动态迭代方法可以进一步减少正反馈对系统性能的影响,同时还可以节省迭代时间。本文应用辅助硬判决 HDA(Hard Decision-Aided) 的思想探讨 SCCPM 系统的动态迭代问题^[11]。无错误帧和稳定的错误帧反映在硬判决符号改变里具有一样的表现,可以通过连续 3 次迭代硬判决改变为零来进行判决,在此称为判决 1。图 6 是帧长 256 的 SCCPM 系统发生震荡的一帧数据误比特数与硬判决改变数关系曲线。从图中可以看出,发生震荡的帧的硬判决改变数与误比特数基本呈比例关系,当判决 1 不满足时,可认为该帧发生了震荡,迭代到最大次数并记录硬判决改变数量,然后选择发生最小硬判决改变的迭代,从而使发生震荡的帧停止在震荡较小的位置上,称为判决 2。为了减少算法复杂度,硬判决符号改变的计数根据信噪比、帧长从迭代到一定次数后开始。

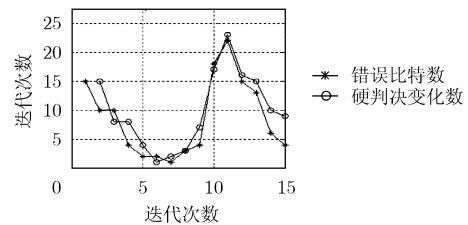


图6 震荡帧中误比特数与硬判决符号改变数关系

5 系统仿真与结果分析

为了检验改进迭代方法的有效性,对 2M2RC 系统在迭代方法改进前后的性能进行了仿真。其中 MAP 算法滑窗长度为 12 个符号,随机交织。卷积码码率为 1/2,生成多项式为(7,5)。固定迭代次数时迭代 8 次,动态迭代时最大迭代次数为 15 次,各系统出现错误数为 1000-3000bit。CPM 调制指数为 1/2,采用复基带映射,每个符号抽样 10 个点。信道模型采用 AWGN 模型。

图 7 是帧长为 256 的 2M2RC 系统采用传统的迭代方法和本文所设计的迭代方法在 AWGN 信道下误比特率性能与迭代次数的关系曲线。从图中可以看出,当信噪比较低时,改进方法对系统误比特率影响不大,但随着信噪比的升高,特别是当信噪比处于各系统的瀑布区时,加权外信息的迭代方法能够通过波动过大的外信息概率进行自适应调整来有效减少正反馈发生,从而使系统性能得到了提高。当结合动态迭代方法时,由于判决 2 能够对发生正反馈的帧进行检测来选择较小错误数的迭代作为输出,因此虽然判决 1 有可能使不发生正反馈的帧的性能略有下降,但由于在短帧系统中前者占优势,所以系统性能有了进一步的提高。此外,从图 8 可以看出,结合动态迭代的改进方法使系统在瀑布区的平均迭代次数有了很大减少。因此,在实际应用中把加权外信息方法与动态迭代方法结合不仅能够有效抑制正反馈的发生,而且还可以减少平均迭代次数,提高系统实时性。

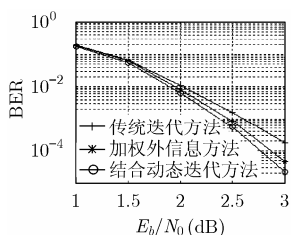


图7 传统方法与改进方法
误比特率性能比较

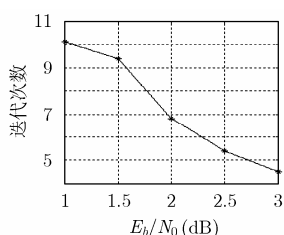


图8 改进方法平均迭代次数

6 结束语

CPM作为一种具有诸多优点的先进调制技术,一直是通信领域的研究热点。把CPM与卷积码进行级联,运用Turbo原理进行迭代检测,是提高CPM系统性能的一种全新思路,迭代方法收敛稳定性是决定SCCPM系统性能的关键。本文探讨了串行级联CPM系统迭代检测收敛性问题。从SCCPM系统模型出发,对短帧SCCPM系统在迭代检测过程中存在的正反馈现象运用动力学原理进行了分析,在此基础上设计了基于加权外信息交换的迭代方法,使正反馈得到有效控制,为了进一步抑制残余的正反馈,设计了基于硬判决改变数量的动态迭代方法,使残余的正反馈帧停留在错误数较小的位置上,减少了对系统性能的影响,同时对于绝大多数稳定收敛的帧,有效地减少了迭代次数。仿真结果表明本文所提出的改进方法不仅能够有效地改善SCCPM系统迭代检测的收敛性,提高系统误比特率性能,而且还减少了系统平均迭代次数,提高了系统实时性。

参考文献

- [1] Anderson J B, Aulin T, and Sundberg C E. Digital Phase Modulation [M]. New York: Plenum, 1986: 181-209.
- [2] Wilson G. Convolutional coding combined with continuous phase modulation [J]. *IEEE Trans. on Comm.*, 1985, 33(1): 20-29.

- [3] Mickelson T L. Turbo detection of coded continuous-phase modulation [A]. Military Common. Conf. Proceeding[C]. Atlantic, 1999: 534-537.
- [4] Moqvist P and Aulin T. Serially concatenated continuous phase modulation with iterative decoding[J]. *IEEE Trans. on Comm.*, 2001, 49(11): 1901-1915.
- [5] Rimoldi B E. A decomposition approach to CPM [J]. *IEEE Trans. on Inform. Theory*, 1988, 34(2): 260-270.
- [6] Benedetto S, Divsalar D, and Montorsi G, et al. A soft-input soft-output maximum a posteriori (MAP) module to decode parallel and serial concatenated codes[R]. JPL TDA Progress Report 42-127, 1996.
- [7] Moqvist P and Aulin T. Serially concatenated continuous phase modulation with iterative decoding[J]. *IEEE Trans. on Comm.*, 2001, 49(11): 1901-1915.
- [8] Richardson T. The geometry of turbo-decoding dynamics [J]. *IEEE Trans. on Inform. Theory*, 2000, 46(1): 9-23.
- [9] 潘振岗, 毕光国. SCCC中两种不同外信息交换方式的比较[J]. 电子技术应用, 2000, (7):19-21.
- [10] Kocarev L, Tasev Z, and Vardy A. Improving turbo codes by control of transient chaos in turbo-decoding algorithms [J]. *Electronic Letters*, 2002, 38(2):1184-1186.
- [11] Shao R Y, Lin S, and Fosserier M P C. Two simple stopping criteria for turbo decoding[J]. *IEEE Trans. on Comm.*, 1999, 47(8):1117-1120.

韩志学: 男, 1979年生, 博士生, 研究方向为信道编码、调制与解调技术、软件无线电等。

毕文斌: 男, 1974年生, 工程师, 博士, 主要研究方向为编码与调制、微弱信号检测、舰船通信。

张兴周: 男, 1947年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向、光电信息与宽带数字通信。