

СТАТИСТИЧЕСКИ ОБУСЛОВЛЕННАЯ ПОРОГОВАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ СКАНИРУЮЩИХ СРЕДСТВ ОПТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

С.М. Слободян

Инновационный центр "ТЕСТ", г.Томск

E-mail: IC_Test@inbox.ru

На основе статистической теории дано определение пороговых значений предельной и контрастной чувствительности оптических сканирующих измерительных средств. Показано, что их предельная чувствительность в режиме обнаружения определяет пороговый уровень светового потока от объектов, контроль параметров которых может быть осуществлен в режиме слежения. Учтено влияние интенсивности светового потока на оценку оптимального размера покрытия пространства и фрактальную размерность изображения. Исследовано влияние на вейвлет-характеристику изображения фона изменения размеров фрактально-го изображения объекта для ортогонального разложения сигнала изображения по базисам вейвлета.

С момента создания самых первых преобразователей оптического излучения и до настоящего времени стремление к обеспечению предельных возможностей приемников излучения (ПИ) измерительных средств является актуальным [1–10]. Их оценка и сравнение производятся с привлечением понятий потенциальной и контрастной чувствительности уже более полувека [2–6]. Для количественной оценки качества систем по этим критериям чувствительности используется отношение "сигнал/шум", определяющее минимальное значение регистрируемого системой оптического сигнала, ограничиваемого шумовыми факторами той или иной физической природы, без учета влияния дискретизации пространства изображения ПИ [2–6, 8]. Это соответствует условиям интегрального принципа регистрации излучения и "замороженности" координат контролируемых объектов или среды, справедливых для несканирующих пространство измерительных средств.

В сканирующих измерительных системах процесс поиска и обнаружения объекта и этап последующего его контроля разделены во времени [7, 9, 10] и необнаружение объекта означает невыполнение задачи измерения его параметров. Следовательно, предельная чувствительность сканирующих оптических измерительных систем в режиме обнаружения как критерий принципиальной осуществимости выполнения контроля состояния объекта сканирующими измерительными средствами в режиме слежения являются важным, определяющим их работоспособность, фактором. Ясно, что в режиме слежения [9] при измерении параметров объекта пороговая или предельная чувствительность может быть значительно улучшена. На предельную чувствительность сканирующих систем в режиме обнаружения заметное влияние оказывают особенности алгоритмов осмотра пространства, определяющих последовательность сканирования, дискретность покрытия – поэлементного разложения пространства изображения, динамика поведения объекта контроля, априорная неопределенность величины сигнала от которого обусловлена случайностью его положения относительно элемента сканирования и ряд других факторов. Ниже

проведен анализ предельных возможностей сканирующих оптических измерительных средств в режиме обнаружения, предшествующего этапу контроля параметров объекта, с учетом статистики влияния выше указанных причин на предельную чувствительность средств измерения.

Особенность обнаружения источника оптического излучения сканирующей измерительной системой состоит в том, что, за счет двумерной дискретизации поэлементного покрытия пространства изображения, относительное расположение элемента сканирования и изображения объекта в системе координат ПИ (канторово пространство) априори неизвестно. Это определяет случайность амплитуды сигнала даже при известных энергетических характеристиках объекта. Влияние динамики смещения объекта, также обуславливающей случайный характер амплитуды сигнала, приводит к появлению повторных сигналов в двух и более, в зависимости от степени соразмерности элемента и изображения объекта, смежных элементах и строках сканирования пространства изображения.

Примем, что поле изображения $h_x \times h_y$ пространства наблюдения сканируется за время T_c с периодом T_c элементом разложения с относительным (по сравнению с $2n_0$ -размером изображения объекта) размером $a_x \times a_y$. Модуль вектора скорости перемещения изображения объекта $|\vec{v}_0| = (v_{0x}^2 + v_{0y}^2)^{1/2}$ определяет его время пребывания в пространстве наблюдения. Так как взаимное положение элемента сканирования и изображения объекта случайно, то величина сигнала от объекта в i -ом элементе j -ой строки разложения поля определится выражением

$$I_{cij}(x, y) = \varepsilon \iint_{(OI)} \rho_s(x, y) I(x - x_0, y - y_0) dx dy,$$

