

基于功率谱 FFT 的 BPSK 信号参数估计

马秀荣* 张媛

(天津理工大学计算机与通信工程学院 天津 300384)

(天津理工大学薄膜电子与通信器件天津市重点实验室 天津 300384)

摘要: 针对低信噪比环境下二相编码(BPSK)信号参数估计的问题, 该文提出一种基于功率谱 FFT 的信号参数估计算法。该算法根据信号功率谱傅里叶变换得到的幅度谱和相位谱与各参数之间的关系, 实现 BPSK 信号的码元宽度、载频和码长估计。该算法对功率谱继续做傅里叶变换可以进一步消除噪声对估值的影响, 更适合在低信噪比环境下实现参数的估计, 且计算简单易于实现。仿真试验证明了该算法的准确性和抗噪性, 在信噪比为-10 dB 时 BPSK 信号的载频和码元宽度估计正确率分别比循环谱算法提高了 9.9%和 190.9%。

关键词: 二相编码(BPSK); 参数估计; 抗噪性

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)05-1252-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01075

Parameters Estimation of BPSK Signals Based on Power Spectral FFT

Ma Xiu-rong Zhang Yuan

(School of Computer and Communication Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

(Tianjin Key Laboratory of Film Electronic and Communication Device, Tianjin University of Technology,

Tianjin 300384, China)

Abstract: A parameters estimation algorithm based on the power spectral FFT is proposed to estimate the parameters of Binary Phase Shift Keying (BPSK) signals under negative Signal-to-Noise Ratio (SNR) environment. The code width, carrier frequency and code length of BPSK signals are estimated according to the relationship between the parameters and the amplitude and phase spectrums, which are obtained through the FFT of power spectrum. This algorithm can further eliminate the noise based on power spectral FFT, so it is more suitable for low SNR environment. And the algorithm is computationally efficient and easy to realize. The experimental results demonstrate high accuracy and stronger capability on anti-noise, the estimation of the carrier frequency and the code width can increase by 9.9% and 190.9% with the cyclic spectral estimation algorithms.

Key words: Binary Phase Shift Keying (BPSK); Parameter estimation; Anti-noise capability

1 引言

二相编码(BPSK)信号具有频带宽、峰值功率低、隐蔽性好及抗干扰性强等优点, 这种信号参数估计是雷达和通信对抗等领域的典型问题^[1-3], 因此成为国内外广泛研究的热点, 形成了许多成熟的估计算法及相关技术^[4-10]。

对于 BPSK 信号参数的估计问题, 前人提出了很多方法, 包括: 时域相位差分法, 小波变换和循环谱法。文献[4,5]将信号瞬时相位进行差分, 将相位差分序列峰值的最小距离作为码元宽度估计, 计算复杂度低, 实现简单, 但当信噪比低于 7 dB 时估

计性能迅速恶化; 文献[6,7]利用 Haar 小波检测相位跳变估计 MPSK 信号的码元宽度, 可处理的信噪比低至-5 dB, 但存在小波母函数和最优尺度的选取问题, 如果选择不合理, 很有可能导致算法性能降低; 文献[8-10]提出了利用循环谱截面进行载频和码元宽度估计, 其核心是用功率谱估计载频, 没有参数选取问题, 但受噪声影响因此精度不高, 同时码元宽度估计更易受载频估计精度和基底噪声影响, 其中文献[10]通过改进算法降低了计算复杂度, 因此本文工作在此方法的基础上提出, 分析了噪声对估计精度的影响, 改善了文献[10]在低信噪比环境下参数估计精度不高的缺点, 并且进一步降低了计算复杂度。

本文提出的一种基于功率谱 FFT 的 BPSK 信号参数估计算法, 首先对信号功率谱进行傅里叶变

2012-08-21 收到, 2013-01-18 改回

天津市科技创新专项资金(10FDZDZX00400)资助课题

*通信作者: 马秀荣 maxiuorong@gmail.com

换提取幅度谱和相位谱特征，这两个特征偏离度比功率谱特征偏离度分别降低了52.4%和100%，因此根据这两个特征与各参数之间的关系即可实现低信噪比环境下参数的准确估计。并且，本文算法计算简单易于实现，在样本点数为8192时，本文算法复乘次数比文献[10]算法减少了约98%。仿真试验证明了该算法的准确性和抗噪性，在信噪比为-10 dB时的载频和码元宽度估计正确率分别比文献[10]中循环谱算法提高了9.9%和190.9%；在信噪比为-10~10 dB时的码长估计正确率均为100%。

