

## 基于平方谱估计的 OQPSK 载波同步算法

彭 华<sup>\*①</sup> 王军杰<sup>①</sup> 丁海峰<sup>①</sup> 杨 欣<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(解放军信息工程大学信息工程学院 郑州 450002)

<sup>②</sup>(北京邮电大学信息与通信工程学院 北京 100876)

**摘 要:** 基于 COSTAS 环的载波同步环路在对大频偏 OQPSK 信号进行载波同步时, 所需的入锁时间较长, 不能满足突发信号的处理要求。针对这一问题, 该文将 OQPSK 信号的平方谱与载波同步环路相结合设计了改进算法。仿真结果显示, 改进算法比传统算法的估计精度更高; 在信噪比高于 6 dB 时, 入锁时间短、误比特率接近理论限, 满足大频偏突发信号的处理要求。

**关键词:** OQPSK 信号; 载波同步; 平方谱; COSTAS 环

中图分类号: TN911.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)-04-0997-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00471

## An Algorithm of OQPSK Carrier Synchronization Based on Quadratic Spectrum

Peng Hua<sup>①</sup> Wang Jun-jie<sup>①</sup> Ding Hai-feng<sup>①</sup> Yang Xin<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(Institute of Information Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China)

<sup>②</sup>(Institute of Information and Communication Engineering,

Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract:** When the feedback structure based on COSTAS loop is used in carrier synchronization of OQPSK signal with large frequency offset, the locking time is so long that feedback structure poorly fits for burst signal. To resolve this problem, this paper designs an improved algorithm based on the power spectrum of OQPSK signal and the feedback structure. Simulation results show that the performance of the improved algorithm is better than the traditional COSTAS loop, and the improved algorithm has a short locking time and low bit error rate which almost attains Shannon capacity under that power-to-noise ratio is higher than 6 dB.

**Key words:** OQPSK signal; Carrier synchronization; Quadratic spectrum; COSTAS loop

### 1 引言

OQPSK 是继 QPSK 之后发展起来的一种恒包络数字调制技术, 与 QPSK 信号相比, 正交支路码元与同相支路码元在时间上偏移了一个比特间隔, 即半个符号周期。OQPSK 信号消除了相邻符号的  $\pi$  弧度偏转现象<sup>[1]</sup>, 在带宽有限的实际通信系统中, 包络起伏小, 经过非线性功率放大器后不会产生明显的功率谱旁瓣增生效应<sup>[2]</sup>。目前, OQPSK 信号广泛应用于卫星通信中, 如 TDMA、CDMA 系统<sup>[3]</sup>中, 已成为非线性带限信道中常用的一种调制方式。

为了得到良好的接收性能, 应尽可能实现准确的载波同步。OQPSK 信号的载波同步一般采用基于锁相环的模式, 通过设置不同的误差函数而得到相应的反馈型载波同步环路。文献[4]基于维纳理论设计了最佳环路滤波器, 该方法虽然误差函数选取

简单, 但环路滤波器实现复杂度高。文献[2,5]选取的误差函数较复杂, 但滤波器可采用一般的低通滤波器, 从而使得整体实现复杂度较低。COSTAS 环法可以较好地提取载波相位, 实现复杂度低, 可靠性高, 锁定误差小; 缺点是捕获速度慢, 不能满足突发信号的处理速度要求。

为了解决反馈环路同步速度慢的问题, 同时保持其良好的同步性能, 前向开环粗同步与反馈环路精同步相结合的联合同步处理模式成为一种有效的方式。文献[6]对利用辅助序列进行前向同步处理的性能进行分析, 分别给出了得到最佳性能和最差性能的符号序列的设计方法, 但是对于接收方而言, 发送方的辅助符号序列唯一确定。文献[7]给出了一种基于前导字的前向同步处理算法, 将载波同步与符号定时同步分离, 在前导字期间利用 Kalman 滤波器设计了载波相位的迭代处理算法, 从而降低了信号的捕获时间。文献[8]利用前导字提出了基于最

大似然准则(Maximum Likelihood, ML)的简化开环同步算法, 该算法与定位无关, 估计精度受滚降系数的影响较小, 同时消除了相位模糊问题。

以上两种算法都是基于已知前导字进行的, 但在某些通信系统中为了提高系统的传输效率, 在信号帧中不存在前导字或未知前导字。因此, 需要设计一种非数据辅助的快速载波同步算法。文献[9]给出了利用信号的循环谱特性进行调制类型识别, 根据 OQPSK 信号的循环谱特性可以看出明显的频率特征。本文利用 OQPSK 信号的平方谱特性设计了一种粗载波频偏估计算法, 通过粗估计可以有效地减小信号的频偏范围, 在此基础上利用基于 COSTAS 环法的反馈式同步环路实现快速准确的载波同步。仿真结果显示, 本文的联合处理模式可以有效地减小捕获时间且估计性能稳定。