где ε – коэффициент, учитывающий особенности преобразования "свет-сигнал" ПИ; OI – область интегрирования равная площади взаимного перекрытия изображения объекта и элемента на ij -ом шаге сканирования; $\rho_s(x, y)$ – распределение чувствительности элемента ПИ; $I(x, y)$ – распределение интенсивности в изображении; x, y – координаты элемента сканирования; x_0, y_0 – координаты элементарных участков изображения объекта от-

носителю его условного центра. Размеры области интегрирования изменяются в соответствии с алгоритмом сканирования, размерами элемента покрытия и шагом поэлементного разложения поля изображения пространства наблюдения.

Следуя [10], в отсутствии межстрочной обработки сигналов и принятии решения об обнаружении объекта, хотя бы в одном из отдельно разрешаемых элементов сканирования поля изображения, вероятность обнаружения объекта в кадре изображения пространства наблюдения, с учетом наличия сигналов от объекта в m смежных, покрывающих изображение объекта, строках поля сканирования, найдем из уравнения

$$D_1 = 1 - 2^{-m} \int_0^{\Delta_y} w(\delta_j) \prod_{j=1}^m \left\{ 1 - \Phi \left[\left(\Psi_m / \sqrt{2\pi} \right) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \int_{a_{j-1}}^{a_j} e^{-t^2/2} dt - \Psi_0 \right] \right\} d\delta_1, \quad (1)$$

где $w(\delta_j) = \Delta_y^{-1}$ – плотность распределения случайной величины $\delta_j = \delta_1 + (j-1)\Delta_y$; δ_1 – размер части изображения объекта в первой из m строк поля; $\Delta_y = f(a_x; a_y)$ – параметр дискретного разложения, соответствующий эталону меры покрытия пространства изображения; Ψ_m – максимально возможное отношение "сигнал/шум" при данном наборе параметров разложения поля изображения и известных интенсивностях излучения объекта и фона; $a_j = (\delta_j/r_0 - 1)$; $a_{j-1} = \delta_j/r_0 - a$; $a = 2r_s/2r_0$ – относительный размер элемента покрытия поля; Ψ_0 – относительный пороговый уровень, определяемый критерием обнаружения, являющийся аргументом интеграла вероятности $\Phi[\cdot]$:

$$\Psi_0 = \arg \Phi[1 - 2F_1\tau_U(a+1)/T_K a],$$

где F_1 – вероятность ложного срабатывания; τ_U – длительность видеосигнала от изображения объекта. Это выражение учитывает, что число разрешаемых элементов покрытия поля изображения, в которых процесс обнаружения отсчетов сигнала, не перекрывающихся на интервале корреляции (равном временному интервалу занимаемому сигналом) $\tau_c = \tau_U(a+1)/a$, является независимым, определяется отношением $N_s = T_U/\tau_c = nT_K/\tau_c$, где T_U – время просмотра n кадрами поля изображения. С изменением размеров элемента покрытия поля сканирования изменяется и число разрешаемых элементов до максимально возможного числа, определяемого числом элементов покрытия поля изображения: $N_m = h_x h_y / 4r_0^2$. Максимально возможное отношение сигнал/шум Ψ_m является параметром обнаружения – неслучайной величиной, численно равной отношению "сигнал/шум" на выходе согласованного фильтра, получаемом при совмещении центров изображения объекта и сканирующего элемента покрытия.

Многопараметрическое уравнение (1) устанавливает зависимость вероятности обнаружения объекта в кадре поля изображения от параметров, характеризующих, в том числе, условия обнаружения, алгоритм, траекторию и размеры элементов

сканирования, статистику распределения, динамику и относительный размер изображения объекта.

