

不同滤波方法在去趋势波动分析中去噪的应用比较*

何文平^{1)†} 吴琼²⁾ 成海英³⁾ 张文⁴⁾

1) (国家气候中心, 北京 100081)

2) (国家卫星气象中心, 北京 10086)

3) (盐城工学院基础教学部, 盐城 224002)

4) (南京邮电大学通达学院, 南京 210003)

(2010年5月4日收到; 2010年5月13日收到修改稿)

研究了连续噪声和尖峰噪声对去趋势波动分析的影响, 发现噪声的存在使得双对数曲线在尺度较小时发生了“转折”现象. 针对这一问题, 文中采用三种不同滤波方法对理想时间序列进行了实验, 结果表明, 多级 Vondrak 滤波得到的高频序列与真实噪声序列无论是在强度还是在演变趋势上都展现出惊人的一致性, 低频滤波序列的去趋势波动分析结果与真实信号十分接近, 多级 Vondrak 滤波基本上能够消除由于噪声所引起的“转折”现象, 而且这一研究结果对于滤波周期阈值的依赖性并不太大. 多点滑动加权平均滤波虽然能够在一定程度上减轻噪声对于去趋势波动的影响, 但不能从根本上消除由于噪声所引起的“转折”现象. 快速傅里叶滤波在选择合适的滤波周期阈值时, 能够基本消除噪声对去趋势波动分析的影响, 但是由于其滤波结果对于滤波周期阈值的依赖较大, 在实际应用中滤波周期阈值的选取比较困难. 因此, 多级 Vondrak 滤波是消除噪声对去趋势波动分析结果影响的一种有效的途径.

关键词: 多级 Vondrak 滤波, 去趋势波动分析, 多点滑动加权平均滤波, 快速傅里叶滤波

PACS: 92.60.Wc

1. 引言

气象观测中不可避免地存在观测误差, 通常所获得的气象资料仅仅是描述实际大气的一个可能的近似值, 而实际大气的真正状态永远不可能被精确地记录下来, 由此产生的误差可能会对观测资料的分析产生一些不良影响, 甚至有可能导致分析结果大相径庭^[1-3]. 文中主要考虑了两种常见的观测误差: 一种是连续性高斯白噪声, 这种误差只要有观测或测量存在就无法避免; 另外一种为尖峰噪声. 产生尖峰噪声的原因有多种, 其可在通信系统的电气开关和继电器改变状态时产生, 又如当气象电子通信设备由于线路自身产生了随机信号或电磁干扰时, 观测设备输出信号可能出现误码、雷达信号失真等现象^[4]. 近年来, 去趋势波动分析方法^[5-7] (detrended fluctuation analysis, DFA) 作为一种标度分析工具, 能够很好地处理非平稳数据, 通

过 DFA 方法获得的标度指数较传统的方法更为可靠. 因此, 该方法已经得到了广泛的应用^[8-17]. 但在实际应用过程中发现, 噪声对于 DFA 分析结果具有较大的影响^[3, 18], 因此, 研究噪声对于 DFA 分析结果的影响以及如何从含噪时间序列中准确地揭示其内在的标度规律非常重要.

鉴于此, 本文研究了连续性高斯白噪声和尖峰噪声对 DFA 分析结果的影响, 发现噪声的存在使得双对数曲线发生了“转折”现象, 而且噪声越强, 发生转折现象的尺度越大. 对于样本量较大的时间序列而言, 噪声对于 DFA 分析结果的影响很容易得到解决, 例如可以在 DFA 分析过程中对双对数曲线进行拟合时, 不考虑受噪声影响的小尺度, 即增大拟合的窗口尺度. 但对于样本量较小的时间序列而言, 这一方法显然不具备实用性, 由于样本量本身就很短, 在拟合双对数曲线时的数据很少, 不可能完全忽略噪声所影响的窗口尺度. 因此, 必须选择一种合适的方法减轻或消除噪声对于 DFA 分析结果的影响, 以便能够保

* 国家自然科学基金 (批准号: 40905034, 4087504, 40930952) 和公益性行业 (气象) 科研专项基金 (批准号: GYHY200806005, GYHY200906019) 资助的课题.

† E-mail: wenping_he@163.com

证所获取的标度指数的可靠性.

考虑到相对于真实信号而言,噪声通常属于一个快变过程,本文将多级 Vondrak 滤波、多点滑动加权平均滤波、快速傅里叶滤波等^[19-21]三种低通滤波器应用于 DFA 待分析时间序列的预处理中,滤除高频噪声,保留低频信号.理想的实验结果表明,经过多级 Vondrak 滤波处理后的低频滤波序列能够基本消除在 DFA 分析过程中由于噪声所引起的“转折”现象,能够很好地对含噪序列进行降噪,相对于快速傅里叶滤波和多点滑动加权平均滤波,无论是在滤波后低频率序列的 DFA 分析结果,还是在滤波周期阈值的选取上,多级 Vondrak 滤波都具有明显的优势.在实际应用中可以将多级 Vondrak 滤波与 DFA 方法结合使用,有助于更为准确地从含噪时间序列中挖掘信号中潜在的标度性质.

2. 方 法

2.1. 多级 Vondrak 滤波

Vondrak 滤波^[19, 20]的实质是一个无相位畸变的低通数字滤波器,郑大伟和董大南^[22]将 Vondrak 滤波做多级联组合,提出采用形式为

$$W = C[I - V^N]^M \quad (1)$$

的多级 Vondrak 滤波器,实现信号的窄带滤波器.(1)式中 C 为实常数, N, M 为正整数, I 为恒等滤波器, V 为 Vondrak 滤波器.黄坤仪和周雄^[23]从理论上证实了 Vondrak 滤波器的频率响应为

$$A(f, \varepsilon) = \frac{\varepsilon}{\varepsilon + (2\pi f)^6}, \quad (2)$$

ε 为平滑因子, f 为谐波频率.

