

ИССЛЕДОВАНИЕ ФРАКТАЛЬНЫХ СВОЙСТВ РАДИОСИГНАЛОВ

Проведена оценка фрактальных свойств радиосигналов. Показано, что для классификации входных сигналов можно использовать такие параметры, как корреляционная и фрактальная размерности, корреляционная энтропия и показатель Херста. Экспериментально определены диапазоны изменения фрактальных параметров для сигналов с различными видами модуляции.

Ключевые слова: цифровая обработка, фрактальные свойства, классификация входных сигналов.

Интенсивное развитие средств связи и отсутствие эффективных средств контроля радиочастотного спектра приводят к образованию различного рода взаимных помех. Для разрешения проблемы частотного регулирования необходимы эффективные системы контроля радиоэлектронной обстановки. Существующие системы радиомониторинга [1] требуют участия опытного оператора и не могут работать в автоматическом режиме. Развитие методов цифровой обработки и элементной базы позволяет начать разработку автоматических систем радиомониторинга, не требующих участия оператора.

По мнению авторов, стройная теория автоматического обнаружения и классификации случайных сигналов пока отсутствует. Данная работа направлена на исследование фрактальных свойств радиосигналов. Интерес к фрактальному анализу обусловлен тем, что такой вид обработки позволяет оценить интегральные характеристики сигналов, которые не зависят от момента прихода и рассчитываются для всей длительности сигнала.

Проведенные исследования демонстрируют возможность использования фрактальной обработки в качестве одного из признаков при классификации входных сигналов в автоматической системе радиомониторинга. Наиболее значимым результатом, полученным при этом, является определение диапазонов изменения фрактальных параметров для сигналов с различными видами модуляции.

Корреляционная размерность. Определение корреляционной размерности – один из наиболее широко используемых методов оценки размерности любого аттрактора.

Чтобы определить корреляционную размерность D_r , необходимо сначала рассчитать корреляционный интеграл C_r [2], поскольку он пропорционален D_r согласно степенному закону:

$$C_r \propto r^{D_r}, \quad (1)$$

Сам же корреляционный интеграл определяется с помощью следующего выражения:

$$C_r = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N \theta(r - |X_i - X_j|), \quad (2)$$

где θ – функция Хэвисайда; r – радиус N -мерной гиперсферы, центр которой будет совпадать с каждой точкой в пределах аттрактора.

Графический подход к оценке корреляционного интеграла является более наглядным (рис. 1).

Сначала выбирается одна любая точка, принадлежащая аттрактору. Затем гиперсфера выбранного радиуса r помещается в эту точку так, как показано на рис. 1. В трехмерном пространстве гиперсфера будет просто сфе-

рой, а в двумерном – окружностью. Далее центр гиперсферы последовательно перемещается от точки к точке вдоль аттрактора, а функция Хэвисайда подсчитывает количество точек, которые попали в область гиперсферы (рис. 2). Корреляционный интеграл для гиперсферы выбранного радиуса r будет вычислен тогда, когда для каждой точки аттрактора будет вычислена функция Хэвисайда.

