

文章编号: 1672-2892(2011)01-0060-04

循环相关符号率盲估计算法的快速实现

王甲峰, 叶江峰, 张健

(中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 介绍了几种常用的符号率盲估计方法, 简单回顾了基于循环相关符号率盲估计的基本算法, 在此基础上, 通过理论分析提出一种基于循环相关符号率盲估计的快速实现方法。该方法利用 FFT 运算代替循环频率遍历搜索, 计算量分析表明, 与基本算法相比, 快速算法大幅度降低了计算量, 仿真结果验证了该算法的有效性。最后, 对算法中存在的问题进行了分析并给出了解决方法。

关键词: 循环相关; 符号率; 盲估计

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

Fast realization of cyclic correlation based symbol rate blind estimation

WANG Jia-feng, YE Jiang-feng, ZHANG Jian

(Institute of Electronic Engineering, China Academic of Engineering Physics, Sichuan Mianyang 621900, China)

Abstract: Some methods of symbol rate blind estimation are introduced. And the basic method based on the cyclic correlation is briefly reviewed. A fast realization method of symbol rate blind estimation based on the cyclic correlation is proposed through theoretic analysis. The method adopts FFT instead of the cyclic frequency scanning. The analysis of the calculation amount shows that the new method is faster than the basic one. Simulation results validate the method. Finally, the defects of the method are analyzed and the solutions are introduced.

Key words: cyclic correlation; symbol rate; blind estimation

在未知调制方式条件下精确估计符号率, 即所谓符号率盲估计问题, 是通信对抗领域的重要研究课题之一。目前, 符号率盲估计的算法大致可分为: 包络平方谱法, 小波变换法^[1-2], 循环相关法^[3-4]以及这些方法的变形及组合^[5]。当然还有许多其他符号估计方法, 本文不一一列举。

在众多的符号率估计方法中, 循环相关法由于利用了通信信号的循环平稳特性, 具有应用范围广、估计精度高、抗噪性能好等优点, 因而日益受到重视。但由于循环相关法采用按循环频率步进搜索的方法估计符号率, 因此当搜索范围比较宽而估计精度要求较高时, 其算法的计算量非常大, 限制了这一方法在实际工程中的应用。本文从基本循环相关算法出发, 提出一种循环相关谱的快速计算方法, 从而大幅度降低了算法的计算量, 具备了工程应用的可行性。

1 基本算法

设接收端信号的离散形式可表示为:

$$x(n) = s(n) + w(n) \quad (1)$$

式中: $s(n)$ 为调制信号; $w(n)$ 为零均值高斯白噪声。 $s(n)$ 可表示如下:

$$s(n) = \text{Re} \left\{ \sum_k a_k g(nT_s - kT) \exp j[2\pi f_c nT_s + \theta_k + \varphi_0] \right\} \quad (2)$$

式中: a_k 为调制幅度; $g(t)$ 为基带信号波形; T_s 为采样周期; T 为符号周期; f_c 为载波频率; θ_k 为调制相位; φ_0 为初始相位。为了便于分析, 一般采用复信号形式:

收稿日期: 2010-03-30; 修回日期: 2010-08-09

基金项目: 中国工程物理研究院科学技术发展基金资助项目(2009B0403043)

$$s(n) = \sum_k a_k g(nT_s - kT) \exp j[2\pi f_c nT_s + \theta_k + \varphi_0] \quad (3)$$

此时 $w(n)$ 为零均值复高斯白噪声。

信号 $x(n)$ 是非平稳的, 但一定是循环平稳的。 $x(n)$ 的自相关函数表示为:

$$r_x(n, \tau) = E[x(n+\tau)x^*(n)] \quad (4)$$

$r_x(n, \tau)$ 可按循环频率展开^[3]:

$$r_x(n, \tau) = \sum_{k=-1}^1 r_x^{k\alpha_0}(\tau) e^{j2\pi k\alpha_0 n} \quad (5)$$

式中: $\alpha_0 = T_s/T$; $r_x^{k\alpha_0}(\tau)$ 表示在循环频率 $k\alpha_0$ 和延时 τ 处的循环相关函数。

