

Интеллектуальные системы управления, анализ данных

© 2026 г. В.Г. БАБИКОВ, канд. физ.-мат. наук (babikov@ipu.ru),
А.А. ГАЛЯЕВ, д-р техн. наук (galaev@ipu.ru)
(Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)

О НЕКОТОРЫХ СВОЙСТВАХ СПЛАЙН-СЕТОК В ЗАДАЧАХ КЛАССИФИКАЦИИ¹

Настоящая работа является дополнением к циклу работ авторов по теме задач обнаружения и классификации слабых сигналов. В продолжение этой темы в предлагаемом исследовании представлены результаты прикладного характера. Здесь авторы фокусируются на адаптивных метрических сетках в приложении к информационным диаграммам и выработке новых классификационных признаков.

Ключевые слова: информационная энтропия, дискретное преобразование Фурье, статистический дисбаланс, статистическая сложность, спектральная сложность, метрическая сетка.

DOI: 10.7868/S2413977726010079

1. Введение

Классические способы решения задачи обнаружения используют дополнительную информацию о свойствах сигнала. Так, решение задачи оптимальной фильтрации требует знания свойств сигнала: периодичности, полосы частот и др. [1]. Решение задачи различения двух гипотез опирается на лемму Неймана–Пирсона, определяет факт превышения оптимального порога при заданной вероятности ложной тревоги и требует оценки статистических свойств выборочных распределений шума и смеси сигнала и шума [2]. В [3] представлена разновидность леммы Неймана–Пирсона, особенность которой состоит в том, что не допускается ошибаться, принимая одну гипотезу вместо другой. Решение задачи о разладке требует настройки алгоритма на изменение неизвестных статистических характеристик распределений шума и смеси сигнала и шума, так же как в задаче поиска аномалий [4]. Все перечисленные способы демонстрируют качественную и надежную работу при превышении сигнала над шумом, но при малых отношениях сигнал/шум или в тяжелой помеховой обстановке зачастую дают неверный ответ.

¹ Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (грант № 23-19-00134).

Что касается использования информационных характеристик для решения задач статистической физики, классификации медицинских анализов (например, в целях изучения текстуры изображений гистопатологии молочной железы) и др., то этот подход уже имеет долгую историю. Уже в 1999 г. в [5] для количественного описания сложности двумерных узоров была введена мера сложности, основанная на среднем приросте информации. В [6] поднимаются вопросы, связанные с разработкой общей меры сложности – или закономерности, или структуры – для двумерных систем. Такие задачи возникают, например, при исследовании поверхностей в геологии.

Статья [7] посвящена исследованию возможности классификации текстур посредством двумерных порядковых паттернов, в частности посредством диаграммы статистической сложности. В [8] авторы подтверждают, что диаграмма статистической сложности является популярным инструментом для отличия стохастических сигналов (шума) от детерминированного хаоса (в англоязычной литературе встречается термин для этого инструмента – complexity-entropy (CE) plane). Однако авторами статьи было обнаружено, что как высокоразмерные детерминированные временные ряды, так и стохастические суррогатные данные (шумы) могут быть расположены в одной и той же области диаграммы и их представления показывают очень похожее поведение для различных сигнально-шумовых смесей или даже типов сигналов. Поэтому классификация этих данных по их положению в плоскости диаграммы может оказаться сложной или даже вводящей в заблуждение.

Вопрос о сложности различения шума и шумоподобных детерминированных сигналов также подробно освещается в [9]. Эта работа посвящена исследованию диаграмм статистической и спектральной сложностей. Диаграммы строятся следующим образом: информационная энтропия отмечается по оси абсцисс, статистическая (спектральная) сложность – по оси ординат. В тексте работы диаграммы статистической сложности обозначаются как (S, C_{TV}) и, соответственно, диаграммы спектральной сложности как (S, C_S) . В работе даны соответствующие определения, сделаны существенные замечания о чувствительности диаграмм, сформулированы и доказаны леммы об оценке верхней и нижней границ на диаграммах статистической и спектральной сложности для различных сигнально-шумовых смесей. Определены некоторые важные закономерности поведения шумоподобных и слабых сигналов, возможности их обнаружения в условиях белого и голубого шумов.

