

改善 SCCRFQPSK 迭代检测收敛性的简单方法

张高远*, 文红, 宋欢欢, 李腾飞

(通信抗干扰技术国家级重点实验室(电子科技大学), 成都 611731)

(* 通信作者电子邮箱 zhanggaoyuan407@163.com)

摘要:首先分析加性高斯白噪声(AWGN)信道条件下递归 FQPSK-B 调制的最大后验概率(MAP)解调算法, 论述了递归 FQPSK 与卷积码构成的串行级联(SCCRFQPSK)系统迭代所需要的对数似然比外信息(ex-LLR)提取方法; 其次, 针对 SCCRFQPSK 系统迭代检测中存在的正反馈现象, 提出对 FQPSK-B 解调器输出的 ex-LLR 进行适当的线性加权处理。通过蒙特卡罗(Monte Carlo)仿真得到了经过加权处理后的迭代系统所需的最优加权因子为 0.7; 且误比特率(BER)为 10^{-5} 时, 与传统迭代方案相比, 该系统在 4 次迭代时可获得 0.3 dB 的信噪比(SNR)增益。仿真结果表明: 经过线性加权处理后, SCCRFQPSK 系统的检测收敛性加快, 系统性能提高, 系统时延降低, 能在一定程度上缓解深空通信中由于传输距离远而带来的 SNR 极低的通信问题。

关键词:串行级联; 递归 FQPSK; 最大后验概率解调; 外信息对数似然比; 线性加权处理

中图分类号: TN911.21 **文献标志码:** A

Simple method to improve the iterative detection convergence of SCCRFQPSK

ZHANG Gaoyuan*, WEN Hong, SONG Huanhuan, LI Tengfei

(National Key Laboratory of Science and Technology on Communications (University of Electronic Science and Technology of China),
Chengdu Sichuan 611731, China)

Abstract: The Maximum-A-Posteriori-probability (MAP) demodulation of recursive FQPSK-B in the presence of Additive White Gaussian Noise (AWGN) channel was first presented. Required in the iterative detection of Serial Concatenation of Convolutional coded Recursive FQPSK (SCCRFQPSK), the bit extrinsic Log-Likelihood Ratio (ex-LLR) of FQPSK demodulation was also derived. Secondly, aiming at weakening the phenomena of positive feedback during the iterative detection of SCCRFQPSK, the bit ex-LLR of FQPSK demodulation was appropriately adjusted by linear weighted processing. By Monte Carlo simulation, it was concluded that the optimal weighting factor of the weighted SCCRFQPSK system was 0.7, and it got 0.3 dB Signal-to-Noise Ratio (SNR) gain at a Bit Error Rate (BER) of 10^{-5} at 4 iterations. The simulation results indicate that the proposed method can not only accelerate the decoding convergence and improve the performance of the SCCRFQPSK system, but also reduce the delay. To a certain extent, it can deal with the deep space communication with low SNR caused by long distance.

Key words: serial concatenation; recursive FQPSK (Feher-Patented QPSK); Maximum-A-Posteriori-probability (MAP) demodulation; extrinsic Log-Likelihood Ratio (ex-LLR); linear weighted processing

0 引言

作为一种恒包络调制, FQPSK-B 以其高频谱和高功率利用率的特性在卫星和深空通信中得到广泛应用, 已被确立为深空通信的调制标准之一^[1-7]。FQPSK-B 通过受控地引入互相关运算, 达到恒包络的目的, 从而有效地降低太空飞行器功率放大器非线性放大引起的失真^[3]。FQPSK-B 可以表示为一种递归(Recursive)或非递归(Non-Recursive, NR)网格编码调制(Trellis-Coded Modulation, TCM)结构, 由此利用维特比算法进行检测, 全维特比接收机共有 16 种网格状态, 实现复杂度较高^[3]。利用 FQPSK-B 基带波形之间的相关性, 将其 16 种基带波形分为四类, 可以得到一种只有两状态的简化形式

的维特比接收机。此外还包括常规 OQPSK 检测、平均匹配滤波器检测等次佳接收机^[1,3]。文献[4]根据其简化的非递归 TCM 结构, 引入了逐符号最大后验概率(Maximum-A-Posteriori-probability, MAP)算法^[5]对其解调, 但并未真正获得比特对数似然比外信息(Extrinsic Log-likelihood Ratio, ex-LLR)。