### 2 OQPSK 信号模型

OQPSK 信号的表达式为<sup>[5]</sup>

$$s(t, \theta) = \sqrt{P} [m_I(t) \cos(\omega_c t + \theta) + m_Q(t) \sin(\omega_c t + \theta)] = \text{Re}[\sqrt{P} m(t) e^{j(\omega_c t + \theta)}] \quad (1)$$

其中  $P$  为信号功率, 本文取  $P=1$ ;  $m(t)$  为数字调制信号的复包络,

$$m(t) = \underbrace{\sum_{k=-\infty}^{+\infty} a_k p(t - kT)}_{m_I(t)} + j \underbrace{\sum_{k=-\infty}^{+\infty} b_k p\left(t - \left(k + \frac{1}{2}\right)T\right)}_{m_Q(t)} \quad (2)$$

其中  $\{a_k\}, \{b_k\} \in \{+1, -1\}$  分别表示独立同分布的  $I$  路,  $Q$  路传输比特流,  $T$  表示符号周期,  $T=2T_b$ ,  $\theta$  为待估计的载波相位,  $p(t)$  为成形滤波器, 在卫星通信系统中常采用滚降系数为 0.35 的升余弦滤波器。

OQPSK 信号, 经过 AWGN 信道后, 其接收信号为

$$r(t) = s(t, \theta) + n(t) \quad (3)$$

### 3 OQPSK 信号载波同步

OQPSK 信号的载波同步常采用基于 COSTAS 环结构的反馈同步环路<sup>[5]</sup>, 其实现简单、同步精度高, 但需要一定的入锁时间且存在挂起现象, 不能满足大频偏信号的处理要求。为了实现快速入锁, 本文首先利用 OQPSK 信号的统计特征进行前向粗估计, 在频偏校正后采用反馈环路进行精同步。

#### 3.1 载波同步环路

由式(3)可得, 接收信号  $r_k$  关于传输数据  $a_k, b_k$  和载波相位  $\theta$  的概率密度函数为

$$p(r_k | \theta, a_k, b_k) = C \exp \left\{ -\frac{1}{N_0} \left[ \int_{kT}^{(k+1)T} (r(t) - s(t, \theta))^2 dt \right] \right\} \quad (4)$$

由文献[5]可得基于 MAP 准则的 OQPSK 载波同步环路误差函数为

$$\varepsilon(\theta) = -I_S(k) \tanh(I_C(k)) + I_C(k + 1/2) \tanh(I_S(k + 1/2)) \quad (5)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} I_C(k) &= \frac{2}{N_0} \left[ \int_{kT}^{(k+1)T} r(t) p(t - kT) \cos(\omega_c t + \theta) dt \right] \\ I_S(k) &= \frac{2}{N_0} \left[ \int_{kT}^{(k+1)T} r(t) p(t - kT) \sin(\omega_c t + \theta) dt \right] \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

经过时延处理后, 由式(6)可得

$$\left. \begin{aligned} E[I_S(k)] &= E[I_S(k + 1/2)] \\ E[I_C(k)] &= E[I_C(k + 1/2)] \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

在式(5)中, 双曲正切函数  $\tanh(\bullet)$  的实现难度较大, 因此需要对同步环路的误差函数进行简化。根据  $\tanh(\bullet)$  的级数展开表达式, 若仅利用级数展开式的首项, 得到误差函数为零, 此时环路将不能工作。为了保证环路可以正常工作, 同时降低实现复杂度, 本文取级数展开式的前两项, 即

$$\tanh(x) \cong x - \frac{x^3}{3} + o(x^3) \quad (8)$$

综上所述, 误差函数可简化为

$$\varepsilon(\theta) = I_C(k) I_S(k + 1/2) (I_C^2(k) - I_S^2(k + 1/2)) \quad (9)$$

