

# Обработка радиолокационных изображений сельскохозяйственных полей с использованием фрактального анализа

С.Е. Яцевич<sup>1</sup>, В.К. Иванов<sup>1</sup>, Р.Э. Пашенко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины  
61085 Харьков, Проскуры 12  
E-mail: sey@ire.kharkov.ua*

<sup>2</sup>*Университет воздушных сил им. Ивана Кожедуба  
61023 Харьков, Сумская 77/79*

В работе рассмотрены вопросы фрактальной обработки данных дистанционного зондирования сельскохозяйственных полей. На основе фрактальных методов обработки радиолокационных изображений (построения поля фрактальных размерностей) показана возможность разделения разных типов природных объектов. При анализе использована информация, полученная самолетным радиолокатором бокового обзора в сантиметровом диапазоне длин волн. Проведенный анализ позволил выделить характерные типы сельскохозяйственных полей.

## Введение

В последнее время природопользователи все чаще применяют данные аэрокосмических радиолокационных съемок в сельском хозяйстве. Их преимущество перед оптическими и ИК съемками заключается в том, что они могут проводиться в любое время суток и независимо от погодных условий.

Физической основой радиолокационных съемок является возможность использования характеристик отражения зондирующих сигналов, излучаемых передатчиком РЛС, от различных объектов на земной поверхности, в том числе и от сельскохозяйственных полей, обладающих различными геометрическими и физико-химическими параметрами в зависимости от типа почв и растительного покрова произрастающего на нем, а также достаточно высокой проникающей способностью радиоволн в исследуемую среду.

Перспективным путем повышения информативности полученных радиолокационных изображений является применение методов фрактальной топологии.

## Фрактальный анализ радиолокационных изображений

Использование фракталов для описания радиолокационных отражений от неровных структур, позволяет учитывать различные пространственные масштабы анализируемой поверхности. В [1-3] представлены исследования фрактальных структур разнообразных поверхностей. Использование таких моделей предполагает учет парадигмы "топология зондируемого пространства - его фрактальная размерность". При этом отраженный радиолокационный сигнал должен описываться в пространстве дробных фрактальных размерностей при топологической инвариантности искусственных целей. Для реализации данной методологии в обнаружении целей необходимо знание фрактальной размерности отраженного сигнала.

Достоверно установлено, что большое число процессов и явлений в физике и окружающей нас природе может быть представлено с использованием фрактальных моделей [1-4]. Независимо от природы или метода построения, у всех фракталов есть ряд общих важных свойств: части фрактальных структур подобны всей структуре в целом, а степень изрезанности или сложности фрактальных структур может быть описана неким характеристическим числом - фрактальной размерностью. Численное значение величины фрактальной размерности характеризует степень заполнения пространства, в котором существует фрактальная система. Отличительной особенностью этой размерности является то, что она не совпадает с евклидовой размерностью пространств

ва, в котором существует фрактальная система, т.е. является дробной. Для нефрактальных объектов (линия, плоскость, шар) размерность принимает целочисленные значения, совпадающие по величине с размерностью пространства.

Понятие фрактальной размерности тесно связывается с понятием фрактальной меры. Эти понятия базируются на определениях, введенных Хаусдорфом и Безиковичем [5, 6]. Определение меры Хаусдорфа опирается на математическую абстракцию практического способа измерения длин, площадей, объемов, когда измеряемый объект покрывается эталонами с определенными мерами [5].

В основе формирования структуры фрактального сигнала лежит гипотеза самоподобия, допускающая бесконечную серию вложения друг в друга одинаковых (гомеоморфных) объектов. При этом объект уменьшается только в размере, но остается гомеоморфным исходному объекту.

Пусть  $M = (M, \rho)$  – метрическое пространство,  $V(M)$  – булева алгебра подмножества  $M$ ,  $E$  – ограниченное множество, причем  $E \subset V(M)$ ,  $h(t)$  – непрерывная неубывающая функция, определенная на неотрицательной полуоси. Функцию  $h(t)$  часто называют хаусдорфовой функцией. Класс всех таких функций обозначим  $H_0$ . Пусть  $d(E)$  обозначает диаметр  $E$  по отношению к метрике  $\rho$ . Под покрытием множества  $E$  в дальнейшем будем понимать набор шаров  $E_j$ , объединение которых содержит  $E$ . Значение  $h(d(E_j))$  будем называть объемом шара  $E_j$ .