利用 FQPSK(Feher-Patented QPSK)内部递归 TCM 结构, 加入适当外码(如重复码、卷积码或低密度奇偶校验(Low Density Parity Check, LDPC)码等)形成级联迭代译码系统, 可以有效地提高功率利用率^[2,6]。目前, 对于编码 FQPSK 级联系统的研究依然不多, 文献[2]集中探讨了 FQPSK 与 LDPC 码的级联问题, 文献[6]则重点研究卷积码与 FQPSK 的迭代

收稿日期: 2014-03-14; **修回日期:** 2014-06-05。 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(61032003, 61271172); 中央高校科研基本业务费专项资金项目(A03008023901004); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20120185110030, 20130185130002)。

作者简介: 张高远(1984-), 男, 河南郑州人, 博士研究生, 主要研究方向: 信道编译码; 文红(1969-), 女, 四川成都人, 教授, 博士, CCF 会员, 主要研究方向: 编译码原理、密码学、网络安全通信; 宋欢欢(1987-), 女, 山东菏泽人, 硕士研究生, 主要研究方向: MIMO; 李腾飞(1988-), 男, 河南平顶山人, 硕士研究生, 主要研究方向: 喷泉码、图像处理。

解调性能。本文首先详细论述了加性高斯白噪声 (Additive White Gaussian Noise, AWGN) 信道下简化递归 FQPSK-B 的 MAP 解调算法,同时阐述了比特外信息提取方法;其次重点研究影响卷积编码的 FQPSK 串行级联系统迭代检测收敛性的正反馈问题。文献[8]针对串行级联连续相位调制 (Continue Phase Modulation, CPM) 系统存在的正反馈现象,提出对外信息进行指数形式的加权^[9],削弱了正反馈现象,提升了系统性能。文献[10]同样将此方案应用到基于 LDPC 码的串行级联 CPM 系统当中。大量仿真表明,正反馈现象^[8]对本文中的串行级联卷积编码递归 FQPSK (Serial Concatenation of Convolutional Coded Recursive FQPSK, SCCRFQPSK) 系统性能同样存在严重的影响。本文提出了一种实现简单,可以较大程度提高系统收敛性,提高系统性能的比特外信息线性加权处理方法。仿真结果表明,误比特率 (Bit Error Ratio, BER) 为 10^{-5} 时,相比传统迭代方案,经过现行加权处理后的迭代系统可以获得 0.3 dB 的增益,在一定程度上缓解深空通信中由于传输距离远而带来的信噪比极低的通信问题。

1 SCCRFQPSK 系统模型

文献[6]中提出了三种基于卷积码的 FQPSK-B 级联结构,包括两种串行和一种并行级联结构,本文采用如图 1 所示的串行级联方案。每一时刻包含 K 个二进制信息比特的序列 $U_1 = (u_1, u_2, \dots, u_k, \dots, u_K)$, 输入码率为 K/N 的卷积码编码器;输出序列 $C_1 = (c_1, c_2, \dots, c_N)$, 经随机比特交织后送入 FQPSK 网格编码器,网格编码器有递归和非递归两种形式^[3],本文采用如图 2 所示的递归形式。序列 U_2 经编码和调制映射后,产生基带波形序列:

$$C_2 = (y_1(t), y_2(t), \dots, y_{N/2}(t))$$

其中 $y_k(t) = M(c_k') = S_{I,k}(t) + jS_{Q,k}(t)$ 。

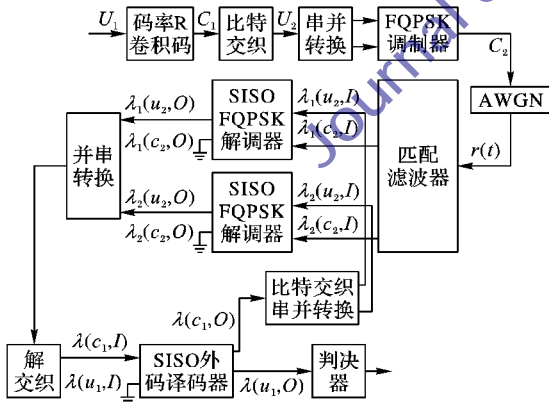


图1 基于卷积码的 FQPSK 串行级联迭代检测系统^[6]

