

ОБНАРУЖЕНИЕ МАЛОЗАМЕТНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ФОНЕ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ФРАКТАЛЬНЫМ МЕТОДОМ

д.т.н., проф. Ю.Г. Даник, к.т.н. Р.Э. Пашенко, к.т.н. Г.А. Кучук, М.В. Маляров

Рассмотрена структурная схема фрактального обнаружителя на основе выбора “затравочных” элементов. Проанализированы основные показатели качества фрактального обнаружения объектов на фоне природных фрактальных поверхностей. Построены кривые обнаружения для случая появления нефрактального и фрактального объектов на фоне морской поверхности.

Постановка проблемы. В последнее время зачастую возникает задача наблюдения малоразмерных объектов на фоне подстилающей поверхности, что приводит к формированию малококонтрастных изображений. Наиболее часто такие наблюдения осуществляются на фоне морской поверхности. Поэтому для Украины, как государства, имеющего выход к морским границам, необходимо иметь средства обнаружения, способные заблаговременно и с высокой точностью проводить обнаружение малококонтрастных объектов.

Анализ литературы. Применение новых подходов к решению поставленной задачи позволило синтезировать фрактальные обнаружители, которые используют в качестве критерия обнаружения изменение фрактальной размерности [1, 2]. При таком способе обнаружения необходимо не только определить фрактальную размерность подстилающей поверхности, которая заранее неизвестна, но и обнаружить на ее фоне объекты, причем для анализа зачастую доступно только одно изображение.

В [2] эта задача решается с использованием генерации вспомогательных изображений путем масштабирования исходного. Такой подход позволяет без вычисления фрактальной размерности подстилающей поверхности обнаружить нефрактальные объекты. Однако генерация вспомогательных изображений требует больших вычислительных затрат. Кроме того, предложенный в [2] способ не позволяет обнаружить фрактальные объекты на фоне фрактальной подстилающей поверхности.

Цель статьи: разработать метод фрактального обнаружения объектов, основанный на свойстве самоподобия фракталов и оценить показатели качества фрактального обнаружения на фоне морской поверхности.

Исходя из свойства самоподобия фрактала в [3] показано, что фрактальная размерность всего изображения и любого его участка одинакова. Рассмотрим это на примере триадной кривой Коха. Фрактальная размер-

ность всей кривой и любого из отмеченных участков (рис. 1) $D_f = 1,2628$.

Для природных фрактальных поверхностей свойство самоподобия будет справедливо при ряде ограничений [4].

Во-первых, для фрактальных природных структур размерность всего изображения и его участка будет изменяться случайным образом.

Так как ошибки измерений вносятся различными независимыми факторами, то можно предположить, что разброс значений фрактальной размерности подчиняется нормальному закону распределения.

На рис. 2 приведена гистограмма распределения значений фрактальной размерности. Данные для построения гистограммы получены путем измерения фрактальной размерности различных участков десяти изображений морской поверхности с фрактальной размерностью $D_f \approx 1,3$.

Проверка данной гипотезы (о нормальном законе распределения значений фрактальной размерности) по критерию χ^2 составила значения $(0,5 \div 0,6) \chi^2_{пред}$, что позволило сделать вывод о правильности выдвинутой гипотезы.

Во вторых, при работе с реальными изображениями при выборе размера участка необходимо учитывать тот факт, что уменьшать размер участка изображения до бесконечности нецелесообразно. В [4] показано, что принцип самоподобия для природных поверхностей соблюдается только в том случае, если площадь участка больше некоторой критической площади δ (размера самоподобия). Для различных природных структур размер самоподобия различен и для морской поверхности составляет $\delta \approx 100 \text{ м}^2$ [3]. Данное условие определяет нижнюю границу

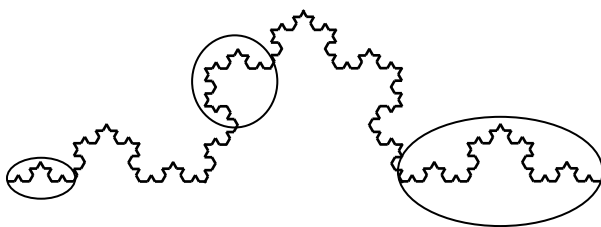


Рис. 1. Триадная кривая Коха

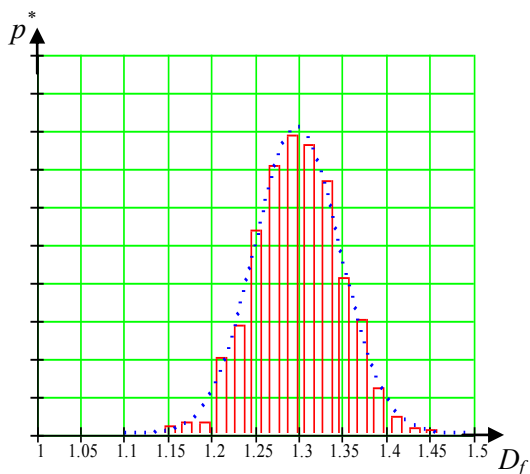


Рис. 2. Распределение значений фрактальной размерности

размеров участка.