С учетом этого, функцию множества  $\mu_\rho^h$ , определяемую равенством

$$\mu_\rho^h(E) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \inf_{d(E_j) \leq \varepsilon} \left\{ \sum_{j=1}^{\infty} h(d(E_j)) \mid E \subseteq \bigcup_{j=1}^{\infty} E_j, \forall j d(E_j) \leq \varepsilon \right\}, \quad (1)$$

называют  $h$ -мерой Хаусдорфа множества  $E$  в метрическом пространстве  $(M, \rho)$  (или относительно метрики  $\rho$ ).

Мера  $\mu_\rho^h$  определена для любого ограниченного множества  $E \subset M$ . Мера может быть равна положительному числу, нулю или бесконечности.

Если хаусдорфова функция определяется как  $h(t) = \frac{\Gamma^m(1/2)}{2^m \Gamma(1+m/2)} t^m = ct^m$ , выражение (1) может быть объяснено следующим образом: мера  $\mu_\rho^h$  определяется нижним пределом суммы объемов  $m$ -мерных шаров, с помощью которых осуществляется покрытие множества  $E$ .

Неотрицательное число  $D$ , при котором хаусдорфова мера  $\mu_\rho^h$  изменяет свое значение с нуля на бесконечность:

$$D = \sup \{D \mid \mu_\rho^d(E) \neq 0\} = \inf \{D \mid \mu_\rho^d(E) = 0\} \quad (2)$$

называется размерностью Хаусдорфа-Безиковича множества  $E \subset M$ .

Значение  $\mu_\rho^d$  при  $d = D$  часто конечно, но может быть равно нулю или бесконечности. Это не существенно при каком именно значении  $d$  величина  $\mu_\rho^d$  изменяется скачком.

Для тех же начальных условий, если внешнюю  $h$ -меру Хаусдорфа определяют выражением

$$\mu_\rho^h(E) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \inf_{d(E_j) \leq \varepsilon} \left\{ N_E(d) d(E_j) \mid E \subseteq \bigcup_{j=1}^{\infty} E_j, \forall j d(E_j) \leq \varepsilon \right\}, \quad (3)$$

где  $N_E(d)$  – наименьшее число шаров диаметра  $d$ , что не превышает размера  $\varepsilon$  (все одинакового диаметра), необходимых для покрытия множества  $E$ , то она называется энтропийной.

В этом случае, если  $\mu_\rho^h(E)$  – энтропийная мера определенная равенством (3), то размерность определенная выражением (2) называется энтропийной. В общем случае энтропийная мера может быть больше размерности Хаусдорфа-Безиковича и не может быть меньше ее.

Введение в теорию множеств размерности Хаусдорфа-Безиковича (выражение (2)) позволило определить класс множеств названных впоследствии фрактальными. При этом множество  $E$  называется фрактальным, если его размерность не является целым числом.

Для анализа фрактальной размерности часто применяют упрощенный вариант размерности Хаусдорфа-Безиковича, для определения которой поступают следующим образом. Выбирают некоторый радиус шара  $\epsilon$  и покрывают множество  $E$ . Пусть  $N(\epsilon)$  минимальное количество шаров радиуса  $\epsilon$  необходимых для покрытия множества  $E$ . Тогда мера  $\mu_p^h(E)$  определяемая по формулам (1) и (3) приближенно равна

$$\mu_p^h(E) \approx N(\epsilon)\epsilon^d. \quad (4)$$

Полагая, что мера  $\mu_p^h(E) > 0$ , и для некоторого  $c > 0$  преобразуем (4) к виду:

$$N(\epsilon) \approx \frac{c}{\epsilon^d}. \quad (5)$$

Логарифмируя правую и левую часть (5), получим:

$$\lg N(\epsilon) = \lg c - d \lg \epsilon, \quad (6)$$

то есть

$$d = -\frac{\lg N(\epsilon)}{\lg \epsilon} + \frac{\lg c}{\lg \epsilon}.$$

Так как  $\lg \epsilon \rightarrow -\infty$  при  $\epsilon \rightarrow 0+$ , то выражая размерность  $d$  из формулы (6) получаем:

$$D = -\lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\epsilon)}{\log(1/\epsilon)}.$$

Фрактальную размерность можно определить, используя метод покрытий с использованием выражения (4).

