

ная часть устройства (В), содержащая трансформаторы на ферритовых кольцах 8 с коэффициентом трансформации 1:100, однополупериодные выпрямители 9 и 10, высоковольтные коммутрующие реле 11, пьезокерамический цилиндр 12.

Устройство с пьезокерамической трубкой ЦТС-19 (длина трубки 19 мм, диаметр 19 мм и толщина 1,5 мм) и двумя регулируемыми биполярными источниками питания  $\pm 400$  В обеспечивает угловую юстировку зеркала в двух ортогональных плоскостях на величину  $0,5 \div 1'$ . Практическое использование устройства показало, что оно позволяет управлять мощностью лазера ЛГ-79-2 в пределах от максимальной до нуля, компенсируя механические и температурные перекосы резонатора лазера.

При незначительном удалении органов регулирования от резонатора можно применять набор подходящих управляемых источников напряжения, доступных пользователю. В качестве источника можно использовать часть высоковольтного напряжения питания трубки лазера, регулируемого современными высоковольтными транзисторами. Если организовать управление транзисторами от четырехквadrантного фотоприемника через цепь обратной связи, то получается автономная система стабилизации лазера.

Поступило в редакцию 30 ноября 1984 г.

УДК 621.391

О. В. БАЗАРСКИЙ, Ю. В. КОРЖИК  
(Воронеж)

### МЕТОД ОПОРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ ЗАШУМЛЕННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Одна из важных задач, возникающих при обработке аэрокосмической информации, заключается в оценке параметров изображений квазипериодических земных поверхностей (геологические образования, сельскохозяйственные культуры, морская поверхность) [1—5]. Определение отдельных параметров изображения может быть проведено непосредственно по изображению или по спектру его мощности [4, 5]. Однако непосредственное получение таких оценок часто затруднено вследствие зашумленности или невысокой разрешающей способности изображений. Спектральный анализ зашумленных квазипериодических поверхностей не позволяет вести распознавание при малых отношениях сигнал/шум. Поэтому для их обработки целесообразно применение корреляционных методов [1, 6, 7], с помощью которых возможны не только оценка частоты гармоник зашумленной поверхности, но и обнаружение заданного участка местности.

Несмотря на то что большинство корреляционных систем ориентировано на классификацию узкого класса изображений, обеспечить условия оптимальной обработки, как правило, невозможно [6, 7], так как параметры изображений квазипериодических поверхностей существенно зависят от формы поверхности и условий съемки [2, 5]. При этом для оптимальной обработки требуется перебор большого числа опорных изображений, что приводит к многоканальности или делает невозможной обработку в реальном масштабе времени. Поэтому представляет интерес исследование способов неоптимальной обработки изображений квазипериодических поверхностей с помощью опорного изображения, в общем случае отличающегося по некоторым параметрам от входного изображения квазипериодической поверхности. В данной работе рассмотрены возможности неоптимального обнаружения и оценки параметров зашумленных изображений квазипериодических поверхностей и практической реализации разработанного алгоритма в корреляционно-экстремальных системах.

Пусть на вход системы поступает реализация  $F(x, y)$ , представляющая собой аддитивную смесь входного изображения  $s(x, y)$  и белого шума  $n(x, y)$  со спектральной плотностью  $N_0$ . При обработке изображений с помощью коррелятора на выходе формируется корреляционный интеграл, соответствующий оптимальной обработке [8, 9]:

$$Z_0 = \int_0^{D_x} \int_0^{D_y} F(x, y) s(x, y) dx dy \cong \frac{1}{2} \frac{N_0 \ln l_0}{2} + \frac{1}{2} E_s = \Psi_0. \quad (1)$$

Здесь  $\Psi_0$  — порог обнаружения;  $E_s$  — энергия входного изображения;  $l_0 = P_2/P_1$  — отношение априорных вероятностей отсутствия и наличия изображений на входе коррелятора;  $D_x, D_y$  — размеры транспаранта коррелятора. Вероятность принятия правильного решения при оптимальной обработке [9]

$$P_0 = 0,5[1 + \Phi((m_0 - \Psi_0)/\sigma_0)] = 0,5[1 + \Phi(0,5G_s - 0,5(\ln l_0)/G_s)], \quad (2)$$

где  $m_0$  — среднее значение корреляционного интеграла;  $\sigma_0$  — дисперсия при оптимальной обработке;  $G_s = \sqrt{E_s N_0^{-1}}$  — отношение сигнал/шум.

