

Таблица 3. Рассчитанные координаты точек эллипса при переносе начала координат в его центр

x_1	x_2	x_3
-191,581	-21,694	-47,221
-49,402	30,926	4,284
-36,353	127,236	-69,296
-81,356	53,015	-17,039
-74,190	-27,684	-36,857
-86,655	-54,663	22,239
43,900	-43,592	2,068
14,873	67,609	10,618
165,369	115,180	26,826
-121,237	-34,137	1,874
211,571	11,226	59,473
-79,225	-139,060	48,411
-85,576	129,114	-67,885
-179,429	-132,900	-9,979
18,144	139,228	-59,856
-101,108	-29,090	8,063
-108,437	103,223	-58,093
-157,128	-147,912	18,408
48,093	-30,568	-1,590
185,754	148,069	1,291

Вычисленное по формуле (6) значение множителя $1/(1-C)$ равно 1,010702696321, а полученные с использованием этого множителя значения полуосей эллипса равны соответственно 235,013; 181,010; 27,002, т. е. практически совпадают с заданными.

Таким образом, показано, что по результатам определения координат точек, принадлежащих его поверхности, можно определить параметры эллипса, находящегося в общем положении. Предложен алгоритм получения соответствующих оценок. Результаты решения численного примера подтверждают работоспособность предложенного алгоритма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ржанов А.В., Свиташев К.К., Семенов А.И. и др. Основы эллипсометрии. – Новосибирск: Наука, 1974. – 253 с.
2. Шолпо Л.Е. Использование магнетизма горных пород для решения геологических задач. – Л.: Недра, 1977. – 187 с.
3. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). – М.: Наука, 1973. – 837 с.
4. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. – М.: Наука, 1988. – 552 с.

УДК 621.397;621.391.883.2

ФРАКТАЛЬНОСТЬ ОТНОШЕНИЯ СИГНАЛ/ШУМ

С.М. Слободян

Инновационный центр «ТЕСТ», г. Томск
E-mail: IC_Test@inbox.ru

Обсуждается классическое определение отношения сигнала к шуму, обычно используемое для количественной оценки эффективности различения сигналов в оптимальном линейном фильтре. Введено понятие фрактальной размерности отношения сигнал/шум для использования в качестве параметра обнаружения объекта в оптико-электронных и телевизионных автоматических системах и средствах контроля и диагностики состояния пространства наблюдения.

В большинстве задач, решаемых в измерительной технике, радиолокации, астрономии, оптической связи, локации, навигации, телевизионной автоматике и многих других весьма широких областях науки и техники, одной из основных и сложных проблем является проблема помехоустойчивости устройств, систем и комплексов [1–12]. Другими словами, решение задачи отыскания наилучшего из способов распознавания сигналов и объектов при наличии шума или помех. В определение «наилучший» способ или метод часто вкладывают синоним «оптимальный» в том или ином смысле подход к обработке сигнала или распознаванию изображения объекта в условиях воздействия помех. Определение наилучшего производится на основе выбранного критерия оптимальности, в большей или меньшей степени соответствующего пониманию разработчиком принципа оценки качества решения данной задачи, которые весьма широки и разнообразны.

Так, например, в оптической и радиолокации требуется установить параметры (x , y , z – координаты объекта, скорость и т. п.) путем облучения этого объекта некоторым видом излучения с последующим приемом отраженной от него энергии этого вида излучения или (при пассивной локации) естественного вида излучения (теплового, солнечного или другого вида электромагнитного излучения). В оптической и радиоастрономии полезным сигналом является собственное излучение наблюдаемого небесного тела. Характеристики сигнала с полезной информацией заданы естественным образом самой природой, и измерительные или регистрирующие средства изменяют его или подвергают активному воздействию наблюдаемый объект не могут. В оптико-электронных, телевизионных и радиоизмерительных средствах задача также сводится к измерению параметров или характеристик сигналов по отличительным их признакам при наличии помех.

Наилучшие средства и методы отыскиваются по достижению наибольшего значения количественного критерия, одним из которых часто служит наилучшее (наибольшее значение) отношение сигнала к шуму [1, 2]. Отношение сигнала к шуму как критерий оценки является здесь отношением двух энергетически однородных величин и представляет собой некоторое число, получающееся в результате измерения или количественной оценки первой величины, в рассматриваемой ситуации – искомого сигнала – числителя, когда вторая, в данном случае помеха или шумовая составляющая, выбрана за единицу меры. Для корректной оценки значений, принимаемых отношением сигнал/шум, обе величины, количественно отражающие величину энергии той и другой составляющей в суммарном значении отсчета текущей выборки, должны быть измерены одной и той же мерой равнозначности. Только тогда отношение сигнал/шум будет точно отражать соотношение между сигналом и уровнем шума в данной выборке.

