

С учетом (5) эта оценка вычисляется следующим образом:

$$\hat{\sigma}^2(M, T) = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^L n_k (k\Delta f_T)^2, \quad \tau = \text{const.} \quad (12)$$

Получая гистограммы распределения флуктуаций частоты по скоростям ухода при различных T и вычисляя параметр $\hat{\sigma}^2(M, T)$, можно найти оценку корреляционной функции $\hat{R}_f(T)$ процесса флуктуаций частоты. Рассматриваемый параметр связан с $\hat{R}_f(T)$ простым соотношением [3]

$$\hat{\sigma}^2(M, T) = 2 [\hat{R}_f(0) - \hat{R}_f(T)], \quad (13)$$

откуда сразу получаем оценку автокорреляционной функции. Выполнив преобразование Фурье над $\hat{R}_f(T)$, определяем спектральную плотность мощности частотных флуктуаций.

Таким образом, предложенная методика оценки стабильности частоты ОКГ на основании соответствующих гистограмм плотности распределения позволяет определять параметры стабильности как во временной, так и в частотной области, а сами гистограммы можно рассматривать как обобщенные характеристики стабильности частоты. Предложенные характеристики применимы для оценки стабильности частоты не только ОКГ, но и генераторов, работающих в других диапазонах, и позволяют унифицировать алгоритм измерений и измерительную аппаратуру.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стабильность частоты: [Тематический выпуск].— ТИИЭР, 1966, т. 54, № 2.
2. Burnes J. A. et al. Characterization of Frequency Stability.— IEEE Trans. on Instrum. and Meas., 1974, vol. IM-20, N 2.
3. Рютман Ж. Характеристики нестабильности фазы и частоты сигналов высокостабильных генераторов.— ТИИЭР, 1978, т. 66, № 9.
4. Гусев А. Ю. и др. Аппаратурная реализация устройства для получения оценки частотной стабильности ОКГ.— В кн.: Прикладной анализ случайных сигналов. Новосибирск: изд. ИАиЭ СО АН СССР, 1973.
5. Борисов Б. Д., Гусев А. Ю., Собетель Г. М. Автоматизация исследований в лазерной спектроскопии. Препринт № 33—79. Новосибирск: изд. ИТФ СО АН СССР, 1979.
6. Аппаратура для частотных и временных измерений/Под ред. А. П. Горшкова. М.: Сов. радио, 1971.

Поступило в редакцию 14 апреля 1980 г.

УДК 535.3

И. Н. СВЕТИЦКАЯ, Ю. А. ФЛЕГОНТОВ
(Ленинград)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ МЕТРИКИ В ЗАДАЧЕ ОБНАРУЖЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НА ФОНЕ СЛУЧАЙНЫХ ПОМЕХ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Целью многих экспериментов, касающихся различных разделов физики, в частности оптики, является получение оптической информации в виде фотометрических характеристик изображения объекта. При этом, как правило, при формировании изображения и его регистрации возникают искажения и случайные помехи. Они зависят от распределения яркости в плоскости объекта, от характеристик оптического прибора и погрешностей регистрации.

Если утрата оптической информации в приборе не позволяет обеспечить требуемую точность эксперимента, возникает задача восстановления информации об объекте при исследовании его изображения.

В данной работе рассматривается эффективный путь численного решения такой задачи в случае характерных объектов, позволяющих свести ее к серии задач на обнаружение [1, 2].

Пусть нас интересует распределение $\varphi(x, y)$ интенсивности в плоскости объекта S , отображаемого оптическим прибором с известной аппаратной функцией $Q(x, x'$,

y, y'), которая описывает изображение в плоскости (x', y') единичного точечного источника с координатами (x, y) .