2 信号功率谱模型

二相编码(BPSK)信号功率谱的表达式为

$$P(f) = A^2 \tau_1^2 \text{sinc}^2[\tau_1(f - f_c)] \cdot \left\{ \left[\sum_{k=0}^{N-1} c_k \cos(2\pi f k \tau_1) \right]^2 + \left[\sum_{k=1}^{N-1} c_k \sin(2\pi f k \tau_1) \right]^2 \right\} = A^2 \tau_1^2 \text{sinc}^2[\tau_1(f - f_c)] \cdot \left[N - 1 + \frac{\sin[2N\pi\tau_1(f - f_c)]}{\sin[2\pi\tau_1(f - f_c)]} \right] \quad (1)$$

式中 A 是信号幅度， τ_1 是码元宽度， f_c 是载波频率， N 是码长， $c_k = \pm 1$ 。

参数设置为：脉宽 $\tau = N\tau_1 = 1 \mu\text{s}$ ，载频 $f_c = 500 \text{ MHz}$ ，码长 $N = 11$ ，BPSK 信号功率谱如图 1 所示。

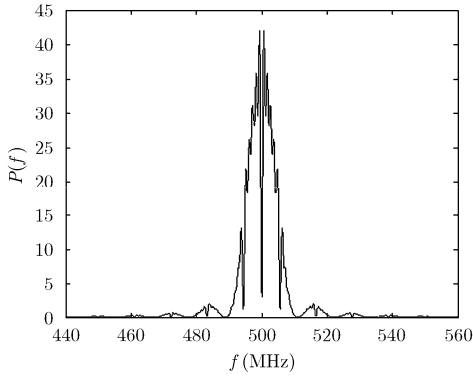


图1 BPSK信号功率谱

3 基于功率谱FFT的BPSK信号参数估计

现将信号功率谱的频率轴按照 $f = t$ 的原则映射到时间轴，即把功率谱的频率向量当作现在的“时域”向量，功率谱的值当作现在“信号”的幅值，进行傅里叶变换提取幅度谱和相位谱特征来识别原始信号的调制信息。其依据是傅里叶变换的对称性，即假设一个时域信号为 $f(t)$ ，若 $F(\omega) = \mathcal{F}[f(t)]$ ，则有 $\mathcal{F}[F(t)] = 2\pi f(-\omega)$ ，变量 t 和 ω 互换，就有 $F[F(\omega)]$

$= 2\pi f(-t)$ 。傅里叶变换的对称性表明，对于一个时域信号所对应的频域信号做傅里叶变换，变换结果完全能够或在一定程度上反映出时域信号的调制(频率等参数)信息。

3.1 BPSK 信号特征提取及参数估计

将 $N = 11$ 代入式(1)中并对其进行傅里叶变换，取 $x \geq 0$ 的部分结果为

$$F'_{N=11}(x) = \frac{2A^2\pi}{11\tau_1} \left[11(\tau_1 - x) \text{rect}\left(\frac{x}{\tau_1}\right) + (x - \tau_1) \text{rect}\left(\frac{x - \tau_1}{\tau}\right) + (3\tau_1 - x) \cdot \text{rect}\left(\frac{x - 2\tau_1}{\tau_1}\right) + \dots + (11\tau_1 - x) \cdot \text{rect}\left(\frac{x - 10\tau_1}{\tau_1}\right) \right] e^{-j2\pi x f_c} \quad (2)$$

其中 $\text{rect}\left(\frac{x}{\tau}\right) = \begin{cases} 1, & 0 < x < \tau \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$ 。

由式(2)可以得到 BPSK 信号功率谱 FFT 的幅频特性为

$$|F'_{N=11}(x)| = \frac{2A^2\pi}{11\tau_1} \left[11(\tau_1 - x) \text{rect}\left(\frac{x}{\tau_1}\right) + (x - \tau_1) \text{rect}\left(\frac{x - \tau_1}{\tau}\right) + (3\tau_1 - x) \cdot \text{rect}\left(\frac{x - 2\tau_1}{\tau_1}\right) + \dots + (11\tau_1 - x) \cdot \text{rect}\left(\frac{x - 10\tau_1}{\tau_1}\right) \right] \quad (3)$$

