

基于多符号检测和 Turbo 乘积码的 PCM/FM 遥测系统性能

王莉*, 袁福, 向良军, 郑林华

(国防科学技术大学 电子科学与工程学院, 长沙 410073)

(*通信作者电子邮箱 arttiankong@163.com)

摘要:多符号检测(MSD)和 Turbo 乘积码(TPC)技术联合应用可以大幅提高脉冲编码调制/调频(PCM/FM)遥测系统性能。针对 MSD 算法计算复杂度高的问题提出了一种改进的 MSD 算法,可以有效降低计算复杂度;在 TPC 的传统 Chase 译码算法中通过简化软输入信息计算可以降低系统存储量。仿真结果表明,改进方法和传统的两种技术联合使用相比,虽然损失了约 1.7 dB 解调增益,但仍提高 PCM/FM 信号解调性能约 8 dB,且算法复杂度低,存储量小,更适合硬件实现。

关键词:脉冲编码调制/调频;多符号检测;Turbo 乘积码;Chase 译码;低复杂度;低系统存储量

中图分类号: TN911.22 **文献标志码:** A

Performance of PCM/FM telemetry system based on multi-symbol detection and Turbo product code

WANG Li*, YUAN Fu, XIANG Liangjun, ZHENG Linhua

(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China)

Abstract: Multi-Symbol Detection (MSD) and Turbo Product Code (TPC) can greatly improve the performance of PCM/FM (Pulse Code Modulation/Frequency Modulation) telemetry system. To solve the high computational complexity issues in MSD algorithm, an improved algorithm which reduced the computational complexity of MSD was proposed. Chase decoding algorithm for TPC also reduced the system memories by simplifying the calculation of the soft input information. The simulation results show that despite of 1.7 dB loss, the improved algorithm still obtains about 8 dB performance gain. Because of low-complexity and low system memories, it is more suitable for hardware implementation.

Key words: Pulse Code Modulation/Frequency Modulation (PCM/FM); Multi-Symbol Detection (MSD); Turbo Product Code (TPC); Chase decoding; low-complexity; low system memory

0 引言

脉冲编码调制/调频(Pulse Code Modulation/Frequency Modulation, PCM/FM)信号常见的解调方式为鉴频解调,是一种非相干解调方式,不需要进行载波和相位同步,接收机结构简单^[1]。但随着数据速率的不断提高以及作用距离的不断增长,现有设备已经不能满足日益增长的需求,因此研究采用新的技术手段克服鉴频解调的门限效应、解决功率利用率等问题意义重大。

多符号检测(Multi-Symbol Detection, MSD)是一种充分利用码元之间相位连续性来提高解调性能的思想。MSD 技术应用于 PCM/FM 信号的解调时,仅作用于 PCM/FM 信号的解调端,发送端无需增加相应设备,只要求调制指数符合一定要求^[2];不仅保留了 PCM/FM 体制的优点,也克服了传统鉴频解调在低信噪比下的门限效应^[3]。Pelchat 等^[4]最早提出 MSD 的思想。Osborne 等^[5]将 MSD 思想应用于连续相位频移键控(Continuous-Phase Frequency Shift Keying, CPFSK)信号的解调,提高了 CPFSK 信号的解调性能。CPFSK 和 PCM/FM 信号均可看作满足一定参数条件的连续相位调制(Continuous Phase Modulation, CPM)信号^[6],因此 MSD 思想可以移植到 PCM/FM 信号的解调上。Geoghegan^[7]研究表明,与传统鉴频解调相比,MSD 算法在符号相关长度 $N = 5$ 时可以提高

PCM/FM 信号解调增益约 3 dB。MSD 算法虽然性能优良,但计算量大,不利于硬件实现。基带复旋转多符号检测(Baseband Complex Rotation MSD, BQCR-MSD)算法^[8]通过复旋转运算来简化计算复杂度,使 MSD 算法适用于硬件实现,但该算法所需信号采样点数较多,且适用的基带信号速率比较低。