В перечисленных и других многочисленных работах, посвященных методам двумерного информационного анализа, использующим информационные диаграммы, показана возможность решения задач обнаружения и классификации. В то время как в статье авторов [9] представлена альтернативная интерпретация этих методов, которая состоит в том, что диаграммы статистической сложности (как и некоторые другие двумерные информационные диаграммы) находятся во взаимно-однозначном соответствии с количеством дискретных компонент спектра сигнала и отношением сигнал/шум. Совер-

шенно неожиданным представляется то, что, рассчитывая значения информационной энтропии и статистической сложности для полученной сигнално-шумовой смеси, одновременно можно определить количество эффективных дискрет спектра и энергетические доли сигнала и шума, но тем не менее это так – в статье последовательно посредством построения аналитических сеток показано, что диаграммы статистической и спектральной сложности могут быть сведены к двумерной диаграмме дискретности и отношения сигнал/шум. Уточним, что в упомянутой работе представлены аналитические оценки метрических сеток для диаграмм статистической и спектральной сложности. Инструмент метрических сеток (при определенных условиях) позволяет определить однозначное соответствие между кортежем информационных характеристик S, C_{TV} и кортежем параметров d (количество дискрет в спектре), SNR (отношение сигнал/шум). При этом при построении метрических сеток требуется прежде определить, какой шум присутствует в сигнално-шумовой смеси (белый шум, голубой шум или какой-либо другой шум).

Естественный шум, конечно, отличается от детерминированного белого, голубого и других шумов. В связи с этим требуется построение так называемых адаптивных сеток. Об этом пойдет речь в разделе “Адаптивные сетки” настоящей работы.

2. Диаграммы спектральной и статистической сложности

В ранее опубликованных работах по теме информационных характеристик авторы сосредотачивались, главным образом, на новых чувствительных информационных критериях, что важно при решении задачи обнаружения [10–12], а также на построении метрических сеток, которые играют роль в решении задачи классификации [3, 9].

Новая спектральная мера $C_S(p)$ (1), предложенная в [10], особенно эффективна при обнаружении слабых сигналов с малым ($d < 50$ при $N \geq 2048$) количеством дискрет d в смеси с белым шумом. В [9] даны соответствующие определения (по сути d – количество гармонических колебаний равной амплитуды в так называемом d -сигнале). Далее в выражениях (1)–(4) представлен ряд обозначений, требуемых для решения задачи обнаружения/классификации слабых сигналов:

$$(1) \quad C_S(p) = -\frac{1}{4 \log_2 N} \left(\sum_{k=1}^N p_k \log_2 p_k \right) \left(\sum_{k=1}^N \left| p_k + \frac{1}{N \cdot K_N} \ln \frac{k}{N+1} \right| \right)^2 .$$

$$(2) \quad C_{TV}(p) = -\frac{1}{4 \log_2 N} \left(\sum_{i=1}^N p_i \log_2 p_i \right) \left(\sum_{i=1}^N \left| p_i - \frac{1}{N} \right| \right)^2 .$$

В свою очередь статистическая сложность является произведением информационной энтропии $S(p)$ и статистического дисбаланса D_{TV} ($C_{TV}(p) = S(p) \cdot D_{TV}(p)$):

$$(3) \quad D_{TV}(p) = \frac{1}{4} \left(\sum_{i=1}^N \left| p_i - \frac{1}{N} \right| \right)^2,$$

$$(4) \quad S(p) = -\frac{1}{\log_2 N} \left(\sum_{i=1}^N p_i \log_2 p_i \right),$$

где N – длина спектрального ряда данных, p_k – энергетический спектр, K_N – нормировочный множитель, близкий к единице и зависящий от N .