由式(2)可以得到 BPSK 信号功率谱 FFT 的相频特性为

$$\varphi = -2\pi f_c x \quad (4)$$

由式(3)可以看出 $|F'_{N=11}(x)|$ 上非零的值域区分为 11 段，分别为 $0 \leq x < \tau_1, \tau_1 \leq x < 2\tau_1, \dots, 10\tau_1 \leq x < 11\tau_1$ ，因此可以得到幅度谱首个过零点 x_a 为码元宽度的估计 $\hat{\tau}_1 = x_a$ ，连续过零点的起点 x_b 为脉宽的估计 $\hat{\tau} = x_b$ ，脉宽与码元宽度的比值取整数为码长的估计 $\hat{N} = [x_b/x_a]$ ；由式(4)可以得到相位谱的频率为载频的估计，即 $\hat{f}_c = \frac{N-1}{x_N - x_1}$ ，其中 x_1 和 x_N 为相位谱中第 1 个和最后一个极大值对应的时间点， N 为极大值个数。

3.2 特征抗噪性能分析

文献[10]利用功率谱进行参数估计，相当于时域信号经过一次 FFT 后又经过频域平滑，可以消除一部分噪声，但仍受噪声影响，因此参数估计精度不高，而本文是在功率谱的基础上再进行 FFT 使噪声

得到进一步抑制,因此本文算法提取的特征受噪声影响小。

设由噪声引起的特征偏离度为 α ,噪声为零时的特征为 x_1, x_2, \dots, x_n ,加入噪声后的特征为 $\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n$,则本文定义 α 为

$$\alpha = E \left[\frac{|\hat{x}_i - x_i|}{x_i} \right], \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

为进一步说明本文算法提取的特征抗噪性能优于功率谱特征,利用式(5)分别计算各个特征的偏离度,以脉宽 $\tau = N\tau_1 = 1 \mu\text{s}$,载频 $f_c = 500 \text{ MHz}$,码长 $N = 11$ 时的BPSK信号为例,分别给出了噪声为零和信噪比 $\text{SNR} = -10 \text{ dB}$ 两种情况的特征如图2所示,图2(a)为噪声为零时的信号功率谱;图2(b)为信噪比 $\text{SNR} = -10 \text{ dB}$ 时的信号功率谱;图2(c)为噪声为零时的信号功率谱FFT得到的幅度谱;图2(d)为信噪比 $\text{SNR} = -10 \text{ dB}$ 时的信号功率谱FFT得到的幅度谱;图2(e)为噪声为零时的信号功率谱FFT得到的相位谱;图2(f)为信噪比 $\text{SNR} = -10 \text{ dB}$ 时的信号功率谱FFT得到的相位谱。计算各个特征因噪声引起的偏离度时,取图2(a)中主瓣区域内243点的幅值为噪声为零时的特征 x_i ,取图2(b)中主瓣区域内243点的幅值为加入噪声后的特征 \hat{x}_i ,利用式(5)即可计算功率谱的偏离度;取图2(c)中首个过零点到首个连续过零点之间1821点的幅值为噪声为零时的特征 x_i ,取图2(d)中首个过零点到首个连续过零点之间1821点的幅值为加入噪声后的特征 \hat{x}_i ,利用式(5)即可计算功率谱FFT得到的幅度谱的偏离度;取图2(e)中2750个极大值对应的时间点为噪声为零时的特征 x_i ,取图2(f)中2750个极大值

对应的时间点为加入噪声后的特征 \hat{x}_i ,利用式(5)即可计算功率谱FFT得到的相位谱的偏离度。

由图2(a),图2(b)可知,与噪声为零时的信号功率谱特征相比,当信噪比为 -10 dB 时信号的功率谱特征受噪声污染严重变形,根据式(5)计算功率谱特征偏离度为4776%;由图2(c),图2(d)及局部放大图可知,与噪声为零时的信号FFT得到的幅度谱特征相比,当信噪比为 -10 dB 时信号功率谱FFT得到的幅度谱特征虽受噪声影响但保留原有形状,根据式(5)计算特征偏离度为2274%;由图2(e),图2(f)可知,与噪声为零时的信号FFT得到的相位谱特征相比,当信噪比为 -10 dB 时信号功率谱FFT得到的相位谱特征不受噪声影响,根据式(5)计算相位特征偏离度为0。由此得出,本文提取的特征偏离度比功率谱特征偏离度分别降低了52.4%和100%,证明本文提取的特征受噪声影响较小,具有一定的抗噪性,因此根据本文特征得到的参数估计也较准确。

3.3 计算量分析

本文算法的计算量主要是FFT的计算量,若信号样本点数为 N ,则FFT的计算量为 $(N/2)\log_2 N$ 复数乘法。

文献[10]算法的计算量包含3个主要部分:(1)数据加窗的计算量;(2)FFT的计算量;(3)序列累积的计算量。若信号样本点数为 N ,时域平滑次数 $P+1$,则文献[10]算法计算量为 $5(P+1)N^2/16 + \frac{(P+1)N}{4}\log_2(N/2)$ 复数乘法。

