基于 FRFT 自相似参数估计的异常流量检测方法*

冶晓隆，兰巨龙，黄万伟
（国家数字交换系统工程技术研究中心，郑州 450002）

摘　要：针对传统异常流量检测方法检测精度较低，Hurst 指数估计受估计序列尺度的影响，提出了基于分数阶傅里叶变换（FRFT）估计 Hurst 指数的方法。在此基础上，实现了基于 Hurst 指数变化的异常检测，有效解决了方法实现过程中 FRFT 最佳估计的分数阶阶数选择及 Hurst 参数求解的关键问题。实验表明，基于 FRFT 的估计不受序列非平稳性影响，对 Hurst 指数估计具有较高的估计精度，并且可以准确地检测网络异常。

关键词：自相似；分数阶傅里叶变换；小波变换；异常检测
中图分类号：TP393.08　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1001-3695(2013)06-1783-03
doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.06.047

Anomaly traffic detection using Hurst estimation based on FRFT

YE Xiao-long, LAN Ju-long, HUANG Wan-wei
(*National Digital Switching System Engineering Technological R&D Center*, *Zhengzhou* 450002, *China*)

Abstract: Since traditional abnormal detection methods have poor performance, and Hurst parameter estimation was affected by non-stationary traffic, this paper designed the FRFT estimation method. On that basis, it implemented the abnormal detection method based on Hurst parameter variation. In addition, it resolved key issues of choice of suitable fractional order and calculation of Hurst. The experimental results show that FRFT estimation method is not affect by non-stationary traffic, which has better performance on Hurst estimation, and FRFT detection method identify abnormal traffic accurately.

Key words: self-similarity; FRFT(fractional Fourier transform); wavelet transform; abnormal detection

0　引言

网络异常给网络的正常运行带来了极大的危害。根据 CNCERT 互联网安全威胁报告显示，仅 2012 年 2 月就有约 900 万个终端感染网络病毒，各种网络攻击、异常操作等异常行为严重影响了互联网的安全运行。同时各种网络异常占用了大量网络带宽，导致整个网络性能下降。因此，及时、准确地检测网络异常，对提高网络安全和网络性能具有重要的意义。

通过对网络流量统计分析来检测网络异常是目前异常流量检测中研究的热点。Leland 等人[1]在 1994 年对不同网络进行分析，发现网络流量具有统计自相似性。其后大量研究表明正常网络流量具有自相似性[2,3]，异常流量会对网络的自相似性产生影响。因而，根据自相似参数 Hurst 值的变化可以有效地检测网络异常。Hurst 指数估计方法有聚合方差法、R/S 法、Whittle 法等，这些方法需要计算的样本较大，对计算能力要求较高，估计精度较低，随着网络带宽增长越来越快，已经难以有效地检测网络异常。Abry 等人[4]将小波分析方法应用于网络流量自相似参数估计中，小波方法成为了 Hurst 指数分析的主要方法。文献[5]提出了基于小波分解法检测 DDoS 攻击的方法，Garcia 等人[6]利用小波分析检测短时异常流量。Borgnat 等人[7]采用鲁棒性小波估计算法，证明骨干网流量 Hurst 指数范围为[0.5,0.75]。文献[8]分析发现小波方法对 Hurst 参数估计受估计序列的平稳性影响，检测精度与选择合适的小波函数和时间尺度有密切的关系[9]，否则在实际检测中算法的检测精度不高。Sun 等人[10]采用了分数阶傅里叶变换（FRFT）估计 Hurst 指数，并验证了 FRFT 方法具有较好的估计精确性，给网络流量分析提供了一种新的思路。

针对传统方法对 Hurst 指数估计精度较低的问题，本文提出了一种基于分数阶傅里叶变换（FRFT）的异常流量检测方法。通过对分形高斯白噪声和真实流量序列进行分析，证明了利用 FRFT 估计自相似参数估计精度高，对非平稳序列估计具有较好的鲁棒性。在根据 FRFT 对 Hurst 参数估计的基础上，提出了基于 FRFT 的异常流量检测方法，实验表明该方法能够准确地检测异常流量。

