

УДК 621.397

Информационный критерий качества формирования и анализа изображений при бесконтактном контроле объектов

© 2020 г. **И. П. Гуков***, доктор техн. наук; **М. В. Дайнеко****, канд. техн. наук

*Университет ИТМО, Санкт-Петербург

**Управление информационных технологий и связи, Санкт-Петербург

E-mail: gurov@mail.ifmo.ru

Поступила в редакцию 10.03.2020

DOI:10.17586/1023-5086-2020-87-07-09-17

Представлены результаты исследования информационного критерия качества применительно к задачам формирования и обработки изображений в системах бесконтактного контроля объектов с учетом статистических характеристик сигналов, представляющих изображения. Рассмотрен пример применения информационного критерия к интерферометрическим системам и проведено сравнение информационного критерия с традиционными критериями — отношением сигнал/шум и погрешностью определения фазы интерференционных полос. Информационный критерий качества носит универсальный характер применительно к решению различных задач бесконтактного контроля объектов.

Ключевые слова: информационный критерий, бесконтактный контроль объектов, отношение сигнал/шум.

Коды OCIS: 100.2960, 120.0120, 120.2650

ВВЕДЕНИЕ

Изображения как форма представления информации составляют значительную долю в общем объеме информации, хранимой и передаваемой в информационных системах, а также при решении многих прикладных задач [1]. В этом существенное значение имеет качество представления информации в соответствии с заданным критерием.

Широко используемые критерии качества представления видеoinформации можно разделить на два вида [2, 3]: критерии качества при субъективном восприятии и объективные показатели качества. При бесконтактном контроле различных объектов на основе формирования и анализа изображений основное значение имеют показатели второго вида, которые включают три основные группы широко

используемых критериев, не учитывающих пространственную структуру изображения (см., например [2], С. 151–154; [4], С. 612–614): отношение сигнал/шум (ОСШ, англ. SNR), в том числе пиковое отношение (ПОСШ, англ. PSNR), среднее квадратичное отклонение (СКО) и вероятностные критерии.

Отношение сигнал/шум определяется выражением

$$\text{SNR} = \frac{\sigma^2}{\sigma_n^2}, \quad (1)$$

где σ^2 — дисперсия исходных значений изображения, σ_n^2 — дисперсия обусловленных влиянием шума отклонений от истинных значений. Отметим, что известны другие определения ОСШ, в частности, отношение максимального значения сигнала к СКО шума.

Пиковое отношение сигнал/шум [3]

$$\text{PSNR} = 10 \lg \frac{(2^n - 1)^2}{\sigma_n^2} \quad (2)$$

вычисляется в логарифмической шкале в форме отношения квадрата максимального значения пиксела изображения в n -битном представлении к дисперсии ошибки (обычно обусловленной влиянием шума).

Среднее квадратичное отклонение вычисляется согласно выражению [4]

$$\sigma_I = \sqrt{\frac{1}{LW} \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^W (\hat{I}(i, j) - I(i, j))^2}, \quad (3)$$

где $\hat{I}(i, j)$ — оценка изображения с координатами пикселей (i, j) , $I(i, j)$ — истинное (идеальное) изображение, $L \times W$ — размер изображения в пикселах.

Критерии (1)–(3) удобны ввиду их простоты, но не всегда адекватны решаемым задачам (см., в частности, примеры в [3]) вследствие того, что недостаточно полно учитывают вероятностные характеристики изображения.

Этот недостаток частично устраняется при использовании вероятностного критерия, который определяется выражением [2]

$$\int_{\varepsilon_{\min}}^{\varepsilon_{\max}} p(\varepsilon) d\varepsilon = P, \quad (4)$$

где $\varepsilon(i, j) = \hat{I}(i, j) - I(i, j)$, ε_{\min} и ε_{\max} — минимальное и максимальное значения ошибки, $p(\varepsilon)$ — плотность вероятности ошибки. Значение критерия (4) можно получить экспериментально из гистограммы распределения ошибки, однако для его применения требуется знание «эталонного» изображения $I(i, j)$.

Приведенные выше критерии используются главным образом для получения оценок качества отдельных изображений при различных процедурах регистрации и обработки. Применительно к последовательности видеок кадров используются критерии на основе метрик, разработанных для систем цифрового телевидения и видеокодеков с учетом требований стандартов кодирования H.264, MPEG и др. (см., например [3, 5]). Упомянутые выше метрики обычно учитывают требования к качеству визуального восприятия видеон-



Рис. 1. Блок-схема опτικο-цифровой системы.

формации и поэтому не всегда применимы непосредственно к задачам бесконтактного контроля объектов.