### Анализ радиолокационных изображений полей сельскохозяйственного назначения

Для анализа радиолокационных изображений с использованием поля фрактальной размерностей (ПФР) использованы данные 3х сантиметрового радиолокатора бокового обзора «МАРС» установленного на борту самолета – лаборатории ИЛ – 18Д (ИРЭ НАНУ) [7].

Радиолокационная съемка выполнена на тестовом полигоне в Харьковской области в течении одного сезона вегетации и представлена снимками, как в весенне - осенний период с полями без растительного покрова, так и во время вегетативного периода (рис.1 - в летний (а) и осенний (б) периоды года).

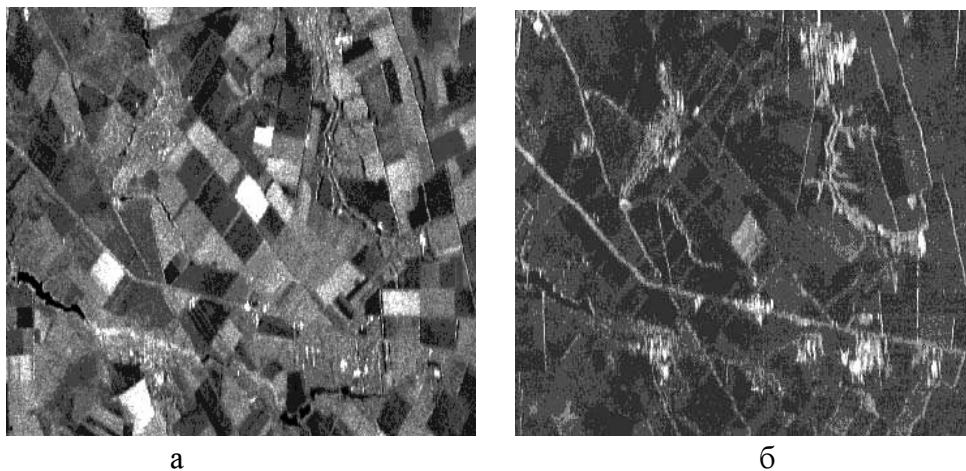


Рис. 1 Радиолокационные изображения тестового полигона в 3х сантиметровом диапазоне выполненные в августе (а) и октябре (б) месяце

Для создания поля локальных фрактальных размерностей анализируемых изображений была разработана специальная программа, которая позволяет выделять характерные кластеры фрактальных размерностей и отображать их определенным (в нашем случае - белым) цветом. Локальные фрактальные размерности строились для «окна» размером 4x4, 8x8, 16x16, 32x32 пикселей с перекрытием 3, 7, 15 и 31 пикселя, т.е. использовалось «скользящее окно».

Программа строит гистограммы локальных фрактальных размерностей, для анализируемого изображения (рис. 1а) показанные на рис.2 (а-г), и позволяет произвольно выбирать диапазоны фрактальных размерностей, используемых при проведении сегментации изображений. На гистограмме по оси X отложена величина фрактальной размерности  $D$ , а по оси Y относительная частота наличия фрактальной размерности  $f_D$  на анализируемом изображении.

Как видно из рис. 2, гистограммы локальных фрактальных размерностей анализируемого изображения имеют ряд характерных особенностей. Локальная фрактальная размерность данного изображения рис.2а изменяется от величины  $D_a = 2,02$  до величины  $D_a = 2,99$ ;  $D_b = 2,02 \div 2,99$ ;  $D_b = 2,78 \div 2,98$ ;  $D_r = 2,86 \div 2,98$ . Относительная частота фрактальной размерности от величины  $D_a = 2,02$  до величины  $D_a = 2,83$  очень мала ( $D_b = 2,02 \div 2,78$ ;  $D_b = 2,78 \div 2,86$ ;  $D_r = 2,86 \div 2,88$ ). Левая часть гистограмм плавно возрастает до величины  $D_a = 2,98$ ,  $D_b = 2,94$ ,  $D_b = 2,95$ ,  $D_r = 2,94$ . Правая часть гистограмм характеризуется резким спадом относительной частоты фрактальной размерности, минимум относительной частоты достигается при  $D_{a-r} = 2,98 - 2,99$ .