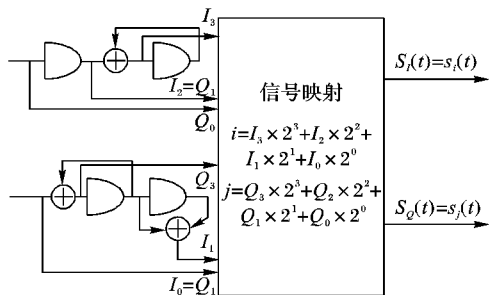


图2 递归 FQPSK 调制结构^[3]

2 简化的 RFQPSK 的外信息提取方法

文献[4]运用 BCJR 算法对 FQPSK 进行了解调,但并未得到比特似然比外信息。本章首先论述了该算法,并以此为依据给出比特外信息提取方法。

FQPSK 调制共有 16 种基带波形 $s_i(t)$ ($i = 0, 1, 2, \dots, 15$), 根据波形相似性将其分为四类 $q_i(t)$ ($i = 0, 1, 2, 3$)^[3], 其中:

$$\begin{cases} q_0(t) = \frac{1}{4} \sum_{i=0}^3 s_i(t) \\ q_1(t) = \frac{1}{4} \sum_{i=4}^7 s_i(t) \\ q_2(t) = -q_0(t) \\ q_3(t) = -q_1(t) \end{cases} \quad (1)$$

经过简化之后的基带波形集为二维信号,根据图 2 中映射关系,发送波形看成是四种波形,且记忆长度为 1,正交信道和同相信道完全独立。递归和非递归 FQPSK 的网格图如图 3 所示,简化后的 MAP 接收机则如图 4 所示^[3]。

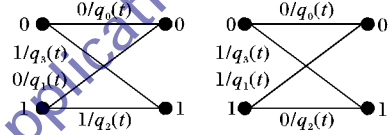


图3 非递归和递归 FQPSK 网格图

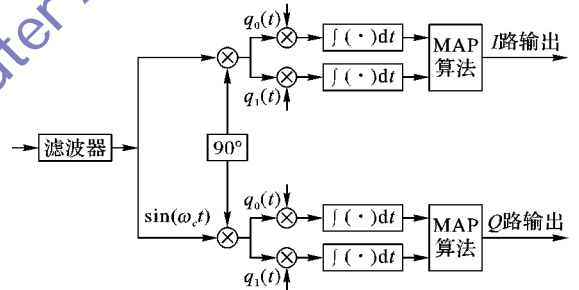


图4 FQPSK 简化的接收机

由于经简化处理后,同相信道和正交信道的调制和检测已相互独立,可以不加区分,所以以下分析对同相信道和正交信道同时适用。接收信号 $r(t) = C_2 + n(t)$, $n(t)$ 是均值为 0、方差为 σ^2 的加性高斯白噪声。 $r(t)$ 经相干检测器处理,最终输入 MAP 检测器的接收序列为 $r = (r_1, r_2, \dots, r_k, \dots, r_{N/2})$, 其中 $r_k = (r_{k,1}, r_{k,2}, r_{k,3}, r_{k,4})$ 。在 BCJR 算法中,分支度量定义为:

$$\begin{aligned} \gamma_i^k(s', s) &= p(S_k = s; r_k | S_{k-1} = s') = \\ &= p(S_k = s | S_{k-1} = s') p(r_k | S_k = s, S_{k-1} = s') = \\ &= p(u_k) p(r_k | u_k) = p(u_k) p(r_k | q_i^k(t)) \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $q_i^k(t)$ 表示时刻 k 由 $(S_k = s, S_{k-1} = s')$ 决定的第 i 种基带波形。在文献[4]已经得到:

$$\begin{cases} p(r_k | q_0^k(t)) = A \exp[-(-2r_{k,1} + E_0)/\sigma^2] \\ p(r_k | q_1^k(t)) = A \exp[-(2r_{k,2} + E_1)/\sigma^2] \\ p(r_k | q_2^k(t)) = A \exp[-(-2r_{k,1} + E_0)/\sigma^2] \\ p(r_k | q_3^k(t)) = A \exp[-(-2r_{k,2} + E_1)/\sigma^2] \end{cases} \quad (3)$$

其中:

$$A = \frac{1}{[(2\pi\sigma^2)^2 E_0 E_1]} \cdot \exp\left[-\frac{(r_{k,1}^2 E_1 + r_{k,2}^2 E_0)}{(\sigma^2 E_0 E_1)}\right]$$