Ввиду сложности и разнообразия задач бесконтактного контроля объектов целесообразно обратиться к теоретико-информационному подходу [1] и обобщенной структуре видеoinформационной системы (рис. 1), обозначив вход опτικο-цифровой системы как X и выход как Y , и использовать информационный критерий, характеризующий качество системы в целом в форме

$$Q = \frac{H(X) - H(X|Y)}{H(X)} = 1 - \frac{H(X|Y)}{H(X)}, \quad (5)$$

где $H(X)$ — энтропия источника сообщений (в данном рассмотрении — исследуемого объекта), $H(X|Y)$ — потери информации вследствие влияния искажений и помех. Качество системы тем выше, чем большие значения принимает критерий (5). Очевидно, что максимальное значение $Q_{\max} = 1$.

Информационный критерий известен в теории связи, согласно формуле (5) он выражается через взаимную информацию X и Y (см., например [6], С. 227), однако применение этого критерия к задачам формирования и анализа изображений при бесконтактном контроле объектов ранее не рассматривалось. В настоящей работе представлены результаты исследования информационного критерия качества и особенностей его применения при решении прикладных задач бесконтактного контроля объектов.

ОПИСАНИЕ ИССЛЕДУЕМЫХ ОБЪЕКТОВ С ПОЗИЦИЙ ТЕОРИИ ИНФОРМАЦИИ

Согласно теории информации исследуемый объект можно интерпретировать как источник сообщений [1], от которого информация передается через оптический и электронный каналы (соответственно посредством отраженного оптического излучения и зарегистрированных камерой видеок кадров). В частности,

в случае контроля характеристик поверхности объекта под сообщениями понимается информация о степени отражения r_p на расстоянии до объекта z_q (пространственные координаты в боковом направлении опускаем для упрощения записи).

Вероятность получить коэффициент отражения r_p на расстоянии z_q можно выразить как

$$P(r_p, z_q) = P(r_p)P(z_q) \quad (6)$$

ввиду взаимной статистической независимости коэффициента отражения и положения точки поверхности. При этом, следуя теории информации по Шеннону, энтропию источника сообщений можно вычислить как

$$H(R, Z) = H(R) + H(Z) = - \sum_{p=1}^{M_r} P(r_p) \log_2 P(r_p) - \sum_{q=1}^{M_z} P(z_q) \log_2 P(z_q), \quad (7)$$

где $r_p \in R$, $z_q \in Z$, R и Z — случайные величины. Если коэффициент отражения представлен, например, 256-ю уровнями (M_r) и разрешение по расстоянию до поверхности объекта соответствует 250-ти интервалам Δz ($M_z = 250$), энтропия (7) равна примерно двум байтам на одну точку рельефа. Эта информация должна быть передана через оптический и электронный субканалы с максимальной скоростью и минимальными потерями информации. Канал передачи информации должен обеспечивать требуемую пропускную способность при минимизации стоимости.

Обратимся к введенному выше информационному критерию (5) для определения показателя качества контроля рельефа поверхности объектов. Энтропия источника сообщений $H(Z)$ интерпретируется в данном случае как среднее количество информации, получаемой от каждой точки рельефа (высота которого z_q , $q = 0, \dots, M_z - 1$, является случайной величиной, $z_q \in Z$), и вычисляется согласно формуле (7) как

$$H(Z) = - \sum_{q=0}^{M_z-1} P(z_q) \log P(z_q), \quad (8)$$

где $P(z_q)$ — вероятности значений высоты рельефа, которые оцениваются при анализе гистограммы значений z_q .

Погрешности δz_q восстановления рельефа приводят к фактическим оценкам рельефа

$$z'_q = z_q + \delta z_q. \quad (9)$$

При этом распределение вероятностей $P(z'_q)$ отличается от истинного $P(z_q)$. Полагая, что слагаемые в выражении (9) статистически независимы, можно оценить распределение вероятностей $P(z'_q)$ в форме

$$P(z'_q) \approx \sum_{q=0}^{M-1} [p_z(z_q) \otimes p_\delta(\delta z_q)] \Delta z, \quad (10)$$

где $p_z(z_q)$ и $p_\delta(\delta z_q)$ — соответствующие плотности вероятности, Δz — шаг по высоте рельефа, разрешаемый системой бесконтактного контроля, \otimes — символ свертки.

