

一种基于 PCA 的 MPSK 信号码元速率估计方法^{*}

王 蒙, 汪 伟, 于宏毅, 胡赞鹏

(解放军信息工程大学 信息工程学院, 郑州 450002)

摘 要: 针对 MPSK 信号的码元速率估计问题, 研究了有限数据条件下循环谱的谱线特征受到背景色噪声干扰的现象, 提出了一种基于主分量分析(PCA)的循环谱特征码元速率估计方法。PCA 变换抑制了信号循环谱中的背景色噪声, 提高了估计精度, 减小了估计方差。仿真表明, 该方法在有限数据条件下具有良好的估计性能, 适用于不同成形滤波系数的 MPSK 信号。

关键词: 码元速率估计; 循环谱; 背景色噪声; 主分量分析; 成形滤波

中图分类号: TN911.23; TP393.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2013)06-1786-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.06.048

Symbol rate estimation method of MPSK signals using principal component analysis

WANG Meng, WANG Wei, YU Hong-yi, HU Yun-peng

(Institute of Information Engineering, PLA Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Aiming at the symbol rate estimation of MPSK signals, this paper investigated the phenomenon that the peak features of cyclic spectrum were corrupted by colored background noise in the case of limited data, and proposed a symbol rate estimation algorithm which combined principal component analysis with cyclic spectrum. PCA transformation restrained the colored background noise in the cyclic spectrum, improved estimation precision, and decreased estimation variance. Simulation result shows that the algorithm acquires fine estimation precision under limited data, and is suitable for MPSK signals with distinct shaped filter coefficients.

Key words: symbol rate estimation; cyclic spectrum; colored background noise; principal component analysis (PCA); shaped filter

0 引言

随着无线通信技术的快速发展,电磁频谱空间日益拥挤。在复杂电磁环境下准确估计出接收信号的调制参数对于后续的信号解调、信息分析等有着重要的意义^[1]。调制参数估计的目的是确定信号的特征参数,如载波频率、码元速率等。

通信信号经过调制、采样、编码等处理后具有循环平稳性^[2-6],其循环频率域包含了载波频率、码元速率等调制参数信息,并且对平稳噪声和干扰具有良好的抑制作用^[7],因此在参数估计中得到了广泛的应用。文献[8,9]通过搜索信号循环相关函数的峰值完成对线性调制信号的码元速率估计;文献[10]通过分析 PSK 信号的循环自相关函数,建立了一个基于循环自相关函数的统计量,利用该统计量完成对载频和码元速率的盲估计;文献[11~15]通过对 MPSK 信号循环谱的特定截面进行谱峰搜索完成信号的符号速率估计,取得了良好的估计效果。但是单一截面的谱峰特征受到背景色噪声^[16]的影响,并不稳定,因此考虑对多个循环谱截面进行主分量分析,然后提取主分量的谱峰特征进行码元速率估计。

本文针对 MPSK 信号的码元速率估计问题,提出了一种基于主分量分析(PCA)的循环谱特征码元速率估计方法。首先

提取源信号的循环谱特征,然后利用 PCA 变换对循环谱特征进行降噪和降维,最后利用第一主分量进行码元速率估计,提高了估计精度。仿真表明本文算法在 SNR 低至 -1 dB 时, MPSK 信号码元速率估计的归一化均方误差在 1% 以下。

1 MPSK 信号模型及循环谱特征

MPSK 信号模型可以表示为

$$x(t) = \text{Re}\{x_l(t)e^{j(2\pi f_c t + \varphi_0)}\} \quad (1)$$

$$x_l(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} q(t-nT)e^{j\theta_n} \quad (2)$$

其中: $x_l(t)$ 为 $x(t)$ 的复包络, f_c 为载频, φ_0 为初始相位, T 为符号周期, $q(t)$ 为成形脉冲, θ_n 为相位调制信息, $\theta_n \in \{2\pi(m-1)/M\}, m=1,2,\dots,M$ 。

文献[5,6]给出了 MPSK 信号循环谱的一般形式如下:

