

基于循环累积量的 QAM 信号载波相位估计算法<sup>\*</sup>冯 祥<sup>1,2</sup>, 李建东<sup>1</sup>

(1. 西安电子科技大学 ISN 国家重点实验室 信息科学研究所 陕西 西安 710071 ;

2. 空军第一航空学院 湖南 信阳 464000)

**摘 要** 利用通信信号的循环平稳特性,在循环累积量域内提出了一种基于高阶循环累积量的载波相位估计算法,该算法通过提取观测样本的循环累积量特征并对其进行归一化,有效消除了信号能量、时延和成形脉冲参数对算法性能的影响。理论分析和仿真结果均证明了算法的正确性和有效性。

**关键词** 载波相位估计;循环平稳性;高阶循环累积量;QAM

中图分类号:TN911 文献标识码:A

Cyclic Cumulants Based Carrier Phase Estimation  
Algorithm for QAM SignalsFENG Xiang<sup>1,2</sup>, LI Jian-dong<sup>1</sup>

(1. Information Science Institute, State Key Laboratory of ISN, Xidian University, Xi'an 710071, China ;

2. The First Aeronautic Institute of the PLA Air Force, Xinyang 464000, China)

**Abstract** By using the cyclostationarity property of communication signals, a higher-order cyclic cumulants based carrier phase estimation algorithm for QAM signals is proposed. Normalized higher-order cyclic cumulants were utilized for the estimation, and the effect of the signal energy, time delay and pulse function with different roll-off parameters on the estimator was eliminated by the normalization. The correctness and effectiveness of the proposed estimation algorithm were verified via theoretical analysis and simulations.

**Key words** carrier phase estimation; cyclostationarity; higher-order cyclic cumulants; QAM

载波相位恢复是数字信号接收中重要的问题,为了进行相干检测,接收机必须对载波相位进行估计。目前,估计载波相位的方法有:最大似然估计、锁相环、面向判决环、非面向判决环等<sup>[1]</sup>,最近,文献[2][3][4]利用样本的高阶统计量进行相位估计,并且文献[3]对高阶调制信号的相位估计问题进行了分析。以上文献均在高斯环境下研究问题的。本文利用通信信号的循环平稳特性,在循环累积量域内提出了一种基于高阶循环累积量载波相位估计算法,该算法消除了成形脉冲影响,并且可在非高斯环境下对载波相位进行估计,本文首先在理论上证明了算法的正确性,然后通过仿真对算法的正确性和有效性进行了验证。

## 1 信号模型及其循环累积量

假定接收的星形 QAM 信号的基带表示为

$$x(t) = \sqrt{E} e^{j\theta} \sum_k s_k p(t - kT - t_0) + u(t) \quad (1)$$

其中  $\{s_k = s_{kI} + j \cdot s_{kQ}\}$  表示第  $k$  个符号周期内的发送符号,它是零均值独立同分布的复符号序列。 $T, \theta, t_0$  分别表示符号周期、载波相位和时延。 $E$  是信号的能量。 $u(t)$  是功率未知均值为零的宽平稳复加性噪声, $p(t)$  表示脉冲成形函数,本文采用最常用的升余弦脉冲函数。

\* 收稿日期 2005-09-06

基金项目 国家自然科学基金和微软亚洲研究院联合资助项目(60372048) 国家自然科学基金重大项目(60496316);高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划、教育部科学技术研究重点项目(104171) 国家 863 计划重大课题资助项目(2005AA123910)

作者简介 冯祥(1968—)男,博士生。

循环平稳信号  $x(t)$  的  $n$  阶时变矩函数 (TMF) 定义为  $n$  阶滞后积的期望值<sup>[5-6]</sup>:

$$\tilde{m}_{x, nm}(t, \boldsymbol{\tau}) = \hat{E}^{(\alpha)} \left\{ \prod_{j=1}^n x^{(*)}(t + \tau_j) \right\} = \sum_{\alpha} M_{x, nm}^{\alpha}(\boldsymbol{\tau}) e^{j2\pi\alpha t} \quad (2)$$

其中  $\boldsymbol{\tau}$  是一个滞后向量:  $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n]$ ,  $\tau_j$  表示延迟。  $\alpha$  称为循环频率。  $m$  ( $m = 0, 1, \dots, n/2$ ) 表示  $n$  阶滞后积中取共轭的因子总数 ( $*$ )<sub>j</sub> 是根据取共轭的因子总数  $m$  选择  $x(t)$  的第  $j$  个因子  $x(t + \tau_j)$  是否取共轭。  $M_{x, nm}^{\alpha}(\boldsymbol{\tau})$  表示信号  $x(t)$  的  $n$  阶循环矩。  $\hat{E}^{(\alpha)}\{\cdot\}$  表示正弦波抽取运算:

$$\hat{E}^{(\alpha)}\{g(t)\} = \sum_{\alpha} \langle g(t) e^{-j2\pi\alpha t} \rangle_t e^{j2\pi\alpha t} \quad (3)$$