1993 年, Berrou 等^[9]在 ICC 会议上首次提出了 Turbo 码的概念。1994 年, Pyndiah 等^[10]提出了分组 Turbo 码,即 Turbo 乘积码(Turbo Product Code, TPC),并设计了可实现软输入软输出的 Chase 译码算法,成为了 TPC 码译码算法的奠基之作。后续对 TPC 译码算法的研究改进研究都是在此方法基础上进行的。1996 年, Pyndiah 等^[11]给出了 TPC 梯度译码算法,用前一次迭代得到的最优判决码字来替代竞争码字,简化了外信息的计算。2001 年, Chen 等^[12]针对文献[11]的梯度算法中前一次迭代的最优判决码不一定是合法码字的缺点进行了改进,进一步提高了 TPC 码的译码性能。2004 年, Argon 等^[13]对 TPC 的 Chase 译码算法进行改进,使用传统有序的校验式,采用奇偶校验中的偶校验来获得校正子,可以获得最少次数的偶校验。该算法降低了译码的复杂度,但译码性能并没有降低。近几年,国内的许多学者针对 TPC 码也展开了大量研究。黄小平等^[14]、柳昭等^[15]对 TPC 译码算法进行了深入研究并提出了改进算法。王晓波等^[3]将 MSD 与

收稿日期: 2013-06-18;修回日期: 2013-08-14。

作者简介: 王莉(1988-),女,河南新郑人,硕士研究生,主要研究方向:通信信号处理;袁福(1984-),男,云南富源人,博士研究生,主要研究方向:认知无线电、协同通信;向良军(1975-),男,湖南汨罗人,讲师,博士研究生,主要研究方向:通信信号处理;郑林华(1961-),男,湖南长沙人,教授,博士,主要研究方向:宽带无线通信、通信信号处理。

TPC技术相结合,对原理样机进行测试,指出两项技术相结合可以提高PCM/FM解调性能约8.5 dB,但并未给出算法的具体实现过程。

本文在研究MSD和TPC技术的基础上,对MSD算法和TPC译码算法进行改进,并将这两项技术应用于遥测PCM/FM信号的解调,显著提高了PCM/FM信号的解调性能。改进后的算法在性能损失不大的情况下大幅降低了算法复杂度,更利于硬件实现。

1 多符号检测算法

1.1 MSD算法描述

MSD算法的基本思想是利用码元之间相位之间的连续性,当接收端接收到一个码元时,并不立即进行判决,而是对当前码元前后多个码元进行观察,进行比较分析后,再对当前码元进行判决,从而提高对当前符号的判决性能。

MSD算法可以分为相干MSD和非相干MSD,非相干MSD只需要对载波进行频率跟踪而不需要进行相位跟踪。非相干MSD算法根据是否对接收信号进行基带处理又可以分为中频MSD和基带MSD。基带MSD相较中频MSD虽有一定性能损失,但基带信号的处理速率低,更易实现,故常用基带MSD算法。

基带MSD算法的实现过程可以表述为:将接收到的PCM/FM信号进行正交解调,形成基带复信号,和本地参考复信号的所有可能组合求共轭复相关,对相关结果进行模平方计算后再比较,模平方值最大的本地参考信号组合的中间一位即为判决输出。第 k 组本地参考复信号与基带复信号处理流程如图1所示,其中: $r(t)$ 表示接收信号, L_k 为第 k 组本地参考复信号。其他各组本地参考复信号的处理过程与第 k 组相类似。

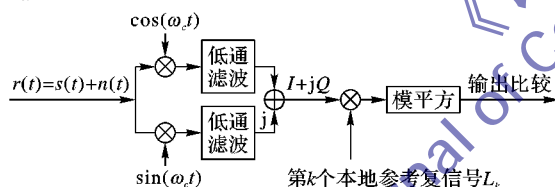


图1 基带复信号求相关处理框图

1.2 MSD算法改进

基带MSD算法需计算较长的相关,计算复杂度随观测间隔呈指数增长,对硬件实现提出了很大挑战。为降低基带MSD算法的计算复杂度,从降低相关长度的角度出发,用单个符号间隔内相关运算结果之和来等效 N 个符号间隔内的相关。

