

УДК 621.372.8

А. А. Бычков, В. А. Понькин

(Воронеж)

**МАТРИЧНАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА
ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ДИСКРЕТИЗАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ
ДЛЯ ОЦЕНКИ ИНФОРМАЦИОННЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ
СИСТЕМ НАБЛЮДЕНИЯ**

Предложена основанная на матричном описании математическая модель пространственной дискретизации изображений, учитывающая форму, размеры и пространственное положение элементов системы дискретизации. С использованием предложенной модели выявлены закономерности влияния характеристик системы дискретизации на качество обнаружения изображений тестовых пространственно-протяженных объектов. Установлены условия применимости традиционно используемого метода передаточных функций для учета пространственной дискретизации изображений при оценке информационных возможностей систем наблюдения.

Вследствие функционирования многих систем наблюдения получаемые изображения при регистрации их матричными (мозаичными) приемниками или сжатии для передачи по каналам связи подвергаются пространственной дискретизации. К настоящему времени подробно исследовано влияние пространственной дискретизации на качественные показатели изображений (отношение сигнал/шум [1], потеря резкости [2] и т. п.), однако влияние пространственной дискретизации изображений на информационные возможности систем наблюдения по обнаружению пространственно-протяженных объектов (ППО) изучено недостаточно.

В ряде работ [2, 3] при оценке информационных возможностей систем наблюдения пространственная дискретизация изображений учитывается путем введения эквивалентной передаточной функции системы формирования изображений. Такой подход, с одной стороны, лишь приближенно описывает процессы пространственной дискретизации изображений, а с другой — затрудняет учет индивидуальных особенностей дискретных элементов системы регистрации и статистических законов распределения входных изображений.

Целью настоящей статьи является разработка матричной модели процесса пространственной дискретизации изображений, которая может быть использована для оценки влияния параметров системы пространственной дискретизации на информационные возможности систем наблюдения.

Описание модели пространственной дискретизации изображений. Пусть исходное изображение представляется вектором $X = [x_i], i = (1, N)$, полученным в результате упорядоченного просмотра области анализа D , содержащей N отсчетов изображения. Тогда при аппликативном [4] взаимодействии изображений объекта и фона, описываемых соответствующими векторами

$S = [s_i]$ и $F = [f_i]$, $i = (1, N)$, изображение X при гипотезах о наличии H_1 и отсутствии H_0 обнаруживаемого объекта может быть представлено в виде

$$X = \begin{cases} VS + (I_N - V)F + W_1 : H_1, \\ F + W_1 : H_0, \end{cases} \quad (1)$$

где $V = [v_{ii}]$ — координатная диагональная матрица изображения объекта порядка N , содержащая нули и единицы, причем последние соответствуют области предполагаемого расположения изображения объекта; W_1 — вектор размерностью N аддитивного гауссова некоррелированного шума с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ_{w1}^2 ; I_N — единичная матрица порядка N .

Предъявляемое к обработке изображение, содержащее M отсчетов ($M \leq N$), формируется из исходного путем пространственной дискретизации по заданному базису [1], описывающему форму, размеры и положение элементов дискретизации в зоне анализа D . При выбранном законе упорядоченного просмотра базис пространственной дискретизации описывается матрицей

$$G = [G_1, G_2, \dots, G_M], \quad i = 1, M, \quad (2)$$

размером $N \times M$, состоящей из индикаторных векторов элементов пространственной дискретизации $G_i = [g_{ij}]$. Значения элементов вектора G_i , соответствующие отсчетам исходного изображения, попадающим на i -й элемент дискретизации, равны единице, а остальные — нулю. Предполагается также, что элементы дискретизации не перекрываются, т. е. попарные скалярные произведения их векторов удовлетворяют условию

$$G_i^T G_j = \begin{cases} N_{gi}, & i = j, \\ 0, & i \neq j, \end{cases}$$

где N_{gi} — количество отсчетов исходного изображения, приходящегося на i -й элемент дискретизации.

Возможная пространственная неоднородность характеристик системы пространственной дискретизации может быть учтена путем введения диагональной матрицы $B = [b_{ij}]$ размерностью M , элементы которой равны коэффициентам передачи (преобразования) сигнала соответствующими элементами дискретизации ($0 \leq b_{ij} \leq 1$).

Результирующее изображение на выходе системы пространственной дискретизации $Y = [y_i] = BG^T X + W_2$ представляется вектором размерностью M и имеет вид

$$Y = \begin{cases} BG^T VS + BG^T(I_N - V)F + BG^T W_1 + W_2 : H_1, \\ BG^T F + BG^T W_1 + W_2 : H_0, \end{cases} \quad (3)$$

где W_2 — вектор размерностью M аддитивного шума, вносимого в изображение системой пространственной дискретизации и описываемого некоррелированным центрированным гауссовым процессом с дисперсией σ_{w2}^2 .