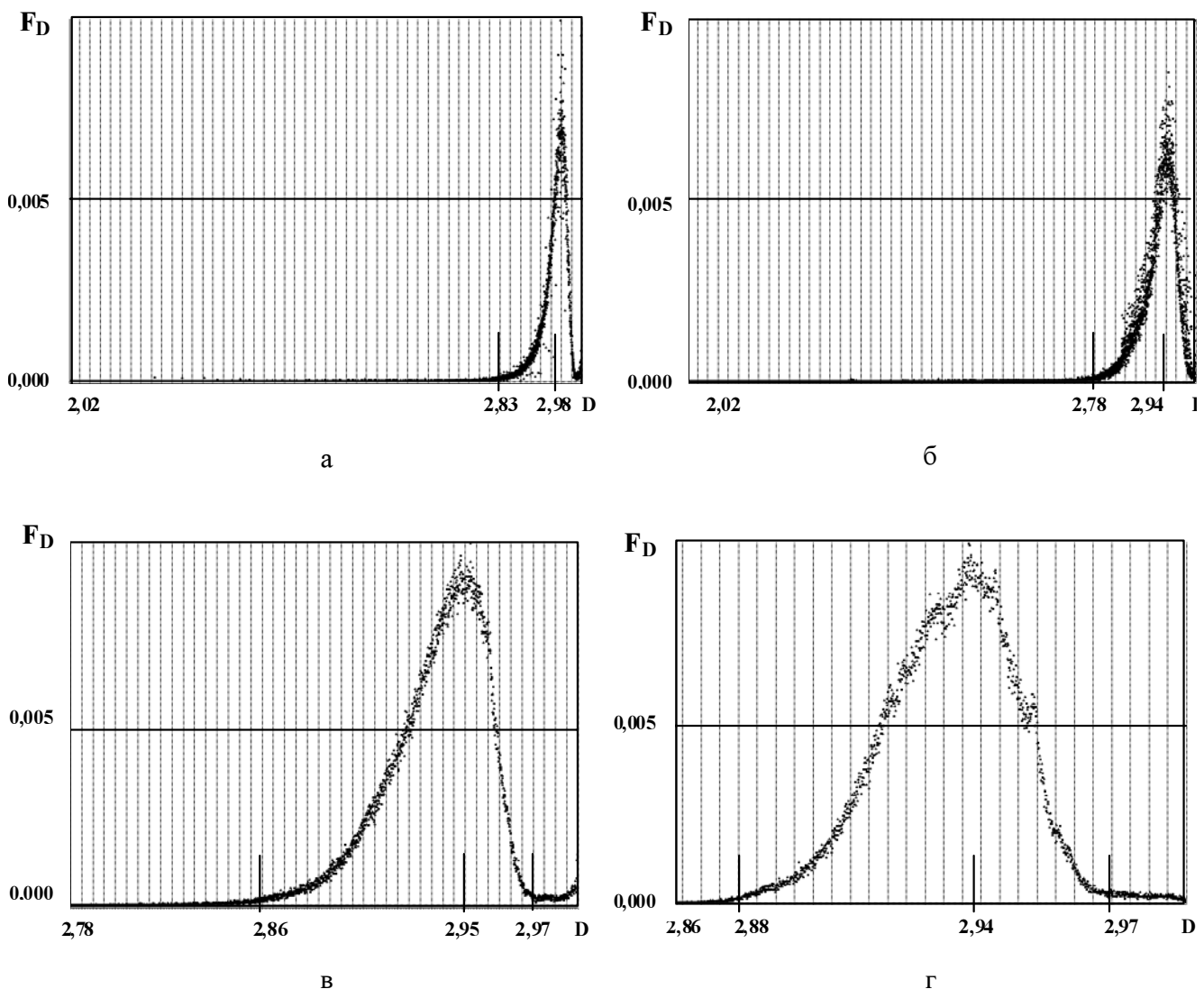


Рис. 2. Гистограммы локальных фрактальных размерностей анализируемого радиолокационного изображения (а – окно 4x4, б – 8x8, в – 16x16, г – 32x32)

Проведем анализ полученных гистограмм локальных фрактальных размерностей анализируемого изображения и построим селективные изображения соответствующих диапазонов изменения величины фрактальной размерности.

