

Л. А. МИТРОФАНОВА, А. С. ОСТРОВСКИЙ,
И. М. ПОЧЕРНЯЕВ, Е. К. ШМАРЕВ

(Киев)

МЕТОДЫ ФОТОПЛАСТИЧЕСКОЙ ЗАПИСИ В ЗАДАЧАХ ФИЛЬТРАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В настоящее время вопросу фильтрации изображений в когерентных оптических системах посвящено большое число работ [1]. Во многих из них делается вывод о необходимости создания голографического фильтра, способного к перезаписи в квазиреальном времени. Создание такого фильтра позволило бы решить многие задачи динамической согласованной фильтрации, двумерного корреляционного и обобщенного спектрального анализа.

Впервые о возможности применения фотопластика для записи голографических согласованных фильтров было сообщено Вандер Люгтом [2]. Фотопластик обладает целым рядом преимуществ, проявляющихся при использовании его в качестве среды для записи голографических фильтров. К ним относятся: возможность записи и стирания фильтра непосредственно в системе пространственной фильтрации [3]; малое время цикла запись — стирание, которое может составлять 10^{-3} с [4]; цикличность порядка нескольких тысяч [5]; высокая дифракционная эффективность, достигающая 20% при малых интермодуляционных шумах [6].

Рассмотрим некоторые особенности построения динамических систем корреляционного анализа изображений с использованием голографических фильтров, записанных на фотопластике.

На рис. 1 представлена схема фильтрации с последовательным вводом коррелирующих изображений. В предметной плоскости на объект-модулятор типа «электрический сигнал — свет» вводится изображение, задаваемое полем комплексной амплитуды $s(x; y)$; при этом в плоскости фотопластического элемента b интенсивность света в интерференционной картине можно представить выражением

$$I(\omega_x \omega_y) = A_0^2 + |S(\omega_x \omega_y)|^2 + A_0 S(\omega_x \omega_y) e^{i\omega_0 x} + A_0 S^*(\omega_x \omega_y) e^{-i\omega_0 x}, \quad (1)$$

где A_0 — амплитуда опорной волны, $S(\omega_x \omega_y) = F[s(x, y)]$ — Фурье-образ распределения поля комплексной амплитуды в плоскости объекта-модулятора. При этом на поверхности фотопластика, предварительно заряженного от ионизатора, образуется зарядное изображение, которое в приближении малой зарядной модуляции $\sigma/\sigma_0 \ll 1$ есть линейная функция от экспозиции $q(\omega_x \omega_y) = \sigma_0 - \sigma I(\omega_x \omega_y)$. После теплового проявления зарядное изображение преобразуется в рельеф поверхности фотопластика. Первые два члена в (1) — низкочастотные функции пространственных координат и вследствие наличия у фотопластика квазирезонансной прост-

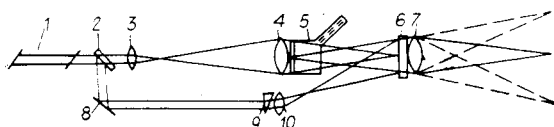


Рис. 1. Схема фильтрации с последовательным вводом изображений:

1 — лазер; 2 — светоделитель; 3, 4, 7 — объективы;
5 — ЭЛТ с термопластической мишенью; 6 — фотопластический носитель; 8—10 — оптические элементы формирования опорного луча.

ранственно-частотной характеристики при выборе достаточно высокой несущей частоты голографического фильтра не будут преобразованы в соответствующий рельеф поверхности. Наличие этих низкочастотных составляющих приводит лишь к локальной разрядке фотопластического слоя.

Таким образом, комплексное пропускание фильтра будет представлено следующим выражением:

$$\tau(\omega_x \omega_y) = \exp \operatorname{Im} [S(\omega_x \omega_y) e^{i\omega_0 x} + S^*(\omega_x \omega_y) e^{-i\omega_0 x}]. \quad (2)$$

Если ограничиться малым коэффициентом модуляции $mS < 0,6$ рад, то с 5%-ной погрешностью экспоненту в выражении (2) можно аппроксимировать первыми двумя членами разложения:

$$\tau(\omega_x \omega_y) = 1 + \operatorname{Im} S(\omega_x \omega_y) e^{i\omega_0 x} + \operatorname{Im} S^*(\omega_x \omega_y) e^{-i\omega_0 x}, \quad (3)$$

что представляет собой функцию комплексного пропускания голографического фильтра, согласованного с функцией $s(x, y)$.

