

УДК 530.1.537.86 + 621.396.96

В.К. Иванов<sup>1</sup>, Р.Э. Пашенко<sup>2</sup>, А.С. Фатеев<sup>1</sup>, А.И. Вовк<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт радиофизики и электроники НАН Украины им. А.Я. Усикова, Харьков

<sup>2</sup>Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба

## АНАЛИЗ ФРАКТАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОТРАЖЕННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

*Проведен анализ фрактальных характеристик отраженных радиолокационных сигналов при зондировании поверхности Земли под малыми углами места. Рассмотрена возможность использования фрактальной размерности для выделения сегментов в выборке, соответствующих отражениям от объектов антропогенного происхождения.*

*радиолокационный сигнал, сегментация, фрактальная размерность*

### Введение

#### Постановка проблемы и анализ литературы.

В настоящее время для анализа сигналов, рассеянных поверхностью Земли под малыми углами места, используют традиционные методы обработки (корреляционный, спектральный).

В данной работе анализируются сигнальные выборки, полученные экспериментально при рассеянии поверхностью Земли излучения РЛС импульсного режима работы сантиметрового диапазона. При этом анализируемая выборка представляет последовательность отраженных сигналов от элементов подстилающей поверхности (технических построек, луга, коттеджей, деревьев, полей, домов и т.д.). Каждый элемент поверхности определенным образом модулирует зондирующий сигнал, изменяя его по амплитуде, фазе, форме, порождает свой спектр частот. Для получения дополнительной информации об объекте зондирования представляется актуальным анализ формы (структуры) сигнала.

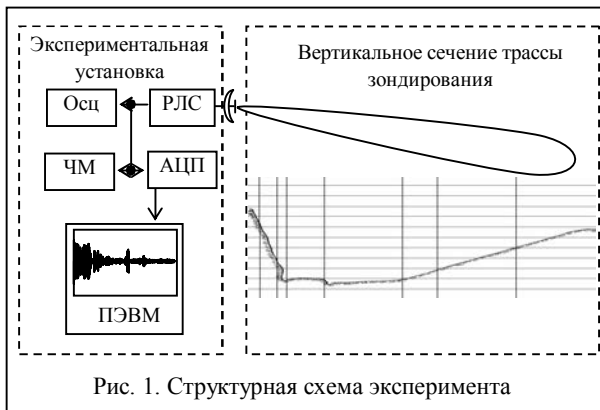
В последние годы перспективным направлением в исследовании разнообразных структур стано-

вится использование новых математических методов, основанных на применении нелинейных процедур (реконструкция аттракторов, фрактальный анализ, нейронные сети, вейвлет-анализ) [1, 2]. Данные методы также успешно применяются для сегментации радиолокационных изображений поверхности Земли [3, 4].

**Цель статьи:** рассмотреть возможность анализа формы (структуры) радиолокационных сигналов, отраженных от подстилающей поверхности, с использованием фрактальной размерности.

### Описание эксперимента

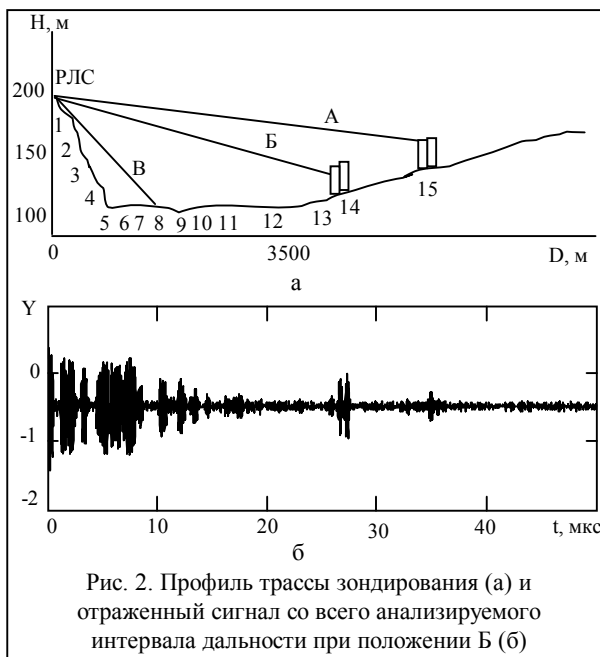
Задача получения отраженных радиолокационных сигналов при зондировании поверхности Земли под малыми углами места со всего интервала дальности (трассы зондирования) решалась аппаратно-программным образом и включала в себя регистрацию сигналов и подготовку к обработке их цифровых кодов. Для получения исходных данных был проведен эксперимент, структурная схема которого показана на рис. 1.