E_0 和 E_1 分别为 $q_0(t)$ 和 $q_1(t)$ 的能量,三者都为常量。定义关于 u_k 的对数似然比先验信息为:

$$L^e(u_k) = \ln \left[\frac{p(u_k = 1)}{p(u_k = 0)} \right]$$

则有:

$$p(u_k) = B_k \exp[u_k L^e(u_k)] \quad (4)$$

其中 $B_k = [1 + \exp(L^e(u_k))]^{-1}$ 为常量。将式(3)和式(4)代入式(2)可得:

$$\gamma_i^k(s', s) = AB_k \exp[u_k L^e(c_k)] \gamma_i'(s', s) \quad (5)$$

其中 $\gamma_i^k(s', s)$ ($i = 0, 1, 2, 3$) 表示式(3)中的指数部分,则有

$$\begin{aligned} \lambda_{k,r} &= \ln \left[\frac{P(c_k = 1|r)}{P(c_k = 0|r)} \right] = \\ &= \ln \left[\frac{\sum_{(s',s) \in \Omega_k^+} \alpha_k(s') \gamma_i^k(s', s) \beta_k(s)}{\sum_{(s',s) \in \Omega_k^-} \alpha_k(s') \gamma_i^k(s', s) \beta_k(s)} \right] = \\ &= L^e(u_k) + \ln \left[\frac{\sum_{(s',s) \in \Omega_k^+} \alpha_k(s') \gamma_i'(s', s) \beta_k(s)}{\sum_{(s',s) \in \Omega_k^-} \alpha_k(s') \gamma_i'(s', s) \beta_k(s)} \right] = \\ &= L^e(u_k) + \tilde{\lambda}_{ext,k} \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $\tilde{\lambda}_{ext,k}$ 可作为比特先验信息,经串并转换和解交织后送入卷积码译码器。

在级联迭代译码系统当中,软输入软输出(Soft Input Soft Out, SISO)译码器得到的外信息有两种不同的使用方案。Berrou 等把外信息作为高斯分布的随机变量来处理,而 Robertson 等把外信息用来更新另一个成员译码器的先验信息,而后者在 Turbo 迭代中的性能在整体上要略优于前者^[11],本文也采用 Robertson 方案。

3 外信息线性加权处理方案

3.1 SCRFQPSK 系统的正反馈现象

在传统的迭代译码过程中,两个子译码器之间的外信息直接传递,可以称为简单传递法或直接传递法^[8]。当帧长较短时,交织深度不够,突发错误的可能性增大,外信息震荡加剧,随着迭代过程的不断进行,外信息的相互传递已经变成一种正反馈,导致系统性能基本保持不变或反复震荡,这种现象称为正反馈现象^[8]。一系列仿真表明正反馈现象在本文的 SCCRFQPSK 迭代系统中同样存在。图5为 AWGN 信道下,不同迭代次数时,帧长为 512 比特时本系统的收敛性能曲线。其中卷积码码率为 1/2,生成多项式为(7,5),随机交织,每个信噪比下至少采集 1000 个错误比特。由图5可以看出,在短帧系统的瀑布区,在最初几次迭代中,误比特率迅速下降,而达到一定的迭代次数之后,正反馈现象加剧,系统性能基本保持不变或震荡严重。可见,正反馈现象是影响本文迭代系统性能的一个关键因素。

3.2 比特外信息加权处理方案

文献[8]和[10]分别对基于卷积码和 LDPC 码的 CPM 串行级联迭代系统外信息进行指数形式加权^[9],通过削弱正反馈现象来改善系统性能,具体实现方法详见文献[9]。为了研究方便,本文只考虑对 SISO FQPSK 解调器输出的外信息进行加权处理,而不对 SISO 卷积码译码器反馈给 SISO FQPSK 解调器的外信息进行加权。通过对 SCCRFQPSK 系统

