

УДК 621.396

АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ ДВИЖУЩЕГОСЯ ФРАКТАЛЬНОГО ОБЪЕКТА НА РАДИОЛОКАЦИОННОМ ИЗОБРАЖЕНИИ

Кошелев Виталий Ивановичдоктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехнических систем
ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет».*E-mail:* koshelev.v.i@rsreu.ru.**Паршин Александр Юрьевич**аспирант кафедры радиотехнических систем
ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет».*E-mail:* alex90fox@gmail.com.*Адрес:* 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

Аннотация: Предложена фрактальная модель сигнала, отраженного от движущегося протяженного объекта – фрактальное броуновское движение (ФБД). Рассмотрено и обосновано применение ФБД для описания амплитудной составляющей комплексной функции рассеяния электромагнитных волн зондируемой поверхности, а также предложено использовать описание синфазной и квадратурной составляющих функции рассеяния ФБД с различными параметрами. Составлено математическое описание сигнала, отраженного от движущегося протяженного объекта, учитывающее доплеровский сдвиг частоты при движении. Методом максимального правдоподобия синтезирован многоканальный алгоритм обнаружения и оценивания скорости движения протяженных объектов на фоне подстилающей поверхности, проведен его анализ, показана эффективность применения оценок скорости в алгоритмах автофокусировки. Предложены структурные схемы многоканальных обнаружителей фрактальных объектов. Экспериментально показана зависимость фрактальной меры объекта от скорости его движения.

Ключевые слова: фрактальное броуновское движение, показатель Херста, отношение правдоподобия, функция рассеяния, протяженный объект, движущийся объект, метод максимального правдоподобия.

Введение

Одной из актуальных задач современной радиотехники является обработка сигналов, отраженных от объектов и подстилающей поверхности в результате дистанционного зондирования при помощи радиотехнических систем с синтезированием апертуры антенны. Традиционные алгоритмы обнаружения малоcontrastных относительно подстилающей поверхности объектов на радиолокационных изображениях [1], основанные на энергетических критериях, часто не обеспечивают необходимого качества обнаружения.

Изображения многих природных объектов, а также изображения плотной городской застройки могут рассматриваться как фрактальные структуры. Такие структуры демонстрируют свойства самоподобия или самоафинности [2]. Поэтому фрактальные характеристики объекта можно рассматривать в качестве статистики при выполнении обнаружения разра-

ботанными для них алгоритмами. При использовании фрактальных методов имеется возможность применения статистических свойств сигналов, присущих фрактальным объектам.

При наличии движущихся объектов на изображении различение сигналов, отраженных от них, заметно усложняется. Это объясняется появлением доплеровского смещения частоты в сигнале, что в условиях малых отношений сигнал-шум вносит дополнительные сложности в процесс обнаружения. Известны различные алгоритмы обнаружения фрактальных сигналов [3-5], полученные методами теории статистических решений. Так в работе [5] рассматривается построение комплексированного энергетико-фрактального обнаружителя фрактальных сигналов. Однако, влияние движения и изменения функции рассеяния протяженного объекта на свойства обнаружителя при этом исследовано недостаточно.

Цель работы состоит в синтезе многоканального алгоритма обнаружения с возможностью классификации движущихся протяженных фрактальных объектов. Предложена модель, описывающая функцию рассеяния от движущихся протяженных объектов, адекватная сложным объектам на поверхности Земли.

Модель отраженного сигнала

Вопрос определения наличия объекта на изображении рассматривался авторами работы [6], в которой предлагалось выполнять оценку скорости по доплеровскому смещению частоты сигнала, отраженного от объекта. Повышение качества обнаружения позволило получить наилучшее разрешение объекта на радиолокационном изображении. Максимально возможное разрешение обеспечивается при использовании радиолокационных станций с синтезированием апертуры (РСА).

Синтезирование апертуры антенны позволяет получать набор изображений облучаемой поверхности, каждое из которых соответствует конкретному положению летательного аппарата. Достижимое при этом более высокое разрешение полученного изображения позволяет получить массив отсчетов сигнала, отраженного от объектов, что, в свою очередь, создает возможность более точно проводить оценку параметров объектов.