该方法通过使用滤波频率带狭窄的多级滤波器来实现高频和低频的分离,不同于传统的滤波方法,多级 Vondrak 滤波器的一个显著特点在于通过其滤波后的时间序列长度与原始序列完全相同,这一优点使得其非常适合于实际资料的分析. Wang 等^[24]和 Shi 等^[25, 26]先后用该方法对海平面温度 30 年以上慢变过程的平均值进行了分离,得到了较好的结果; Zhang 和 Wan^[27]利用该方法将青藏高原古里雅冰芯冰川累积量分为 10 年以上和 10 年以下两个尺度,发现近百年来,20 世纪 60 年代初以及 70 年代末 80 年代初的两次气候突变是高频和低频共同作用的结果.

本文中使用的另外两种滤波方法——快速傅里叶滤波和多点滑动加权平均滤波的具体算法可

以参考文献[21].

2.2. 去趋势波动分析法^[5-7]

对于时间序列 $\{x_i, i = 1, N\}$, 首先计算序列的累积量 y_n ,

$$y_n = \sum_{i=1}^n \Delta x_i, \quad (3)$$

然后将累积量序列 $\{y_i, i = 1, N\}$ 分成不重合的等长度为 s 的子序列.对于 p 阶 DFA 分析过程(简记为 DFA_p),在每一段长度为 s 的累积量子序列中,对其局部趋势采用 p 阶多项式进行拟合,去掉局部拟合趋势后可得到波动序列 $\{y_s(i), i = 1, N\}$.最后,平均所有各段波动函数可得到累积量序列的均方波动函数

$$F_p(s) = \left\langle \frac{1}{s[N/s]} \sum_{i=1}^{s[N/s]} y_s^2(i) \right\rangle^{1/2}, \quad (4)$$

$\langle \cdot \rangle$ 表示对所有的窗口取平均.若 $F_p(s)$ 与窗口长度 s 存在标度关系,则有

$$F_p(s) \sim s^\gamma, \quad (5)$$

其中 γ 为标度指数,可通过线性拟合波动函数 $F_p(s)$ 和窗口长度 s 的双对数曲线得到.

3. 数值实验

3.1. 噪声对 DFA 分析的影响

本文研究了不同强度的连续性噪声对 DFA 分析的影响,理想序列由 Lorenz 方程^[28-31]的 x 分量产生,序列长度为 1000 个单位积分时间(图 1(a)),采用四阶定步长 Rung-Kutta 法求解,积分步长为 0.01.图 1(b)给出了信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)为 1 dB 的连续性高斯白噪声序列,图 1(c)则为未受污染的真实信号(图 1(a))与高斯白噪声(图 1(b))叠加得到的合成序列.采用 DFA 方法分别对图 1(a)中所示的原序列及其与噪声的合成序列(图 1(c))进行了标度分析,结果表明, Lorenz 方程的 x 分量波动函数 $F(s)$ 与窗口尺度大小 s 的双对数曲线近似地服从直线分布,这表明其具有标度性质,但噪声的存在导致双对数曲线发生了“转折”现象,即在拟合窗口尺度小于某个临界值 s_x 时,合成序列的双对数曲线相对于原序列明显上升,而在窗口尺度大于 s_x 后,合成序列与原序列的双对数曲线基本重合.这一结果表明,噪声的存在使得小尺度上的波动函数明显增大,严重影响了小尺度上的

DFA 分析,如果不考虑序列中所存在的噪声,直接对其双对数曲线进行线性拟合,得到的标度指数显然要小于真实信号,因此不能够正确地反映原序列的标度性质.由图 1(d)可知,随着噪声强度的增大,双对数曲线发生“转折”的临界窗口尺度 s_x 随之增大,且其在小于 s_x 时的双对数曲线有一个近似垂直上升的趋势.为了考察噪声对于不同阶 DFA 分析的影响,本文采用 DFA3 方法对理想序列进行了类似于 DFA2 的分析(图 1(e)),发现对于同等强度的噪

声,DFA3 分析结果所受的影响较 DFA2 更大,即其双对数曲线发生“转折”的临界尺度 s_x 相对于低阶 DFA2 明显增大,这主要是由于高阶 DFA 分析对于序列中的趋势成分移除得更彻底,导致去趋势后的残余序列中的真实信号与噪声的信噪比要明显的小于低阶 DFA2 分析.对更高阶 DFA 分析的研究得到了类似结果.因此,在实际应用 DFA 分析的过程中,应注意同等强度的噪声对不同阶 DFA 分析的不同影响这一特点.

