

Вычисление размерностей временного ряда фотоотсчетов полученных при лазерном зондировании турбулентной трассы

Г. Н. Доля¹, Р. Э. Пашенко², А. Н. Скрипка¹

¹Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Украина,

²Харьковский университет Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба, Украина

The analysis of features by calculation of dimensions different methods is produced to estimate the fractals properties of the temporal rows got by laser sounding of turbulent atmosphere. It is shown the dimension of Hausdorf-Bezikovich. Is the most sensible dimension to define the moment of change of the state of gas thread, the most exactly. Some suggestions are mined-out on the choice of "window" and size of "jump" extent at treatment of initial temporal row by using the dimension of Hausdorf-Bezikovich.

1. Введение

Среди многочисленных применений лазеров важное место занимают методы лазерного дистанционного зондирования. Они широко применяются при экологическом мониторинге природной среды [1,2], для диагностики потоков жидкости и газов [3], при дистанционном зондировании параметров атмосферы [4], для раннего обнаружения загораний [5] и т.д. Традиционная схема лазерных устройств дистанционного зондирования включает в себя аппаратную часть и алгоритмы обработки полученной информации. Развитие и улучшение характеристик такого рода устройств подразумевает совершенствование обеих этих составляющих. Так, в частности, для определения закономерностей распространения лазерного излучения через турбулентную трассу широко используются как традиционные методы статистической обработки результатов измерений [1,3], так и современные методы, например, методы фрактального и вейвлет анализа [6,7].

Необходимо отметить, что турбулентность жидкости и газов исторически явилась одним из первых физических явлений, обративших на себя внимание исследователей фрактальных свойств природы [8,9]. С обстоятельным обобщением полученных в настоящее время результатов можно познакомиться, например, в [6]. Как известно, фрактальные свойства турбулентности проявляются в закономерностях пространственных характеристик изоповерхностей, а также в закономерностях хаотических временных рядов, полученных в результате лазерного дистанционного зондирования. Существует множество методов количественной оценки фрактальных свойств того или иного объекта или процесса. Целесообразность использования конкретного метода (метода расчета фрактальной размерности) зависит от характера решаемой задачи и требований к результату оценивания фрактальности. Такими требованиями, например, могут быть точность, оперативность, относительная величина изменения параметра при изменении степени турбулентности и т.д.

Скорость расчета различных фрактальных размерностей и реализация алгоритмов в реальном масштабе времени напрямую связаны с различной сложностью организации вычислительного процесса при определении фрактальных размерностей (арифметической сложностью алгоритмов). Кроме того, при обработке длинного временного ряда, каковым, как правило, является результат лазерного зондирования турбулентной трассы, на время анализа оказывает значительное влияние количество отсчетов в ряду и параметры алгоритма их просмотра, например, такие как размер “окна” и характер перемещения “окна” (“скользящее”, “скачущее”). Эти же параметры влияют и на качество анализа фрактальных свойств турбулентной атмосферы.

Целью данной работы являлся анализ особенностей различных методов вычисления размерностей при оценке фрактальных свойств временных рядов, полученных в результате лазерного зондирования турбулентной атмосферы.

2. Основная часть

Для получения временного ряда (рис.1) использовалась экспериментальная установка, подробное описание которой можно найти в [10]. Установка включала в себя гелий-неоновый лазер с коллимирующей оптикой, световозвращающее покрытие, и фотозлектронный умножитель (ФЭУ), выход которого был подключен к входу звуковой карты компьютера. Длина трассы составляла величину около 10 метров, на ней также устанавливался тепловентилятор для изменения степени турбулентности воздуха.

