

文章编号: 2095-4980(2019)03-0385-05

一种用于遥测多符号检测的位同步算法

周 游¹, 刘荣科¹, 段瑞枫², 蒋伯峰³

(1.北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191; 2.北京林业大学 信息学院, 北京 100083; 3.北京信威集团, 北京 100193)

摘 要:为使现有遥测脉冲编码调制/调频(PCM/FM)系统中的定时同步环路可直接用于多符号检测(MSD), 从而降低系统的复杂度, 提出了一种适用于遥测 PCM/FM MSD 的位同步算法。该算法采用 MSD 的似然比作为定时估计的统计变量, 据此可直接利用传统 PCM/FM 限幅鉴频接收机中的定时同步环路来实现位同步。与传统的基于“迟早门”的 MSD 位同步算法相比, 所提算法节省了一个 MSD 支路的运算, 极大降低了接收机存储和计算资源。此外, 所提算法采用 Gardner 算法作为定时误差检测单元, 便于高速实现; 所提算法的定时估计误差的归一化方差在低信噪比区仍小于 0.01, 满足遥测接收机的要求, 且误比特率(BER)性能与理想同步情况相比, 几乎没有损失。

关键词: 多符号检测; 遥测接收机; 位同步; 误比特率性能; Gardner 算法

中图分类号: TN914.2

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201903.0385

A symbol timing synchronization algorithm for multiple symbol detection in range telemetry

ZHOU You¹, LIU Rongke¹, DUAN Ruifeng², JIANG Bofeng³

(1.School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. School of Information Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

3.Beijing Xinwei Telecom, Beijing 100193, China)

Abstract: Applying the timing recovering loop for PCM/FM to Multi-Symbol Detection(MSD) could reduce the complexity of the whole system. This paper proposes a symbol timing synchronization algorithm for MSD in telemetry Pulse-Code Modulation/Frequency Modulation(PCM/FM) system. The proposed algorithm uses the likelihood ratio of MSD as the statistical variable for timing estimation, and can adopt traditional timing synchronization loop in PCM/FM using limiting amplitude and frequency discrimination to achieve symbol synchronization. Compared with the traditional MSD symbol timing synchronization method based on the “early-late gate”, the proposed method saves the operation of a branch of MSD, which greatly reduces the storage and computing resources in receiver. In addition, the proposed algorithm adopts the Gardner algorithm as a timing error detection unit, which facilitates high speed implementation in practical systems. The normalized variance of the timing estimation error in the proposed method is still less than 0.01 in the low SNR region, which satisfies the requirements of the telemetry receiver. Compared with the ideal synchronization situation, the proposed algorithm has almost no loss in terms of Bit Error Rate(BER) performance, and has a promising prospect.

Keywords: Multi-Symbol Detection; range telemetry receiver; symbol timing synchronization; Bit Error Rate performance; Gardner algorithm

靶场遥测对于深空探测和国防工业有重大的意义, 脉冲编码调制/调频(PCM/FM)体制以其恒包络的特点、优良的抗火焰和相位干扰能力, 一直以来是靶场遥测的主用体制^[1]。近些年国内外学者也一直在研究具有更高频谱效率的 Multi-h 连续相位调制(Continuous Phase Modulation, CPM)体制^[2]来解决日益增长的遥测数据量需求和频谱资源紧张的矛盾, 如费赫尔正交移相键控(Feher patented Quadrature Phase Shift Keying, FQPSK)调制^[3]和高级

收稿日期: 2018-03-28; 修回日期: 2018-04-19

基金项目: 中央高校基本科研业务费资助项目(BLX201623); 国家自然科学基金资助项目(31700479; 91438116)

