

УДК 621.396.677

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПВМС НА РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В КОГЕРЕНТНО-ОПТИЧЕСКОМ ПРОЦЕССОРЕ

*С. С. Баранов, А. М. Мартынов, С. Г. Рабинович, А. Л. Тamarin,
В. П. Чураков, А. С. Шпилевой*

Изложена методика и результаты моделирования когерентно-оптического процессора (КОП), включающего пространственно-временной модулятор света (ПВМС) типа «Титус». Приведены основные соотношения, описывающие процесс прохождения информации в тракте КОП. Представлены зависимости степени искажения изображений и погрешностей измерения информативных признаков пространственных спектров, получаемых на выходе КОП, от конструктивных параметров применяемых ПВМС.

Исследования проведены при работе с реальными изображениями в системе, содержащей стандартную телевизионную передающую камеру, аналого-цифровой и цифро-аналоговый преобразователи, буферное запоминающее устройство на телевизионный кадр, мини-ЭВМ «СМ-4».

В различных областях науки и техники возникают задачи оперативной обработки изображений в масштабе времени, близком к реальному. Перспективным является развитие гибридных способов обработки, совмещающих оптические методы для проведения двумерных преобразований с последующим использованием средств вычислительной техники для расчета параметров обработанных изображений. В случаях, когда исходное изображение представляется в виде фотографии (негатива) либо получается на выходе передающей телевизионной камеры, реализация преимуществ оптической обработки возможна при наложении исходного изображения на когерентную световую несущую, что требует применения в качестве устройства ввода пространственно-временных модуляторов света (ПВМС).

В ряде работ [1—3] показана возможность решения задач обработки изображений с использованием ПВМС типа «Титус».

В настоящей работе проведено математическое моделирование влияния характеристик ПВМС типа «Титус» на результаты обработки изображений в когерентно-оптическом процессоре.

Блок-схема моделируемой оптической системы представлена на рис. 1. Исходное изображение в виде слайда, функция прозрачности которого изменяется по закону

$$f_0(x, y) = s_0(x, y) + \delta s_1(x, y), \quad (1)$$

где $f_0(x, y)$ — положительно определенная произвольная случайная функция; $s_{0,i}(x, y)$ — аддитивные составляющие фонового ($i=0$) и полезного ($i=1$) сигналов изображения; δ — индекс амплитудной модуляции полезного сигнала, помещается во входное окно проектора.

Далее изображение поступает на вход телевизионной камеры (КТП), в плоскости считывания которой изображение описывается выражением

$$\Phi_1(x, y) = I_0 f_1(x/k_1, y/k_1), \quad f_1(x, y) = 1(x, y/D) e(x, y) f_0(x, y), \quad (2)$$

где I_0 — амплитуда интенсивности света; $e(x, y)$ — нормированное распределение интенсивности в плоскости кадрового окна проектора (для идеальной системы $e(x, y) = 1$); $1(x, y/D)$ — функция зрачка, равная единице для x и $y \in D$; k_1 — коэффициент увеличения масштаба. В предположении линейности передающего телевизионного тракта для выходного сигнала имеем

$$\Phi_2(x, y) = \hat{F}^{-1} \left\{ \mathcal{F}_2 \left(\frac{k_1}{k_2} v_x, \frac{k_1}{k_2} v_y \right) \right\} = f_2 \left(\frac{k_2}{k_1} x, \frac{k_2}{k_1} y \right), \quad (3)$$

где

$$\mathcal{F}_2 = \mathcal{F}_1 \left(\frac{k_1}{k_2} v_x, \frac{k_1}{k_2} v_y \right) V(v_x, v_y), \mathcal{F}_1 = \hat{F} \{ f_1(x, y) \},$$

\hat{F} — оператор Фурье-преобразования; $V(v_x, v_y)$ — спектральная характеристика телекамеры; k_2 — коэффициент уменьшения масштаба изображения объективом КТП.