Селективные изображения для различных диапазонов значений фрактальной размерности показаны на рис. 3 а-з.

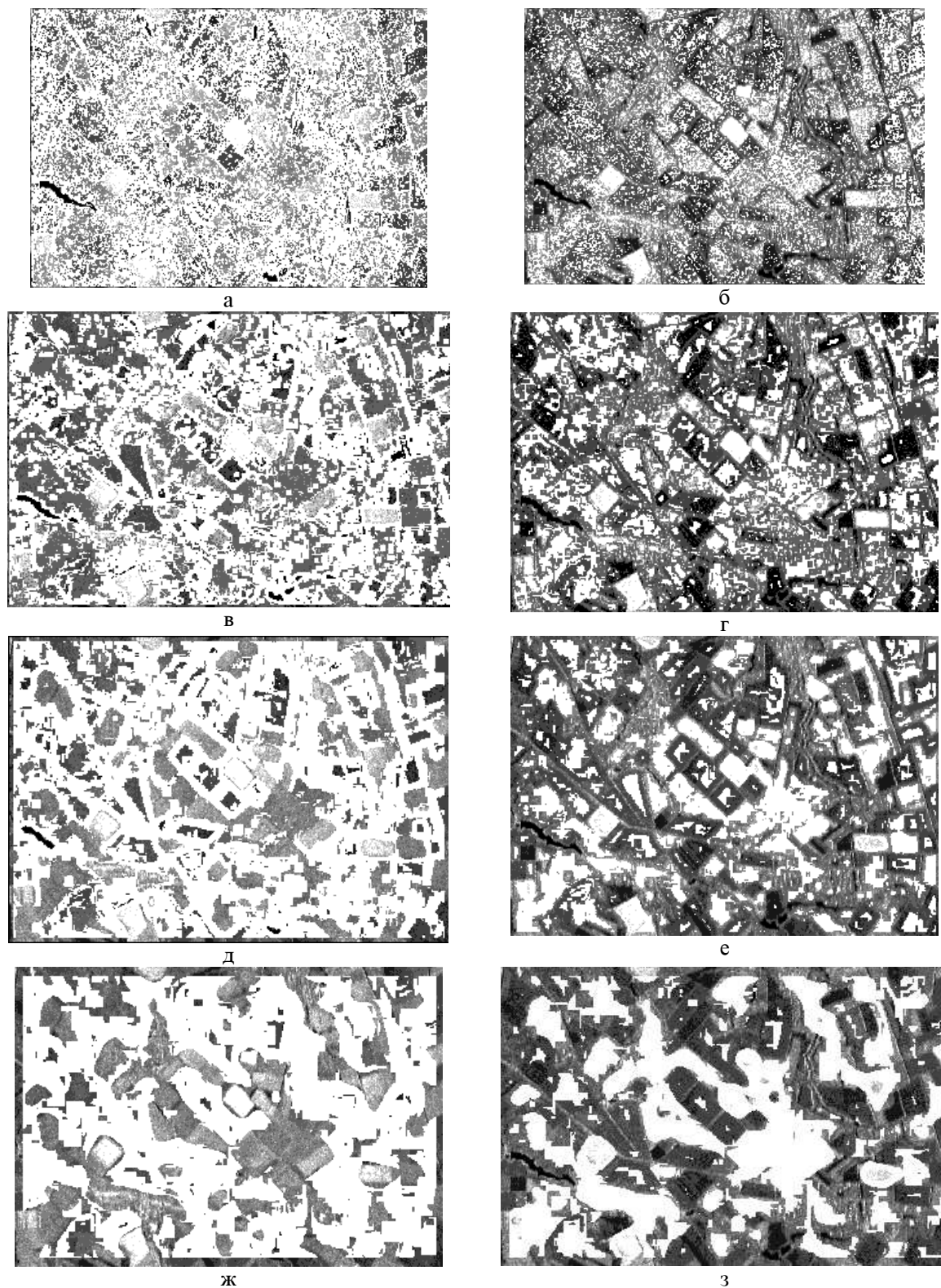


Рис. 3. Селективные изображения сельскохозяйственных полей при различных значениях фрактальной размерности и увеличении размера «окна»