遥测 CPM(Advanced Range Telemetry CPM, ARTM CPM)^[4], 但这些高谱效调制的方法在实际应用中面临复杂度高和性能不稳定等因素, 因此 PCM/FM 仍将是目前以及未来一段时间靶场遥测的主用体制。如何提高遥测系统的检测性能一直是研究的热点^[5-9], 多符号检测(MSD)技术是提高 PCM/FM 性能的主要手段, 它利用 PCM/FM 相位记忆的特点, 通过观察多个符号间隔来增加判决符号的可靠性, 使 PCM/FM 的检测性能有了很大的提升^[10-11]。但 MSD 性能的提升是以精确的位同步为前提, 由于 MSD 不是在接收到符号后立即进行判决, 而是通过观察相邻几个符号间隔来计算最佳匹配结果, 因此原来的用于 PCM/FM 非相干检测的定时同步方法不再适用。目前多符号检测的定时方法主要是基于数据辅助的位同步算法和利用修改后的“迟早门”位同步方法^[12], 但它们或增加了系统的开销改变了原有的帧结构, 或增加了位同步环路的复杂度, 使得系统实现较为困难。本文提出一种新型的适用于 MSD 的位同步方法, 通过引入似然比进行定时误差估计。提出算法可直接利用传统 PCM/FM 接收机中的定时环路实现 MSD 下的位同步, 极大降低了计算复杂度, 且位同步精确度高。

1 系统模型

传统的采用限幅鉴频器解调 PCM/FM 的系统模型见图 1。遥测 PCM/FM 信号在经过数字下变频后, 首先送入限幅鉴频器进行鉴频, 所得基带信号输入插值滤波器进行滤波; 然后滤波结果被送入定时误差检测器, 检测每个码元的定时误差; 再将该误差结果进行环路滤波, 减小误差抖动; 滤波结果输入数控振荡器(Numerically Controlled Oscillator, NCO), 得出内插滤波器的采样时钟, 反馈到内插滤波器控制内插过程, 对采样点进行修正; 抽样判决器在环路进入稳定状态后, 在码元最佳判决时刻对码元进行判定, 并输出判决结果。

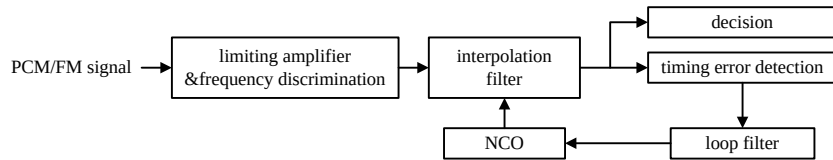


Fig.1 System model of PCM/FM using limiting amplifier and frequency discrimination to detection
图 1 限幅鉴频解调 PCM/FM 的系统模型

当使用检测性能更优的 MSD 对 PCM/FM 进行检测时, 图 1 中同步环路不再适用, 需要重新设计。文献[12]提出了一种基于“迟早门”的 MSD 定时同步方法, 其原理框图见图 2。该方法利用迟、早 2 个多符号检测支路的结果进行定时误差计算, 产生定时误差信息 t_{err} 反馈到定时单元进行修正, 实现 PCM/FM 的定时同步。当环路进入稳定时, 其判决结果可从上下检测支路的任何一路输出。

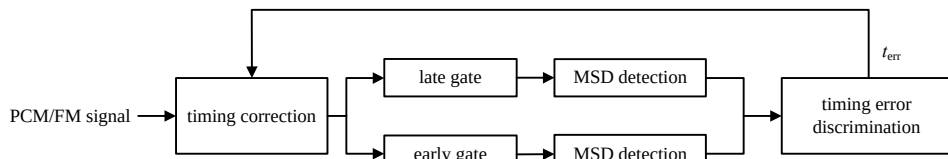


Fig.2 Schematic diagram of MSD timing synchronization based on early-late gate
图 2 基于“迟早门”的 MSD 定时同步原理图

2 提出的基于 MSD 似然比的位同步算法

MSD 检测模块是 PCM/FM 接收机中计算复杂度最高的部分, 图 2 的方法包含了迟、早两支路的多符号检测, 进一步增加了接收机的存储和计算复杂度。为了克服这个问题, 本文提出一种低复杂度的适用于 MSD 检测的符号同步方法。