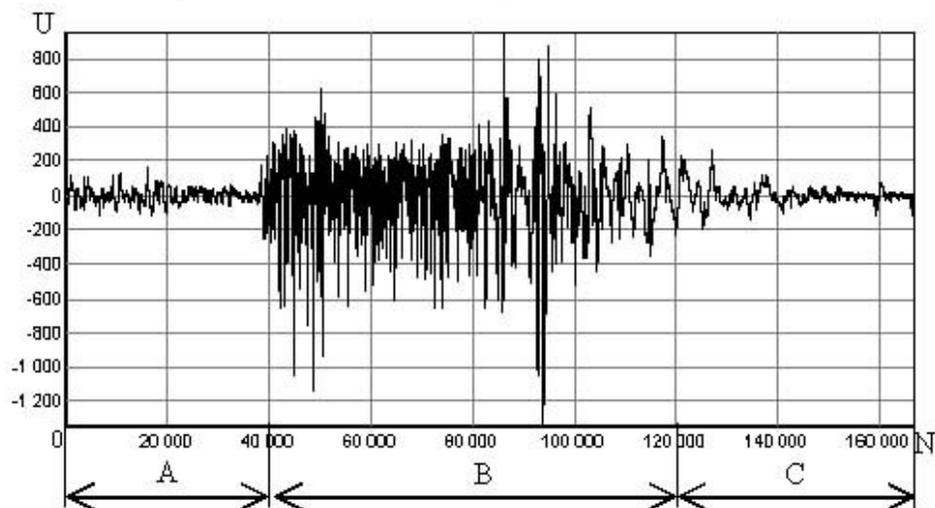


Рис.1. Исходный временной ряд

Временная реализация (переменная составляющая) зарегистрирована в формате wav-файла (48000-16-bit-Mono) и содержит три характерных участка. Участок А (отсчеты $N=0-40000$) продолжительностью около 0,8 секунд соответствует случаю отсутствия существенных турбулентных потоков на трассе распространения. Участок В (отсчеты $N=40000-120000$) продолжительностью 1,2 секунды характеризует изменение состояния

турбулентной трассы, возникавшее при помощи тепловентилятора. Заключительный участок С характеризует этап перехода в исходное состояние после выключения тепловентилятора.

Оценим эффективность различных методов вычисления фрактальных размерностей при анализе особенностей исходного временного ряда. Для обработки временного ряда будем использовать три вида размерностей, которые наиболее часто используются на практике: показатель Херста [12], размерность Хаусдорфа-Безиковича (емкостная размерность) [13] и корреляционная размерность [9]. Одной из главных целей сравнительного анализа фрактальных свойств временного ряда при использовании различных размерностей было определение наиболее чувствительного метода, позволяющего определить момент изменения состояния газового потока.

Так как на рассматриваемом временном интервале имели место участки с разной степенью турбулентности, то очевидно, для анализа целесообразно было применять метод «скачущего окна», сущность которого заключается в следующем [11]. Исходная выборка анализируется с помощью «окна» определенного размера (N_0), которое перемещается («скачет») с дискретностью в $M=kN_0$ элементов «окна», где k – коэффициент «скачка», т.е. первое положение «окна» содержит значения с 1-го до N_0 -го элемента выборки N , второе – с (kN_0+1) -го до $((kN_0+1)+N_0)$ -го, третье – с $(2kN_0+1)$ -го до $((2kN_0+1)+N_0)$ -го и т.д. Для каждого положения «окна» рассчитываются размерности различными методами. Результаты расчетов представляются в виде зависимости величины фрактальной размерности (ось Y) от положения «скачущего окна» (ось X).

Для проведения сравнительной оценки методов расчета фрактальной размерности была разработана специальная компьютерная программа, позволяющая определять, перечисленные выше размерности, и реализующая метод «скачущего окна».

На рис.2 показаны результаты обработки исходного временного ряда (рис.1) с использованием трех сравниваемых методов расчета размерности: показателя Херста (рис.2,а), размерности Хаусдорфа-Безиковича (рис.2,б) и корреляционной размерности (рис.2,в). При обработке временного ряда выбирался одинаковый размер «окна» равный $N_0=1000$ отсчетов и коэффициент «скачка» – $k=N_0/4=250$ отсчетов.

Из представленных зависимостей видно, что наиболее чувствительной размерностью при анализе исходного временного ряда, позволяющей наиболее точно определить момент изменения состояния турбулентности, является размерность Хаусдорфа-Безиковича. Так при невозмущенном состоянии турбулентной трассы среднее значение показателя Херста имело величину порядка $H=0,85$, размерности Хаусдорфа-Безиковича – $D=1,45$, корреляционной размерности $K=0,78$. При значительном увеличении степени турбулентности среднее значение показателя Херста уменьшалось до величины около $H=0,77$; размерности Хаусдорфа-Безиковича – $D=1,2$; корреляционной размерности $K=0,87$. На третьем характерном участке (С) размерности опять восстанавливались до исходного значения (участка А). Усреднение размерностей проводилось для 10 положений «скачущего окна» на границах характерных участков (А, В, С) временного ряда. Таким образом, перепады величин при переходе от невозмущенного к возмущенному состоянию