当 $M=2$ 时, BPSK 信号的循环谱为

$$S_x^\alpha(f) = \begin{cases} \frac{1}{4T} \left[Q(f-f_c + \frac{\alpha}{2}) \cdot Q^*(f-f_c - \frac{\alpha}{2}) + Q(f+f_c + \frac{\alpha}{2}) \cdot Q^*(f+f_c - \frac{\alpha}{2}) \right] & \alpha = \frac{n}{T} \\ \frac{1}{4T} \left[e^{j2\varphi_0} Q(f-f_c + \frac{\alpha}{2}) \cdot Q^*(f+f_c - \frac{\alpha}{2}) + e^{-j2\varphi_0} Q(f+f_c + \frac{\alpha}{2}) \cdot Q^*(f-f_c - \frac{\alpha}{2}) \right] & \alpha = \pm 2f_c + \frac{n}{T} \end{cases} \quad (3)$$

收稿日期: 2012-10-30; 修回日期: 2012-12-19 基金项目: 国家科技重大专项基金资助项目(2010ZX03006-002, 2011ZX03005-003-03)

作者简介: 王蒙(1989-), 男, 河南周口人, 硕士研究生, 主要研究方向为分布式调制识别与参数估计(wang-meng06@163.com); 汪伟(1989-), 男, 安徽合肥人, 硕士研究生, 主要研究方向为多传感器协同信号检测与识别; 于宏毅(1963-), 男, 内蒙古呼和浩特人, 教授, 博导, 主要研究方向为通信中的信号处理; 胡赞鹏(1978-), 男, 江西南昌人, 副教授, 硕导, 主要研究方向为无线通信、无线传感器网络等。

当 $M \geq 4$ 时, MPSK 信号的循环谱为

$$S_x^\alpha(f) = \frac{1}{4T} \begin{bmatrix} Q(f-f_c + \frac{\alpha}{2}) \cdot Q^*(f-f_c - \frac{\alpha}{2}) + \\ Q(f+f_c + \frac{\alpha}{2}) \cdot Q^*(f+f_c - \frac{\alpha}{2}) \end{bmatrix}, \alpha = \frac{n}{T} \quad (4)$$

其中: $Q(f)$ 为成形脉冲 $q(t)$ 的傅里叶变换, 当 $q(t)$ 为矩形脉冲时, $Q(f) = \frac{\sin(\pi f T)}{\pi f}$ 。

对所有的 MPSK 信号, 循环谱 $f=f_c$ 的 α 截面为

$$|S_x^\alpha(f=f_c)| = \begin{cases} \frac{|Q(\alpha/2)|^2}{4T} & \alpha = 0, \pm \frac{1}{T} \\ 0 & \alpha = \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可知, MPSK 信号循环谱的 $f=f_c$ 截面仅在循环频率 $\alpha=0, \pm \frac{1}{T}$ 处有非零值, $\alpha=0$ 为最大值, $\alpha = \pm \frac{1}{T}$ 为次大值。

由于高斯白噪声不具有循环平稳性, 其循环谱仅在 $\alpha=0$ 时有非零值, 其余循环频率处均为零, 则可通过搜索信号 $f=f_c$ 截面上最大值和次大值的间距来估计 MPSK 信号的码元速率。

以上是理想的无限长序列情况下 MPSK 信号的循环谱特征。由于循环相关函数是对信号的非线性变换, 在观察数据长度有限时会产生明显的色噪声, 影响循环频率域谱线特征的提取。在低信噪比情况下背景色噪声对谱线特征提取的影响尤为明显, 此时单纯地使用某个循环谱截面提取谱线特征变得困难。PCA 变换通过子空间投影可以去除原始特征中的相关性, 通过舍去方差最小的那部分投影部分消除背景色噪声对循环谱特征的影响, 因此使得循环谱特征更加明显, 抗噪声性能提高。鉴于 PCA 变换的以上优点, 本文提出利用 PCA 变换的方法抑制循环谱中的背景色噪声, 以提高码元速率估计精度, 增强估计稳定性。

2 基于 PCA 的码元速率估计方案

2.1 信号循环谱特征主分量分析

PCA 是一种正交线性变换。它将原始特征投影到一个正交子空间中, 得到的新特征之间互不相关。新特征依方差从大到小排序之后, 舍去累积比重小于阈值的部分特征, 保留下来的特征即为主分量, 从而达到降维的目的。由于主分量是原始特征在最小均方误差意义下的最佳逼近, 因此 PCA 是一种最小均方误差意义下的最佳线性变换^[17]。

