

# 频偏条件下基于循环平稳的定时估计算法

王娜<sup>1</sup>, 张邦宁<sup>2</sup>, 郭道省<sup>2</sup>, 张国敏<sup>3</sup>

(1. 解放军理工大学理学院 南京 211101; 2. 解放军理工大学通信工程学院 南京 210007;  
3. 解放军理工大学指挥自动化学院 南京 210007)

**【摘要】** 研究了利用信号的循环平稳统计特性提取定时误差的估计算法, 由于性能的优良是建立在大量统计信息的基础上, 因而所需的观测时间长度较大, 同时算法受频偏的影响也随观测时间长度的增大而增大。针对该特点, 研究了频偏对算法性能的影响及存在频偏环境下算法中参数的选择。仿真结果表明, 频偏对该类算法的影响不可忽略, 尤其是在观测时间长度较大的情况下。实用中应结合具体频偏大小, 合理选择参数取值。

**关键词** 循环平稳; 频偏; 观测时间长度; 定时误差  
**中图分类号** TN911.23 **文献标识码** A

## Cyclostationarity-Based Timing Estimation Considering the Frequency Offset

WANG Na<sup>1</sup>, ZHANG Bang-ning<sup>2</sup>, GUO Dao-sheng<sup>2</sup>, and ZHANG Guo-min<sup>3</sup>

(1. Institute of Sciences, PLA University of Electronic Science and Technology of China Nanjing 211101;  
2. Institute of Communication Engineering, PLA University of Electronic Science and Technology of China Nanjing 210007;  
3. Institute of Command Automation, PLA University of Electronic Science and Technology of China Nanjing 210007)

**Abstract** Symbol timing delay can be estimated by employing cyclostationarity features of signals. The super performance of estimators is based on large numbers of statistical information. Thus, the observation interval is required to be quite long. However, the performance of estimators become complex when the frequency offset is considered. Due to this problem, the effect of frequency offset and the choice of parameters under this circumstance are studied. Simulation results show that the effect of frequency offset can not be ignored, especially when the observation interval is quite long. In practice, the effect of frequency offset must be considered when choosing the rational parameters.

**Key words** cyclostationarity; frequency offset; observation interval; timing delay

位同步是全数字接收机中的一个重要环节。传统的接收机常采用锁相环路来达到同步, 虽然精确度较高, 但存在体积大、功耗高、锁相电路复杂的缺点。近年来, 随着数字通信技术的不断发展, 非数据辅助的定时误差提取算法引起了人们广泛的关注<sup>[1-5]</sup>。文献[6]从循环平稳统计特性的角度, 对几种非数据辅助的定时误差提取算法进行了分析, 并发现可以通过对接收信号的非线性变换, 使变换后的信号具有循环统计特性, 进而可以从中提取信号的周期分量。

基于信号二阶<sup>[1-2,4]</sup>或高阶循环统计特性<sup>[5]</sup>进行定时误差提取的算法具有结构简单、适应性强等优点, 因此在数字接收机的同步设计中得到重视。该

类算法的缺点是在利用信号的循环平稳统计特性进行分析时, 需要搜集大量的统计信息来实现定时误差的准确估计, 即观测时间长度很大, 会在实际应用环境中存在发送和接收端定时时钟之间的频偏等问题。

本文介绍了基于二阶循环统计特性的定时误差估计算法, 分析了频偏对该类算法的影响, 并给出了计算机仿真结果。

### 1 基于二阶循环平稳统计特性的定时误差估计算法

基于信号的循环特性<sup>[1-8]</sup>及高阶统计量<sup>[9]</sup>进行参数估计的方法很多, 可以利用信号的二阶或高阶循

环统计特性对信号的同步信息进行分析。本文考察基于二阶循环平稳统计特性的定时误差估计算法。

在实际应用中,循环相关函数  $M_{2r}(k;\tau)$  通常由其有限样值的抽样序列来表示<sup>[1,6,10]</sup>:

$$\hat{M}_{2r}(k;\tau) = \frac{1}{LN} \sum_{n=0}^{LN-\tau-1} r^*(n)r(n+\tau) e^{-j2\pi \frac{kn}{N}} \quad \tau \geq 0 \quad (1)$$