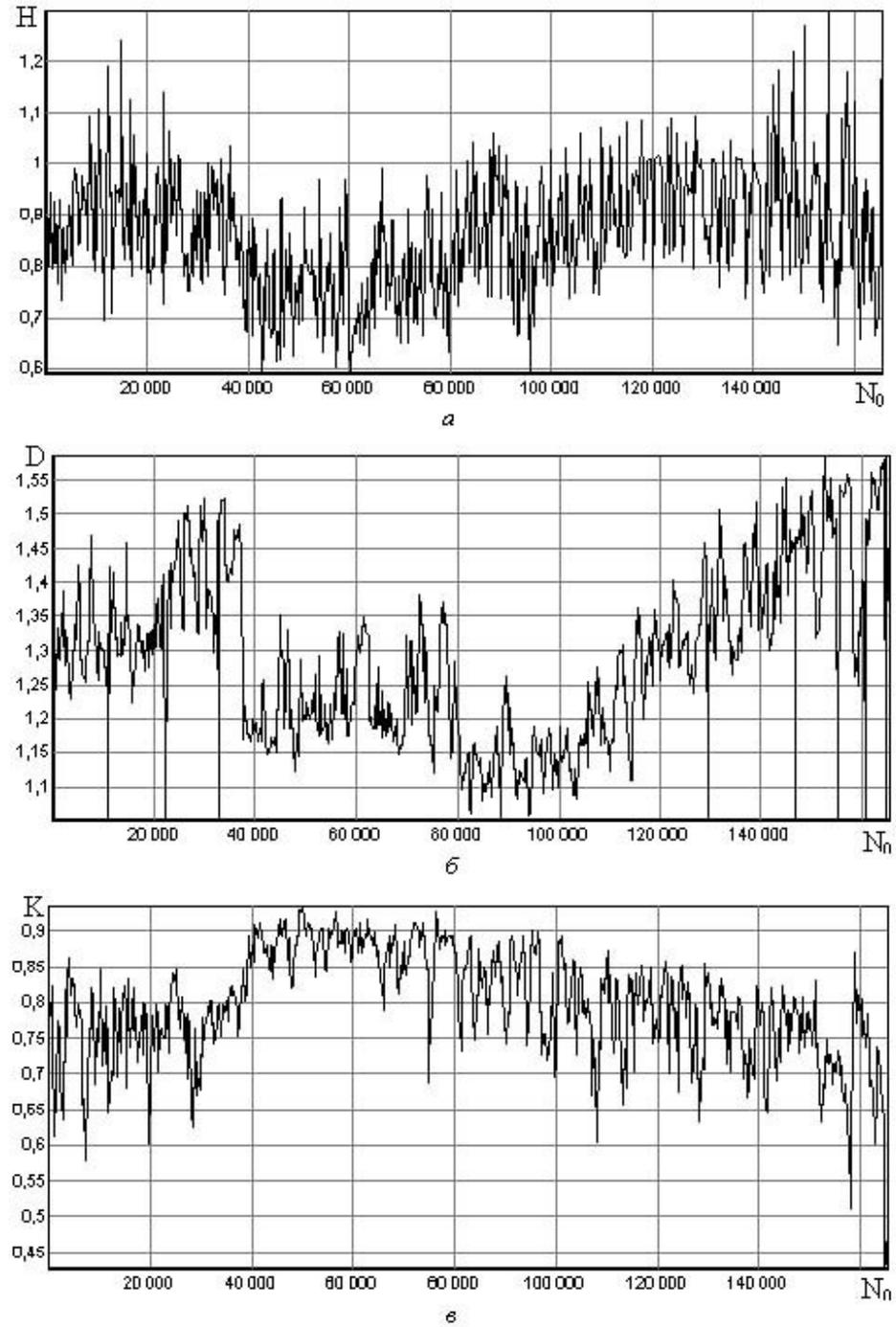


Рис.2. Результаты обработки исходного временного ряда тремя методами: показатель Херста (а), размерность Хаусдорфа-Безиковича (б), корреляционная размерность (в)

составили $\Delta H=0,08$; $\Delta D=0,25$ и $\Delta K=0,09$, т.е. на изменение состояния газового потока наиболее сильно реагирует метод расчета размерности Хаусдорфа-Безиковича ($\Delta H < \Delta K < \Delta D$).