В таком приборе распределение интенсивности $F(x', y')$ в плоскости изображения при наличии случайного фона $\Delta f(x', y')$ имеет вид

$$f(x', y') = \int_S \varphi(x, y) Q(x, x', y, y') dx dy, \quad (1)$$

$$F(x', y') = f(x', y') + \Delta f(x', y').$$

Допустим, что мы имеем информацию о конкретных свойствах функции $\varphi(x, y)$, связанную с условиями эксперимента. Будем считать, например, что распределение интенсивности в плоскости объекта может быть описано суперпозицией M функций, имеющих заданный вид $\{U_i(x_i, y_i, x, y)\}_{i=1}^M$, где неизвестны координаты $\{x_i, y_i\}_{i=1}^M$.

Сведем задачу определения $\varphi(x, y)$ к задаче последовательного обнаружения изображений объектов $U_i(x_i, y_i, x, y)$ на фоне шумов. Последнюю задачу будем решать, осуществляя статистический подход.

Предположим, что исследование изображения объекта с фоном производится сканированием по координате щелью прибора площадью s . При этом регистрируются величины, пропорциональные потокам, проходящим через площадь щели s . В случае если регистрируется изображение известного объекта $U_i(x_i, y_i, x, y)$, эти величины могут быть представлены так:

$$F_{ij}^s = \eta_j^s + f_{ij}^s, \quad (2)$$

где f_{ij}^s — величины, пропорциональные потокам, обусловленным только изображением объекта $U_i(x_i, y_i, x, y)$ без учета фона, соответствующие j -му шагу сканирования; η_j^s — случайная величина, обусловленная фоном.

С учетом (1)

$$f_{ij}^s = \int_{s_j} \int f_i(x', y') dx' dy', \quad (3)$$

s_j определяет интегрирование в пределах щели площадью s , расположенной соответственно j -му шагу сканирования, а

$$f_i(x', y') = \int_S \int U_i(x_i, y_i, x, y) Q(x, x', y, y') dx dy. \quad (4)$$

Для измерения фона в (2) имеем также

$$\eta_j^s = \int_{s_j} \int \eta(x', y') dx' dy'. \quad (5)$$

Здесь $\eta(x', y')$ — случайная величина с известным распределением, характеризующая интенсивность фона. Ее математическое ожидание — a , дисперсия — σ^2 . Если в интегралах (3) и (5) воспользоваться сумматорной формулой при интегрировании по координате x' (это обусловлено использованием узких щелей, расположенных вдоль оси $O'y'$), то (3) и (5) примут вид

$$F_{ij}^s = \sum_{n=1}^h (f_{ijn}^s + \eta_{jn}^s), \quad (6)$$

где

$$f_{ijn}^s = \int_0^l dy' f_i(x'_{nj}, y'), \quad (7)$$

l — высота щели, $\{x'_{nj}\}_{n=1}^h$ — узлы сумматорной формулы. Аналогично

$$\eta_{jn}^s = \int_0^l dy' \eta(x'_{nj}, y'). \quad (8)$$

В результате сканирования получаем зависимость измеренной величины потока Φ_j^s от положения щели. Следуя (6), можно считать, что величина Φ_j^s всегда представляет собой выборку случайных величин ξ_{nij}^s . Пусть при этом в случае аддитивного некоррелированного шума одинаков закон их распределения с одинаковой дисперсией σ^2 и разными математическими ожиданиями a_{nij} , т. е.

$$\Phi_j^s = \sum_{n=1}^n \xi_{nij}^s, \quad (9)$$

$$\xi_{nij}^s = \eta_{jn}^s + \delta_{nij}^s f_{nij}^s,$$

$$a_{nij} = a + \delta_{nij}^s f_{nij}^s,$$

где $\delta_{nij}^s = 0$, если измеряется чистый фон, и $\delta_{nij}^s = 1$, если измеряется объект с фоном.