Предложенное формализованное описание процесса пространственной дискретизации изображений открывает возможность использования хорошо разработанных методов статистической теории обнаружения сигналов [5] для оценки информационных возможностей систем наблюдения с учетом характеристик исходного изображения и системы пространственной дискретизации.

Для оценки влияния пространственной дискретизации изображений на информационные возможности систем наблюдения далее проведен сравнительный анализ возможностей обнаружения ППО по его исходному и дискретизированному изображениям.

Синтез и анализ алгоритмов обнаружения изображений. При описании изображений объекта S и фона F детерминированными функциями достаточные статистики l_x и l_y для обнаружения объекта по его исходному X и дискретизированному Y изображениям соответственно определяются соотношениями [4, 5]:

$$l_x = \sigma_{w1}^{-2} (S - F)^T V X, \quad (4)$$

$$l_y = (B G^T V (S - F))^T K^{-1} Y,$$

где $K^{-1} = [k_{ij}^{-1}]$, $k_{ij}^{-1} = (\sigma_{w2}^2 + b_{ij}^2 N_{gj} \sigma_{w1}^2)^{-1}$ — диагональная матрица порядка M , обратная корреляционной матрице шума на выходе системы пространственной дискретизации. Введя обозначение $B K^{-1} = \sigma_{w1}^{-2} C$, где $C = [c_{ij}]$, $c_{ij} = b_{ij} \sigma_{w1}^2 / (\sigma_{w2}^2 + b_{ij}^2 N_{gj} \sigma_{w1}^2)$ — диагональная матрица порядка M , состоящая из нормированных коэффициентов передачи элементов дискретизации, выражения (4) после очевидных преобразований можно переписать в виде

$$l_x = \sigma_{w1}^{-2} \sum_{i=1}^N (s_i - f_i) v_{ii} x_i, \quad (5)$$

$$l_y = \sigma_{w2}^{-2} \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N (s_i - f_i) v_{ii} g_{ji} c_{jj} y_j.$$

Из сравнения полученных соотношений следует, что в алгоритме обработки подвергнутых пространственной дискретизации изображений пространственная структура системы дискретизации учитывается при формировании M частных сумм отсчетов исходного изображения, а неравномерность коэффициентов передачи и внутренние шумы элементов дискретизации определяют значения коэффициентов весового суммирования.

Поскольку достаточные статистики вида (5) для принятых моделей изображений (1), (3) распределены по нормальному закону с равными по гипотезам H_1 и H_0 дисперсиями, эффективность обнаружения ППО по исходному X и дискретизированному Y изображениям определяется единственным параметром d^2 (далее называемым параметром обнаружения), который для рассматриваемых случаев имеет вид [4, 5]:

$$d_x^2 = \sigma_{w1}^{-2} (S - F)^T V (S - F) = \sigma_{w1}^{-2} \sum_{i=1}^N (s_i - f_i)^2 v_{ii}, \quad (6)$$

$$d_y^2 = (B G^T V (S - F))^T K^{-1} B G^T V (S - F) = \sigma_{w1}^{-2} \sum_{j=1}^M b_{jj} c_{jj} \left[\sum_{i=1}^N (s_i - f_i) v_{ii} g_{ji} \right]^2.$$

Для сравнительного анализа качества обнаружения ППО по его исходному и дискретизированному изображениям рассмотрим зависимость величины отношения параметров обнаружения (6) от характеристик системы регистрации. В случае равенства размеров элементов дискретизации $N_{gj} \equiv N_g$, $j = (1, M)$, и коэффициентов передачи $b_{jj} \equiv b$, $j = (1, M)$, введя обозначение $\sigma_{w3}^2 = \sigma_{w2}^2 b^{-2} N_g^{-1}$, это отношение можно представить в виде произведения двух сомножителей:

$$d_y^2 / d_x^2 = \alpha^2 \psi^2,$$

первый из которых

$$\alpha^2 = \sigma_{w1}^2 / (\sigma_{w3}^2 + \sigma_{w1}^2), \quad (7)$$

называемый в дальнейшем для краткости параметром шума, определяет степень снижения качества обнаружения изображения ППО из-за шумов, вносимых системой регистрации, второй

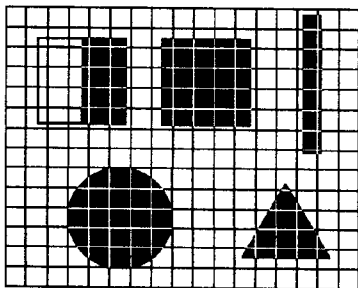
$$\psi^2 = \left[N_g \sum_{i=1}^N (s_i - f_i)^2 v_{ii} \right]^{-1} \sum_{j=1}^M \left[\sum_{i=1}^N (s_i - f_i) v_{ij} g_{ij} \right]^2, \quad (8)$$

называемый параметром пространственной дискретизации изображений, характеризует влияние на качество обнаружения ППО искажений пространственного распределения яркости, вносимых в изображение при его дискретизации.