Критерий (5), очевидно, можно записать в форме

$$Q = \frac{H(Y) - H(Y|X)}{H(X)}, \quad (11)$$

где энтропия наблюдаемых значений (по выходу) $H(Y)$ вычисляется по формуле вида (8) при подстановке значений вероятности из выражения (10), поскольку распределение вероятностей (10) можно интерпретировать как значения вероятности наблюдаемых оценок рельефа (9) в условиях влияния помех. Условная энтропия $H(Y|X)$ представляет собой энтропию помехи, которая определяется распределением вероятности погрешностей δz_q и может быть также вычислена аналогично по формуле вида (8). Зная $H(Y)$ и $H(Y|X)$, можно найти оценку критерия Q согласно (11).

ПРИМЕНЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОГО КРИТЕРИЯ ПРИ БЕСКОНТАКТНОМ КОНТРОЛЕ ОБЪЕКТОВ В ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Методы интерферометрии широко используются при решении задач высокоточного оптического контроля формы и рельефа поверхности объектов (см., например [7, 8]). Рассмотрение в качестве примера интерферометрических систем с точки зрения применимости информационного критерия целесообразно ввиду того, что регистрируемые изображения представляют собой картины интерференционных полос, определяемые хорошо известной моделью

для пространственного распределения интенсивности света

$$I(x, y) = I_a(x, y) \cos \varphi(x, y) + I_b(x, y),$$

где $I_a(x, y)$, $\varphi(x, y)$, $I_b(x, y)$ — амплитуда, фаза и фоновая составляющая картины интерференционных полос соответственно. Критерий качества в рассматриваемом случае обычно выражается погрешностью $\delta\varphi$ определения разности фаз опорной и измерительной волн в интерферометре. Представляет интерес сравнение информационного и традиционных критериев качества интерферометрических систем.

Обратимся вначале к рассмотрению статистических характеристик интерферометрических сигналов, формируемых в результате преобразования интенсивности света в фотоэлектрический сигнал, $s = \mu I$, где μ — коэффициент преобразования,

$$s(i, j) = a(i, j) \cos \varphi(i, j) + b(i, j), \quad (12)$$

где $a(i, j) = \mu I_a(i, j)$, $b(i, j) = \mu I_b(i, j)$, (i, j) — дискретные координаты пикселей видеокамеры, $x_i = i\Delta x$, $y_j = j\Delta y$ с шагом Δx и Δy соответственно, $i = 1, \dots, L$, $j = 1, \dots, W$.

Для идеализированного сигнала (12), когда $a = b = 1$, и значения фазы равновероятны, т.е. плотность вероятности $p_\varphi(\varphi) = 1/(2\pi)$, значения интерферометрического сигнала не являются равновероятными и определяются известным выражением для плотности вероятности значений гармонического процесса

$$p_s(s) = \begin{cases} (\pi\sqrt{a^2 - s^2})^{-1}, & |s| \leq a, \\ 0, & |s| > a \end{cases} \quad (13)$$

Соответствующая функция распределения вероятностей определяется выражением [9]

$$P_s(s) = \begin{cases} 0, & s < -a, \\ \frac{1}{\pi} \left(\frac{\pi}{2} + \arcsin \frac{s}{a} \right), & |s| \leq a, \\ 1, & s > a. \end{cases} \quad (14)$$

Пусть имеются M уровней s_m квантования сигнала, $m = 0, \dots, M - 1$, при шаге квантования Δs . Полагая, что s_m представляют собой набор значений случайной величины S , можно использовать значения вероятностей из (14)

и согласно формуле Шеннона вычислить энтропию

$$H(S) = - \sum_{m=0}^{M-1} P(s_m) \log_2 P(s_m). \quad (15)$$

Оценку энтропии на практике можно получить методом построения гистограммы значений сигнала (12) для набора значений фазы $\varphi(i, j)$. При достаточно большом количестве значений фазы в наборе, которое превышает количество уровней квантования M , энтропия (15) будет близка к значению $\log_2 M$, равному максимальной энтропии. Экспериментальная проверка показала, что при 10^4 заданных значений фазы, распределенных по равновероятному закону, оценки энтропии (15) составили $H(S) = 7,68, 9,61$ и $11,34$ бит/отсчет соответственно для $M = 256, 1024, 4096$. Отметим, что эти значения ниже максимальных H_{\max} , достигаемых при равновероятном законе распределения по уровням квантования и равных 8, 10 и 12 бит/отсчет соответственно. Данное отличие объясняется погрешностью квантования сигнала, обусловленной округлением значений сигнала, которую принято называть шумом квантования. Кроме этого, проявляется так называемое явление дефицита алфавита ([10], С. 234), когда, несмотря на большое количество задаваемых значений фазы, некоторые окна квантования не содержат ни одного отсчета сигнала. В рассмотренном выше примере доля незаполненных окон квантования составила около 2% при 11-ти двоичных разрядах и более 10% при 12-ти разрядах. Следовательно, при увеличении разрядности представления сигналов в видеокамере снижается шум квантования, однако возрастает влияние дефицита алфавита, приводящее к некоторым потерям информации.