Введем B — множество выборок k случайных величин, дающих суммарную величину Φ_j^s , лежащую в пределах интервала $[\Phi_1, \Phi_2]$. Тогда вероятность того, что ξ_{nij}^s принадлежат B , запишется так:

$$P_j(\{\xi_{nij}^s\}_{n=1}^k \in B) = \int \dots \int_B P_{1j} P_{2j} \dots P_{kj} d\xi_{1ij} d\xi_{2ij} \dots d\xi_{kij}. \quad (10)$$

Здесь $P_{nj} = P(\xi_{nij})$, P_{nj} — плотность распределения вероятностей случайной величины ξ_{nij}^s .

Рассмотрим нормальный закон распределения помех. Будем исследовать значение коэффициента K_j^i , пропорционального разности вероятности того, что регистрируется изображение объекта $U_i(x_i, y_i, x, y)$ с фоном, и вероятности того, что регистрируется чистый фон (на j -м шаге сканирования):

$$K_j^i = (P_{o+\Phi}^{ji} - P_{\Phi}^{ji}) / (P_{o+\Phi}^{ji} + P_{\Phi}^{ji}), \quad (11)$$

$P_{o+\Phi}^{ji}$ — плотность вероятностей регистрации объекта с фоном, а P_{Φ}^{ji} — чистого фона при энергии регистрации Φ_{ji}^s . Тогда

$$K_j^i = \frac{\exp \left\{ \frac{2(\Phi_{ji}^s - ka) \sum_{n=1}^k f_{ijn}^s - \left(\sum_{n=1}^k f_{ijn}^s \right)^2}{2k\sigma^2} \right\} - 1}{\exp \left\{ \frac{2(\Phi_{ji}^s - ka) \sum_{n=1}^k f_{ijn}^s - \left(\sum_{n=1}^k f_{ijn}^s \right)^2}{2k\sigma^2} \right\} + 1}. \quad (12)$$

Можно называть K_j^i коэффициентом восстановления объекта $U_i(x_i, y_i, x, y)$ в зависимости от положения щели прибора при сканировании исследуемого изображения. Вычисление K_j^i определяет контрастность изображения в вероятностном смысле. Область $K_j^i > 0$ выделяет участки, где превалирует вероятность изображения

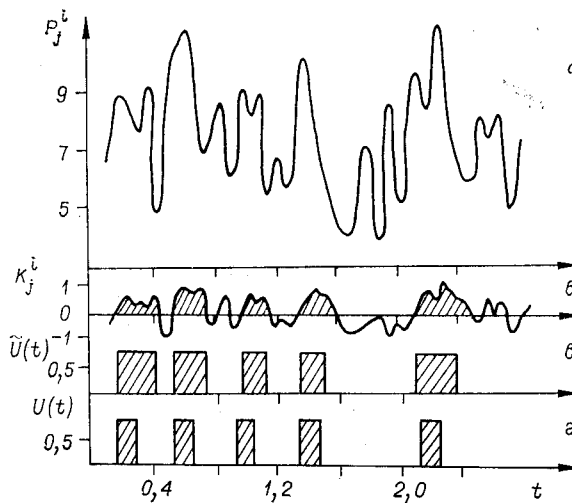


Рис. 1.

объекта $U_i(x_i, y_i, x, y)$. В области $K_j^i < 0$ преобладает вероятность чистого шума. Соотношения (3) — (9), (12) показывают связь K_j^i с конкретными условиями эксперимента.

Исследования соотношения (12) показывают, что при очень больших и очень малых Φ_{ji}^s величина K_j^i не чувствительна к изменениям Φ_{ji}^s . В то же время при Φ_{ji}^s , сравнимых с ka , величина $dK_j^i/d\Phi_{ji}^s$, характеризующая чувствительность алгоритма к наличию сигнала, может быть наибольшей, и это достигается выбором условий эксперимента.