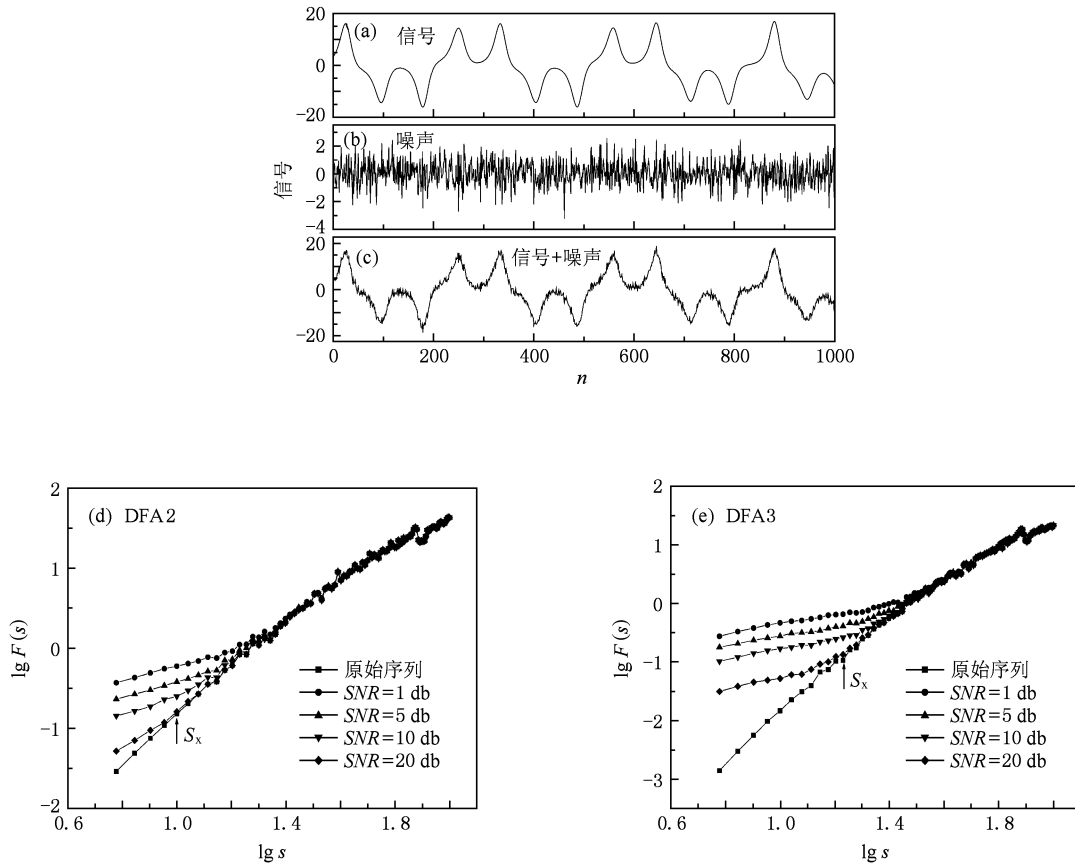


图 1 连续性高斯白噪声对 DFA 分析的影响 (a) Lorenz 模型产生的理想序列,不含噪声,(b) 信噪比 SNR = 1 dB 的连续性高斯白噪声,(c) 信号(a)和噪声(b)的叠加序列,(d) 不同强度高斯白噪声对 DFA2 分析的影响,(e) 不同强度高斯白噪声对 DFA3 分析的影响

在实际观测中,往往会由于一些不可预料的原因导致观测资料中存在尖峰噪声.为此,研究了尖峰噪声对 DFA 分析结果的影响.理想序列仍然采用图 1(a),图 2(a)展示了尖峰噪声的位置及其大小,含有尖峰噪声的合成序列已在图 2(b)中给出.很容易发现,尖峰噪声仅占理想序列长度的 6‰,因此,尖峰噪声的数量相对而言非常少.类似于连续噪声中的操作,采用不同阶 DFA 方法对含尖峰噪声的合成序列进行了标度分析,发现少量尖峰噪声对于低

阶 DFA 分析(如 DFA1, DFA2)的影响较小,但是其对于高阶的影响不容忽视.从图 2(c)可知,少量尖峰噪声对于 DFA3 分析的影响较大,其影响类似于连续性噪声,即导致双对数曲线在小尺度发生了转折现象.对比图 1(e)不难发现,这里考虑的少量尖峰噪声对于 DFA 分析结果的影响与信噪比为 20 dB 时的连续性高斯白噪声基本相当,因此,尖峰噪声对于 DFA 分析,尤其是 DFA3 及以上的高阶 DFA 分析的影响较大.