Кроме того, из рис.2 видно, что при анализе исходной выборки с использованием размерности Хаусдорфа-Безиковича (рис.2,а) лучше отражаются процессы, происходящие после выключения тепловентилятора. Так в конце участка В ($N_0=80000-100000$) величина размерности уменьшается до средней величины $D=1,14$, а затем начинает линейно возрастать, что характеризует переходной процесс от возмущенного состояния кневозмущенному ($N_0=100000-140000$). При анализе исходного временного ряда с использованием других размерностей эти процессы не так хорошо выражены.

Оценим скорость обработки исходной выборки с использованием сравниваемых методов расчета размерности при тех же параметрах “скачущего окна”. На рис.3 показаны зависимости времени вычисления показателя Херста (H), размерности Хаусдорфа-Безиковича (D) и корреляционной размерности (K) от величины “скачка” ($k=N_0/4, N_0/2, 3N_0/4, N_0$) при размере “окна” $N_0 = 1000$.

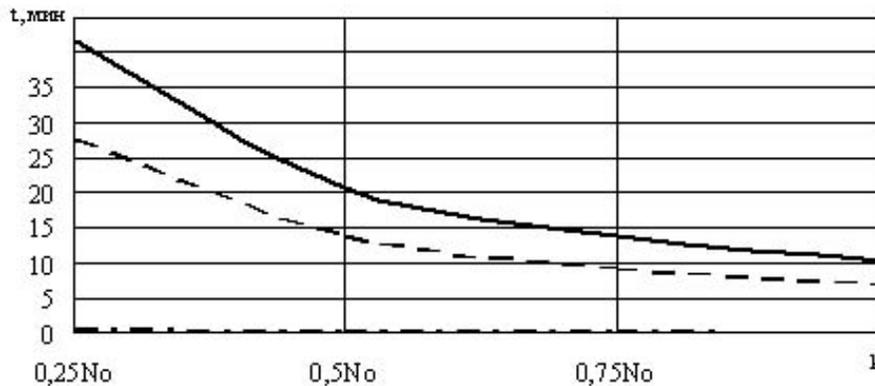


Рис.3. Зависимость времени вычисления D, K, H от величины “скачка” при размере “окна” $N_0=1000$ (сплошная – D, пунктирная – K, штрих пунктирная – H)

На рис. 3 сплошная линия соответствует времени анализа временного ряда с использованием D, пунктирная линия – K и штрих пунктирная – H. Время анализа приведено в минутах, при расчетах использовалась персональная ЭВМ следующей конфигурации: процессор Intel© Celeron©, 1,4 ГГц; ОЗУ 2x256; основной чипсет ATI RC300MD. Из хода кривых видно, что лучшими скоростными характеристиками обладает метод расчета показателя Херста, а худшими – размерности Хаусдорфа-Безиковича. Так при величине “скачка” $k=N_0/4=2500$ отсчетов скорость обработки исходного временного ряда составила $t_H=23$ сек., $t_K=27$ мин. 43 сек., $t_D=41$ мин. 31 сек. Из рис.3 также видно, что время обработки уменьшается с увеличением величины “скачка”.

Проведем оценку влияния размера “окна” на качество и скорость обработки временного ряда и выработаем предложения по выбору размера “скачущего окна”. На рис.4 представлены зависимости изменения величин сравниваемых размерностей D, K, H от размера “окна”, сплошная линия соответствует D,

пунктирная линия – К и штрих пунктирная – Н. Размер “окна” от 0 до 1000 изменялся с дискретностью 100 отсчетов, а от 1000 до 5000 с дискретностью 1000.

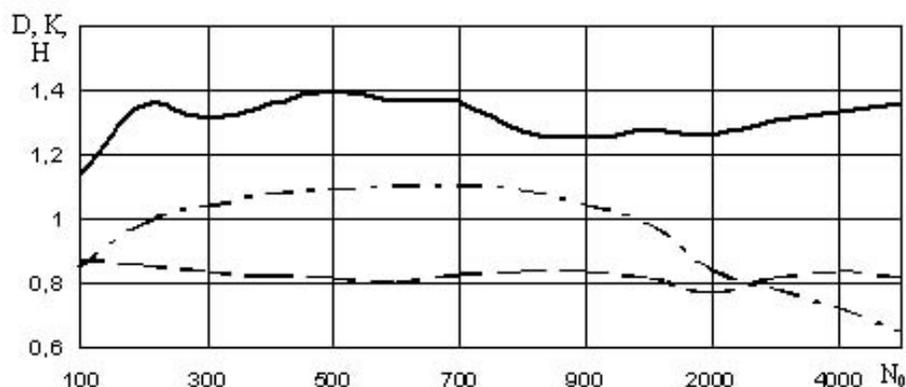


Рис.4. Зависимость величины размерности D , K , H от размера “окна” (сплошная – D , пунктирная – K , штрих пунктирная – H)