进行仿真,发现文献[9]中的指数形式加权处理对收敛性的改善并不明显。针对本文的串行级联迭代系统,现提出线性加权法。该方法是将对式(6)中的 $\tilde{\lambda}_{ext,k}$ 进行加权,得到新的外信息 $\tilde{\lambda}_{ext,k}' = \varphi(\tilde{\lambda}_{ext,k}) \cdot \tilde{\lambda}_{ext,k}$ 后再传递给 SISO 卷积码译码器。这里 φ 为 $\tilde{\lambda}_{ext,k}$ 的函数,且令 $\varphi(\tilde{\lambda}_{ext,k}) = \omega$, ω 为加权因子,且 $0 < \omega \leq 1$ 。当 $\omega = 1$ 时,即变为传统的直接传递法。具体的实现框图如图6所示,在图6当中,由 FQPSK 解调器输出的 ex-LLR,经串并转换和解交织之后,并不直接送入卷积码 SISO 译码器,而是经过线性加权处理得到 $\tilde{\lambda}_{ext,k}'$ 后将其作为先验信息送入卷积码的 SISO 译码器。目前通过理论分析得到最优的加权因子仍有一定的难度,可以考虑通过蒙特卡罗仿真得到。

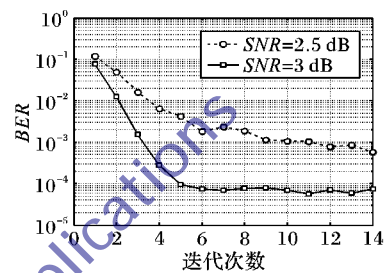


图5 帧长为 512 比特时系统收敛性能

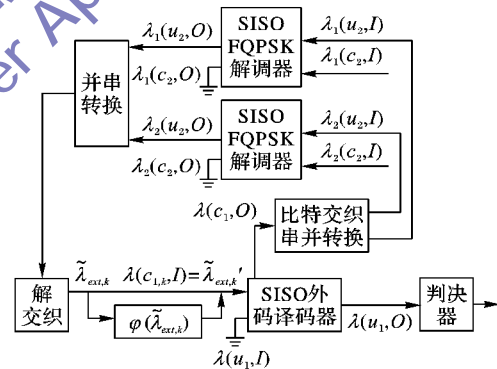


图6 经加权处理的 SCRFQPSK 迭代检测框图

显然,相对于文献[9]中的指数形式加权,线性加权实现更为简单。其物理意义为:首先,对于 SCCRFQPSK 系统,对整个系统采用 MAP 译码是一种最优的译码方式。由于此时状态转移较多,实现复杂度较大,在实际应用中经常采用对每个分量码采用独立 MAP 译码器的迭代 SISO 译码^[12],这种次优的译码算法必然带来信息比特平均不确定度(通过 $-\sum_{u_k} p(u_k) \lg(p(u_k))$ 计算得到)的降低。图7给出了信息比特的的外信息幅度与其平均不确定度的关系曲线^[13]。由图7可知,信息比特的的外信息幅度是平均不确定度的单调递减函数,则次优迭代译码方式对比特可靠度存在“过估计”(overestimation)现象,而线性加权处理能对此现象进行一定程度的退化修正。其次,在 SCCRFQPSK 系统中,自身采用的简化形式的四状态 MAP 解调器,相对于未经简化的全状态 MAP 解调器,对比特可靠度必然存在过估计现象^[12]。再者,随着迭代过程的不断进行, SISO 译码器输出的 $\tilde{\lambda}_{ext,k}$ 可认为近似服从高斯分布^[14],经过合适的加权处理, $\tilde{\lambda}_{ext,k}$ 的方差降低,其波动性自然得到有效的削弱。最后,更直观地讲,有效的线性加权处理能将外信息幅度 $|\tilde{\lambda}_{ext,k}|$ 降低到一个合理的

范围之内,从而减小比特位概率的波动性。需要特别指出的是, ω 的取值不能过小,否则将会有 $\tilde{\lambda}_{ext,k}' \approx 0$,从而使得每次迭代时输入 SISO 卷积码译码器的先验信息趋于等概,进而使得迭代检测失去意义,大量译码错误也随之发生。线性加权处理并不是一个新的概念,在低密度奇偶校验码的归一化置信传播算法和归一化最小和算法中都有应用^[13]。

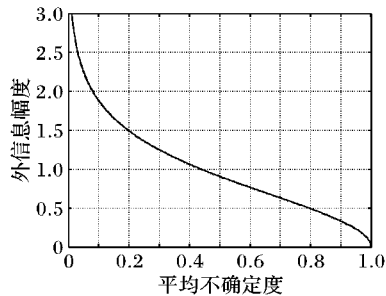


图7 $|\tilde{\lambda}_{ext,k}|$ 是平均不确定度的单调递减函数

4 系统仿真与结果分析

本章所采用的仿真参数如下:

1) FQPSK-B 的三种接收机性能仿真时发送帧长为 1024 比特,在 AWGN 信道条件下,每个信噪比点至少采集 1000 个错误比特。

2) SCCRFQPSK 迭代系统中,卷积码码率为 1/2,生成多项式为(7,5),帧长 1024 比特,随机交织。在 AWGN 信道条件下,每个信噪比点至少采集 1000 个错误比特。

4.1 FQPSK-B 不同接收机性能比较

图 8 为三种不同接收机误比特率性能曲线;表 1 为误比特率为 10^{-5} 时,三种 FQPSK-B 接收机性能与理论 QPSK 性能损耗的比较。通常系统带宽利用率的提高必然伴随着检测性能的损失^[3],从图 8 和表 1 可见,FQPSK-B 同样存在此种现象。

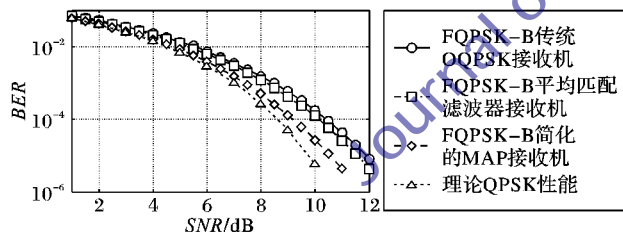


图8 FQPSK-B 三种接收机误比特率性能

表1 $BER = 10^{-5}$ 时三种 FQPSK-B 接收机与 QPSK 检测性能比较

接收机	SNR/dB	性能损耗/dB
理想 QPSK 检测	9.6	—
简化的 MAP 接收机	10.7	1.1
平均匹配滤波接收机	11.6	2.0
OQPSK 接收机	11.9	2.3

4.2 寻找最优加权因子 ω

图 9 为不同迭代次数时的误比特率性能曲线。由图 9 可知,系统性能在迭代 4 次时受正反馈现象影响最为严重;在 3 dB 以后,出现错误平台现象;当信噪比高于 3.35 dB 时,最终的硬判决发生在误比特率较高的点上的几率较高^[8],导致系统性能比迭代 3 次还要差。所以本小节考虑设定迭代次数为 4,探讨线性加权对正反馈现象的改善情况。不同 ω 值下的性能曲线如图 10 所示。由图 10 可知,在经过合适的加权处理

(如 ω 从 0.5 到 0.9)后,正反馈现象被不同程度地削弱。同时,正如在第 3.2 节中分析的一样,当 ω 较小(如为 0.1 和 0.3)时,由于 $|\tilde{\lambda}_{ext,i}|$ 被削减较大,使得输入卷积码译码器的比特先验信息(每个比特为 0 或者为 1 的概率)趋于等概,系统性能恶化严重。在 2 dB 到 3 dB 的范围内,最优的加权系数为 $\omega = 0.7$ 。

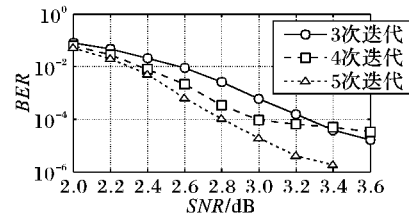


图9 传统方法不同迭代次数时的误比特率性能

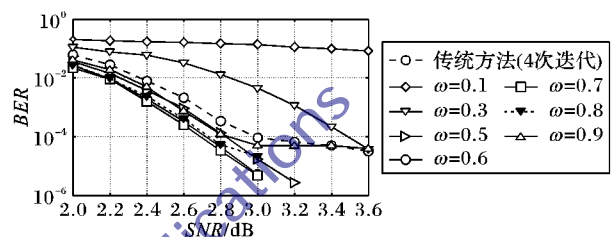


图10 不同加权系数对性能的影响

4.3 性能分析

考虑将传统方法迭代 4 次和 5 次,迭代 4 次经线性最优加权处理($\omega = 0.7$)和迭代 4 次经文献[9]中指数加权处理的误比特率性能进行比较,得到的曲线如图 11 所示。