原始特征向量为 $\mathbf{S}_x = [s_{f_1}, s_{f_2}, \dots, s_{f_n}]^T$, 对于每个频率 f_i , $s_{f_i} = [s_{f_i}^{\alpha_1}, s_{f_i}^{\alpha_2}, \dots, s_{f_i}^{\alpha_N}]^T (i=1, 2, \dots, n)$ 。 $\mathbf{S}_x$ 的协方差矩阵 $\mathbf{C}_{ss}$ 的特征值为 $\{\lambda_i | i=1, 2, \dots, n\}$, 其中 $m (m < n)$ 个最大的特征值对应的特征向量 $\{\mathbf{u}_i | (i=1, 2, \dots, m)$ 组成了一个特征子空间 U^m , 将 $\mathbf{S}_x$ 投影到 U^m 中, 得到 m 个主分量 $\{p_i | (i=1, 2, \dots, m)$ 。其中, $p_i = \mathbf{u}_i^T \mathbf{S}_x (i=1, 2, \dots, m)$ 。

PCA 变换的核心是对原始特征向量 $\mathbf{S}_x$ 的协方差矩阵 $\mathbf{C}_{ss}$ 作特征分解, 可得

$$\mathbf{C}_{ss} = \mathbf{U} \mathbf{\Lambda} \mathbf{U}^T \quad (6)$$

其中, $\mathbf{C}_{ss} = E[(\mathbf{S}_x - E[\mathbf{S}_x])(\mathbf{S}_x - E[\mathbf{S}_x])^T]$, 特征值对角阵 $\mathbf{\Lambda} = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$, $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_n$, 对应的特征向量为 $\mathbf{U} = [\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_n]$ 。特征向量集合 $\{\mathbf{u}_i | (i=1, 2, \dots, n)$ 组成了协方差矩阵 $\mathbf{C}_{ss}$ 的特征子空间的一组正交基。

将原始特征向量 $\mathbf{S}_x$ 向特征子空间 U^m 中投影后得到新特征 $\hat{\mathbf{S}}_x$, 则有

$$\hat{\mathbf{S}}_x = \mathbf{U}^T \mathbf{S}_x \quad (7)$$

其中: $\hat{\mathbf{S}}_x = [\hat{s}_{f_1}, \hat{s}_{f_2}, \dots, \hat{s}_{f_n}]^T$, 新特征 $\hat{s}_{f_n}$ 即为主分量 p_n , 其方差即为对应的特征值^[17]。新特征中方差最大的特征即为第一主分量, 方差次大的为第二主分量, 余下的特征以此类推^[18]。

2.2 码元速率估计方案

基于以上有关 MPSK 信号循环谱特征和主分量分析的内容, 码元速率估计算法设计如下:

a) 计算 MPSK 信号的循环谱 $f = [f_c - \Delta f, \dots, f_c, \dots, f_c + \Delta f]$ 截面上循环频率 $\alpha \geq 0$ 的部分, 得到原始特征向量 $\mathbf{S}_x = [s_{f_1}, s_{f_2}, \dots, s_{f_n}]^T$ 。

b) 对原始特征向量 $\mathbf{S}_x$ 作 PCA 变换, 得到新的特征向量 $\hat{\mathbf{S}}_x$, 提取其中的第一主分量 $\hat{s}_{f_1}$ 作为码元速率估计的截面。

c) 在 $\hat{s}_{f_1}$ 截面上搜索最大值位置 I_1 和次大值位置 I_2 。

d) 计算 $\hat{f}_b = |I_1 - I_2| \cdot f_{sm}$ 作为码元速率的估计值。其中: f_{sm} 为频率分辨率, $f_{sm} = f_s/N$, f_s 为采样频率, N 为采样点数。

2.3 算法性能分析

由文献[19]可知, 信号循环谱均值平方和噪声循环谱估计方差比值有如下近似关系式:

$$\frac{E^2 \{ |S_x^\alpha(f)_{\Delta f}| \}}{\text{var} \{ |S_x^\alpha(f)_{\Delta f}| \}} \propto \Delta t \cdot \Delta B \cdot C_x^\alpha(f) \cdot \frac{S_x(f + \alpha/2) S_x(f - \alpha/2)}{S_n(f + \alpha/2) S_n(f - \alpha/2)} \quad (8)$$