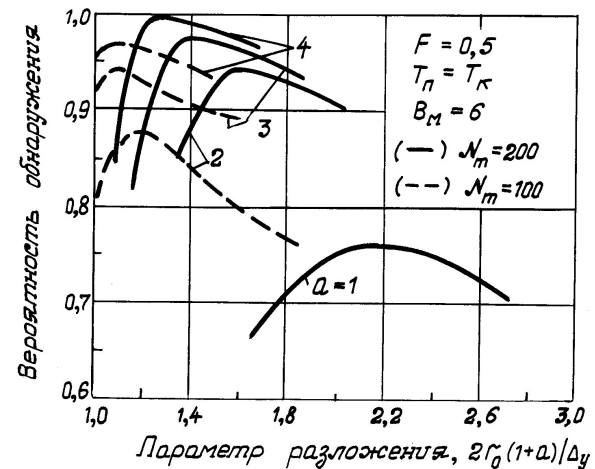


Рис. 1. Зависимость вероятности обнаружения для элемента квадратной и круглой форм

Так как аналитическое решение вероятностного функционала (1) получить не удалось, то на рис. 1 представлены результаты численного его решения на компьютере для элемента покрытия квадратной формы с равномерным (сплошная линия) и круглой формы (пунктир) гауссовым распределениями чувствительности. Здесь $B_M = \Psi_m(\Delta_y = 2r_s)$. Влияние вариаций параметров на вероятность обнаружения в многокадровом режиме $D_n = 1 - \prod_{j=1}^n (1 - D_1)$ отражает таблица. Результаты численного анализа (рис. 1) показывают, что максимум отношения "сигнал/шум", адекватный точке наилучшей чувствительности систем, является необходимым, но недостаточным условием обеспечения предельной чувствительности сканирующих средств измерения на стадии обнаружения объекта. Поэтому под предельной чувствительностью в режиме обнаружения следует понимать минимальное значение освещенности или интенсивности светового потока, сосредоточенного в изображении объекта, обнаруживаемого с заданной вероятностью обнаружения при оптимальном наборе параметров системы для принятого критерия обнаружения и заданных условий ее работы. Пороговое значение интенсивности светового потока или освещенности изображения объекта определяется известными выражениями для отношения "сигнал/шум" [4, 5, 10]. Зависимости, приведенные на рис. 1, подтверждают, что выбор параметров сканирования пространства изображения, максимизирующих вероятность обнаружения, дает экстремальное, а значит, наилучшее значение предельной чувствительности сканирующей системы контроля оптически наблюдаемого объекта.

Иногда [4, 5, 10] оперируют понятием контрастной чувствительности. Предельная контрастная чувствительность сканирующих измерительных средств будет определяться минимальным значением контраста объекта на внешнем фоне, при ко-

тором объект контроля обнаруживается с требуемой достоверностью системой, имеющей оптимальный по условиям работы набор параметров. Использование в сканирующих системах режима счета фотонов, метода последовательного анализа, адаптации к фону, пространственной селекции, вейвлет- и других методов обработки оптического или электрического сигнала, являются способами повышения их предельной чувствительности. Сравнение эффективности обнаружения объекта по критерию Неймана-Пирсона одновременно двумя методами (токовым и счета фотонов) обработки сигнала представлено на рис. 2.

Таблица. Вероятность пропуска (1-D) объекта при однокадровой $T_n = T_k$ и многокадровой $T_n = nT_k$ процедурах обнаружения ($T_n = \text{const}$)

Элемент квадратный равноразмерной чувствительности	Отношение "сигнал/шум"	Вероятность пропуска при однократном режиме	Вероятность пропуска при многократном режиме	
			n	в кадре
2	6	$8 \cdot 10^{-2}$	2	0,122
	10	10^{-5}		$1,5 \cdot 10^{-7}$
3	6	$4,8 \cdot 10^{-2}$	3	0,118
	10	$1,5 \cdot 10^{-5}$		$1,65 \cdot 10^{-3}$
4	6	$4 \cdot 10^{-2}$	4	0,11
	10	$2,62 \cdot 10^{-7}$		$1,46 \cdot 10^{-4}$

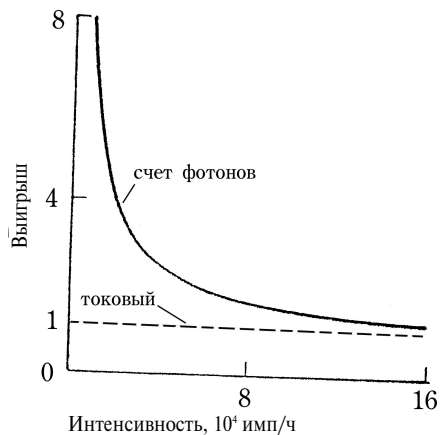


Рис. 2. Иллюстрация преимущества метода счета фотонов по сравнению с токовым в зависимости от интенсивности потока фотонов