При неоптимальной обработке для нахождения значения корреляционного интеграла используется опорное изображение  $v(x, y)$ . Тогда

$$Z_H = \int_0^{D_x} \int_0^{D_y} F(x, y) v(x, y) dx dy \stackrel{1}{\approx} \Psi_0. \quad (3)$$

Подставляя в (2) среднее значение корреляционного интеграла при неоптимальной обработке

$$m_H = \int_0^{D_x} \int_0^{D_y} s(x, y) v(x, y) dx dy \quad (4)$$

и дисперсию  $\sigma_H^2 = \langle (Z_H - m_H)^2 \rangle = N_0 E_v$ , получаем вероятность правильного обнаружения в неоптимальном случае

$$P_H = 0,5 [1 + \Phi(0,5\mu r_E G_s - 0,5r_E (\ln l_0)/G_s)], \quad (5)$$

которая в отличие от известного выражения (2) зависит от отношения энергий входного и опорного изображений  $r_E = \sqrt{E_s/E_v}$  и параметра оптимальности

$$\mu = 2m_H E_s^{-1} - 1, \quad (6)$$

определяемого декорреляцией входного и опорного изображений при неоптимальной обработке. При оптимальной обработке  $v(x, y) = s(x, y)$ ,  $\mu = r_E = 1$  и  $P_H = P_0$ . Используя неравенство Буныковского — Шварца, нетрудно показать, что  $\mu \leq 2r_E^{-1} - 1$ . Следовательно, значение  $\mu = 1$ , соответствующее оптимальной обработке, максимально при  $E_v = E_s$ . В этом случае областью изменения параметра оптимальности является интервал  $[-1, 1]$ . Следует отметить, что при  $\mu < 0$   $P_H < 0,5$  и обнаружение невозможно, так как вероятность обнаружения в этом случае не превосходит вероятности случайного угадывания.

Пусть опорное изображение  $v(x, y)$  представляет собой гармонический транспарант с частотой  $\omega_s$ , амплитудой  $A_v$  и контрастом  $M_v$ :

$$v(x, y) = A_v (1 + M_v \cos \omega_s x), \quad (7)$$

а входное изображение  $s(x, y)$  — детерминированная квазипериодическая поверхность с периодом  $T_s = 2\pi/\omega_s$ . Функцию  $s(x, y)$  можно разложить в ряд Фурье

$$s(x, y) = \sum_{k=0}^{\infty} A_{sk} \sin(k\omega_s x + \varphi_k). \quad (8)$$

Выбирая начало координат так, чтобы  $s(-x, y) = -s(x, y)$ , представим исследуемую поверхность в виде

$$\begin{aligned} s(x, y) &= \sum_{k=0}^{\infty} A_{sk} \cos k\omega_s x = A'_{s0} \left( 1 + \frac{A_{s1}}{A'_{s0}} \cos \omega_s x \right) + \sum_{k=2}^{\infty} A_{sk} (1 + \cos k\omega_s x) = \\ &= \sum_{k=1}^{\infty} A_{sk} (1 + M_{sk} \cos k\omega_s x), \end{aligned} \quad (9)$$

где  $A'_{s0} = A_{s0} - \sum_{k=2}^{\infty} A_{sk}$ ;  $A_{sk}$  — коэффициенты разложения ряда Фурье;  $M_{sk}$  — контраст членов разложения.