其中: Δt 为信号采样时间, ΔB 为平滑窗频域宽度, $S_x(f)$ 和 $S_n(f)$ 为信号和噪声的功率谱, $C_x^\alpha(f)$ 为谱相干系数。其定义为

$$C_x^\alpha(f) = \frac{S_x(f)}{\sqrt{S_x^0(f + \alpha/2) S_x^0(f - \alpha/2)}} \quad (9)$$

由式(8)可知, 当输入信噪比较低时, 可以通过增加信号采样时间 Δt 的方法来提高信号与噪声循环谱特征的比值, 以实现可靠估计。

3 仿真性能分析

在高斯白噪声环境下对 MPSK 信号码元速率估计算法进行性能仿真。

仿真测试 1 信号 $f=f_c$ 的 α 截面与第一主分量的 α 截面比较

仿真条件: 采样点数为 4 096 点, 码元速率为 1 MHz, 载波频率为 2 MHz, 采样频率为 8 MHz, 频率平滑窗点数为 128。

图 1 为信号循环谱 PCA 变换前 $f=f_c$ 的 α 截面, 图 2 为信号循环谱 PCA 变换后第一主分量的 α 截面。其中 $\alpha = \pm 1$ 处的谱线对应信号码元速率 f_b , 两谱线间即为背景色噪声。由图 1、2 结果对比可知, 信号循环谱经过 PCA 变换后, 第一主分量中的背景色噪声得到抑制, $\alpha = \pm 1$ 处的谱线在第一主分量的 α 截面中更加明显。

仿真测试 2 本文算法与文献[13]算法估计性能比较

仿真条件: 码元速率为 1 MHz, 载波频率为 2 MHz, 采样频率为 8 MHz, 采样点数 4 096 点, 频率平滑窗点数为 128, 使用平方根升余弦成形滤波器, 滚降系数 0.3, 信噪比 $-5 \sim 15$ dB, 进行 2 000 次蒙特卡罗仿真。

图 3、4 分别为两种算法归一化均方误差和归一化估计方差的比较图。文献[13]中使用循环谱 $f=f_c$ 的 α 截面估计信号码元速率的方法是一种被广泛采用的算法, 为方便研究,

在本文中称之为 α 截面法。由图3.4可知,当信噪比高于5 dB时,本文算法明显优于 α 截面法;当信噪比低于5 dB时,随着信噪比的降低,本文算法的性能与 α 截面法逐渐接近。这是因为低信噪比情况下循环谱截面受噪声影响大,不利于谱峰特征的提取。

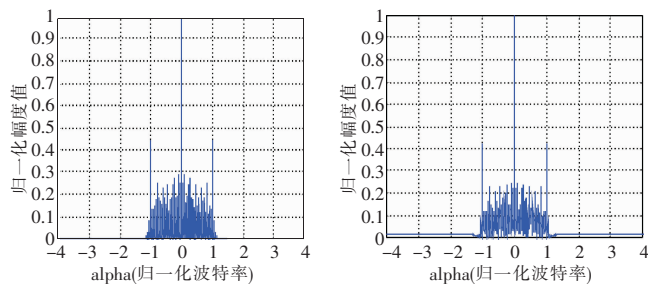
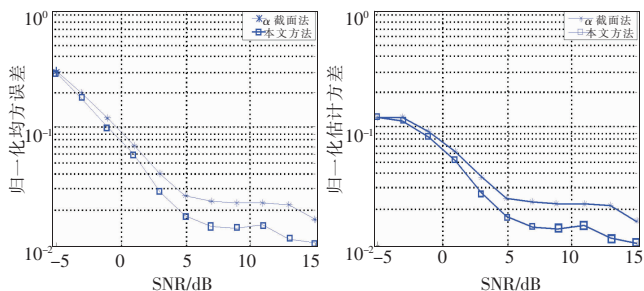
图1 $f=f_c$ 的 α 截面图2 第一主分量的 α 截面

图3 两种算法归一化均方误差比较

图4 两种算法归一化估计方差比较

仿真测试3 本文算法在不同滚降系数下估计性能比较

仿真条件:码元速率为1 MHz,载波频率为2 MHz,采样频率为8 MHz,采样点数4096点,频率平滑窗点数为128,使用平方根升余弦成形滤波器,滚降系数0.3~0.9,信噪比-5 dB~15 dB,进行2 000次蒙特卡罗仿真。