式中, 时间平均算子  $\langle g(t) e^{-j2\pi\alpha t} \rangle_t = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} g(t) e^{-j2\pi\alpha t} dt$ 。与  $n$  阶时变矩函数 (TMF) 相应的  $n$  阶时变累积量函数 (TCF) 可以由 M-(moment to cumulants) 转换得到<sup>[7]</sup>:

$$c_{x, nm}(t, \boldsymbol{\tau}) = \sum_{\cup_{j=1}^p I_j = I} (-1)^{p-1} (p-1)! \prod_{j=1}^p \tilde{m}_{x, n, m_j}(t, \boldsymbol{\tau}^j) \quad (4)$$

集合  $I = \{1, 2, \dots, n\}$ ,  $I_j$  表示集合  $I$  的无交连的非空分割, 分割数为  $p$ 。  $x(t)$  在循环频率  $\alpha$  处的  $n$  阶循环累积量可表示为

$$C_{x, nm}^{\alpha}(\boldsymbol{\tau}) = \langle c_{x, nm}(t, \boldsymbol{\tau}) e^{-j2\pi\alpha t} \rangle_t \quad (5)$$

由于平稳噪声在循环频率  $\alpha = k/T$  ( $k \in \mathbb{Z}$ ) 处的高阶循环累积量为零, 故对于式 (1) 所对应的 SQAM 信号有

$$C_{x, nm}^{\alpha}(\boldsymbol{\tau}) = E^{n/2} \frac{C_{s, nm}}{T} e^{j2\pi\alpha t_0} e^{j(n-2m)\theta} \int_{-\infty}^{\infty} \prod_{j=1}^n p^{(*)}(t + \tau_j) e^{-j2\pi\alpha t} dt \quad (6)$$

式中,  $C_{s, nm}$  表示序列符号  $s_k$  的  $n$  阶累积量, 由下式定义:

$$C_{s, nm} = \text{cum} \left( \underbrace{s \dots s}_{n-m}, \underbrace{s^* \dots s^*}_m \right) \quad (7)$$

$\text{cum}(\cdot)$  表示特征函数  $\ln E \{ \exp[ j(\omega_0 + \dots + \omega_{n-m-1} + s^* \omega_{n-m} + \dots + s^* \omega_{n-1}) ] \}$  围绕原点的 Taylor 级数展开式中  $(-j)^n \omega_0 \dots \omega_{n-1}$  项的系数, 文献 [8] 给出了不同阶数  $C_{s, nm}$  的表达形式。

## 2 载波相位估计

考虑循环频率  $\alpha = 1/T$  处的循环累积量, 在式 (6) 中, 可以看出, 如果积分项不为零, 同阶的循环累积量间的差别在于  $C_{s, nm}$  和  $e^{j(n-2m)\theta}$ , 只要  $C_{s, nm} \neq 0$ ,  $n \neq 2m$ , 循环累积量中就包含有相位信息。例如: 分别取  $n = 4, m = 0, 2$ , 滞后向量  $\boldsymbol{\tau} = [0, 0, 0]$  可得到

$$C_{x, A0}^{1/T}(0, 0, 0) = E^2 \cdot \frac{C_{s, A0}}{T} e^{j2\pi t_0/T} e^{j4\theta} \int_{-\infty}^{\infty} p^4(t) e^{-j2\pi t/T} dt \quad (8)$$

$$C_{x, A2}^{1/T}(0, 0, 0) = E^2 \cdot \frac{C_{s, A2}}{T} e^{j2\pi t_0/T} \int_{-\infty}^{\infty} |p(t)|^4 e^{-j2\pi t/T} dt$$

显然, 如果  $C_{s, A0} \neq 0$ ,  $C_{x, A0}^{1/T}(0, 0, 0)$  中包含有相位信息, 而  $C_{x, A2}^{1/T}(0, 0, 0)$  不含相位信息, 但它可作为归一化因子, 对实成形脉冲, 有

$$e^{j4\theta} = \frac{C_{x, A0}^{1/T}(0, 0, 0)}{C_{x, A2}^{1/T}(0, 0, 0)} \cdot \frac{C_{s, A2}}{C_{s, A0}} \quad (9)$$

