

Данные проверочные полиномы могут быть использованы при разработке устройств формирования ГМВП, основанных на регистрах сдвига с линейными обратными связями.

Также представленный алгоритм может найти применение при разработке методов формирования псевдослучайных последовательностей, допускающих аналитическое представление в конечных полях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юдачев С. С., Калмыков В. В. Ансамбли последовательностей GMW для систем с кодовым разделением каналов // „Наука и образование: электронное научно-техническое издание“. 2012. № 1. <<http://technomag.edu.ru/issue/264798.html>>.
2. Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985. 384 с.
3. Ипатов В. П. Периодические дискретные сигналы с оптимальными корреляционными свойствами. М.: Радио и связь, 1992. 152 с.
4. Свердлик М. Б. Оптимальные дискретные сигналы. М.: Сов. радио, 1975. 200 с.
5. Стародубцев В. Г. Алгоритм формирования последовательностей Гордона-Миллса-Велча // Изв. вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55, № 7. С. 5—9.
6. Питерсон У., Уэлдон Э. Коды, исправляющие ошибки / Под ред. Р. Л. Добрушина и С. И. Самойленко. М.: Мир, 1976. 596 с.
7. Стародубцев В. Г., Павлов О. А. Помехоустойчивые коды в телекоммуникационных и информационных системах. Вып. 1. Конечные поля Галуа: элементы теории и практики: Учеб. пособие. СПб: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2003. 252 с.

#### Сведения об авторе

**Виктор Геннадьевич Стародубцев** — канд. техн. наук, доцент; ООО „Мультисервисные сети и Телекоммуникации“, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра беспроводных телекоммуникаций; E-mail: [vgstarod@mail.ru](mailto:vgstarod@mail.ru)

Рекомендована кафедрой  
беспроводных телекоммуникаций НИУ ИТМО

Поступила в редакцию  
20.12.12 г.

УДК 620.178

А. А. ВИНОГРАДОВА, А. О. КАЗНАЧЕЕВА, В. М. МУСАЛИМОВ

### ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТОМОГРАММ ГОЛОВНОГО МОЗГА

Исследованы возможности применения фрактального анализа для оценки структуры объектов. Представлены результаты расчета показателя Херста для магнитно-резонансных томограмм головного мозга, вычислены параметры распределений, выполнена оценка вероятности попадания в доверительные интервалы. Проведено стохастическое моделирование для нормального и равномерного законов распределения, проанализированы особенности показателя Херста и возможность использования его в качестве диагностического показателя.

**Ключевые слова:** показатель Херста, фрактальный анализ, томография, распределение, моделирование.

**Введение.** Качество получаемых в клинической практике магнитно-резонансных томограмм и оценка диагностических признаков выполняются визуально на основе экспертной оценки. Субъективность восприятия изображений и сложность анализируемых структур

делают актуальным поиск универсальных количественных оценок. Фрактальный анализ используется в задачах анализа сигналов различной природы [1—6], в том числе в рентгеновских и оптических методах [7—8]. Ряд анатомических структур также характеризуется фрактальными свойствами (например, артерии головного мозга, легкие, граница белого вещества и коры головного мозга), проявляющимся на изображениях различной модальности, в том числе магнитно-резонансных томограммах. В большинстве работ используется фрактальный подход для решения частных задач: оценки микроструктурных изменений [9, 10], снижения зашумленности данных [11, 12], анализа функций организма [13, 14]. Цель настоящей работы — исследование возможностей использования фрактальных оценок для анализа структур головного мозга и получения новой диагностической информации.

