

- ройства и измерительные приборы на их основе». — Барнаул: НИИАПП АлтПИ им. И. И. Ползунова, 1988.
4. Гудмен Дж. Введение в фурье-оптику. — М.: Мир, 1970.
5. Вагнер Е. Т. Контроль геометрических параметров объектов по кольцевой структуре лазерного луча // Измер. техника. — 1981. — № 4.

Поступило в редакцию 18 апреля 1990 г.

УДК 621.391.172 : 621.397

П. Г. ПОПОВ, А. С. ПОРЯДИНА
(Новосибирск)

ПОСТРОЕНИЕ АНИЗОТРОПНЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ КОРРЕКЦИИ СТРОЧНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ШУМОВ

В микрофотоэлектронных преобразователях изображений как видимого, так и ИК-диапазонов фактором, существенно искажающим изображение, является геометрический шум, обусловленный дискретно-аналоговой структурой фоточувствительных элементов. Геометрический шум проявляется в виде разброса фотоэлектрических сигналов от отдельных фоточувствительных элементов. Скомпенсировать чувствительность элементов не всегда возможно, поэтому для устранения геометрического шума требуются специальные методы.

Рассмотрим случай линейных фотоприемников, которые вносят в изображение строчный геометрический шум. Предположим, что геометрический шум является случайным процессом с сильной корреляцией в одном направлении, а изображение задано в цифровом виде.

Известно, что частотный спектр локальных участков изображения, содержащих контуры объектов, оказывается анизотропным [1, 2]. В направлении, взятом вдоль резкого прямоугольного контура, высокочастотные составляющие практически отсутствуют, в то время как в перпендикулярном направлении мощность высокочастотных составляющих спектра может быть значительной. Для обнаружения контура в частотной плоскости должны сохраняться элементы спектра, соответствующие направлению контура, что эквивалентно применению направленного фильтра, импульсный отклик которого вырезает в частотной области это направление.

Результаты статистических измерений фрагментов реальных изображений показали, что хорошее их описание можно получить с помощью модели, имеющей пять классов [3, 4]. Четыре из них соответствуют преобладающим корреляционным связям в одном из четырех направлений осей, составляющих углы 0, 45, 90 и 135° с вертикалью. Пятый класс — это фрагменты с изотропной структурой, при которой имеются две пары направлений с одинаковыми корреляционными связями: пара вертикаль — горизонталь и пара диагональных направлений. При этом корреляции разных пар могут отличаться по величине друг от друга.

Для каждой точки изображения возьмем прямоугольную локальную окрестность размером $n \times n$ элементов. Для определения принадлежности локальной окрестности к какому-либо из классов достаточно проанализировать мощность спектра вдоль выбранных осей. Направление с наибольшей мощностью спектра определяет класс окрестности.

Изотропная структура локальных окрестностей на изображениях реальных сцен встречается крайне редко. Даже при анализе равномерного фона шума, присутствующие в принятом изображении, нарушают изотропную структуру окрестностей. Более часто на изображениях встречаются точки, имеющие окрестности со структурой, близкой к изотропной, т. е. такие точки, окрестности которых не имеют ярко выраженной анизотропии спектра. Для отнесения таких окрестностей к изотропным, т. е. к пятому классу, для каждой точки изображения составляется отношение E_n/E_m , где E_m — наибольшая мощность спектра окрестности вдоль осей, а E_n — мощность в перпендикулярном направлении. Если теперь ввести порог R , то разделение окрестностей происходит по правилу:

$$\begin{cases} \text{если } E_n/E_m < R, \text{ то окрестность анизотропна;} \\ \text{если } E_n/E_m \geq R, \text{ то окрестность изотропна.} \end{cases}$$

Предположим, что классы окрестностей на незашумленном изображении распределены случайным образом. Возьмем два различных фрагмента размером $N \times N = B$ элементов и оценим вероятность того, что совпадут классы окрестностей в M точках при совмещении этих фрагментов:

$$P(M, B, p) = \binom{M}{B} p^M q^{B-M}. \quad (1)$$

где p — вероятность совпадения классов в точке; q — вероятность несовпадения. Статистика классов окрестностей изображения зависит от применяемых процедур выделения изотропных окрестностей. Для того чтобы дальнейшие рассуждения