Изображения рис. 3 (а, в, д, ж) соответствуют левым скатам соответствующих гистограмм фрактальных размерностей (возрастанию частоты) с «окнами» 4x4, 8x8, 16x16, 32x32, а рис.3 - б,г,е,з – правым (падению). Белым цветом на изображении показаны области соответствующие заданному диапазону изменения фрактальной размерности.

Проанализируем изменение гистограммы локальных фрактальных размерностей и полученных селективных изображений от величины «окна».

Как видно из хода кривых на рис. 2, с увеличением размера «окна» характер гистограмм изменяется. Увеличение «окна» приводит к выделению особенностей гистограммы, что упрощает сегментацию изображения. Как видно из селективных изображений показанных на рис. 3, с увеличением размера «окна» происходит сглаживание областей анализа, кроме того, исчезают мелкие особенности изображений. Для детального анализа изображений целесообразно выбирать «окна» небольших размеров, очевидно в диапазоне от 8x8 до 16x16.

При этом, как видно из рис. 3, первому диапазону фрактальных размерностей (левый скат) соответствуют некоторые элементы дорог и растительные покровы – засеянные поля, лесополосы, а также населенные пункты и овражно – балочная система; второй диапазон (правый скат) отражает убранные поля, как перепаханные, боронованные, с наличием стерни и без нее.

Рассмотрим особенности фрактального анализа изображений сельскохозяйственных полей при зондировании в другое время года. На рис. 1б показано радиолокационное изображение, полученное при зондировании, рассмотренного выше тестового полигона в октябре месяце в том же диапазоне радиоволн на вертикальной поляризации приема и передачи. На рис. 4 изображена гистограмма локальных фрактальных размерностей для анализируемого изображения при размере «скользящего окна» равном 8x8. Анализ гистограммы локальных фрактальных размерностей позволяет отметить, что диапазон изменения фрактальных размерностей всего изображения уменьшился и изменяется от величины  $D = 2,78$  до величины  $D = 2,98$ , что вероятно обусловлено большей однородностью радиолокационного изображения, связанной с преобладанием квазигладких поверхностей после уборки урожая и механической обработки полей.

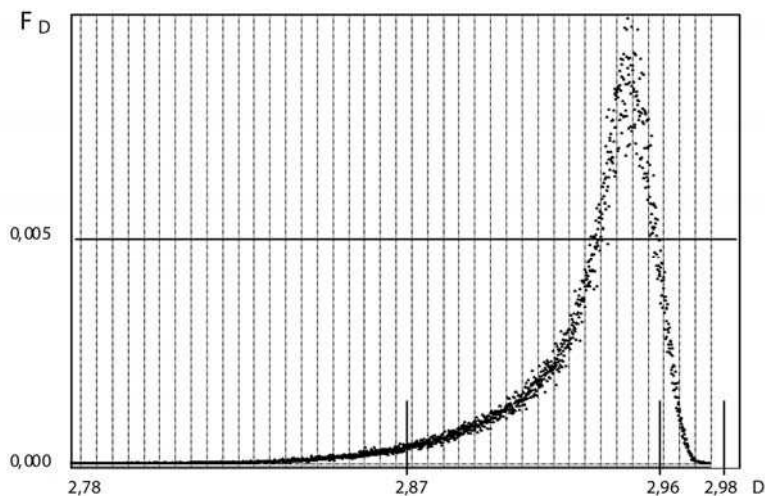
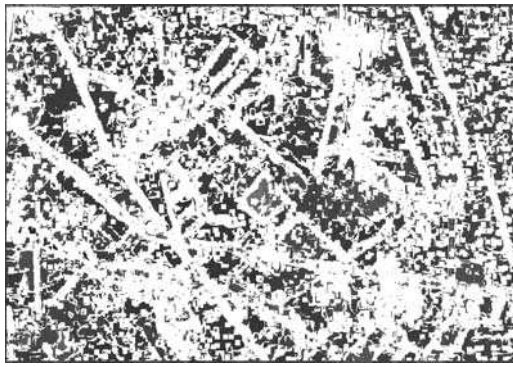
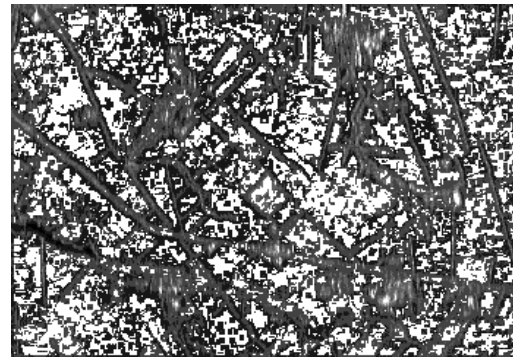


