

А. С. ОСТРОВСКИЙ, Е. К. ШМАРЕВ

(Киев)

**КОМПЛЕКСНЫЙ КОГЕРЕНТНЫЙ СИНТЕЗ
И ФИЛЬТРАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ
НА ОСНОВЕ НЕГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Когерентно-оптические системы обработки информации весьма перспективны для решения ряда задач распознавания образов, коррекции и фильтрации изображений и сигналов. Однако до настоящего времени им присущ существенный недостаток, связанный с их малой универсальностью и гибкостью по сравнению с соответствующими цифровыми системами. По всей видимости, устранение такого недостатка возможно на базе создания гибридных оптико-электронных систем, в которых исполняющим элементом будет когерентно-оптическое устройство (КОУ), а логическим и управляющим — ЭВМ.

При создании такой гибридной системы одним из наиболее важных является вопрос связи ЭВМ и КОУ. В ряде работ для этой цели предлагается использование синтезированных цифровым методом голографических фильтров с последующим вводом их в частотную плоскость коррелометра Ван дер Люгта [1, 2]. К сожалению, технические характеристики отображающих систем, в особенности по разрешению, во многих практических случаях не позволяют реализовать такую систему.

В данной работе изложен способ реализации управляемого комплексного фильтра на основе неголографических только амплитудных или только фазовых фильтров, что позволяет избежать необходимости кодирования фазы с помощью пространственной несущей и тем самым существенно снижает технические требования к отображающей системе ЭВМ, работающей совместно с КОУ. В основе способа лежит представление любой комплексной двумерной функции в виде суммы трех положительных или двух фазовых функций, реализуемое в оптической системе с когерентным освещением.

Синтез комплексного поля по трем положительным компонентам. Ввод функции, синтезированной на ЭВМ, в КОУ затруднен тем, что объект-модулятор обычно может осуществить лишь ввод действительных положительных функций, в то время как для решения задач фильтрации изображений, а также при отображении трехмерной информации требуется ввод как знакопеременных, так и комплексных функций.

Рассмотрим возможность синтеза произвольной двумерной комплексной функции $f(x; y)$. Как известно [3], такую функцию можно представить в виде разложения по трем векторам в комплексной плоскости

$$f(x; y) = |f(x; y)| \exp[i\chi(x; y)] = f_1(x; y) + f_2(x; y) \exp[i2\pi/3] + f_3(x; y) \exp[i4\pi/3]. \quad (1)$$

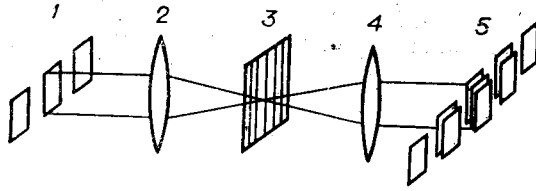


Рис. 1. Когерентно-оптическая схема синтеза комплексного поля:

1 — входная плоскость с тремя амплитудными транспарантами; 2 — объектив Фурье-преобразования; 3 — фазовая балансная решетка; 4 — объектив обратного преобразования; 5 — плоскость синтеза.

$$U(x; y) = f_1(x, y) + f_2(x-a; y) + f_3(x+a; y), \quad (2)$$

где a — расстояние между центрами модуляторов. Соответствующее распределение в частотной плоскости можно представить в виде

$$F[U(x; y)] = \mathcal{F}_1(\omega_x; \omega_y) + \mathcal{F}_2(\omega_x; \omega_y) \exp[-i\omega_x a] + \mathcal{F}_3(\omega_x; \omega_y) \exp[i\omega_x a], \quad (3)$$

здесь символ F обозначает фурье-преобразование: $\mathcal{F}_{1,2,3}(\omega_x; \omega_y) = F[f_{1,2,3}(x; y)]$; $\omega_x = 2\pi\xi/(\lambda f)$; $\omega_y = 2\pi\eta/(\lambda f)$.