Основными элементами схемы являются: монопольная (простой сигнал, длительность импульса  $\tau_{и} = 0,4$  мкс) радиолокационная станция (РЛС), работающая в сантиметровом (1,8 см) диапазоне длин волн; осциллограф (Осц.); частотомер (ЧМ); аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) и персональный компьютер (ПЭВМ).

На рис. 2, а и б, приведены соответственно вертикальное сечение трассы зондирования (профиль местности) и отраженный сигнал (со всего анализируемого интервала дальности) при зондировании в направлении Б.

На трассе зондирования по дальности (рис. 2, а) находились соответственно: технические постройки 1, луг 2, коттеджи 3, деревья 4, ручей 5, деревья 6, коттеджи 7, деревья 8, река 9, деревья 10, коттеджи 11, поле 12, коттеджи 13, высотные дома 14, 15. Координаты основных элементов трассы (точка стояния РЛС, река 9, высотные дома 14) определялись с использованием приемника системы GPS.



При проведении эксперимента положение диаграммы направленности в азимутальной плоскости фиксировалось (задавалась трасса зондирования), а в угломестной плоскости принимало три значения

верхнее (А на рис. 2, а), среднее (Б на рис. 2, а) и нижнее (В на рис. 2, а). Анализируемый интервал дальности составлял 7,5 км (50 мкс). Отраженный от поверхности аналоговый радиолокационный сигнал переносился в РЛС на промежуточную частоту  $f_{пр} = 7,5$  МГц в полосе 5 МГц, затем преобразовывался в АЦП (частота дискретизации  $f_{д} = 100$  МГц, разрядность 1024 дискрета) в цифровую форму. Полученный цифровой код посредством соответствующего программного обеспечения АЦП представлялся в виде текстового файла, доступного для различных компьютерных математических пакетов. Осциллограф и частотомер использовались соответственно для контроля величин амплитуды и частоты на выходе усилителя промежуточной частоты РЛС.

Зафиксированные в цифровом виде реализации отраженного радиолокационного сигнала позволяют провести анализ его формы.

### Анализ экспериментальных результатов

Визуальный анализ исходной реализации (см. рис. 2, б) не позволяет непосредственно выявить скрытые особенности и закономерности сигнала, а также выделить фоновые процессы. Отраженный радиолокационный сигнал по дальности будем рассматривать как последовательность следующих друг за другом участков, обладающих на некотором временном интервале постоянными свойствами (структурная модель сигнала). При этом задача сегментации сводится к выделению локальных неоднородностей в сигналах со сложной структурой. Будем понимать под сегментацией процесс разделения сигнала на участки (сегменты), соответствующие некоторым структурным единицам. Предлагается метод сегментации сигналов на основе исследования фрактальных размерностей, рассчитанных в пределах “скачущего окна”. Критерием сегментации в данном случае является изменение формы сигнала, математической характеристикой которой в этой работе служит фрактальная размерность.

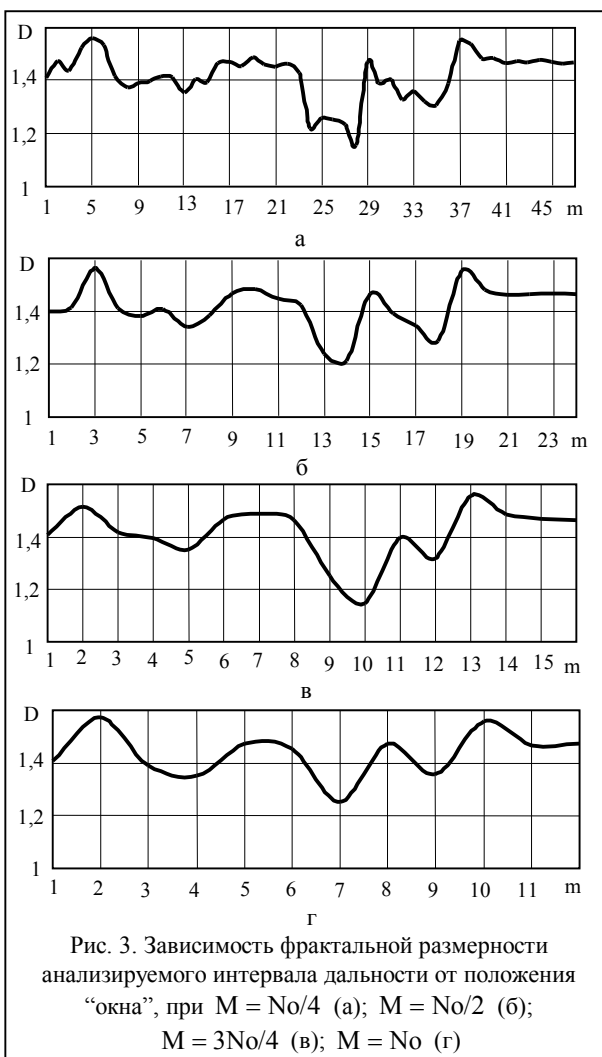
Для анализа отраженного радиолокационного сигнала со всего интервала дальности предлагается использовать метод “скачущего окна” [5]. Исходная выборка анализируется с помощью “окна” определенного размера ( $N_0$ ), которое перемещается (“скачет”) на  $M = kN_0$  элементов “окна”, где  $k$  – коэффициент “скачка”, т.е. первое положение “окна” содержит значения с 1-го до  $N_0$ -го элемента анализируемой выборки, второе – с  $(kN_0 + 1)$ -го до  $(k+1)N_0$ -го, третье – с  $(2kN_0 + 1)$ -го до  $(2k+1)N_0$ -го и т.д. Размер “окна” выбрался равным десяти длительностям импульса  $N_0 = 10 \tau_{и} f_{д} = 400$ .