Теории оптимальных методов приема сигналов и обработки изображений предшествовало создание теории оптимальной фильтрации, основанной на применении количественного критерия, а именно, критерия достижения максимального отношения пикового значения амплитуды (напряжения, тока и т. п.) сигнала к среднему квадратичному значению уровня (напряжения, тока и т. п.) шума. Достижение максимального значения отношения сигнала к шуму любым возможным вариантом вариации параметров схем обработки и фильтрации полезного сообщения и определяет степень оптимальности данной схемы, элемента, устройства или системы.

Этот подход применялся в самых ранних системах. Он обеспечивает достаточно хорошие результаты в оценке систем и используется до сих пор в новейших разработках, что и определяет необходимость настоящего обсуждения, чтобы иметь ясное представление о свойствах и возможностях модификации этого подхода.

Действительно, величина отношения сигнала к шуму до настоящего времени остается одним из основных фундаментальных критериев оценки качества элементов, схем, устройств и систем во многих областях приборостроения. Оно служит базовым параметром оценки качества сложных систем и комплексов в современных теориях статистических решений, обнаружения и оценок. Отношение сигнал/шум как энергетический параметр, хотя и в относительных единицах меры, отражает характер относительного расположения двух сопоставляемых для сравнения элементов определенной системы «сигнал/помеха» или «сигнал/шум» и определяет их взаимозависимости.

Основываясь на принципах логики, не обязательно математической, нетрудно показать, что любое отношение двух величин, в том числе и отношение сигнал/шум, определяет разбиение мно-

жества (области возможных значений принимаемых этим отношением), на котором оно определено, на непересекающиеся классы, так называемые классы эквивалентности. Элементы множества суть фрагменты области принимаемых значений, связанные данным отношением, попадают в общий класс; не связанные – в различные. Тогда элементы множества, попавшие по связности отличительных признаков в общий класс, в известном энергетическом смысле, неразличимы. Это и определяет важность не только высокой точности оценки значений «энергетического» отношения сигнал/шум, но и поиск других подходов и мер более точных оценок различения двух смежных классов множества, в данном случае, сигнала и шума.

Стремление к практике идеального приема сигналов и изображений в условиях воздействия шума и помех основывается на простых и глубоких идеях, изложенных в наиболее последовательной и ясной форме Ф.М. Вудвордом. Следуя этой идее, задачей идеального устройства, на вход которого поступает смесь сигнала с шумом, является более полное разрушение ненужной информации, содержащейся в смеси, и сохранение полезной информации о тех параметрах сигнала, которые представляют интерес для пользователя измерительного или автоматического средства, например, телевизионной автоматической системы (ТАС) [6].

Выходом идеальной системы обработки сигнала изображения является распределение вероятностей возможных значений измеряемых параметров, вычисленное на основании принятой реализации смеси и статистических данных о сигнале изображения и шуме, известных лишь априори. Однако, амплитуда, интенсивность и другие отличительные параметры сигнала изображения не всегда достоверно известны для ТАС.

Чаще всего, прием излучения от объекта и обработку сигнала изображения приходится выполнять системе, когда совсем нет априорных сведений о многих параметрах, например, интенсивности принимаемого сигнала изображения. В этом случае её приходится считать произвольной. Тогда исход работы ТАС и операции обработки, получаемого ею, массива данных о пространстве и поле изображения определяется истинной выборкой, полученной на момент регистрации, интенсивности сигнала изображения. ТАС остается правильно интерпретировать результат проведенных вычислений и принять однозначное решение о степени достоверности величины каждого измеренного параметра. При наличии шума принятое решение ТАС лишь случайно (с определенной степенью вероятности) может оказаться правильным. Правило, которым руководствуется ТАС, принимая решение, определяется величиной и характером допустимых ошибок, установленных для системы её разработчиком.

Показатели качества, используемые в автоматических средствах контроля и анализа состояния пространства наблюдения, различных методов об-

наружения объектов на фоне стохастических помех, определяются численными значениями вероятностей ложной тревоги и правильного обнаружения. Как количественные характеристики, функционально связанные со структурными особенностями конкретной системы и условиями её работы, они зависят от отношения сигнала к шуму, являющегося параметром обнаружения, и ряда энергетических и неэнергетических параметров ТАС контроля пространства наблюдения [1–3].