При подаче на вход системы изображения $f(x, y)$ на выходе системы пространственной фильтрации распределение поля комплексной амплитуды

$$K(x', y') = f(x', y') + \operatorname{Im} [s(x', y') \otimes f(x', y') \otimes \delta(x' + x_0, y') + s^*(-x', -y') \otimes f(x', y') \otimes \delta(x' - x_0, y')], \quad (4)$$

где символ \otimes обозначает операцию свертки.

Последний член суммы, как и в случае амплитудного голографического фильтра, представляет собой функцию кросс-корреляции $s(x, y)$ и $f(x, y)$ и позволяет реализовать алгоритм согласованной фильтрации. В отличие от системы с амплитудным согласованным фильтром в нулевом порядке дифракции в рамках приближения (3) наблюдается неискаженное изображение объекта, подвергающегося фильтрации.

Благодаря наличию у фототермопластика квазирезонансной пространственно-частотной характеристики становится возможным не только осуществить фильтрацию низкочастотных автокорреляционных составляющих, но и значительно снизить погрешность приближения (3), обусловленную интермодуляционным шумом. Это является существенным преимуществом фотопластика перед другими фазовыми регистрирующими средами.

На рис. 2 представлена схема когерентного коррелометра с одновременным вводом изображений, подаваемых на два пространственно-разделенных объекта-модулятора. На фотопластике осуществляется запись распределения интенсивности света в интерференционной картине в фокальной плоскости объектива 4:

$$\begin{aligned} I(\omega_x \omega_y) &= |F[f(x-a, y) + g(x+a, y)]|^2 = \\ &= |F(\omega_x, \omega_y) e^{-ia\omega_x} + G(\omega_x, \omega_y) e^{ia\omega_x}|^2 = |F(\omega_x, \omega_y)|^2 + \\ &+ |G(\omega_x, \omega_y)|^2 + FG^* e^{-i2a\omega_x} + F^* G e^{i2a\omega_x}. \end{aligned} \quad (5)$$

В приближении (3) комплексное пропускание зарегистрированной голограммы будет описываться функцией

$$\tau(\omega_x \omega_y) \approx 1 + \operatorname{Im} [F(\omega_x \omega_y) G^*(\omega_x \omega_y) e^{-i2a\omega_x} + F^*(\omega_x \omega_y) G(\omega_x \omega_y) e^{i2a\omega_x}]. \quad (6)$$

Центральный пучок света используется для восстановления картины корреляционного поля в плоскости 8. Затворы 3 осуществляют коммутацию потоков света на этапе записи и восстановления. Распределение поля комплексной амплитуды в восстановленном изображении

$$\begin{aligned} U_{\text{восст}} &= \delta(x', y') + \operatorname{Im} [f(x', y') \otimes \\ &\otimes g^*(-x', y') \otimes \delta(x' - 2a, y') + \\ &+ f^*(-x', -y') \otimes g(x', y') \otimes \\ &\otimes \delta(x' + 2a, y')]. \end{aligned}$$

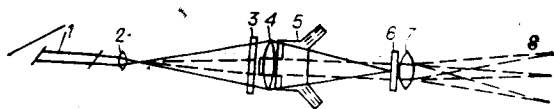


Рис. 2. Схема фильтрации с параллельным вводом изображений:

1 — лазер; 2, 4, 7 — объективы; 3 — коммутирующий затвор; 5 — ЭЛТ с двумя термопластическими мишенями; 6 — фотопластический носитель; 8 — плоскость восстановления корреляционных изображений.

Таким образом, на выходе системы в режиме восстановления наблюдаются два кросс-корреляционных распределения, симметричных относительно пика нулевого порядка.

Обе описанные схемы в качестве входных объектов-модуляторов могут использовать устройства как с амплитудной, так и с фазовой модуляцией, например электронно-лучевые трубки с термопластической мишенью. Во втором случае в частотной плоскости перед фотопластическим элементом устанавливается фильтр, режектирующий постоянную составляющую. В остальном обработка производится аналогично случаю амплитудной модуляции, и на выходе системы в приближении малых углов фазовой модуляции распределение интенсивности соответствует квадрату корреляционной функции обрабатываемых изображений.