Обратимся к взаимосвязи разрешающей способности интерферометра по фазе и информационного критерия (11) с учетом влияния квантования интерферометрического сигнала по уровню.

Энтропия источника сообщений $H(X)$ определяется вероятностью значений фазы интерференционных полос. Обозначим $\Delta\varphi$ разрешающую способность интерферометра по фазе. Полагая, что значения фазы как случайной величины Φ имеют равновероятное распределение, получим оценку количества разрешаемых

значений фазы в пределах фазового цикла, равную $2\pi/\Delta\varphi$. Пусть $\Delta\varphi = 2\pi/1000$ (значение, достижимое в системах прецизионного оптического контроля). Тогда энтропия источника (значений фазы) $H(X) = H(\Phi)$ составит около 10 бит/отсчет. Энтропия «правильных» значений сигнала есть $H(Y) - H(Y|X) = H(S) - H(S|\Phi)$, где второе слагаемое (условная энтропия) определяется потерями информации из-за влияния шума квантования. Это слагаемое отражает тот факт, что при фиксированном значении фазы значения сигнала имеют отклонения, вызванные случайным шумом квантования и выражаемые условной вероятностью $P(S|\Phi)$. При равновероятном попадании значений сигнала в окно квантования Δs СКО шума квантования, очевидно, составляет $\Delta s/(2\sqrt{3})$ и при большом количестве уровней квантования (т.е. малых значениях Δs) пренебрежимо мало. При этом $H(S) \approx H(Y)$, и информационный критерий (11) выражается как

$$Q = \frac{H(S)}{H(\Phi)}. \quad (16)$$

Из изложенного выше и выражения (16) следует, в частности, что при использовании 8-битной видеокамеры информационный критерий имеет значение менее 0,8. Видеокамера с 10-ю разрядами обеспечивает повышение информационного критерия до значений, близких к единице. Однако дальнейшее повышение разрядности не меняет значение критерия: энтропия значений квантованного полезного сигнала не может превышать энтропию фазы.

Таким образом, информационный критерий позволяет количественно охарактеризовать процедуру квантования сигналов по уровню и сделать обоснованный выбор видеокамеры с необходимой разрядностью представления сигналов с учетом ожидаемой разрешающей способности интерферометра по фазе.

Реальные регистрируемые сигналы подвержены также влиянию шума наблюдения. Обозначим n_m отсчеты нормально распределенного аддитивного шума с нулевым средним значением, статистически не зависимо от значений сигнала s_m . При этом значения регистрируемого сигнала, искаженного шумом, определяются как

$$\xi_m = s_m + n_m. \quad (17)$$

Энтропии значений принятого сигнала ξ и шума n обозначим соответственно как $H(\Xi)$ и $H(N)$.

При обработке рассматриваются матрица дискретных отсчетов сигнала (12) с учетом влияния шума в виде

$$\xi(i, j) = a \cos \varphi(i, j) + b + n(i, j) \quad (18)$$

и потери информации ввиду вносимых шумом искажений сигнала.

В качестве примера зададим пространственное распределение фазы

$$\varphi(i, j) = 2\pi l [(i - i_0)^2 - (j - j_0)^2] \times \\ \times [(W - i_0)^2 + (L - j_0)^2]^{-1}, \quad (19)$$

где, как и ранее, $i = 1, \dots, L$, $j = 1, \dots, W$, (i_0, j_0) — координаты пиксела с нулевым значением фазы, l — количество фазовых циклов (наблюдаемых интерференционных полос). Распределение фазы (19) при $l = 5$, $L = W = 100$, $i_0 = j_0 = 35$ представлено на рис. 2а. Соответствующая картина интерференционных полос (12) иллюстрируется рис. 2б.

Построим гистограмму сигнала (18) при различных значениях отношения сигнал/шум

$$\text{SNR} = \frac{a}{\sigma_n}, \quad (20)$$

где σ_n — СКО шума. Примеры гистограмм представлены на рис. 3. Гистограммы соответствуют плотности вероятности (13) гармонического случайного процесса и ее модификации при наличии аддитивного шума.

Оценки энтропии (15), полученные при 8-битном представлении регистрируемого сигнала и ОСШ = 10, 50, 100, составили $H(\Xi) = 7,88, 7,77, 7,72$ бит/отсчет соответственно. Оценки энтропии шума определяются нормальным распределением вероятностей с параметром $\sigma_n = a/\text{SNR}$ и получены равными $H(N) = 3,7, 2,0, 1,3$ соответственно.