В этой же плоскости устанавливается фазовая дифракционная решетка с пропусканием

$$\tau(\omega_x; \omega_y) = \exp[i\frac{m}{2} \cos 2\pi\xi a/(\lambda f)] = \sum_{q=-\infty}^{\infty} J_q\left(\frac{m}{2}\right) \exp[iq2\pi\xi a/(\lambda f)], \quad (4)$$

где m — глубина фазовой модуляции, λ — длина волны излучения, f — фокусное расстояние объектива, J_q — функция Бесселя.

При выборе глубины модуляции решетки $m \approx 1,4$ рад реализуется условие равенства интенсивностей ее порядков дифракции $J_0(m/2) = J_{\pm 1}(m/2)$ и функцию пропускания с точностью до множителя можно переписать в виде

$$\tau(\omega_x; \omega_y) = [1 + \exp(i2\pi\xi a/(\lambda f)) + \exp(-i2\pi\xi a/(\lambda f)) + \dots]. \quad (5)$$

Общее поле комплексной амплитуды в фурье-плоскости схемы можно представить в виде

$$U_1(\omega_x; \omega_y) = F[U(x; y)] \tau[i\omega_x a + i\psi], \quad (6)$$

где ψ — пространственная фаза решетки, определяемая ее положением относительно оптической оси системы.

Обозначив $\Omega = 2\pi a/(\lambda f)$, получаем из (1) и (5)

$$U_1(\xi; \eta) = \mathcal{F}_1(\xi; \eta) + \mathcal{F}_2(\xi; \eta) \exp[i\Omega\xi] + \mathcal{F}_3(\xi; \eta) \exp[i\Omega\xi] + \mathcal{F}_1(\xi; \eta) \exp[i(\Omega\xi + \psi)] + \mathcal{F}_2(\xi; \eta) \exp[i\psi] + \mathcal{F}_3(\xi; \eta) \exp[i(2\Omega\xi + \psi)] + \mathcal{F}_1(\xi; \eta) \exp[-i(\Omega\xi + \psi)] + \mathcal{F}_2(\xi; \eta) \exp[-i(2\Omega\xi + \psi)] + \mathcal{F}_3(\xi; \eta) \exp[-i\psi]. \quad (7)$$

После выполнения обратного фурье-преобразования объективом 4 распределение поля комплексной амплитуды в выходной плоскости запишется в виде

$$U_3(x'; y') = f_1(x'; y') + f_2(x'; y') \exp[i\psi] + f_3(x'; y') \exp[-i\psi] + \\ + \{ [f_2(x'; y') + f_1(x'; y') \exp(-i\psi)] \otimes \delta(x' - a; y') \} + \{ [f_3(x'; y') + \\ + f_1(x'; y') \exp(i\psi)] \otimes \delta(x' + a; y') \} + \text{члены высших} \quad (8) \\ \text{дифракционных порядков,}$$

где символ \otimes обозначает операцию свертки.

При выборе положения дифракционной решетки таким, что $\psi = 2\pi/3$, в нулевом порядке дифракции на выходе схемы будет синтезировано комплексное поле, описываемое функцией

$$f(x'; y') = f_1(x'; y') + f_2(x'; y') \exp[i2\pi/3] + f_3(x'; y') \exp[-i2\pi/3]. \quad (9)$$

Фильтрация по трем положительным компонентам передаточной функции. Пусть необходимо осуществить фильтрацию входного изображения $f(x; y)$ комплексной передаточной функцией $\Phi(\omega_x; \omega_y)$. Как и в предыдущем случае, последнюю можно представить суммой трех положительных компонент, однако теперь на входе схемы фильтрации необходимо осуществить разделение каналов обработки. На рис. 2

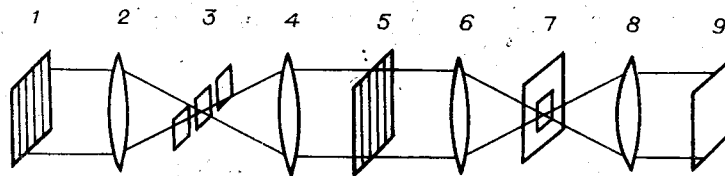


Рис. 2. Когерентно-оптическая схема комплексной фильтрации амплитудными фильтрами:

1 — плоскость входного изображения с первой балансной решеткой; 2, 4, 6, 8 — фурье-объективы; 3 — частотная плоскость с тремя пространственно-разделенными амплитудными фильтрами; 5 — вторая балансная решетка; 7 — фильтр низких частот; 9 — плоскость выходных изображений.