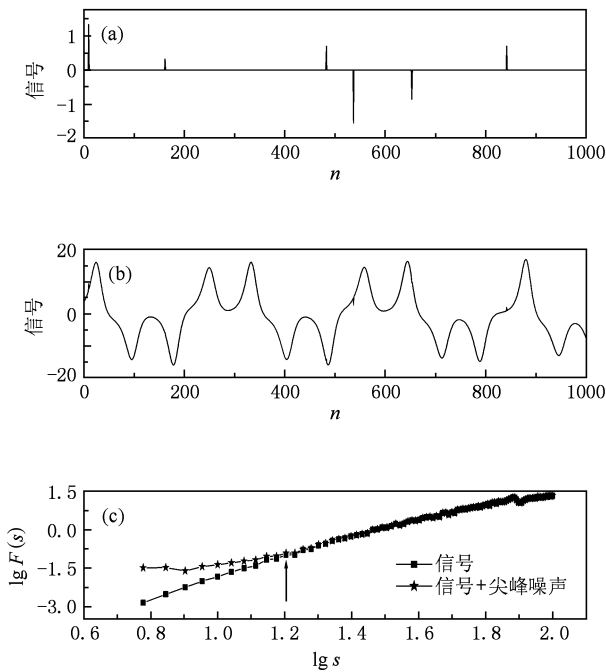


图2 尖峰噪声对 DFA 分析的影响 (a)尖峰噪声,(b)尖峰噪声和理想序列的叠加序列,(c)原序列和含噪序列的 DFA3 分析

由于连续性高斯白噪声以及少量尖峰噪声在小于某个临界尺度 s_x 时会导致双对数曲线发生“转折”现象,而且噪声越强,对 DFA 分析结果的影响越大,并且同等强度的噪声对不同阶 DFA 分析的影响程度各异.因此,在应用 DFA 进行标度分析的过程中,应根据实际情况选择合适的线性拟合区域,在资料长度允许的情况下,尽可能选择大一点的窗口尺度对双对数曲线进行拟合.但在实际应用过程中,由于观测资料长度的有限性,许多资料长度较短,不可能毫无限制地增大线性拟合的窗口尺度,在对于长度较短的时间序列进行 DFA 分析时,噪声对其结果的影响将不可避免.因此,亟需寻找减轻或消除噪声对 DFA 分析影响的有效方法.鉴于噪声(连续性噪声和尖峰噪声)通常变化较快,相对于真实的信号而言属于一个快变过程,而传统的滤波方法正是基于将待分析的时间序列分解成高频和低频序列,以此来对原序列进行降噪处理.因此在利用 DFA 分析的过程中,我们可以尝试采用各种不同类型的滤波方法来事先对时间序列进行降噪处理,以减轻或消除各类噪声对于 DFA 分析结果的影响.

3.2. 多级 Vondrak 滤波在 DFA 分析中的应用

为了检验多级 Vondrak 滤波是否能够有效地分离高频噪声和真实信号,本文利用其对图 1(c)中的

信号进行了滤波,高频滤波的滤波周期阈值 $ph = 8$,滤波后的高频噪声已由图 3(a)给出,从中不难发现,高频率序列的噪声强度及其变化范围与真实的噪声序列相当接近.为了更加清晰地考察滤波的效果,这里任意选了图 3(a)中的一段时间序列进行放大(图 3(b)),发现无论在噪声的强度,还是在噪声随时间的演变趋势上,多级 Vondrak 滤波得到的高频率序列与真实噪声均表现出惊人的一致性,虽然二者还存在着一些细微的差异,但由图 3(c)可知,对于低频率序列的 DFA 分析而言,滤波已经极大地减轻了高频噪声的影响,使得滤波后的 DFA 分析结果几乎与原序列的结果完全一致.因此对于 DFA 分析而言,经过多级 Vondrak 滤波得到的高频率序列与真实噪声之间的差异性基本上可以忽略不计.

一般而言,在实际应用过程中,多数情况下我们可能并不知道所分析时间序列中的噪声强弱及其在信号中的分布情况,故而在使用多级 Vondrak 滤波滤除高频信号时,并不能够准确地根据噪声的实际情况来确定滤波的周期阈值.我们期望滤除高频噪声后的低频率序列其 DFA 分析结果至少能够在一定的滤波周期阈值范围比较稳定,这一特点将使得在实际的操作中,可以十分方便地选择滤波周期的阈值,进而达到减轻或消除噪声对 DFA 分析结果的目的.因此,需要研究多级 Vondrak 滤波在减轻或消除噪声对于 DFA 分析结果的影响的稳定性.鉴于此,在不同滤波周期阈值情况下,本文对此进行了研究.图 3(d)为滤波周期阈值分别取 18, 28, 38 时, DFA 方法对各自低频率序列的分析结果,发现经过多级 Vondrak 滤波后低频率序列的双对数曲线中均不存在“转折”现象,且其双对数曲线与真实信号基本重合或平行.这表明经过多级 Vondrak 滤波后,待分析信号中的噪声强度已经极大地降低了.本文对滤波周期阈值在 8—38 之间时的情形进行了类似试验,发现多级 Vondrak 滤波均能够很好地降低噪声对 DFA 分析结果的影响.这意味着多级 Vondrak 滤波对于消除连续性噪声对 DFA 分析结果的影响具有很强的稳定性,而且经过多级 Vondrak 滤波后原始信号的标度特征得到了较好的保留,能够更为准确地反映信号中所包含的真实标度信息.

类似于连续性噪声,本文研究了多级 Vondrak 滤波在减轻或消除尖峰噪声对 DFA 分析结果影响中的应用.从图 4 中可以看出,在滤波周期阈值较小时,经过多级 Vondrak 滤波后得到的高频率序列与真实噪声的强度以及其所处的位置十分相符(见图 4