1　网络流量自相似性

自相似性指序列的局部结构与总体结构相比具有某种程度的一致性，从流量分析的角度上直观的解释是：在不同时间尺度上，网络流量对时间的分布图看起来是相似的。传统的网络模型一般是基于泊松过程的，认为若间隔时间 s 足够大，当前时刻 t 和过去时间 $t-s$ 的业务量是不相关的，即短相关模型。后续研究发现这种模型和实际网络行为特性不符[11]，真实网络流量具有统计自相似性。采用具有长相关的模型（如自相似模型）来研究网络流量能够更加有效地刻画实际网络流量。

广义平稳的离散随机过程 X，自相关函数为 $r(k)$，对于其 m

收稿日期：2012-11-15；**修回日期**：2012-12-30　　**基金项目**：国家“973”计划重点资助项目（2012CB315901）；国家“863”计划资助项目（2011AA01A103）

作者简介：冶晓隆（1987-），男，宁夏固原人，硕士研究生，主要研究方向为异常流量检测（yexiaolong_2854@163.com）；兰巨龙（1953-），男，博导，主要研究方向为宽带信息网络；黄万伟（1979-），男，博士，主要研究方向为路由与交换技术.

阶聚集过程 X^m,自相关函数为 $r^m(k)$,如果对于所有的 m,均有

$$r^m(k) = r(k) \sim \alpha k^{-\beta}, 0 < \beta < 1, k \to \infty \tag{1}$$

称 X 为精确二阶自相似过程。其自相关函数满足

$$r(k) = H(2H-1)k^{2H-2}, k \to \infty \tag{2}$$

其中:$H = 1 - \beta/2$ 为自相似参数,又称 H 为 Hurst 参数,H 是描述自相似特性的唯一参数,取值范围为[0.5,1],H 越大,自相似程度越高。由于 $\sum_k r(k) = \infty$,所以也称为长相关,表示当 k 很大时,序列仍然具有较强的相关性。

2 异常流量检测方法

FRFT 作为一种时频分析工具,是傅里叶变换理论的完善,其在时频平面沿坐标轴变换,给处理相关问题带来了新的思路。利用 FRFT 估计 Hurst 指数是利用公式变换得到 FRFT 变换和小波变换的相互关系,其原理都是利用能量的分析方法。

2.1 FRFT 估计理论

定义信号 $f(x)$ 的 a 阶 FRFT 变换为

$$f_a(\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} K_a(\xi, x) f(x) \mathrm{d}x \tag{3}$$

通过 $g(j) = f_a(j/\sec \alpha_F)$ 将 FRFT 变换表示为 j 的函数,变换参数可以得到

$$WT_f(j,k) = \frac{\exp[i\pi j^2 \sin^2 \alpha_F]}{C(\alpha_F) |\tan \alpha_F|^{\frac{1}{4}}} g(j) \tag{4}$$

式(4)建立了小波和分数阶傅里叶变换之间的联系,其中 $WT_f(j,k)$ 为连续小波变换。结合式(4)和 Mallat 算法得到 FRFT 频谱的对数尺度:

$$G(j) = \log_2(E[g^2(j)]) = \log_2\left(\left(\frac{C(\alpha_F) |\tan \alpha_F|^{\frac{1}{4}}}{\exp[i\pi j^2 \sin^2 \alpha_F]} \right)^2 E[d_{j,k}^2(f)] \right) \tag{5}$$

其中:$d_{j,k}(f)$ 为函数 $f(u)$ 的小波系数,则 $E[d_{j,k}^2(f)]$ 为在尺度 j 的小波系数的平均能量。通过帕斯瓦尔德定理和变换参数可得

$$E[d_{j,k}^2(f)] = \int_R |\hat{\psi}(\eta)|^2 s_Y(\eta/2^j) \mathrm{d}\eta \tag{6}$$

即小波系数 $d_{j,k}(f)$ 的平均功率 ε_j 和平稳序列 $f(t)$ 谱密度的关系满足式(6),对于大尺度 j,函数 $s_Y(\eta/2^j)(\eta \in R)$ 可看做谱密度 $s_Y(\eta)$ 在频谱为 0 位置的缩放,由此可得

当 $j \to \infty$ 时,$E[d_{j,k}^2(Y)] \sim cf \int_R |\hat{\psi}(\eta)|^2 |\eta/2^j|^{-\alpha} \mathrm{d}\eta = c_f C 2^{j\alpha}$。根据公式 $H = (1+\alpha)/2$ 和式(6)得到

$$G(j) = (2H-1)j + \mathrm{const} \tag{7}$$

通过 j 和 $G(j)$ 画图,利用线性拟合得到以 j 为自变量,以 $G(j)$ 为函数的直线,斜率即为 $(2H-1)$,H 为 Hurst 指数的值。

2.2 Hurst 指数的 FRFT 估计方法

基于 FRFT 估计法求解 Hurst 参数主要包括两个关键步骤:a)FRFT 分数阶阶数选择;b)自相似参数估计。具体实现方法如下所示:

FRFT 的分数阶阶数 $a(a \in [0,1])$ 对 Hurst 参数的估计有着重要的影响,本文利用实验求取最佳的 a,首先生成随机高斯白噪声,设置高斯白噪声的 Hurst 参数为 0.5。设置 $a = 1$,使用 FRFT 方法对随机高斯白噪声进行多次估计,典型的估计结果如表 1 所示。

表 1 $a = 1$ 时 FRFT 的高斯白噪声 Hurst 估计值

Method	$H(1)$	$H(2)$	$H(3)$	$H(4)$
FRFT	0.531	0.529	0.463	0.476
error/%	6.2	5.8	7.4	4.8

由表 1 可知,$a = 1$ 时,使用 FRFT 估计 Hurst 指数误差较大。为了求取最佳分数阶阶数,取 a 从 0.1 ~ 1.0 间隔为 0.1 的 10 个值分别进行估计,估计结果和实际 Hurst 求差值,最终得到阶数—差值图,如图 1 所示。其中白噪声使用 MATLAB 产生,样本为 1 000 000。

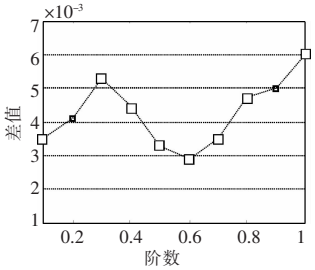

图 1 FRFT 估计差值随阶数变化

图 1 为 FRFT 估计差值随阶数变化曲线,x 轴为 FRFT 分数阶阶数,y 轴为估计差值。在 $a = 0.6$ 时估计差值最小,所以使用 FRFT 的阶数 0.6 作为 Hurst 参数的估计阶数,进行再次估计,FRFT 估计的 Hurst 参数的值为 0.509 77,具有较小的估计误差。由此得到 $a = 0.6$ 是 FRFT 估计方法的最佳分数阶阶数。基于 MATLAB 工具可以有效地实现 FRFT 估计的 Hurst 参数提取。具体的 Hurst 参数提取方法如下:

a)对进入的网络报文进行特征提取,得到要分析的流量特征序列。

b)选择 FRFT 的最佳分数阶阶数,对流量特征序列进行 FRFT 变换。

c)求 FRFT 变换后序列的能量谱 $g(j)$,根据式(5)得到 $G(j)$。

d)对得到的矩阵[j,$G(j)$]拟合直线,确定斜率 α,并由 $H = (1+\alpha)/2$ 确定 Hurst 参数的值。

2.3 基于 FRFT 估计的异常检测方法

假设有离散时间序列 $X = \{X_k, k \in 1, \cdots, \infty\}$ 和 $Y = \{Y_k, k \in 1, \cdots, \infty\}$,其中 X 为正常网络流量,假设有异常流量 N,则 X 和 N 相互独立,令 $Y = X + N$,则 Y 为有异常的网络流量。对于一个自相似过程 H,当发生异常时,$H_Y - H_X$ 变化明显,所以可以利用 Hurst 参数的变化来检测异常。同时这种方法不需要数据包的特征匹配,具有较好的检测实时性。

通过分析 Hurst 参数值的变化来检测异常,首先根据 FRFT 方法估计当前时刻的自相似参数 H_n,设前一次估计的自相似参数为 H_p,定义两者的差 $\Delta H = H_n - H_p$,即 Hurst 参数值的变化。if $|\Delta H| > \overline{H}$,即判定发生异常。在基于 Hurst 指数变化检测异常时,阈值的设置对于算法的性能有很大的影响。若阈值设置太小,虽然提高了检测准确性,但同时带来了误报概率增加的问题;若阈值设置太大,检测准确性降低。综合衡量检测率和误报率,本文设置 $\overline{H} = 0.2$。如果检测到异常,则将当前估计的 Hurst 参数设为 H_p,并重新开始检测。