Зависимость мощности и амплитуды отраженного сигнала от ракурса облучаемого участка поверхности характеризуется диаграммой вторичного излучения. При представлении объектов на зондируемой поверхности в виде простых геометрических форм диаграмма вторичного излучения может быть рассчитана в результате решения электродинамических задач. Однако, в реальных условиях функционирования РЛС с РСА вследствие взаимного движения элементов картографируемой поверхности и РСА, изменения условий распространения радиоволн, отраженный сигнал флуктуирует, поэтому такие диаграммы описываются статистическими характеристиками.

Характеристикой рассеивающих свойств поверхности является функция рассеяния, которая представляет собой комплексную

функцию $\underline{F}[\vec{r}, \vec{\lambda}(\vec{r})]$, характеризующую рассеивающие свойства элемента поверхности с координатами \vec{r} и электрофизическими параметрами $\vec{\lambda}(\vec{r})$. При использовании стохастических моделей электромагнитного поля $\underline{F}[\vec{r}, \vec{\lambda}(\vec{r})]$ отражение его можно описать случайным процессом, обычно нестационарным в пространстве. Если поверхность представлена в виде совокупности блестящих точек, то коэффициент отражения является пространственно дискретным. В результате рассеяния поверхностью принимаемый РСА сигнал определяется выражением [7]:

$$\underline{S}_{i\text{ ПР}}(t) = \underline{G}_{i\text{ ПР}} \{t - [t_{31i}(t) + t_{32i}(t)]\} \underline{G}_{i\text{ ПЕР}}(t) \times \\ \times \underline{F}_i [t - t_{31i}(t), \vec{\lambda}_i] \underline{S}_0 [t - [t_{31i}(t) + t_{32i}(t)]] \times \\ \times \exp\{j\omega_0 [t - [t_{31i}(t) + t_{32i}(t)]]\},$$

где t_{31i} , t_{32i} – задержка во времени при распространении зондирующего сигнала от РСА до цели и отраженного сигнала от цели до нового положения РСА, $\underline{G}_{i\text{ ПЕР}}(t)$, $\underline{G}_{i\text{ ПР}}(t)$ – диаграммы направленности приемной и передающей антенн.

Для описания распределения амплитудной составляющей коэффициента отражения $\underline{F}[\vec{r}, \vec{\lambda}(\vec{r})]$ по зондируемой поверхности Земли используем фрактальные модели. Установлено [1], что поверхности почв и моря при облучении зондирующим сигналом РЛС создают вторичное излучение, пространственный спектр которого имеет форму $(1/f)^\alpha$. Это позволяет описывать свойства естественных поверхностей моделью двумерного фрактального броуновского движения (ФБД). Отсчеты двумерного ФБД формируются одним из известных методов [8] и характеризуются показателем интенсивности σ , показателем Херста H и размерностью $d = 3 - H$.

Комплексный коэффициент отражения формируется совокупностью блестящих точек по пространственным координатам:

$$\underline{F}_{i,k} = X_{i,k} \exp(j\phi_{i,k}) \quad i = 1, \dots, N_x, k = 1, \dots, N_y, \quad (1)$$

где N_x, N_y – число элементов разрешения по двум измерениям зондируемого участка поверхности.

Пусть амплитудная составляющая $X_{i,k}$ в выражении (1) описывается двумерным ФБД, заданным в дискретном виде. Отсчеты ФБД принимают как положительные, так и отрицательные значения, в то время как $X_{i,k}$ является модулем комплексного числа, следовательно, должен иметь строго положительные значения. Это несоответствие устраняется при использовании случайных аргументов $\phi_{i,k}$, независимых и равномерно распределенных на интервале $[0, 2\pi]$. При разработке модели отрицательное значение $X_{i,k}$ учитывается в виде дополнительного сдвига фазы отраженного сигнала на π . Коэффициент отражения с учетом корректировки равен:

$$\underline{F}_{i,k} = |X_{i,k}| \exp(j(\phi_{i,k} + \arg(X_{i,k}))) = |X_{i,k}| \exp(j\Psi_{i,k}),$$

$$i = 1, \dots, N_x, k = 1, \dots, N_y,$$

где $\Psi_{i,k}$ – случайная фаза с равномерным распределением, независимая для разных отражателей.