В ранее опубликованных работах было показано, что диаграммы² статистической и спектральной сложности представляют собой эффективный инструмент в решении задач обнаружения и классификации. Причем информационные диаграммы, построенные на основе спектральной сложности $C_S(p)$, в меньшей степени применимы к решению задачи классификации, чем информационные диаграммы, основанные на статистической сложности $C_{TV}(p)$ (2). Так, информационная метрика, обладающая преимуществом в решении задачи обнаружения, уступает другой метрике при решении задачи классификации. Поэтому далее авторы развивают метод информационных диаграмм, основанный на статистической сложности, который как раз чувствительнее при определении количества дискрет в спектре сигнала.

Работа [9] посвящена построению аналитических сеток для диаграмм статистической и спектральной сложности (белый шум). Отметим, что у аналитических сеток большое преимущество – возможность построения обратных непрерывных функций и, как следствие, получение быстрого результата для высокоточной оценки дискрет d и отношения сигнал/шум по полученным оценкам значения энтропии и статистической сложности. В тех случаях, когда шум сильно отличается от белого, а сигналы слабые, приходится строить адаптивные сетки.

На рис. 1 представлены примеры метрических сеток на диаграмме статистической сложности в условиях голубого и розового шумов. Обратим внимание, что в условиях розового шума по сравнению с голубым или белым шумами появляется возможность «разглядывать» шумоподобные сигналы, т.е. классифицировать сигналы с большим количеством дискрет, в частности короткие импульсы. Так, на рис. 1,а (голубой шум) сигналы с количеством дискрет $d > 256$ практически неразличимы, в то время как на рис. 1,б (розовый шум) появляется возможность различить сигналы с количеством

² Диаграмма сложности представляет собой зависимость сложности от энтропии: значение O_x на диаграмме соответствует энтропии, рассчитанной по нормированному энергетическому спектру сигнально-шумовой смеси для заданного временного интервала (окна), а значение O_y соответственно определяется расчетным значением сложности.

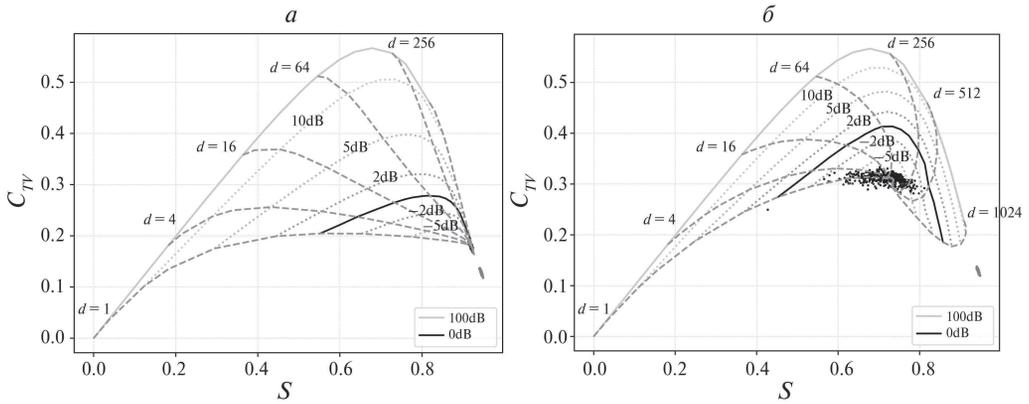


Рис. 1. Сравнение метрических сеток для голубого и розового шумов для $N = 2048$ (для белого шума: $S = 0,945$, $C_{TV} = 0,125$); *a* – сетка для голубого шума, *б* – сетка для розового шума.

дискрет $d > 1024$, т.е. когда количество спектральных компонент сигнала больше размера всего спектра (т.е. когда сигнал шумоподобен).