Параметр α^2 изменяется в пределах $0 < \alpha^2 \leq 1$ и в соответствии с выражением (7) зависит от величины дисперсии аддитивных шумов исходного изображения σ_{w1}^2 и преобразованной ко входу системы регистрации дисперсии шума элементов дискретизации $\sigma_{w3}^2 = \sigma_{w2}^2 b^{-2} N_g^{-1}$. Увеличение интенсивности шума системы дискретизации σ_{w2}^2 приводит к уменьшению значения параметра шума α^2 , а следовательно, к снижению качества обнаружения изображения при его пространственной дискретизации. В свою очередь, увеличение значения коэффициента передачи b и дисперсии входного шума σ_{w1}^2 (по отношению к σ_{w3}^2) влечет за собой рост величины α^2 , которая в пределе при $\sigma_{w1}^2 \gg \sigma_{w3}^2$ стремится к единице, что соответствует фактическому отсутствию влияния шума системы дискретизации на качество обнаружения изображений ППО.

Параметр ψ^2 также изменяется в пределах $0 < \psi^2 \leq 1$. Значение параметра ψ^2 в общем случае зависит от формы и размеров элементов системы дискретизации, распределения контраста по изображению объекта, а также от положения исходного изображения ППО относительно элементов дискретизации. В соответствии с (8) при отсутствии дискретизации ($N_g = 1$) параметр пространственных искажений равен единице: $\psi^2 = 1$. Кроме того, равенство единице параметра пространственной дискретизации (дискретизация без потерь) может обеспечиваться и при более низкой разрешающей способности ($N_g > 1$) в случае, когда система дискретизации не вносит искажений в распределение контраста по изображению объекта. Последнее возможно, если каждому элементу пространственной дискретизации соответствует область исходного изображения объекта или фона, все отсчеты которой имеют одинаковую интенсивность.

На рис. 2—6 приведены графики зависимостей параметра пространственной дискретизации ψ^2 тест-объектов, содержащих N_v отсчетов исходного изображения, от относительной разрешающей способности системы дискретизации $\sqrt{N_g}/N_v$, все элементы которой имеют форму квадрата. Вариант возможного расположения рассматриваемых тест-объектов относительно элементов системы пространственной дискретизации приведен на рис. 1.



Расчет проведен методом моделирования на ЭВМ с использованием соотношения (8) применительно к изображениям (см. рис. 1) — двуполярной миры с одной парой штрихов (см. рис. 2) и простых фигур: квадрата (см. рис. 3), прямоугольника с соотношением сторон 8 : 1 (см. рис. 4), круга (см. рис. 5) и равностороннего треугольника (см. рис. 6).

Рис. 1. Вариант расположения изображений тест-объектов относительно элементов системы пространственной дискретизации

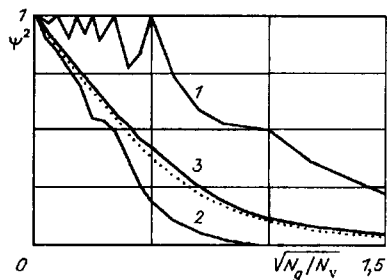


Рис. 2. Параметр пространственной дискретизации дуполярной миры

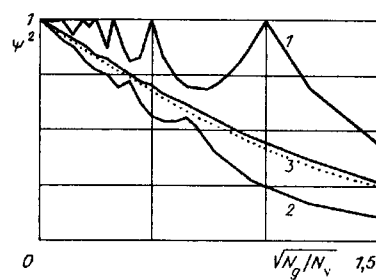


Рис. 3. Параметр пространственной дискретизации квадрата

Все тест-объекты наблюдаются на фоне постоянной интенсивности, так что выполняется условие

$$|s_i - f_i| = v_i \Delta s. \quad (9)$$

На каждом рисунке приведены зависимости максимальных ψ_+^2 (кривые 1), минимальных ψ_-^2 (кривые 2) и средних ψ_0^2 (кривые 3) значений параметров пространственной дискретизации от величины $\sqrt{N_g/N_v}$, полученные при всех возможных значениях сдвига изображения объекта в пределах линейного размера элемента дискретизации $\sqrt{N_g}$. Большое различие между кривыми максимальных и минимальных значений параметров пространственной дискретизации объясняется существенной зависимостью искажений, вносимых в изображение ППО системой пространственной дискретизации, от расположения (сдвига) изображения объекта относительно элементов дискретизации.