Проведем анализ фрактальных характеристик отраженных радиолокационных сигналов при зондировании поверхности Земли под малыми углами места.

На рис. 3 показана зависимость фрактальной размерности  $D$  от положения “окна”  $m$ . По оси абсцисс отложены положения “скачущего окна”, а по оси ординат, соответствующие “окнам”, фрактальные размерности. Для расчета фрактальной размерности применялся известный метод покрытия [6].

В качестве исходной анализируемой выборки использовался отраженный от подстилающей поверхности радиолокационный сигнал при среднем угле места зондирования (направление Б), показанный на рис. 2, б.

На рис. 3, а представлено изменение величины фрактальной размерности, полученное при величине “скачка” равной  $M = N_0 / 4 = 100$  ( $k = 1/4$ ), т.е. перекрытие составляло три четверти размера “окна”; на рис. 3, б –  $M = N_0 / 2 = 200$  ( $k = 1/2$ ), “окна” перекрываются на половину; на рис. 3, в –  $M = 3 N_0 / 4 = 300$  ( $k = 3/4$ ), перекрытие составляет четверть; на рис. 3, г –  $M = N_0 = 400$  ( $k = 1$ ), “окна” не перекрываются. Кривые на рис.3 построены в результате усреднения фрактальных размерностей, полученных при обработке десяти выборок, зафиксированных в различные моменты времени одного дня, в который проводился эксперимент.



Таким образом, при анализе выборки по дальности формируется последовательность сегментов, каждому из которых поставлена в соответствие своя фрактальная размерность, которая может в каком-то смысле характеризовать форму сигнала в сегменте. Данная последовательность подвергалась дальнейшему анализу.

На всех четырех рисунках видно, что на дальности 3700 – 3800 м, где расположены высотные дома (22 – 26 положение “окна” на рис. 3, а; 12, 13 – на рис. 3, б; 8, 9 – на рис. 3, в и 7 – на рис. 3, г) наблюдается снижение величины фрактальной размерности. Таким образом, отраженный от домов сигнал имеет отличную по сравнению с другими сигналами структуру, что объясняется различным характером рассеяния волн на разных элементах подстилающей поверхности. Из рис. 3, а – г также видно, что увеличение величины “скачка” приводит к сглаживанию кривой фрактальных размерностей. Меньшее значение “скачка”  $M = N_0 / 4 = 100$  (рис. 3, а) позволяет более точно оценивать структуру отраженного сигнала по дальности. Максимальное значение “скачка”  $M = N_0 = 400$  (рис. 3, г) позволяет уменьшить время на обработку сигнала со всего анализируемого интервала дальности, так как необходимо минимальное количество “скачков” “окна”. Для обеспечения компромисса между временем обработки и точностью анализа фрактальных характеристик отраженного сигнала по дальности рекомендуется величину “скачка” выбирать равную  $M \leq N_0/2$  (коэффициент “скачка”  $k \leq 1/2$ ).

Такой анализ отраженного радиолокационного сигнала со всего интервала дальности позволяет сделать вывод, что на расстоянии 3700-3800 м от РЛС расположен объект (высотные дома 14 на рис. 2, а), сигнал от которого имеет структуру, которая выделяется на фоне других по значению фрактальной размерности.

Проведем анализ фрактальных характеристик отраженных радиолокационных сигналов при зондировании поверхности Земли под другими углами места. На рис. 4, а и б приведены соответственно отраженный сигнал со всего анализируемого интервала дальности при высоком угле места зондирования (направление А) и изменение фрактальной размерности  $D$  в зависимости от положения “окна” при размере  $N_0 = 400$  и величине “скачка” равной  $M = N_0 / 4 = 100$ .