Оптимизация параметров (например, размеров, формы и ориентации элемента, скорости и типа траекторий сканирования и т. п.) систем, проводимая с учетом функциональных особенностей их влияния на статистическую эффективность обнаружения, позволяет осуществлять рациональный выбор и синтез методов и алгоритмов, обеспечивающих наименьшую из возможных изменчивость характеристик телевизионных автоматических систем при отклонениях распределения помех и воздействий от номинальных значений, предварительно задаваемых при проектировании. Это обеспечивает большую устойчивость их функционирования в условиях действия хаоса турбулентного, нелинейного и других видов факторов влияния на работу автоматического средства, комплексов и систем. Можно говорить о том, что оптимизация параметров повысит устойчивость (робастность) автоматических телевизионных средств наблюдения пространства при изменении условий функционирования.

Границу надежной работы автоматических средств в режиме слежения за измеряемым параметром принято [1, 2, 6, 9–12] оценивать величиной порогового значения отношения сигнала к шуму. За пороговое значение отношения сигнала к шуму принимается такое, при котором ошибка сопровождения изменения параметра, вызванного шумом, становится равной максимально возможному или максимально допустимому значению без нарушения режима нормального функционирования системы.

Если следовать К.В. Михалкову [6], то отношение сигнал/шум в измерительных средствах и следящих системах телевизионной автоматики (в настоящей статье – ТАС) определяется отношением тока (или напряжения) сигнала, как правило его максимального значения, к среднеквадратическому значению тока (или напряжения) шума на уровне фона в заданной полосе частот фильтрации сигнала на входе схемы, регистрирующей наличие сигнала. Обычно, ввиду малости амплитуд сигнала и шума, а в режиме счета фотонов – низкой интенсивности регистрируемых потоков фотоэлектронных импульсов от излучения падающего на фоточувствительную поверхность приемника изображения, между входом регистрирующей и выходом приемника изображения устанавливается усилитель сигнала (видеоусилитель) с требуемым коэффициентом усиления по току (или напряжению).

Максимальное потенциально возможное отношение сигнал/шум при гауссовом шуме [1–6] соответствует условиям обнаружения малококонтрастного объекта на значительном (по интенсивности излучения или освещенности) внешнем фоне пространства наблюдения объекта:

$$\Psi_m = \sqrt{\mathcal{E} / N_u} = \sqrt{N_u^{-1} \int_{-\infty}^{\infty} I_C(x, y, t) dt}, \quad (1)$$

где \mathcal{E} – энергия сигнала; x и y – координаты изображения объекта в плоскости приемника; t – время и $N_u = N_0/2$ – интенсивность шума (для гауссова стационарного) на входе усилителя прямо пропорциональна величине определяемой свойствами распределения освещенности изображения объекта и текстуры фона, особенностями, используемого в системе, приемника изображения и размерами его элемента [1, 6, 10–12]. В тех приемниках изображения, где дисперсия шумового тока не зависит (или даже при сильных световых потоках зависимость пренебрежимо мала) от уровня фона и темнового тока, шумовой процесс изменения тока относится к классу стационарного случайного процесса. В ряде приемников изображения [10], например, фотоэлектронный умножитель, диссектор и т. п., шум приемника изображения, в общем случае, – нестационарный случайный процесс. Другими словами, он является сложной функцией величины тока сигнала приемника изображения, зависящего от потока излучения, освещающего его фотоувствительную поверхность.

Следует заметить, что вышеприведенное выражение лежит в основе – как базовое – одного из важных показателей качества любого измерительного автоматического и неавтоматического средства или системы обработки сигналов, которым является чувствительность средства к минимально значимым или пороговым информационным сигналам. Под чувствительностью измерительного средства понимается его способность принимать или регистрировать (т. е. идентифицировать) слабые по величине или интенсивности (или по другому параметру в зависимости от вида информационной идентификации признака) сигналы и количественный критерий этой способности.

В простейших устройствах чувствительность определяется минимальным уровнем сигнала (или другого информационного параметра, например, угла прихода излучения) на входе измерительного средства, при котором содержащаяся в сигнале полезная информация еще может быть идентифицирована (воспроизведена, обнаружена, измерена) с необходимой оценкой качества (точностью определения угла, амплитуды сигнала, контраста изображения).

