

УДК 537.86+621.396.96

В.И. Кошелев, А.Ю. Паршин

ОБНАРУЖЕНИЕ ДВИЖУЩЕГОСЯ ПРОТЯЖЕННОГО ОБЪЕКТА НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ФРАКТАЛЬНОГО БРОУНОВСКОГО ДВИЖЕНИЯ

Предложена фрактальная модель движущегося протяженного объекта. Обосновано использование фрактального броуновского движения для описания комплексного коэффициента отражения. Методом максимального правдоподобия разработан алгоритм обнаружения фрактального протяженного объекта. Рассмотрена возможность использования оценок фрактальных характеристик в качестве статистики обнаружения движущегося протяженного объекта. Предложен подход к оцениванию скорости движения объекта по изменению величины его фрактальной размерности.

Ключевые слова: фрактальное броуновское движение, показатель Херста, отношение правдоподобия, коэффициент отражения, протяженный объект, движущийся объект.

Введение. На радиолокационном изображении (РЛИ), полученном при дистанционном зондировании поверхности Земли, целевые объекты расположены на фоне подстилающей поверхности и других объектов. Возникает необходимость в выполнении классификации и различении объектов на изображении. Многие используемые в настоящее время алгоритмы [1] не обеспечивают различение малоконтрастных объектов на фоне подстилающей поверхности, так как не учитывают внутренних связей между отсчетами сигнала, отраженного от объекта. В работе предложено использовать алгоритмы, основанные на принципе самоподобия объектов и учитывающие их фрактальные свойства.

Основным принципом фрактального подхода к обработке изображений является тот факт, что каждый объект имеет одинаковую структуру при рассмотрении в разных масштабах. Фрактальная геометрия применяется для описания нерегулярных структур, которые сложно представляются методами классической геометрии. Такие структуры демонстрируют свойства самоподобия или самоаффинности [2]. На изображениях поверхности Земли такие свойства чаще всего проявляют естественные образования: лес, поле, поверхность воды, рельеф местности. Кроме того, плотная городская застройка также может рассматриваться как фрактальная структура.

Известны различные алгоритмы обнаружения фрактальных сигналов [3-6], полученные

методами теории статистических решений. Однако влияние движения протяженного объекта на свойства обнаружителя исследовано недостаточно.

Таким образом, появляется необходимость в разработке модели отражений от движущегося протяженного объекта, адекватной сложным объектам на РЛИ. Полученная модель применяется при анализе эффективности предложенного алгоритма обработки сигналов. **Цель работы** – разработка модели сигнала, отраженного от неподвижных и движущихся объектов на подстилающей поверхности, для обоснования алгоритма обнаружения сложных объектов.

Модель отраженного сигнала. В результате отражения от поверхности Земли радиолокационный сигнал трансформируется в зависимости от свойств отражающих объектов. Зависимость мощности и амплитуды отраженного сигнала от ракурса облучаемого участка поверхности представляется в виде диаграммы вторичного излучения. Диаграмма вторичного излучения рассчитана теоретически в результате решения электродинамических задач только для объектов простой геометрической формы. Но для реальных сложно конфигурированных элементов провести такой расчет обычно не удается. В реальных условиях функционирования РЛС с синтезированной апертурой (РСА) вследствие взаимного движения элементов картографируемой поверхности и РСА, изменения условий распространения радиоволн отраженный сигнал флук-

турует, поэтому такие диаграммы описываются статистическими характеристиками. Источником флуктуаций могут быть изменение свойств поверхности объектов, случайные изменения диаграмм направленности антенн, положения зондирующей РСА.

В силу вышеперечисленных причин отраженный от поверхности сигнал можно представить как случайную функцию пространственных координат [1], для описания которой применяются стохастические модели. В отличие от функционально-детерминированных данные модели позволяют учесть флуктуации амплитуды и фазы сигнала, отраженного от поверхности поля.