При наличии на изображении движущихся объектов отраженный сигнал получает дополнительное изменение фазы, вызванное доплеровским смещением частоты Ω_D , что учитывается в коэффициенте отражения:

$$\underline{F}_{i,k} = |X_{i,k}| \exp(j(\Psi_{i,k} + \Omega_D n \Delta t)),$$

$$i = 1, \dots, N_x, k = 1, \dots, N_y, n = 1, \dots, M,$$

где Δt – интервал времени между соседними точками зондирования РСА, M – число зондирований на апертуре РСА.

Фрактальные свойства комплексного коэффициента отражения можно представить в алгебраической форме записи в виде квадратурных составляющих. В этом случае квадратурные составляющие коэффициента отражения описываются отсчетами $X_{i,k}^{(I)}$, $X_{i,k}^{(Q)}$ двух независимых реализаций ФБД:

$$\underline{F}_{i,k} = X_{i,k}^{(I)} + jX_{i,k}^{(Q)}, i = 1, \dots, N_x, k = 1, \dots, N_y.$$

Учитывая изменение фазы сигнала, отраженного от движущегося объекта, и разложение на квадратурные составляющие, выражение для комплексного коэффициента отражения можно записать в виде:

$$\underline{F}_{i,k} = X_{i,k}^{(I)} + jX_{i,k}^{(Q)} = \sqrt{(X_{i,k}^{(I)})^2 + (X_{i,k}^{(Q)})^2} \times$$

$$\times \exp(j \arg(\underline{F}_{i,k}) + \Omega_D n \Delta t),$$

$$i = 1, \dots, N_x, k = 1, \dots, N_y, n = 1, \dots, M.$$

Две представленные модели отраженного сигнала имеют близкие фрактальные характеристики, но отличаются плотностью распределения вероятностей модуля комплексной записи.

Многоканальная система обнаружения

В практических задачах скорость движения протяженного объекта неизвестна, поэтому целесообразно использовать многоканальную структуру обнаружителя. При традиционной доплеровской многоканальной фильтрации сигналов число используемых каналов определяется шириной просматриваемых диапазонов доплеровских частот, а также допустимой расстройкой каналов [9]. Допустимая расстройка в свою очередь, зависит от интервала скоростей, перекрываемого каждым каналом в отдельности, и связана с разрешающей способностью радиолокатора по скорости. В такой системе сравнение статистики с порогом выполняется в каждом канале, т.е. для всех возможных скоростей.

Для многоканального обнаружения движущихся фрактальных объектов предлагаются две схемы построения. В первой используется многоканальное оценивание скорости по доплеровскому смещению частоты с последующим обнаружением объекта фрактальными методами. Сигнал после системы фильтров, имеющих определенную расстройку, поступает на многоканальный фрактальный обнаружитель, в котором каждый канал настроен на определенную величину показателя Херста. На основе вычисленного отношения правдоподобия производится оценивание показателя Херста и фрактальной размерности по известному соотношению $d = 3 - H$. Предположим, что объект имеет размерность d , ограниченную пределами d_{\min} и d_{\max} , а плотность распределения является равномерной:

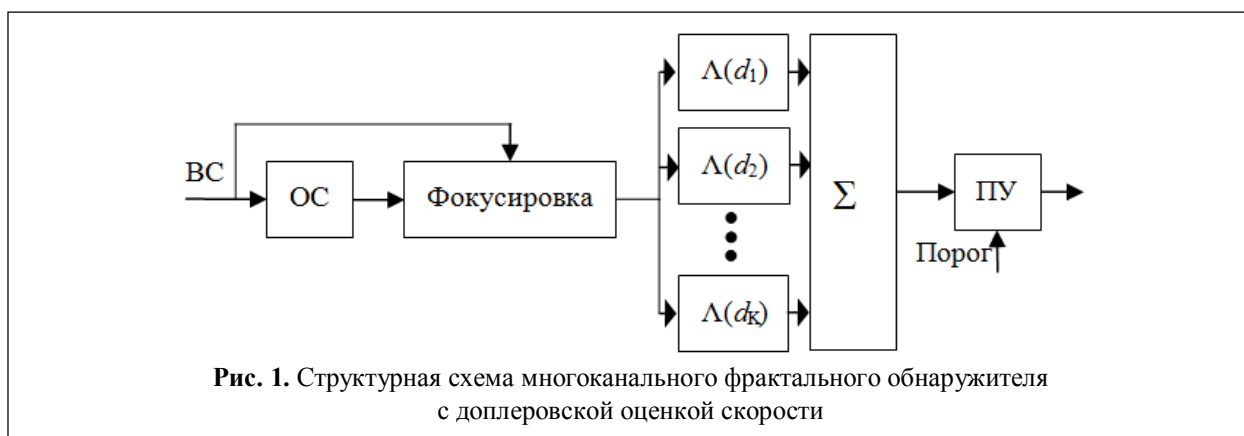


Рис. 1. Структурная схема многоканального фрактального обнаружителя с доплеровской оценкой скорости

$w_d(d) = 1/(d_{max} - d_{min})$. Запишем выражение для достаточной статистики обнаружения:

$$z = \int_{d_{min}}^{d_{max}} \Lambda(d) w_d(d) dd .$$

Для упрощения технической реализации алгоритма обнаружения интеграл заменяется суммой:

$$z = \sum_{k=1}^K \Lambda(d_k) w_d(d_k) \Delta d .$$

Схема многоканального фрактального обнаружителя показана на рис. 1. Условные обозначения следующие: BC – входной сигнал, OC – оценка скорости, Σ – суммирующее устройство, ПУ – пороговое устройство, СЭ – сравнение с эталоном. Каждый доплеровский фильтр имеет расстройку по доплеровской частоте, соответствующую определенной скорости во всем диапазоне возможных скоростей.

Во второй схеме используется определение движущегося объекта по зависимости величины фрактальной размерности от скорости движения. В этом случае выполняется оценивание размерности входного сигнала и определение скорости по вышеуказанным зависимостям для разных объектов. Далее выбирается наименьшее значение скорости и выполняется сравнение с порогом. При превышении порогового значения объект считается движущимся и выносится решение об его обнаружении. Соответствующая описанию схема представлена на рис. 2.

При наличии на изображении нескольких движущихся объектов возможно использование многоканальной структуры, в которой

каждый канал построен по схеме, соответствующей рис. 1. Таким образом обеспечивается обнаружение и различение объектов, движущихся с разными скоростями относительно подстилающей поверхности.

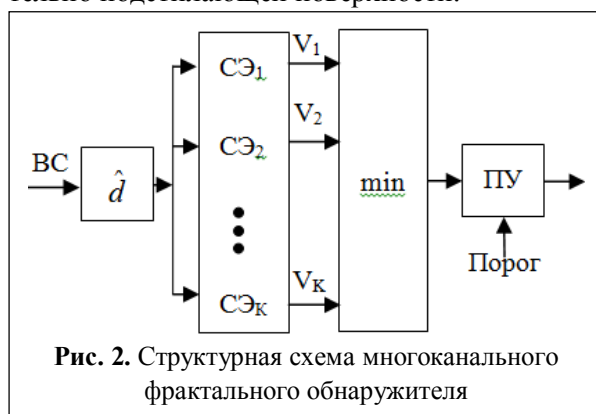


Рис. 2. Структурная схема многоканального фрактального обнаружителя

Алгоритм обнаружения фрактального протяженного объекта

Составляющие сигнала имеют следующую совместную многомерную плотность распределения вероятности (ПРВ):

$$w(\Delta \mathbf{X}) = \frac{1}{(2\pi)^M \sqrt{\det \mathbf{R}}} \exp \left[-\frac{1}{2} \Delta \mathbf{X}^T \mathbf{R}^{-1} \Delta \mathbf{X} \right], \quad (2)$$