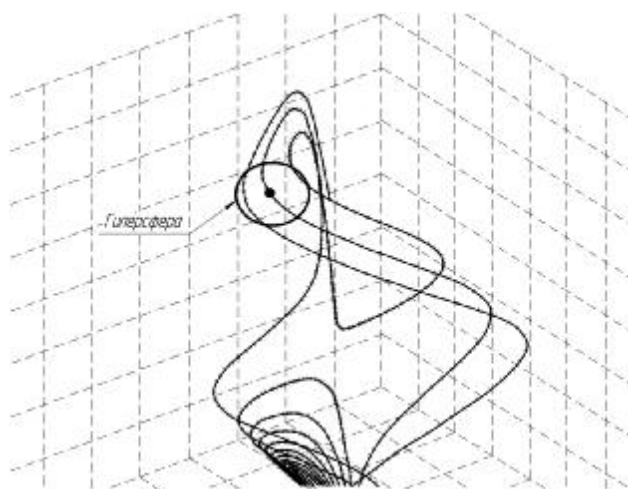


Рис. 1. Трехмерный аттрактор Лоренца

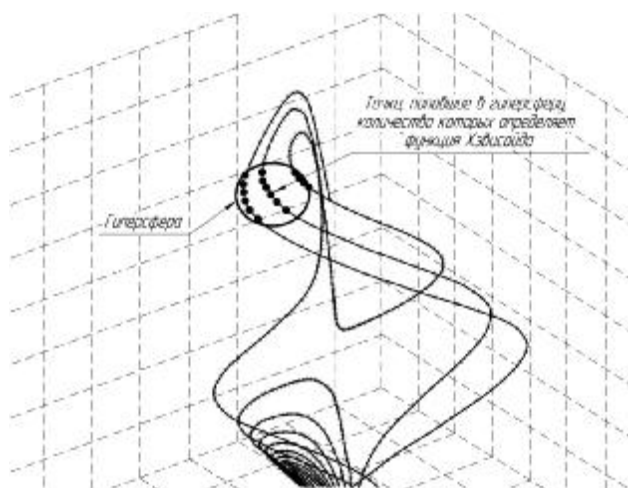


Рис. 2. Функция Хэвисайда

Для вычисления корреляционной размерности D_r необходимо оценить корреляционные интегралы C_r для гиперсфер различных радиусов. Следовательно, следующим шагом является увеличение радиуса гиперсферы и повторение алгоритма.

Первоначально размер гиперсферы выбирается настолько малым, что ни одна другая точка в ее область не попадает, а затем размер гиперсферы увеличивается до тех пор, пока абсолютно все точки не окажутся в ее области.

Алгоритм вычисления корреляционного интеграла для конкретного аттрактора [3] показан ниже (рис. 3).

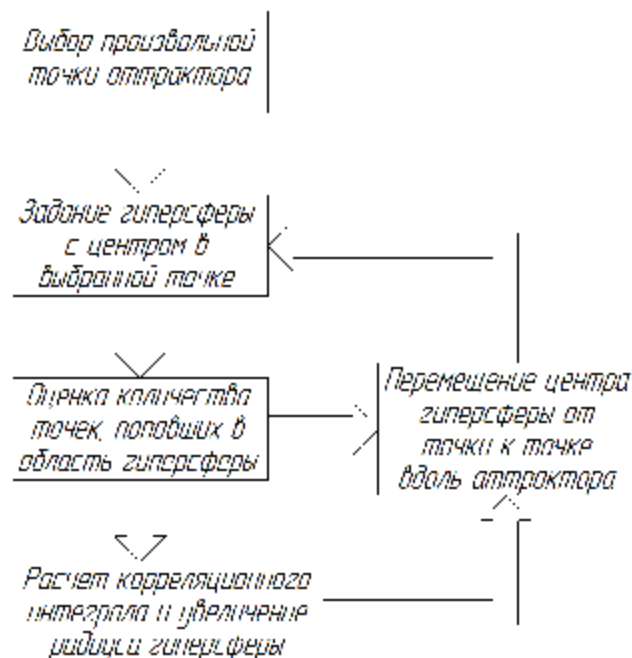


Рис. 3. Алгоритм расчета корреляционного интеграла

Показатель Херста. Способ для исследования фрактальных временных рядов был предложен Б. Мандельбротом [4]. Этот способ базируется на исследованиях, проведенных английским исследователем Херстом, и носит название $\frac{R}{S}$ -метода. Он построен на анализе размаха параметра (его наибольшего и наименьшего значения на изучаемом отрезке) и среднеквадратичного отклонения.

Предложенная Херстом новая статистика – показатель H – широко применяется в анализе временных рядов благодаря своей устойчивости. Этот показатель содержит минимальные предположения об изучаемой системе и может классифицировать временные ряды, отличив случайный ряд от неслучайного, даже если случайный ряд не гауссов, т. е. не нормально распределенный.