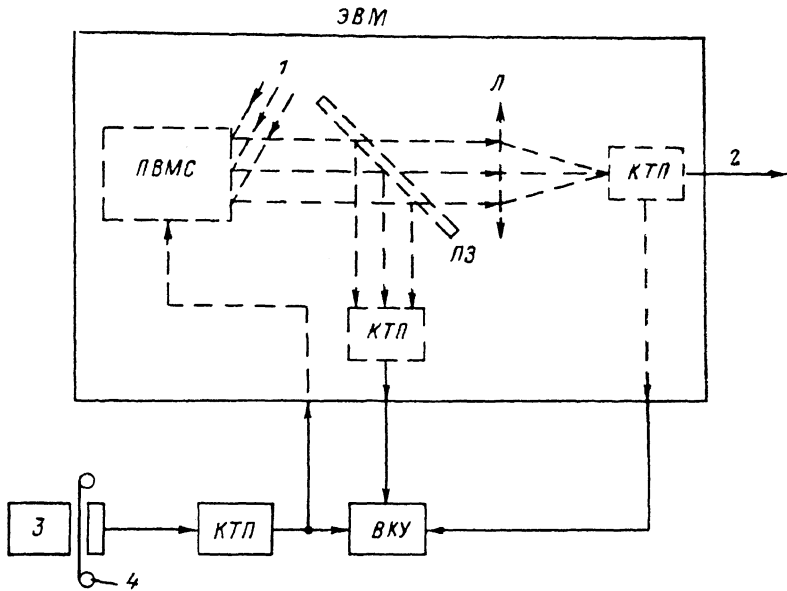


Рис. 1. Блок-схема моделируемой оптической системы.

1 — световой поток, 2 — признаки, 3 — проектор, 4 — выходное изображение.

Сигнал (3) поступает в ПВМС, где переносится на световую несущую. Нормированный выходной сигнал ПВМС в режиме амплитудной модуляции представляется в виде [4, 5]

$$\Phi_3(x, y) = \sin [v f_3(x/k, y/k)] e^{i\varphi(x, y)}, \quad (4)$$

где $v = U/U_{\lambda/2}$ — индекс фазовой модуляции, индуцированный в кристалле управляющим напряжением U ; $U_{\lambda/2}$ — полуволновое напряжение; $k = k_1 k_3 / k_2$; k_3 — коэффициент увеличения масштаба изображения при записи его на кристалл; $\varphi(x, y)$ — функция фазовой погрешности в оптическом канале ПВМС; f_3 — результат считывания функции поверхностного заряда f_2 с электрооптической мишени

$$f_3(x/k, y/k) = \hat{F}^{-1} \{ \mathcal{F}_3(kv_x, kv_y) \}, \mathcal{F}_3 = \mathcal{F}_2(kv_x, kv_y) P(v_x, v_y; \alpha q), \quad (5)$$

где $P = W(v, q) T(v, \alpha)$ — передаточная функция ПВМС; $T = \text{th } \psi / \psi$ — спектральная характеристика мишени электрооптического кристалла; $\psi = 2\pi \alpha l_{\text{эф}} v$; $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$; l — толщина кристалла; l_0 — среднее значение толщины кристалла, характерное для известных [1-3] конструкций прибора; $l_{\text{эф}} = \alpha l_0$; $\alpha = \sqrt{\epsilon_{\perp} \epsilon_{\parallel}}$;

ε_1 и ε_2 — главные значения тензора диэлектрической проницаемости кристалла; $W = e^{-\pi q^2 (v/L_{\text{эф}})^2}$ — спектральная функция плотности тока электронного луча для нормального закона распределения; $q = a/L_{\text{эф}}$; a — диаметр электронного луча.

Относительное влияние переменных α и q на точность передачи спектра в ПВМС описывается соотношением

$$\gamma(v; \alpha, q) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \eta}{\partial \alpha} \bigg/ \frac{\partial \eta}{\partial q} = 2\pi \alpha / q f(\psi), \quad f(\psi) = (1 - 2\psi / \text{sh} 2\psi) / \psi^2, \quad (6)$$

где $\eta = (\mathcal{F}_2 - \mathcal{F}_3) / \mathcal{F}_2 = 1 - P(v; \alpha, q)$; η — параметр, характеризующий погрешность выполнения Фурье-преобразования в системе с ПВМС. Из анализа соотношения (6) следует, что в указанном интервале значений α и q уровень фокусировки оказывает менее существенное влияние на точность передачи изображений, чем толщина кристалла ($\gamma > 1$). Очевидно, что для передачи изображений в спектральном диапазоне $v \leq \omega$ с погрешностью, не превышающей η_0 , требуется, чтобы $k \geq \omega / v_0$, где величина v_0 определяется в результате решения уравнения $\eta_0 = \eta(v_0; \alpha, q)$.