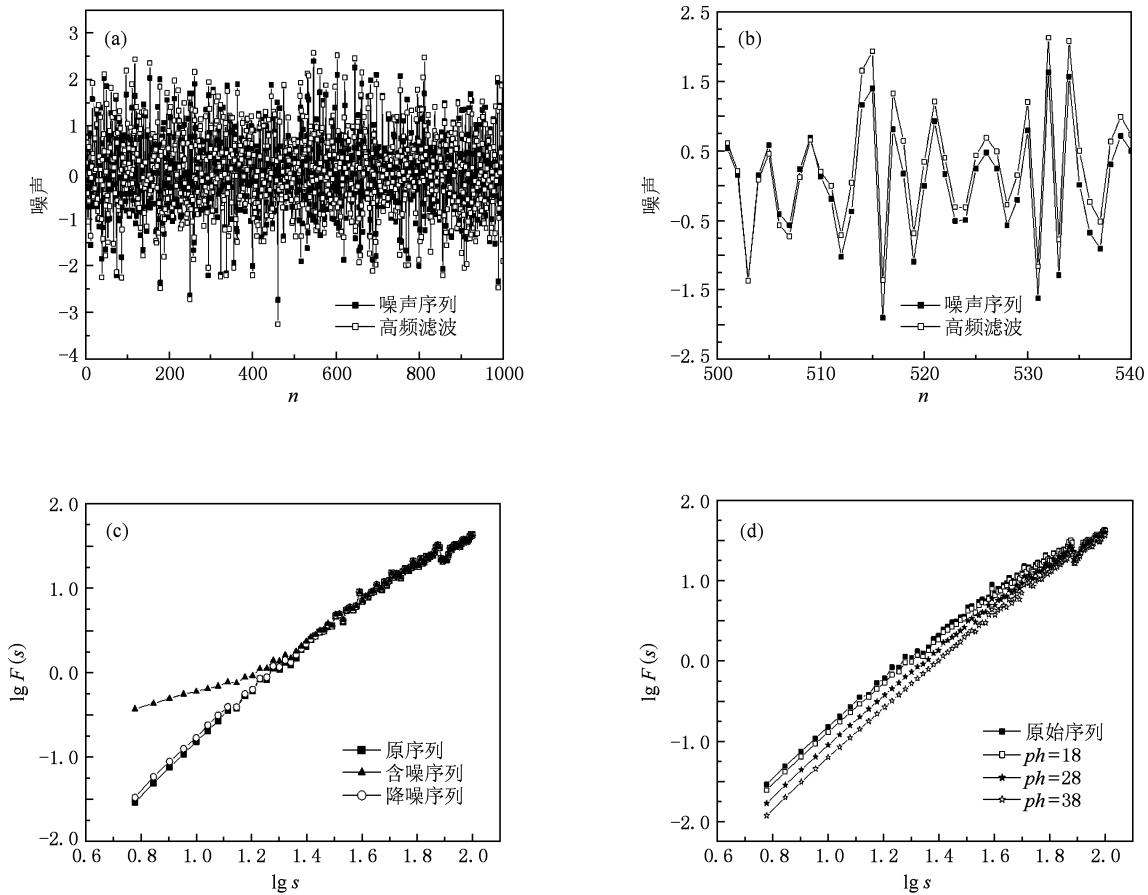


图3 强噪声情况下多级 Vondrak 滤波去噪对 DFA 分析的影响 (a) SNR = 1 dB 的强噪声序列和滤波后的高频序列; (b) (a) 中的局部放大区域; (c) 含噪序列和降噪后低频序列的 DFA2 分析, 滤波周期阈值 $ph = 8$; (d) 不同滤波周期阈值情形下, 低频序列的 DFA2 分析

(a) 和 (b)), 而当增大滤波周期阈值后, 经滤波得到的高频序列与原噪声序列的差异逐渐显著 (图 4 (c) 和 (d)), 但还能隐约发现尖峰噪声的踪影. 随后采用 DFA3 对各种不同周期阈值下的低频滤波进行了标度分析, 发现类似于图 2 (c) 中的“转折”现象消失了, 不同周期阈值下的多级 Vondrak 滤波均能够很好地减轻尖峰噪声对 DFA 分析结果的影响. 而且类似于连续噪声的情况, 随着周期阈值的增大, 低频滤波序列的双对数曲线近似地呈现垂直下移的趋势 (见图 4 (e)), 这表明尽管滤波周期阈值增大了, 但是低频滤波还是能够很好地保留原信号中的标度信息.

3.3. 多级 Vondrak 滤波与其他滤波方法的比较

以图 1 (c) 中的含噪序列为例对多级 Vondrak 滤波和其他滤波方法进行了比较. 首先对含噪序列采用多点滑动加权平均方法进行滤波, 随后利用

DFA3 对滤波后的序列进行了标度分析, 图 5 给出了其分析结果. 从图 5 中不难发现, 经过多点滑动加权平均后的确能够减轻噪声引起的“转折”现象, 而且随着滑动加权平均的数据个数的增加, 这种滤波的效果也更加显著. 但必须指出的是, 这种“滤波”减轻“转折”现象的效果并不会随着滑动加权平均数据个数的增加而变得越来越好, 大约在滑动加权平均的数据个数 $n = 25$ 以后, 再增加滑动加权平均数据的个数对于滤波的效果改善没有本质的差异. 多点滑动加权平均对于信号的平滑度高, 但对于数据平滑度的增大也使得其对噪声的敏感性降低, 因此, 该方法在减轻噪声对于 DFA 分析的影响效果有限, 不能够从根本上消除由于噪声所引起的“转折”现象. 同时, 我们也采用多点滑动平均 (等权重) 滤波对含噪序列进行了试验, 得到的结果没有本质的区别, 本文不再赘述.

快速傅里叶变换 (fast Fourier transformation,

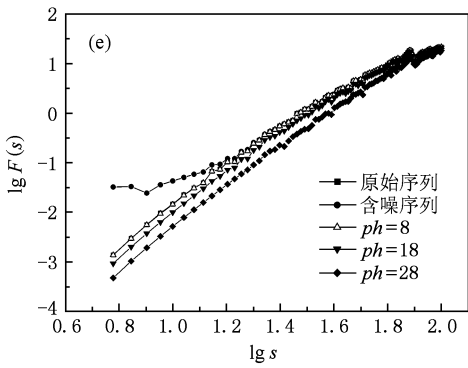
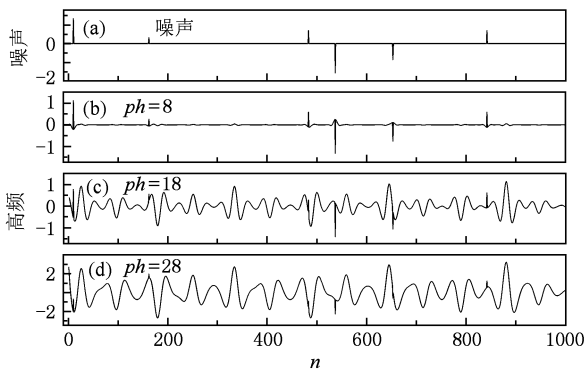