Для калибровки временных измерений было введено безразмерное отношение посредством деления размаха на стандартное отклонение наблюдений. Этот способ анализа стал называться методом нормированного размаха, или $\frac{R}{S}$ -анализом. Херстом было показано, что большинство естественных явлений, включая речные стоки, температуры, осадки, солнечные пятна и т. д., следуют смещенному случайному блужданию – тренду с шумом. Сила тренда и уровень шума могут быть оценены по тому, как изменяется нормированный размах со временем.

Основываясь на исследованиях Херста, введем следующее соотношение:

$$\frac{R}{S} = (a \cdot N)^H, \quad (3)$$

где $\frac{R}{S}$ – нормированный размах; N – число наблюдений; a – константа; H – показатель Херста. Прологарифмируем это соотношение:

$$\log\left(\frac{R}{S}\right) = H(\log(a) + \log(N)). \quad (4)$$

Найдя наклон $\frac{R}{S}$ как функцию от N в двойных логарифмических координатах, мы получим оценку H . Эта оценка не связана с какими-либо предположениями относительно лежащего в основе распределения.

Имеются три различных классификации для показателя Херста [3]:

- значение $H = 0,5$ указывает на случайный ряд, когда события случайны и не коррелированы;

- диапазон $0 \leq H < 0,5$ соответствует антиперсистентным, или эргодическим, рядам. Такой тип системы часто называют «возврат к среднему». Если система демонстрирует рост в предыдущий период, то, скорее всего, в следующем периоде начнется спад. И наоборот, если шло снижение, то вероятен близкий подъем. Устойчивость такого антиперсистентного поведения зависит от того, насколько H близок к нулю. И наоборот, чем ближе показатель Херста к $0,5$, тем более некоррелирован и случаен рассматриваемый ряд;

- диапазон $0,5 < H \leq 1$ соответствует персистентным рядам. Если ряд возрастает (убывает) в предыдущий период, то вероятно, что он будет сохранять эту тенденцию какое-то время в будущем. Сила персистентности увеличивается при приближении H к 1 , или 100%-й корреляции. Чем ближе H к $0,5$, тем более зашумлен ряд и тем менее выражен его тренд. Персистентный ряд – это обобщенное броуновское движение, или смещенные случайные блуждания. Сила этого смещения зависит от того, насколько H больше $0,5$.

Эмпирический закон Херста. Херстом была предложена следующая формула для оценки величины H по значению $\frac{R}{S}$:

$$H = \log\left(\frac{R}{S}\right) / \log\left(\frac{N}{2}\right), \quad (5)$$

где N – количество наблюдений. В этой формуле предполагается, что константа a из соотношения

$$\log\left(\frac{R}{S}\right) = H(\log(a) + \log(N)) \text{ равна } 0,5.$$

Федером было показано, что этот эмпирический закон имеет тенденцию увеличивать H , когда он больше $0,7$, и, наоборот, уменьшать, если $H \leq 0,4$, однако для коротких рядов, где регрессия невозможна, этот закон может использоваться как разумное приближение.

Показатель Херста может быть преобразован во фрактальную размерность с помощью следующей формулы:

$$D = 2 - H. \quad (6)$$

Таким образом, если $H = 0,5$, то $D = 1,5$. Обе величины характеризуют независимую случайную систему, при этом величина $0,5 < H \leq 1$ будет соответствовать фрактальной размерности, более близкой к кривой линии. Это персистентный временной ряд, который дает более гладкую, менее зазубренную линию, нежели слу-

чайное блуждание. Антиперсистентная величина $0 \leq H < 0,5$ соответствует более высокой фрактальной размерности и более прерывистой линии, чем случайное блуждание, и, следовательно, характеризует систему, более подверженную переменам.

Авторами данной статьи была предпринята попытка классификации различных сигналов с помощью показателей фрактальной теории оценивания. Наряду с определением фрактальных параметров, сигналы подвергались различного рода преобразованиям, таким как вейвлет-преобразование и добавление в сигнал аддитивного белого гауссового шума (АБГШ) различных отношений сигнал/шум.

Для рассмотрения были выбраны сигналы, модулируемые по следующим законам [5]: BPSK, QPSK, 8PSK, 16QAM, ASK, FSK.