Для визуальной оценки качества считывания информации с ПВМС световой поток с помощью полупрозрачного зеркала (ПЗ) подается на КТП (рис. 1). Выходной сигнал на экране ВКУ при этом пропорционален квадрату модуля излучения

$$U_2(x, y) \sim |\Phi_3(x, y)|^2. \quad (7)$$

В практических случаях индекс модуляции $\delta \leq 1$, поэтому в (4) можно ограничиться членами первого порядка малости по δ , положив

$$\sin(vf_3) \cong \sin(vs_0^{(3)}) + \delta v \cos(vs_0^{(3)}) s_1^{(3)}, \quad (8)$$

где $s_{0,1}^{(3)} = \hat{F}^{-1}\{S_{0,1}VP\}$ — функции фонового и полезного сигналов, $S_{0,1} = \hat{F}\{s_{0,1}(x, y)\}$. Согласно (4) и (8), сигнал на выходе модулятора представляется суммой двух составляющих, первая из которых обусловлена фоновой компонентой, а вторая является результатом мультипликативного взаимодействия фонового и полезного сигналов. Пространственный спектр, формируемый с помощью линзы (Л), равен

$$\mathcal{F}(v_x, v_y) = \hat{F}\{\Phi_3(x, y)\} = \mathcal{F}_0(v_x, v_y) + \delta v \mathcal{F}_n(v_x, v_y), \quad (9)$$

где \mathcal{F}_0 — спектр нулевого порядка, равный функции свертки Фурье-спектра S_{n_0} фонового сигнала ПВМС со спектром ψ , обусловленным фазовой погрешностью

$$S_{n_0}(kv_x, kv_y) = \hat{F}\{\sin[vs_0^{(3)}(x/k, y/k)]\}, \quad \psi(v_x, v_y) = \hat{F}\{e^{i\varphi(x, y)}\}, \quad (10)$$

\mathcal{F}_n — информативная спектральная составляющая, определяемая функцией свертки Фурье-спектра $S_1^{(3)} = S_1VP$ полезного сигнала с функцией

$$C_n(kv_x, kv_y) = \hat{F}\{\cos[vs_0^{(3)}(x/k, y/k)] e^{i\varphi(x, y)}\}. \quad (11)$$

Для идеальных проектора и ПВМС ($e(x, y) = 1$, $\varphi(x, y) \rightarrow 0$), действующего в линейном режиме ($v \leq 1$), нулевой и информативный спектры соответственно пропорциональны спектрам фонового и полезного сигналов исходного изображения

$$\tilde{S}_{0,1}^{(3)}(v_x, v_y) \sim H\left(\frac{k_3}{k_2} v_x, \frac{k_3}{k_2} v_y\right) [S_{0,1}(kv_x, kv_y) V(kv_x, kv_y) P(v_x, v_y; \alpha, q)], \quad (12)$$

где H — спектральная функция входного зрачка.

Фоновый сигнал по отношению к полезному обычно является существенно узкополосным, и для расширения эффективного динамического диапазона тракта регистрации пространственного спектра в КОП производится режекция