图5、6分别为本文算法归一化均方误差和归一化估计方差在不同平方根升余弦滚降系数下的比较图。由图5、6可知,随着滚降系数的减小,本文算法的归一化均方误差和归一化估计方差均变大。这是因为随着滚降系数的减小,信号的剩余带宽^[13]也在减小,导致 α 截面上对应码元速率处的谱线幅度降低,谱线特征更容易受到背景色噪声的影响,从而降低了估计精度。由仿真结果可知,当滚降系数为0.3以上,信噪比大于5 dB时,本文算法的归一化均方误差在1%以下。

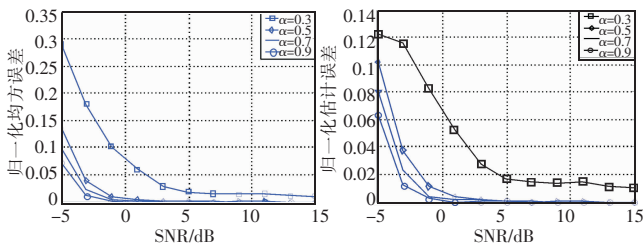


图5 本文算法归一化均方误差 图6 本文算法归一化估计方差

仿真测试4 本文算法在不同采样时间 Δt 下估计性能比较

仿真条件:码元速率为1 MHz,载波频率为2 MHz,采样频率为8 MHz,采样时间 Δt 分别为256 μ s和512 μ s,频率平滑窗点数为128,使用平方根升余弦成形滤波器,滚降系数0.3,信噪比-5~15 dB,进行2 000次蒙特卡罗仿真。

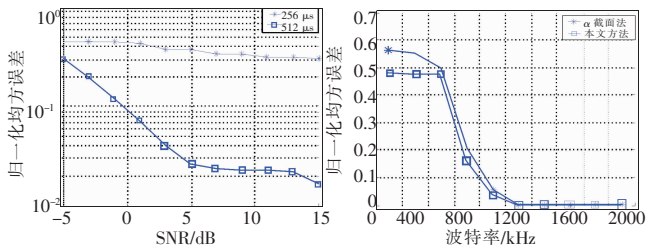
图7为本文算法在不同采样时间 Δt 下码元速率估计性能的比较图。由图7可知,增加采样时间 Δt 后,码元速率估计性能

能得到提高。这与2.3节中关于采样时间对估计性能的影响分析一致。

仿真测试5 本文算法与 α 截面法在不同码元速率 R_s 下估计性能比较

仿真条件:SNR=5 dB,码元速率范围为[200 kHz 2 MHz],载波频率为2 MHz,采样频率为8 MHz,采样点数4 096点,频率平滑窗点数为128,使用平方根升余弦成形滤波器,滚降系数0.3,进行2 000次蒙特卡罗仿真。

图8为本文算法与 α 截面法在不同码元速率 R_s 情况下估计性能的比较图。由图8可知,随着码元速率的增大,本文算法的归一化均方误差逐渐下降。这是因为码元速率增大后,信号采样时间 Δt 增加,从而提高了估计性能。

图7 不同采样时间 Δt 时归一化均方误差图8 不同码元速率 R_s 时归一化均方误差

算法时间复杂度分析:本文算法与原算法时间复杂度比较

对于给定的数据长度 N 和窗长 M ,原算法中计算循环谱 α 截面的实数乘法次数为 $2MN+N$;本文算法的实数乘法次数为 $2MN+N+mN$ 。其中原始特征向量 S_x 的协方差矩阵为 C_{ss} , m 为对 C_{ss} 进行PCA变换后剩余的维数,也就是保留的主分量个数。

由上述分析可知,PCA变换使得算法时间复杂度有所增加,增长程度为

$$\Delta = mN \quad (10)$$

式(10)说明算法时间复杂度的增长取决于PCA变换后保留的主分量的个数 m ,而且PCA变换前后时间复杂度都是 $O(N)$ 的。

仿真条件:信噪比-5 dB,码元速率为1 MHz,载波频率为2 MHz,采样频率为8 MHz,频率平滑窗点数为128,使用平方根升余弦成形滤波器,滚降系数0.3,PCA变换后保留第一主分量提取特征谱线位置,进行2 000次蒙特卡罗仿真。

仿真环境为Windows XP操作系统下的32位MATLAB 7.9软件,硬件配置为Intel® Pentium® Dual E2180 2 GHz、2 GB内存的联想台式机。表1给出两种算法时间复杂度的仿真对比。