Из хода кривых на рис.4 видно, что величина размерности Хаусдорфа-Безиковича (D) и корреляционной размерности (K) слабо зависит от размера “окна”, поэтому для увеличения скорости расчета размерностей можно выбирать “окна” размером от 200 до 500 отсчетов временного ряда. Из рис.4 также видно, что величина показателя Херста (H) при размерах “окна” от 200 до 1000 отсчетов превышает единицу, что является ошибкой, так как значения показателя Херста изменяются в диапазоне $0 \leq H \leq 1$ [12,13], поэтому использовать небольшие размеры “окна” при расчете показателя Херста нельзя.

На рис.5 показан характер изменения показателя Херста при больших размерах “окна” от 1000 до 40000 отсчетов. Из рисунка видно, что значение показателя Херста начинает стабилизироваться при размерах “окна” больше 20000 отсчетов.

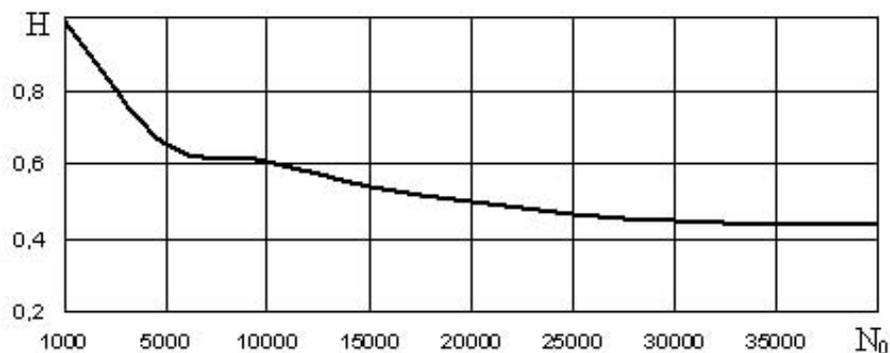


Рис 5. Зависимость величины показателя Херста от размера “окна”

Таким образом, главным недостатком анализа временного ряда, описывающего состояние газового потока, с использованием показателя Херста является, то, что для получения достоверных результатов необходимы большие размеры “скачущего окна”, однако скорость обработки даже при больших размерах “окна” будет высокой. Так при размере “окна” $N_0=20000$ отсчетов и величине “скачка” $k=N_0/4=5000$ отсчетов скорость обработки исходного временного ряда составляет менее 6 минут. При таких же величинах “окна” и “скачка” размерность Хаусдорфа-Безиковича и корреляционную размерность практически вычислять нецелесообразно из-за очень большого времени расчета.

Оценим скорость обработки исходного временного ряда при расчете размерности Хаусдорфа-Безиковича (D) и корреляционной размерности (K) с использованием небольших размеров “скачущего окна”. На рис.6,а и б показаны зависимости времени вычисления D и K соответственно от величины “скачка” при размере “окна” $N_0=300$ отсчетов – сплошная линия и $N_0=500$ отсчетов – штриховая. Из хода кривых видно, что время расчета размерностей D и K уменьшается с уменьшением размера “окна” и увеличением величины “скачка”.