Имеющиеся результаты позволяют сделать вывод о возможности классификации различных сигналов с помощью полученных значений корреляционной размерности и энтропии.

Согласно рис. 4, в отсутствии шума сигналы определяются с достаточной степенью точности. Однако при добавлении даже малейшего шума величина разброса значений значительно увеличивается, а само усредненное значение перемещается в область более высоких значений соответствующего параметра, что уменьшает вероятность правильного обнаружения входного сигнала. Очевидно, что для повышения значений этого параметра необходимо использовать дополнительную обработку сигнала.

Оценка влияния количества измерений на величину значений корреляционной размерности и корреляционной энтропии. При проведении исследований было выявлено, что при большом количестве измерений величины D_r и K имеют определенный разброс своих значений, однако стремятся к среднему. Это объясняется подчинением значений этих величин центральной предельной теореме, которая говорит о том, что при суммировании достаточно большого числа равномошных статистически независимых случайных величин, имеющих произвольные плотности распределения вероятности, плотность распределения суммы стремится к нормальной.

Результаты определения оптимального количества измерений D_r и K для BPSK при различном уровне шума (рис. 5) показывают, что при десяти и более измерениях как для BPSK, так и для других сигналов (не представленных на данном графике), фрактальный анализ дает результаты с хорошей степенью точности даже при наличии в сигнале АБГШ.

Анализ влияния вейвлет-преобразования на вероятность правильного обнаружения радиосигналов. В ходе исследования также было рассмотрено влияние вейвлет-преобразования [6] на рассматриваемые сигналы, которое заключается в том, что после осуществления над сигналом вейвлет-преобразования разброс значений корреляционной размерности вокруг среднего сильно уменьшается (рис. 6). Это свидетельствует о повышении вероятности правильного обнаружения сигнала.

Важной особенностью также является то, что наличие в сигнале даже сильного АБГШ практически никак