Комплексная адаптивная система фильтрации с фотопластическим носителем может использовать ЭВМ в качестве элемента, задающего одно из коррелирующих изображений, и тем самым осуществлять управление процессом фильтрации входных функций. Описанный метод перезаписи фильтра является более удобным по сравнению с методом прямого синтеза голографического фильтра на ЭВМ, так как он предъявляет менее жесткие требования к разрешающей способности отображающей системы ЭВМ.

Однако в этом методе требуется на предыдущем такте адаптации запомнить импульсный отклик, видоизменить его в соответствии с алгоритмом адаптации и только затем снова записать на предварительно очищенном фотопластике. Было бы желательно осуществить локальную коррекцию фильтра без его полного стирания, что существенно упростило бы адаптивную систему. Для этого можно воспользоваться тем, что тепловая энергия записи изображения для фотопластика меньше энергии стирания, и поэтому можно осуществить повторную запись новой информации без стирания предыдущей. Это потенциально позволяет строить адаптивную систему фильтрации без промежуточного запоминания функции импульсного отклика в периферийном устройстве. Однако в предварительных экспериментах реализовать такой режим работы фильтра на фотопластике с числом тактов адаптации, большим чем три, оказалось трудно из-за роста уровня шумов, а также ввиду сложности выбора режима зарядки и проявления на каждом последующем этапе. Поэтому данный вопрос требует еще дальнейших исследований.

Результаты экспериментов. Экспериментально исследовалась как схема с последовательным, так и схема с параллельным вводом коррелирующих функций. Изображения в систему вводились в виде записи на фотоленке (амплитудная запись) или фотопластике (фазовая запись с растриванием). Для записи голографических фильтров использовались типовые фотопластические элементы, изготавливаемые в Киевском государственном университете [7]. Время цикла запись — стирание 0,2 с. Запись фильтра производилась по следующей методике: поверхность фотопластика заряжалась от ионизатора, после чего осуществлялось экспонирование и тепловое проявление. Достижимая дифракционная эффективность составляла 10%, несущая пространственная частота фильтра обычно выбиралась равной 150—200 лин/мм.

При использовании фотопластика в качестве голографического фильтра в когерентную систему вносятся дополнительные источники пространственных шумов, влияющие на динамический диапазон обработки вводимых сигналов. К ним относятся: шумы «морозной» деформации поверхности фотопластика; интермодуляционные шумы, возникающие за счет нелинейной записи голографического фильтра; косметические фазовые шумы, появляющиеся в процессе многократного использования фотопластического носителя. Первые два типа шумов могут быть уменьшены до необходимого уровня путем обеспечения определенных режимов записи фильтра на фотопластике: а) уменьшение потенциала

поверхности ниже $V_{кр}$, уменьшение времени проявления $t < t_{кр}$; б) работа на резонансной пространственной частоте, уменьшение глубины фазовой модуляции.

Как показали экспериментальные исследования, наибольшую неприятность при работе с фотопластиком в схемах голографической фильтрации представляет третий источник шума. Именно фазовые шумы, связанные с возникновением мелких неоднородностей в слое фотопластического носителя, ограничивают число циклов использования реверсивного голографического фильтра. Так, если новый фотопластический элемент позволяет осуществить запись голографического фильтра с динамическим диапазоном по интенсивности вплоть до 25 дБ, то уже после 30 циклов запись — стирание за счет роста уровня косметических шумов динамический диапазон снижается до 18 дБ, а после 100 циклов составляет всего 5—10 дБ.

На рис. 3 представлен результат согласованной фильтрации изображения в схеме с последовательным вводом коррелирующих функций. Голографический фильтр был согласован с изображением самолета. Слева видно изображение входного транспаранта, подвергаемое фильтрации и наблюдаемое в выходной плоскости в нулевом порядке дифракции, справа — корреляционное поле в первом порядке дифракции. Виден яркий корреляционный пик в квадрате с изображением самолета, а также пик меньшей интенсивности в квадрате, содержащем изображение контура самолета.