Отраженный от непрерывной поверхности сигнал записан в виде [7]:

$$u(t) = S_D \{ \underline{F}[\vec{r}, \vec{\lambda}(\vec{r})], \underline{S}(t, \vec{r}) \} + n(t),$$

где $S_D \{ \}$ – сигнал, отраженный от зондируемой поверхности D ; $\underline{F}[\vec{r}, \vec{\lambda}(\vec{r})]$ – комплексная функция, характеризующая отражающие свойства элемента поверхности с координатами \vec{r} и электрофизическими параметрами $\vec{\lambda}(\vec{r})$; $\underline{S}(t, \vec{r})$ – сигнал, принимаемый от элемента поверхности с координатами \vec{r} при условии $\underline{F}[\vec{r}, \vec{\lambda}(\vec{r})] = 1$, $n(t)$ – аддитивный белый гауссовский шум. Для непрерывной пространственной координаты комплексный коэффициент отражения $\underline{F}[\vec{r}, \vec{\lambda}(\vec{r})]$ находится в результате решения прямых дифракционных задач при регулярных или случайных граничных условиях и соответствует отношению коэффициента отражения элемента поверхности $d\vec{r}$ к площади этого участка. При использовании стохастических моделей отраженного электромагнитного поля $\underline{F}[\vec{r}, \vec{\lambda}(\vec{r})]$ представляет собой случайный процесс, обычно нестационарный в пространстве. Если поверхность представлена в виде совокупности блестящих точек, то коэффициент отражения является дискретным в пространстве. Отраженные от i -й точки поверхности и принимаемые РСА сигналы определяются выражениями [7]:

$$\begin{aligned} \underline{S}_{iOTP}(t) &= \underline{K}_i [t, t_{31i}(t), \vec{r}] \underline{F}_i [t - t_{31i}(t), \vec{\lambda}_i] \underline{G}_{iПЕР}(t) \times \\ &\times \underline{S}_0 [t - t_{31i}(t)] \times \exp \{ j\omega_0 [t - t_{31i}(t)] \}, \\ \underline{S}_{iПР}(t) &= \underline{G}_{iПР} \{ t - [t_{31i}(t) + t_{32i}(t)] \} \underline{G}_{iПЕР}(t) \times \\ &\times \underline{F}_i [t - t_{31i}(t), \vec{\lambda}_i] \underline{S}_0 [t - [t_{31i}(t) + t_{32i}(t)]] \times \\ &\times \exp \{ j\omega_0 [t - [t_{31i}(t) + t_{32i}(t)]] \}, \end{aligned}$$

где t_{31i} , t_{32i} – задержка во времени при распространении зондирующего сигнала от РСА до це-

ли и отраженного сигнала от цели до нового положения РСА, $\underline{G}_{iПЕР}(t)$, $\underline{G}_{iПР}(t)$ – диаграммы направленности приемной и передающей антенн.

РСА имеет высокую разрешающую способность, что позволяет разрешать элементы объекта малого размера. В случае когда размер элемента разрешения значительно больше длины волны, в качестве характеристики отражающих свойств локальных элементов объекта используется комплексный коэффициент отражения, пропорциональный отношению напряженности рассеянного точечным отражателем поля E_0 к напряженности поля облучения E при заданных параметрах сигнала: поляризации на передачу и прием, длине волны и угле облучения:

$$S(x, y, z, t) = \lim_{R_H \rightarrow \infty} \sqrt{4\pi R_H} \frac{E_0(x, y, z, t)}{E(x, y, z, t)}.$$

Амплитуда отраженного сигнала определяется эффективной площадью рассеяния (ЭПР), следовательно, комплексный коэффициент отражения связан с ЭПР отражателя в виде

$$\sigma = \lim_{R_H \rightarrow \infty} 4\pi R_H \left| \frac{E_0}{E} \right|^2 \text{ выражением:}$$

$$\underline{F}_i = \sqrt{\sigma_i} \exp(j\phi_i),$$

где ϕ_i – изменение фазы волны при отражении, которое в дальнейшем принимается случайным с равномерным распределением и независимым для разных отражателей.

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 генерируют вторичное излучение, пространственный спектр которого имеет форму $(1/f)^\alpha$. Такие результаты позволяют 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 $d = 3 - H$. Дисперсия приращений $\Delta X = X(x + \Delta x, y + \Delta y) - X(x, y)$ двумерного ФБД равна $\sigma^2 (\Delta x^2 + \Delta y^2)^H$, а плотность распределения вероятностей приращений на различных интервалах времени является гауссовской [8].

Комплексный коэффициент отражения формируется совокупностью блестящих точек по пространственным координатам:

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

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

Пусть амплитудная составляющая $X_{i,k}$ 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:

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

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

Фокусировка радиолокационного изображения. Для анализа изменения фрактальных свойств радиолокационного изображения рассмотрим протяженный объект, состоящий из N блестящих точек в направлении движения РСА. Полагаем также, что в направлении, перпендикулярном к движению носителя, подстилающая поверхность также содержит аналогичную последовательность блестящих точек. При этом разрешающая способность РСА по дальности позволяет выполнить разрешение каждой блестящей точки в направлении, перпендикулярном к движению РСА.