Параметр оптимальности

$$\mu = 2 \sum_{k=1}^{\infty} \mu_k - 1. \quad (10)$$

Здесь

$$\begin{aligned} \mu_k &= (S_{\text{из}} A_v A_{sk} / E_s) [1 + M_v \text{sinc } 2\pi\theta + M_{sk} \text{sinc } 2\pi kR\theta + \\ &+ 0,5M_{sk}M_v \text{sinc } 2\pi(kR - 1)\theta + 0,5 M_{sk}M_v \text{sinc } 2\pi(kR + 1)\theta]; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} E_s &= S_{\text{из}} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} A_{si} A_{sj} [1 + M_{si} \text{sinc } 2\pi iR\theta + M_{sj} \text{sinc } 2\pi jR\theta + \\ &+ 0,5M_{si}M_{sj} \text{sinc } 2\pi(i - j)R\theta + 0,5M_{si}M_{sj} \text{sinc } 2\pi(i + j)R\theta]; \end{aligned} \quad (12)$$

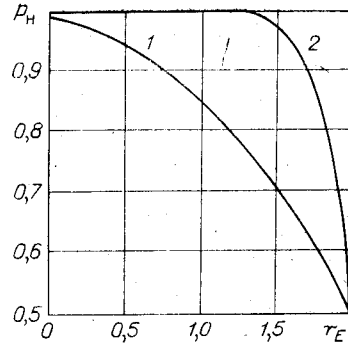


Рис. 1. Зависимость вероятности неоптимального обнаружения от отношения амплитуд входного и опорного изображений: 1 —  $G_s = 2$ ; 2 —  $G_s = 10$ .

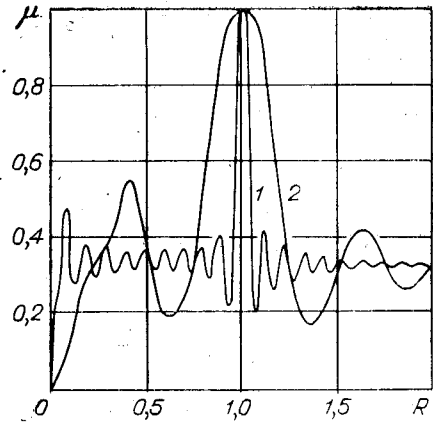


Рис. 2. Связь параметра оптимальности с отношением частот входного и опорного изображений: 1 —  $\theta = 10$ ; 2 —  $\theta = 2$ .

$S_{из} = D_x D_y$  — площадь изображения;  $R = \omega_s \omega_v^{-1}$  — отношение пространственных частот;  $\theta = D_x T_v^{-1}$  — число периодов опорной частоты в области анализа (на опорном транспаранте). Параметр  $r_E$  для квазипериодической поверхности

$$r_E = \left[ \frac{E_s}{S_{из} A_v^2} (1 + 0,5M_v^2 + 2M_v \text{sinc } 2\pi\theta + 0,5M_v^2 \text{sinc } 4\pi\theta)^{-1} \right]^{0,5}. \quad (13)$$

В общем случае анализ выражений (10) — (13) затруднен из-за большого числа слагаемых и необходимости задания конкретной формы квазипериодической поверхности, т. е. коэффициентов  $A_{s,k}$ , которые могут меняться в широких пределах. Поэтому проанализируем возможности неоптимальной обработки для отдельной гармонической составляющей квазипериодической поверхности. Рассмотрим первую гармонику, которая в основном определяет амплитуду и частоту входного квазипериодического изображения. При этом  $A_{s,k} \ll A_{s,1}$  и

$$r_E = \frac{A_{s,1}}{A_v} \left[ \frac{1 + 0,5M_{s,1}^2 + 2M_{s,1} \text{sinc } 2\pi R\theta + 0,5M_{s,1}^2 \text{sinc } 4\pi R\theta}{1 + 0,5M_v^2 + 2M_v \text{sinc } 2\pi\theta + 0,5M_v^2 \text{sinc } 4\pi\theta} \right]^{0,5}; \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \mu = 2 \frac{A_v}{A_{s,1}} [1 + M_v \text{sinc } 2\pi\theta + M_{s,1} \text{sinc } 2\pi R\theta + 0,5M_{s,1} M_v \text{sinc } 2\pi(R-1)\theta + \\ + 0,5M_{s,1} M_v \text{sinc } 2\pi(R+1)\theta] (1 + 0,5M_{s,1}^2 + 2M_{s,1} \text{sinc } 2\pi R\theta + \\ + 0,5M_{s,1}^2 \text{sinc } 4\pi R\theta)^{-1} - 1. \end{aligned} \quad (15)$$