式中  $r(n)$  为对接收信号  $r(t)$  以速率  $f_s = N/T$  进行抽样后得到的样值序列,  $T$  为码元周期;  $L$  为获得循环统计信息所需的符号数,即观测时间长度;  $\tau$  为二次变换中的整数延迟量,  $k=0,1,\dots,N-1$ 。基于二阶非线性变换的定时误差估值为<sup>[6]</sup>:

$$\hat{\varepsilon} = -\frac{1}{2\pi} \arg \left\{ \hat{M}_{2r}(1;\tau) e^{-\frac{j\pi\tau}{N}} \right\} \quad (2)$$

从式(2)可知,如果变换不同的  $\tau$  取值可得到不同的基于二阶循环统计量的定时误差估计算法<sup>[1-2,4]</sup>。式(2)中  $\tau=0$  的情况即为O&M平方估计算法<sup>[4]</sup>,它是比较特殊的延迟二次变换。基于信号循环统计特性进行参数估计的这类算法通过对信号的循环平稳特性的分析,直接得到定时误差信息,并将该信息送给后续数字信号处理单元来完成定时调整,从而避免了环路的限制,因此在结构上比锁相环简单,适应性强。

## 2 频偏对算法的影响

基于二阶循环统计量的定时误差估计算法都有一个前提:假设在观测时间长度  $L$  内,定时误差值  $\varepsilon(t)$  为一常数  $\varepsilon$ ,即忽略了频偏的影响。但实际的应用环境中存在频偏现象,发送和接收端定时时钟的频偏会引起定时误差一个连续的上升或下降过程,虽然它与载波频偏相比较小,通常只有符号速率的  $10^{-5} \sim 10^{-2}$  倍,但它对定时误差的影响是不能忽视的。尤其对于基于信号的统计特性来分析和估计参数的算法,由于其本质上是基于大量的统计信息量,因而在较大的观测时间长度下,分析频偏对算法造成的影响更加重要。

以O&M平方定时估计算法为例,本文分析了基于循环统计量的定时误差估计算法受频偏的影响,如图1所示。图中,  $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$ 、 $\varepsilon_3$  分别为  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$  时刻  $\varepsilon(t)$  的值;  $\hat{\varepsilon}_1$  和  $\hat{\varepsilon}_2$  为  $L$  取  $L_1$  和  $L_2$  时,利用O&M估算出来的定时误差值;相应的  $\Delta\varepsilon_1$  和  $\Delta\varepsilon_2$  为在小段内估值与段末处  $\varepsilon(t)$  值的差值,即是估算的偏差大小。当  $L_2 > L_1$  时,  $\Delta\varepsilon_2 > \Delta\varepsilon_1$ ,即由于频偏的存在引起定时误差值的连续上升或下降,其变化快慢受频偏取值大小的直接影响。随着  $L$  取值的增大,该变化范围将

逐渐增大。而基于循环统计量的定时误差估计算法却是在假定定时误差为常量的前提下进行的一个近似求均值的过程。因而,随着观测时间长度取值的增大,由于频偏引起的估值与真实值之间的偏差会随之增大。所以当考虑频偏的影响时,应适当减小观测时间长度  $L$  的取值。当频偏较小时,且在一个较短的观测时间长度  $L$  内,定时误差的变化速度缓慢,可以近似认为是常量,算法得到的定时误差估值与真实值之间差异较小,基本可以满足系统需求。但基于循环统计量的定时误差估计算法是利用信号的循环平稳统计特性来实现定时误差的检测估计,往往需要搜集大量的统计信息来实现定时误差的准确估计,观测时间长度  $L$  的取值较大。若频偏值也较大,定时误差的变化较快,造成在一个观测时间长度内定时误差的变化范围增大。这时基于该类方法得到的定时误差估值与真实值之间的误差明显变大,误差增幅大小主要由频偏大小、初始误差值及算法中参数取值共同决定。因此,当利用信号的循环统计特性提取定时误差估计值,尤其是当观测时间长度取值较大时,有必要考虑频偏对算法的影响。