В рассматриваемом случае формула информационного критерия (11) принимает вид

$$Q = \frac{H(Y) - H(Y|X)}{H(X)} = \frac{H(\Xi) - H(N)}{H(\Phi)}. \quad (21)$$

Примем разрешающую способность интерферометра по фазе $2\pi/250$, что примерно со-

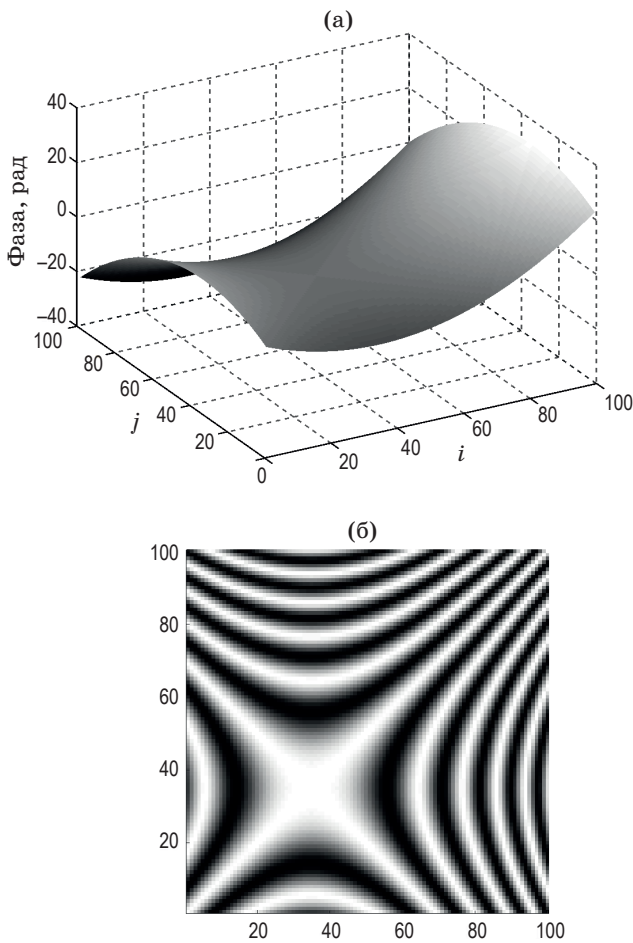


Рис. 2. Пространственное распределение фазы (а) и картина интерференционных полос (б).

ответствует 8-битному представлению в пределах одного фазового цикла 2π . При этом $H(\Phi) \approx 8$ бит/отсчет, и информационный критерий (21) при изменении ОСШ принимает значения, приведенные в табл. 1.

На рис. 4 приведена кривая, полученная в результате моделирования с использованием выражения (21) и показывающая взаимосвязь информационного критерия и отношения сигнал/шум в определении (20). Из рисунка видно, что информационный критерий более показателен при малых и умеренных значениях ОСШ: сравнительно малым отклонениям

Таблица 1. Оценки информационного критерия при различных значениях отношения сигнал/шум