接收信号 $r(t; \mathbf{a})$ 可以表示为:

$$r(t; \mathbf{a}) = s(t; \mathbf{a})e^{j\psi} + n(t) \quad (1)$$

式中: $n(t)$ 为单边功率谱密度为 N_0 的高斯白噪声, 方差为 σ^2 ; ψ 为 $0 \sim 2\pi$ 之间均匀分布的载波初始相位, 即 ψ 的概率密度函数为 $f(\psi) = 1/2\pi$; $s(t; \mathbf{a})$ 为发送信号, $s(t; \mathbf{a}) = \exp\{j\varphi(t; \mathbf{a})\}$; $\mathbf{a}$ 为发送符号矢量, $\mathbf{a} = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N, \dots, \alpha_{2N+1}\}$, 且 $\alpha_i = \pm 1$; $\varphi(t; \mathbf{a})$ 为相位参数, 可通过式(2)计算^[13]。

$$\varphi(t; \alpha) = \frac{\pi h}{T} \int_{-\infty}^t \sum_{i=0}^n \alpha_i g(\tau - iT) d\tau = \pi h \sum_{i=0}^n \alpha_i q(t - iT) \quad (2)$$

式中: h 为调制指数, $h=0.7$; T 为码元持续时间; τ 为定时误差; $g(t)$ 是预调滤波器的矩形脉冲响应; $q(t)$ 是相应的相位脉冲, $q(t) = \int_{-\infty}^t g(\tau) d\tau$ 。

对于 MSD 检测而言, 通常选取 $2N+1$ 个符号间隔进行观察, 然后选择似然函数最大的序列并对其第 $N+1$ 个符号进行判决, MSD 的似然函数可以表示为^[14]:

$$\Lambda(\alpha, \tau) = \int_{-\pi}^{\pi} \exp \left[-\frac{1}{n_0} \int \left| r(t) e^{j\nu} - s(t - \tau; \alpha) \right|^2 dt \right] f(\nu) d\nu \quad (3)$$

引入贝塞尔函数化简后可得

$$\Lambda(\alpha, \tau) = CI_0 \left(\left| \int r(t) s^*(t - \tau; \alpha) dt \right|^2 \right) \quad (4)$$

式中 $I_0(x)$ 为零阶修正的贝塞尔函数, 它是单调非降函数, 因此等效似然函数可以表示为:

$$\Lambda'(\alpha, \tau) = \left| \int r(t) s^*(t - \tau; \alpha) dt \right|^2 \quad (5)$$

假设信号经过采样, 并对信息序列 α 求期望, 可得^[15]

$$\Lambda''(\tau) = F[(k_2 - k_1)T, k_2T - \tau] \quad (6)$$

式(6)中:

$$F(\Delta t, t) = \prod_{i=-\infty}^{\infty} \frac{\sin[4h\pi p_{\Delta}(i - iT)]}{2\sin[2h\pi p_{\Delta}(i - iT)]} \quad (7)$$

$p_{\Delta}(t) = q(t) - q(t - \Delta t)$ 。MSD 检测器判决 $\alpha_{N+1} = 0$ 的似然值为: $\Lambda'(0|\tau) = \max\{\Lambda'(\alpha, \tau)|_{\alpha_{N+1}=0}\}$; $\alpha_{N+1} = 1$ 的似然值为:

$\Lambda'(1|\tau) = \max\{\Lambda'(\alpha, \tau)|_{\alpha_{N+1}=1}\}$ 。因此可以构造似然比检测变量:

$$L(\alpha, \tau) = \Lambda'(0|\tau) - \Lambda'(1|\tau) \quad (8)$$

对 α 取期望, 利用式(6)和式(7), 通过数值计算可以得到检测变量 $L(\alpha, \tau)$ 与定时误差 τ 的关系, 见图 3。从图 3 可看出似然比检测变量关于定时误差 τ 是二次函数特性的曲线, 同时在信息符号发生变化时可以产生过零点, 因此可以直接利用传统接收机中的定时同步环路实现位同步。其中插值滤波可采用 $a=0.5$ 的分段抛物线方法^[16], 插值器系数为:

$$\begin{cases} C_{-2}(\mu) = a\mu^2 - a\mu \\ C_{-1}(\mu) = -a\mu^2 + (1+a)\mu \\ C_0(\mu) = -a\mu^2 + (a-1)\mu + 1 \\ C_1(\mu) = a\mu^2 - a\mu \end{cases} \quad (9)$$