где корреляционная матрица \mathbf{R} зависит от показателя Херста H , а плотность распределения вероятностей (2) может быть представлена как функция правдоподобия

$$w(\Delta \mathbf{X} / H) = \frac{1}{(2\pi)^M \sqrt{\det \mathbf{R}(H)}} \times \exp \left[-\frac{1}{2} \Delta \mathbf{X}^T \mathbf{R}^{-1}(H) \Delta \mathbf{X} \right] \quad (3)$$

и использоваться для получения оценок максимального правдоподобия показателя Херста:

$$\hat{H} = \arg \max_H w(\Delta X / H). \quad (4)$$

Оценка показателя Херста (4) является достаточной статистикой для выполнения обнаружения неподвижного или движущегося объекта на фоне подстилающей поверхности. Оцененное значение сравнивается с порогом h , в результате сравнения выносится решение о наличии или отсутствии объекта:

$$\hat{\theta} = \begin{cases} 1, & H > h \\ 0, & H \leq h \end{cases}$$

Обнаружение объекта может производиться как по данным отраженного сигнала, так и при текстурной обработке радиолокационных изображений, где текстурным признаком является показатель Херста. Ввиду сложности операции обращения корреляционной матрицы в (3) применяются различные методы ее упрощения, в том числе, рассмотрение некоррелированных отсчетов квадратурных составляющих и переход в спектральную область при помощи одномерного или многомерного преобразования Фурье. Это обеспечивает снижение требований к процессорной части системы или повышение скорости обработки сигналов.

Как отмечено выше, статистика обнаружения – значения оценок показателя Херста, полученных с учетом статистических свойств коэффициента отражения, используется для обнаружения неподвижного или движущегося объекта на фоне подстилающей поверхности. Значения статистики сравниваются с порогом, в результате выносится решение о наличии или отсутствии объекта. На рис. 3 приведены графики характеристик обнаружения ФБД движущегося протяженного объекта.

Семейство характеристик обнаружения построено для различных значений порога обнаружения. По оси X размечены значения разности показателей Херста подстилающей поверхности и объекта. Анализ приведенных на рис.3 зависимостей указывает на явные зависимости вероятностей правильного обнаружения от скорости движения объекта, что характерно и для традиционных алгоритмов доплеровской фильтрации.

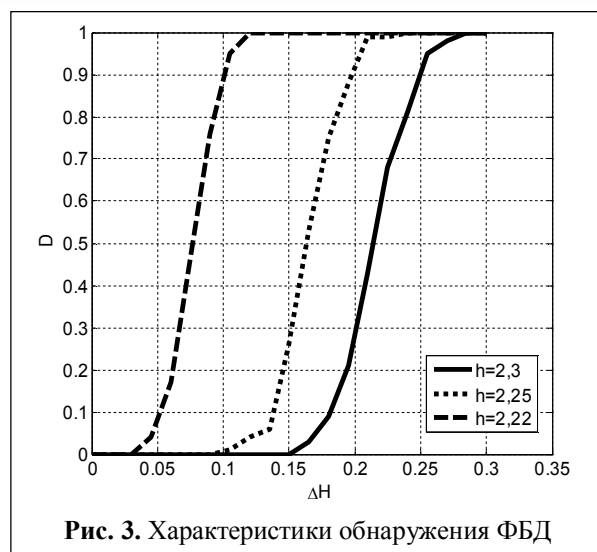


Рис. 3. Характеристики обнаружения ФБД

Результаты моделирования

На рис. 4 приведено яркостное изображение объектов на фоне подстилающей поверхности со свойствами ФБД с различными показателями Херста. Яркость объекта пропорциональна модулю коэффициента отражения. Для наглядности контуры каждого объекта выделены. В результате приема сигнала РСА в каждой точке получаем несфокусированное изображение. Ближний край изображения находится на расстоянии 100λ , расстояние между блестящими точками, а также между точками измерения равны $\lambda/2$.