В случае неоптимальности обработки по амплитуде

$$M_v = M_{s,1} = 1, \quad \omega_v = \omega_s, \quad R = 1, \quad r_E = A_{s,1}/A_v, \quad \mu = (2A_v/A_{s,1}) - 1.$$

Тогда параметр оптимальности  $\mu$  непосредственно связан с энергетическим параметром  $r_E$  соотношением  $\mu = 2r_E^{-1} - 1$  и

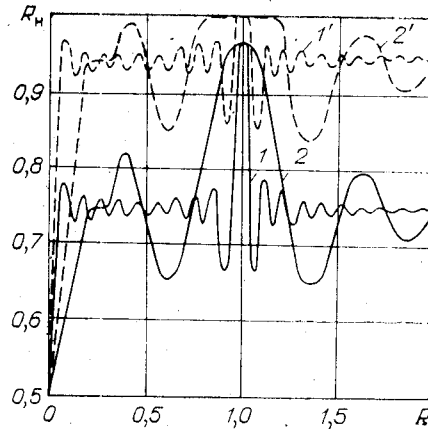
$$P_n = 0,5\{1 + \Phi[(1 - 0,5r_E)G_s - 0,5r_E(\ln l_0)/G_s]\}. \quad (16)$$

Зависимость  $P_n(r_E)$  для  $l_0 = 1$  и двух отношений сигнал/шум приведена на рис. 1. Анализ этой зависимости показывает, что обнаружение возможно лишь при  $r_E < 2$ , т. е. при  $A_v > 0,5A_{s,1}$ . Для обеспечения наибольшей вероятности обнаружения амплитуду опорного изображения следует выбирать большей, чем амплитуду входного изображения. При этом значения  $r_E < 0,5$  почти не увеличивают вероятности обнаружения, а изменение амплитуды опорного изображения в области  $0,66 A_{s,1} < A_v < 2A_{s,1}$  вызывает снижение вероятности обнаружения не более чем на 0,05 при  $G_s \geq 10$ . При меньших отношениях сигнал/шум область изменения амплитуды опорного изображения сужается.

В случае неоптимальности обработки по частоте  $M_{s,1} = M_v = 1, A_{s,1} = A_v$

$$r_E(R) = \left[ \frac{1,5 + 2 \text{sinc } 2\pi R\theta + 0,5 \text{sinc } 4\pi R\theta}{1,5 + 2 \text{sinc } 2\pi\theta + 0,5 \text{sinc } 4\pi\theta} \right]^{0,5}; \quad (17)$$

Рис. 3. Зависимость вероятности неоптимального обнаружения от отношения частот входного и опорного изображений: сплошные кривые,  $G_s = 4$ : 1— $\theta = 10$ ; 2— $\theta = 2$ ; штриховые кривые,  $G_s = 10$ : 1'— $\theta = 10$ ; 2'— $\theta = 2$ .



$$\begin{aligned} \mu(R) = & 2[1 + \text{sinc } 2\pi\theta + \\ & + \text{sinc } 2\pi R\theta + 0,5 \text{sinc } 2\pi(R-1)\theta + \\ & + 0,5 \text{sinc } 2\pi(R+1)\theta](1,5 + \\ & + 2 \text{sinc } 2\pi R\theta + 0,5 \text{sinc } 4\pi R\theta)^{-1} - 1 \end{aligned} \quad (18)$$