定时误差检测可以采用 Gardner 算法^[17]。定时误差 τ 可通过式(10)计算:

$$\tau = x(nT + T/2) \{x((n+1)T) - x(nT)\} \quad (10)$$

式中 $x(n)$ 为经过插值后的第 n 个采样点。

所提位同步算法的原理见图 4。从图 4 可看出, 所提算法采用匹配滤波器组结合似然比计算模块实现了 PCM/FM 信号的鉴频。与图 2 的方法相比, 直接减少了一路 MSD 信号检测, 因此检测复杂度降低了约 50%。

与图 1 的方法相比, 采用了一路 MSD 检测器代替了非相干检测的限幅鉴频器, 后续处理过程完全一致。但 MSD 检测性能远优于非相干检测。

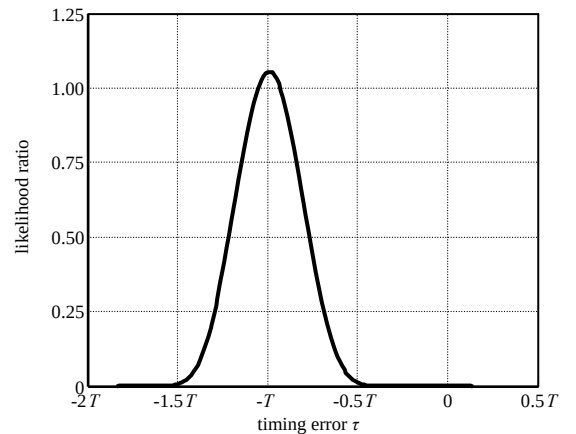


Fig.3 Relationship between detection variable $L(\alpha, \tau)$ and timing error τ
图3 检测变量 $L(\alpha, \tau)$ 与定时误差 τ 的关系

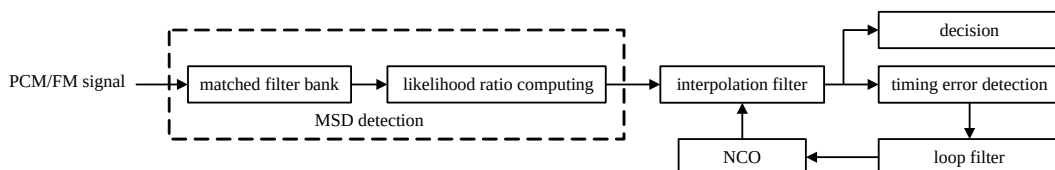


Fig.4 Schematic diagram of the proposed timing synchronization method for MSD detection

图4 提出的用于 MSD 检测的位同步方法原理图

3 性能分析和仿真

针对本文提出的方法,设码速率为 2 Mbps,采样率为 56 MHz,对 PCM/FM 遥测信号进行位同步性能和误码性能的分析与蒙特卡罗仿真。图 5 给出了 $E_b/N_0=10$ dB 时的眼图,由此可见所提的似然比估计方法能对接收信号进行有效检测。

根据文献[18],当预调滤波器为 6 阶线性贝塞尔滤波器时,定时误差修正的克拉美罗界(Modified Cramer-Rao Bounds, MCRB)计算见式(11),其中 $C_f=0.186$ 。

$$\frac{1}{T^2} MCRB(\tau) = \frac{1}{8\pi^2 h^2 C_f (2N+1)} \times \frac{1}{E_b/N_0} \quad (11)$$

图 6 为所提算法的定时估计误差性能,从图中可看出,在宽的 SNR 动态范围内,提出算法的定时误差非常接近克拉美罗界,特别是在低 SNR 区域,估计误差的归一化方差不超过 0.01。

图 7 给出了环路进入稳态时提出算法的误码率性能,由图可见,与完美位同步条件下的检测性能相比,在低 SNR 区,定时估计误差略大,提出算法的 BER 性能略有损失,但随着 SNR 增加,提出算法的 BER 性能越来越逼近理想性能。当 E_b/N_0 大于 9 dB 时,性能损失可忽略不计。