考虑 $2\gamma+1$ 维情况, 令 $r_x(n) = [r_x(n, -\gamma), r_x(n, -\gamma+1), \dots, r_x(n, \gamma)]^T$, 则:

$$r_x(n) = \sum_{k=-1}^1 r_x^{k\alpha_0} e^{j2\pi k\alpha_0 n} \quad (6)$$

式中 $r_x^\alpha = [r_x^\alpha(-\gamma), r_x^\alpha(-\gamma+1), \dots, r_x^\alpha(\gamma)]^T$ 。当 α 不等于 $-\alpha_0, 0, \alpha_0$ 时, 都有 $r_x^\alpha(\tau) = 0$, 即 $r_x^\alpha = 0$, 因此得到 α_0 及符号率 f_T 的估计式:

$$\alpha_0 = \arg \max_{\alpha \in (0, 1/2)} \|r_x^\alpha\|^2 \quad (7)$$

$$f_T = \alpha_0 f_s \quad (8)$$

式(7)~式(8)中: $\|\cdot\|$ 表示求向量范数; f_s 表示采样频率。 r_x^α 可按式(9)估计:

$$r_x^\alpha \approx \frac{1}{N-2\gamma} \sum_{n=\gamma+1}^{N-\gamma} y(n) e^{-2j\pi\alpha n} \quad (9)$$

式中 $y(n) = [x(n-\gamma)x^*(n), \dots, x(n+\gamma)x^*(n)]^T$ 。

需要指出的是, 实际上 $x(n)$ 的循环频率有无限多个, 式(6)中只取 3 个循环频率是通过限定信号带宽实现的^[3]。

2 快速算法

由式(7)和式(9)可以看出, 采用基本算法估计符号率, 需要循环频率 α 在 $(0, 1/2)$ 范围内进行遍历搜索, 对于每一个 α 都要按式(9)计算 r_x^α , 当要求的估计精度较高, 而且数据长度较大时, 其计算量是非常之大的。为了减小计算量, 目前大多从缩小 α 的搜索范围出发, 如文献[3]和文献[5]所述的方法。虽然这些方法可以在一定程度上减小计算量, 但其作用是有限的, 本文从基本算法出发推导出快速算法。

考察 r_x^α 中的第 l 个元素 $r_x^\alpha(l)$ ($l = -\gamma, -\gamma+1, \dots, \gamma$) 的计算过程。根据式(9)有:

$$r_x^\alpha(l) \approx \frac{1}{N-2\gamma} \sum_{n=\gamma+1}^{N-\gamma} y(n, l) e^{-2j\pi\alpha n} \quad (10)$$

式中 $y(n, l) = x(n-l)x^*(n)$ 。将 α 的搜索范围扩展到 $[0, 1)$, 并设其搜索步长为:

$$\Delta\alpha = \frac{1}{N-2\gamma} \quad (11)$$

则 $\alpha = k\Delta\alpha$, $k = 0, 1, \dots, N-2\gamma-1$, 代入式(10)有:

$$r_x^{k\Delta\alpha}(l) \approx \frac{1}{N-2\gamma} \sum_{n=\gamma+1}^{N-\gamma} y(n, l) e^{-2j\pi \frac{nk}{N-2\gamma}}, k = 0, 1, \dots, N-2\gamma-1 \quad (12)$$

式(12)显然是 $y(n, l)$ 的长度为 $N-2\gamma$ 的 DFT 运算。而 DFT 运算可以利用 FFT 实现, 因此有:

$$r_x^{k\Delta\alpha}(l) \approx FFT[y(n, l), k], k = 0, 1, \dots, N-2\gamma-1 \quad (13)$$

式中 $FFT[y(n, l), k]$ 表示序列 $y(n, l)$ FFT 的第 k 个输出。定义循环相关谱为:

$$P(k) = \|r_x^{k\Delta\alpha}\|^2, k = 0, 1, \dots, N-2\gamma-1 \quad (14)$$

由于 $\|r_x^\alpha\|^2 = \sum_{l=-\gamma}^{\gamma} |r_x^\alpha(l)|^2$, 则循环相关谱为:

$$P(k) = \sum_{l=-\gamma}^{\gamma} |FFT[y(n, l), k]|^2, k = 0, 1, \dots, N-2\gamma-1 \quad (15)$$