Приведенные рассуждения были применены при корректировке на ЭВМ фотоизображений штриховой строки,

полученных в оптическом приборе с известной аппаратной функцией при гауссовом распределении шума. Вычисления K_j^i , где $U_i(x_i, y_i, x, y)$ — интенсивность штриха с координатами центра x_i, y_i , позволили определить наиболее вероятное расположение штрихов ($K_j^i > 0$) при различных параметрах шума. На рис. 1 представлены результаты вычислений такого рода, приведенных для эталонной строки (см. рис. 1, *г*). На рис. 1, *а* показаны вычисленные результаты фотометрирования фотонизображения строки вместе с фоном ($\sigma = 0,5 \alpha$). На рис. 1, *б* даны значения K_j^i , на рис. 1, *в* мы видим восстановленную строку, т. е. строку, в которой участки $K_j^i > 0$ идентифицированы как штрихи.

Графики, подобные рассмотренному, получены для различных плоских объектов, описываемых суперпозицией штрихов в условиях шума с разными параметрами. Подобные вычисления показали эффективность восстановления объектов в широких пределах изменения экспериментальных условий.

Следует отметить, что приведенный подход применим к восстановлению более сложных объектов, задаваемых определенным классом функций $U_i(x_i, y_i, x, y)$, что обусловлено относительной простотой алгоритма.

На рис. 2 приведен результат численного эксперимента по восстановлению двумерного объекта — буквенного кода. Функция рассеяния представляла собой квадрат постоянной интенсивности со стороной h . Исходный объект расположен в верхней части фотографии. Ширина штрихов, составляющих буквы, равна h . На объект наложен шум, распределенный по нормальному закону с дисперсией 0,8 и математическим ожиданием (фоном) 1, где за единицу принята интенсивность штриха исходного объекта. Шум носит зернистый (квантованный) характер. Зерно случайного почернения имеет размеры прямоугольника со сторонами $h/8$ и $h/4$. За зрачок диссектора принята прямоугольная щель со сторонами h и $h/4$. Изображение объекта с помехами, зарегистрированное диссектором, приведено на средней фотографии, на нижней — результат восстановления по описанному методу с использованием формулы (12).

На рис. 3, *а* представлена фотография дефокусированного текста, образец которого дан на рис. 3, *б*. С помощью фотоввода дефокусированный текст преобразовывался в двумерный цифровой массив, который обрабатывался на электронно-вычислительной машине.

По заданному размытию эталонного штриха численно восстанавливалась функция рассеяния линии. Для этого использовался метод, предложенный в работе [3]. Затем строка текста разбивалась на десять линейных зон по высоте буквы, и в каждой зоне применялся алгоритм восстановления. Вертикальные интенсивные линии восстанавливались по методу работы [3], а слабые сигналы между ними — по методу, предложенному в данной статье. Результаты усреднялись по трем смежным законам. Априорная информация о шуме, который в данном случае принесен фотовводом и состоит из аддитивной и мультипликативной компонент, определялась из записи фотометрического клина, который также с помощью фотоввода переводился в цифровой массив.

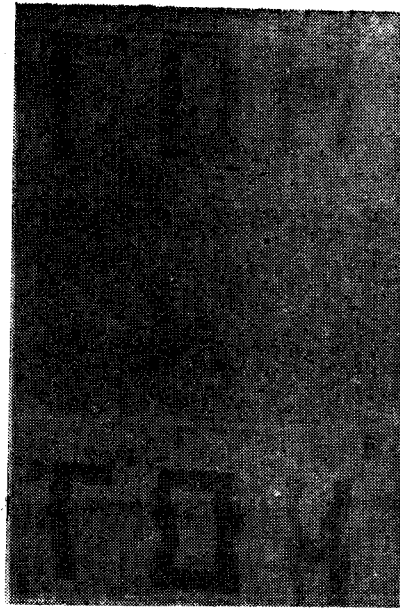


Рис. 2.