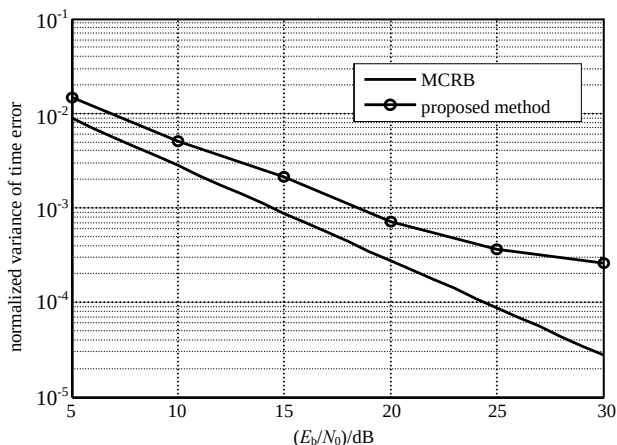


Fig.6 Estimated performance for timing error in proposed algorithm
图 6 提出算法的定时误差估计性能曲线

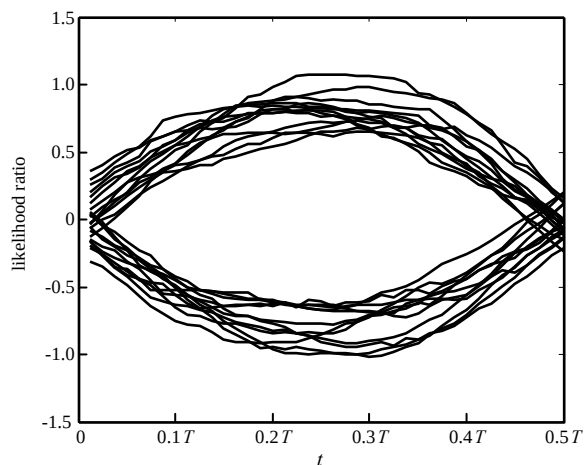


Fig.5 Eye pattern in the proposed algorithm at $E_b/N_0=10$ dB
图 5 提出算法的眼图($E_b/N_0=10$ dB)

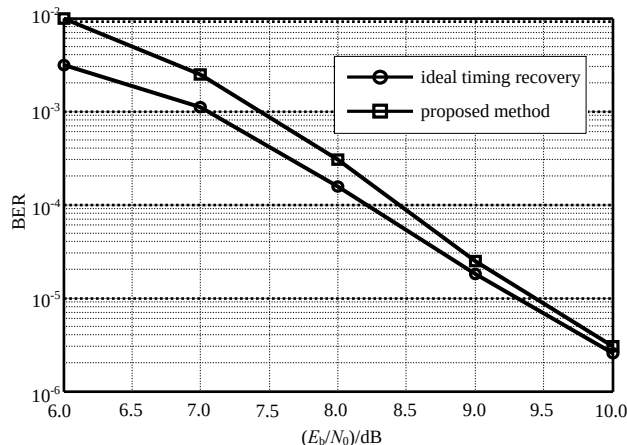


Fig.7 BER performance of the proposed algorithm
图 7 提出算法的 BER 性能

4 结论

本文提出了一种新型的用于 MSD 检测的位定时同步方法。分析了 MSD 检测算法的定时误差函数,提出采用 MSD 检测的似然比计算定时误差,使得码元同步可直接利用传统限幅鉴频接收机中位定时恢复环路来完成。相比于传统的基于“迟早门”的 MSD 定时恢复环路算法,该算法实现简单,计算复杂度降低了约 50%。并且在遥测系统工作的 SNR 区域,所提算法的检测性能几乎没有损失,具有非常高的实用价值。

参考文献:

- [1] RICE M. PCM/FM aeronautical telemetry in frequency selective multipath interference[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2002,36(4):1090–1098.
- [2] CHALFANT T, IRVING C. Range telemetry improvement and modernization[C]// Proceedings of the International Telemetering. Las Vegas, NV, USA: [s.n.], 1997:294–303.
- [3] LAW E, FEHER K. FQPSK versus PCM/FM for aeronautical telemetry applications; spectral occupancy and bit error probability comparisons[C]// Proceedings of the International Telemetering. Las Vegas, NV, USA: [s.n.], 1997:489–496.

