

ВЫВОДЫ

Эксперименты по записи излучением CO_2 -лазера рефракционных транспарантов показали возможность регистрации в реальном времени черно-белых и цветных полутоновых изображений с разрешением до 80 лин./мм, контрастом до $1D$, восстанавливаемых при проекции в обычных проекционных устройствах. Разрешающая способность и контрастные характеристики таких транспарантов на сегодняшний день в 2—5 раз хуже характеристик галодосеребряных фотоматериалов для микрофильмирования [1], но могут быть существенно улучшены при уменьшении размера сфокусированного лазерного пучка в плоскости записи.

Существенными преимуществами по сравнению с галодосеребряными фотоматериалами являются низкая стоимость, отсутствие стадии обработки и поглощения света в транспаранте. Последнее обстоятельство позволит использовать исследованный метод регистрации и восстановления рефракционных транспарантов для проекции высокоинтенсивными источниками света на большие экраны в системах визуализации коллективного пользования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Средства информационной техники: Справочник.— М.: Энергия, 1980.
2. Bartolini R. et al. Embossed hologram motion pictures for television playback.— Appl. Opt., 1970, v. 9, N 10, p. 2283—2290.
3. Gale M. T. Sinusoidal relief gratings for zero-order reconstruction of black-and-white images.— Opt. Commun., 1976, v. 18, N 3, p. 292—297.
4. Кноп К. Color pictures using the zero di raction order of phase grating structures.— Opt. Commun., 1976, v. 18, N 3, p. 298—303.
5. Орловский Е. Л. Передача факсимильных изображений.— М.: Связь, 1980.
6. Алимбарашвили Н. А. и др. Новые материалы для оптической записи информации.— Тбилиси: Мецниереба, 1983.
7. Бессмельцев В. П., Гриценко Д. А., Жилевский А. И. Универсальное лазерное устройство вывода изображений в стандарте КАМАК.— В кн.: Обработка изображений и дистанционные исследования. Ч. II. Новосибирск: ВЦ СО АП СССР, НИИГАиК МВ и ССО РСФСР, 1984, с. 44—45.
8. Глузун Г. Г., Левченко Е. Б., Низьев В. Г., Сейфазов Р. Д. О механизме разрушения полимеров излучением импульсно-периодического CO_2 -лазера.— Квант. электроника, 1984, т. II, № 11, с. 2294—2300.

Поступила в редакцию 20 июля 1985 г.

УДК 621.391 : 681.3.01

**О. А. АФАНАСЬЕВА, С. М. БОРЗОВ, И. С. ГИБИН,
В. П. КОТЕНКО, И. И. РАЗУМОВА, В. Н. ХУДИК,
Л. Ф. ЧЕРНЫШЕВ, А. И. ЧЕРНЫШОВ, П. Н. ШЕЙКО**

(Новосибирск)

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ИТЕРАТИВНОЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЕ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Введение. Перспективным направлением развития оптических и оптико-электронных методов и средств обработки изображений является применение принципов обратной связи, имеющих фундаментальное значение при построении большинства технических систем. При этом основная проблема, которая может быть эффективно решена, состоит в реализации итерационных методов восстановления изображений в реальном или квазиреальном масштабе времени. Ввиду относительной простоты наибольшее распространение получили системы, в основе принципа дей-

ствия которых лежит алгоритм ван Циттерта и его модификации [1—3]. Реализация этого алгоритма осуществляется в замкнутой гибридной оптико-электронной системе с обратной связью. Концепция гибридной обработки разбивает ее на этапы, которые решаются в соответствующих телевизионных, оптических и цифровых подсистемах. В результате объединяются высокая скорость аналоговых оптических систем и гибкость и функциональная полнота цифровых электронных систем.

Известен ряд работ [4—8] по применению в оптических системах методов обратной связи, однако методы и системы, пригодные для практического применения и решения конкретных задач прикладного характера, развиты недостаточно. В связи с этим цель данной работы — разработка и создание экспериментального макета интерактивной гибридной оптико-электронной системы с оптической обратной связью, предназначенной для восстановления изображений итерационным методом в квазиреальном масштабе времени.