представлена схема фильтрации изображений трехкомпонентным фильтром с использованием двух балансных решеток. Рассмотрим работу этой схемы. Первая балансная фазовая решетка устанавливается непосредственно в плоскости входного изображения. Поле комплексной амплитуды на входе будет

$$U_1 = f(x; y) k [1 + \exp(i\Omega x + i\psi_1) + \exp(-i\Omega x - i\psi_1) + \dots]. \quad (10)$$

Величина основной частоты решетки Ω выбирается больше максимального значения пространственной частоты в спектре изображения. Если теперь в каждом из трех дифракционных порядков в плоскости 3 установить соответствующий амплитудный фильтр с пропусканием $\Phi_{1, 2, 3}$, то поле комплексной амплитуды в частотной плоскости после фильтрации

$$U_2(\omega_x; \omega_y) = \mathcal{F}(\omega_x; \omega_y) \Phi_1(\omega_x; \omega_y) + \\ + \mathcal{F}(\omega_x - \Omega; \omega_y) \Phi_2(\omega_x - \Omega; \omega_y) \exp(-i\psi_1) + \\ + \mathcal{F}(\omega_x + \Omega; \omega_y) \Phi_3(\omega_x + \Omega; \omega_y) \exp(i\psi_1). \quad (11)$$

После обратного фурье-преобразования и умножения на функцию пропускания второй балансной решетки

$$\tau(x') = k [1 + \exp(i\Omega x' + i\psi_2) + \exp(-i\Omega x' - i\psi_2)] \quad (12)$$

поле комплексной амплитуды в плоскости 5 будет иметь вид

$$U_3(x'; y') = f(x; y) \otimes [\varphi_1(x; y) + \varphi_2(x; y) \exp(i\psi_2 - i\psi_1) + \varphi_3(x; y) \exp(i\psi_1 - i\psi_2)] + \{f(x; y) \otimes [\varphi_3(x; y) \exp i\psi_1 + \varphi_1(x; y) \exp i\psi_2]\} \exp i\Omega x' + \{f(x; y) \otimes [\varphi_2(x; y) \times \exp(-i\psi_1) + \varphi_1(x; y) \exp(-i\psi_2)]\} \exp(-i\Omega x') + \{f(x; y) \otimes \varphi_3(x; y)\} \times \times \exp(i2\Omega x' + i\psi_1 + i\psi_2) + \{f(x; y) \otimes \varphi_2(x; y)\} \exp(-i2\Omega x - i\psi_1 - i\psi_2), \quad (13)$$

где

$$\varphi_{1, 2, 3}(x; y) = F[\Phi_{1, 2, 3}(\omega_x; \omega_y)].$$

В это выражение первое слагаемое входит без пространственной несущей и поэтому может быть легко отфильтровано в последующем оптическом каскаде соответствующей диафрагмой 7. В результате в нулевом порядке дифракции в выходной плоскости 9 при выборе $\Delta\psi = \psi_2 - \psi_1 = 2\pi/3$ получаем результат фильтрации входного изображения желаемой комплексной передаточной функцией

$$U_{3,0}(x'; y') = f(x; y) \otimes [\varphi_1(x; y) + \varphi_2(x; y) \exp(i2\pi/3) + \varphi_3(x; y) \exp(-i2\pi/3)] = f(x; y) \otimes F[\Phi(\omega_x; \omega_y)]. \quad (14)$$

Анализ выражения (13) показывает, что при осуществлении сдвига фаз между балансными решетками на π возможно осуществление фильтрации знакопеременной действительной функцией в нулевом, $+1$ -м и -1 -м порядках дифракции, что является частным случаем рассмотренной комплексной фильтрации.