但文献[10]算法需要的样本点数少,当文献算法

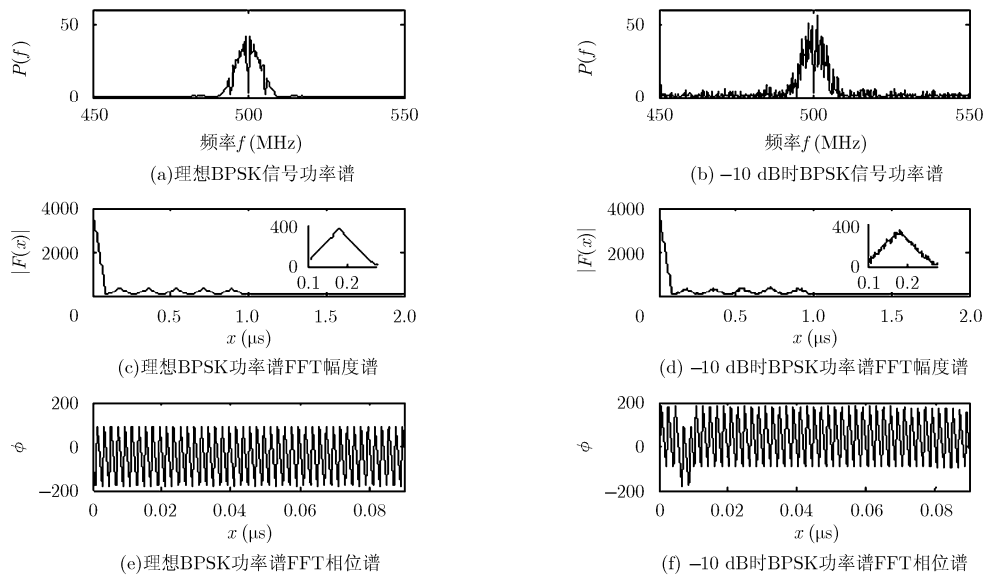


图2 BPSK信号功率谱FFT的幅度谱和相位谱

样本点数为 512, $P = 16$ 时, 本文算法需要的样本点数为 8192, 此时文献[10]算法的乘法次数为 1410048, 本文算法的乘法次数为 24576, 本文算法比文献算法计算量降低了 98.26%。

3.4 参数估计步骤

步骤 1 提取接收信号的功率谱;

步骤 2 对信号功率谱进行傅里叶变换;

步骤 3 根据 3.1 节给出的参数计算规则对信号进行参数估计。

4 仿真试验

信号参数为: BPSK 信号脉宽 $\tau = N\tau_1 = 1 \mu\text{s}$, 载频 $f_c = 500 \text{ MHz}$, 码长 $N = 11$ 。以下各参数估计均进行 100 次 Monte Carlo 试验。

试验 1 载频估计 本文定义载频估值等于真实值为正确估计, 载频估计正确概率为正确估计的试验次数与总次数的比值, 将本文算法与文献[10]算法进行比较, 结果如图 3 所示。

由图 3 可知, 在信噪比变化范围为 $-10 \sim 10 \text{ dB}$ 时, 本文算法的载频估计正确率均为 100% 大于文献[10]算法; 在信噪比小于 -10 dB 时两种算法的载频估计正确率均下降。在信噪比为 -10 dB 时, 本文算法比文献[10]算法的载频估计正确率提高了 9.9%。

试验 2 码元宽度估计 本文定义码元宽度的估计误差小于等于 $\pm 1\%$ 为正确估计, 码元宽度估计

正确概率为正确估计的试验次数与总次数的比值, 将本文算法与文献[10]算法进行比较, 结果如图 4 所示。

由图 4 可知, 在信噪比大于 0 dB 时, 本文算法和文献[10]算法正确率都很高; 但在小于 0 dB 时, 本文算法仍保持较高的正确率, 文献算法的正确率明显下降。在信噪比为 -10 dB 时, 本文算法比文献[10]算法的码元宽度估计正确率提高了 190.9%。

试验 3 码长估计 本文算法还可以对 BPSK 信号的码长进行估计, 同样定义码长估值等于真实值为正确估计, 码长估计正确概率为正确估计的试验次数与总次数的比值, 进行 100 次 Monte Carlo 试验, 码长估计正确率如图 5 所示。