Влияние вариаций статистики объекта и фона на фрактальную размерность изображения оценим с использованием [11] вейвлет-метода (W-метода) представления сигналов изображения. Для упрощения анализа путем сжатия изображения необходимо представить его в виде W-базисов с большим числом нулевых моментов. При разложении сигнала изображения в выбранный (ортогональный или другого типа) W-базис, с последующими преобразованием и интегрированием, подавляются с точностью до погрешности преобразования малоинформативные низкочастотные компоненты и сигнал представится набором W-базисов более высокого порядка. Эта

сортировка значимых весовых коэффициентов разложения соответствует сжатию сигнала; чем меньше коэффициентов вейвлет-разложения остается в представлении сигнала (большее число нулевых моментов разложения), тем лучше сжатие. Принимая во внимание результаты работы [11], основанные на справедливости равенства Парсеваля разложению по ортогональным системам функций, характеристику изображения фона B_{w0} запишем в виде наиболее значимых B_{wi} коэффициентов W-разложения

$$B_{w0}^2 = \sum_{i=2}^4 B_{wi}^2. \quad (2)$$

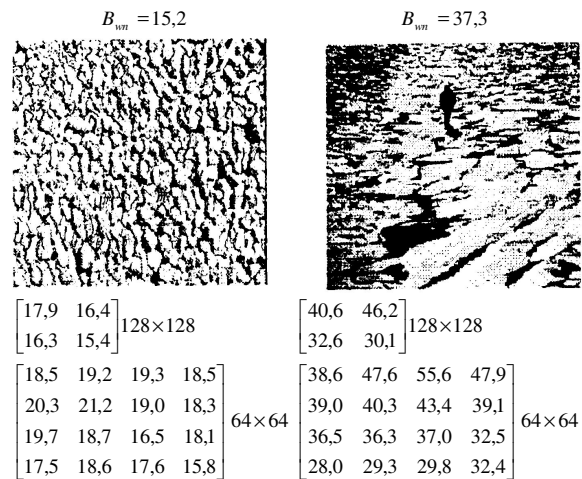


Рис. 3. Устойчивость W-характеристики изображения фона

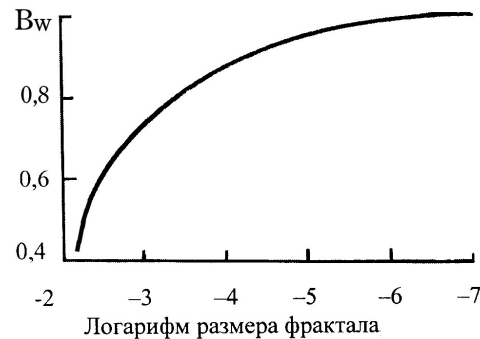


Рис. 4. Влияние изменения фрактальной размерности на вейвлет-характеристику

Причем в разложении изображения фона по W-базисам скорость сходимости вейвлет-коэффициентов к нулю велика: $B_{w2}/B_{w0} \sim 1/7$ и $B_{w3}/B_{w0} \sim 1/20$, где B_{w0} — коэффициент, отражающий среднюю интенсивность полного исходного для вейвлет-изображения фона. Для оценки степени влияния энергетических характеристик изображения фона на фрактальную размерность необходимо провести анализ закономерности поведения B_{w0} при вариациях изображения фона наблюдаемого пространства. Физически ясно, что независимость фрактальной размерности от интенсивности фона при изменении размеров изображения объекта, текстуры изображения фона и их масштабов будет соответствовать условию устойчивости W-характерис-

тики изображения фона: $B_{\text{фн}} = \text{const}$. Для оценки постоянства $B_{\text{фн}}$ используем типовые (для определения адекватности получаемого результата) [11] изображения фона. Выявление закономерности поведения $B_{\text{фн}}$ от параметров изображения проведем по методу покрытия [12] для двух наборов (64×64 и 128×128) элементов разложения пространства фрактального изображения, с вычислением значений характеристики $B_{\text{фн}}$ и ее составляющих коэффициентов разложения (2).