Описание системы. В основу принципа действия разработанной системы положен итерационный алгоритм ван Циттерта восстановления изображений в форме

$$S_0(x, y) = f(x, y); \quad (1)$$

$$S_{n+1}(x, y) = S_n(x, y) + \alpha[f(x, y) - h(x, y) \otimes S_n(x, y)], \quad n = 0, 1, 2, \dots,$$

где $f(x, y)$ — исходное изображение; $h(x, y)$ — аппаратная функция искажающей системы; α — некоторая постоянная. Заметим, что на работу системы оказывает влияние ряд искажающих воздействий, вносимых базовыми элементами. Вследствие этого реализуемый алгоритм имеет более сложную форму, приведенную в работе [9], но это усложнение несущественно при рассмотрении функционирования системы. В соответствии с (1) система, реализующая его, должна обладать следующими возможностями: наличие памяти, осуществление арифметических операций, реализация операции свертки двух функций, гибкость формирования аппаратной функции, высокое быстродействие, обеспечивающее работу в реальном и квазиреальном масштабе времени.

На основании этих требований структурная схема системы содержит (рис. 1) блок ввода изображений, интегратор, блок операторных преобразований и блок контроля. В блоке ввода осуществляется ввод исходного изображения $f(x, y)$, подлежащего обработке. Интегратор обеспечивает хранение исходного $f(x, y)$ и текущего $S_n(x, y)$ изображения, а также выполнение арифметических операций «сложение», «вычитание», «умножение». В блоке операторных преобразований выполняются фор-

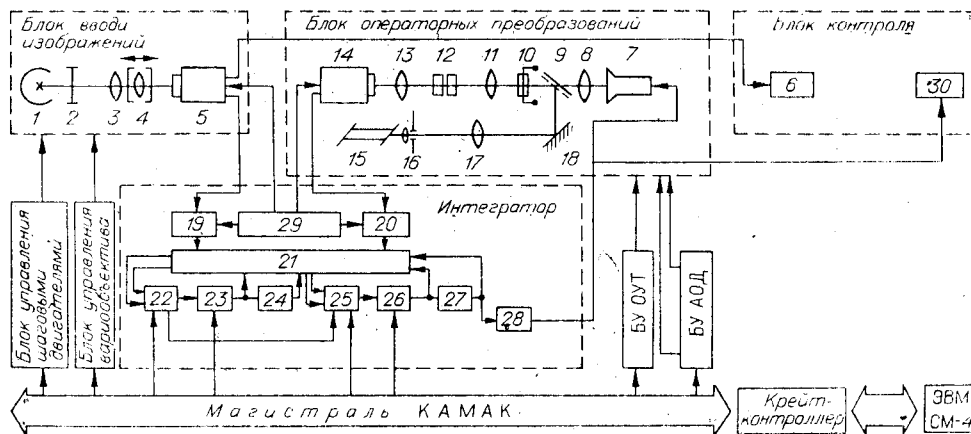


Рис. 1. Структурная схема системы:

БУ ОУТ — блок управления оптически управляемого транспаранта, БУ АОД — блок управления акустооптического дефлектора.

мирование аппаратной функции искажающей системы $h(x, y)$ и свертка ее с текущим изображением $S_n(x, y): h(x, y) \otimes S_n(x, y)$. Блок контроля служит для отображения результата каждой итерации $S_{n+1}(x, y)$ и обеспечивает возможность интерактивного режима работы системы: оператор анализирует результат каждой итерации и имеет возможность остановить процесс обработки на любой стадии.

Блок ввода изображений содержит осветитель на базе фотометрического шара 1, стол с двухкоординатным перемещением кассеты с носителем обрабатываемого изображения 2, систему объективов 3 и 4 для проецирования изображения в плоскость входного окна передающей телевизионной камеры КТП-63 5. Наличие стола с двухкоординатным перемещением обеспечивает возможность фрагментирования изображения при вводе. Использование вариообъектива 4 позволяет масштабировать входную информацию.

Блок операторных преобразований содержит приемную телевизионную трубку 7 на базе электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) 17ЛК2А, проекционный объектив 8, дихроичное зеркало 9, управляемый транспарант 10 на основе структуры «фотопроводник — жидкий кристалл» [10], объективы 11 и 13, образующие телескопическую систему, в совместной фокальной плоскости которых расположен двухкоординатный акустооптический дефлектор 12. Задняя фокальная плоскость объектива 13 совмещена с плоскостью входного окна передающей телевизионной трубки 14. Считывание изображения, записанного на управляемый транспарант 10 с экрана электронно-лучевой трубки 7, осуществляется коллимированным пучком He—Ne-лазера 15, сформированным посредством микрообъектива с точечной диафрагмой 16, объектива коллиматора 17 и проекционного зеркала 18.