Следует сказать также и о том, что альтернативные диаграммы, построенные на основании энтропии и статистического дисбаланса D_{TV} (3), позволяют в большинстве случаев эффективнее разделять дискретности и решать задачу классификации, чем диаграммы, построенные на основе статистической сложности C_{TV} . Это связано с тем, что при появлении сигнала в белом шуме энтропия S (4) и дисбаланс D_{TV} меняются разнонаправлено и при перемножении $C_{TV} = S \cdot D_{TV}$ они частично подавляют друг друга. В работах авторов рассматриваются диаграммы статистической сложности, так как этот метод известен и часто используется на практике. Следующие исследования будут посвящены также и диаграммам на основе энтропии и статистического дисбаланса.

В целях решения задачи обнаружения и классификации на практике требуется построение так называемых адаптивных сеток. Дело в том, что при решении прикладных задач исследователь сталкивается с проблемой определения типа шума, который может значительно отличаться от белого, голубого и т.д. Важно иметь на вооружении инструмент, который бы позволял быстро адаптировать метрическую сетку к реальным условиям. Далее в статье об этом поговорим подробнее.

Отдельно стоит сказать, что размер спектра N определяет возможности по оценке количества дискрет в спектре. Ранее в [3] была дана оценка для определения максимального количества дискрет в белом шуме $d < \frac{N}{3}$. На рис. 2 представлено сравнение предельных возможностей по обнаружению сигналов посредством статистической и спектральной сложностей для $N = 2048$ и для $N = 8192$ в зависимости от числа дискрет сигнала в белом шуме. На рис. 2,б показано сравнение белых метрических сеток для $N = 2048$ и для $N = 8192$.

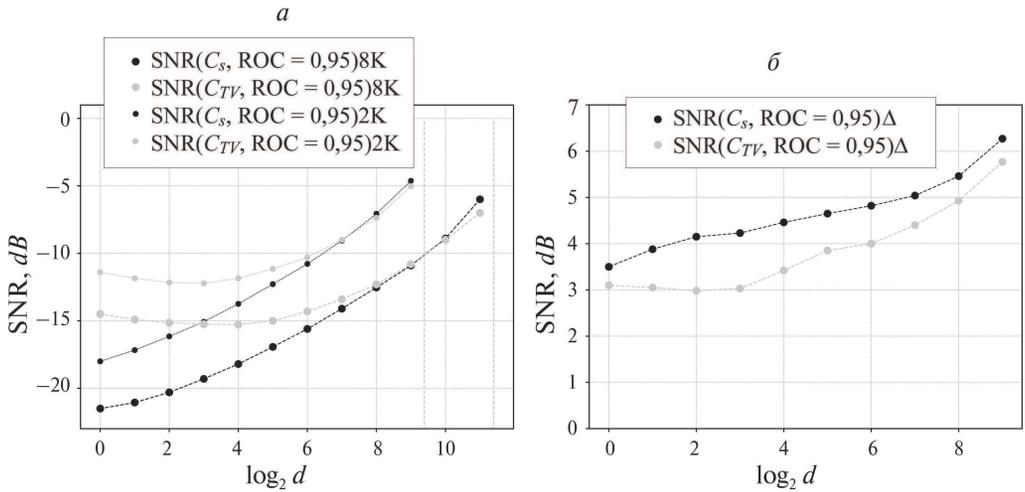


Рис. 2. Сравнение предельных возможностей обнаружения сигнала в зависимости от количества дискрет d и размера спектра N ; a – предельный уровни SNR в зависимости от дискретности ($AUC = 0,95$), b – эффект от увеличения размерности (8K vs 2K), изменение предельных SNR.

На графиках заметно, что возможности классификации и обнаружения сигналов при помощи метрических сеток с ростом N возрастают [9]. Кривая серого цвета демонстрирует снижение SNR для сигналов с малым количеством дискрет примерно на 3дБ при увеличении размера спектра с $N = 2048$ до $N = 8192$ для диаграммы статистической сложности и примерно на 4дБ для диаграммы спектральной сложности. Это важное наблюдение, потому как становится ясно, что с ростом N чувствительность диаграммы спектральной сложности растет быстрее, чем чувствительность диаграммы статистической сложности. Результат зависимости предельного SNR в зависимости от количества дискрет в спектре был получен посредством численного эксперимента ($ROC = 0,95$)³.