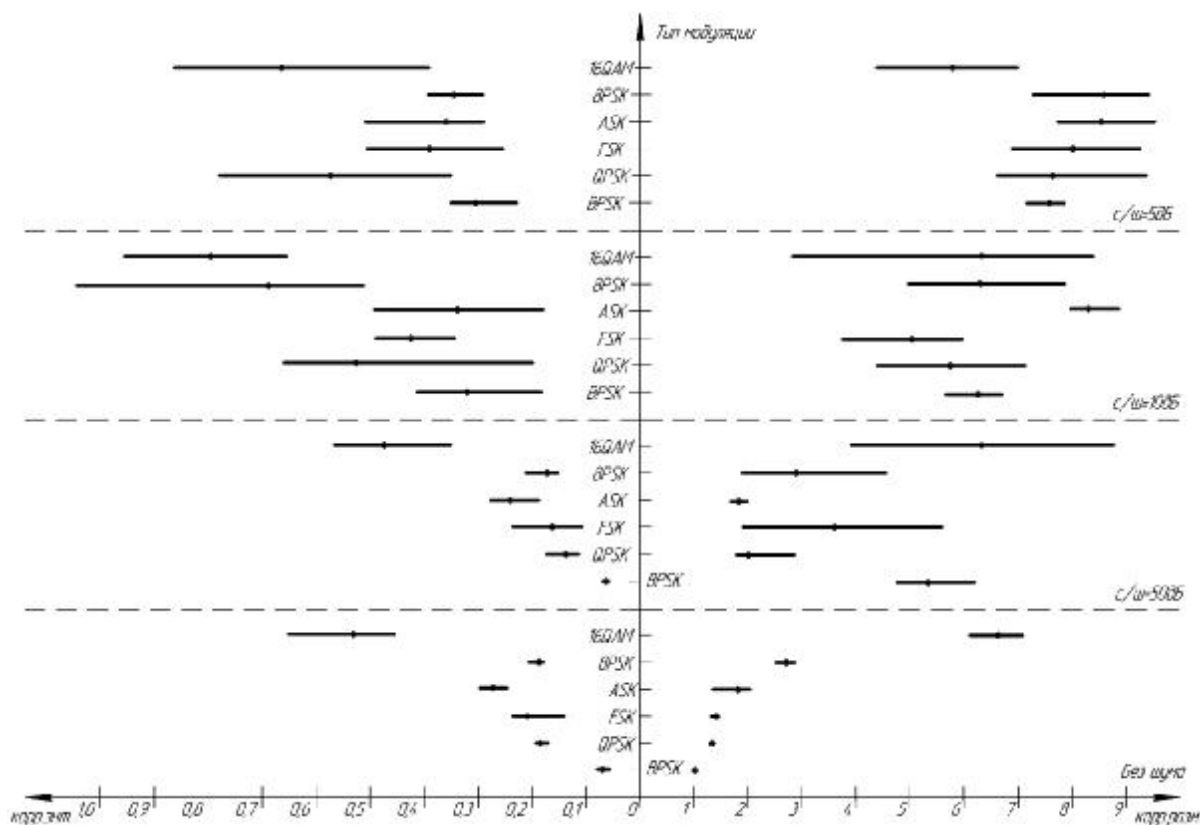


Рис. 4. Оценка корреляционной размерности и энтропии сигналов с АБГШ различных отношений сигнал/шум и без него (точками показаны усредненные значения соответствующего параметра по результатам большого количества измерений, жирными линиями – величина разброса соответствующего параметра вокруг его усредненного значения)

не влияет на разброс значений и вероятность правильного обнаружения, и то, что разброс значений для всех рассматриваемых сигналов практически одинаков, т. е. вид модуляции сигнала после вейвлет-преобразования почти не влияет на разброс фрактальных параметров.

В дальнейшем планируется исследование механизмов вейвлет-обработки сигналов (уровня разложения, видов вейвлетов), а также возможности использования результатов вейвлет-разложения в качестве дополнительного признака для создания автоматической системы радиомониторинга.

Оценка показателя Херста и фрактальной размерности. Значения этих показателей приведены в таблице:

Вид модуляции	Показатель Херста	Фрактальная размерность
FSK	0,097 18	1,902 82
ASK	0,248 40	1,751 60
BPSK	0,008 70	1,991 30
QPSK	0,135 74	1,864 26
8PSK	0,140 98	1,859 02
16QAM	0,194 98	1,805 02

Таким образом, в данной статье была получена оценка фрактальных свойств радиосигналов. Показано, что фрактальную обработку можно использовать для классификации входных сигналов. Проведенные исследования позволили определить диапазоны изменения фрактальных параметров для разных типов сигналов. Проанализирована возможность использования вейвлет-преобразования для уменьшения диапазона изменения фрактальных свойств радиосигналов.

Диапазон полученных значений показателя Херста (и, соответственно, фрактальной размерности благодаря формуле $D = 2 - H$) лежит в пределах $0 \leq H < 0,5$ (рис. 7). Как уже было отмечено выше, данный диапазон соответствует антиперсистентным, или эргодическим, рядам.

Исходя из вышесказанного, можно заключить, что наибольшей предсказуемостью обладает сигнал с двоичной фазовой манипуляцией, сигнал с квадратурной фазовой манипуляцией имеет меньшую предсказуемость, а наиболее случайным является сигнал с 8PSK. Отсчеты сигнала с 16QAM, который можно отнести к широкополосным, обладают наибольшей некоррелированностью.

Проведенное моделирование является важным этапом в формировании пространства признаков для повышения вероятности правильного обнаружения случайных сигналов. Полученные результаты необходимо использовать при создании автоматических систем радиомониторинга. Дальнейшей задачей является расширение и формирование полного пространства признаков, которое позволит создать систему автоматического обнаружения случайных сигналов.