Многие изображения и сигналы характеризуются полной или случайной повторяемостью в различных масштабах. Для их анализа целесообразно использовать фрактальную размерность  $D$  (размерность Хаусдорфа), позволяющую оценить сохраняемость геометрии или статистических характеристик при изменении масштаба. Для двумерного сигнала фрактальная размерность связана с показателем Херста  $H$  как  $D = 2 - H$ , где значение  $H$  определяется эмпирически [2]:

$$R / S = (\alpha N)^H, \quad (1)$$

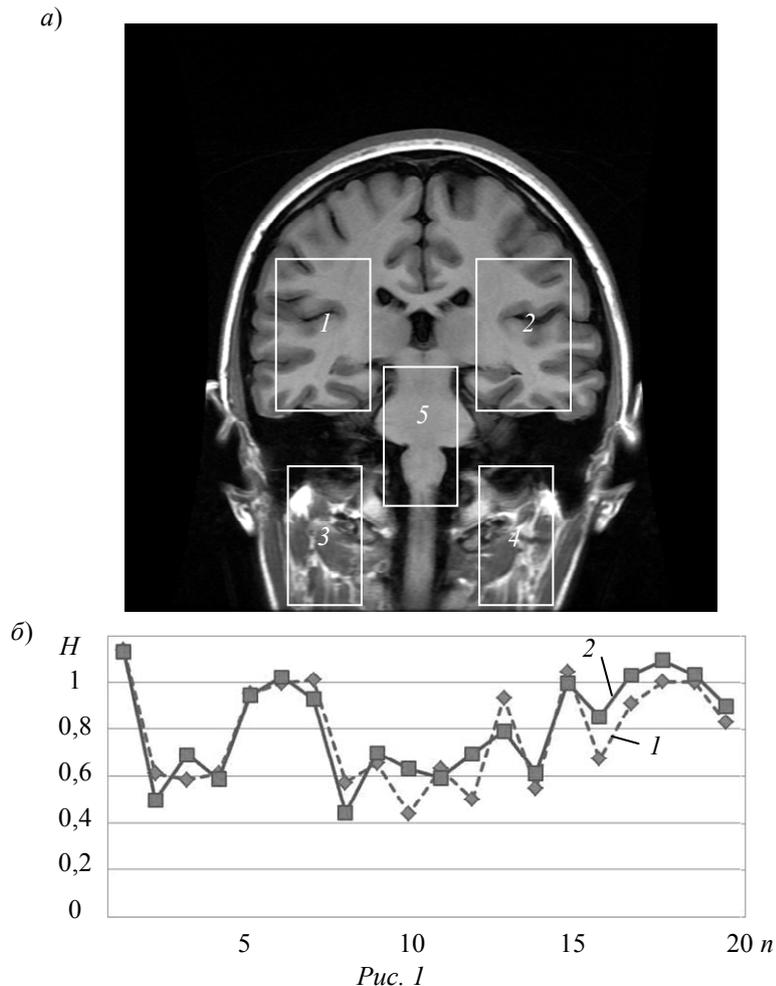
где  $R$  — размах вариации;  $S$  — стандартное отклонение;  $N$  — длина выборки;  $\alpha$  — постоянная.

Параметры самоподобия  $H$  и  $D$  характеризуют устойчивость статистического явления, или долгосрочную зависимость стохастического процесса. Для большинства сигналов  $0 < H < 1$ . В случае  $H = 0,5$  свойства самоподобия процесса отсутствуют и корреляции между событиями нет; при  $H > 0,5$  устойчивость процесса выше среднего, и он является самоподобным (фрактальным). Чем ближе показатель Херста к единице, тем более выражены фрактальные свойства и для самоподобных процессов с долгосрочной зависимостью  $0,7 < H < 0,9$ . При  $H < 0,5$  ряд более изменчив, чем случайный, поскольку состоит из частых циклов „спад—подъем“.