Синтез и фильтрация изображений на основе киноформов. Другой возможный способ синтеза комплексной функции состоит в представлении ее в виде суммы двух фазовых распределений. В этом случае нормированный комплексный вектор U в любой точке плоскости представляется суммой двух единичных комплексных векторов

$$U(x; y) = a(x; y) \exp[i\chi(x; y)] = \exp[i\chi(x; y) + i \arccos[a(x; y)/2]] + \exp[i\chi(x; y) - i \arccos[a(x; y)/2]]. \quad (15)$$

Первое и второе слагаемые в данном выражении представляют собой двумерные фазовые распределения, которые могут быть реализованы на основе киноформов. В отличие от традиционного киноформа Лезема [4] в данном методе синтеза волнового поля не требуется выполнения условия $a(x; y) = \text{const}$, что существенно расширяет его область применения. Когерентное суммирование волновых полей от таких киноформов может быть осуществлено в любом двухлучевом интерферометре; в частности, может использоваться схема, представленная на рис. 1, при условии выбора $\psi = 0$ для балансной решетки (синтез в $+1$ -м и -1 -м порядках).

В результате того, что на основе двух киноформов синтезируется произвольная комплексная функция, появляется возможность использования их в схеме фильтрации изображений рис. 2. При этом величина $\Delta\psi$ опять-таки выбирается равной нулю и используются лишь два канала пространственной фильтрации.

Экспериментальные результаты. С целью иллюстрации принципиальных возможностей рассмотренных методов и систем был выполнен ряд простейших экспериментов по комплексной фильтрации изображений на основе амплитудных фильтров и синтез комплексных изображений на основе двух киноформов.

В первом случае фильтрация входного изображения (радиальной миры Фуко) осуществлялась с помощью трех бинарных амплитудных фильтров (рис. 3, $a-v$) по схеме, представленной на рис. 2. Низкочас-

тотный фильтр *a* устанавливается в нулевом порядке дифракции в плоскости *З*, полосовые фильтры *б* и *в* — в +1-м и -1-м порядках соответственно. На рис. 4 представлен результат фильтрации по нулевому каналу (*a*), по нулевому и +1-му каналу (*б*), по нулевому и -1-му каналу (*в*) и одновременно по всем трем каналам (*г*) при различных сдвигах фаз между балансными решетками. При плавном смещении одной из балансных решеток в выходном изображении мираы наблюдалось перемещение полос в соответствующих зонах в направлениях, показанных на рис. 4 стрелками. Таким образом, в данном эксперименте с помощью трех амплитудных фильтров была синтезирована чисто фазовая ступенчатая передаточная функция, имеющая значения $\chi=0; 2\pi/3; 4\pi/3$ для соответствующих частотных областей.

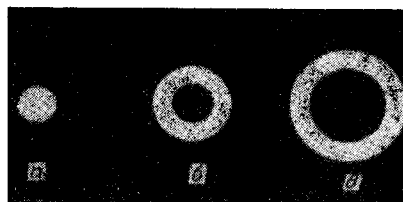


Рис. 3. Бинарные амплитудные фильтры.

Частным, но практически важным случаем комплексной фильтрации является фильтрация действительными знакопеременными функциями, которые могут быть представлены в виде (+) и (-) составляющих [5]. Такая функция, например, соответствует Фурье-образу изображения, приведенного на рис. 6, б. В этом случае можно использовать лишь два канала с $\Delta\psi=\pi$. На рис. 5, а, б представлены положительная Φ^+ и отрицательная Φ^- составляющие фурье-образа кольцевой фигуры, построенные в сферических координатах. По этим функциям, используя известную методику [6], были получены соответствующие радиально-симметричные полутонные фильтры. Для осуществления фильтрации использовалась схема рис. 2, в которой -1-й порядок в плоскости *З* был перекрыт непрозрачным экраном, а сдвиг фаз между балансными решетками составлял $\Delta\psi=\pi$. Полутонные фильтры, соответствующие функциям Φ^+ и Φ^- , устанавливались +1-м и 0-м порядках частотной плоскости *З*, а входное изображение (рис. 6, а) — в плоскости *1*. На рис. 6, в изображено полученное в результате фильтрации корреляционное поле, являющееся типичной картиной пространственной корреляции креста и окружности.