3 实验结果及分析

为了验证 FRFT 的 Hurst 指数估计方法的精确性,基于设计的算法,用 MATLAB 生成分形高斯白噪声(FGN)序列进行仿真验证,同时采用真实网络流量数据进行实时估计,通过与小波分析法进行比较进一步分析 FRFT 估计算法的可靠性。同时为了验证 FRFT 估计检测方法能够有效检测异常流量,截

取了一段具有异常流量的 MAWI 网络数据包,数据包长度为 7 000,使用本文提出的异常检测方法进行验证。

3.1　分形高斯白噪声估计

分形高斯白噪声(FGN)因其符合实际网络流量的自相似特性及简单参数描述而成为自相似网络流量建模的主要工具。本文采用功率谱 FFT 快速算法生成 Hurst 值从 0.01 ~ 1.00 间隔为 0.01 的 100 组分形高斯白噪声序列用于仿真测试,如图 2 所示。图 2 为 $H=0.7$ 的分形高斯白噪声序列,x 轴为 FGN 序列的样本数,y 轴为 FGN 序列的幅值。

本文采用小波方法和 FRFT 方法估计具有不同 Hurst 值的分形高斯白噪声,并比较两者结果,结果如图 3 所示。x 轴为 FGN 序列实际的 Hurst 值,y 轴为 FRFT、小波对 Hurst 指数的估计值。以实际的估计值 $y=x$ 作为参考。由图可知,FRFT 估计十分接近理想的估计,其估计精度优于小波方法。对于$0.5<H<1$ 表示长相关,FRFT 给出了理想的估计,说明了 FRFT 估计法可以有效估计自相似网络流量。在 Hurst 值小于 0.5 时,估计值比理想值大,说明了估计方法存在误差。

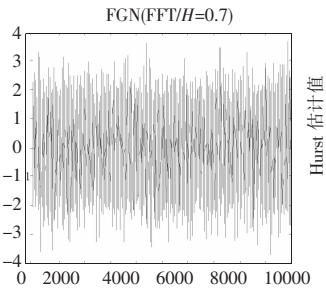

图 2　FFT 法产生的 FGN 序列(H=0.7)

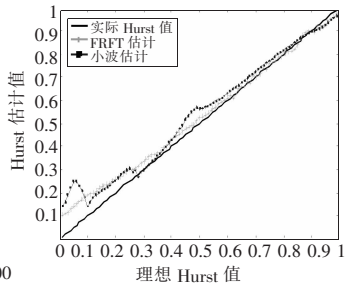

图 3　FGN 序列 Hurst 参数估计(FGN-FFT)

对于存在的估计偏差,可能与 FGN 的产生算法有关,为了进一步证明估计的可靠性,采用随机中点置换法(RMD)生成另一组 FGN 序列(图 4)进行比较。利用小波方法和 FRFT 方法分别进行估计,估计结果如图 5 所示。结果表明 FRFT 对 Hurst 指数的估计值更加接近实际值,证明 FRFT 估计方法的估计精度优于小波估计方法。

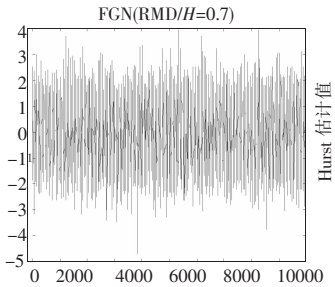

图 4　RMD 法产生的 FGN 序列(H=0.7)

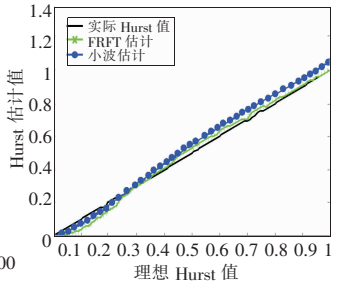

图 5　FGN 序列 Hurst 参数估计(FGN-RMD)

3.2　实际网络流量估计

FGN 序列由于其具有理想的自相似性,难以完全描述真实网络流量。为了进一步说明本方法的可靠性,本文采用 Bell 实验室实测的三组数据集(BC-Oct89Ext, BC-Oct89 和 BC-pAug89)作为实验数据,该数据集在正常网络流量中具有自相似特性,得到广泛的实验应用。由于网络流量在大时间尺度表现出自相似特性,在较小的时间尺度(< 100 ms)表现出多重分形特性,因此本文将数据处理到 1 s、5 s 和 10 s 时间尺度上,利用本算法和小波方法对 Hurst 参数的估计值进行比较。从表 2 中可以看出,小波方法对于不同时间尺度估计时估计值变化较大,而 FRFT 估计方法估计偏差较小,说明本估计方法不易受时间尺度变化影响。