图4 多级 Vondrak 滤波在滤除尖峰噪声中的应用 (a)真实的尖峰噪声,(b)滤波周期阈值 $ph=8$,(c)滤波周期阈值 $ph=18$,(d)滤波周期阈值 $ph=28$,(e)不同滤波周期阈值下低频滤波的双对数曲线(DFA3)

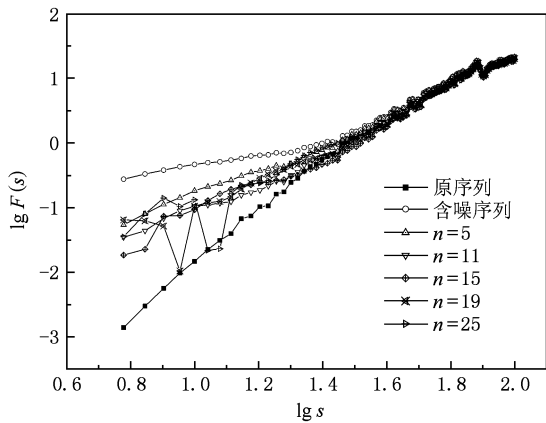


图5 多点滑动加权平均滤波去噪对 DFA 分析的影响 SNR = 1 dB

FFT)是一种常用的传统滤波方法,本文利用其对图1(c)中的序列进行去噪,并采用 DFA3 对去噪后的序列进行了标度分析(见图6(a)).结果表明,经过 FFT 滤波后的确能够使得由于噪声所引起的“转折”现象得到减轻,而且随着滤波周期阈值的加大,滤波对于 DFA3 准确提取原序列中内在的标度信息

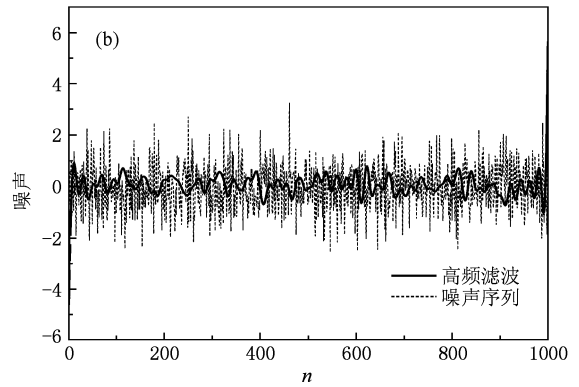
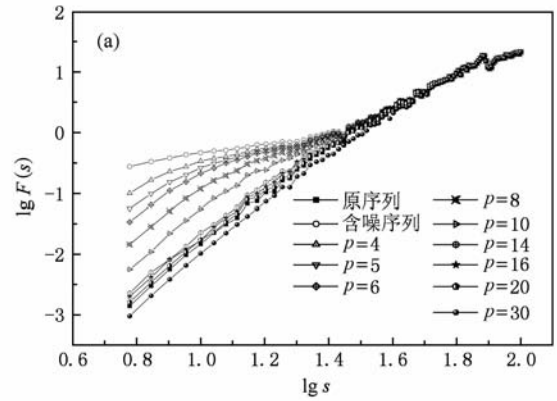


图6 FFT 滤波方法去噪对 DFA 分析的影响,SNR = 1 dB (a)不同周期阈值下,低频滤波后的双对数曲线(DFA3), p 为滤波周期阈值;(b) $p=20$ 时,高频滤波与真实噪声的演变图

更为有利,当滤波阈值约为 20 时,几乎可以完全消除噪声对于 DFA3 分析的影响.同多级 Vondrak 滤波的结果对比分析表明,FFT 方法完全消除噪声对于 DFA3 分析的影响所需的周期阈值要大得多,而且多级 Vondrak 滤波的结果对于滤波周期阈值的依赖性要明显小于 FFT 方法,即要想最大限度地减小噪声对于 DFA 分析的影响,多级 Vondrak 滤波更容易选择合适的滤波周期阈值.从 FFT 所分离出来的高频序列与实际噪声序列的对比分析可知(见图6(b)),尽管 FFT 在选择合适的滤波周期阈值时能够有效减轻甚至消除噪声对于 DFA 分析的影响,但整体而言,FFT 得到的高频序列的变化幅度要小于真实的噪声信号,而且在高频序列的两端存在强烈的边界效应,即在序列两端,高频序列中的变化幅度显著大于真实的噪声.