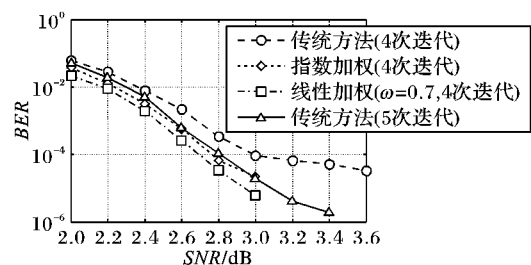


图11 传统方法与改进方法性能比较

由图 11 可见,在 2~3 dB,实现复杂度较高的指数形式的加权对正反馈的改善情况并不理想,而单单增加迭代次数为 5 也并未对系统性能有较大幅度的改善。按照图 6 给出的实现方法,先对 FQPSK 解调器输出的 $ex\text{-}LLR$ 进行最优的线性加权处理(取 $\omega = 0.7$),则比特可靠度外信息中存在的“过估计”现象已经得到削弱,即此时送入卷积码译码器的比特先验信息更加准确可靠,最终的译码性能必然得到有效改善。由图 11 可知,迭代 4 次,在 $BER = 10^{-5}$ 时,运用最优线性加权处理相对于传统方法可获得 0.3 dB 的增益;更可观的是,相对于传统方法迭代 5 次还可以获得 0.14 dB 的增益。可见,合适的线性加权处理能明显提高 SCCRFQPSK 系统收敛速度,有效地降低系统时延;更重要的是,相对于指数形式加权,本方法实现更为简单。基于同样的理论出发点,本文提出的线性加权处理方案对于文献[2]中的 FQPSK 与 LDPC 码构成的级联系统同样能取得一定编码增益。

5 结语

FQPSK-B 与卷积码结合形成的 SCCRFQPSK 串行级联系统能取得不错的编码增益。针对 SCCRFQPSK 系统迭代过程

中存在的正反馈现象,提出对 FQPSK 解调器输出的比特对数似然比外信息进行线性加权处理后再传递给卷积码译码器,从而在较少的迭代次数下获得了更好的性能,在一定程度上缓解深空通信中由于传输距离远而带来的信噪比极低的通信问题。需要指出的是,本文通过蒙特卡罗仿真得到了系统所需的最优的加权因子,而如何通过理论分析来加以求解仍有待深入研究。

参考文献:

- [1] LIU Q, MEI J, CHENG W, *et al.* Analysis and simulation on FQPSK modulation performance applied to deep space communication [J]. *Radar Science and Technology*, 2013, 11(1): 101–105. (刘强, 梅进杰, 程伟, 等. 基于深空通信的 FQPSK 调制性能分析与仿真[J]. *雷达科学与技术*, 2013, 11(1): 101–105.)
- [2] XIE Z, ZHANG G, BIAN D. A concatenated coded modulation scheme and its iterative receive for deep space communication[J]. *Journal of Astronautics*, 2011, 32(8): 1786–1792. (谢智东, 张更新, 边东明. 深空通信中的一种级联编码调制及其迭代接收[J]. *宇航学报*, 2011, 32(8): 1786–1792.)
- [3] SIMON M K. *Bandwidth-efficient digital modulation with application to deep-space communications* [M]. Hoboken: Wiley, 2003.
- [4] ZHANG G, WEN H, ZHOU L, *et al.* The research of serially concatenated FQPSK demodulation based on LDPC codes[C]// *FGCN 2011: Proceedings of the International Conference on Future Generation Communication and Networking, Communications in Computer and Information Science Volume 265*. Berlin: Springer-Verlag, 2012: 254–260.
- [5] BAHL L, COCKE J, JELINEK F, *et al.* Optimal decoding of linear codes for minimizing symbol error rate[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1974, 20(2): 284–287.
- [6] SIMON M K, DIVSALAR D. A reduced complexity highly power-bandwidth efficient coded FQPSK system with iterative decoding [C]// *ICC 2001: Proceedings of the IEEE International Conference on Communications*. Piscataway: IEEE, 2001, 10: 2963–2969.
- [7] YANG F, SONG Z, QIAO K. FQPSK digital modulator implementation method base on FPGA [J]. *Control & Automation*, 2012, 28(10): 171–172. (杨峰, 宋哲, 乔旷怡. 基于 FPGA 的全数字 FQPSK 调制器实现[J]. *微计算机信息*, 2012, 28(10): 171–172.)
- [8] HAN X, BI W, ZHANG X. A method to improve the iterative detection convergence of SCCPM [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(2): 274–277. (韩学志, 毕文斌, 张兴周. 一种提高 SCCPM 系统迭代检测收敛性的方法[J]. *电子与信息学报*, 2007, 29(2): 274–277.)
- [9] KOCAREV, L, TASEV Z, VARDY A. Improving turbo codes by control transient chals in turbo-decoding algorithm [J]. *Electronics Letters*, 2002, 38(20): 1184–1186.
- [10] RUI X, ZHAO D-F, XIAO C-L. A novel approach to improve the iterative detection convergence of LDPC coded CPM modulated signals [C]// *Proceedings of 6th International Conference on Wireless Communication Networking and Mobile Computing*. Piscataway: IEEE, 2010: 1–5.
- [11] YAN T, DU X, RU L. Study on iterative decoding of turbo codes with extrinsic information in different versions [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2005, 27(10): 1643–1646. (阎涛, 杜兴民, 茹乐. 基于不同外信息处理方式的 Turbo 迭代译码研究[J]. *电子与信息学报*, 2005, 27(10): 1643–1646.)
- [12] LIN S, COSTELLO D J, Jr. *Error control coding: fundamentals and application* [M]. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 1983.
- [13] YAZDANI M R, HEMATI S, BANIHASHEMI A H. Improving belief propagation on graphs with cycles [J]. *IEEE Communications Letters*, 2004, 8(1): 57–59.
- [14] RICHARDSON T. The geometry of turbo-decoding dynamics [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2000, 46(1): 9–23.
- [8] RINTAMAKI M, KOIVO H, HARTIMO I. Adaptive closed-loop power control algorithms for CDMA cellular communication systems [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2004, 53(6): 1756–1768.
- [9] YI D, DENG K, DONG K. Performance analysis of an improved uplink power control method in LTE-A CoMP network [C]// *IC-BNMT 2010: Proceedings of the 3rd IEEE International Conference on Broadband Network and Multimedia Technology*. Piscataway: IEEE, 2010: 624–628.
- [10] ONIRETI O, HELIOT F, IMRAN M A. On the energy efficiency-spectral efficiency trade-off in the uplink of CoMP System [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2012, 11(2): 556–561.
- [11] ZHANG X, LI Y, JI H. An energy efficiency power and sub-carrier allocation for the downlink multi-user CoMP in multi-cell systems [C]// *ICC 2012: Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Communications*. Piscataway: IEEE, 2012: 5926–5930.
- [12] FU S, WU B, HO P-H, *et al.* Interference coordination in CoMP with transmission scheduling and game theoretical power reallocation [C]// *ICC 2012: Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Communications*. Piscataway: IEEE, 2012: 4212–4217.
- [13] FODOR G, JOHANSON M, SOLDATI P. Near optimum power control under fairness constraints in CoMP systems [C]// *GLOBE-COM 2009: Proceedings of the 2009 IEEE Global Telecommunications Conference*. Piscataway: IEEE, 2009: 1–8.
- [14] KATIRAN N, FISAL N, YUSOF S K S, *et al.* Joint power allocation strategy in CoMP (JP) transmission [C]// *ISWTA 2012: Proceedings of the 2012 IEEE Symposium on Wireless Technology and Applications*. Piscataway: IEEE, 2012: 146–150.
- [15] SOUDEN M, ARAKI S, KINOSHITA K, *et al.* A multichannel MMSE-based framework for speech source separation and noise reduction [J]. *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 2013, 21(9): 1913–1928.
- [16] MEHANA A H, NOSRATINIA A. Performance of linear receivers in frequency-selective MIMO channels [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(6): 2697–2705.
- [17] OHWATARI Y, MIKI N, SAGAE Y, *et al.* Investigation on interference rejection combining receiver for space-frequency block code transmit diversity in LTE-advanced downlink [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013, 63(1): 191–203.
- [18] MA X, GUAN X, TAO J, *et al.* A novel IRC botnet detection method based on packet size sequence [C]// *ICC 2010: Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Communications*. Piscataway: IEEE, 2010: 1–5.
- [19] BAI Z, BADIC B, IWELSKI S, *et al.* On the equivalence of MMSE and IRC receiver in MU-MIMO systems [J]. *IEEE Communications Letters*, 2011, 15(12): 1288–1290.

(上接第 2455 页)