Как видно на рис. 4, б снижение фрактальной размерности наблюдается на дальности 5100-5300 м (32– 36 положение “окна”), а на дальности 3700-3800 м величины фрактальной размерности не отличаются от фоновых. Это обусловлено тем, что при увеличении угла места зондирования в направлении максимума диаграммы направленности находятся высотные дома 15, которые расположены дальше, чем дома 14, но не

отличаются по характеристикам рассеяния от них и также характеризуются малыми значениями фрактальных размерностей из-за схожести форм отраженных сигналов. Высотные дома 14 попадают в нижнюю часть диаграммы направленности. Такое взаимное расположение диаграммы направленности и высотных домов 14 приводит к тому, что отраженный сигнал от них изменяет свою форму и отличается от полученного при зондировании в положении Б.

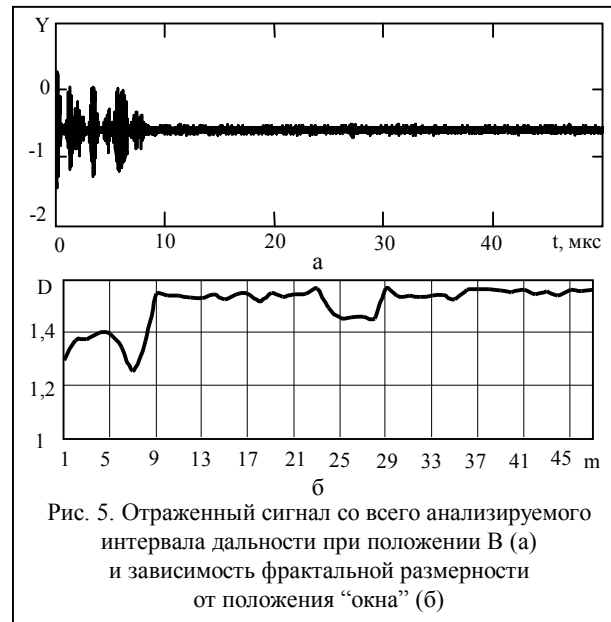


Таким образом, сравнение выборок сигналов и последовательностей фрактальных размерностей при высоком и среднем угле места зондирования показывает, что сигнал с меньшей фрактальной размерностью получается при прямом облучении антропогенного объекта. Попадание объекта в нижнюю часть диаграммы направленности приводит к изменению формы отраженного от него сигнала и, соответственно, фрактальной размерности.

На рис. 5, а и б приведены те же зависимости, что и на рис. 4, а и б, но при низком угле места зондирования (направление В).

Анализ рис. 5, а показывает, что при уменьшении угла места зондирования (положение В) отраженные сигналы приходят с дальностями до 1000 м, а малые значения фрактальной размерности соответствуют отражениям от коттеджей 7 (рис. 5, б). Необходимо отметить, что на дальности 3700 – 3800 м (22 – 26 положение "окна") наблюдается снижение фрактальной размерности по сравнению с фоновыми значениями. Как было показано выше, на этой дальности находятся высотные дома 14.

Таким образом, использование фрактальной размерности при сегментации выборок позволило выделить недоступные визуальному анализу скрытые закономерности формы отраженного радиолокационного сигнала.



## Выводы

1. Основой анализа фрактальных характеристик отраженных радиолокационных сигналов при зондировании поверхности Земли под малыми углами места является разработанный метод сегментации на основе исследования фрактальных размерностей сигналов, рассчитанных в пределах "скачущего окна".

2. Для обеспечения компромисса между временем обработки и точностью анализа фрактальных характеристик отраженного сигнала рекомендуется величину "скачка" выбирать равной  $M \leq N_0/2$ .

3. Применение разработанного метода сегментации с использованием фрактальной размерности позволяет выделить скрытые закономерности формы отраженного радиолокационного сигнала, недоступные визуальному анализу.

## Список литературы

1. Короленко П.В., Маганова М.С., Меснянкин А.В. *Новационные методы анализа стохастических процессов и структур в оптике*. – М.: МГУ, НИИ ЯФ, 2004. – 82 с.
2. Грушенко М.В., Пащенко Р.Э., Шаповалов А.В. *Мониторинг морской поверхности с использованием метода "К-дерева" поля фрактальных размерностей // Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2006. – № 1/2 (19). – С. 100-104.
3. *Использование теории фракталов для анализа радиолокационных изображений поверхности Земли / В.К. Иванов, Р.Э. Пащенко и др. // Успехи современной радиоэлектроники*. – 2006. – № 5. – С. 17-45.
4. *Фрактальный анализ процессов, структур и сигналов / Под ред. Р.Э. Пащенко*. – Х.: ХООО "НЭО "Эко-Перспектива", 2006. – 348 с.
5. Федер Е. *Фракталы*. – М.: Мир, 1991. – 254 с.

Поступила в редколлегию 6.03.2007

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.В. Полярус, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