Как и следовало ожидать, в наибольшей степени расположение исходного изображения относительно элементов дискретизации влияет на качество обнаружения объектов со сложным распределением контраста (штриховая мира на рис. 2). При этом разброс в значениях параметра пространственной дискретизации $\Delta\psi^2 = (\psi_+^2 - \psi_-^2)$ достигает максимальных значений $\Delta\psi^2 = 0,75-0,8$ при $\sqrt{N_g/N_v} \approx 0,5$. Данный факт объясняется тем, что, с одной стороны, при величине элемента разрешения, равной ширине полосы миры, возможно такое расположение изображения, при котором обеспечивается дискретизация без потерь (когда в каждом элементе дискретизации, попавшем на изображение объекта, суммируются однополярные, т. е. только «черные» или только «белые» отсчеты миры). С другой стороны, при той же разрешающей способности изображение объекта может быть расположено так, что элементы дискретизации, попавшие на границу «черной» и «белой» полос, накрывают равную их долю, что приводит к взаимной компенсации яркости и как следствие к существенному снижению значения параметра пространственной дискретизации ($\psi^2 \approx 0,2$).

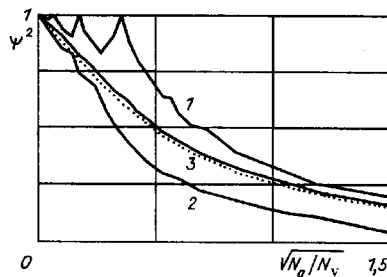


Рис. 4. Параметр пространственной дискретизации прямоугольника с соотношением сторон 8 : 1

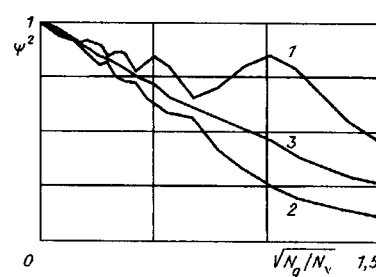


Рис. 5. Параметр пространственной дискретизации круга

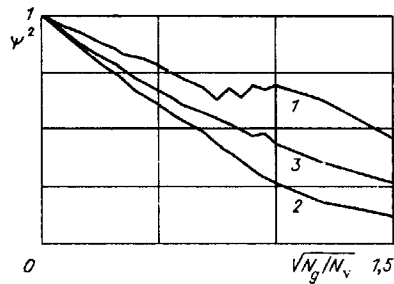


Рис. 6. Параметр пространственной дискретизации равностороннего треугольника

Степень влияния расположения изображения объекта относительно элементов дискретизации на качество обнаружения изображений простых фигур (см. рис. 3, 5, 6) определяется формой контура объекта и отражается, главным образом, на различном ходе кривых, соответствующих максимальным значениям параметра пространственной дискретизации ψ_+^2 , в то время как кривые, соответствующие средним (ψ_0^2) и минимальным (ψ_-^2) значениям, от этого фактора почти не зависят (разность между соответствующими кривыми для рассматриваемых фигур не превышает 0,1).

Наибольших значений разброс параметра пространственной дискретизации $\Delta\psi^2 \approx 0,7$ достигает при обнаружении квадрата, совпадающего по форме и ориентации с элементами системы дискретизации (см. рис. 3). Кривые максимальных значений параметра ψ^2 в этом случае имеют четко выраженные максимумы $\psi_+^2 = 1$ в точках, соответствующих целому количеству элементов дискретизации, накрывающих изображение объекта, когда, как указывалось выше, происходит дискретизация без потерь. Минимальный разброс параметра пространственной дискретизации ψ^2 соответствует случаю обнаружения фигур с наибольшим отличием по форме от элемента дискретизации. Например, разброс величин параметра пространственной дискретизации при обнаружении треугольника не превышает значений $\Delta\psi^2 \approx 0,4$.