**Расчет показателя Херста для некоторых областей томограмм головного мозга.** Анализируемые МР-томограммы головного мозга получены на томографе Signa HDx с полем 3 Тл (General Electric). Все изображения получены в корональной плоскости при помощи импульсной последовательности с подавлением сигнала от ликвора (FLAIR). Протокол исследования: время появления эхо-сигнала  $TE = 11$  мс; время повторения импульсов  $TR = 3300$  мс; ширина полосы пропускания 32 кГц; число усреднений данных  $NEX = 1$ ; матрица  $448 \times 224$ ; поле сканирования 220 мм; толщина среза 5 мм. Экспериментальные данные в формате DICOM 3.0 получены для 20 здоровых добровольцев. С целью сохранения всего объема экспериментальной информации (в том числе интенсивности сигнала и сведений об условиях измерений) конвертация форматов не выполнялась.

Значения показателя Херста и фрактальной размерности рассчитаны в пакете Fractan для исходной матрицы изображения. На рис. 1, а приведены анализируемые области: левый (1) и правый (2) гиппокампы, область мягких тканей шеи слева (3) и справа (4), область ствола (5). Матрица фрагментов томограмм трансформировалась к одномерной выборке путем суммирования элементов матриц по строкам [4]. Все изображения содержат случайный шум, включающий аппаратную, вычислительную и физиологическую (вызванную пульсацией в организме жидкостей — кровь, ликвор) составляющие [11].

Для анализируемых областей выполнялась оценка разброса рассчитанных показателей Херста (рис. 1, б). Во всех случаях разность полученных показателей Херста областей 1 и 2 превышает  $\Delta H$  для областей 3 и 4, что может объясняться наличием пульсирующих сосудов в плоскости среза. Структуры в области 5 относительно симметричны и однородны, что может объяснить узкий диапазон рассчитанных значений  $H$ .



Можно предположить: чем ближе значения показателей Херста областей 1 и 2, тем симметричней полушария головного мозга. Разность рассчитанных показателей некоторых пациентов ( $n$ ) существенна, однако это может быть проявлением как структурных изменений, так и погрешности измерений. Диапазон рассчитанных показателей для области 1 составил 0,44—1,04, для 2 — 0,44—1,13, для 3 — 0,44—1,04, для 4 — 0,53—0,87, для 5 — 0,5—1,03. Результаты, находящиеся ближе к единице, показывают наличие устойчивости и самоподобия. В других случаях имеется либо слабо выраженная фрактальность, либо трендонеустойчивость, связанная с зашумленностью изображений.

Анализ областей 3 и 4 различных пациентов показал более близкие значения показателя Херста, что объясняется большим размером анализируемых структур и их однородностью.

Вариации рассчитанных оценок определяются не только асимметричностью головного мозга пациента, но и углом среза. В некоторых случаях срезы заложены несимметрично относительно исследуемых структур, что вызвано субъективностью восприятия изображения оператором и усложняет дальнейший выбор области анализа и сравнение характеристик для двух полушарий. Результат фрактальной оценки также существенно зависит от размера выбранной для анализа области.

**Стохастический анализ полученных результатов.** Оценим математическое ожидание и дисперсию полученных показателей Херста. Моделирование осуществлялось в пакете MatLab с использованием гипотез о распределении данных по нормальному и равномерному законам распределения. Математическое ожидание  $M$  вычисляется по формуле:

$$M(x) = \sum_{i=1}^{\infty} x_i p_i, \quad (2)$$

где  $x_i$  — случайная величина,  $p_i$  — статистическая вероятность.

Среднее квадратическое отклонение имеет вид:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad (3)$$

где  $\bar{x}$  — среднее значение случайной величины.

В таблице приведены вычисленные значения  $M$  и  $\sigma$  для разных областей, а также указаны минимальное ( $a$ ) и максимальное ( $b$ ) значения для случая равномерного распределения.