3. Адаптивные сетки

На практике требуется построение так называемых адаптивных сеток, которые можно получить следующим образом: по накопленным наблюдениям по пеленгам фазированной решетки, по которым наблюдается минимум энергии (условно отсутствует сигнал), оцениваются средние энтропия \hat{S} и статистическая сложность \hat{C}_{TV} , далее генерируется шум, так чтобы в каждом окне математическое ожидание энтропии было равно \hat{S} , а математическое ожида-

³ Площадь под ROC-кривой (Receiver Operating Characteristic) или AUC (Area Under the Receiver Operating Characteristic curve). В целом, значение ROC-AUC 0,5 предполагает отсутствие какой-либо способности обнаруживать сигнал в шуме на основе заданного критерия, значение от 0,7 до 0,8 считается приемлемым, от 0,8 до 0,9 считается высоким, а значение более 0,9 считается превосходным.

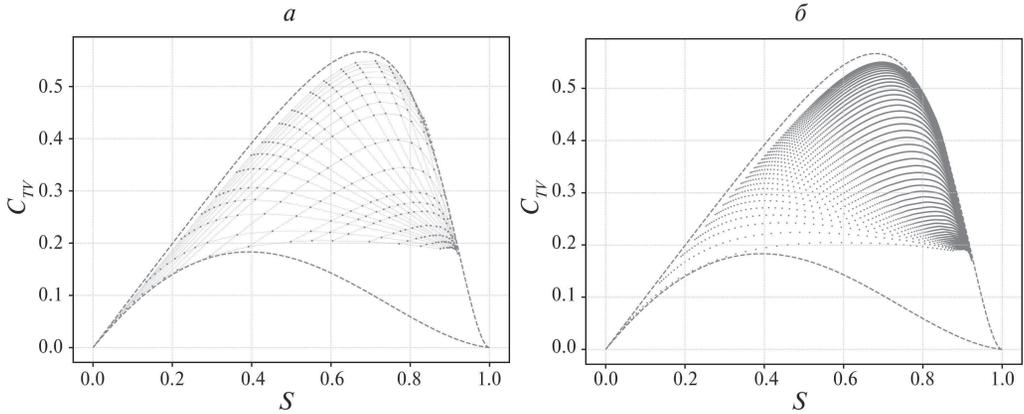


Рис. 3. Оценка узлов голубой сетки (а) и расчет сплайн-сетки (б) для диаграммы статистической сложности ($N = 2048$).

ние статистической сложности было равно \hat{C}_{TV} , этот шум смешивается с простыми сигналами разного количества дискрет (комбинация синусоидальных сигналов одинаковой амплитуды) с целью получения d -сигналов с заданными характеристиками, затем посредством усреднения по 200 кейсам оценивается энтропия и сложность каждого узла метрической сетки (каждый узел характеризуется количеством дискрет d и уровнем отношения сигнал/шум SNR), далее по узлам грубой сетки строится сплайн-сетка (получаем детализированную сетку). О таком способе построения метрических сеток говорится в [9] в целях сравнения аналитических сеток с численным экспериментом.

На рис. 3,а представлена метрическая сетка для диаграммы статистической сложности ($N = 2048$) в целях обнаружения и классификации сигналов в голубом шуме, которая была построена согласно описанному выше алгоритму для адаптивных сеток. Узлы решетки определяются следующими значениями дискретности и отношениями сигнал/шум: $d \in \{1, 2, 4, 6, 8, 12, 16, 20, 28, 36, 52, 68, 96, 128, 192, 256, 384, 512\}$, $\text{SNR} \in \{-10, -7, -5, -3, -1, 0, 1, 3, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15\}$. Каждый узел построен усреднением по 200 кейсам. В Приложении представлен пример построения аналитической метрической сетки для голубого шума.