Для исследования фрактальных характеристик и их влияния на обнаружение движущегося объекта используется модель РСА, в которой не отражены направленные свойства передающей и приемной антенн, а также изменение амплитудно-фазовых параметров электромагнитной волны при распространении.

Синтез апертуры состоит в фокусировке радиолокационного изображения путем умножения принимаемых сигналов на опорную функцию $\underline{R}_{mk} = e^{j\frac{4\pi}{\lambda} r_{mk}}$. Расстояние от m -й блестящей точки до k -го положения точки измерения РСА равно

$$r_{mk} = \sqrt{L_2^2 + (m\Delta x_{SC} - k\Delta x_{RCA})^2},$$

где L_2 – наклонное расстояние от траектории движения РСА до фокусируемой строки на поверхности, Δx – расстояние между положениями РСА, в которых проводится излучение и прием сигнала, $\Delta x_{SC} = v_{SC} T$ – расстояние между соседними блестящими точками движущегося объекта в моменты времени излучения сигнала, $\Delta x_{RCA} = v_{RCA} T$ – расстояние между соседними положениями РСА, пройденное за T – период излучения сигнала.

Назначение опорной функции состоит в компенсации фазы сигналов, принятых во всех различных положениях реальной антенны, для каждой точки на РЛИ. Рассмотрим случай полного обзора, при котором в каждом $m=1,\dots,M$

положении РСА принимается сигнал, отраженный от всех $i=1, \dots, M$, блестящих точек изображения. Несфокусированный сигнал для одной строки имеет вид:

$$\underline{s}_k = \sum_{i=1}^N s_{ik} = \sum_{i=1}^N A_0 a_{ik} e^{-j \frac{4\pi}{\lambda} r_{ik}}, \quad k=1, \dots, M.$$

Сфокусированное изображение строки получается умножением отражений от каждого пиксела несфокусированного изображения на опорную функцию и суммированием полученных произведений:

$$\hat{s}_m = \sum_{k=1}^N s_k R_{mk} = \sum_{i=1}^N A_0 a_i \sum_{k=1}^N e^{-j \frac{4\pi}{\lambda} (r_{ik} - r_{mk})}, \quad m=1, \dots, M.$$

При анализе положим, что разрешение РСА по дальности достаточно, чтобы выделить без искажения каждый пиксел изображения по дальности, а синтезирование апертуры производится в направлении движения РСА.

Алгоритм обнаружения протяженного объекта. Так как коэффициент отражения от поверхности описывается при помощи модели ФБД, то для его оценки достаточно оценить параметры модели ФБД. Основным параметром ФБД, имеющим различные значения для протяженного объекта и подстилающей поверхности, является показатель Херста. Статистическая зависимость приращений ФБД на различных интервалах определяется корреляционными матрицами \mathbf{V}_{OBJ} для объекта и \mathbf{V}_{UND} для поверхности. Полагаем, что независимые квадратурные составляющие $X_{i,k}^{(I)}$, $X_{i,k}^{(Q)}$ имеют одинаковые корреляционные матрицы \mathbf{V}_{OBJ} , а корреляционная матрица комплексного коэффициента отражения приращений интенсивностей всех пикселов объекта имеет вид $\mathbf{R}_{OBJ} = 2\mathbf{V}_{OBJ}$.

Вектор $\underline{\mathbf{F}}$ коэффициента отражения для протяженного объекта имеет следующую многомерную плотность распределения вероятности:

$$w_{OBJ}(\underline{\mathbf{F}}) = \frac{1}{\pi^M \det \mathbf{R}_{OBJ}} \exp\left[-\underline{\mathbf{F}}^H \mathbf{R}_{OBJ}^{-1} \underline{\mathbf{F}}\right],$$

а плотность распределения вероятностей поверхности имеет вид:

$$w_{UND}(\underline{\mathbf{F}}) = \frac{1}{\pi^M \det \mathbf{R}_{UND}} \exp\left[-\underline{\mathbf{F}}^H \mathbf{R}_{UND}^{-1} \underline{\mathbf{F}}\right].$$

Статистика обнаружения – значения оценок размерности подобия, полученных с учетом статистических свойств коэффициента отражения, используется для обнаружения неподвижного или движущегося объекта на фоне подстилающей поверхности. Значения статистики сравни-

ваются с порогом, в результате выносятся решение о наличии или отсутствии объекта. На рисунке 1 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.