Анализируемая область	$M$	$\sigma$	$a$	$b$	Вероятность попадания в интервал		
					(0 0,5]	(0,5 1]	(1 1,5)
1	0,7634	0,2072	0,4406	1,0480	0,0982	0,7420	0,1591
2	0,8090	0,2115	0,4446	1,1330	0,0719	0,7449	0,1826
3	0,6875	0,1317	0,4415	1,0421	0,0772	0,9139	0,0088
4	0,7075	0,0968	0,5330	0,8704	0,0161	0,9827	0,0013
5	0,7929	0,1234	0,4992	1,0271	0,0088	0,9446	0,0466

Данные, полученные в результате расчетов, были использованы при стохастическом моделировании для всех анализируемых областей (рис. 2, а). Полученные зависимости показывают, что в случае равномерного распределения диапазон значений показателя Херста (рис. 2, в) будет меньше, чем при нормальном законе распределения (рис. 2, б). Также во втором случае будет присутствовать больше результатов, свидетельствующих о случайности процессов ( $H < 0,5$ ).

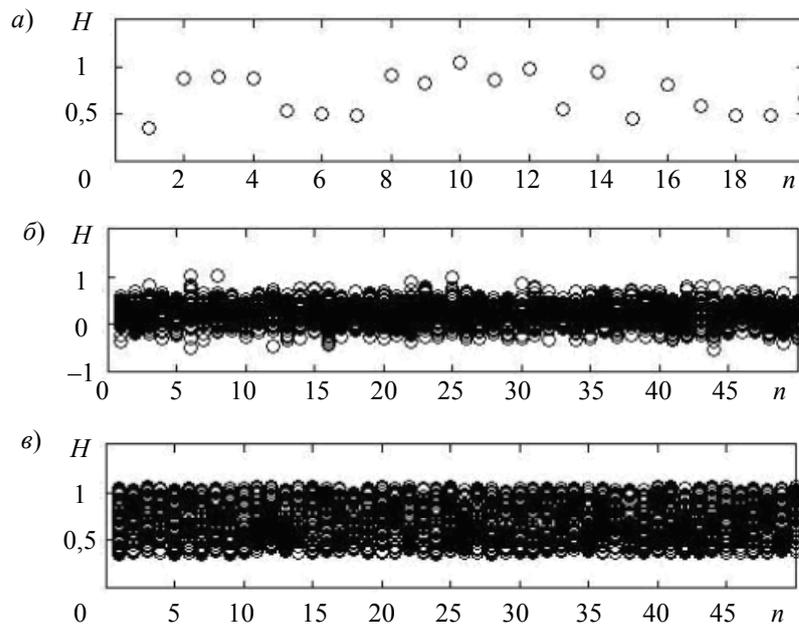


Рис. 2

Для всех рассмотренных областей характерно нахождение математического ожидания в пределах  $0,5 < M < 1$ . Отсюда следует, что для здоровых добровольцев это — зона устойчивых статистических признаков применительно к показателю  $H$ . Вероятность попадания в диапазон (0,5—1) по статистике достаточно велика (более 75 %) и существенно превышает вероятность попадания показателя Херста в диапазон (0—0,5), не превышающую 10%. В то же время можно предположить, что для пациентов с анатомической асимметрией структур картина будет противоположной. В определенной степени это согласуется с исследованиями авторов [14], которые показали, что для крыс с эпилепсией рассчитанное значение меньше 0,5, а для здоровых животных  $H > 0,5$ . Можно надеяться, что для людей сохранится такая же

зависимость. И более того, сам показатель Херста может быть использован в качестве значимого диагностического параметра.

Вероятность попадания рассчитанных показателей в трендонеустойчивую зону для здоровых пациентов менее 10 %. Вероятность в случае, когда  $H > 1$ , может составлять, по полученным данным, до 18 %. Результат моделирования плотности вероятности (рис. 3) показывает близость средних значений для областей 1, 2 и 5, однако для структур гиппокампов дисперсия показателей будет существенно больше. Для более однородных областей 3 и 4 средние значения также будут близкими.