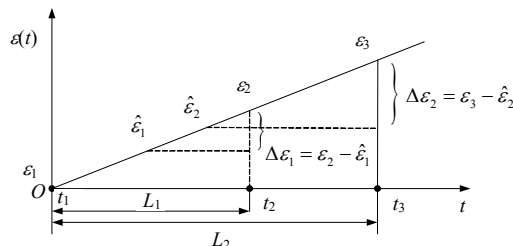


图1 定时误差估值受频偏的影响

## 3 仿真结果及性能分析

针对不考虑频偏影响和考虑频偏影响两种情况,本文对基于信号的二阶循环统计特性定时误差估计算法进行计算机仿真及性能分析。信号采用8PSK调制方式,发送和接收滤波器均为平方根升余弦滤波器,  $N=4$ ,  $\varepsilon=0.1875$ 。当考虑频偏影响时,频偏为  $10^{-3}$ 。

### 3.1 $\tau$ 取值对算法性能影响

由式(2)可知,基于二阶循环统计量的定时误差估计的各种算法最主要的区别在于延迟二次变换中的整数延迟量  $\tau$  取值不同。本文分析了  $\tau$  取值对算法性能的影响,图2和图3所示为未考虑频偏时  $\tau$  取值变化的影响,图4和图5所示为考虑频偏的情况。图2和图4是基于500次蒙特卡洛仿真的结果,其余各图是基于2000次蒙特卡洛仿真的结果。

从图2和图3可以看出,不考虑频偏,当观测时

间长度 $L$ 取值较大时,  $\tau$ 对算法性能的影响较小, 只在曲线尾部即信噪比较高时, 差别变化相对较大。相比较而言, 图3中 $L$ 取值较小, 估值性能比图2差, 且随信噪比的增大, 曲线尾部分叉比图2早。当信噪比大于15 dB,  $\tau$ 对算法性能的影响较为明显。

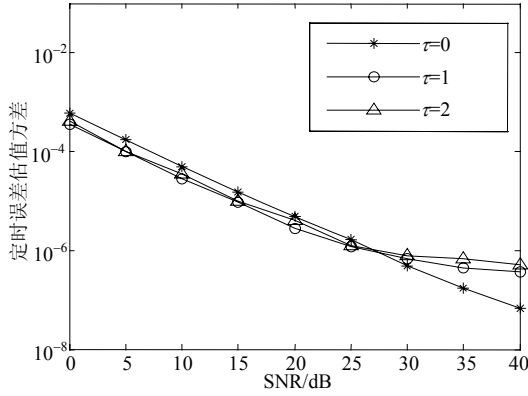


图2  $\tau$ 对算法性能的影响( $L=200$ )

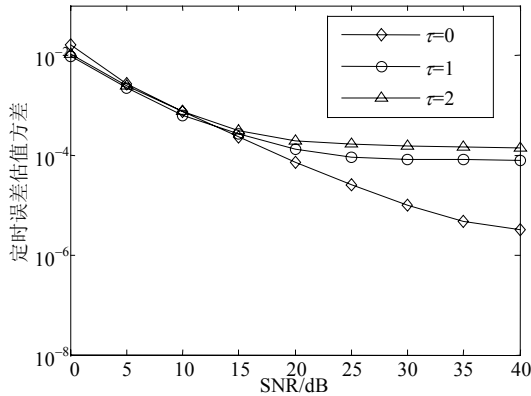


图3  $\tau$ 对算法性能的影响( $L=16$ )