В состав интегратора входят аналого-цифровые преобразователи 19, 20, мультиплексор 21, арифметико-логические устройства (АЛУ) 22, 25, табличные преобразователи интенсивности (ТПИ) 23, 26, телевизионные кадровые ЗУ 24, 27 форматом $512 \times 512 \times 8$ бит, цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) 28, синхронизатор 29. Аналого-цифровые преобразователи 19 и 20 обеспечивают преобразование видеосигналов в 8-разрядный двоичный код. С выходов аналого-цифровых преобразователей 19 и 20 данные поступают на мультиплексор 21, который осуществляет программно-управляемое подключение входов арифметико-логических устройств 22 и 25 ко всем выходам источников видеоданных (выходы АЛУ и ТПИ, выходы телевизионных ЗУ). Цифровой мультиплексор управляется от ЭВМ и осуществляет динамическую функциональную перестройку конфигурации и параметров системы в соответствии с выбором алгоритма функционирования системы.

Телевизионные кадровые ЗУ 24 и 27 предназначены для хранения в цифровом виде значений дискретизированных изображений фрагментов снимков.

АЛУ 22, 25 выполняют поточечную обработку изображений в реальном масштабе времени.

Устройство ТПИ позволяет управлять видеоданными, корректировать искажения видеосигнала, усиливать и подавлять отдельные области диапазона яркости изображения, уменьшать градации яркости.

Цифроаналоговый преобразователь 28 служит для получения видеосигнала с целью визуализации изображений, содержащихся в телевизионных ЗУ 24 и 27 или поступающих через мультиплексор из АЦП 19, 20.

Вся электронная аппаратура управления и обработки, за исключением стандартных приборов, выполнена в стандарте КАМАК. Управление осуществляется программно посредством ЭВМ СМ-4 через крейт-контроллер СМ-4.

Система функционирует следующим образом. Фотоснимок, подлежащий анализу и обработке, размещается в кассете на каретке стола 2. Изображение снимка посредством проекционных объективов 3 и 4 пере-

видеоконтрольного устройства 6. Одновременно изображение фрагмента поступает в интегратор, где оцифровывается с помощью первого аналого-цифрового преобразователя 19; цифровой массив $f(x, y)$ записывается в первое запоминающее устройство 24. Содержимое первого запоминающего устройства 24 постоянно на каждой итерации. Затем осуществляется пересылка цифрового массива, соответствующего исходному изображению $f(x, y)$, во второе запоминающее устройство 27, последующее цифроаналоговое преобразование и отображение $f(x, y)$ на экране электронно-лучевой трубки 7, являющейся входом блока операторных преобразований. Изображение с экрана электронно-лучевой трубки 7 проекционным объективом 8 переносится в плоскость фоточувствительного слоя управляемого транспаранта 10, которая совпадает с входной плоскостью оптического коррелятора. Изображение, записанное на управляемый транспарант 10, считывается коллимированным пучком лазера 15 и вводится в коррелятор, основанный на параллельно-последовательном принципе вычисления взаимно-корреляционной функции 11. Программно от управляющей ЭВМ на блок управления акустооптического дефлектора 12 поступают коды аппаратной функции искажающей системы $h(x, y)$. В соответствии с этими кодами акустооптические ячейки отклоняют изображение $f(x, y)$ и в выходной плоскости оптического коррелятора (плоскость фотокатода телевизионной передающей камеры 14) накашивается световое распределение, соответствующее свертке $f(x, y) \otimes h(x, y)$. На время работы акустооптического дефлектора 12 в телевизионной передающей камере 14 по команде от ЭВМ выключается сканирование электронного пучка. При этом на мишени видикона происходит временное накопление светового распределения, соответствующего двумерной свертке. После того как свертка сформирована, по команде от ЭВМ выключается акустооптический дефлектор 12 и начинается считывание полученного распределения путем сканирования мишени видикона электронным пучком в телевизионной камере 14. По мере считывания светового распределения, соответствующего функции свертки $f(x, y) \otimes h(x, y)$, осуществляется его аналого-цифровое преобразование первым аналого-цифровым преобразователем 19, значения цифрового массива текущей свертки вычитаются из содержимого первого запоминающего устройства 24 $[f(x, y) - h(x, y) \otimes S_n(x, y)]$, при прохождении через табличный преобразователь интенсивности умножаются на постоянный коэффициент $\alpha[f(x, y) - h(x, y) \otimes S_n(x, y)]$, складываются с содержимым второго запоминающего устройства 27 и цифровой массив, соответствующий результату текущей, в данном случае первой, итерации