В-третьих, при работе с реальными изображениями необходимо учитывать характеристики аппаратуры наблюдения, так как при выборе изображения небольших размеров возможна ситуация, когда оно займет только один элемент разрешения и в этом случае информация о самоподобии будет потеряна.

Сформулируем правило выбора размера участка изображения (назовем его «затравочным» элементом).

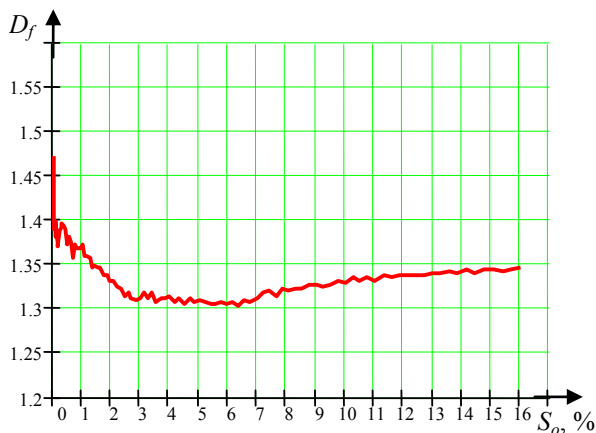


Рис. 3. Зависимость фрактальной размерности от площади участка морской поверхности

Зависимость величины фрактальной размерности участка морской поверхности от его площади S_0 (в процентах от площади исходного изображения) представлена на рис. 3.

Из приведенного графика видно, что значение фрактальной размерности увеличивается при уменьшении площади участка S_0 до 3 % от исходного изображения.

Рост значений фрактальной размерности обусловлен ограниченными возможностями аппаратного разрешения средств наблюдения, что приводит к потере информации о самоподобии.

Размер «затравочного» элемента следует выбирать так, чтобы его площадь S_0 в зависимости от площади исходного изображения S составляла:

$$S_0 = \begin{cases} (0,01 - 0,05) \cdot S, & \text{если } 0,01 \cdot S > \delta; \\ \delta, & \text{если } 0,01 \cdot S \leq \delta. \end{cases} \quad (1)$$

Обобщая вышеизложенное, предложим фрактальный обнаружитель объектов. Для обнаружения объектов на фоне морской подстилающей поверхности входное изображение $F(x, y)$ разбивается на N непересекающихся областей и в каждой области выбирается «затравочный» элемент с площадью S_0 , определенной по формуле (1). Затем, определяя фрактальную размерность [5] для каждого «затравочного» элемента, получим N значений фрактальной размерности D_{f1}, \dots, D_{fN} . Определим фрактальную

размерность морской поверхности для случая отсутствия объекта в виде

$$D_f = \frac{1}{N} \sum_i D_{fi} . \quad (2)$$

Затем, определяя фрактальную размерность всего изображения в целом D_{fob} и находя величину изменения фрактальной размерности в виде

$$\Delta D = D_{fob} - D_f , \quad (3)$$

сравним ее с порогом. При превышении порога примем решение о наличии объекта, а в противном случае – об его отсутствии. Структурная схема фрактального обнаружителя представлена рис. 4.