ОСШ	10	50	100
Q	0,52	0,72	0,80

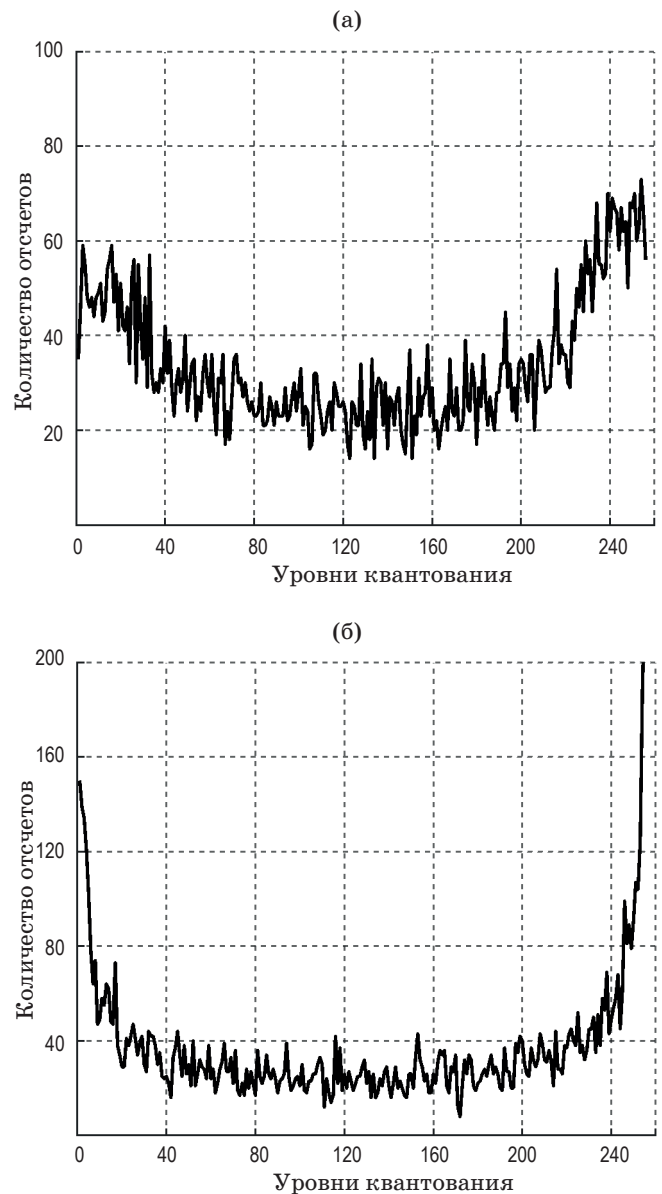


Рис. 3. Гистограммы значений интерферометрического сигнала при ОСШ = 10 (а) и ОСШ = 100 (б).

ОСШ соответствуют существенные изменения информационного критерия.

Отметим, что распределение фазы может включать значения в диапазоне, большем 2π (например, в (19) при $l > 1$). Тогда энтропия значений фазы $H(\Phi)$ увеличится на $\log_2 l$ (при равновероятных значениях фазы). В рассматриваемом примере (см. рис. 2) при $l = 5$ энтропия фазы составила $H(\Phi) \approx 10,3$ бит/отсчет. При этом значения критерия (21) снижаются в соответствии с кривой 2, представленной на рис. 4. Уменьшение значения критерия отражает факт потерь информации при получении

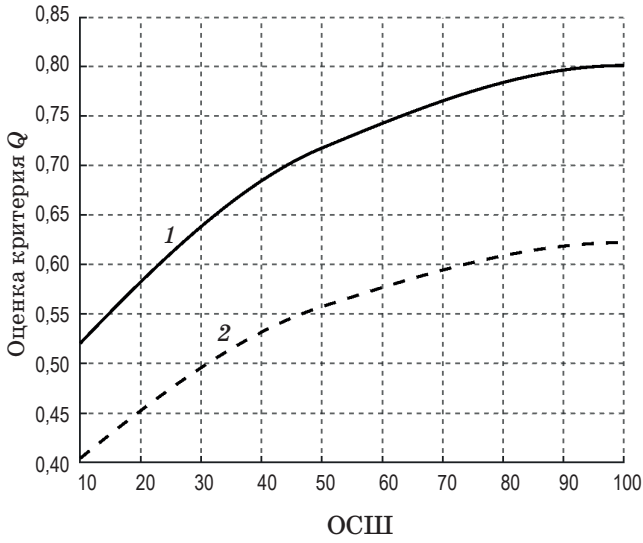


Рис. 4. Взаимосвязь информационного критерия и отношения сигнал/шум в условиях воздействия аддитивного шума. 1 — для приведенной фазы, 2 — для развернутой фазы.

оценок приведенной фазы (в интервале $(0, 2\pi)$) вместо исходной развернутой фазы (19) при $l = 5$.

Рассмотрим влияние случайных отклонений фазы интерференционных полос на значения информационного критерия. В этом случае модель (12) принимает вид

$$\xi(i, j) = a \cos[\varphi(i, j) + \psi(i, j)] + b = \xi_c(i, j) + b, \quad (22)$$

где $\psi(i, j)$ — случайные отклонения фазы с нулевым средним значением и дисперсией σ_ψ^2 , обусловленные влиянием внешних факторов (микровибраций, флуктуаций показателя преломления при распространении интерферирующих волн, нестабильности объекта и др.).

Уравнение (22) содержит три неизвестных параметра a , φ , b , поэтому для определения фазы φ необходимо регистрировать не менее трех значений сигнала и использовать алгоритмы обработки (см., например [7]), которые устраняют фоновую составляющую b и позволяют определить квадратурный сигнал

$$\xi_s(i, j) = a \sin[\varphi(i, j) + \psi_s(i, j)]. \quad (23)$$

При этом из выражений (22) и (23) оценка фазы вычисляется в форме

$$\hat{\varphi}(i, j) = \varphi(i, j) + \psi(i, j) = \arctg \frac{\xi_s(i, j)}{\xi_c(i, j)}. \quad (24)$$

Оценка (24) отличается от истинных значений фазы. Погрешность составит

$$\delta\varphi(i, j) = \arctg \frac{\xi_s(i, j)}{\xi_c(i, j)} - \arctg \frac{a \sin \varphi(i, j)}{a \cos \varphi(i, j)}. \quad (25)$$

Определим качество оценок фазы с привлечением информационного критерия.