- [4] Range Commanders Council Telemetry Group. Range Commanders Council, White Sands Missile Range[S]. New Mexico:IRIG Standard 106-00:Telemetry Standards, 2000.
- [5] SVENSSON A,SUNDBERG C E. A class of reduced-complexity Viterbi detectors for partial response continuous phase modulation[J]. IEEE Transactions on Communications, 1984,32(1):1079-1087.
- [6] COLAVOLPE G,RAHELI R. Noncoherent sequence detection of continuous phase modulations[J]. IEEE Transactions on Communications, 2002,47(9):1303-1307.
- [7] PERRINS E,RIVE M. Optimal and reduced complexity receivers for M-ary multi-h CPM[C]// Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference(WCNC04). Atlanta,USA:[s.n.], 2004:1165-1170.
- [8] TEMPLE K. ARTM CPM receiver/demodulator performance:an update[C]// Proceedings of the International Telemetry, 49th Annual International Telemetry Conference and Technical Exhibition. Las Vegas,NV,USA:[s.n.], 2013.
- [9] YANG M,HAO Y,LIU Y. A new equalization technique for Multi-h CPM in a telemetry multipath channel[C]// International Conference on Wireless Communications,NETWORKING and Mobile Computing. Shanghai,China:[s.n.], 2015.
- [10] GOGHEGAN M. Improving the detection efficiency of conventional PCM/FM telemetry by using a multi-symbol demodulator[C]// ITC00:Proceedings of the 2000 International Telemetry Conference. San Diego:[s.n.], 2000.
- [11] WU Z,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.
- [12] 付刚,吴燕军,吴广志,等. 基于MSD的软件解调PCM/FM算法研究[J]. 航天控制, 2014,32(6):63-66. (FU Gang,WU Yanjun, WU Guangzhi,et al. Research on software demodulation algorithm of PCM/FM based on MSD[J]. Aerospace Control, 2014, 32(6):63-66.)
- [13] ANDERSON J B,AULIN T,SUNDBERG C E. Digital phase modulation[M]. New York:Springer, 1986.
- [14] VAN Trees HL. Detection,estimation,and modulation theory,Part I[M]. New York:John Wiley and Sons, 2001.
- [15] D'ANDREA A N,MENGALI U,MORELLI M. Symbol timing estimation with CPM modulation[J]. IEEE Transactions on Communications, 2002,44(10):1362-1372.
- [16] 宋青平,刘荣科,段瑞枫,等. 一种用于全数字接收机的位同步算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(3):436-440. (SONG Qingping,LIU Rongke,DUAN Ruifeng,et al. A symbol timing synchronization algorithm for all digital receiver[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(3):436-440.)
- [17] GARDNER F M. Interpolation in digital modems-part I:fundamentals[J]. IEEE Transactions on Communications, 1993,41(3): 501-507.
- [18] PERRINS E,BOSE S,WYLIE Green M P. Timing recovery based on the PAM representation of CPM[C]// Military Communications Conference. San Diego,CA:[s.n.], 2008:1-8.

作者简介:



周 游(1985-),男,黑龙江省海伦市人,在读博士研究生,主要研究方向为测控通信、卫星移动通信、阵列信号处理.email:youzhou2015@163.com.

刘荣科(1973-),男,西安市人,博士,博士生导师,主要研究方向为空天信息传输与处理、无线宽带多媒体通信、网络信息论与编码和专用集成电路设计.

段瑞枫(1985-),女,内蒙古自治区包头市人,博士,讲师,主要研究方向为测控通信、卫星通信、编码调制、自适应传输.

蒋伯峰(1962-),男,河北省衡水市人,博士,博士生导师,主要研究方向为阵列信号处理、无线通信.