В модели предполагается, что каждый объект имеет свою скорость движения относительно подстилающей поверхности. Верхний объект имеет скорость $v_1 = 0,2v_{RSA}$, средний - $v_2 = 0,4v_{RSA}$, а нижний - $v_3 = 0,7v_{RSA}$, где v_{RSA} - скорость РСА относительно поверхности Земли. На рис. 5 приведено сфокусированное изображение движущегося объекта. Фокусировка выполнена только на один из объектов, который перемещается со скоростью v_2 . Фокусировка выполнена вдоль строки, а по вертикали разрешение обеспечивается за счет разрешающей способности РСА по дальности.

При движении объекта относительно поверхности возникает дополнительный сдвиг фазы принимаемого сигнала, который зависит от скорости движения объекта. Если в опорной функции учитывается точное значение скоро-

сти, то синтез изображения объекта выполняется с наименьшими искажениями, а сама скорость объекта существенно не влияет на качество синтезированного изображения. Если скорость не учтена в опорной функции, то фокусировка производится с ошибкой и изображение получается смазанным. В этом случае фокусировка может быть выполнена для подстилающей поверхности.

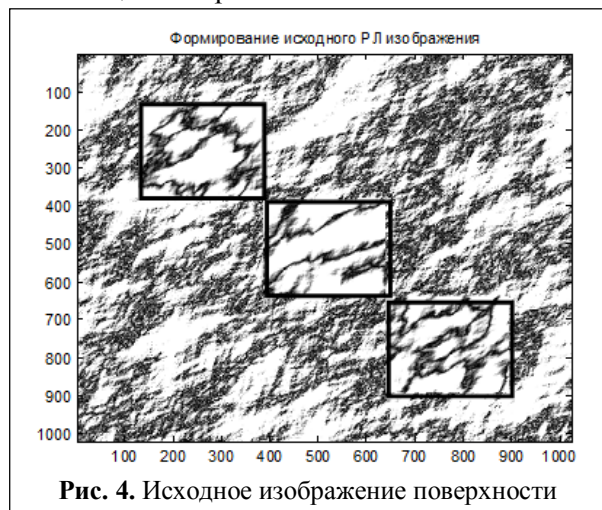


Рис. 4. Исходное изображение поверхности

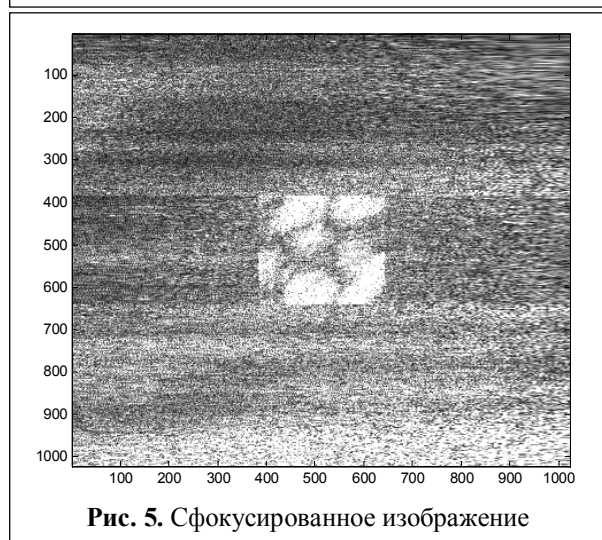


Рис. 5. Сфокусированное изображение

Расчет размерности покрытия изображения движущегося объекта в соответствии с алгоритмом [11,12] показывает однозначную связь между скоростью движения и оценкой размерности. При увеличении относительной скорости движения объекта его размерность уменьшается. Так как в случае использования модели двумерного фрактального броуновского движения размерность непосредственно связана с показателем Херста, то последний так же

может использоваться в качестве оценки скорости объекта. График зависимости размерности покрытия фрактального объекта от скорости его движения показан на рис. 6, где D_e - оценка размерности покрытия, v - скорость объекта относительно РСА.

Из графика видно, что размерность неподвижного объекта равна его реальной размерности, а при скорости, равной $0,5v_{RSA}$, она уменьшается на 0,3. Это позволяет оценивать скорость движения объекта по величине его размерности или показателя Херста.