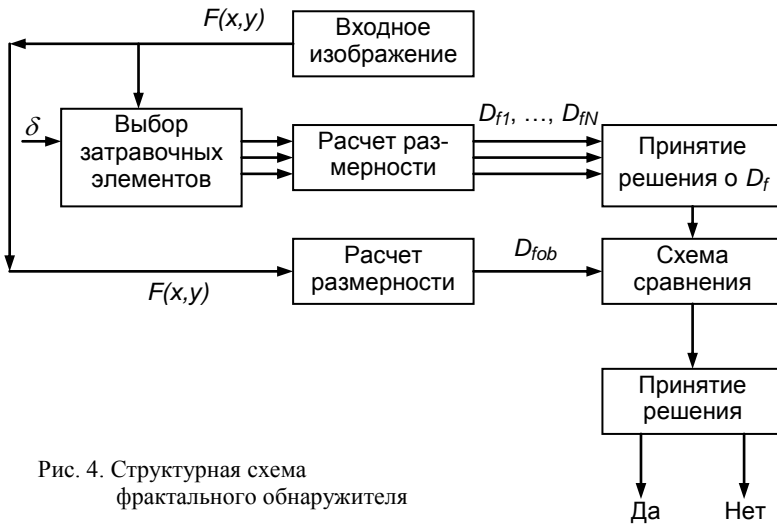


Рис. 4. Структурная схема фрактального обнаружителя

Величина порога принятия решения зависит от требуемых показателей качества обнаружения (вероятности правильного обнаружения D и вероятности ложной тревоги F). Оценим эти показатели качества при фрактальном обнаружении объектов на фоне морской поверхности.

Принятие решения по одному единственному изображению носит случайный характер из-за неизбежного наличия помех и случайного характера параметров обрабатываемого изображения.

Генеральная совокупность всех возможных значений фрактальной размерности описывается соответствующими плотностями вероятности. Перейдем к их рассмотрению.

Сначала рассмотрим обработку изображения, в котором находится только морская поверхность с некоторой размерностью \hat{D}_j . В результате обработки изображения проводится измерение его фрактальной раз-

мерности D_f в соответствии с выражением (2).

Как было показано выше, распределение значения фрактальной размерности «затравочных» элементов подчиняется нормальному закону распределения с равными математическими ожиданиями и дисперсиями:

$$\begin{aligned} m_1 &= m_2 = \dots = m; \\ \sigma_1^2 &= \sigma_2^2 = \dots = \sigma^2. \end{aligned}$$

Исходя из [6] распределение результирующей фрактальной размерности морской поверхности для случая отсутствия объекта также будет подчинено нормальному закону распределения с параметрами:

$$\begin{aligned} \hat{D}_f &= \frac{1}{N} \sum_i m_i = m = \hat{D}_f; \\ \sigma^2 &= \frac{1}{N^2} \sum_i \sigma_i^2 = \frac{\sigma^2}{N}. \end{aligned} \quad (4)$$

Из выражения (4) видно, что математическое ожидание результирующей фрактальной размерности остается прежним, а дисперсия уменьшается в N раз.

Учитывая вышеизложенное, плотность вероятности $p(D_f)$ будет иметь вид

$$p(D_f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \exp \left(-\frac{(D_f - \hat{D}_f)^2}{2\sigma^2} \right). \quad (5)$$

Далее рассмотрим появление на пространстве наблюдений нефрактального объекта и проанализируем изменение величины фрактальной размерности в зависимости от размера появившегося объекта.

Пусть имеется фрактальное изображение морской поверхности с геометрическими размерами p на p точек и фрактальной размерностью D_f .

Предположим, что на изображении присутствует только морская поверхность. Для нахождения фрактальной размерности покроем изображение подстилающей поверхности клетками разных размеров ε_1 и ε_2 (метод покрытия [5]). Решая систему уравнений вида

$$\begin{cases} LgN(\varepsilon_1) = LgC - D_f Lg\varepsilon_1; \\ LgN(\varepsilon_2) = LgC - D_f Lg\varepsilon_2, \end{cases} \quad (6)$$

где $N(\varepsilon_1)$, $N(\varepsilon_2)$ – количество клеток покрытия, содержащих зоны обрешающихся волн морской поверхности [6], а C – некоторая константа,

получим фрактальную размерность в виде

$$D_f = \frac{Lg[N(\varepsilon_1)/N(\varepsilon_2)]}{Lg[\varepsilon_2/\varepsilon_1]}. \quad (7)$$

Рассмотрим изменение фрактальной размерности при появлении на изображении морской поверхности объекта, обладающего нефрактальными свойствами и имеющего геометрическую площадь S_{ob} . Введем безразмерную величину s :

$$s = \frac{S_{ob}}{S_\Sigma}, \quad (8)$$

где $S_\Sigma = p \cdot p = p^2$ – площадь изображения морской поверхности.

В этом случае при вычислении фрактальной размерности количество клеток покрытия, содержащих зоны обрушающихся волн морской поверхности, изменится на величину:

$$N'_1 \approx \frac{S_{ob}}{\varepsilon_1}; \quad N'_2 \approx \frac{S_{ob}}{\varepsilon_2} \quad (9)$$

для размеров клеток покрытия ε_1 и ε_2 соответственно.