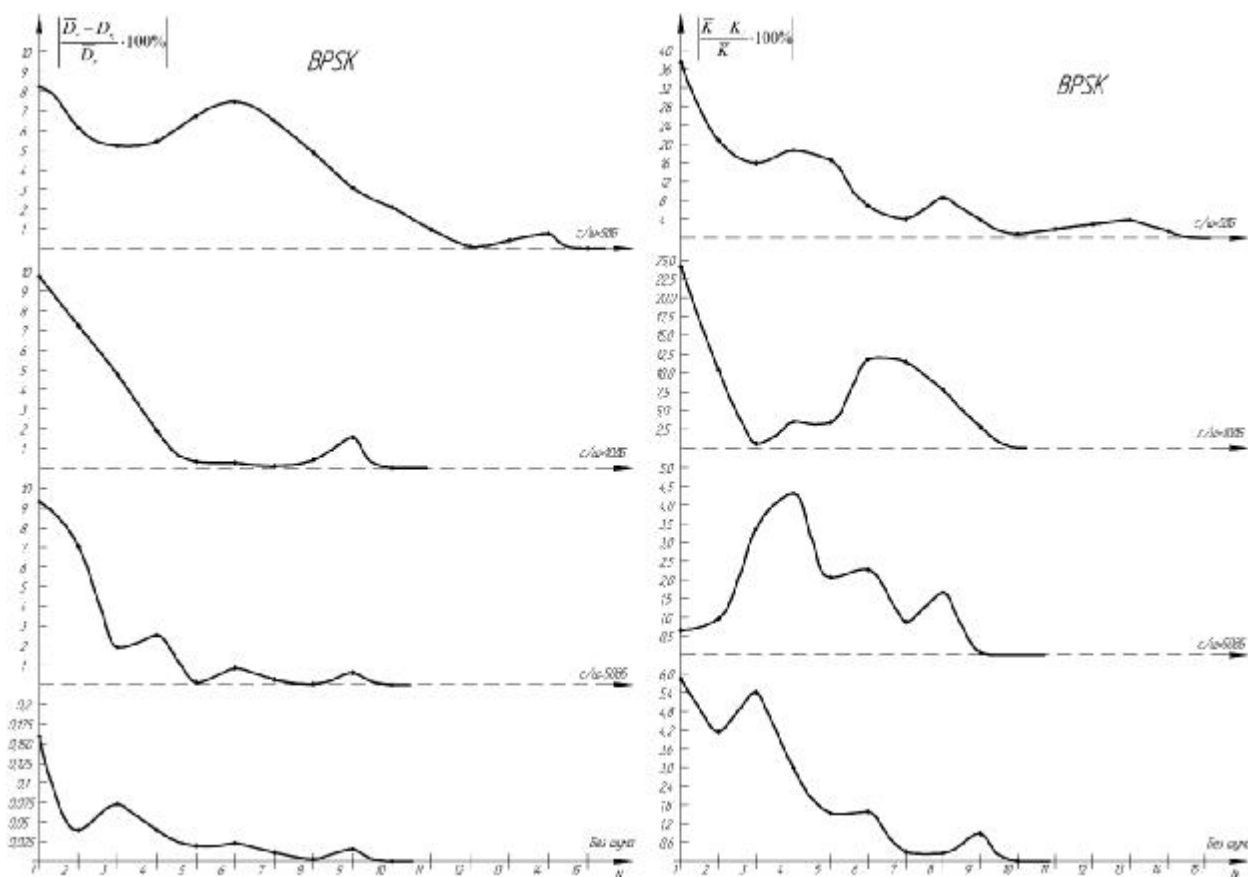


Рис. 5. Определение оптимального количества измерений D_r (слева) и K (справа)

Библиографические ссылки

1. Рембовский А. М., Ашихмин А. В., Козьмин В. А. Радиомониторинг: задачи, методы, средства. М. : Горячая линия – Телеком, 2006.
2. Li I. Non-Linear Dynamical Modeling of Epileptic Seizure : final project rep. / The Univ. of Auckland. Auckland, New Zealand, 2004.
3. Вычисление корреляционной размерности временного ряда котировок валют // Проектирование научных и

инженерных приложений в среде MatLab : тр. II науч. конф. С. 688–695.

4. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы / Ин-т компьютер. исслед. М., 2002.

5. Manassah J. T. Elementary mathematical and computational tools for electrical and computer engineers using MatLab. New York : CRC Press LLC, 2001.

6. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов : пер. с англ. М. : Мир, 2005.