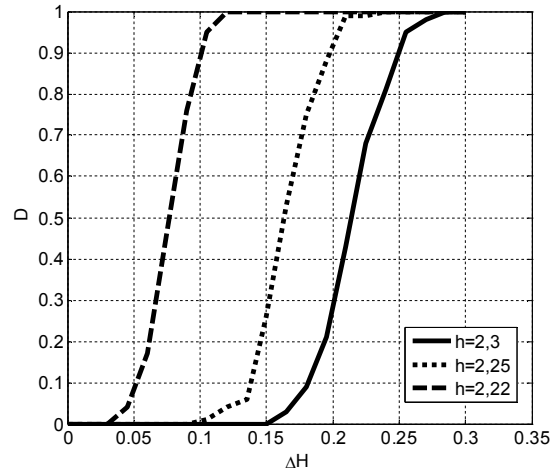


Рисунок 1 – Характеристики обнаружения ФБД

Результаты моделирования. На рисунке 2 приведено яркостное изображение, яркость которого пропорциональна модулю коэффициента отражения. Изображение представляет собой объект на фоне подстилающей поверхности в виде ФБД с различными показателями Херста. В результате приема сигнала в каждой точке РСА получаем несфокусированное изображение. Ближний край изображения находится на расстоянии 100λ , расстояния между блестящими точками, а также между точками измерения равны $\lambda/2$.

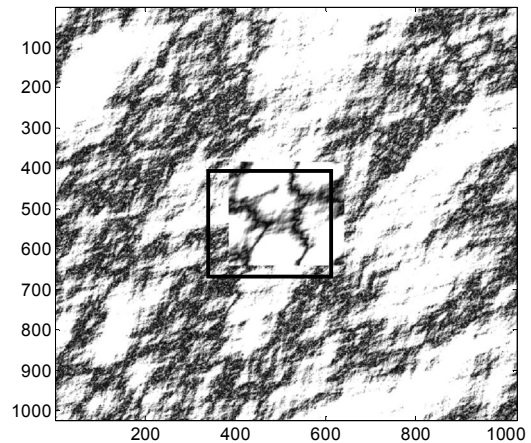


Рисунок 2 – Исходное изображение поверхности

На рисунке 3 приведено сфокусированное неподвижное изображение. Фокусировка проводится вдоль строки, а по вертикали разрешение обеспечивается за счет разрешающей способности РСА по дальности. На сфокусированном изображении отчетливо видны спекл-шумы. Уменьшить влияние спекл-шума можно путем усреднения нескольких изображений, полученных независимо, а также методом линейной фильтрации, например с помощью фильтра Ли.

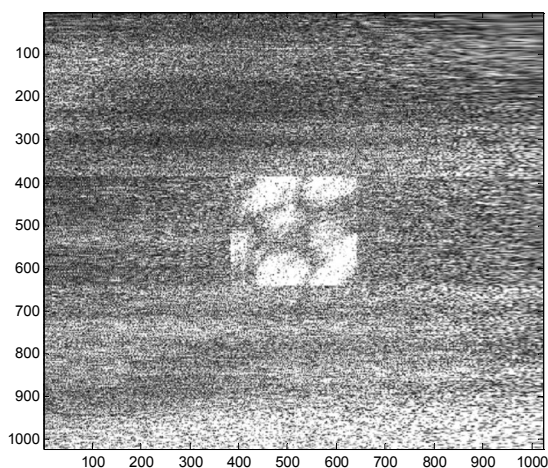


Рисунок 3 – Сфокусированное изображение

Движение объекта изменяет корреляционную матрицу \mathbf{V}_{OBJ} . При движении объекта относительно поверхности возникает дополнительный сдвиг фазы принимаемого сигнала, который зависит от скорости движения облучаемого объекта. Если точное значение скорости учитывается в опорной функции, то синтез изображения объекта выполняется с наименьшими искажениями, а скорость объекта существенно не влияет на качество синтезированного изображения. Если скорость не учтена в опорной функции, то фокусировка производится с ошибкой, изображение получается смазанным. На рисунке 4 показано синтезированное изображение, для которого опорная функция не учитывает скорость движения. Скорость движения принята равной $0,4v_{RSA}$ относительно подстилающей поверхности в направлении, совпадающем с направлением движения РСА. В опорную функцию не введена скорость движения, при этом фокусировка выполняется для подстилающей поверхности.