图4和图5所示为在考虑频偏的条件下考察 $\tau$ 取值对算法的影响。当观测时间长度 $L$ 取值较大时, 算法受频偏的影响随之增大, 且参数估计准确度也随之降低。这是因为 $L$ 取值增大表明由频偏引起的定时误差变化的范围增大, 因此, 比较加入频偏前后两种情况,  $L$ 较小(图5)时所受影响明显小于 $L$ 较大(图4)的情况。

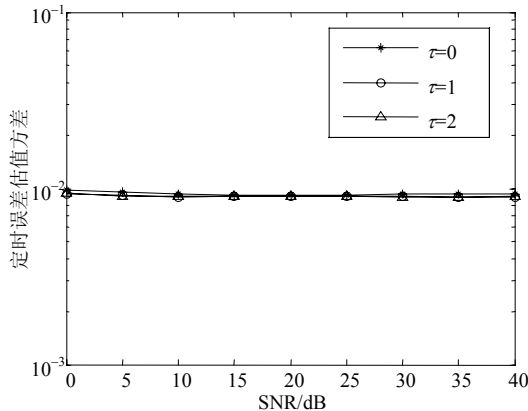


图4 考虑频偏时 $\tau$ 对算法性能的影响( $L=200$ )

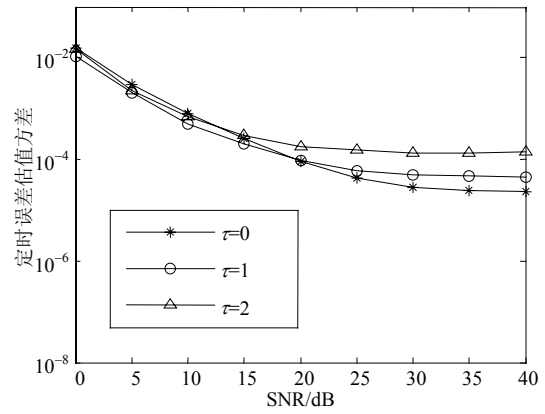


图5 考虑频偏时 $\tau$ 对算法性能的影响( $L=16$ )

### 3.2 $L$ 取值对算法性能影响

设  $E_b/N_0 = 7.3$  dB,  $\tau = 0$ ,  $L$ 对算法性能的影响如图6所示。从图6可以看出, 当不考虑频偏时, 估值方差随着观测时间长度 $L$ 取值的增大而逐渐减小。因为当 $L$ 取值越大, 所获得的循环统计信息量越大, 因而参数估计的准确度越高。当考虑频偏的影响时,  $L$ 取值增大表明由频偏引起的定时误差变化的范围也随之增大。但这种影响又无法消除, 因此参数 $L$ 对算法的作用不再只是一个单调递减的过程, 而是以上两种因素共同作用的结果。若随着观测时间长度 $L$ 取值的增大, 由于循环统计信息量的增多, 对算法性能的改善作用强于由频偏引起的算法性能的恶化作用, 则系统整体性能随着参数 $L$ 取值的增大而提高; 反之, 若由频偏引起的算法性能的恶化作用强于前者, 则随着参数 $L$ 取值的增大而造成算法参数估计的精度降低, 从而影响整个同步系统的性能。若两者作用相当, 则定时误差估值方差达到最小, 即临界点。

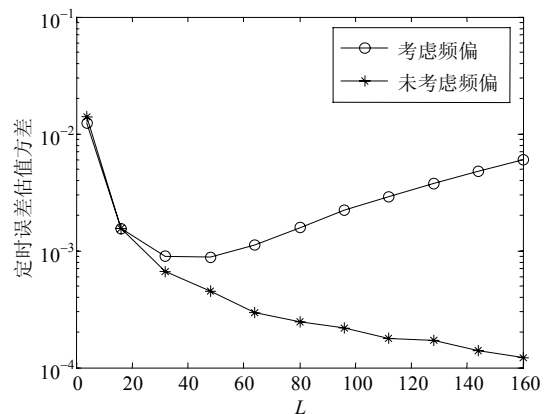


图6  $L$ 对算法性能的影响

(下转第220页)