На рис. 3,б представлена метрическая сплайн-сетка, которая построена на основе грубой сетки 3,а (на рисунке представлена сетка размером 500×500) при помощи двумерной интерполяции RectBivariateSpline (в Python имеется также более простой аналог interp2d). Двумерная сплайн интерполяция при построении метрической сетки позволяет значительно повысить степень ее детализации (в условиях ограниченного времени расчета), что, в свою очередь, позволяет с высокой точностью оценивать дискретность и отношение сигнал/шум [9].

4. Признаки, порождаемые дискретностью и отношением сигнал/шум

Задача классификации связана с разнообразными информационными критериями. Как было показано в [9], посредством информационных характеристик, таких как энтропия и статистическая сложность, можно получать оценки уровней дискретности d и отношения сигнал/шум SNR, которые, в свою очередь, порождают целое семейство сильных классификационных критериев. Остановимся на некоторых из них.

1. Уровень корреляции d и SNR. Высокий уровень корреляции дискретности и отношения сигнал/шум внутри некоторого временного интервала может свидетельствовать об изменении дистанции до объекта.

2. Разница в дискретности (абсолютная и относительная) между средним значением дискретности d сигнально-шумовой смеси, измеренной по k окнам (длительность каждого окна τ), и D оценкой дискретности сигнально-шумовой смеси, измеренной по всему временному окну $k\tau$: $D - d$, $D/d - 1$. Уровень этой разницы позволяет определить, насколько стабильны частоты дискрет. Такой критерий может быть, например, полезен при определении variability сердечного ритма.

3. Уровни дискретности и отношения сигнал/шум для сигнально-шумовой смеси после вычитания огибающей спектра. Подробнее о методах вычитания огибающей и выделении линейчатого спектра говорится в [13].

4. Взвешенная по энергии частота d главных дискрет спектра (обладающих наибольшей энергией). Этот показатель может быть полезен для оценки частоты вершины холма кавитационного шума.

5. Уровень локализации спектра и другие критерии.

Поясним подробнее понятие «Уровень локализации спектра». Как уже было сказано, диаграмма дискретности [9] обладает уникальными свойствами, которые позволяют извлекать дополнительную информацию для решения задачи классификации. В частности, согласно диаграмме дискретности у исследователя появляется возможность формализовать поиск количества «эффективных» дискрет d в спектре. Это, в свою очередь, позволяет построить распределение для этой случайной величины. Отметим также, что дискретность d и отношение сигнал/шум, являясь уникальными характеристиками сигнала, также являются важнейшими классификационными признаками в задаче классификации, но это далеко не все. Одним из самых важных критериев, который порождается дискретностью, является уровень локализации спектра. Суть этого критерия состоит в определении индексов d дискрет, которые удалось выделить при формировании критерия дискретности d посредством применения инструмента Диаграммы дискретности. Пусть Z – суммарное расстояние d дискрет с максимальной энергией до среднего значения по выборке из этих d дискрет (расстояние определяется модулем разницы между индексом дискреты в неупорядоченном спектре и средним значением всех индексов этих d дискрет). Итак, определим минимальное и максимальное

возможное суммарное расстояние d дискрет от их среднего:

$$Z_{\min}(N, d) = \begin{cases} \frac{d^2 - 1}{4}, & d = 2k + 1, \\ \frac{d^2}{4}, & d = 2k. \end{cases}$$

$$Z_{\max}(N, d) = \begin{cases} \left(N - \frac{d+3}{4}\right) \left(\frac{d-1}{2}\right) + \frac{1}{2} \left(N - d - \frac{N}{d} - 2\right), & d = 2k + 1, k > 1, \\ \frac{dN}{2} - \frac{d^2}{4}, & d = 2k. \end{cases}$$