类似于对连续性噪声的分析,图7(a)给出不同滤波周期阈值下,FFT 在减轻或消除尖峰噪声对于 DFA3 分析的影响,从中可以发现,FFT 对于减轻尖峰噪声对于 DFA3 分析的影响确有作用,而且在滤

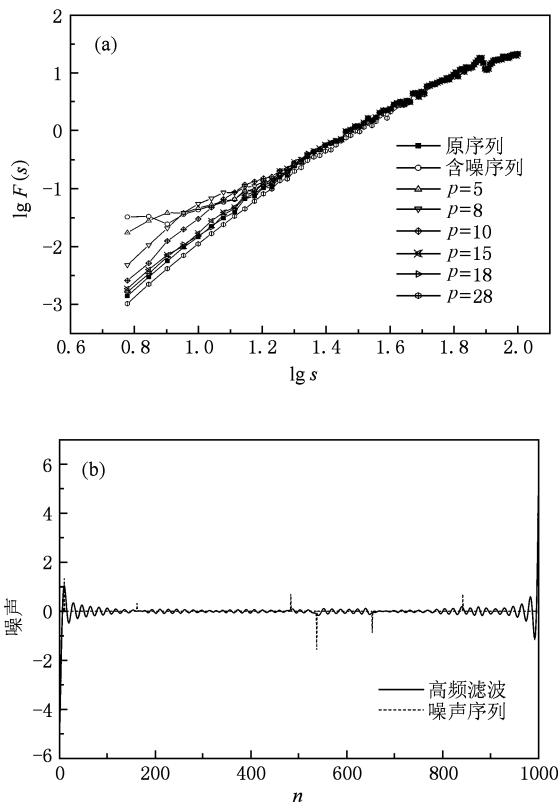


图7 FFT滤波方法去除尖峰噪声对DFA分析的影响 (a)不同周期阈值下,低频滤波后的双对数曲线(DFA3);(b)滤波周期阈值 $p=15$ 时,高频滤波与真实噪声的对比图

波阈值选择合适的情形下甚至能够几乎完全消除尖峰噪声对于DFA分析的影响.但与连续性噪声中存在的问题一样,FFT方法完全消除噪声对于DFA3分析的影响所需的周期阈值要明显大于多级Vondrak滤波.从图7(b)可知,尽管在一定情形下FFT能够近乎完全消除噪声对于DFA3分析的影响,但是FFT得到的高频序列与真实的尖峰噪声差异很大.反观多级Vondrak滤波不仅仅能够消除尖峰噪声的影响,而且还能够在一定程度上捕获尖峰噪声的出现时刻及其演变规律(图4).同样地,FFT滤波得到的高频序列两端存在明显的边界效应.

4. 结果与讨论

本文的研究结果表明,噪声会使得DFA分析的

双对数曲线在拟合尺度较小时发生“转折”现象,影响了准确地提取时间序列中的标度信息,特别是对于长度较短的序列这种影响更大;在利用滑动去趋势波动分析(moving detrended fluctuation analysis, MDFA)对时间序列进行动力学结构突变检测的过程中,通常由于所选择的子序列长度较短^[16,17],噪声对于标度分析的影响就显得尤为突出,因此在进行DFA和MDFA分析的过程中,需要事先对时间序列进行降噪.针对这一问题,本文采用多级Vondrak滤波分别对含有连续性噪声和少量尖峰噪声的理想序列进行了滤波试验,发现在滤波周期阈值较小时,经过多级Vondrak滤波后的高频序列与真实的噪声序列无论在噪声强度还是噪声的演变趋势上都表现出惊人的一致性,特别是其对于尖峰噪声能够准确地给出噪声的位置,且其强度与真实情况相仿.对比滤波前后信号的DFA分析结果发现,经过滤波后,低频序列的双对数曲线中的“转折”现象已经完全消失,与真实信号的双对数曲线几乎重合;增大滤波周期阈值后,虽然滤波后的高频部分与真实噪声之间的差异逐渐变大,但是在较大范围内,滤波周期阈值的改变并不会显著影响低频序列的DFA分析.

同传统的一些滤波方法的比较表明,多点滑动加权平均方法仅仅能够在一定程度上减轻噪声对于DFA分析的影响,但不能完全消除噪声的影响,其原因在于滑动加权平均方法仅仅能够使序列的演化更为平滑,滤波效果有限;FFT方法虽然对于减小噪声对于DFA分析的影响有利,甚至在选择合适的周期阈值时几乎能消除噪声对于DFA分析的影响,但对于同样的滤波效果,相对于多级Vondrak滤波,FFT分析中选取的滤波周期阈值明显偏大,而且FFT滤波得到的高频序列与真实的噪声序列差别很大,且在其两端存在明显的边界效应,而多级Vondrak滤波能够更为准确地从噪声序列中提取出真实的信号.这表明结合多级Vondrak滤波可以有效地降低噪声对于DFA分析的影响,而且明显优于传统的FFT,多点滑动加权平均等滤波方法.

[1] He W P, Feng G L, Dong W J, Li J P 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 969 (in Chinese) [何文平、封国林、董文杰、李建平 2006 物理学报 **55** 969]

[2] Du J 2002 *J. Appl. Meteor. Sin.* **13** 16 (in Chinese) [杜均 2002 应用气象学报 **13** 16]

[3] He W P 2008 *Ph. D. Dissertation* (Lanzhou: Lanzhou University)