当观测间隔为 N 时,由于预滤波的影响,一个码元将扩展成三个码元的宽度。考虑两端码元的符号干扰,故本地参考信号波形的组合共有 2^{N+2} 种。

基带MSD算法中需要计算相关长度为 N 的 2^{N+2} 个相关值,计算复杂度高。考虑预滤波的影响,一个码元扩展成了三个码元,使单个码元间隔内求相关的可能性共有8种,因此,对接收到的观测间隔内的码元进行分段相关,只需计算 $N \times 8$ 个相关值,使计算相关值的数目大幅下降。因此考虑利用单个码元间隔内分段相关之和来等效较长的相关。

例如第 n 组本地参考复信号和接收信号的相关结果 $M(n)$ 可用分段相关结果表示为

$$M(n) = M_1(n) + M_2(n) + \dots + M_N(n) \quad (1)$$

按照上述方法可计算出 2^{N+2} 组相关值,对这 2^{N+2} 个复值进行模平方运算,再进行比较判决即可得到判决输出。而第 k 组

的第 i 个相关结果 $M_i(k)$ 可从分段后单个码元间隔内的 $N \times 8$ 个相关结果中取,其中 $k = 1, 2, \dots, 2^{N+2}$, $i = 1, 2, \dots, N$,不需要再重复计算相关,使相关运算的长度和次数均大幅下降。

针对改进前后MSD算法相关运算处理过程中乘法和加法运算量进行比较分析,计算量降低前后对照如表1所示。其中 N 为观测间隔符号数, N_s 为采样点数。

表1 复杂度降低前后计算量比较

算法名	乘法运算量	加法运算量
基带MSD	$N \times N_s \times 2^{N+2} + 2^{N+3}$	$N \times N_s \times 2^{N+2}$
改进MSD	$N \times N_s \times 8 + 2^{N+3}$	$N \times (N_s - 1) \times 8 + (N - 1) \times 2^{N+2}$

2 TPC编译码

2.1 TPC编码原理

TPC码是乘积码的一种。乘积码是一种多维阵列编码技术,常用的乘积码为二维或三维码。根据构成的子码种类不同,乘积码又可分为RS乘积码、扩展汉明乘积码、BCH乘积码、奇偶校验乘积码等。根据子码的不同,使得乘积码在复杂度、编码效率、性能等方面有很大不同。卫星通信中常用扩展汉明码作为子码。现以二维乘积码为例说明TPC码的编码原理:假设子码是两个扩展汉明码,分别为 $C_1(n_1 + 1, k_1, d_1 + 1)$ 和 $C_2(n_2 + 1, k_2, d_2 + 1)$,其中: $n_i (i = 1, 2)$ 表示码长, k_i 表示信息位数, d_i 表示最小汉明距离。

编码过程如下:

- 1) 将 $(k_1 \times k_2)$ 个信息位排列成 k_1 行 k_2 列的矩阵。
- 2) 用 C_2 码对 k_1 行信息位进行编码。
- 3) 用 C_1 码对 $n_2 + 1$ 列信息位进行编码,最终构成 $(n_1 + 1) \times (n_2 + 1)$ 的矩阵码字。构成的TPC码码长 $n = (n_1 + 1) \times (n_2 + 1)$,信息位数 $k = k_1 \times k_2$,最小汉明距离 $d = (d_1 + 1) \times (d_2 + 1)$ 。最终得到的码字结构如图2所示。

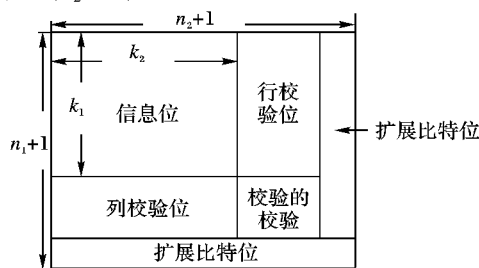


图2 TPC编码结构

2.2 Chase迭代软输入软输出译码算法

Chase算法是一种针对线性分组码的软输入硬输出(Soft-Input Hard-Output, SIHO)译码算法,输出为硬判决结果。而软判决译码可以有效提高线性分组码的纠错能力,故TPC码的译码多采用迭代SISO译码算法。算法实现主要包括以下几个步骤^[10]:

- 1) 对接收信号 $\mathbf{R} = (r_1, r_2, \dots, r_n)$ 进行硬判决,得到硬判决结果 $\mathbf{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_n)$,其中:

$$y_i = 0.5(1 + \text{sign}(r_i)); i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

- 2) 在接收序列 \mathbf{R} 中,按照可信度选取 $p = \lfloor d/2 \rfloor$ 个不可靠位。 y_i 的可信度可以表示为

$$\Lambda(y_i) = \ln \left(\frac{\Pr\{e_i = +1 | r_i\}}{\Pr\{e_i = -1 | r_i\}} \right) = \left(\frac{2}{\sigma^2} \right) r_i \quad (3)$$

对上式进行归一化处理后 $|r_i|$ 即表示接收码字的可信度。

- 3) 根据可信度最低的位置生成 $q = 2^p$ 个测试图样 \mathbf{T}^q 。

4)对硬判决结果 Y 和测试图样进行异或运算得到测试序列 $Z^q = Y \oplus T^q$ 。

5)对 Z^q 进行代数译码,将得到的译码结果 C^i 进行双极性映射:0 映射为 -1 ,1 映射为 $+1$,然后归入集合 Ω 。

6)求集合 Ω 中的码字与接收序列 R 的欧氏距离,如式(4)所示。选取欧氏距离最小的码字作为判决序列 D 。

$$|R - C^i| = \sum_{j=1}^n (r_j - c_j^i)^2 \quad (4)$$

为了实现 SISO 迭代译码,要将输出信息转化为软信息,需引入外信息对输出信息进行调节。外信息的计算满足式(5):

$$w_j = \begin{cases} \left(\frac{|R - C|^2 - |R - D|^2}{4} \right) d_j - r_j, & C \in \Omega \\ \beta \times d_j, & C \notin \Omega \end{cases} \quad (5)$$

其中: C 是集合 Ω 中与接收信号 R 欧氏距离最小且满足 $c_j \neq d_j$ 码字,是最优判决码字 D 的竞争码字。但有时存在找不到竞争码字的情况,此时就引入可信度调节因子 β 来计算外信息,其数值多由实验获得。

TPC 迭代 SISO 译码的过程可以由单元译码器的结构进行说明,如图3所示。

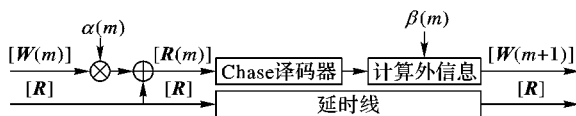


图3 TPC 单元译码器结构

单元译码器包含两部分:基于 Chase 算法的软输入硬输出译码器部分,把硬输出转化为软输出的外信息计算部分。其工作过程如下:

1)计算软输出信息 $[R(m)] = [R] + \alpha(m)[W(m)]$ 。

2)将软输出计算结果 $[R(m)]$ 代入 Chase 译码器进行译码,确定集合 Ω , 找到最优判决码字 D 及竞争码字 C 。

3)计算外信息 $[W(m+1)]$, 将新的外信息代入下一级译码器,作为译码先验信息。

其中: m 表示第 m 次半迭代, $[R(m)]$ 为软输出矩阵, $[W(m)]$ 为外信息矩阵, $\alpha(m)$ 为缩放因子。当完成一次行译码和列译码就实现了一次 TPC 译码的完整迭代。

2.3 Chase 译码算法改进

为简化软输入信息的计算,减少存储量,将接收信号矩阵 $[R]$ 用前一个单元译码器的迭代输出 $[R(m-1)]$ 替代,得到的软信息计算公式为:

$$[R(m)] = \begin{cases} [R(m-1)] + \alpha(m)[W(m)], & m \geq 1 \\ [R] & m = 0 \end{cases} \quad (6)$$