Расчет корреляционной размерности изображения движущегося объекта в соответствии с алгоритмом [9,10] показал взаимоднозначную связь между скоростью движения и оценкой корреляционной размерности. При увеличении относительной скорости движения объекта его

корреляционная размерность уменьшается. График зависимости размерности покрытия фрактального объекта от скорости его движения показан на рисунке 5.

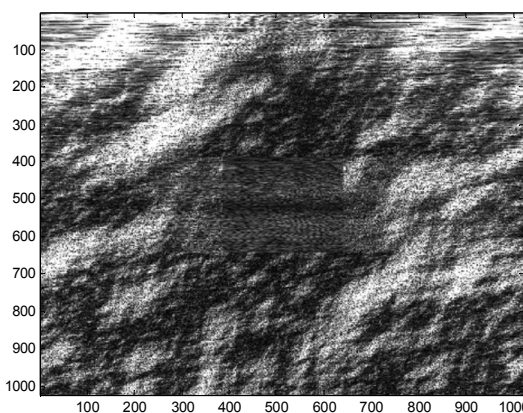


Рисунок 4 – Изображение движущегося объекта

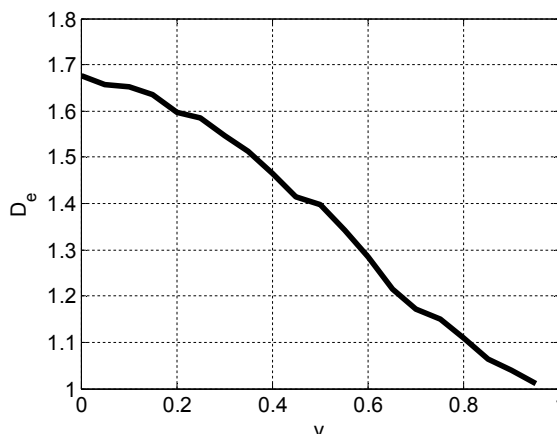


Рисунок 5 – Зависимость размерности покрытия фрактального объекта от скорости его движения

Из графика видно, что размерность неподвижного объекта равна номинальному значению, а при скорости, равной $0,5v_{RSA}$, она уменьшилась на 0,3. Таким образом, показана возможность оценивания скорости движения объекта по величине его размерности.

Закключение. Предложенная модель с использованием двумерного фрактального броуновского движения позволяет учесть фрактальные свойства движущегося протяженного объекта. На основе модели получено выражение для статистики обнаружения, позволяющее реализовать оптимальный обнаружитель. Результаты моделирования показывают, что движение протяженного объекта вызывает расфокусировку изображения, получаемого РСА. При этом изменяются также фрактальные свойства изображения, величина показателя Херста в зависимости от скорости движущегося объекта. Путем учета скорости движения можно выполнять фокусировку на движущейся или неподвижной части

изображения. Зависимость оценки показателя Херста от скорости движения протяженного объекта позволяет использовать его в качестве статистики при обнаружении движущегося объекта, а также для выполнения оценивания скорости движения. В дальнейшем при оценивании скорости возможно использовать многоканальный алгоритм компенсации скорости движения объектов, который также позволит обрабатывать изображения с несколькими движущимися объектами.

Исследования выполнены при поддержке Российского научного фонда, проект № 14-19-01263.

Библиографический список

1. 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 // Потапов А.А. – М.: Университетская книга, 2005. – 847 с.
3. Потапов А.А., Герман В.А. Фрактальный непараметрический обнаружитель радиосигналов // Радиотехника. 2006. № 5. С. 30 – 36.
4. Гуляев Ю.В., Никитов С.А., Потапов А.А., Герман В.А. Идеи скейлинга и дробной размерности в схеме фрактального обнаружителя радиосигналов // Радиотехника и электроника. 2006. Т. 51. № 8. С. 968 – 975.
5. Сосулин Ю.Г., Русскин А.Б. Фрактальное обнаружение протяженных малоконтрастных объектов на изображениях // Радиотехника. 2009. № 2. С. 48-57.
6. 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, Dresden, Germany. – German institute of navigation, 2013. P. 779-784.
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. 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.
10. Паршин А.Ю., Паршин Ю.Н. Выделение границ фрактального объекта методом максимального правдоподобия по независимой и зависимой выборкам // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. № 50-2. С. 3–9.