表 2　FRFT 和小波方法对实际网络数据的估计值

估计值	BC-Oct89Ext			BC-Oct89			BC-pAug89		
	1 s	5 s	10 s	1 s	5 s	10 s	1 s	5 s	10 s
小波估计值	0.89	0.91	0.93	0.83	0.87	0.94	0.82	0.85	0.86
FRFT 估计值	0.91	0.91	0.92	0.92	0.93	0.93	0.84	0.85	0.86

由于网络流量随着时间尺度增大,在大时间尺度上可以看做是平稳序列,而在小时间尺度流量的变化明显,认为是非平稳序列,因此可以从时间序列的平稳性影响估计算法的精确度来解释小波法对 Hurst 指数的估计精度受时间尺度的影响的原因。多数 Hurst 参数估计方法是建立在时间序列是平稳的这个约束基础上,而对于非平稳时间序列,利用小波预测结果不佳。图 6 和 7 是对实际网络流量在尺度 J 上的小波频谱和 FRFT 谱,Hurst 值大约为 0.89。

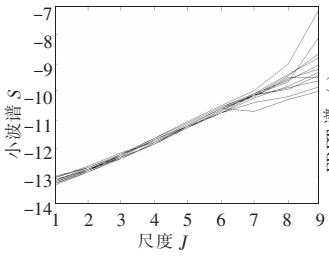

图 6　网络流量在尺度 J 的小波谱

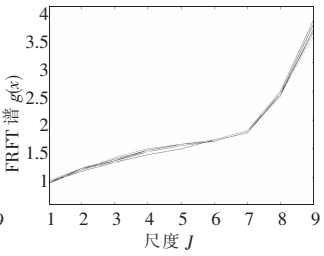

图 7　网络流量在尺度 J 的 FRFT 谱

如图 6 所示,在尺度 $J>7$ 时,小波谱产生了明显的变化,说明小波方法易受估计尺度的影响。对于非平稳序列如对于均值突然变化的序列会造成陡峭的小波频谱,从而影响对 Hurst 参数估计准确性。图 7 中 FRFT 谱在尺度 J 变化时几乎没有变化,FRFT 谱对于非平稳序列估计表现出了良好的鲁棒性。

3.3　异常检测分析

本文截取 MAWI 数据集作为实验数据。MAWI 是日本到美国网络链路的实际网络数据,由于其具有自相似性[12],得到广泛实验应用。MAWI 在 2003 年 8 月 ~2004 年 4 月网络存在异常(洪泛攻击),本文截取 2004 年 3 月部分数据进行仿真。图 8 显示为 MAWI 网络流量,在 time 为 70 时流量波形产生脉冲,表示短时间大量流量到达,判断为异常(洪泛攻击)。利用 FRFT 方法进行估计,如图 9 所示。利用本文提出的检测方法,对当前时刻估计的 Hurst 指数和前一时刻 Hurst 指数相比较,如果大于 0.2 则判断为异常。对于第三个估计点,其 Hurst 指数相比较前一次估计大 0.23,则判断为异常。

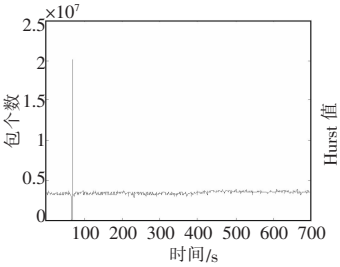

图 8　MAWI_2004 网络流量

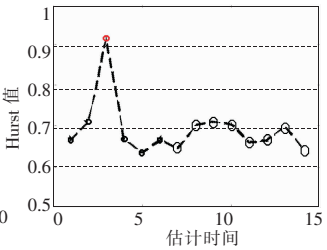

图 9　FRFT 自相似参数估计

对于图 8 采用的估计检测方法,选择时间间隔为 30 的流量进行一次估计,异常发生在时间为 70。图 9 显示了第三次估计检测出异常,即估计的网络流量序列区间为 time ∈ [60, 90],说明本算法可以准确地检测出异常。

(下转第 1789 页)

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,闻翔,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.

(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.

[4] ABRY P, VEITCH D. Wavelet analysis of long range dependent traffic [J]. IEEE Trans on Infor Theory,1998,44(1):2-15.

[5] 任勋益,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 Fouier 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.