Подставляя полученные значения (9) в (7) определяем фрактальную размерность при наличии объекта:

$$D_{fob} = \frac{Lg \frac{N(\varepsilon_1) + N'_1}{N(\varepsilon_2) + N'_2}}{Lg[\varepsilon_2/\varepsilon_1]}. \quad (10)$$

В результате появления на изображении морской поверхности нефрактального объекта величина фрактальной размерности изменилась на величину

$$\Delta D = D_{fob} - D. \quad (11)$$

Подставляя в выражение (11) значения (10) и (7), получим изменение фрактальной размерности для случая появления на изображении нефрактального объекта

$$\Delta D = C \cdot Lg \frac{N'_1 N(\varepsilon_2) + K}{N'_2 N(\varepsilon_1) + K}, \quad (12)$$

где

$$C = 1/Lg[\varepsilon_2/\varepsilon_1];$$

$$K = N(\varepsilon_2)N(\varepsilon_1).$$

Таким образом, обобщающее математическое выражение для величины фрактальной размерности при появлении на изображении нефрак-

тального объекта можно представить в виде

$$D_{job}(s) = D_f + k \cdot Lg(1 + ns). \quad (13)$$

В приведенном выражении величина s описывается формулой (8) и изменяется на интервале $[0;1]$, величина D_f – фрактальная размерность при отсутствии объекта. Коэффициент k определяется как разность топологической размерности нефрактального объекта D_T (пространства, в котором существует фрактал) и фрактальной размерности подстилающей морской поверхности D_f ($k = D_T - D_f$). Коэффициент n учитывает скорость изменения фрактальной размерности в зависимости от состояния морской подстилающей поверхности (волнение). Для спокойной морской поверхности, изображения которой подвергались анализу, при $D_f \approx 1,3$ и $k = 0,7$ коэффициент $n = 9$.

На рис. 5 представлен график изменения величины фрактальной размерности (D_{job}) от площади нефрактального объекта (S_{ob}). Кривая 1

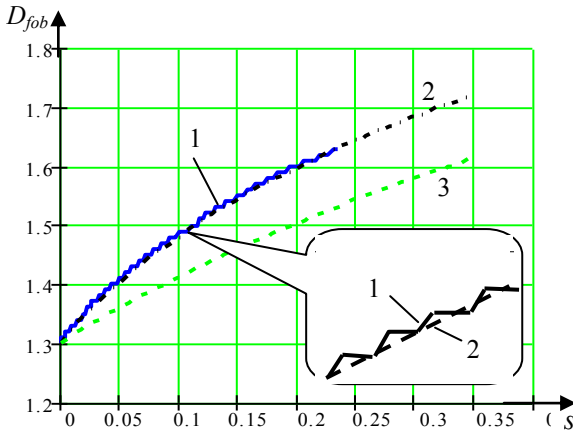


Рис. 5. Изменение величины фрактальной размерности от площади нефрактального объекта

получена при анализе изображений спокойной морской поверхности с бинарным (черно-белым) квантованием. Фрактальная размерность изменяется от начального значения фрактальной размерности $D_f \approx 1,3$ до размерности нефрактального объекта, совпадающей с топологической размерностью пространства $D_T = 2$, в котором существует фрактал. Пока размер нефрактального объекта не превысит размера клетки покрытия ($S_{ob} < \varepsilon_1$), фрактальная размерность не изменится, при дальнейшем росте площади нефрактального объекта размерность скачком перейдет к новому значению, и какое-то время будет оставаться неизменной. Поэтому график изменения фрактальной размерности представляет собой ступенчатую функцию, имеющую некоторый тренд к изменению.

Величина ступеньки определяется дискретностью заполнения фракт-

тального изображения нефрактальным объектом.

Кривые 2 и 3 на рис. 5 рассчитаны по формуле (13) при появлении на изображении нефрактального и фрактального объектов с размерностью $D_{fob} = 1,75$ соответственно.

Найдем условную плотность вероятности для случая появления на изображении морской поверхности нефрактального объекта.

Ясно, что это распределение зависит от площади нефрактального объекта. Поэтому площадь объекта будем считать произвольной, но фиксированной величиной.

Так как площадь объекта есть величина детерминированная, то фрактальная размерность для случая присутствия объекта связана линейной зависимостью с фрактальной размерностью для случая отсутствия объекта.