В представленных на рис. 3 матрицах значений двух вариантов покрытия исходных двух типовых изображений фона заметно, хотя и незначительное (в 1,05 раза) изменение W -характеристики изображения фона при двукратном масштабировании. В принципе (с 5 % погрешностью) можно говорить об устойчивости или постоянстве $B_{\text{фн}}$ -вейвлет характеристики изображения фона. Влияние изменения фрактальной размерности изображения объекта постоянной интенсивности, наблюдаемого на фрактальном фоне с 25 % контрастом, представлено на рис. 4 в виде нормированной зависимости

$B_{\text{фн}} = B_{\text{фн}}/B_{\text{фн0}}$ от логарифма $a_{\text{фр.об}} = a_{\text{фр.об}}/a_{\text{фр.ф}}$ относительного размера фрактального изображения объекта по сравнению с $a_{\text{фр.ф}}$ – фрактальной размерностью изображения фона. Видно, что соотношение фрактальных размеров изображений объекта и фона при сопоставимых их величинах оказывает заметное влияние на величину наиболее значимых коэффициентов разложения сигнала изображения по базисам вейвлета.

В заключение отметим, что предельная чувствительность сканирующих средств в режиме обнаружения определяет пороговый уровень светового потока от объектов, которые могут быть с заданной достоверностью обнаружены, и слежение за которыми для измерения их параметров может быть осуществлено. Следует учитывать влияние интенсивности светового потока от объекта и фона на величину оптимального размера дискретизации покрытия пространства изображения, подтверждаемое наличием зависимости фрактальной размерности изображения от энергетических характеристик, в том числе, и статистики изображений объекта и фона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крутиков В.Н. История развития и состояние приемников излучения как первичных преобразователей оптических величин, сигналов и изображений // Измерительная техника. — 2002. — № 9. — С. 28–33.
2. Сытинская Н.Н. Абсолютная фотометрия протяженных объектов. — Л.: ЛГУ, 1948. — 80 с.
3. Ратнер Е.С. О пороговой чувствительности приемников излучения // Оптика и спектроскопия. — 1960. — Т. 9. — С. 101–107.
4. Гуревич С.Б. Эффективность и чувствительность телевизионных систем. — М.-Л.: Энергия, 1964. — 344 с.
5. Михалков К.В. Основы телевизионной автоматики. — Л.: Энергия, 1967. — 284 с.
6. Фанченко С.Д., Фролов В.А. О реальной чувствительности многокаскадных ЭОП // Приборы и техника эксперимента. — 1970. — № 2. — С. 210–212.
7. Мищенко Н.И., Слободян С.М. Экспериментальная оценка влияния параметров разложения на помехоустойчивость телевизионной автоматической системы на диссекторе // Вопросы телевизионной техники. — Томск: ТГУ. — 1975. — Вып. 1. — С. 23–28.
8. Агапов Е.С., Александрин Ю.С., Анисимов В.Ф., Поляков М.А., Птицин И.В., Романенко В.Л. Измерение пороговой чувствительности астрономической телевизионной системы с автоматической регистрацией изображения звезд // Радиотехника. — 1978. — Т. 33, № 7. — С. 57–59.
9. Слободян С.М., Сазанович В. М., Галахов В. Н. Следящая система с диссектором для измерения угловых флуктуаций оптического пучка // Приборы и техника эксперимента. — 1980. — № 4. — С. 192–194.
10. Пустынский И.Н., Слободян С.М. Диссекторные следящие системы. — М.: Радио и связь, 1984. — 136 с.
11. Laine A. F. Wavelet applications in signal and image processing // Proc. Society Photo-Optical Instrumentation Engineers. — 1990. — V. 2034. — P. 237–296.
12. Слободян С.М. Влияние погрешности фокусировки на оценку фрактальной размерности изображения // Известия Томского политехнического университета. — 2004. — Т. 307. — № 1. — С. 43–48.