简化后, 载波相位同步处理框图<sup>[2]</sup>如图 1 所示。

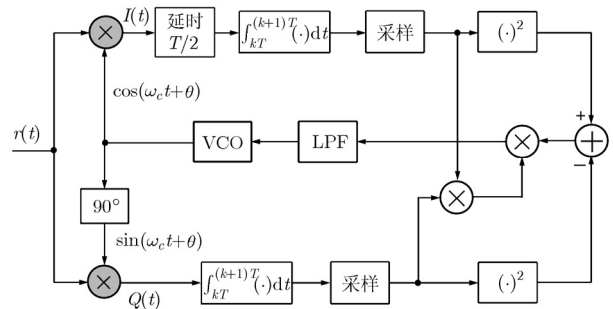


图 1 OQPSK 载波同步简化框图

基于锁相环的载频同步算法可以实现准确的载频同步且性能稳定, 但需要较长的入锁时间。载波同步环路的入锁时间受载波频偏的影响明显: 当频偏较小时, 锁相环可以很快入锁; 当频偏较大时, 锁相环所需的入锁时间较长; 当频偏过大时, 锁相环甚至出现失锁现象。实际通信中, 信号的频偏范围较大。因此, 为了满足突发信号的快速同步要求, 可以通过减小载波频偏来实现同步环路的快速入锁。

#### 3.2 OQPSK 信号的统计特征

与 QPSK 信号相比, OQPSK 信号的载波同步

先于定时同步，因此在进行载波同步时，需要考虑符号间干扰的影响，这就造成基于 ML 准则的前向载波同步算法计算复杂度高<sup>[10]</sup>。

数字载波调制信号具备与载波频率和符号速率相关的循环平稳特性<sup>[11]</sup>。对于循环平稳信号  $x(t)$ ，其共轭循环自相关函数为

$$R_{xx}^{\alpha*}(\tau) = \lim_{Z \rightarrow \infty} \frac{1}{Z} \int_{-Z/2}^{Z/2} E \left\{ x \left( t + \frac{\tau}{2} \right) x \left( t - \frac{\tau}{2} \right) \right\} e^{-j2\pi\alpha t} dt \quad (10)$$

其中  $x^*$  表示对  $x$  取共轭。而共轭循环谱相关为共轭循环自相关函数的傅氏变换为

$$S_{xx}^{\alpha*}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \mathcal{R}_{xx}^{\alpha*}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (11)$$

下面讨论信号  $x(t, \theta)$  的循环谱特征,  $x(t, \theta)$  的共轭循环自相关函数为

$$\begin{aligned} \mathcal{R}_{xx}^{\alpha*}(\tau) &= \lim_{Z \rightarrow \infty} \frac{1}{Z} \int_{-Z/2}^{Z/2} E \left\{ m \left( t + \frac{\tau}{2} \right) e^{j \left[ 2\pi f_c \left( t + \frac{\tau}{2} \right) + \theta \right]} \right. \\ &\quad \left. \cdot m \left( t - \frac{\tau}{2} \right) e^{j \left[ 2\pi f_c \left( t - \frac{\tau}{2} \right) + \theta \right]} \right\} e^{-j2\pi\alpha t} dt \\ &= \mathcal{R}_{mm}^{\alpha-2f_c}(\tau) e^{j2\theta} \end{aligned} \quad (12)$$

其中  $m^*$  表示对  $m$  取共轭。而基带信号  $m(t)$  的共轭谱相关函数为

$$S_{mm}^{\alpha*}(f) = \frac{1 - e^{-j\pi\alpha T}}{T} P \left( f + \frac{\alpha}{2} \right) P^* \left( f - \frac{\alpha}{2} \right), \alpha = \frac{n}{T} \quad (13)$$

其中  $P(f)$  为成形滤波器  $p(t)$  的傅氏变换。

联合式(12), 式(13)可得: 当  $n$  为奇数时, 在循环频率  $\alpha = 2f_c + n/T$  处存在共轭谱函数。综上可得 OQPSK 信号的共轭谱函数为

$$\begin{aligned} S_{xx}^{\alpha*}(f) &= \frac{1 - e^{-j\pi(\alpha-2f_c)T}}{T} e^{j2\theta} P \left( f - f_c + \frac{\alpha}{2} \right) \\ &\quad \cdot P^* \left( f + f_c - \frac{\alpha}{2} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

式中  $\alpha = 2f_c + n/T$ ,  $n$  为奇数。

由于  $\mathcal{R}_{xx}^{\alpha*}(\tau)$  与  $S_{xx}^{\alpha*}(f)$  是傅氏变换对, 因此有

$$\mathcal{R}_{xx}^{\alpha*}(0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_{xx}^{\alpha*}(f) df \quad (15)$$