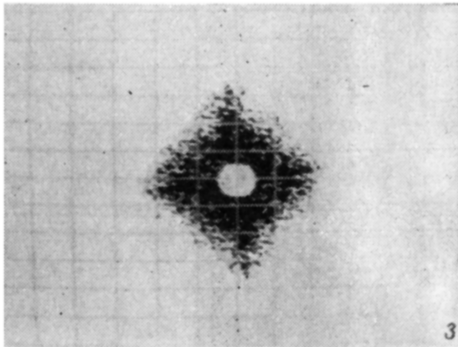
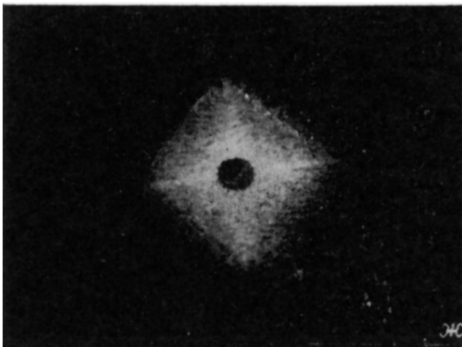
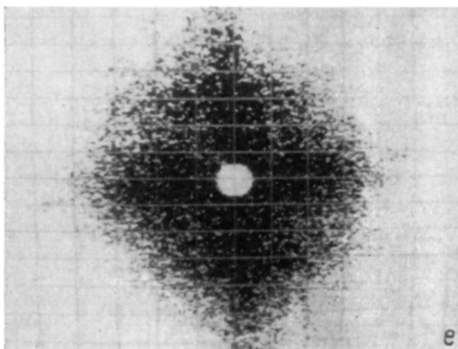
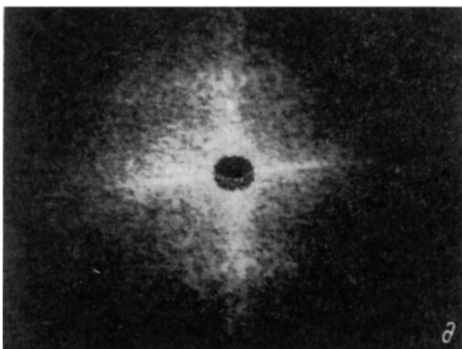
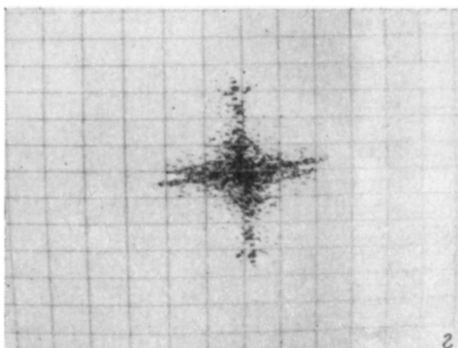
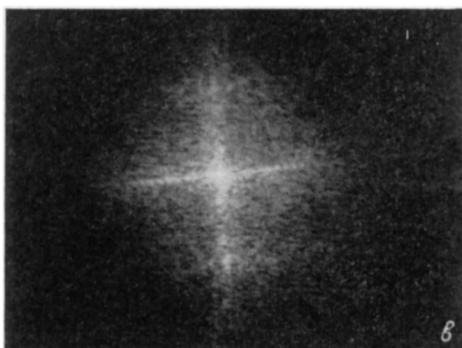
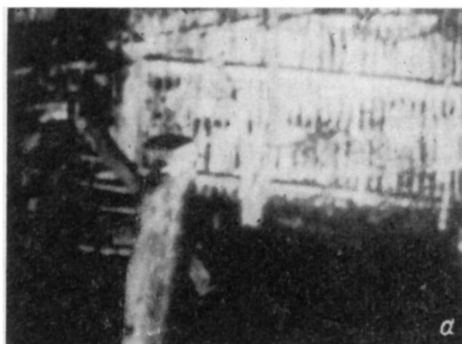


Рис. 2. Фотографии с ВКУ исходного изображения (а), изображения после наложения на его спектр передаточной характеристики ПВМС (б), логарифма квадрата модуля спектра исходного изображения (в), логарифма квадрата модуля спектра с режекцией (д), с режекцией после «наложения» спектральной функции ПВМС (ж) и сечений этих спектров по уровню $\tau=40$ ед. логарифмического масштаба (е), (з).

нулевого порядка спектра. В этом случае выходной сигнал системы описывается следующим соотношением:

$$U_3(v_x, v_y) \sim [1 - 1(v_x, v_y/\rho)] (|\mathcal{F}_0|^2 + 2\delta v \operatorname{Re} \{ \mathcal{F}_0^* \mathcal{F}_n \} + \delta^2 v^2 |\mathcal{F}_n|^2), \quad (13)$$

где ρ — диаметр режетирующего фильтра.

Изложенный выше принцип действия КОП на основе ПВМС моделировался на ЭВМ. Функциональная схема установки, использованная при моделирова-