На рис. 7 приведена интерферограмма комплексного поля, синтезированного по методу двух киноформов в схеме рис. 1. Синтезированное поле содержит области со значениями комплексной амплитуды $0,1, e^{i\pi}$ (внутри квадрата). Сдвиг пространственной фазы балансной решетки отсутствовал ($\psi=0$), а комплексные пропускания киноформов в соответствующих областях были равны $(1, e^{i\frac{\pi}{6}}, e^{i\frac{5\pi}{6}}$ и $e^{i\pi}, e^{i\frac{11\pi}{6}}, e^{i\frac{7\pi}{6}}$). Третье окно во входной плоскости схемы синтеза использовалось для

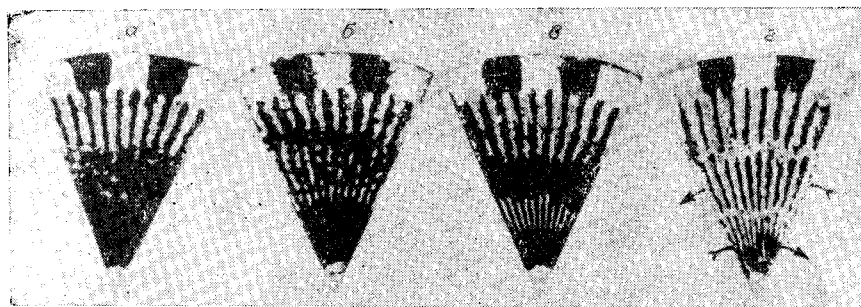


Рис. 4. Результат фильтрации бинарными амплитудными фильтрами: а — фильтр *a*; б — фильтр *a* и *б*; в — фильтр *a* и *в*; г — фильтры *a-в* при $\Delta\psi=2\pi/3$.

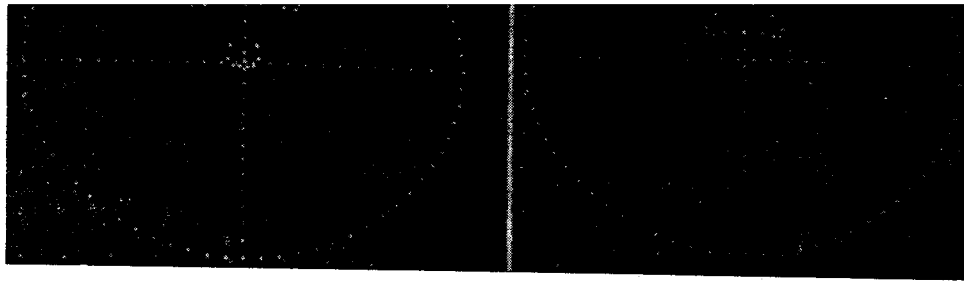


Рис. 5. Составляющие (+) и (—), соответствующие фильтру с импульсным откликом в виде кольца, построенные в координатах $\theta = \Phi_+(\rho)$ (начало координат — 37; —37; масштаб 0,296; 0,296).

ввода опорного пучка на стадии получения интерферограммы с целью контроля распределения фаз в синтезируемом изображении.