Из теории вероятности известно [7], что если величина X подчинена нормальному закону распределения, то величина $Y = a \cdot X + b$ также подчинена нормальному закону распределения с параметрами:

$$\begin{aligned} m_Y &= a \cdot m_X + b; \\ \sigma_Y &= |a| \cdot \sigma_X. \end{aligned} \quad (14)$$

где m и σ – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение нормального закона распределения.

Используя выражение (14), получим условную плотность вероятности для случая присутствия на изображении нефрактального объекта, которая распределена по нормальному закону

$$p(D_f | s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{ob}} \exp \left(-\frac{(D_f - \hat{D}_{fob})^2}{2\sigma_{ob}^2} \right) \quad (15)$$

с параметрами $\hat{D}_{fob} = \hat{D}_f + kLg(1+ns)$; $\sigma_{ob} = \sigma$.

Это равносильно сдвигу кривой плотности вероятности на величину $k \cdot Lg(1+ns)$. Графики плотности вероятности для случая отсутствия (сплошная линия) и наличия (пунктирная) объекта при $D_f \approx 1,3$; $k = 0,7$; $n = 9$; $s = 0,2$ приведены на рис. 6.

Для количественной оценки показателей качества воспользуемся двумя условными вероятностями [8]: ложной тревоги F и правильного обнаружения $D(s)$.

Условная вероятность ложной тревоги определяется выражением

$$F = \int_{D_0}^{\infty} P(D_f) dD_f, \quad (16)$$

где D_0 – порог обнаружения.

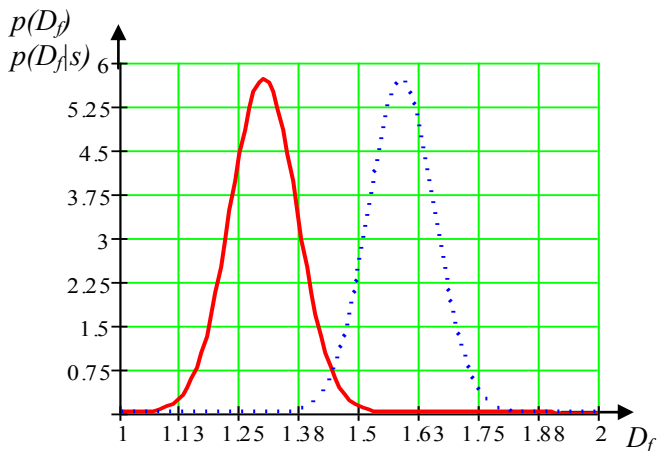


Рис. 6. Плотность вероятности для случая отсутствия (сплошная линия) и наличия объекта (пунктирная)

Подставляя выражение (5) в (16) получим условную вероятность ложной тревоги

$$F = 1 - \Phi\left(\frac{D_0 - \hat{D}_f}{\sigma}\right), \quad (17)$$

где $\Phi(x)$ – интеграл вероятностей, определяемый выражением

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt.$$

Задаваясь условной вероятностью ложной тревоги и определяя порог D_0 с использованием (17), найдем условную вероятность правильного обнаружения $D(s)$, определяемую выражением

$$D(s) = \int_{D_0}^{\infty} P(D_f | s) dD_f. \quad (18)$$

Подставляя (15) в (18) получим

$$D(s) = 1 - \Phi\left(\frac{D_0 - D_f + k \cdot \text{Lg}(1 + n \cdot s)}{\sigma}\right). \quad (19)$$

Задаваясь значениями условной вероятности ложной тревоги и находя значения порога обнаружения (17), получим семейство кривых

обнаружения для случая появления нефрактального объекта (рис. 7) и фрактального объекта (рис. 8).