Определим критерий частотной локализации на основании представленных выше формул (интервал значений критерия должен находиться внутри интервала $(0, 1)$, для этого воспользуемся оценками Z_{\min}, Z_{\max} для четных значений дискретности d). Уровнем локализации спектра будем называть следующее выражение:

$$(5) \quad K_z = \frac{Z - Z_{\min}}{Z_{\max} - Z_{\min}} = \frac{4Z - d^2}{2(Nd - d^2)}.$$

Такой критерий позволяет ответить на вопрос, насколько спектр наблюдаемого сигнала локализован в отдельной области спектра. А средняя частота по d дискретам позволяет определить область локализации. Такой критерий позволяет производить классификацию множества типов сигналов. В качестве практического приложения можно рассмотреть такой пример: для белого шума (как и для широкополосной помехи или взрыва) значение этого критерия близко к 0,5, для морских судов в зависимости от дедвейта этот показатель варьируется в пределах интервала 0,1–0,4, а для криков некоторых морских животных этот критерий близок к нулю.

5. Заключение

Настоящая работа является третьей работой в линейке работ авторов, посвященных метрическим сеткам для диаграммы сложности. Прикладной характер работы связан прежде всего с понятием адаптивной сетки и выделением целого ряда информативных классификационных признаков. В совокупности все эти статьи формируют метод метрических сеток и построения диаграммы дискретности, суть которого сводится к оценке количества дискрет в спектре и отношения сигнал/шум по одному временному окну в условиях малого отношения сигнал/шум.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Ранее в [10] была получена оценка энтропии в зависимости от размера спектрального ряда N для белого шума:

$$S(N) \approx 1 + \frac{\gamma - 1}{\ln N} \approx 1 - \frac{0,422}{\ln N},$$

где γ – постоянная Эйлера–Маскерони.

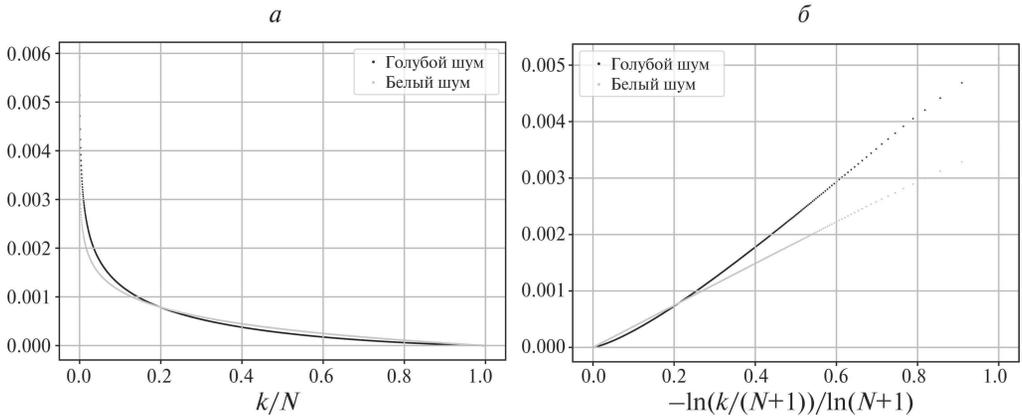


Рис. 4. Пояснение к формуле (II.1); *a* – упорядоченный спектр одной реализации фрейма длины $N = 2048$ для белого и голубого шума, *б* – те же реализации для белого и голубого шумов, горизонтальная ось в логарифмическом масштабе.

Приближенная оценка энтропии для голубого шума, которая также дает хорошее приближение, может быть получена с помощью формулы

$$(II.1) \quad S(N) \approx 1 - \frac{0,616}{\ln N}.$$

Экспериментально подтверждено, что эта формула для голубого шума оценивает истинное значение энтропии с точностью до четвертого знака после запятой ($128 < N < 16\,384$). На рис. 4 представлена плотность распределения нормированных упорядоченных энергетических спектров белого и голубого шумов для $N = 2048$.