При изготовлении киноформов использовались фотопластинки "Agfa—Gevaert 10E70" с последующим отбеливанием в отбеливателе на основе двуххромовоокислого калия [7]. Такой процесс отбеливания более удобен, чем использованный в оригинальной работе Лезема, так как в данном случае киноформ образуется не за счет поверхностного рельефа задубленного желатина, а в основном за счет замены металлического серебра прозрачным соединением. При этом не наблюдается

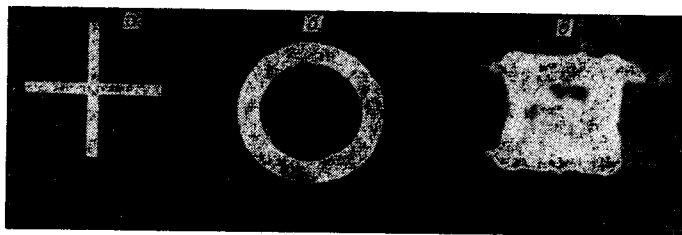


Рис. 6. Результат обработки изображения двухкомпонентным амплитудным фильтром:
a — изображение на входе схемы фильтрации; *б* — импульсный отклик синтезируемого фильтра; *в* — результат фильтрации.

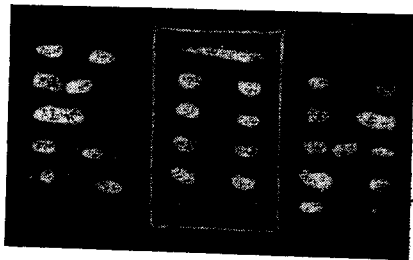


Рис. 7. Интерферограмма изображения, синтезированного с помощью двух киноформов.

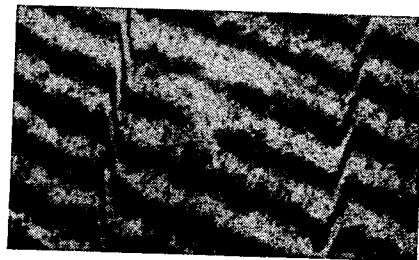


Рис. 8. Интерферограмма фрагмента низкочастотного киноформа, иллюстрирующая выполнение условия «баланса фаз» $\Delta\chi = 2\pi$.

спад частотной характеристики на низких пространственных частотах в результате влияния конечной глубины слоя желатина.

На рис. 8 представлена интерферограмма, иллюстрирующая осуществимость условия «баланса фаз» для киноформ на низких пространственных частотах (сдвиг фазы для максимального почернения соответствует 2π).

Кроме описанных экспериментов исследовалась также возможность построения управляемых киноформов на основе термопластических (забыл осуществлен лишь для одномерных функции вдоль строки одномерного растра. Вопрос об использовании термопластика для синтеза двумерных киноформов требует дальнейшего исследования.

ВЫВОДЫ

Предложенные методы синтеза комплексных изображений и передаточных функций фильтров обладают рядом преимуществ перед соответствующими методами на основе голографических элементов. Эти преимущества наиболее эффективно могут быть использованы в системах фильтрации изображений, в которых комплексные функции фильтров рассчитываются на ЭВМ и впоследствии вводятся в частотную плоскость когерентно-оптической схемы фильтрации. В таких гибридных системах в перспективе могут быть использованы электрооптические, фазовые и амплитудные модуляторы: ЭЛТ с термопластической мишенью, ЭЛТ с мишенью на кристалле КДР и другие.

ПРИЛОЖЕНИЕ

В связи с тем, что в оригинальной работе Буркхарта [3] допущены некоторые неточности, мы приводим выражения для нахождения трех положительных компонент произвольного комплексного вектора в системе координат с углами между осями $0; 2\pi/3; 4\pi/3$.

При $0 \leq \chi \leq 2\pi/3$

$$f_1(x; y) = |f(x; y)| \cos \chi(x; y) + 1/\sqrt{3} |f(x; y)| \sin \chi(x; y);$$

$$f_2(x; y) = 2/\sqrt{3} |f(x; y)| \sin \chi(x; y);$$

$$f_3(x; y) = 0.$$

При $2\pi/3 \leq \chi \leq 4\pi/3$

$$f_1(x; y) = 0;$$

$$f_2(x; y) = |f(x; y)| \cos[\chi(x; y) - 2\pi/3] + 1/\sqrt{3} |f(x; y)| \times \\ \times \sin[\chi(x; y) - 2\pi/3];$$