估计符号率时取 $k=0,1,\dots,\frac{N-2\gamma}{2}-1$ 。因此,符号率的估计式可转换为:

$$k_0 = \arg \max_{k \in \{0, \frac{N-2\gamma}{2}-1\}} P(k) \quad (16)$$

$$f_T = \frac{k_0}{N-2\gamma} f_s \quad (17)$$

从而将符号率的估计转换为求使 $2\gamma+1$ 个序列 FFT 谱的模平方和最大的 k_0 值。

上述分析中利用 FFT 运算代替 DFT 运算是合理的:一方面可以选择合适的 N 及 γ , 使 $N-2\gamma$ 满足 FFT 对数据长度的要求;另一方面,即使 $N-2\gamma$ 不满足 FFT 的要求,也可以通过补零的方法实现。后面的仿真表明,补零不仅可以使数据长度满足 FFT 运算的要求,还可以提高估计精度。

综上所述,快速算法的计算流程如下:

- 1) 构造 $2\gamma+1$ 个序列 $y(n,l), l=-\gamma, -\gamma+1, \dots, \gamma$;
- 2) 分别求每个序列的 FFT;
- 3) 求 $2\gamma+1$ 频谱的模平方和 $P(k), k=0,1,\dots,\frac{N-2\gamma}{2}-1$;
- 4) 最后按式(16)、式(17)估计符号率。

3 计算量分析

根据所需的复数乘法数作为衡量计算量的标准。

假设 $y(n)$ 已经构造好,对于基本算法每个 α 所需的复数乘法数为:

$$N_1 = (N-2\gamma)(2\gamma+1) + (2\gamma+1) = (N-2\gamma+1)(2\gamma+1) \quad (18)$$

则扫描全部 α 所需的复数乘法数为:

$$N_2 = \frac{(N-2\gamma)}{2} N_1 = \frac{1}{2} (N-2\gamma)(N-2\gamma+1)(2\gamma+1) \quad (19)$$

加上构造 $y(n)$ 所需的复数乘法数,得到基本算法所需要的复数乘法数为:

$$N_b = \frac{1}{2} (N-2\gamma)(N-2\gamma+1)(2\gamma+1) + (N-2\gamma)(2\gamma+1) \quad (20)$$

而对于快速算法很容易得到所需复数乘法数为^[6]:

$$N_f = (2\gamma+1) \frac{N-2\gamma}{2} \log_2(N-2\gamma) + 2(2\gamma+1)(N-2\gamma) \quad (21)$$

则

$$\frac{N_f}{N_b} = \frac{\log_2(N-2\gamma)+4}{N-2\gamma+3} \quad (22)$$

例如, $L-2\gamma=1024$ 时,快速算法的计算量约为基本算法的 1.4%。

4 仿真分析

由于快速算法是基于基本算法的,而基本算法的性能在参考文献[4]中已有详细分析,本文只给出部分仿真结果。

图 1(a)是一种 8PSK 信号的循环相关谱,为了能够直观反映符号率,将循环相关谱的横坐标变换为频率。仿真参数如下:采样率 16 ksps,符号率 3.2 kB,成形系数 0.35,符号数 2 000,信噪比 0 dB, γ 取 10。符号率估计结果是 3.195 2 kB。限于篇幅,没有给出其他单载波调制方式的仿真结果,总体来说,其性能与 8PSK 类似。

图 1(b)是一种 2FSK 信号的循环相关谱。仿真参数为:采样率 16 ksps,符号率 1.6 kB,载波频率 4 kHz,频偏 2 kHz,符号数 2 000,信噪比 0 dB, γ 取 10。符号率估计结果是 1.593 6 kB。

从仿真结果可以看出,估计精度已经比较高,如果需要进一步提高估计精度,可以通过补零或采用 CZT 算法实现,如图 1(c)所示,其仿真参数与图 1(a)相同,而符号率估计值为 3.200 8 kB。