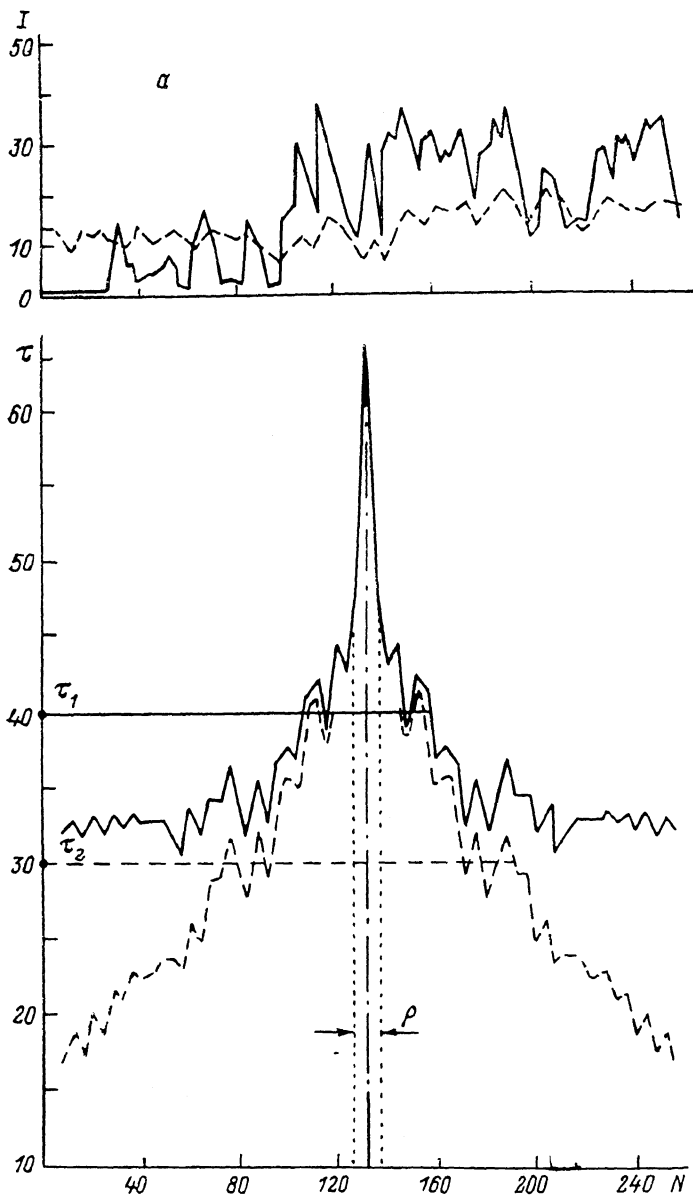


Рис. 3.

нии, состоит из блоков (рис. 1, сплошные линии). Изображение проецировалось в заданном масштабе на входное окно КТП, выходной сигнал которой подвергался аналого-цифровому преобразованию (разложение на 256×256 элементов, количество уровней квантования каждого элемента 64). В результате функция, описывающая изображение (3), представляется в виде

$$\Phi_2(x, y) = \sum_{n, m}^{N-1} \Delta x \Delta y f_2(n \Delta x, m \Delta y) \delta(x - \Delta x n) \delta(y - \Delta y m),$$

где $\Delta x = A(N-1)$, $\Delta y = B(N-1)$, $A \times B$ — апертура экрана видикона телекамеры, N — число точек дискретизации.

Замена непрерывной функции дискретной последовательностью производится без потери информации при условии $k_2 k_1 \geq \omega \Delta x$, где Δx — интервал дискретизации, ω — полоса частот сигнала. Полученная числовая последовательность поступает в архив, создаваемый на магнитном носителе ЭВМ. На пространственный спектр, получаемый в ЭВМ в результате быстрого Фурье-преобразования исходного изображения, накладывалась передаточная функция ПВМС и осуществлялась режекция нулевого порядка спектра. После цифро-аналогового преобразования информация воспроизводилась на экране ВКУ.

На рис. 2, а-з приведены фотографии исходного изображения, квадрат модуля его пространственного спектра (в логарифмическом масштабе), сечения спектра без режекции и с режекцией нулевого порядка, а также аналогичные фотографии, получаемые в результате воздействия на спектр исходного изобра-

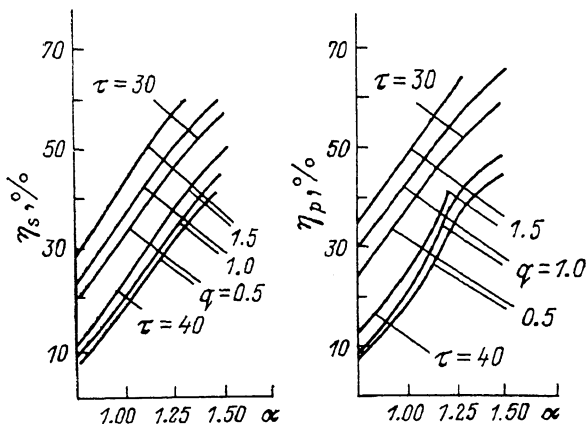


Рис. 4. Функции погрешностей информационных признаков для двух фиксированных уровней сечений спектров $\tau=30, 40$ ед. логарифмического масштаба.