表1 两种算法时间复杂度

算法	FFT点数		
	2048	4096	8192
原算法/ms	695	1532	3392
本文算法/ms	698	1538	3405.2

由表1结果可知,与原算法相比,本文算法并没有明显增加算法的时间复杂度,两种算法的时间复杂度仍然是同一个数量级的,与理论分析结论一致。

4 结束语

本文针对有限数据条件下信号循环谱的谱线特征受到背景色噪声干扰的问题,提出了基于主分量分析(PCA)的循环谱

特征码元速率估计方法,有效抑制了背景色噪声对谱线特征提取的影响。算法通过对原始循环谱特征的 PCA 变换,提取变换后第一主分量中的谱线特征进行码元速率估计,与原算法相比提高了估计精度和稳定性,其时间复杂度与原算法具有相同的数量级。仿真表明,对原始特征进行 PCA 变换后,MPSK 信号码元速率的估计精度得到提高,估计方差更小,估计值更加准确且稳定。

本文算法在较高信噪比时估计精度较高,在较低信噪比时估计精度下降,低信噪比时与直接提取循环谱截面特征进行码元速率估计的方法相比性能提高有限。分析原因在于循环谱截面特征在低信噪比情况下受噪声影响较大,不利于谱峰特征提取,造成估计精度下降。考虑寻找新的特征以克服低信噪比的影响可以作为进一步研究的内容。

参考文献:

- [1] 杨水旺. 数字中频接收机关键技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.
- [2] GARDNER W A, BROWN W A, CHEN C K. Spectral correlation of modulated signals, part II: digital modulation[J]. *IEEE Trans on Communications*, 1987, 35(6): 595-601.
- [3] GARDNER W A. Measurement of spectral correlation[J]. *IEEE Trans on ASSP*, 1986, 34(5): 1111-1123.
- [4] GARDNER W A. The spectral correlation theory of cyclostationary time-series[J]. *Signal Processing*, 1986, 11(4): 13-36.
- [5] VUCIC D, OBRADOVIC M. Spectral correlation of PSK signals[J]. *Nis Yugoslavia*, 1999, 13(15): 273-276.
- [6] 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.
- [7] TIAN Zhi, TAFESSE Y, SADLER B M. Cyclic feature detection with sub-Nyquist sampling for wideband spectrum sensing[J]. *Selected Topics in Signal Processing*, 2012, 6(1): 58-69.
- [8] MAZET L, LOUBATON P H. Cyclic correlation based symbol rate estimation[C]//Proc of Conference Record of the 23th Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers. 1999:1008 - 1012.
- [9] 刘世刚. 基于循环相关的符号速率盲估计[J]. *信号处理*, 2004, 20(4): 356-359.
- [10] 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: 自然科学版*, 2006, 33(6): 892-895.
- [11] 张仔兵, 李立萍, 肖先赐. MPSK 信号的循环谱检测及码元速率估计[J]. *系统工程与电子技术*, 2005, 27(5): 803-806.
- [12] 史建锋, 朱良学, 冯辉. 基于循环谱包络的 BPSK 码元速率估计算法研究[J]. *系统工程与电子技术*, 2007, 29(2): 186-188.
- [13] 谢然. 一种基于循环谱的 MPSK 信号符号速率估计方法[J]. *计算机应用研究*, 2011, 28(6): 2294-2296.
- [14] 刘鹭航, 周云生. 基于循环谱的相位编码信号调制参数估计[J]. *遥测遥控*, 2009, 30(3): 47-53.
- [15] 赵冰, 罗丰, 吴顺君. 相位编码信号的谱相关分析与调制参数估计[J]. *雷达与对抗*, 2005(3): 34-37.
- [16] 刘双平, 翔刚, 金梁. 一种抑制符号速率估计背景色噪声的非线性滤波算法[J]. *电子学报*, 2007, 35(1): 95-99.
- [17] 陆明泉. 多信号的调制识别技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2008.
- [18] HE Fang-ming, YIN Ya-feng, ZHOU Lei. Principal component analysis of cyclic spectrum features in automatic modulation recognition[C]//Proc of Military Communications Conference. 2010:1737-1742.
- [19] CHEN C K, GARDNER W A. Signal-selective time-difference-of-arrival estimative environments, part II: algorithms and performance[J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 1992, 40(5): 1185-1197.
- [1] 杨水旺. 数字中频接收机关键技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.
- [2] GARDNER W A, BROWN W A, CHEN C K. Spectral correlation of modulated signals, part II: digital modulation[J]. *IEEE Trans on Communications*, 1987, 35(6): 595-601.
- [3] GARDNER W A. Measurement of spectral correlation[J]. *IEEE Trans on ASSP*, 1986, 34(5): 1111-1123.
- [4] GARDNER W A. The spectral correlation theory of cyclostationary time-series[J]. *Signal Processing*, 1986, 11(4): 13-36.
- [5] VUCIC D, OBRADOVIC M. Spectral correlation of PSK signals[J]. *Nis Yugoslavia*, 1999, 13(15): 273-276.
- [6] 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.
- [7] TIAN Zhi, TAFESSE Y, SADLER B M. Cyclic feature detection with
- [4] ABRY P, VEITCH D. Wavelet analysis of long range dependent traffic[J]. *IEEE Trans on Infor Theory*, 1998, 44(1): 2-15.
- [5] 任勤益, 王汝传, 王海艳. 基于自相似检测 DDoS 攻击的小波分析方法[J]. *通信学报*, 2006, 27(5): 6-11.
- [6] GARCIA R C, SADUKU M N O, CANNADY J D. WAID: wavelet analysis intrusion detection, circuits and system[C]//Proc of the 45th Midwest Symposium. 2002:688-691.
- [7] BORGNAT P, DAWAELE G, FUKUDA K, et al. Seven years and one day: sketching the evolution of Internet traffic[C]//Proc of the 28th Conference on Computer Communications. [S. l.]: IEEE Press, 2009: 711-719.
- [8] LI Mu-hai, LI Ming. A new approach for detecting DDoS attacks based on wavelet analysis[C]//Proc of the 2nd International Congress on Image and Signal Processing. 2009:1-5.
- [9] CHEN Yang-quan, SUN Rong-tao, ZHOU An-hong. An improved Hurst parameter estimator based on fractional Fourier transform[J]. *Telecommunication Systems*, 2009, 43(3/4): 197-206.
- [10] SUN Rong-tao, CHEN Yang-quan, ZAVERI N, et al. Local analysis of long-range dependence based on fractional Fourier transform[C]//Proc of IEEE Mountain Workshop on Adaptive and Learning Systems. 2006:13-18.
- [11] 高波, 张钦宇, 梁永生. 基于 EMD 及 ARMA 的自相似网络流量预测[J]. *通信学报*, 2011, 32(4): 47-56.
- [12] GUPTA H, RIBEIRO V J, MAHANTI A. A longitudinal study of small-time scaling behavior of Internet traffic[C]//Proc of the 9th IFIP TC6 International Conference on Networking. Berlin: Springer-Verlag, 2010: 83-95.

(上接第 1785 页)对于骨干网流量,本文采用 FRFT 进行估计,验证了骨干网流量的自相似性。而第三次估计 Hurst 指数为 0.91,验证了异常导致网络流量具有非自相似性,同时证明了本检测方法可以有效检测网络异常。

4 结束语

基于传统 Hurst 参数分析方法估计 Hurst 指数精度较低的问题,本文提出了一种基于 FRFT 估计 Hurst 参数来检测异常流量的方法,通过 FRFT 估计网络流量的 Hurst 指数,并根据 Hurst 指数变化检测异常。实验结果表明:该方法具有较高的估计精度,估计不受序列的平稳性影响,且可以准确地检测异常。FRFT 方法由于使用 FFT 变换,方法的计算时间随之上升,如何提高估计算法的效率,将是下一步研究的重点。

参考文献:

- [1] LELAND W E, TAQQU M S, WILLINGER W, et al. On the self-similar nature of Ethernet traffic (extended version)[J]. *IEEE/ACM Trans on Networking*, 1994, 2(1): 1-15.
- [2] GIORGI G, NARDUZZI C. A study of measurement-based traffic models for network diagnostics[J]. *IEEE Trans on Instrumentation and Measurement*, 2008, 57(8): 1642-1650.
- [3] LI M, LIM S C, HUB J, et al. Towards describing multi-fractality of traffic using local hurst function[C]//Proc of the 7th International Conference on Computational Science. 2007:1012-1020.