$$f_3(x; y) = 2/\sqrt{3} |f(x; y)| \sin[\chi(x; y) - 2\pi/3].$$

При $4\pi/3 \leq \chi \leq 2\pi$

$$f_1(x; y) = 2/\sqrt{3} |f(x; y)| \sin[\chi(x; y) - 4\pi/3];$$

$$f_2(x; y) = 0;$$

$$f_3(x; y) = |f(x; y)| \cos[\chi(x; y) - 4\pi/3] + \\ + 1/\sqrt{3} |f(x; y)| \sin[\chi(x; y) - 4\pi/3].$$

В более общем случае при выборе системы координат с углами θ_1 , θ_2 и θ_3 компоненты векторов определяются из уравнений:

$$\begin{aligned} |f| \cos \chi &= f_1 + f_2 \cos \theta_1 + f_3 \cos \theta_3; \\ |f| \sin \chi &= f_2 \sin \theta_1 - f_3 \sin \theta_3. \end{aligned}$$

Очевидно, что имеется определенный произвол в выборе f_1 , f_2 и f_3 . Можно, например, взять $f_1 = \max |f(x; y)| = \text{const}$, при этом комплексное поле будет синтезироваться с помощью двух амплитудных транспарантов и опорной волны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lohman A. W., Paris D. F. Binary Fraunhofer holograms generated by computer.—“Appl. Opt.”, 1967, vol. 6, p. 1739.
2. Lee W. H. Sampled Fourier-transform hologram generated by computer.—“Appl. Opt.”, 1970, vol. 9, p. 639.
3. Burckhardt C. B. A simplification of Lee's method of generating holograms by computer.—“Appl. Opt.”, 1970, vol. 9, p. 1949.
4. Lesem L. B., Hirsch P. M., Jordan J. A., Jr. The kinoform: a new wavefront reconstruction device.—“IBM J. Res. Develop.”, 1969, vol. 13, p. 150.
5. Гибин И. С., Нежевенко Е. С., Потатуркин И. И., Твердохлеб П. Е. Способ обобщенного спектрального анализа.—Авт. свид-во, № 369587, 1971. Б. И., 1971, № 1688013/18—24.
6. Соколов В. К., Черных Д. Ф., Яновский В. В. Методика изготовления амплитудных фильтров с заданным законом пропускания.—В кн.: Проблемы голографии. Вып. 2. М., изд. МИРЭА, 1973, с. 88.
7. Голография: методы и аппаратура. Под ред. В. М. Гинзбурга, Б. М. Степановой. М., «Сов. радио», 1974, с. 269.
8. Островский А. С., Митрофанова Л. Н., Почерняев И. М., Шмарев Е. К. Применение фотопластика в задачах фильтрации изображений.—«Автометрия», 1976, № 3, с. 16.

Поступила в редакцию
10 сентября 1976 г.

УДК 772.99 : 62.50 : 621.391.156

В. К. БЫХОВСКИЙ, И. В. ПРАНГИШВИЛИ, М. С. СОНИН, М. А. УСКАЧ
(Москва)

МИКРООПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССОРЫ ДЛЯ АНАЛИЗА ПРОБЛЕМ И УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМАМИ*

1. В последние годы становится все более очевидным, что современные ЭВМ недостаточно эффективны для анализа сложных проблем и управления большими системами. Это обусловлено тем, что 1) организация блока управления современных ЭВМ не обеспечивает смысловой надежности процесса управления (микро)программами: даже незначительные отклонения кода операции от стандартного вида приводят к «каварийному останову» из-за невозможности найти или выработать соответствующую (микро)программу управления; 2) схемы современных ЭВМ непригодны для хранения и обработки топологической информации, присущей объекту управления; 3) устройства сопряжения

* Материалы статьи докладывались на Всесоюзной конференции по автоматизации научных исследований на основе применения ЭВМ (г. Новосибирск, 10—12 июня 1974 г.). (Печатается в порядке дискуссии.—Прим. ред.).