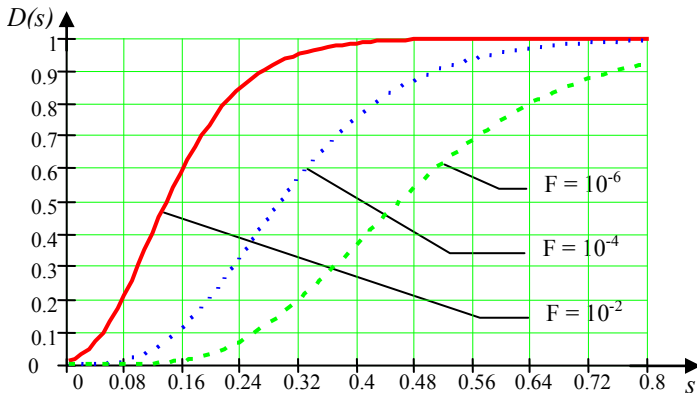


Рис. 7. Кривые обнаружения при появлении нефрактального объекта

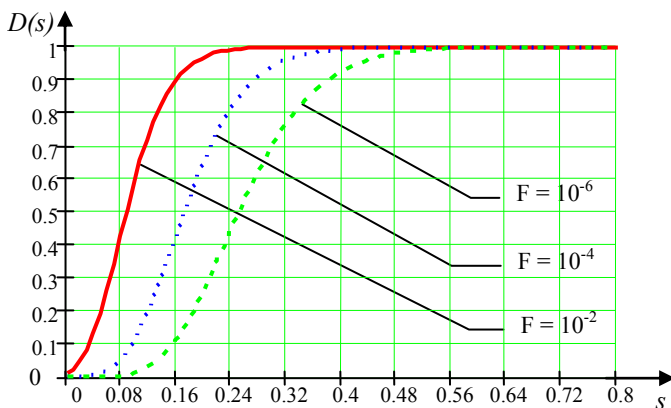


Рис. 8. Кривые обнаружения при появлении фрактального объекта

Из приведенных графиков видно, что для достижения вероятности правильного обнаружения $D(s) = 0,9$ необходимо чтобы площадь нефрактального объекта составляла $0,16 - 0,38$ от площади исходного изображения при различных значениях условной вероятности ложной тревоги.

При появлении на изображении морской поверхности фрактального объекта с фрактальной размерностью $D_{fob} = 1,75$, те же показатели качества достигаются, если его площадь составляет $0,26 - 0,73$ от площади исходного изображения.

Заключение. Таким образом, проведенный синтез фрактального обнаружителя позволяет обнаруживать как нефрактальные, так и фрактальные объекты на фоне морской подстилающей поверхности.

При выборе затравочных элементов их размер необходимо выбирать в пределах (1 – 5) % от площади исходного изображения.

Анализ показывает, что при применении фрактального обнаружителя с такими показателями качества как $F = 10^{-2}$, $D \geq 0,9$ площадь нефрактального объекта должна быть не менее 0,16 от площади исходного изображения.

При обнаружении фрактального объекта те же показатели качества достигаются при соотношении площадей $s = 0,26$, что равносильно увеличению площади в 1,5 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Даник Ю.Г. Фрактальное обнаружение объектов // Сборник научных трудов ХВУ. – Х.: ХВУ. – 1998. – Вып. 4 (26). – С. 31 – 34.
2. Потапов А.А., Герман В.А., Соколов В.М. Радиолокационное обнаружение цели на фоне земной поверхности фрактальным методом // Радиотехника. – 2000. – № 8. – С. 67 – 74.
3. Федер Е. Фракталы. – М.: Мир, 1981. – 260 с.
4. Даник Ю.Г., Маляров М.В., Толстая А.А. Методика локализации фрактально-однородных участков в результатах наблюдений // Системы обработки информации. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ. – 2002. – Вып. 2 (18). – С. 120 – 125.
5. Даник Ю.Г., Маляров М.В., Толстая А.А. Фрактальная размерность природных структур и способы ее определения // Радиофизика и электроника. – Х.: ХНУ. – 2002. – Вып. 1. – С. 173 – 178.
6. Заславский Г.М., Шарков Е.А. Фрактальные свойства зон обрушающихся волн на поверхности моря // ДАН СССР. – 1987. – Т. 294. – С. 1362 – 1366.
7. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. – М.: «Высшая школа», 2000. – 432 с.
8. Алмазов В.Б. Основы теории радиолокации. – Х: ВИРТА, 1992.

Поступила 19.09.2002

ДАНИК Юрий Григорьевич, доктор техн. наук, профессор, ведущий научный сотрудник научного центра ХВУ. Окончил факультет подготовки командно-штабного и руководящего инженерного состава Харьковского военного университета в 2002 году. Область научных интересов – обработка информации.

ПАЩЕНКО Руслан Эдуардович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры ХВУ. Окончил Житомирское ВУРЭ ПВО в 1987 году. Области научных интересов – первичная обработка сигналов, нелинейная динамика, фрактальный анализ.

КУЧУК Георгий Анатольевич, канд. техн. наук, ст. научн. сотр., начальник НИО ИВЦ ХВУ. Окончил мехмат Московского государственного университета в 1977 году. Область научных интересов – обработка информации.

МАЛЯРОВ Мурат Всеволодович, адъюнкт ХВУ. Окончил Харьковский военный университет в 1997 году. Область научных интересов – фрактальная обработка изображений.