对于 2QAM 和 4QAM 信号, 其载波相位的估计值分别为

$$\hat{\theta} = \begin{cases} \frac{1}{4} \arg \left[ \frac{C_{x, A0}^{1/T}(0, 0, 0)}{C_{x, A2}^{1/T}(0, 0, 0)} \right] & 2\text{QAM} \\ \frac{1}{4} \arg \left[ -\frac{C_{x, A0}^{1/T}(0, 0, 0)}{C_{x, A2}^{1/T}(0, 0, 0)} \right] & 4\text{QAM} \end{cases} \quad (10)$$

$\arg[x]$  表示复数  $x$  的相角运算。可以看出, 取  $C_{x, A2}^{1/T}(0, 0, 0)$  作为归一化因子, 消除了信号能量、时延和成

形脉冲对载波相位估计值的影响。

### 3 仿真及性能分析

为了评估本文所提出载波相位估计算法的性能,定义载波相位的估计偏差和方差为:偏差 =  $E(\hat{\theta}) - \theta$ ,方差 =  $E(\hat{\theta}^2) - [E(\hat{\theta})]^2$ 。仿真中码元宽度  $T = 8$ ,观测码元分别为 500、800 个,信噪比的变化范围是 0dB ~ 20dB,变化步长为 2dB,噪声采用虚部与实部独立均匀分布的平稳白噪声。在每个信噪比上进行 1000 次仿真实验,循环累积量的估计值根据观测样本获得<sup>[9-10]</sup>。

#### (1) 仿真试验 1

本仿真试验考察信噪比和样本长度对算法性能的影响。成形脉冲采用滚降系数为 0.35 的升余弦脉冲,仿真结果如图 1、2 所示,可以看出,当符号信噪比大于 8dB 时,算法具有较好的性能,并且随着信噪比和观测符号的增加,性能逐渐变好。另外可以看出,在信噪比和观测符号相同的情况下,算法对 2QAM 的估计性能比 4QAM 好,这与文献 2][3]的结论是一致的。此外,图中还给出了文献 2]中的算法对载波相位的估计性能,可以看出,在低信噪比时,本文算法比文献 2]中算法的性能好,在信噪比大于 10dB 时,两种算法性能基本相同。

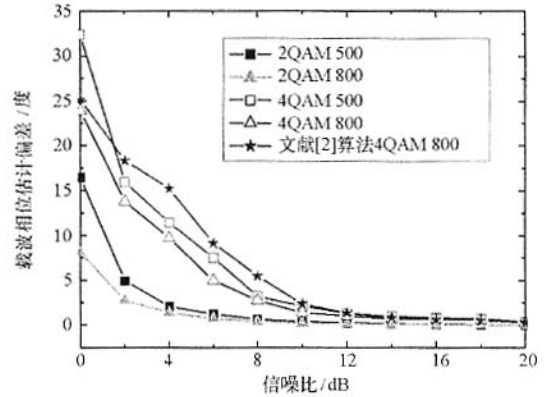
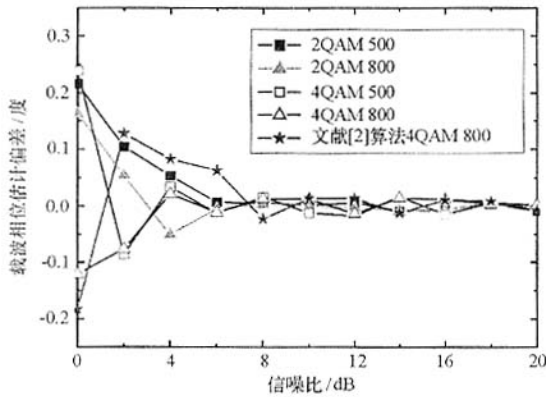


图 1 载波相位的估计偏差随信噪比的变化  
Fig.1 The variation of the estimation bias with SNR's

图 2 信噪比对载波相位估计方差的影响  
Fig.2 The effect of SNR on the estimation variance

#### (2) 仿真试验 2

本仿真试验考察算法对成形脉冲的稳健性。成形脉冲的滚降系数从 0.1 变化到 0.9,变化步长 0.1,符号信噪比为 10dB,观测码元 800 个。仿真结果如图 3 所示,可以看出,随滚降系数变化算法对载波相位的估计性能(偏差、方差)变化较小,验证了算法对成形脉冲的稳健性。

### 4 结束语

本文研究了非高斯环境下载波相位估计问题,在循环累积量域内利用通信信号具有的循环平稳特性,提出了一种载波频率相位的估计算法。本文首先在理论上证明了算法的正确性,并从不同的侧面对算法进行了仿真,以评估算法的性能。仿真结果表明,当符号信噪比大于 8dB 时,算法对载波相位具有较好的估计性能,并且随着信噪比和观测符号的增加,性能逐渐变好;此外算法估计性能对不同滚降系数的成形脉冲具有稳健性。