得到新的迭代译码框图如图4所示。

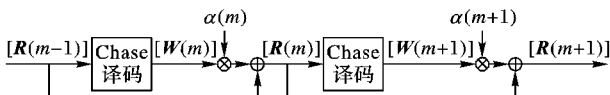


图4 改进后的 Chase 迭代译码结构

这样处理不用再额外存储接收信号矩阵 $[R]$, 每次迭代的软输出矩阵 $[R(m)]$ 都可由前一次迭代的软输出矩阵 $[R(m-1)]$ 和外信息矩阵 $[W(m)]$ 计算得到,节省了存储,且对译码性能影响较小。

3 仿真结果及性能分析

3.1 系统仿真模型

将 MSD 技术和 TPC 编译码应用于 PCM/FM 遥测系统,系统框图如图5所示。系统仿真模型的工作流程为:首先对

基带 PCM 码元进行 TPC 编码,对编码后的信息数据经过脉冲成型形成可传送波形,再经过 FM 调制发送到信道中;接收端对接收的信号经过 A/D 变换,通过数字下变频搬移至基带处,应用 MSD 对基带信号进行处理得到解调信息,最后进行 TPC 译码即可恢复原始数据信息。

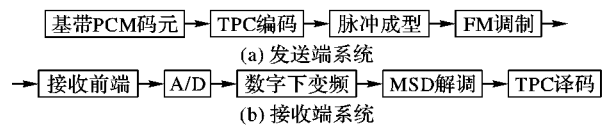


图5 PCM/FM 遥测系统框图

3.2 仿真分析

根据实际工程应用背景,系统仿真的参数设置为:信号速率 $f_b = 10 \text{ Mb/s}$,中频 $f_c = 70 \text{ MHz}$,采样速率 $f_s = 90 \text{ Mb/s}$;脉冲成型采用升余弦滤波器,PCM/FM 信号调制指数 $h = 0.7$;信道噪声为高斯白噪声。此外,仿真实验中假设载波和定时已经同步。

3.2.1 MSD 技术应用于 PCM/FM 解调

基带 MSD 算法性能与观测间隔 N 的选取有关,综合考虑计算复杂度和解调性能,选择观测间隔 $N = 5$ 。

图6的仿真结果表明在 10^{-6} 误码率下,基带 MSD 解调相较于鉴频解调性能增益约 3 dB。

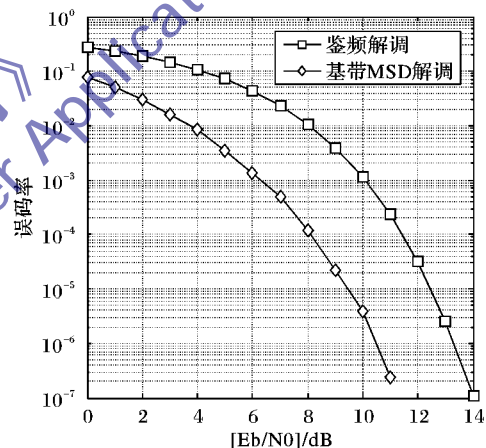


图6 基带 MSD 解调时 PCM/FM 信号解调性能

3.2.2 TPC 编译码技术应用于 PCM/FM 解调

TPC 编码部分选择两个 $(64,57)$ 的扩展汉明码为子码。考虑到 Chase 迭代译码过程中迭代次数和不可靠位数对译码复杂度和性能的影响,选择不可靠位数 $p = 4$,迭代次数 $\text{Iteration} = 4$ 。译码部分仿真采用改进后的 Chase 译码算法。

由图7可以看出,在 10^{-6} 误码率下,加入 TPC 技术后可以提高 PCM/FM 信号解调性能 6 dB。加入 TPC 编码会略微增加系统带宽,例如采用 $(64,57) \times (64,57)$ 的扩展汉明码编码时系统带宽增加约 26%,但和其优异的性能相比,带宽的略微增加是可以接受的。