Формула (II.1) позволяет получить приближенную метрическую сетку для голубого шума:

$$S(q, d, N) = S_0(N)(1 - q) - \frac{\ln \left(\left(\frac{q}{d} \right)^q (1 - q)^{1-q} \right)}{\ln N},$$

$$D_{TV}(q, d, N) = \frac{1}{4} \left(\alpha(d, N) + 1 + q + \beta(1 - q^2) + \right. \\ \left. + (1 - q) \left(-1 + 2 \exp \left(\frac{1}{q - 1} \right) \right) \right)^2,$$

$$C_{TV}(q, d, N) = S(q, d, N) \cdot D_{TV}(q, d, N),$$

где $N \gtrsim 1000$ – размер спектрального ряда, а $S_0(N)$ – значение информационной энтропии для голубого шума $S_0(N) \approx 1 - \frac{0,616}{\ln N}$ (для $N = 2048$ $S_0 \approx 0,9192$), $\alpha(d, N) = -\frac{2d}{N}$, $\beta \approx 0,12$ – эмпирически полученный коэффициент, q – энергетическая доля d -сигнала в сигнально-шумовой смеси.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ronald L.A., Duncan W.M.* Signal analysis: time, frequency, scale, and structure // N.J.: Wiley-IEEE Press, 2004.
2. *Шуряев А.Н.* Вероятностно-статистические методы в теории принятия решений. Современная математика. М.: МЦНМО: НМУ, 2020.
3. *Babikov V.G., Galyaev A.A.* Information diagrams and their capabilities for classifying weak signals // *Probl. Inform. Transmiss.* 2024. V. 60. No. 2. P. 127–140.
4. *Kishan G.M., Chilukuri K.M., Huang HuaMing.* Anomaly Detection Principles and Algorithms. Cham. Springer, 2017.
5. *Andrienko Y.A., Brilliantov N.V., Kurths J.* Complexity of two-dimensional patterns // *Eur. Phys. J. B.* 2000. V. 15. No. 3. P. 539–546.
6. *Feldman D.P., Crutchfield J.P.* Structural information in two-dimensional patterns: Entropy convergence and excess entropy // *Physical Review E.* 2003. V. 67. No. 5. P. 1–12.
7. *Bandt C., Wittfeld K.* Two new parameters for the ordinal analysis of images // *Chaos.* 2023. V. 33. No. 7. P. 1–20.
8. *Kottlarz I., Parlitz U.* Ordinal pattern-based complexity analysis of high-dimensional chaotic time series // *Chaos.* 2023. V. 33. No. 7. P. 1–11.
9. *Babikov V.G., Galyaev A.A.* Complexity-entropy plane analytical representation // *Probl. Inform. Transmiss.* 2025. V. 61. No. 1. P. 27–40.
10. *Галаяев А.А., Бабиков В.Г., Лысенко П.В., Берлин Л.М.* Новая спектральная мера сложности и ее возможности по обнаружению сигналов в шум // Докл. РАН. Математика, информатика, процессы управления. 2024. Т. 518. С. 80–88.
11. *Galyaev A.A., Babikov V.G., Lysenko P.V., Berlin L.M.* Addition to the article “A new spectral measure of complexity and its capabilities for detecting signals in noise” // *Doklady Mathematics.* 2024. V. 518. P. 89–92.
12. *Галаяев А.А., Берлин Л.М., Лысенко П.В., Бабиков В.Г.* Порядковые статистики нормированного спектрального распределения для обнаружения слабых сигналов в белом шуме // *АиТ.* 2024. № 12. С. 49–69.
13. *Babikov O.V., Babikov V.G.* Estimating the fundamental frequency of a propeller shaft-blade harmonic series using the hilbert transform and autocorrelation // *Mathematical Problems of Control.* 2025. No. 3. P. 12–23.

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.И. Кибзуном.

Поступила в редакцию 03.08.2025

После доработки 24.09.2025

Принята к публикации 06.10.2025