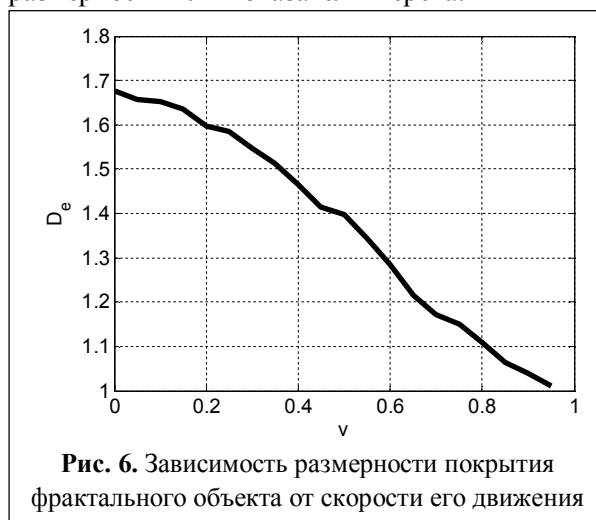


Рис. 6. Зависимость размерности покрытия фрактального объекта от скорости его движения

Заключение

Предложенные многоканальные структуры обнаружителей движущихся объектов позволяют выполнить обнаружение и оценивание скорости объектов, имеющих фрактальную структуру. На основе модели двумерного фрактального броуновского движения получены выражения для статистики обнаружения. Методом моделирования показана возможность оценивания фрактальной размерности объекта после предварительной оценки скорости движения и фокусировки. Фокусировка может выполняться как на движущейся, так и на неподвижной части изображения в зависимости от решаемой задачи. Зависимости оценки показателя Херста от скорости движения протяженного объекта позволяют использовать их в качестве статистики при обнаружении движущегося объекта, а также для получения оценки скорости движения.

Литература

1. Бакут П.А., Большаков И.А., Герасимов Б.М., и др. Вопросы статистической теории радиолокации. Т.1. Под ред. П.А. Бакута. – М.: Советское радио, 1963. – 426 с.
2. Фракталы в радиофизике и радиолокации: топология выборки. // А.А. Потапов– М.: Университетская книга, 2005. 847 с.
3. Потапов А.А., Герман В.А. Фрактальный непараметрический обнаружитель радиосигналов // Радиотехника. 2006. № 5. С. 30 – 36.
4. Сосулин Ю.Г., Русский А.Б. Фрактальное обнаружение протяженных малококонтрастных объектов на изображениях // Радиотехника. 2009. № 12. - С. 48-57.
5. Parshin A., Parshin Yu. Usage of non-Gaussian statistics for RF signals detection by complex energy and fractal detector // I nternational radar symposium - IRS 2013, Proceeding, volume I, II, Drezden, Germany. – German institute of navigation, 2013, pp. 779-784.
6. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. – М.: Радиотехника. 2005. 368 с.
7. Pesquet-Popescu B., Vehel J. L. Stochastic fractal models for image processing // IEEE Signal Processing Magazine. 2002. Vol. 19. №. 5. P. 48-62.
8. Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории. // Кроновер Р.М. – М.: Постмаркет, 2000. 352 с.
9. Кошелев В.И., Горкин В.Н. Синтез фильтров многоканальной доплеровской обработки сигналов. - Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. 2003. Т. 46. № 1. С. 63-68
10. Parshin A., Parshin Yu. Detection of moving extended object based on fractional Brownian motion model. // 2015 IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), May 21-23, 2015, Omsk, Russia.
11. Паршин Ю.Н., Паршин А.Ю. Максимально правдоподобное оценивание корреляционной размерности с учетом влияния смещения оценки и усечения диапазона масштабов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2013. №4–1(46). С.18-25.
12. Паршин А.Ю., Паршин Ю.Н. Выделение границ фрактального объекта методом максимального правдоподобия по независимой и зависимой выборкам // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. №4–2 (50). С. 3–9.

Поступила 11 августа 2015 г.

English

Evaluation methods of moving fractal object in radar image

Vitaly Ivanovich Koshelev – Doctor of Technical Science, Professor Head of Radio Engineering Systems Department “Ryazan State Radio Engineering University”.