3.2.3 基带 MSD 技术和 TPC 技术联合使用

选择观测间隔 $N = 5$, TPC 子码为两个 $(64,57)$ 的扩展汉明码。仿真中 MSD 技术采用基带 MSD 算法,TPC 译码采用改进的 Chase 译码算法。

图8表明,联合使用 MSD 和 TPC 两项技术,在 10^{-6} 误码率下可以提高 PCM/FM 解调性能约 9.7 dB。

图9给出了采用改进后的 MSD 算法和 TPC 编译码联合作用于遥测 PCM/FM 信号的解调性能。由仿真结果可以看出在 10^{-6} 误码率下,采用 $(64,57) \times (64,57)$ 的子码,联合使用两项技术和鉴频解调的理论曲线相比,PCM/FM 信号解调性能增益可以达到 8 dB,使 PCM/FM 信号的性能得到了大幅提升。此外,TPC 编译码采用子码 $(32,26)$ 和子码 $(64,57)$

相比,性能增益约1 dB。这是因为在低编码效率时信息冗余更大,这里是用信息冗余换取了性能的提升。

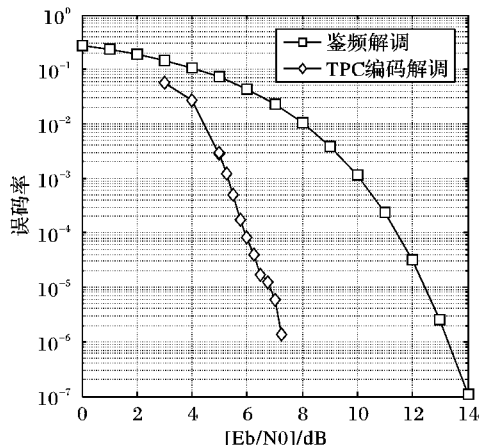


图7 基于TPC编译码的PCM/FM信号解调性能

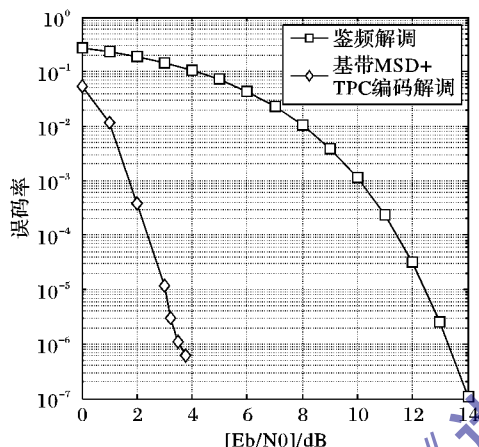


图8 基带MSD和TPC联合使用时PCM/FM信号解调性能

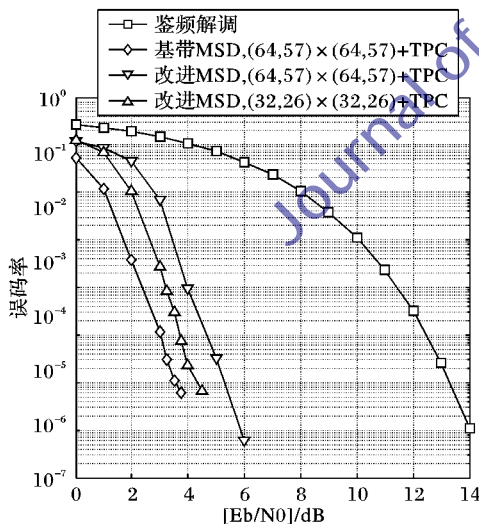


图9 基带MSD+TPC和改进MSD+TPC解调性能比较

仿真结果表明采用改进的MSD算法和TPC联合解调比采用基带MSD和TPC联合解调性能下降约1.7 dB。虽然和基带MSD相比性能有所损失,但在 10^{-6} 误码率下仍有8 dB的性能增益,且改进后的MSD算法计算量大幅下降,易于硬件实现。