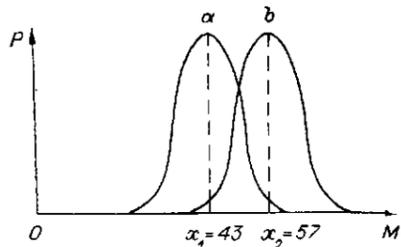


Рис. 1. Расчетные кривые вероятности сов-

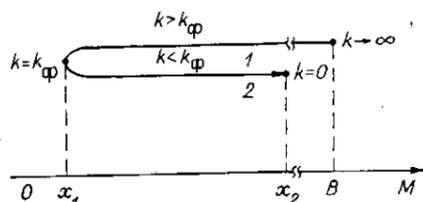


Рис. 2. Схема смещения максимума ве-



Рис. 3. Исходное изображение

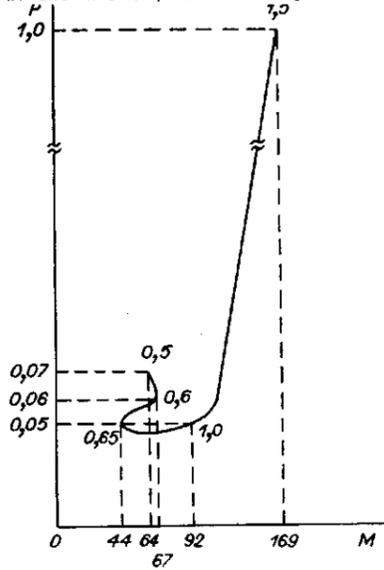


Рис. 4. График изменения положения максиму-
ма вероятности совпадения классов для исходно-
го изображения



Рис. 5. Обработанное
изображение

не зависели от этих процедур, будем рассматривать четыре класса окрестностей, исключая изотропный случай. Тогда $p = 1/4$, а $q = 3/4$. На рис. 1 показана расчетная кривая вероятности P для случая из четырех классов окрестностей (кривая a с максимумом в точке x_1).

При появлении на изображении строчного геометрического шума распределе-ние классов окрестностей меняется [5]. Дело в том, что строчный шум вносит анизотропию в спектры окрестностей, и поэтому начинает преобладать класс, совпадаю-щий с классом геометрического шума. Вероятность совпадения классов, заданная выражением (1), увеличивается, и с увеличением мощности шума ее значение будет стремиться к 1. При этом кривая a вероятности совпадения классов будет смещать-ся вправо, а ее максимум — к точке $B = N \times N$.

Умножим сумму элементов спектра каждой локальной окрестности, соответствующую направлению строчной структуры, на некоторый коэффициент k . При больших значениях k , т. е. при $k \rightarrow \infty$, вероятность совпадения классов будет равна 1, а количество совпадений $-B = N \times N$. При уменьшении коэффициента от 1 до некоторого значения $k_{\phi} < 1$ происходит процесс подавления шума на изображении. При дальнейшем уменьшении значения коэффициента k начинается разрушение изображения и, как результат, исчезновение на изображении окрестностей рассматриваемого класса; в предельном случае при $k = 0$ остается только три класса окрестностей. В этом случае $p = 1/2$, $q = 2/3$ и кривая (1) имеет вид, показанный на рис. 1 (кривая b с максимумом в точке x_2). Схематически положение максимума вероятности совпадений в зависимости от величины коэффициента k показано на рис. 2. Коэффициент k принимает значение k_{ϕ} в самой левой точке кривой.

Кривую смещения максимума вероятности совпадения классов можно подучить, если для различных значений k просканировать исходное изображение произвольно выбранным фрагментом этого же изображения, вычисляя на каждом шаге сканирования количество совпавших классов элементов.

Выбор значения коэффициента $k = k_{\phi}$, вводимого для коррекции спектров, позволяет добиться оптимального режима, при котором направление, соответствующее строчной структуре, перестает превалировать над остальными направлениями, т. е. на определение класса окрестностей здесь уже влияет не геометрический шум, а структура самого изображения.