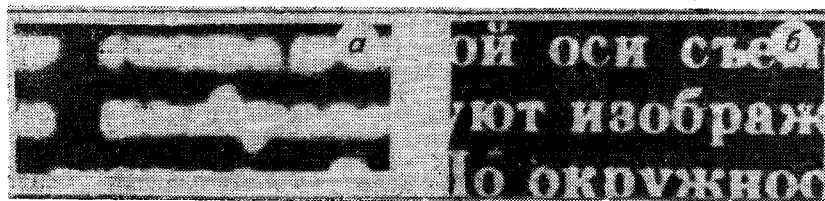


Рис. 3.

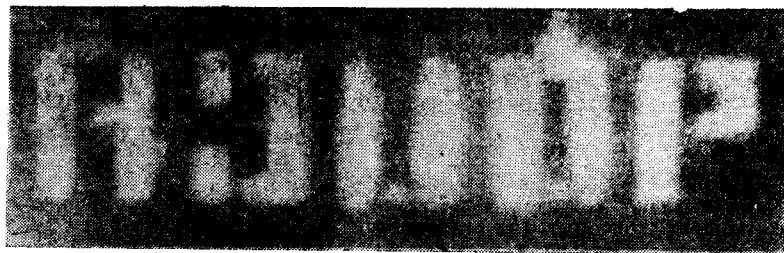


Рис. 4.

Об окончательном результате эксперимента можно судить по рис. 4, где в качестве примера приведено получившееся изображение первых пяти букв слова из нижней строки рис. 3, а.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шестов Н. С. Выделение оптических сигналов на фоне случайных помех. М.: Сов. радио, 1967, с. 347.
2. Hawkins J. K. Фототехника при выделении формы сигнала.— Phot. Sci. and Eng., 1964, vol. 8, N 6.
3. Свентицкая И. Н., Шапиро Ю. А. О восстановлении оптического сигнала по его электронному изображению.— Автометрия, 1972, № 3, с. 15—19.

*Поступило в редакцию 18 декабря 1978 г.;
окончательный вариант — 29 января 1980 г.*

УДК 621.378

А. А. КАСТОРНОВ
(Новосибирск)

ОБ ОДНОМ ВАРИАНТЕ ПРОДОЛЬНОЙ НАКАЧКИ КВАНТОВОГО УСИЛИТЕЛЯ ЯРКОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Ранее в работе [1] были рассмотрены основные характеристики оптического квантового усилителя (ОКУ) яркости изображения с поперечной накачкой красителя. В таком варианте накачки затруднено формирование канала усиления определенной формы. В связи с этим в данном кратком сообщении приведены экспериментальные результаты исследования квантового усилителя яркости изображения на красителе с продольным вариантом накачки. Выбор схемы усиления яркости изображения с продольным вариантом накачки определен необходимостью улучшения пространственного разрешения в системе транспарант (мира) — объектив — оптический квантовый усилитель и повышения эффективности усилителя.

Схема эксперимента приведена на рисунке. Излучение второй гармоники рубинового лазера длительностью 25 нс с помощью сферической линзы 5 фокусируется в объем кюветы 3 ОКУ на красителе (раствор родамина 6Ж в этаноле) через отверстие в экране 4. Размеры активной области ОКУ $2 \times 3 \times 6$ мм³. Входным сигналом ОКУ является сигнал, близкий к фурье-образу распределения поля в плоскости стандартной миры 1, получаемому с помощью объектива 2. Подсветка миры осуществляется от вспомогательного лазера на красителе — родамин 6Ж в этаноле, накачка которого производится частью излучения, идущего на квантовый усилитель. Наблюдение усиленного по яркости изображения осуществляется с помощью экрана 4, расположенного в плоскости, сопряженной с плоскостью миры, при этом линейное увеличение, получаемое с помощью объектива, $\beta \approx 10$.

Измерение однопроходного усиления (отношение энергии усиленного сигнала к энергии входного сигнала) осуществлялось с помощью фотоумножителя ФЭУ-83