- (in Chinese) [何文平 2008 博士学位论文(兰州:兰州大学)]
- [4] Zuo H J 2001 *Meteorology Journal of Hubei* **4** 29 (in Chinese) [左惠娟 2001 湖北气象 **4** 29]
- [5] Peng C K, Havlin S, Schwartz M, Stanley H E 1991 *Phys. Rev. A* **44** R2239
- [6] Peng C K, Buldyrev S V, Havlin S, Simons M, Stanley H E, Goldberger A L 1994 *Phys. Rev. E* **49** 1685
- [7] Peng C K, Havlin S, Goldberger A L 1995 *Chaos* **5** 82
- [8] Feng G L, Wang Q G, Hou W, Gong Z Q, Zhi R 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2853 (in Chinese) [封国林、王启光、侯威、龚志强、支蓉 2009 物理学报 **58** 2853]
- [9] Wang Q G, Hou W, Zheng Z H, Gao R 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6640 (in Chinese) [王启光、侯威、郑志海、高荣 2009 物理学报 **58** 6640]
- [10] Caballero R, Jewson S, Brix A 2002 *Clim. Res.* **21** 127
- [11] Eichner J F, Koscielny-Bunde E, Bunde A 2003 *Phys. Rev. E* **68** 046133-1
- [12] Fraedrich K, Blender R 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 108501
- [13] Govindan R B, Vyushin D, Bunde A, Brenner S, Havlin S, Schellnhuber H J 2000 *Phys. Rev. Lett.* **89** 028501
- [14] Govindan R B, Vyushin D, Brenner S, Bunder A, Havlin S, Schellnhuber H J 2001 *Physica A* **294** 239
- [15] Cao H X, Zheng Z F, Zhang X L, Xie Z, Pan J H 2007 *Chin. J. Geophys.* **50** 420 (in Chinese) [曹鸿兴、郑祚芳、张秀丽、谢庄、潘家华 2007 地球物理学报 **50** 420]
- [16] He W P, Feng G L, Wu Q, Wan S Q, Chou J F 2008 *Non. Proc. Geophys.* **15** 601
- [17] He W P, Wu Q, Zhang W, Wang Q G, Zhang Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2862 (in Chinese) [何文平、吴琼、张文、王启光、张勇 2009 物理学报 **58** 2862]
- [18] Chen Z, Ivanov P, Hu K, Stanley H E 2002 *Phys. Rev. E* **65** 041107
- [19] Vondrak J 1969 *Bull. Astron. Inst. Czech.* **20** 349
- [20] Vondrak J 1977 *Bull. Astron. Inst. Czech.* **28** 84
- [21] Yan H M, Zhong M, Zhu Y Z 2006 *J. Geode. Geody.* **26** 109 (in Chinese) [闫昊明、钟敏、朱耀仲 2006 大地测量与地球动力学 **26** 109]
- [22] Zheng D W, Dong D N 1986 *Acta Astro. Sin.* **27** 368 (in Chinese) [郑大伟、董大南 1986 天文学报 **27** 368]
- [23] Huang K Y, Zhou X 1981 *Acta Astro. Sin.* **22** 121 (in Chinese) [黄坤仪、周雄 1981 天文学报 **22** 121]
- [24] Wang X L, Ropelewski C F 1995 *J. Climate* **8** 1584
- [25] Shi N, Gu J Q, Yi Y M, Lin Z N 2005 *Chin. Phys.* **14** 844
- [26] Shi N, Yi Y M, Gu J Q, Xia D D 2006 *Chin. Phys.* **15** 2180
- [27] Zhang W, Wan S Q 2008 *Chin. Phys. B* **17** 2311
- [28] Lorenz E N 1963 *J. Atmos. Sci.* **20** 130
- [29] Feng G L, Dai X G, Wang A H 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 606 (in Chinese) [封国林、戴新刚、王爱慧 2001 物理学报 **50** 606]
- [30] Feng G L, Dong W J, Jia X J 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1181 (in Chinese) [封国林、董文杰、贾晓静 2002 物理学报 **51** 1181]
- [31] Feng G L, Dong W J, Gong Z Q, Hou W, Wan S Q, Zhi R 2006 *Nonlinear Theories and Methods on Spatial-Temporal Distribution of the Observational Data* (Beijing: Metrological Press) p17 (in Chinese) [封国林、董文杰、龚志强、侯威、万仕全、支蓉 2006 观测数据非线性时空分布理论和方法(北京:气象出版社)第17页]

Comparison of applications of different filter methods for de-noising detrended fluctuation analysis*

He Wen-Ping^{1)†} Wu Qiong²⁾ Cheng Hai-Ying³⁾ Zhang Wen⁴⁾

1) (National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

2) (National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

3) (Fundamental Education Department, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224002, China)

4) (Tongda College, Nanjing University of Post and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

(Received 4 May 2010; revised manuscript received 13 May 2010)

Abstract

We studied the effects of continuous noises and random spikes on detrended fluctuation analysis, and found that the noises lead to the appearance of crossovers in the double logarithm curves when the linear fitting scale was less than a characteristic scale s_x . To solve this problem, we use three kinds of filter methods, multi-stage Vondrak filter, N -point weighted moving average filter and fast Fourier filter, to filter high frequency from the analyzed time series. The results indicate that the evolution trend and intensity of high frequency series by multi-stage Vondrak filter is almost identical to those of real noises. Further investigation showed that multi-stage Vondrak filter can eliminate the phenomenon of crossover, and the DFA results of lowpass filtering time series are less dependent on the threshold of the filter periods. To some extent, N -points weighted moving average filter can partly eliminate the effect of noises on DFA, but can not completely eliminate the phenomenon of crossover caused by noises. Fast Fourier filter can almost totally eliminate the effect of noises on DFA when the period of filter adopts an appropriate value, but the filtering results have a stronger dependence on the period of filter, so it is difficult to select the period of filter in practical application. Therefore, comparatively speaking, multi-stage Vondrak filter is an effective measure to alleviate the effects of noises on the DFA results.

Keywords: multi-stage Vondrak filter, detrended fluctuation analysis, N -points weighted moving average filter, fast Fourier filter

PACS: 92.60.Wc

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 40905034, 40875040, 40930952) and the Special Scientific Research Fund of Meteorological Public Welfare Profession of China (Grant Nos. GYHY200806005, GYHY200906019).

† E-mail: wenping_he@163.com