$$S_1(x, y) = f(x, y) + \alpha[f(x, y) - h(x, y) \otimes f(x, y)],$$

записывается во второе запоминающее устройство 27. Изображение, соответствующее результату текущей итерации, отображается на экране видеоконтрольного устройства 30 блока контроля. Далее все операции повторяются, за исключением операции пересылки цифрового массива, соответствующего исходному изображению $f(x, y)$, из первого запоминающего устройства 24 во второе 27. Оператор анализирует результат каждой итерации и по мере оптимального приближения текущего изображения $S_n(x, y)$ к неискаженному $f_0(x, y)$ останавливает итерационную процедуру. На рис. 2 приведена временная диаграмма работы системы.

В работе [12] рассмотрены прикладные вопросы реализации алгоритма ван Циттерта, в частности эффективность и сходимость алгоритма с учетом влияния шумов реальной аппаратуры, входящей в состав итеративной системы, как-то: оптико-геометрических трансформаций

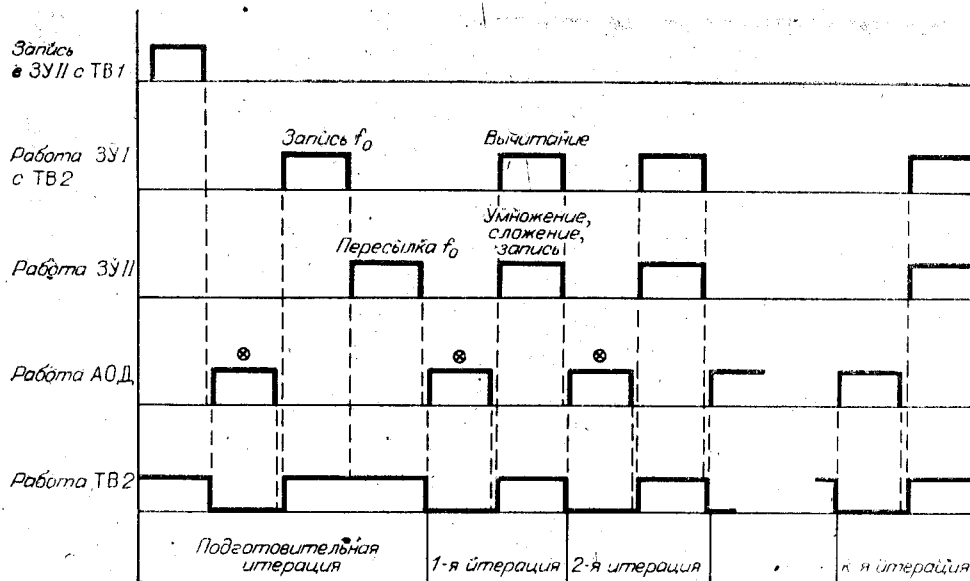


Рис. 2. Временная диаграмма работы системы.

изображения, интерференционной модуляции, дискретизации аппаратной функции, нелинейности элементов, пороговых эффектов. Разработка системы проведена на базе этих работ и с учетом содержащихся в них оценок.

На рис. 3, а, б приведены вход-выходные характеристики электронно-лучевой трубки 7 и управляемого транспаранта 10 соответственно, полученные экспериментальным путем. Из рис. 3, а видно, что электронно-лучевая трубка воспроизводит весь заданный диапазон уровней входного сигнала практически линейно; динамический диапазон выходного сигнала 10 дБ. Из рис. 3, б следует, что использованный в макете образец управляемого транспаранта на основе структуры «фотопроводник — жидкий кристалл» воспроизводит весь диапазон входного сигнала практически линейно.