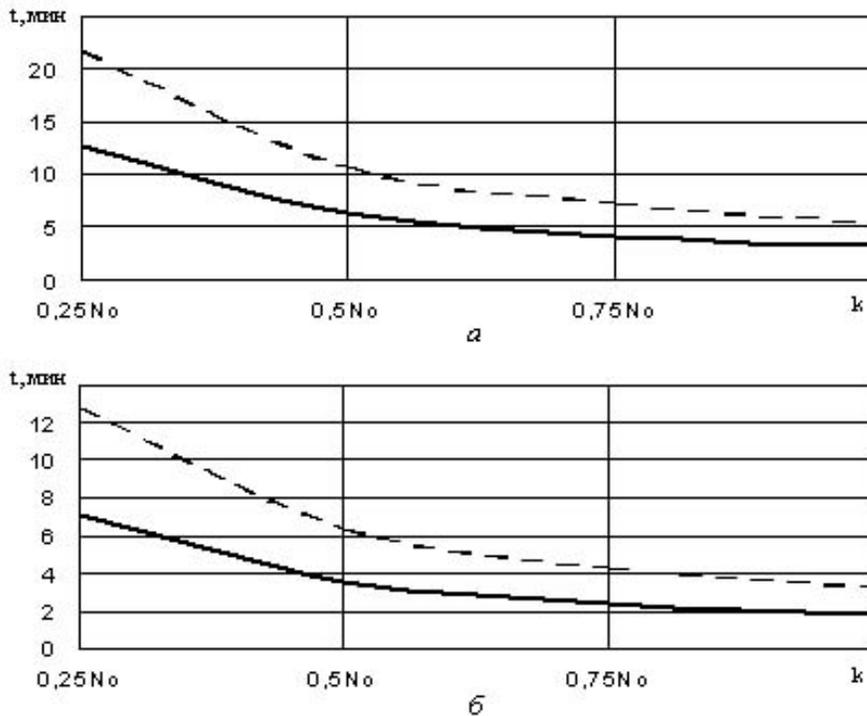


Рис.6. Зависимости времени вычисления D (а) и K (б) от величины “скачка” (размер “окна” $N_0=300$ – сплошная линия, $N_0=500$ – штриховая)

Таким образом, для обеспечения соизмеримых по сравнению с методом расчета показателя Херста ($N_0=20000$ отсчетов и $k=N_0/4=5000$) времен вычисления размерности Хаусдорфа-Безиковича и корреляционной размерности

целесообразно выбирать размер “окна” равный $N_0=300$ отсчетов временного ряда.

Оценим влияние размера “окна” и величины “скачка” на качество анализа исходного временного ряда на примере использования размерности Хаусдорфа-Безиковича (наиболее чувствительной). На рис.7,а и б представлены результаты обработки исходного временного ряда при размерах “окна” $N_0=500$ и $N_0=300$ отсчетов соответственно, величина “скачка” равнялась $k=N_0/4$.

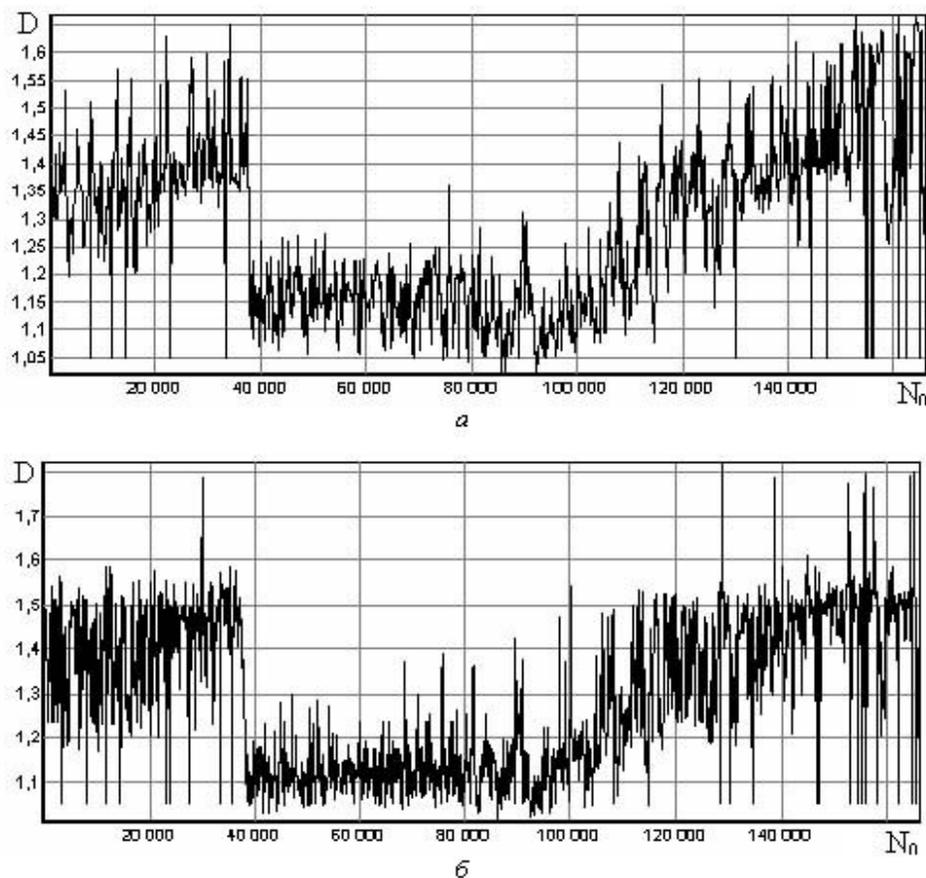


Рис.7. Результаты обработки исходного временного ряда с использованием размерности Хаусдорфа-Безиковича при $N_0=500$ (а), $N_0=300$ (б) и $k=N_0/4$