На рис. 4 представлен нулевой и первый порядок дифракции на выходе той же схемы, голографический фильтр согласован с изображением креста. В правом изображении видны фигуры в виде квадратов, представляющие собой результат корреляции креста и окружности. На рис. 5 показан результат обработки простейшего изображения (вверху) в схеме с параллельным вводом изображений. Корреляционное поле (внизу), кроме кросс-корреляционных изображений (квадраты), содержит результат автокорреляции окружности, так как при записи голограммы несущая пространственная частота была выбрана недостаточно большой для обеспечения полной фильтрации низкочастотных членов.

При работе описанных систем в динамическом режиме на поверхно-

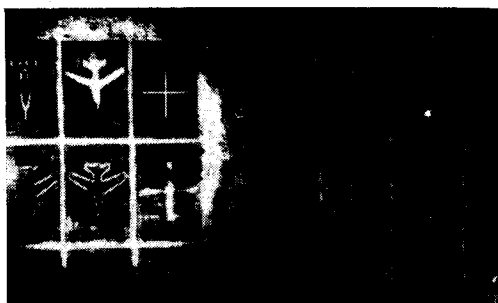


Рис. 3. Результат согласованной фильтрации изображений самолета (нулевой и первый порядок дифракции).

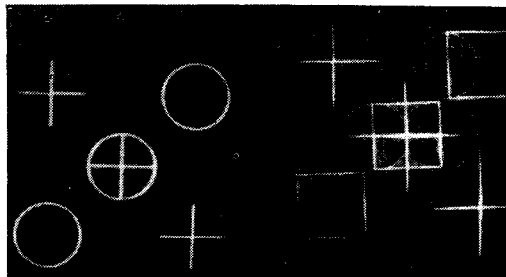


Рис. 4. Результат корреляционной обработки изображения. Слева — обрабатываемое изображение в нулевом порядке дифракции, справа — корреляционное изображение в первом порядке дифракции.

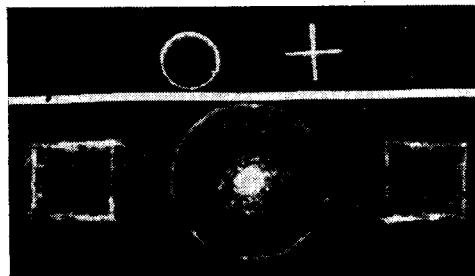


Рис. 5. Результат обработки в схеме с параллельным вводом изображений. Вверху — входные изображения, внизу — восстановленное корреляционное изображение.

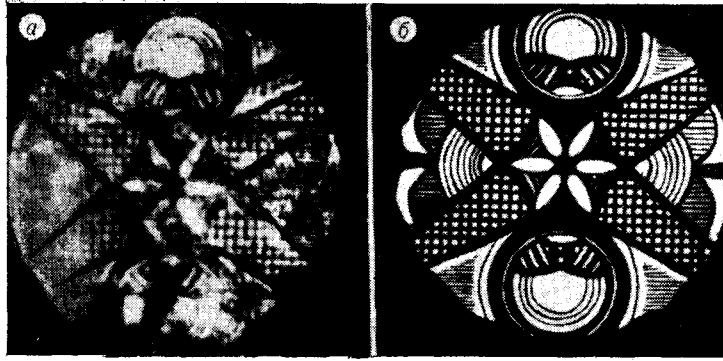


Рис. 6. Импульсный отклик голографического фильтра, записанного на фотопластике:

a — без избыточности, *b* — с избыточностью.

сти фотопластика самопроизвольно возникают косметические дефекты. Учитывая то, что при записи голографического фильтра световая энергия локализуется на малой площади фотопластика, система фильтрации работает с малой надежностью.

На рис. 6, *a* представлено изображение, соответствующее импульсному отклику фильтра, записанного без избыточности на фотопластике с локальным фазовым дефектом.

Существенно повысить надежность работы схемы фильтрации с фотопластическим элементом можно путем введения избыточности за счет использования пространственных степеней свободы волнового поля. Подобная задача решалась Хенненом [8] применительно к системе кассетного телевидения «Holotape». В отличие от работ Хеннена нам удалось достичь 60-кратной избыточности с помощью голографически синтезированной двумерной дифракционной решетки [9], записанной глубоким рельефом на фотопластике. Введение такой решетки в плоскость перед объектом-модулятором позволяет осуществлять фильтрацию одновременно по 60 параллельным каналам, что существенно повышает надежность работы системы в динамическом режиме.