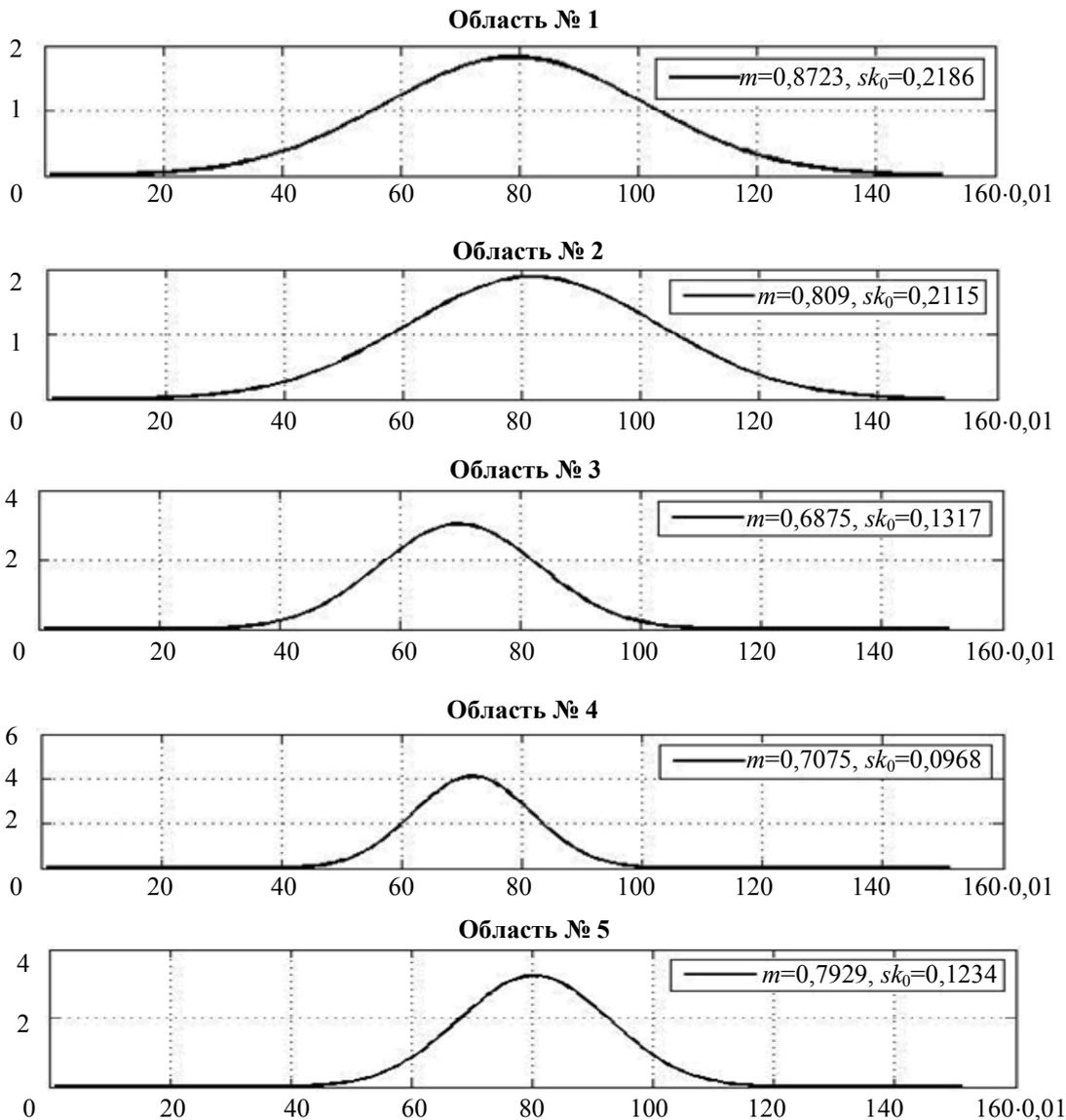


Рис. 3

**Заключение.** Фрактальная природа различных биологических структур и характер измерений в МР-томографии позволяют использовать количественные фрактальные оценки для анализа отображаемых тканей. При анализе МР-томограмм головного мозга здоровых пациентов выявлено, что зона устойчивых статистических признаков с точки зрения показателя Херста  $H$  находится в пределах  $0,5 < M < 1$ . Для пациентов с наличием структурных изменений ожидается противоположная вероятность попадания в упомянутые зоны. В настоящей работе предпочтение при анализе отдавалось нормальному закону распределения, полученные результаты согласуются с исследованиями, выполненными другими авторами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антипов О. И., Нагорная М. Ю. Показатель Херста биоэлектрических сигналов // Инфокоммуникационные технологии. 2011. Т. 9, № 1. С. 75—77.
2. Бортников А. Ю., Минакова Н. Н. Текстурно-фрактальный анализ микроскопических срезов образцов композиционных материалов, наполненных техническим углеродом // Изв. Томского политехнического университета. 2006. Т. 309, № 6. С. 64—67.
3. Виноградова А. А., Мазурова У. С. Фрактализация одномерных объектов // V Сессия научной школы „Проблемы механики и точности в приборостроении“. 2012. С. 24—30.
4. Коваленко П. П., Мусалимов В. М. Прямая и обратная задачи паттернизации сигналов и изображений // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 1. С. 38—45.
5. Окунев В. В., Потапов А. С. Оптимизация разбиения изображения в форме квадродерева по критерию минимальной длины описания во фрактальном сжатии // Науч.-техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики. 2011. № 3 (73). С. 34—39.
6. Потапов А. А., Герман В. А. Современные методы экспериментальных исследований фрактальных объектов и физических процессов // Сб. статей „Синергетика геосистем“. М.: ИГЕМ РАН, 2007. С. 134—141.