Анализ результатов обработки исходного временного ряда (рис.2,б и рис.7) при различных размерах “окна” показывает, что уменьшение размера “окна” не существенно влияет на определение момента изменения состояния газового потока, поэтому для увеличения скорости обработки возможно использование “окна” $N_0=300$ отсчетов не ухудшая качество анализа.

На рис.8,а, б и в представлены результаты обработки исходного временного ряда при размерах “окна” $N_0=300$ отсчетов и величинах “скачка” $k=N_0/2$, $k=3N_0/4$ и $k=N_0$ соответственно.

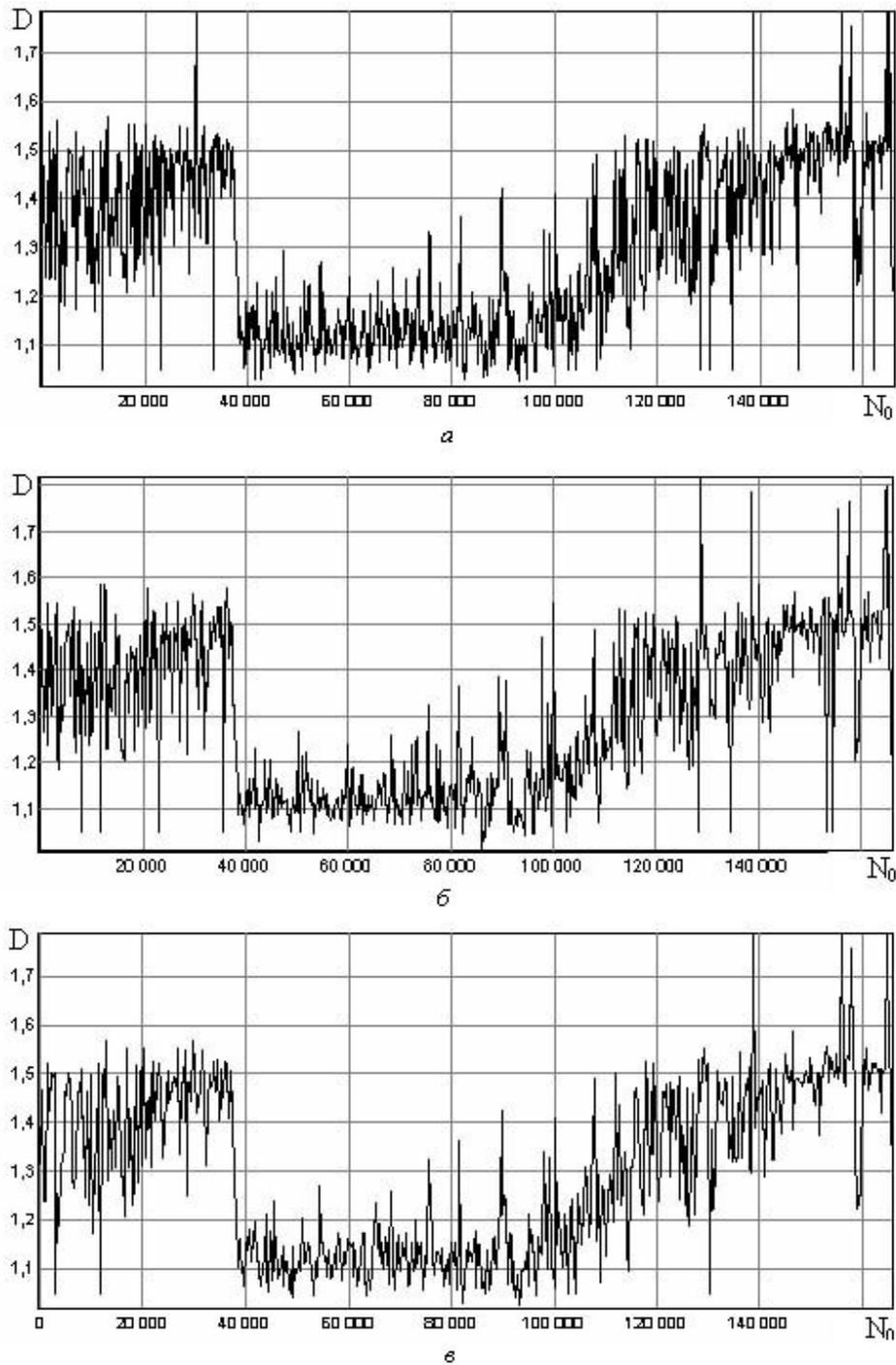


Рис.8. Результаты обработки исходного временного ряда с использованием размерности Хаусдорфа-Безиковича при $N_0=300$ и $k=N_0/2$ (а), $k=3N_0/4$ (б), $k=N_0$ (в)

Характер изменения размерности Хаусдорфа-Безиковича (рис.7,б и рис.8) показывает, что при длинных временных выборках увеличение величины “скачка” также не существенно влияет на определение момента изменения состояния газового потока. Величину “скачка” в этом случае можно выбирать равной $k=N_0$, что увеличит скорость обработки, не ухудшая ее качество.

3. Выводы и практические рекомендации

1. Наиболее чувствительной размерностью анализа исходного временного ряда, позволяющей наиболее точно определить момент изменения состояния газового потока, является размерность Хаусдорфа-Безиковича.
2. Лучшими скоростными характеристиками обладает метод расчета показателя Херста, а худшими – размерности Хаусдорфа-Безиковича.
3. Главным недостатком анализа временного ряда, описывающего состояние газового потока, с использованием показателя Херста является, то, что для получения достоверных результатов необходимы большие размеры “скачущего окна”, однако скорость обработки даже при больших размерах “окна” будет высокой.
4. Для увеличения скорости анализа исходного временного ряда с использованием размерности Хаусдорфа-Безиковича и корреляционной размерности целесообразно выбирать “окна” размером $N_0=300$ отсчетов временного ряда и величину “скачка” равную $k=N_0$, не ухудшая при этом качество обработки.