жения передаточной функции ПВМС. Фотографии получены для следующих параметров ПВМС: толщина кристалла $l=250$ мкм, диаметр электронного луча $a=90$ мкм.

Размытости границ контуров и потери мелкоструктурных фрагментов изображения (рис. 2, б), восстановленного в результате обратного Фурье-преобразования, обусловлены подавлением высокочастотных составляющих пространственного спектра из-за воздействия передаточной характеристики ПВМС. Увеличение эффективности площади спектральных картин (рис. 2, д-з) после режекции нулевого порядка спектра вызвано ограниченностью динамического диапазона канала визуализации. Для иллюстрации количественных характеристик исходного и искаженного изображений на рис. 3, а представлены кривые значений функций по горизонтальной оси для центральной строки исходного изображения (сплошная линия) и изображения, восстановленного после наложения на спектр характеристики ПВМС (штриховая линия), а на рис. 3, б — одномерные сечения спектральных картин изображений для центральной строки, где сплошной линией обозначено сечение после Фурье-преобразования, а штриховой — то же сечение после наложения на него функции ПВМС.

В ЭВМ производится расчет информативных признаков, в качестве которых использовались значения площади и периметра сечений пространственных спектров по определенным уровням. Погрешность измерения информативных признаков описывается соотношением

$$\eta_{s, p}(\alpha, q; \tau) = (\mu_{s, p}^{(0)}(\tau) - \mu_{s, p}^{(0)}(\alpha, q; \tau)) / \mu_{s, p}^{(0)}(\tau),$$

где $\mu_{s, p}$, $\mu_{s, p}^{(0)}$ — значения информативных признаков пространственных спектров соответственно с учетом и без учета переходной характеристики ПВМС, $\tau = 64 + 2 \ln(|\mathcal{F}|/|\mathcal{F}_0|)$ — уровень сечения спектра, $|\mathcal{F}_0| = \max\{|\mathcal{F}(v_x, v_y)|\}$.

На рис. 4, а, б представлены зависимости погрешностей измерения периметра и площади сечений пространственных спектров от уровня фокусировки электронного луча и толщины кристалла для сечений по различным уровням. При характерных значениях толщины мишени (175 мкм, $\alpha=1$) и диаметра электронного луча (60 мкм, $q=1$) погрешности измерений площади и периметра составляют соответственно 35 и 43 % для сечения по уровню $\tau=30$ и уменьшаются до 20 % для сечения по уровню $\tau=40$. С увеличением толщины мишени a от 1 до 1.5 (175—262.5 мкм) значения площади и периметра сечения пространственного спектра уменьшаются более чем на 20 %, а изменение в том же интервале q при $\alpha=1$ приводит к уменьшению значений информативных признаков лишь на 5 %.

Изложенная методика моделирования, реализованная на мини-ЭВМ «СМ-4», позволяет по известным конструктивным параметрам ПВМС определять метрологические характеристики когерентно-оптических процессоров и, наоборот, по заданным метрологическим характеристикам рассчитывать требуемые параметры ПВМС.

Литература

- [1] Дун А. З., Криворученко А. И., Щербаков Г. П. и др. Техника кино и телевидения, 1979, № 7, с. 37—41.
- [2] Дун А. З., Криворученко А. И., Щербаков Г. П. и др. Тез. докл. III Всес. конф. по голографии. Л., 1978, с. 207—208.
- [3] Акимов Ю. А., Нагаев А. И., Пикалов В. П., Фрунзе А. В. Тез. докл. II Всес. конф. «Формирование оптического изображения и методы его обработки». Кишинев, 1985, т. 2, с. 10—11.
- [4] Мустель Б. Р., Парыгин В. Н. Методы модуляции и сканирования света. М.: Наука, 1970.
- [5] Мальшаков В. Г., Манжеев С. К., Нагаев А. И. и др. Квант. электр., 1979, т. 6, № 11, с. 2393.

Всесоюзный научно-исследовательский институт оптико-физических измерений
Москва

Поступило в Редакцию
26 мая 1986 г.
В окончательной редакции
24 марта 1987 г.