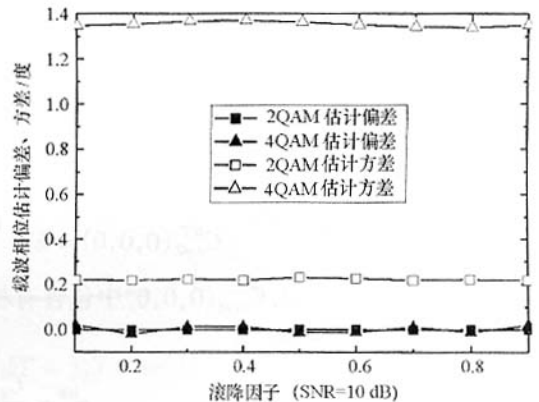


图 3 算法对载波相位估计性能随滚降系数的变化  
Fig.3 The variation of the estimation performance with different roll-off factor

## 4 结束语

本文分析目前视频管理的特点,讨论了视频管理系统中要管理的元素,建立了三维视频内容模型,据此提出一种开放式的视频管理框架,并分析了要研究的关键技术。该框架将视频数据、元数据、内容数据分开存储与维护,保持了数据的独立性,并用关联机制建立起相应的联系,用视图来形成查询的主体。使用这种框架,用户可以根据自己的需求建立符合具体应用领域的视频管理系统。同时由于保留了多层内容,可以在语义不完全的情况下实现“多模态查询”。该框架中许多具体实现技术还有待于我们在今后的工作中进一步深入研究。

## 参考文献:

- [1] 吴玲达 等. 多媒体信息系统[M]. 北京:电子工业出版社,2002.
- [2] Mahdi W, Ardebilian M, Chen L M. Automatic Video Scene Segmentation Based on Spatial-temporal Clues and Rhythm[J]. Networking and Information Systems Journal, 2000, 2(5):1-25.
- [3] Chen J Y, Taskiran C, Albiol A, et al. ViBe: A Compressed Video Database Structured for Video Active Browsing and Search[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2004, 4(1):103-118.
- [4] Naphade M R, Kozintsev I V, Huang T S. A Factor Graph Framework for Semantic Video Indexing[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2002, 12(1).
- [5] Zhou W, Vellaikal A, Kuo C C J. Rule-based Video Classification System for Basketball Video Indexing[A]. In ACM Multimedia 2000, Los Angeles, USA, 2000.
- [6] Weiss R, Duda A, Gifford D K. Composition and Search with a Video Algebra[J]. IEEE MultiMedia, 1995, 2(1):12-25.
- [7] Chen L, Ozsu M T, Oria V. Modeling Video Data for Content Based Queries: Extending the DISIMA Image Data Model[A]. In: Proceedings of the 9th International Conference on Multimedia Modeling, 2003:169-189.
- [8] Hsu W, Chang S. A Statistical Framework for Fusing Mid-level Perceptual Features in News Story Segmentation[R]. IEEE International Conference on Multimedia & Expo (ICME) 2003, invited paper.

(上接第50页)

## 参考文献:

- [1] Proakis J G. 数字通信(第四版)[M]. 张力军 等译. 北京:电子工业出版社,2003.
- [2] Cartwright K V. Blind Phase Recovery in General QAM Communication Systems Using Alternative Higher Order Statistics[J]. IEEE Signal Processing Letters, 1999, 6(12):327-329.
- [3] 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):1816-1822.
- [4] 韩钢. 自适应单载波、多载波调制中信号盲检测技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2003,10.
- [5] Gardner W A, Spooner C M. The cumulant theory of cyclostationary time-series, Part I: Foundation[J]. IEEE Transactions On Signal Processing, 1994, 42(12):3387-3408.
- [6] Spooner C M, Gardner W A. The Cumulant Theory of Cyclostationary Time-series, Part II: Development and Applications[J]. IEEE Transactions On Signal Processing, 1994, 42(12):3409-3429.
- [7] Dobre O A, Bar-Ness Y, Su W. Robust QAM Modulation Classification Algorithm Using Cyclic Cumulants[A]. In Proc. IEEE WCNC, Atlanta, GA, 2004:745-748.
- [8] Swami A, Sadler B M. Hierarchical Digital Modulation Classification Using Cumulants[J]. IEEE Transactions on communications, 2000, 48(3):416-429.
- [9] Dandawate V, Giannakis G B. Asymptotic Theory of Mixed Time Averages and Kth-order Cyclic-moment and Cumulant Statistics[J]. IEEE Trans. Information Theory, 1995, 41(1):216-232.
- [10] 张贤达,保铮. 非平稳信号分析与处理[M]. 北京:国防工业出版社,1998.