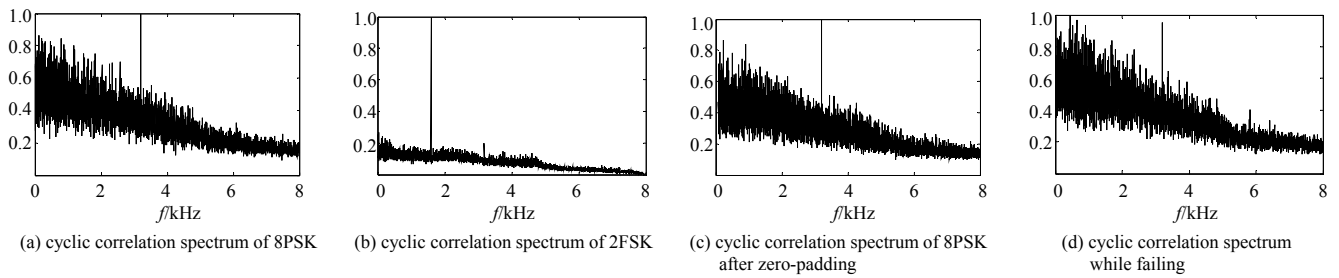


Fig.1 Part of simulation results

图 1 部分仿真结果

由于本文算法只是基本算法的快速实现, 因此基本算法中存在的问题, 在快速算法中依然存在。循环相关法估计符号率的一个最大的问题就是, 在信噪比较低时, 循环相关谱的低频部分的幅度可能会比符号率谱线高, 如图 1(d)所示。解决这个问题的办法有 3 个:

1) 采用过采样, 即使采样率远大于符号率, 这样符号率谱线就会位于循环相关谱的低频部分, 从而提高正确估计率;

2) 首先对符号率进行粗略估计, 限定符号率的大致范围, 然后在限定的范围内搜索符号率谱线;

3) 对循环相关进行加窗处理, 使循环相关谱尽量平坦^[4]。

方法 3) 不适用于快速算法, 而方法 1) 由于采样率很高, 计算量必然很大, 同时会影响估计精度, 因此一般采用方法 2) 解决上述问题。

5 结论

本文所提出的快速算法, 解决了基于循环相关估计符号率的计算瓶颈, 为此技术在实时分析系统中的应用奠定了基础。但是, 本文算法并未改变基本算法的固有缺点, 即当信噪比较低时符号率谱线有可能低于低频谱线, 因此同样需要辅助手段限定符号率的范围, 以提高正确估计率。而符号率范围的正确限定将直接决定能否正确估计符号率, 因此有关符号率的粗估计方法还需进一步研究。

参考文献:

- [1] Chan Y T, Plews J W, Ho K C. Symbol Rate Estimation by the Wavelet Transform[C]// Proceeding of 1997 IEEE International Symposium on Circuits and System. HongKong:[s.n.], 2002:177-180.
- [2] XU Jun, WANG Fuping, WANG Zanji. The Improvement of Symbol Rate Estimation by the Wavelet Transform[C]// Proc. of 2005 International Conference on Communications, Circuits and Systems. HongKong:[s.n.], 2005:100-103.
- [3] 刘世刚. 基于循环相关的符号率盲估计[J]. 信号处理, 2004, 20(4):356-361.
- [4] Mazet L, Loubaton Ph. Cyclic correlation based symbol rate estimation[C]// Proc. of IEEE ISCAS'97. HongKong:[s.n.], 1997.
- [5] 周欣, 吴琰. 一种基于小波变换和循环相关的波特率估计方法[J]. 信息工程大学学报, 2007, 8(2):171-174.
- [6] 胡广书. 数字信号处理[M]. 2版. 北京:清华大学出版社, 2003.

作者简介:



王甲峰(1974-), 男, 吉林省镇赉县人, 副研究员, 现从事通信对抗、通信信号处理等领域的工作。email:hugeghost@hotmail.com.

叶江峰(1974-), 男, 江西省安福县人, 副研究员, 主要从事电子对抗、通信信号处理等领域的研究工作。

张健(1968-), 男, 重庆市人, 博士, 研究员, 主要从事电子学和电子信息对抗理论、技术与工程研究。