После введения корректирующего коэффициента k_{ϕ} и определения класса локальной окрестности становится возможным проведение фильтрации.

Процедура фильтрации заключается в наложении на спектр Фурье локальной окрестности направленного фильтра. Так как имеется пять классов окрестностей, то, следовательно, будет и пять видов весовой функции направленного фильтра. Действие фильтра сводится к вырезанию из спектра элементов, лежащих на оси, соответствующей классу данной окрестности. В том случае, когда окрестности соответствует пятый (изотропный) класс, в спектре остается только нулевая частота.

После наложения фильтра и выполнения обратного преобразования Фурье восстанавливается точка изображения, локальная окрестность которой рассматривалась.

Эксперименты показали, что расчетная (исходя из принятой модели распределения классов) величина k_{ϕ} и экспериментальная (для слоистых изображений) практически совпадают.

В других экспериментах величина коэффициента выбиралась, основываясь на визуальной оценке качества изображения. Выбранные коэффициенты также совпали с расчетными.

Эксперименты по фильтрации предложенным методом проводились на изображениях размером 32×32 элемента при использовании окрестности размером 4×4 элемента. Для оценки вероятности совпадения классов на исходном изображении выбирался фрагмент размером 13×13 элементов.

На рис. 3 приведено исходное изображение, полученное с помощью линейки фотоприемников. Сканирование проводилось сверху вниз, что обусловило геометрический шум в вертикальном направлении.

Экспериментальная кривая смещения максимума вероятности совпадения классов в зависимости от коэффициента k показана на рис. 4. На оси абсцисс отложено количество совпадений классов окрестностей, на оси ординат - вероятность совпадения при текущем значении коэффициента. Для всех значений k , отмеченных на кривой, проводилось сканирование исходного изображения фрагментом и на каждом шаге подсчитывалось количество случаев совпадения классов. Затем для каждого k строилась кривая вероятности количества совпадений классов и находился максимум этой кривой.

Чем больше значение k , тем чаще встречается класс, соответствующий направлению геометрического шума; вероятность совпадения классов увеличивается, поэтому увеличивается и максимум вероятности. Из рисунка видно, что при $k = 1,5$ на изображении остается один класс, что приводит к полному совпадению всех $13 \times 13 = 169$ сравниваемых элементов с вероятностью 1.

При уменьшении коэффициента вероятность появления класса, соответствующего направлению шума, уменьшается, что приводит к уменьшению совпадений классов. Минимальное количество совпадений классов наблюдается в случае, когда появление каждого класса на изображении равновероятно. На рисунке это точка $k_{\phi} = 0,65$.

При последующем уменьшении k вероятность появления этого класса уменьшается, начинается разрушение изображения. Так, на рассматриваемом изображении при $k = 0,5$ класс окрестности, соответствующий вертикальному направлению, полностью исчезает.

Обработанное изображение приведено на рис. 5.

Таким образом, обработка изображений, основанная на анализе анизотропных свойств локальных окрестностей, позволяет уменьшить влияние на изображение строчного геометрического шума, оставив резкими участки изображения с достаточно сильными корреляционными связями. Размер локальной окрестности выбирается в зависимости от величины деталей, которые должны быть различимы на изображении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gabor D. The smoothing and filtering of two-dimensional images // Progress in Biocybernetics, Amsterdam, 1965.— 2.
2. Лебедев Д. С. Статистическая модель изображения // Иконика: Пространственная фильтрация изображений. Фотографические системы.— М.: Наука, 1970.
3. Лебедев Д. С., Миркин Л. И. Двумерное сглаживание изображений с использованием «составной» модели фрагмента // Иконика: Цифровая голография. Обработка изображений.— М.: Наука, 1975.
4. Понов П. Г., Порядина С. А. Кодирование изображений локальными анизотропными признаками // Оптические и оптико-электронные средства обработки информации.— Л.: ЛФГИ, 1989.
5. Понов П. Г., Порядина С. А., Солнышков А. А. Амплитудно-фазовая коррекция изображений: Тез. докл. // Проблемы создания и практического использования оптических процессоров реального масштаба времени.— Черкассы: КГУ, 1989.

Поступило в редакцию 21 декабря 1989 г.