Зависимость (18) приведена на рис. 2. При  $R = 1$   $\mu = r_E = 1$  для любых  $\theta$  и вероятность (5) совпадает с вероятностью оптимального обнаружения (2). Для  $R \neq 1$  (частоты входного и опорного изображений различны)  $\mu < 1$  и  $P_n \neq P_0$ . Анализ этой зависимости показывает, что существует область  $\Delta R$ , в пределах которой изменение отношения частот изображений не вызывает значительного снижения параметра оптимальности  $\mu$  и вероятности обнаружения. Ширина этой области обратно пропорциональна значению  $\theta$ :

$$\Delta R = K\theta^{-1} = 2\pi(K/D_x\omega_0), \quad (19)$$

где  $K$  — коэффициент, зависящий от заданного значения параметра оптимальности  $\mu_0$ , определяемого допустимой декорреляцией входного и опорного изображений при неоптимальности обработки по частоте. Зависимость  $K(\mu_0)$  в области  $0,3 \leq \mu_0 \leq 1$  хорошо аппроксимируется выражением

$$K = 1,22\sqrt{1 - \mu_0}. \quad (20)$$

Случай  $K = 1$  ( $\mu_0 = 0,33$ ) соответствует уровню средней корреляции опорного и входного изображений при изменении частоты основной гармоники во всей области пространственных частот;  $K = 0$  ( $\mu_0 = 1$ ) соответствует автокорреляции.

На рис. 3 приведены зависимости вероятности неоптимального обнаружения от отношения частот входного и опорного изображений. Из рисунка видно, что при фиксированном уровне минимальной вероятности обнаружения  $P_{н0}$  ширина области  $\Delta R$ , в пределах которой  $P_n \geq P_{н0}$ , сильно зависит от отношения сигнал/шум. При отсутствии априорной информации о вероятности появления изображений  $I_0 = 1$  из (5) следует

$$\mu_0 = 2(\Phi^{-1}(2P_{н0} - 1))/(r_E G_s), \quad (21)$$

где  $\Phi^{-1}$  — функция, обратная интегралу вероятности. Из (17) следует, что при  $R \approx 1$   $r_E(R) \approx 1$ . Тогда, учитывая соотношения (19), (20), (21), максимальная девиация частоты основной гармоники, при которой  $P_n \geq P_{н0}$ , задается выражением

$$\Delta R = \Delta f_{s\max}/f_0 = K\theta^{-1} = 1,22\theta^{-1}\sqrt{(1 - 2\Phi^{-1}(2P_{н0} - 1))/G_s}. \quad (22)$$

Обнаружение возможно с вероятностью  $P_n \geq P_{н0}$  только для  $G_s \geq 2\Phi^{-1}(2P_{н0} - 1)$ , при этом  $\Delta R \geq 0$ . Следует отметить, что отношение сигнал/шум определяется условиями получения изображений, вероятность  $P_{н0}$  — требованиями к решающему устройству, а величина  $\theta = D_x f_0$  — характеристиками корреляционного процессора, т. е. устройством обработки. Изменяя апертуру  $\theta$ , можно менять максимально допустимую девиацию частоты основной гармоники квазипериодической поверхности. Следовательно, априорная информация о возможном интервале изменения частоты  $\Delta f_{s\max}$  позволяет сформулировать требования к апертуре корреляционного процессора:

$$D_x \leq 1,22\Delta f_{s\max}^{-1} \sqrt{\frac{2\Phi^{-1}(2P_{н0} - 1)}{G_s}}, \quad (23)$$

когда возможно обнаружение с вероятностью  $P_n \geq P_{н0}$ . При этом используется всего лишь один опорный гармонический транспарант, что позволяет сделать коррелятор одноканальным и вести обработку в реальном масштабе времени.

Известно, что при оценке параметров, принимающих континуум значений и не являющихся функцией времени запаздывания или интенсивности сигнала, приемное устройство должно быть многоканальным [8]. Оценка частоты основной гармоники квазипериодической поверхности осуществляется решающим устройством по максимальному значению корреляционного интеграла при сравнении его значений в различных каналах.

При получении значения корреляционного интеграла в каждом канале имеет место неоптимальная обработка. Следовательно, возможно использование полученных результатов для определения характеристик каждого канала коррелятора с уче-

том параметра оптимальности. Число каналов коррелятора при оценке частоты  $N = \Delta F / \Delta f_0$  зависит от области изменения оцениваемой частоты  $\Delta F$  и точности оценки частоты  $\Delta f_0$ .