4 结语

本文在介绍MSD算法和TPC编译码原理的基础上,重点研究了改进的MSD算法和改进的Chase译码算法,并将这两

种技术应用于PCM/FM遥测系统进行了仿真分析。使用TPC编译码技术,系统带宽增加较小但性能优异;应用MSD解调技术,克服了传统鉴频解调的门限效应。将改进的MSD和TPC技术联合使用可以在保证PCM/FM信号解调性能增益损失不大的情况下,算法计算复杂度下降,存储量减小,实现了性能和计算复杂度的折中,更利于硬件实现。

MSD算法的性能提升需要以精确的同步为前提,本文的研究结果是在理想同步的情况下取得的,因此在不同定时误差下MSD和TPC联合使用对PCM/FM遥测系统性能的提升情况还需进一步研究。

参考文献:

- [1] 徐以涛,李浩,王金龙,等. 软件无线电中调频波形的正交解调[J]. 解放军理工大学学报, 2006, 7(4): 312-315.
- [2] 郝建民. 两项技术使PCM/FM遥测系统信噪比增益提高9dB[J]. 遥测遥控, 2004, 25(6): 6-8.
- [3] 王晓波,吴岭,徐松艳. MSD与TPC技术在PCM/FM遥测系统中的应用研究[J]. 遥测遥控, 2007, 28(S): 49-53.
- [4] PELCHAT M G, DAVIS R C, LUNTZ M B. Coherent demodulation of continuous phase binary FSK signals [C]// Proceedings of the 1971 International Telemetry Conference. Washington, DC: International Foundation for Telemetry, 1971: 181-190.
- [5] OSBORNE W P, LUNTZ M B. Coherent and noncoherent detection of CPFSK [J]. IEEE Transactions on Communications, 1974, 22(8): 1023-1036.
- [6] BALACHANDRA K. Applications of the PAM representation of CPM [D]. Provo, UT, USA: Brigham Young University, 2008: 15-17.
- [7] GEOCHEGAN M. Improving the detection efficiency of conventional PCM/FM telemetry by using a multi-symbol demodulator [C] // ITC'00: Proceedings of the 2000 International Telemetry Conference. San Diego: International Foundation for Telemetry, 2000: 675-682.
- [8] WU Z L, ZHAO N, LI S, et al. A novel PCM/FM multi-symbol detection algorithm for FPGA implementation[J]. Information Technology Journal, 2009, 8(4): 583-588.
- [9] BERROU C, GLAVIEUX A, THITIMAJSHIM P. Near Shannon limit error correcting coding and decoding: Turbo codes [C]// ICC'93: Proceedings of the 1993 International Conference on Communications. Piscataway: IEEE, 1993, 2: 1064-1070.
- [10] PYNDIAH R, GLAVIEUX A, PICART A, et al. Near optimum decoding of product codes [C]// GLOBECOM'94: Proceedings of the 1994 IEEE Global Telecommunications Conference. Piscataway: IEEE, 1994, 1: 339-343.
- [11] PYNDIAH R, COMBELLES P, ADDE P. A very low complexity block Turbo decoder for product codes [C]// GLOBECOM'96: Proceedings of the 1996 IEEE Global Telecommunications Conference. Piscataway: IEEE, 1996, 1: 101-105.
- [12] CHEN Y, PARHI K K. A very low complexity block Turbo decoder composed of extended Hamming codes [C]// GLOBECOM'01: Proceedings of the 2001 IEEE Global Telecommunications Conference. Piscataway: IEEE, 2001, 1: 171-175.
- [13] ARGON C, MCLAUGHLIN W S. An efficient Chase decoder for Turbo product codes[J]. IEEE Transactions on Communications, 2004, 52(6): 896-898.
- [14] 黄小平,简福斌,谭庆廷,等. 一种新的Turbo乘积码简化迭代译码算法[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(2): 689-691.
- [15] 柳昭,魏延清,张晓明. Turbo乘积码译码算法的优化和改进[J]. 计算机应用, 2013, 33(2): 397-399.