由式(15)可知, OQPSK 信号的  $\mathcal{R}_{xx}^{\alpha*}(0)$  在  $\alpha = 2f_c \pm f_T$  处存在两条明显的谱线。而由式(11)可知,  $\mathcal{R}_{xx}^{\alpha*}(0)$  为信号  $x(t)$  的平方谱。本文在符号信噪比为 6 dB 时, 分别计算了频偏为 0 Hz, 300 Hz 的 OQPSK 信号的平方谱, 结果如图 2 所示。

由图 2 可以看出, OQPSK 信号的平方谱存在两条明显的谱线, 且这两条谱线的幅度、位置受载波频偏的影响。当频偏较小时, 平方谱中存在两条明显的谱线; 当频偏较大时, 其中一条谱线更加突出, 而另一条谱线受噪声影响变得不明显。

### 3.3 改进的 OQPSK 载波同步

由式(19)可知, OQPSK 信号的平方谱在  $\alpha = 2f_c \pm f_T$  处存在两条明显的谱线, 因此借助平方谱可以得到粗频偏以缩小信号的频偏范围。在信噪比较大、频偏较小时, 信号的平方谱中可得到这两条谱线的准确位置, 此时进行频偏估计不需要考虑信号的传输速率。而当信噪比较低、信号的频偏较大时, 在平方谱图中很难同时得到这两条谱线的准确位置, 但可以得到一条谱线的准确位置, 此时需要借助信号的传输速率进行频偏估计, 则有: 当单谱线的频率位置  $\alpha < 0$  时, 此时频偏为负

$$\hat{f}_c = \frac{\alpha + f_T}{2} \quad (16)$$

当单谱线的频率位置  $\alpha > 0$  时, 此时频偏为正

$$\hat{f}_c = \frac{\alpha - f_T}{2} \quad (17)$$

通常信号的传输速率较容易得到, 因此本文假设已知准确的信号传输速率。

平方谱中突出谱线属于明显的极大峰值, 但在整个频谱中可能不是最大的峰值, 可利用爬山法搜索此类极大峰值点。在得到粗频偏后, 对信号进行校正, 此时信号的频偏较小, 可以采用简化的 OQPSK 载波同步环路实现信号的同步。整体实现过程如图 3 所示。

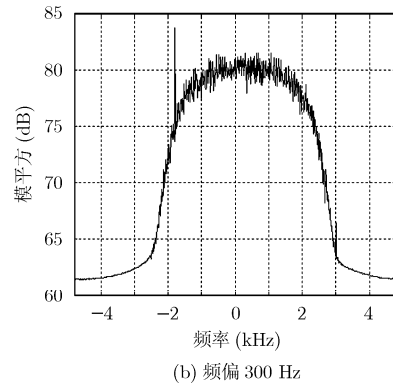
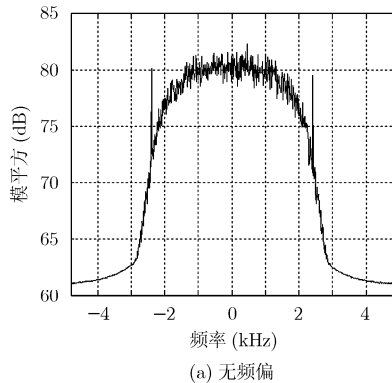