В сложных прецизионных, тем более, автоматических средствах измерения величина (интенсивность и т. п.) полезного сигнала часто оказывается сравнимой с величиной (уровнем, интенсивно-

стью) действующих одновременно с этими сигналами на входе устройства внешними помехами, искажающими полезный сигнал и затрудняющих его распознавание и идентификацию. В этом случае, предельной чувствительностью средства (системы, устройства, схемы) называется чувствительность, ограниченная помехами. Она является параметром автоматической системы и функционально зависит от внешних факторов.

При благоприятных условиях внешние помехи слабы, и основным фактором, ограничивающим чувствительность системы, становятся внутренние источники шума. Последние в нормальных условиях работы имеют постоянный уровень, поэтому чувствительность, ограниченная внутренними шумами – вполне определённый параметр, оцениваемый величиной, обратной значению отношения сигнала к шуму. Чем больше пороговое отношение сигнала к шуму, тем хуже чувствительность. За меру чувствительности, в этом случае, часто принимают непосредственно уровень внутрисистемного шума, что тождественно отношению сигнала к шуму, равного единице. В любом случае, чувствительность системы это её свойство, выражаемое отношением изменения сигнала на выходе устройства к вызвавшему его изменению на входе и ограничиваемое отношением сигнала к шуму (т. е. уровнем шума в системе или на её входе).

Прежде чем перейти к обсуждению фрактальности параметра обнаружения, отметим, что выражение (1) для отношения сигнал/шум получено [6] статистическим методом в приближении стационарности флуктуационных шумовых процессов и гауссова характера их распределения. Его применение в ТАС дало возможность решать самые разнообразные задачи, связанные с оценкой характеристик синтезируемых структур и эффективности различных алгоритмов их функционирования. Однако, надо четко понимать, что статистические методы, помогая решать широкий спектр задач, представляют иногда, например, для оптимизации реальных физически осуществляемых схематизированных алгоритмов функционирования или определения и оценки равновероятных и взаимоисключающих событий «хаоса» и «порядка», значительные и принципиальные трудности.

Из формулы (1) видно, что влияние пространственной и временной неравномерности чувствительности приемника изображения и текстуры распределения фона, спроецированных на его фоточувствительную поверхность, при конечном времени анализа ($\tau_a \ll \infty$), характерно для получаемых реализаций выходного сигнала приемника как временного ряда наблюдений телевизионной автоматической системой. Эти факторы приводят к вариациям по полю изображения значений числителя и/или знаменателя, а значит и величины отношения сигнал/шум при переборе элементов и данных выборки наблюдения.

Практический вид выходного сигнала приемника изображения для малоконтрастных изображений имеет типично изрезанный фрактальный характер, как для стационарных, так и нестационарных распределений сигнала и шума. При фрактальном характере числителя и/или знаменателя соотношения (1) справедливо говорить о фрактальной обусловленности величины отношения сигнал/шум (частное от деления) конкретного временного ряда наблюдения. Этот факт позволяет вынести суждение, что отношение сигнал/шум как параметр обнаружения в принципе носит фрактальный характер.

В практическом отношении было бы полезно и желательно определить влияние изменения и взаимозависимости, входящих в это выражение, параметров на степень изрезанности огибающей выходного сигнала приемника изображения, т. е. изменение его фрактальности. Проблема установления закономерностей и особенностей процесса оценки фрактальности и её вариаций от поведения отношения сигнала к шуму является академически интересной и самостоятельной областью исследования. Она требует детального изучения поведения системы при изменении форм и вариаций сигнала, наличия помех и вариаций их вида и статистического распределения.

Случай обнаружения малоконтрастных сигналов и изображений объекта соответствует классическому винеровскому процессу с траекторией хаотического броуновского движения [4, 5], являющегося примером самоаффинного фрактала. Это подтверждается тем, что координаты смещения изображения объекта в плоскости изображения, совмещенной с фоточувствительной поверхностью приемника изображения, и времени входят в соотношение подобия с различными коэффициентами. Фрактальную размерность самоаффинных фракталов характеризуют аффинным масштабным коэффициентом, называемым показателем Херста H ($0 < H < 1$).