Указанной точности оценки соответствует апертура коррелятора

$$D_{x0} = K \Delta f_0^{-1} = 1,22 \Delta f_0^{-1} \sqrt{1 - \mu_0}. \quad (24)$$

При  $D_x > D_{x0}$  возможно появление аномальных ошибок в оценке частоты в том случае, когда частота основной гармоники изображения квазипериодической поверхности попадает в область между двумя соседними каналами, сдвинутыми по частоте на  $\Delta f_0$ . При  $D_x < D_{x0}$  увеличивается вероятность нормальной ошибки, т. е. принятия в качестве оцениваемой частоты одного из соседних каналов. Минимальный уровень параметра оптимальности зависит от отношения сигнал/шум, вероятности нормальной (или аномальной) ошибки при оценке частоты и определяется аналогично случаю обнаружения изображения квазипериодической поверхности.

Полученный алгоритм неоптимальной адаптивной обработки зашумленных изображений квазипериодических поверхностей может быть реализован как в цифровых, так и в аналоговых процессорах В. [10] предложена схема адаптивного оптического коррелятора, реализующего полученный алгоритм. В зависимости от типа решаемой задачи возможна максимизация вероятности обнаружения входного изображения или минимизация ошибки при оценке частоты входного изображения квазипериодической поверхности.

В результате анализа алгоритма неоптимальной корреляционной обработки зашумленных изображений квазипериодических поверхностей:

1) найдена область, в пределах которой изменение частоты входного изображения относительно опорного не вызывает снижения вероятности обнаружения ниже заданного порога;

2) получено условие для апертуры корреляционного процессора, открывающее возможность неоптимальной обработки входного изображения с использованием одного опорного гармонического транспаранта;

3) найдены оптимальные размеры апертуры коррелятора для оценки частоты входного изображения квазипериодической поверхности с заданной точностью.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Алядин М. С. и др. Корреляция с эталоном — эффективный метод выявления анизотропных свойств изображения. — Автометрия, 1980, № 3.
2. Автоматизированные системы обработки изображений (АСОИЗ-81). — В кн.: Тез. докл. I Всесоюз. конф. М.: Наука, 1981, с. 182—213.
3. Аэрокосмические исследования Земли. Методы обработки видеoinформации с использованием ЭВМ. — М.: Наука, 1978.
4. Давыдов В. Т., Нежевенко Е. С. Спектральный анализ изображений в оптико-электронном процессоре. — Автометрия, 1977, № 5.
5. Живичин А. Н., Соколов В. С. Дешифрирование фотографических изображений. — М.: Недра, 1980.
6. Базарский О. В., Коржик Ю. В. Оценка параметров изображений квазипериодических поверхностей при наличии помех. — В кн.: Тез. докл. IV Всесоюз. школы по оптической обработке информации. Минск: Высшая школа, 1982, ч. I.
7. Hester C. F., Casasent D. Multivariate technique for multiclass pattern recognition. — Appl. Opt., 1980, v. 19, N 11.
8. Куликов Е. И., Трифонов А. П. Оценка параметров сигналов на фоне помех. — М.: Сов. радио, 1978.
9. Красильников И. Н. Статистическая теория передачи изображений. — М.: Связь, 1976.
10. А. с. 1101855 (СССР). Оптический коррелятор/О. В. Базарский, Ю. В. Коржик. — Оpubл. в Б. И., 1984, № 25.

Поступило в редакцию 24 июня 1983 г.

УДК 51.74 : 615.471

О. Е. ТРОФИМОВ

(Новосибирск)

#### О ТЕОРЕМЕ КОТЕЛЬНИКОВА В ПОЛЯРНЫХ КООРДИНАТАХ

В рентгеновской и ультразвуковой томографии естественной решеткой, в узлах которой задаются исходные данные, является равномерная решетка в полярных координатах [1—3]. При выборе шага дискретизации обычно ссылаются на теорему отсчетов [3]. Однако полярная сетка принципиально отличается от прямоугольной тем, что расстояния между отсчетами возрастают и имеется выделенная точка — начало координат. В этой связи возникает задача об аналогах теоремы Котельникова