图 2 OQPSK 信号的平方谱



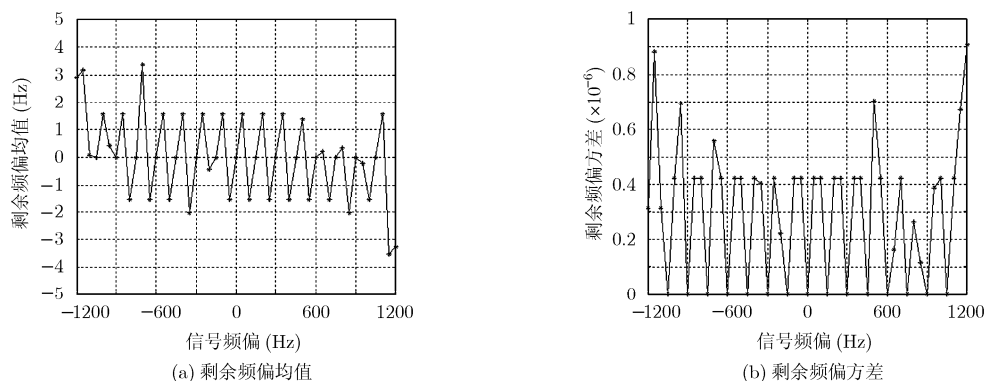


图4 不同频偏下平方谱估计仿真性能

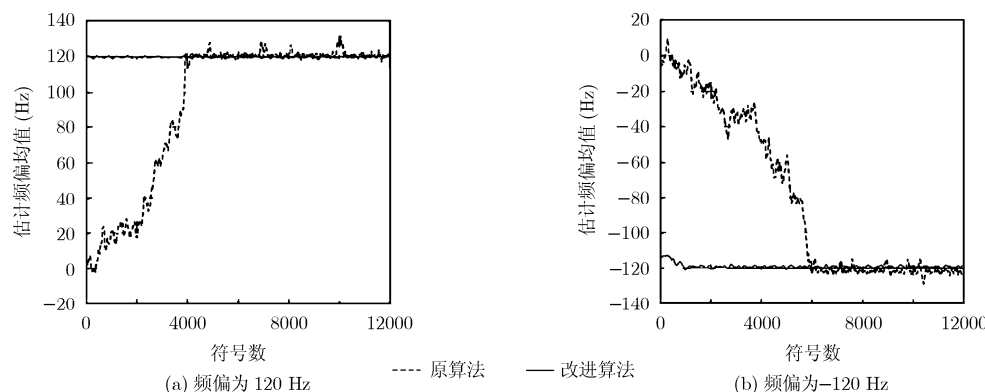


图5 算法的捕获速度比较

## 参考文献

- [1] Long Z Y. Analysis of modulation scheme using GNU radio. March 2009. <http://academic.csuohio.edu/yuc/mobile09/zeyu.pdf>.
- [2] Kinman P W and Berner J B. Carrier synchronization of offset QPSK for deep space telemetry[C]. IEEE Aerospace Conference, Big Sky, Montana, 9-16 Mar., 2002, 3: 1327-1336.
- [3] Kanirkar N B and Sarvaiya J N. Performance evaluation of direct sequence spread spectrum CDMA transceiver hardware using pseudo code and code modulation technique[J]. *International Journal of Engineering Research & Industrial Application*, 2009, 1(2): 1-13.
- [4] Spalvieri A and Magarini M. Wiener's loop filter for PLL-based carrier recovery of OQPSK and MSK-type modulations [J]. *Research Letters in Communications*, 2008, Vol.2008, Article ID 235761, 4 pages.
- [5] Simon M K. Carrier synchronization of Offset Quadrature Phase-shift Keying[R]. TMO progress report, 1998.
- [6] Rice M and Perrins E. On the Performance of estimators for burst-mode offset QPSK[C]. IEEE Military Communications Conference, Boston, MA, 18-21 Oct., 2009: 1-6.
- [7] 朱健军, 姚庆栋. 突发模式 OQPSK 接收机的一种快速同步算法[J]. *电子与信息学报*, 2002, 24(1): 120-124.  
Zhu Jian-jun and Yao Qing-dong. A new algorithm for fast synchronization in a burst mode OQPSK receiver [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2002, 24(1): 120-124.
- [8] 吴玉成, 高珊, 侯剑辉. OQPSK 载波相位捕获算法的改进及数字化实现[J]. *电路与系统学报*, 2005, 10(5): 120-124.  
Wu Yu-cheng, Gao Shan, and Hou Jian-hui. Improvement and digitalization of OQPSK carrier phase acquisition algorithm [J]. *Journal of Circuits and Systems*, 2005, 10(5): 120-124.
- [9] 张炜, 杨虎, 张尔扬. 多进制相移键控信号的谱相关特性分析 [J]. *电子与信息学报*, 2008, 30(2): 392-396.  
Zhang Wei, Yang Hu, and Zhang Er-yang. Spectral correlation analysis of MPSK signals [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(2): 392-396.
- [10] D'Amico A A, D'Andrea A N, and Mengali U. Feedforward joint phase and timing estimation with OQPSK modulation [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1999, 48(3): 824-832.
- [11] Vucic D and Obradovic M. Spectral correlation evaluation of MSK and offset QPSK modulation[J]. *Signal Processing*, 1999, 78(3): 363-367.

彭 华：男，1973 年生，博士，教授，硕士生导师，研究方向为软件无线电与通信信号处理。  
王军杰：男，1985 年生，硕士，研究方向为通信信号处理。  
丁海峰：男，1977 年生，硕士，研究方向为通信信号处理。  
杨 欣：女，1987 年生，硕士，研究方向为多媒体图像处理。