При этом если пропускание решетки описывается рядом $\sum_{n,h=-\infty}^{\infty} C_n C_h e^{i\omega_0(nx+hy)}$, где C_n, C_h — коэффициенты Фурье, а основная частота решетки ω_0 выбрана такой, что выполняются следующие условия:

$$F(\omega_x, \omega_y) \approx G(\omega_x, \omega_y) \approx 0 \text{ при } |\omega_x| \geq \omega_0/2, |\omega_y| \geq \omega_0/2,$$

то можно показать, что в корреляционной плоскости распределение поля комплексной амплитуды в первом порядке

$$K(x', y') = f(x', y') \otimes g^*(-x', -y') \left[\sum_{n,h=-N}^N C_n^2 C_h^2 e^{2i\omega_0(nx+hy)} \right]. \quad (8)$$

Таким образом, корреляционная функция на выходе оказывается умноженной на периодическую несущую. Устранение такой периодической структуры в выходном изображении может быть осуществлено посредством медленного перемещения входной решетки или же использованием выходного считывающего фотоприемника с линейной апертурой, большей периода решетки. Получаемый при этом квадрат корреляционной функции остается инвариантным к смещениям входного изображения. В ряде случаев наличие периодической структуры в выходном изображении является даже полезным, так как по смещению ее линий

можно определить фазовое распределение в корреляционной функции.

На рис. 6, б представлено изображение, соответствующее импульсному отклику фильтра, записанного с избыточностью на фотопластике с локальным фазовым дефектом.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показали возможность широкого применения фотопластика для построения динамических и адаптивных систем пространственной фильтрации. Для дальнейшего усовершенствования этих систем необходимо улучшение параметров фотопластических носителей и в первую очередь — их цикличности. Это позволит создать гибкие электронно-оптические комплексы, управляющие функции в которых могут быть переданы ЭВМ, а исполняющим элементом будет когерентно-оптический коррелометр с динамическим фильтром.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Б. Гуревич, В. К. Соколов. Оптические методы обработки информации.— В кн.: Оптические методы обработки информации. Л., «Наука», 1974.
2. A. Vander Lugt. Optical processing.— In: Proceedings Development in Holography. SPIE Seminar Proceedings, 1971, vol. 25, p. 117.
3. T. C. Lee. Holographic recording on thermoplastic films.— "Appl. Opt.", 1974, vol. 13, № 4, p. 888.
4. W. T. Maloney, R. L. Gravel. Submillisecond development of thermoplastic recordings.— "Appl. Opt.", 1974, vol. 13, № 11, p. 2471.
5. W. S. Colburn, E. N. Tompkins. Improved thermoplastic-photoconductor devices for holographic recording.— "Appl. Opt.", 1974, vol. 13, № 12, p. 2934.
6. T. L. Credelle, F. W. Spong. Thermoplastic media for holographic recording.— "RCA Rev.", 1972, vol. 33, p. 206.
7. Н. Г. Находкин, Н. Г. Кувшинский, И. М. Почерняев. Управляемые фазовые термопластические среды для регистрации и обработки информации.— В кн.: Способы записи информации на бессеребряных носителях. Вып. 5. Киев, «Выща школа», 1974, с. 3—19.
8. W. I. Hannan. Embossed holographic movies.— Материалы V Всесоюзной школы по голографии. Л., ЛИЯФ, 1973. 359 с.
9. А. С. Островский, Е. К. Шмарев. Амплитудный синтез голографических дифракционных решеток.— В кн.: Проблемы голографии. Вып. 6. М., МИРЭА, 1976.

*Поступила в редакцию 9 сентября 1975 г.;
окончательный вариант — 11 ноября 1975 г.*

УДК 772.773:631.325.5

А. В. КУЗЬМЕНКО, Н. Г. НАХОДКИН

(Киев)

ОПТИЧЕСКИЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СИЛУЭТНО-КОНТУРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЕЙСТВИТЕЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ ОДНОЙ ПЕРЕМЕННОЙ

Введение. Исходные формулы. Известно, что задание действительной функции одной переменной $y=z(x)$ в виде силуэтного или контурного изображений (рис. 1, 2) может быть использовано для получения Фурье-спектра этой функции в когерентном оптическом вычислительном