Учитывая предыдущее рассмотрение, энтропию истинных значений фазы разумно принять равной $H(\Phi) = \log_2 G$, где G — количество градаций фазы в интервале 2π рад, обеспечиваемое оптической системой. Энтропия $H(\Psi)$ отклонений фазы $\psi(i, j)$ определяется распределением вероятности значений $P_\psi(\psi)$. При этом информационный критерий выражается в форме

$$Q = \frac{H(\hat{\Phi}) - H(\hat{\Phi}|\Phi)}{H(\Phi)} = \frac{H(\hat{\Phi}) - H(\Psi)}{H(\Phi)}. \quad (26)$$

Здесь $H(\hat{\Phi})$ — энтропия полученных оценок фазы согласно (24).

На рис. 5 представлена гистограмма оценок приведенной фазы, полученная экспериментально согласно (24) при гауссовой плотности вероятности случайных отклонений фазы $\psi(i, j)$ в (22) с СКО фазы $\sigma_\psi = 2\pi/100$. Изрезанность кривой обусловлена влиянием шума квантования при получении квадратурных компонентов (22) и (23) и случайными отклонениями фазы $\psi(i, j)$.

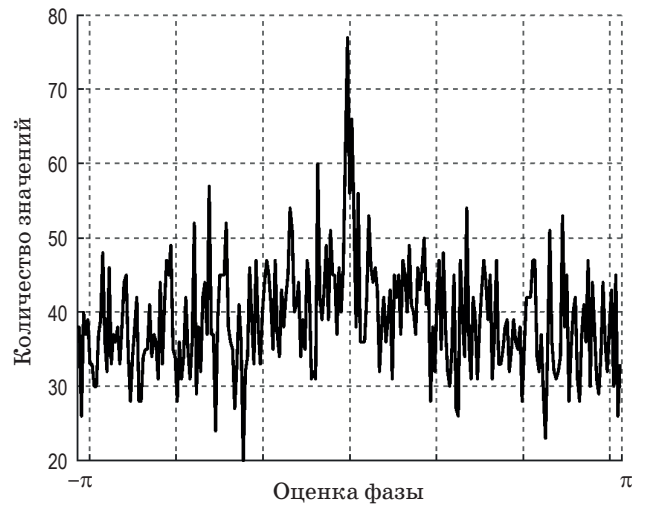


Рис. 5. Экспериментальная гистограмма оценок приведенной фазы в условиях влияния случайных отклонений фазы волнового фронта.

Таблица 2. Оценки информационного критерия при различных значениях точности определения фазы интерференционных полос

ρ	10	50	100
Q	0,44	0,62	0,69

В случае нормального закона распределения отклонений фазы с параметром σ_ψ выразим относительную точность ρ определения фазы как величину, обратную относительной погрешности, т.е.

$$\rho = \frac{2\pi}{\sigma_\psi}. \quad (27)$$

В табл. 2 приведены оценки информационного критерия в форме (26) для отдельных значений параметра ρ , полученные применительно к картине интерференционных полос, иллюстрируемой рис. 2б.

На рис. 6 приведена зависимость информационного критерия от параметра ρ при $M = 256$, т.е. при 8-битном представлении сигналов в видеокамере.

Сравнение рис. 6 с рис. 4 показывает их схожесть. Отметим, что фаза является неэнергетическим параметром, поэтому непосредственное использование критерия ОСШ в определении (1) или (20) в данном случае невозможно.

Информационный критерий применим для оценивания качества интерферометрических

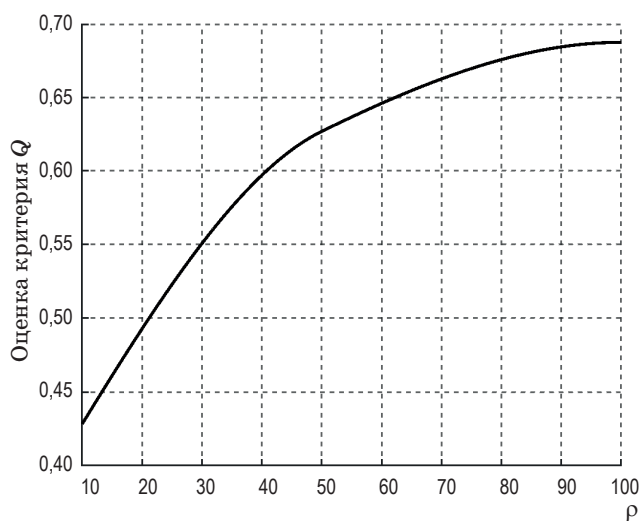


Рис. 6. Зависимость информационного критерия от случайных отклонений фазы волнового фронта.