由图 5 可知, 在信噪比变化范围为 $-10 \sim 10 \text{ dB}$ 时, 码长估计正确率均为 100%; 在小于 -10 dB 时, 码长估计正确率下降, 但仍然较高。

5 结论

本文提出的基于功率谱 FFT 的 BPSK 信号参数估计算法, 根据信号功率谱傅里叶变换得到的幅度谱和相位谱与各参数之间的关系, 可以在低信噪比条件下对 BPSK 信号进行码元宽度、载频和码长估计, 且计算简单, 对比试验验证了算法的准确性和抗噪性。

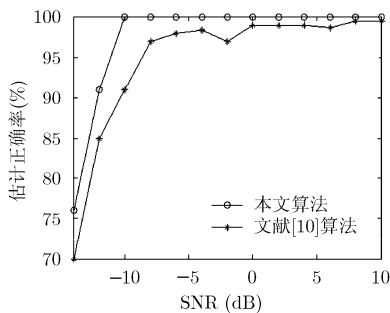


图 3 载频估计正确率比较

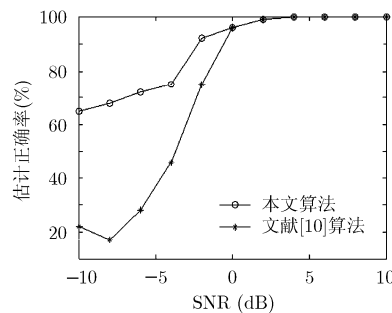


图 4 码元宽度估计正确率比较

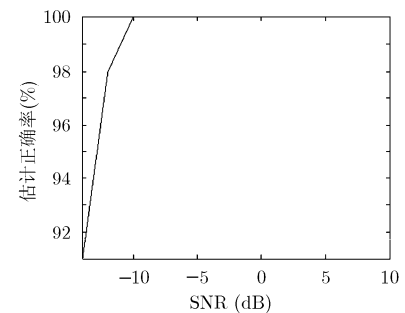


图 5 码长估计正确率

参考文献

- [1] Gardner W A. Spectral correlation of modulated signals: part I — Analog modulation[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1987, 35(6): 584-594.
- [2] Kawalec A and Owczarek R. Radar emitter recognition using intra pulse data[C]. Proceedings of 15th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications, Warsaw, 2004: 435-438.
- [3] Cui T, Tang J, Gao F F, et al. Moment-based parameter estimation and blind spectrum sensing for quadrature amplitude modulation[J]. *IEEE Transactions on*

Communications, 2011, 59(2): 613-623.

- [4] Yu Z H, Shi Y Q, and Su W. A blind carrier frequency estimation algorithm for digitally modulated signals[C]. Military Communications Conference, Monterey, CA, USA, 2004: 48-53.
- [5] 李杨, 李国通, 杨根庆. 通信信号数字调制方式自动识别算法研究[J]. *电子与信息学报*, 2005, 27(2): 197-201.
- Li Yang, Li Guo-tong, and Yang Gen-qing. Automatic digital modulation recognition algorithm of communication signals[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2005, 27(2): 197-201.

- [6] Ho K C, Prokopiw W, and Chan Y T. Modulation identification of digital signals by the wavelet transform[J]. *IEE Proceedings - Radar, Sonar and Navigation*, 2000, 147(4): 169-176.
- [7] Wang Long, Zhang Geng-xin, Bian Dong-ming, *et al.* Blind symbol rate estimation of satellite communication signal by Haar wavelet transform[J]. *Journal of Electronics*, 2011, 28(2): 198-203.
- [8] 金艳, 姬红兵. 基于循环自相关的 PSK 信号盲参数估计新方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2006, 33(6): 892-901.
- Jin Yan and Ji Hong-bing. A new cyclic autocorrelation based blind parameter estimation method for PSK signals[J]. *Journal of Xidian University*, 2006, 33(6): 892-901.
- [9] Wen Jing-yang. Parameter estimation in detection of BPSK radar signals[C]. IET International Radar Conference, Guilin, 2009: 1-4.
- [10] 崔伟亮, 江桦, 李剑强, 等. 改进的循环谱估计快速算法与性能分析[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(7): 1594-1599.
- Cui Wei-liang, Jiang Hua, Li Jian-qiang, *et al.* Improved fast cyclic spectral estimation algorithm and performance analysis[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(7): 1594-1599.
- 马秀荣: 女, 1961 年生, 天津市高等学校特聘教授, 博士生导师, 研究方向为无线通信.
- 张 媛: 女, 1987 年生, 硕士生, 研究方向为信号处理.