5. При проведении дальнейших исследований целесообразно оценить влияние отношения сигнал/фон на качество анализа временного ряда фотоотсчетов, полученного в результате лазерного зондирования, при использовании различных методов вычисления размерностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды: Учебное пособие для вузов / Под ред. В.Н. Рождествина. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 528 с.
2. Каталог-справочник по странам СНГ и Прибалтики. Лазерные измерения и диагностика в технике и экологическом контроле. – М.: Научно-технический информационно-учебный центр Лазерной ассоциации, 2000. – 120 с.
3. Ринкявичюс Б.С. Лазерная диагностика потоков / Под ред. В.А. Фабриканта. – М.: Издательство МЭИ, 1990. – 288 с.
4. Аппаратура и методики дистанционного зондирования параметров атмосферы / Под ред. В.Е. Зуева. – Новосибирск: Наука, 1980. – 128 с.
5. Шаровар Ф.И. Методы раннего обнаружения загораний. – М.: Стройиздат, 1988. – 336 с.
6. Потапов А.А. Фракталы в радиофизике и радиолокации. – М.: Логос, 2002. – 664 с.
7. Доля Г.Н., Катунин А.Н., Живчук В.Л., Антонов Д.В. Применение методов фрактального и вейвлет-анализа для обнаружения изменения состояния турбулентной среды // Збірник наукових праць Інституту проблем

- моделювання в енергетиці імені Г.С. Пухова НАН України. – К.: ІПМЕ, 2004. – Вип.25. – С.27-29.
8. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. – М.: Институт компьютерных исследований, 2002. – 656 с.
 9. Шредер М. Фракталы, хаос, степенные законы. Миниатюры из бесконечного рая. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 528 с.
 10. Доля Г.Н., Катунин А.Н., Мазанов В.М. Сравнительный анализ возможностей методов интерферометрии для наблюдения фазовых неоднородностей в воздушной среде. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2006. – № 2(20). – С.61-64.
 11. Фрактальный анализ процессов структур и сигналов / Под. ред. Р.Э. Пашенко. – Харьков: «НЭО Экоперспектива», 2006. – 348 с.
 12. Федер Е. Фракталы: Пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 254 с.
 13. Мун Ф. Хаотические колебания: Вводный курс для научных работников и инженеров: Пер. с англ. – М.: Мир, 1993. – 312 с.