星几何分布以及漏警率  $P_{MD}$  等因素,采用HPL方法判断RAIM算法是否可用。仿真结果证明了本文提出的改进RAIM算法有效地降低了漏警率。

### 参 考 文 献

- [1] 孙明菡, 孙国良. 接收机自主完好性检测可用性判断方法研究[J]. 遥测遥控, 2006, 27(2): 24-27.
- [2] 刘 准, 陈 哲. GPS自主完整性检测技术研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(8): 673-676.
- [3] 陈金平. GPS完善性增强研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学测绘学院, 2001.
- [4] 王永超, 黄智刚. 三种导航卫星故障识别方法的等价性研究[J]. 遥测遥控, 2006, 27(1): 51-55.
- [5] 翁 健. GPS接收机自主完善性监测算法及研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 1997.

- [6] 廖向前, 黄顺吉. 奇偶矢量法用于GPS的故障检测与隔离[J]. 电子科技大学学报, 1997, 26(3): 262-267.
- [7] 邱致和, 王万义. GPS原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002: 195-204.
- [8] MISRA P, BAYLISS E, LAFREY R, et al. Receiver autonomous integrity monitoring(RAIM) of GPS and GLONASS[J]. Journal of the Institute of Navigation, 1993, 40(1): 87-104.
- [9] BROWN A. Baseline GPS RAIM: scheme and a note on the equivalence of three RAIM methods[J]. Journal of The Institute of Navigation, 1992, 39(3): 301-316.
- [10] KAPLAN E D. Understanding GPS: principles and applications[M]. Norwood, USA: Artech House Inc, 1996: 230-245.

编辑 张 俊

(上接第193页)

## 4 结 论

针对基于二阶循环统计量进行定时误差估计的算法,需要较长的观测时间长度的特点,本文分析了频偏对算法的影响。通过仿真结果可以看出,虽然算法估值精确度随观测时间长度取值的增大(即统计信息量的增大)而提高,但同时频偏的影响也随之增大。并且当 $L$ 取值超过一定量时,频偏对算法性能的恶化程度较大。因此在实际应用中,应根据频偏大小并结合实际系统性能需求,选择合适的观测时间长度及各类参数。

### 参 考 文 献

- [1] GINI F, GIANNAKIS G B. Frequency offset and symbol timing recovery in flat-fading channels: a cyclostationary approach[J]. IEEE Transactions on Communications, 1998, 46(3): 400-411.
- [2] GHOGHO M, SWAMI A, DURRANI T. On blind carrier recovery in time-selective fading channels[J]. Signals, Systems and Computers, 1999, 1: 243-247.
- [3] SCOTT K E, OLASZ E B. Simultaneous clock phase and frequency offset estimation[J]. IEEE Transactions on

Communications, 1995, 43(7): 2263-2270.

- [4] OERDER M, MEYR H. Digital filter and square timing recovery[J]. IEEE Transactions on Communications, 1988, 36(5): 605-612.
- [5] PANAYIRCI E, BAR-NESS E Y. A new approach for evaluating the performance of a symbol timing recovery system employing a general type of nonlinearity[J]. IEEE Transactions on Communications, 1996, 44(1): 29-33.
- [6] WANG Y, SERPEDIN E, CIBLAT P. Blind feedforward cyclostationarity-based timing estimation for linear modulations[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2004, 3(3): 709-715.
- [7] 冯 祥, 李建东. 基于循环累积量的QAM信号载波相位估计算法[J]. 国防科技大学学报, 2006, 28(1): 48-50.
- [8] 刘 鹏, 李兵兵, 卢朝阳, 等. 基于部分检测相关的OFDM符号同步新算法[J]. 吉林大学学报, 2006, 24(2): 120-124.
- [9] SERPEDIN E, CIBLAT P, GIANNAKIS G B, et al. Performance analysis of blind carrier phase estimators for general QAM constellations[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2001, 49(8): 1816-1823.
- [10] 张贤达. 非平稳信号分析与处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.

编辑 黄 莘