7. Гуров И. П., Киракозов А. Х. Анализ методов обработки интерферометрических данных в спектральной оптической когерентной томографии // Науч.-техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 2 (78). С. 21—24.
8. Кривых А. В., Сизиков В. С. Обработка дискретных спектров с помощью алгоритма интегральной аппроксимации // Науч.-техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики. 2011. № 5 (75). С. 14—18.
9. Молчатский С. Л., Молчатская В. Ф. Фрактальный анализ структуры вентромедиального ядра гипоталамуса мозга человека в пре- и постнатальном онтогенезе // Новые исследования. 2010. Т. 1, № 24. С. 60—67.
10. Трофимова А. В., Гайкова О. Н., Ананьева Н. И. и др. Периваскулярные пространства: морфология, нейровизуализация, атипичные варианты // Лучевая диагностика и терапия. 2011. № 2. С. 37—44.
11. Казначеева А. О. Фрактальный анализ зашумленности магнитно-резонансных томограмм // Альманах современной науки и образования. 2013. № 2. С. 73—76.
12. Казначеева А. О. Разработка методов и средств шумоподавления в томографии: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб, 2006. 19 с.
13. Гаязова Н. Т., Зарипов Р. Р. Стохастическая оценка скорости патологического тремора человека с помощью показателя Херста // Филология и культура = Philology and Culture. 2008. № 15. С. 18—20.
14. López T., Manjarrez J., Plascencia N. et. al. Fractal analysis of EEG signals in the brain of epileptic rats, with and without biocompatible implanted neuroreservoirs // Applied Mechanics and Materials. 2009. Vol. 15. P. 127—136.

**Сведения об авторах**

- Алла Алексеевна Виноградова** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра мехатроники; E-mail: vinogradova\_a@list.ru
- Анна Олеговна Казначеева** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии; E-mail: a\_kazn@mail.ru
- Виктор Михайлович Мусалимов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра мехатроники; заведующий кафедрой E-mail: musvm@yandex.ru

Рекомендована кафедрой  
мехатроники

Поступила в редакцию  
01.03.13 г.