систем как в условиях воздействия шума наблюдений, так и при случайных отклонениях фазы интерференционных полос с учетом разрядности квантования сигналов по уровню в видеокамере и разрешающей способности по фазе оптической системы интерферометра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Информационный критерий позволяет оценить важные характеристики процессов формирования и обработки видеоинформации при бесконтактном контроле объектов, определяющие требования к пропускной способности и, следовательно, к быстродействию и связанной с ним помехоустойчивости системы при регистрации, передаче и обработке данных. Это особенно важно в случае использования получивших широкое распространение методов регистрации и обработки последовательности видеок кадров для многокурсного наблюдения объектов, исследования динамических объектов, гиперспектральных наблюдений, трехмерного отображения объектов и др., когда объем регистрируемой и обрабатываемой видеоинформации имеет существенное значение.

Информационный критерий носит универсальный характер ввиду того, что произвольное изображение можно описать моделью вида (17) и применить методику определения информационного критерия в форме (11) подобно тому, как описано выше применительно к интерферометрическим системам. Значения энтропии $H(Y)$ и условной энтропии $H(Y|X)$ в числителе выражения (11) определяются соответственно статистическими характеристиками зарегистрированного изображения и шума, поэтому их вычисление не составляет сложности по отношению к традиционному определению ОСШ в формуле (1). Вместе с тем знаменатель $H(X)$ в (11) позволяет учесть априорную информацию об исследуемом объекте, которая может быть получена, в частности, методами машинного обучения на выборке ранее исследованных объектов заданного класса. Информационный критерий (11) есть отношение взаимной информации между входом и выходом системы к информации, потенциально содержащейся в свойствах объекта, т.е. информационный критерий выражает долю извлеченной полезной информации.

Как показано выше, информационный критерий находится в соответствии с другими известными критериями качества, в частности, с критерием ОСШ. Преимущество информационного критерия состоит в том, что он учитывает информационные характеристики сигналов и помех, в том числе неэнергетической природы, и поэтому более полно отражает качество конкретной системы с учетом процедур формирования, регистрации и обработки данных при бесконтактном контроле объектов в современных оптико-цифровых системах.

В рассмотренных примерах приняты упрощающие допущения, например, о статистической независимости сигнала и помехи, гауссовом распределении шума и др. Информационный критерий, очевидно, применим к иным распределениям вероятностей шумов и помех, однако эти вопросы требуют отдельного рассмотрения вне рамок данной статьи.

Следует заметить, что применимость информационного критерия связана с возможностью получения достаточно точных оценок вероятностных характеристик сигналов и помех. При этом требуется получение представительной по объему выборки данных во избежание влияния «дефицита алфавита» и статистической изменчивости оценок на малых выборках.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект №8.2501.2017/4.6) в части формулирования информационного критерия для задач бесконтактного контроля рельефа объектов и Российского научного фонда (грант 19-79-10118) в части применения информационного критерия при бесконтактном контроле объектов в интерферометрических системах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев В.Н., Гуров И.П., Потапов А.С. Современная видеоинформатика: проблемы и перспективы // Оптический журнал. 2012. Т. 79. № 11. С. 5–15.
2. Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. Сойфера В.А. М.: Физматлит, 2003. 782 с.
3. Ричардсон Я. Видеокодирование. H.264 и MPEG-4 — стандарты нового поколения. М.: Техносфера, 2005. С. 42–45.
4. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.
5. Дворкович В.П., Дворкович А.В. Метрологическое обеспечение видеоинформационных систем. М.: Техносфера, 2015. 784 с.
6. Теория электрической связи / Под ред. Кловского Д.Д. М.: Радио и связь, 1999. 433 с.
7. Malacara D., Servín M., Malacara Z. Interferogram analysis for optical testing. 2nd ed. NY: Taylor & Francis, 2005. 568 p.
8. De Groot P. Principles of interference microscopy for the measurement of surface topography // Adv. Opt. Photon. 2015. V. 7. P. 1–65.
9. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. М.: Мир, 1989. 540 с.
10. Голдман С. Теория информации. М.: ИИЛ, 1957. 446 с.