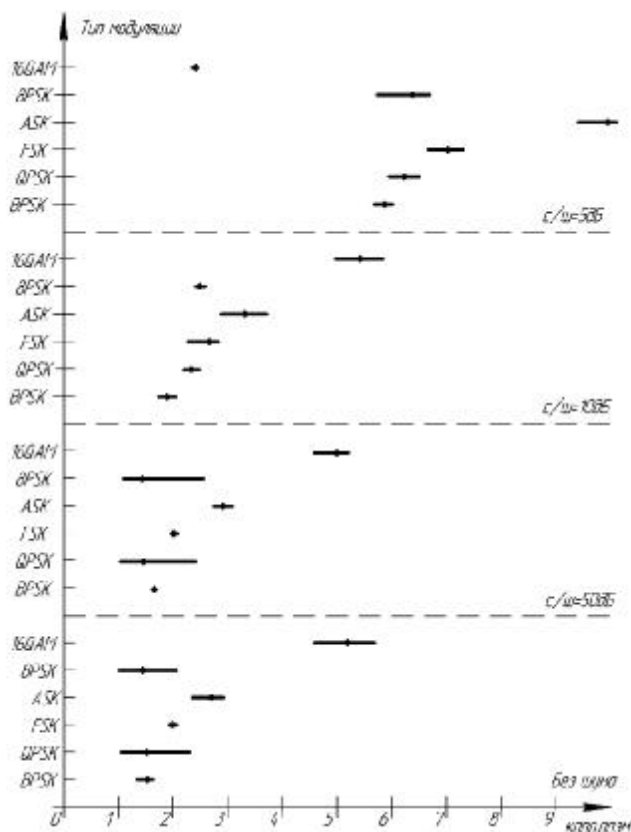


Рис. 6. Корреляционная размерность сигналов после вейвлет-преобразования (обозначения аналогичны обозначениям на рис. 4)

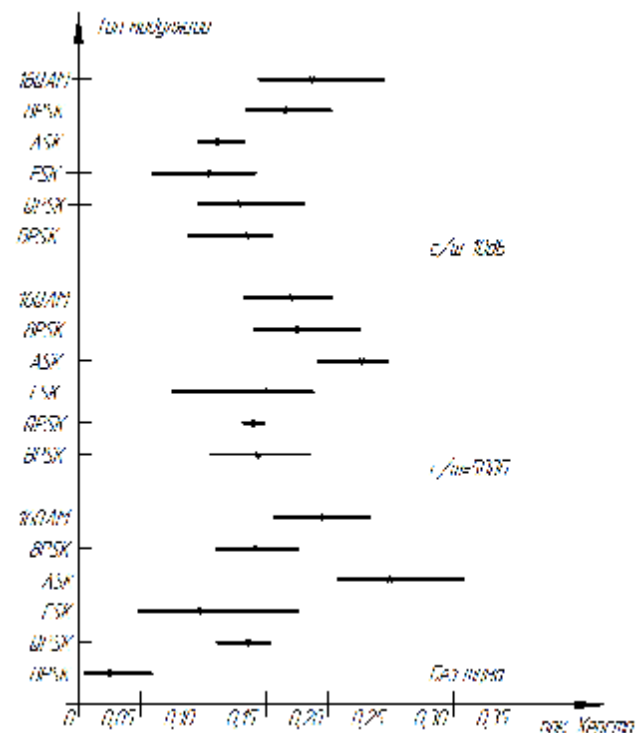


Рис. 7. Показатель Херста рассматриваемых сигналов с АБГШ различных отношений сигнал/шум и без него (обозначения аналогичны обозначениям на рис. 4)

D. V. Stepanov, A. V. Kuzovnikov

RESEARCH OF FRACTAL PROPERTIES OF RADIOSIGNALS

In this job the estimate of fractal properties of radiosignals is made. It's displayed that such parameters as correlative and fractal dimensions, correlative entropy and Hurst's index can be used for classification of input signals. Experimentally ranges of a modification of fractal parameters for signals with different types of modulation are defined.

Keywords: digital processing, fractal properties, classification of input signals.

© Степанов Д. В., Кузовников А. В., 2010