Рис. 4. Гистограмма локальных фрактальных размерностей анализируемого радиолокационного изображения рис.2б («окно» 8x8)

На рис. 5 представлены селективные изображения, полученные для радиоизображения рис.1б при различных диапазонах значений фрактальной размерности. Как видно из рис. 6, первому диапазону фрактальных размерностей (левый скат) соответствуют сельскохозяйственные угодья, элементы дорог, связанные с растительностью и лесополосами, овраги, населенные пункты; второй диапазон (правый скат) отображает убранные поля с неоднородностями, связанными с характером механической обработки, остатками соломы и стерни, а также различным распределением влажности в верхнем слое почв и их диэлектрическими характеристиками.



левый скат



правый скат

Рис. 5. Селективные изображения сельскохозяйственных (рис.2б) полей при различных значениях фрактальной размерности

Сравнение селективных изображений, показанных на рис.3 и рис. 5, позволяет сделать вывод о том, что применение фрактального анализа радиолокационных изображений, полученных в различные периоды года, позволяет расширить возможности разделения сельскохозяйственных полей на характерные типы. Так анализ селективного радиозображения, полученного в летнее время, позволяет уверенно разделить сельскохозяйственные поля, леса, лесополосы и водные поверхности, а также особенности полей с культурной растительностью, такие как разная высота и биомасса, проективное покрытие и пр. Анализ селективного радиоизображения, полученного в осенний период года, позволяет получить дополнительную информацию о характерных параметрах почвенного покрова, таких как различная влажность верхнего слоя почв, характер вспашки, эрозийные процессы и пр.

### Выводы

Показано, что использование фрактальных методов обработки радиолокационных изображений (построение поля фрактальных размерностей) позволяет разделять разные типы природных объектов. Проведенный анализ позволил выделить характерные типы сельскохозяйственных полей, а также другие подстилающие поверхности (леса и лесополосы, дороги, водорозделы, эрозийные особенности местности).

Применение квантования диапазона полученных значений фрактальных размерностей позволяет осуществить сегментирование анализируемого изображения путем выделения кластеров заданного диапазона значений фрактальных размерностей.

Дальнейшим путем повышения информативности радиолокационных изображений сельскохозяйственных полей может быть совместное использование фрактального анализа многоканальных радиоизображений (многочастотных и многополяриметрических), а также учет рельефа местности, на которых они находятся с применением ГИС технологий.

### Литература

1. Федер Е. Фракталы: Пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 254 с.
2. Пащенко Р.Э. Основы теории формирования фрактальных сигналов. – Харьков: ХООО НЭО «Экоперспектива», 2005. – 296 с.
3. Потапов А.А. Фракталы в радиофизике и радиолокации. – М.: Логос, 2002. – 664с.
4. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. – М.: Институт компьютерных исследований, 2002. – 656 с.
5. Турбин А.Ф., Працевитый Н.В. Фрактальные множества, функции, распределения. – К.: Наукова думка, 1992. – 207 с.
6. Хаусдорф Ф. Теория множеств. – М.: Л: ОНТИ, 1937. – 304с.
7. Калмыков А.И., Цымбал В.Н., Курекин А.С. и др. Многоцелевой радиолокационный комплекс исследования Земли “МАРС” // Радиофизика и радиоастрономия, 1998. Т.3. №2. С.119-129.