Обобщая фрактальные методы анализа на случай обнаружения малоконтрастного изображения объекта, соответствующего достаточно малому отношению сигнал/шум, при котором нестационарность шума слабо проявляется или еще незаметна, формализованную модель – эффективной фрактальной размерности общепринятого понятия [1, 6] отношения сигнал/шум как фрактального параметра обнаружения малоконтрастных фрактальных сигналов и изображений можно записать в виде классической модели Херста:

$$\Psi_{FR} = (U_c N)^{H_s}, \quad (2)$$

где U_c и H_s – параметры сигнала, подлежащие оценке по результатам измерений выборки объема N . Здесь введенный H_s – показатель фрактальной размерности отношения сигнал/шум как параметра обнаружения, связанный с H – показателем

Херста, часто называемым аффинным показателем [5], простым соотношением

$$H_s = (1 + 2H)/2.$$

На практике различают два вида фрактальных размерностей: глобальную и при высоком разрешении – локальную. Считают [7, 8], что самоаффинные траектории с неоднозначной фрактальной размерностью не являются фрактальными в глобальном смысле. Для соотношения сигнал/шум как параметра обнаружения это подтверждается в выше приведенной формуле: в глобальном смысле отношение сигнал/шум представляет собой некоторую в ограниченном смысле постоянную величину (усредненную на принятом в практической системе интервале времени) и поэтому при классической процедуре обнаружения это отношение не является фрактальным параметром.

Таким образом, в настоящей работе предложена, как одна из возможных, модель фрактальности параметра обнаружения, определяемого фрактальной размерностью величины отношения сигнал/шум, сопоставимая с общепринятым понятием отношения сигнал/шум и формально основанная на классической модели Херста. Физическая сущность предложенной модели фрактальности отношения сигнал/шум как аналога модели Херста заключается в том, что введенный показатель H_s характеризует степень хаотичности как случайной реализации выходного сигнала приемника изображения автоматического средства в целом. Показатель же H фрактальной размерности модели Херста отражает степень хаотичности только трендовой составляющей реализации выходного сигнала приемника. Это означает, что понятие фрактальности отношения сигнал/шум обобщает понятие фрактальной размерности на более широкий класс изображений и сигналов и позволяет оценить количественно эффективность обнаружения фрактальных изображений и сигналов общепринятым вероятностным подходом теории статистических решений.

Влияние дискретности элементов приемника изображения на формируемый им выходной сигнал от наблюдаемого системой объекта можно учесть зависимостью изменения среднего в строке или мгновенного в текущем отсчете выборки значения отношения сигнал/шум [9–12], которая справедлива и в условиях действия нестационарного шума:

$$\Psi_i(x, y, t) = \Psi_m(x, y, t)K(\delta),$$

где $K(\delta)$ – функциональная закономерность, описывающая изменение величины сигнала приемника изображения от наблюдаемого объекта.

Если применить к выражению (2) операцию логарифмирования, например, исходя из удобства дальнейшего сопоставления с известными физическими представлениями, то получим вероятностное уравнение, связывающее величину фрактальной размерности отношения сигнал/шум, точнее,

значение его логарифма, как критерия оценки с параметрами сигнала, отражающими макроскопическое состояние ТАС. Таким же, «логарифмическим», подходом в [13] была выявлена граница заметного влияния нестационарности шума на изменение закономерности от линейного к нелинейному поведению отношения сигнал/шум при возрастании освещенности фоточувствительной поверхности приемника изображения.

Проведя нормировку и перейдя к относительным величинам, получим, что изменение относительного сигнал/шум, в общем случае, весьма наглядно описывается широко известной физикам функциональной зависимостью

$$S = k \ln w,$$

где S – логарифм фрактальной размерности отношения сигнал/шум; k – коэффициент пропорциональности, определяемый условием нормировки, и w – функция статистического веса данного равновесного состояния системы, определяемая значением энергии сигнала изображения и объемом его выборки.

Как видно, формализованное описание фрактальной размерности логарифма отношения сигнал/шум тождественно классическому определению (полученному [14] на основе формулировки второго начала термодинамики) энтропии – меры неупорядоченности системы, характеризующей вероятность получения конкретного значения фрактальной размерности отношения сигнал/шум при вышеуказанных параметрах сигнала, сформированного в текущем состоянии функционирования системой.

В данном случае, приведенную логарифмическую зависимость можно рассматривать как новое определение фрактальной размерности отношения сигнал/шум. Согласно этого выражения, фрактальная размерность представляет собой вероятностную величину, равную аддитивной статистической сумме числа всех возможных равновероятно распределенных составляющих процесса формирования сигнала изображения, в том числе, обусловленных разными источниками шума и воздействием внешних сосредоточенных помех.