E-mail: koshelev.v.i@rsreu.ru.

Alexander Yuryevich Parshin – Post-graduate student Radio Engineering Systems Department “Ryazan State Radio Engineering University”.

E-mail: alex90fox@gmail.com.

Address: 390005, Ryazan, Gagarin St., 59/1.

Abstract: One of critical tasks of today’s radio engineering is processing signals reflected from objects and underlying surface. Images of many natural objects received after probing can be considered as fractal structures. Therefore fractal characteristics of object can be considered as statistics when performing detection via the algorithms developed for them. Two schemes of making detectors are proposed for multichannel detection of moving fractal objects. The first one uses multichannel speed evaluation via Doppler frequency shift with the subsequent object detection by fractal methods. The second one uses moving object detection via dependence of size of fractal dimension on motion speed. In this case evaluation of input signal dimension and speed determination via the above dependencies for different objects is carried out. Object detection can be done both via reflected signal data and via textural processing of radar images where Hurst exponent is textural attribute. The detection statistics - Hurst exponent values that were received with regard to statistical properties of reflection coefficient is used for detection of moving or non-moving object against underlying surface. Statistics values are compared to a threshold and as a result the decision on presence or absence of object is made. Calculation of dimension of image coverage of moving object demonstrates clear relation between the motion speed and dimension evaluation. Object dimension decreases with increase its relative speed. Dimension is directly connected with Hurst exponent as in case of using model of two-dimensional fractal Brownian motion and thus Hurst exponent can be also used as object speed evaluation. Evaluation dependencies of Hurst exponent on the motion

speed of extended object enable to use them as statistics in moving object detection as well as for obtaining motion speed value.

Key words: fractal Brownian motion, Hurst exponent, likelihood ratio, dispersion function, extended object, moving object, maximum-likelihood method.

References

1. Bakut P.A., Bolshakov I.A. Gerasimov and other colleagues. Problems of statistical theory of radar-location. T.1. Ed. by P.A. Bakut. - M.: Sovetskoye radio, 1963. – 426 p.
2. Fractals in radio physics and a radar-location: selection topology. - Potapov A.A. - M.: Universitetskaya kniga, 2005. 847 p.
3. Potapov A.A., Hermann V.A. Fractal nonparametric detector of radio signals. - Radiotekhnika. 2006. No. 5. P.30 - 36.
4. Sosulin Yu.G., Russskin A.B. Fractal detection of extended low-contrast objects in images. - Radiotekhnika. 2009. No. 12. P. 48-57.
5. Parshin A., Parshin Yu. Usage of non-Gaussian statistics for RF signals detection by complex energy and fractal detector. - International radar symposium - IRS 2013, Proceeding, volume I, II, Drezden, Germany. - German institute of navigation, 2013, pp. 779-784.
6. Kondratenkov G.S., Frolov A.Yu. Radio vision. Radar-tracking systems for Earth remote probing. - M.: Radiotekhnika. 2005. 368 p.
7. Pesquet-Popescu B., Vehel J.L. Stochastic fractal models for image processing. - IEEE Signal Processing Magazine. 2002. Vol. 19. No. 5. P. 48-62.
8. Fractals and chaos in dynamic systems. Theory basics. - Kronover R. M. - M.: Postmarket, 2000. 352 p.
9. Koshelev V.I., Gorkin V.N. Synthesis of filters for multichannel Doppler signal processing. - Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeny. Radioelektronika. 2003. T. 46. P. 63-68
10. Parshin A., Parshin Yu. Detection of moving extended object based on fractional Brownian motion model. - 2015 IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), May 21-23, 2015, Omsk, Russia.
11. Parshin Yu.N., Parshin A.Yu. Maximum-likelihood evaluation of correlation dimension in regard to influence of evaluation shift and downgrading scales range. - Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta. 2013. No. 4-1(46). P.18-25.
12. Parshin A. Yu., Parshin Yu.N. Fractal object boundary detection by method of maximum likelihood via independent and dependent selections. - Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta. 2014. No. 4-2 (50). P. 3-9.