УДК 531.715 : 681.327

А. А. ТИТОВ
(Москва)

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТА
ГЕТЕРОДИННЫМ МЕТОДОМ

В настоящее время интерференционные методы находят применение для абсолютных измерений положения объекта [1, 2]. Однако при реализации этих методов необходимы двухчастотные лазеры, достаточно сложные оптические и электронные системы, что значительно затрудняет их применение в измерительных устройствах.

В данной работе предложен более простой метод разрешения неоднозначности в определении положения объекта. Сущность метода поясняется рис. 1.

Акустооптический модулятор (АОМ) освещается плоским волновым фронтом. Совместим плоскость XOY системы координат с выходной плоскостью АОМ, ось Z с направлением распространения падающего пучка света, а начало координат расположим в центре пучка. Подадим на АОМ два гармонических сигнала с частотами f_n и $f_n + f_m$, где f_n и $f_n + f_m$ — частоты сигналов на выходах генераторов высокой и низкой частоты соответственно. Пучок света будет дифрагировать на бегущих в АОМ ультразвуковых волнах в плоскости XOZ . Ограничимся рассмотрением дифрагированных пучков плюс первого порядка, так как остальные пучки могут быть отфильтрованы щелью фотоприемника. Тогда амплитуды дифрагированных пучков на выходе АОМ можно представить в виде

$$A_1 = A_0 \exp i[(\omega_{cn} + \omega_n)t + kz \cos \Theta_n + kx \sin \Theta_n]; \quad (1)$$

$$A_2 = A_0 \exp i[(\omega_{cn} + \omega_n + \omega_m)t + kz \cos (\Theta_n + \Theta_m) + kx \sin (\Theta_n + \Theta_m)],$$

где $k = 2\pi n_n/\lambda$ — волновое число; λ — длина волны света в вакууме; $\Theta_n \approx \lambda f_n/v_{zn}n_n$; $\Theta_m \approx \lambda f_m/v_{zm}n_m$ — углы дифракции света; n_n — показатель преломления воздуха; v_{zn} — скорость звука в АОМ; A_0 — амплитуда дифрагированного пучка; ω_{cn} — частота света.

Положим, что фотоприемник расположен на расстоянии $Z = L$ от АОМ и смещен в поперечном направлении на $x = c$, углы дифракции малы и $\Theta_n \gg \Theta_m$, а дифрагированные пучки интерферируют в плоскости фотоприемника. Тогда с учетом (1) можно получить выражения для сигнала на выходе фотоприемника, в котором учтен только интерференционный член:

$$U = A_0^2 S_{ФП} l_{щx} \int_{c-l_{щx}/2}^{c+l_{щx}/2} |\exp i(\omega_{cn} + \omega_n)t + kL \cos \Theta_n + kx \sin \Theta_n| + \\ + \exp i[(\omega_{cn} + \omega_n + \omega_m)t + kL \cos (\Theta_n + \Theta_m) + kx \sin (\Theta_n + \Theta_m)]|^2 dx = \\ = A_0^2 S_{ФП} S_{щ} \operatorname{sinc} \left[k l_{щx} \sin \frac{\Theta_m}{2} \cos \left(\Theta_n + \frac{\Theta_m}{2} \right) \right] \cos \left[\omega_n t + 2kL \sin \left(\Theta_n + \frac{\Theta_m}{2} \right) \sin \frac{\Theta_m}{2} - \right. \\ \left. - 2kc \sin \frac{\Theta_m}{2} \cos \left(\Theta_n + \frac{\Theta_m}{2} \right) \right] \approx A_0^2 S_{ФП} S_{щ} \operatorname{sinc} \left(\frac{k l_{щx}}{2} \Theta_m \right) \cos (\omega_n t - \varphi), \quad (2)$$

где $\varphi = -k\Theta_n L + k\Theta_m c$; $S_{щ} = l_{щx} l_{щy}$ — размеры щели фотоприемника по координатам x и y ; $S_{ФП}$ — чувствительность фотоприемника.

Фазометр измеряет фазу φ , которая пропорциональна положению фотоприемника. Оптимизация диапазона и точности измерения положения объекта. При оценке диа-