Изменение фрактальной размерности, как и энтропии, обусловлено изменением параметров системы и условий ее функционирования. Наличие флуктуаций фрактальной размерности отношения сигнал/шум показывает, что, как и закон возрастания энтропии, поведение оценки фрактальной размерности выполняется только в среднем для достаточно большого промежутка времени.

Так же как и для энтропии, с уменьшением значения фрактальной размерности отношения сигнал/шум автоматическая система будет переходить из более вероятного статистически равновесного состояния в менее вероятное. Другими словами, изменению вероятного состояния системы свойственно изменение веса преобладающего действия

шума и помех на преобладающее действие сигнала изображения от объекта как полезного информационного сообщения.

Таким образом, по аналогии с формулировкой Л. Больцмана [14] о связи энтропии с вероятностью состояния системы: возрастание фрактальной размерности отношения сигнал/шум в ТАС обусловлено переходом системы из менее вероятного состояния в более вероятное. Иначе говоря, эволюция ТАС как замкнутой системы происходит в направлении наиболее вероятного статистически равновесного состояния её отдельных подсистем.

По аналогии с определением информационной энтропии как меры неопределенности сообщений (например, наличия сигнала от искомого объекта): фрактальная размерность отношения сигнал/шум будет принимать наибольшее значение, когда неопределенность в информации максимальна, т. е., равновероятно наличие сигнала от объекта и шума (помехи). В случае, когда неопределенность в информации отсутствует, вероятность наличия объекта тождественна единице (слежение и наведение объекта в системе устойчиво), фрактальная размерность отношения сигнал/шум будет иметь минимальное значение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лезин Ю.С. Оптимальные фильтры и накопители импульсных сигналов. – М.: Советское радио, 1969. – 448 с.
2. Тихонов В.И., Миронов М.А. Марковские процессы. – М.: Советское радио, 1977. – 488 с.
3. Карпенко В.И., Даник Ю.Г., Маляров М.В. Обнаружение объектов во фрактальных структурах // Радиотехника. – 2002. – № 1. – С. 9–12.
4. Шустер Г. Детерминированный хаос: Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 242 с.
5. Шредер М. Фракталы, хаос, степенные законы. Миниатюры из бесконечного рая. – Ижевск: РХД, 2001. – 528 с.
6. Михалков К.В. Основы телевизионной автоматики. – Л.: Энергия, 1970. – 284 с.
7. Николис Г., Пригожин И. Познание сложного. – М.: Мир, 1990. – 342 с.
8. Пайтген Х.-О., Рихтер П.Х. Красота фракталов: Пер. с англ. – М.: Мир, 1993. – 176 с.

Выводы

1. Впервые введено понятие фрактальной размерности отношения сигнал/шум параметра обнаружения сигнала и объекта. На примере модели Херста показана возможность нахождения фрактальной размерности отношения сигнал/шум, функционально определяющего статистическое качество работы автоматических систем.
2. Установлена тождественность математического описания и закономерности поведения фрактальной размерности отношения сигнал/шум с энтропией. Показано, что фрактальная размерность отношения сигнал/шум, как и энтропия, обладает свойством аддитивности: фрактальная размерность отношения сигнал/шум для близко расположенных объектов с перекрытием изображений равна сумме таковых размерностей каждого из отдельных взятых сигналов.
3. Предложена модель оценки фрактальной размерности отношения сигнал/шум, выявлены общие закономерности ее изменения, что позволяет уточнить расчет и найти подходы к решению проблемы установления точных критериев оценки качества системы в режиме обнаружения фрактальных объектов.
9. Слободян С.М. Разработка и исследование в режиме обнаружения устройств на диссекторе для контроля и управления оптическими пучками: Дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 1978. – 191 с.
10. Слободян С.М. Статистически обусловленная пороговая чувствительность сканирующих средств оптического контроля // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 2. – С. 41–44.
11. Митяшев Б.Н. Определение временного положения импульсов при наличии помех. – М.: Советское радио, 1962. – 199 с.
12. Слободян С.М. Телевизионная диагностика лазерных пучков. – Барнаул: Азбука, 2006. – 224 с.
13. Слободян С.М. Влияние погрешности фокусировки на оценку фрактальной размерности // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 1. – С. 43–48.
14. Зубарев Д.Н. Неравновесная статистическая термодинамика. – М.: Наука, 1971. – 194 с.