Протяженность изображения объекта (прямоугольник с соотношением сторон 1 : 8, см. рис. 4) также оказывает существенное влияние на максимально достижимые значения параметра пространственной дискретизации. Из графиков видно, что кривая ψ_+^2 в отличие от случая обнаружения квадрата (см. рис. 3) имеет четко выраженные максимумы $\psi_+^2 = 1$ лишь при разрешающей способности, не превышающей минимального линейного размера изображения объекта, при этом разброс значений параметра пространственной дискретизации составляет величину порядка $\Delta\psi^2 \approx 0,5$. При дальнейшем увеличении размеров элемента дискретизации эта кривая становится гладкой и приближается к кривой средних значений. При размерах элемента дискретизации, близких к размерам изображения объекта ($N_g/N_v \approx 1$), разность между максимальными значениями параметра пространственной дискретизации для квадрата и прямоугольника становится весьма существенной и достигает значений 0,6—0,7, в то время как разность между соответствующими минимальными значениями не превышает 0,2.

Сравнительный анализ моделей. Как указывалось выше, для оценки информационных возможностей систем наблюдения пространственная дискретизация изображений при регистрации их матричными приемниками или при сжатии для передачи по каналам связи традиционно учитывается путем введения эквивалентной передаточной функции системы формирования изображений. Такой подход лишь приближенно описывает указанные процессы пространственной дискретизации изображений, поэтому несомненный интерес представляет оценка возможностей его использования для анализа систем наблюдения. С этой целью проведено сравнение оценок качества обнаружения, полученных при использовании аппарата передаточных функций [6], и матричной модели, адекватной процессу пространственной дискретизации. В качестве количественного показателя выбрано отношение параметра обнаружения d_y^2 ППО по дискретизированному изображению к параметру обнаружения d_0^2 того же ППО по изображению, полученному на выходе системы с идеальной дискретизацией ($N_g = 1$). Для матричной модели это

отношение с учетом ранее введенных обозначений можно записать в виде

$$\frac{d_y^2}{d_0^2} = \frac{(\sigma_{w2}^2 + \sigma_{w1}^2)}{\sigma_{w1}^2} \alpha^2 \psi^2. \quad (10)$$

Если, как принято в [6], дисперсию шума в исходном изображении положить равной нулю ($\sigma_{w1}^2 = 0$), последнее выражение преобразуется к виду

$$d_y^2 / d_0^2 = \psi^2.$$

Для модели, основанной на методе передаточных функций, отношение (10) имеет аналогичный вид [6]:

$$d_y^2 / d_0^2 = Q^2,$$

где Q^2 — параметр формы. Поэтому сравнительный анализ влияния пространственной дискретизации изображений на информационные возможности систем наблюдения можно выполнить на основе сравнения значений параметра пространственной дискретизации ψ^2 и параметра формы Q^2 . На рис. 2—4 приведены точечные кривые зависимости параметра формы от относительного размера элемента разрешения системы дискретизации, моделируемой гауссовой передаточной функцией с шириной полосы пропускания, равной полосе пропускания квадратного элемента дискретизации, охватывающего N_g отсчетов исходного изображения [2]. Расчет проведен с использованием соотношений [6, формула (12)]. Видно, что кривые, соответствующие параметру формы и среднему значению параметра пространственной дискретизации, с незначительной ошибкой совпадают. Следовательно, соотношения, полученные с помощью аппарата передаточных функций, могут быть использованы для усредненной (с точностью 10—20 %) оценки влияния пространственной дискретизации на качество обнаружения изображений ППО. Однако при необходимости учета взаимного пространственного положения элементов пространственной дискретизации аппарат передаточных функций может давать существенные (до 100 %) ошибки в оценках качества обнаружения объектов по их дискретизированным изображениям. Другое достоинство предложенной матричной модели состоит в том, что она может использоваться для оценки влияния пространственной дискретизации на характеристики обнаружения объектов с учетом статистических свойств шума на входе и выходе системы формирования изображения, в то время как в модели, основанной на аппарате передаточных функций, учет статистических свойств шума входного изображения связан со значительными вычислительными трудностями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ярославский Л. П. Цифровая обработка сигналов в оптике и голографии: Введение в цифровую оптику. М.: Радио и связь, 1978.
2. Прэтт У. Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. М.: Мир, 1982.
3. Красильников Н. Н. Теория восприятия и передачи изображений. Теория передачи изображений и ее приложения. М.: Радио и связь, 1986.
4. Бычков А. А., Понькин В. А. Обнаружение изображений пространственно-протяженных затеняющих фон объектов // Автометрия. 1992. № 4.
5. Ван Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции. Т. 1: Пер. с англ. под ред. В. И. Тихонова. М.: Сов. радио, 1972.
6. Поветко В. Н., Понькин В. А. Оценка качества обнаружения пространственно-протяженных объектов по их изображениям // Радиотехника и электроника. 1993. 38, № 4.

Поступила в редакцию 5 апреля 1995 г.