Для работы видикона передающей телевизионной камеры 14 в режиме накопления необходимо, чтобы выполнялся принцип взаимозаменяемости светового потока $J_{вх}$ и времени засветки τ , т. е. его выходной сигнал $J_{вых}$ должен являться функцией произведения $J_{вх}\tau$:

$$J_{вых} = \varphi(J_{вх}\tau).$$

График функции φ , полученный экспериментальным путем, приведен на

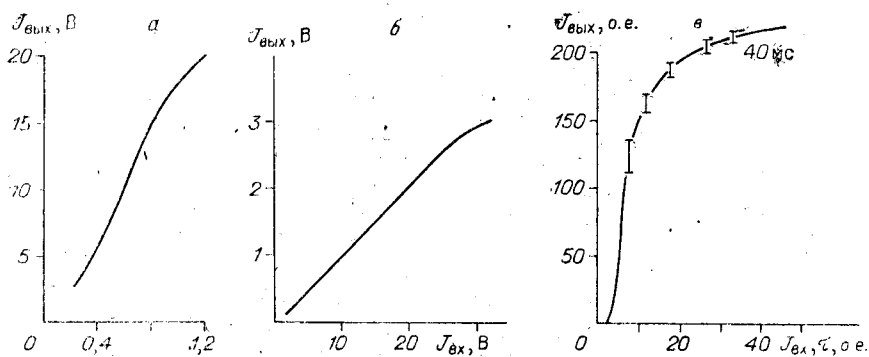


Рис. 3. Характеристики базовых элементов системы.

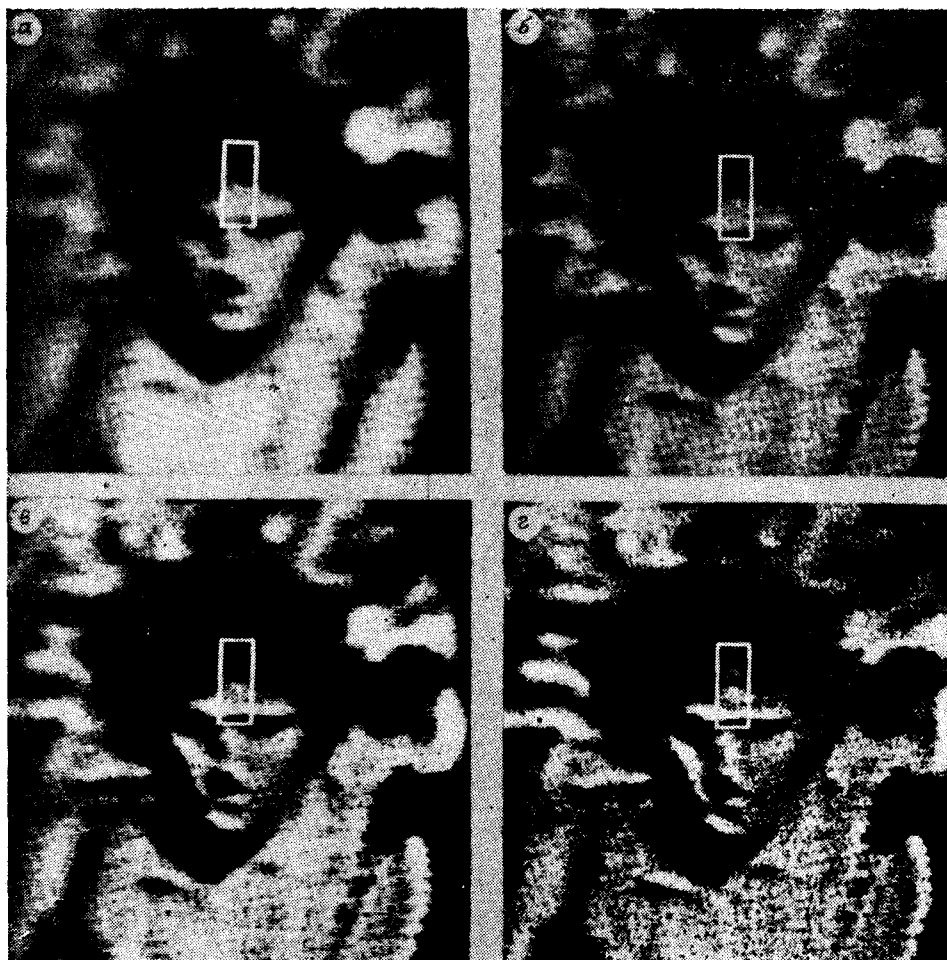


Рис. 4. Экспериментальные результаты.

рис. 3, в. Разброс значений $J_{\text{вых}}$, показанный на рис. 3, в, получен при изменении $J_{\text{вх}}$ в пределах рабочего диапазона при $J_{\text{вх}}\tau = \text{const}$. Его максимальная величина не превышает $\pm 8\%$, что свидетельствует о возможности работы видикона в режиме накопления.

Отметим, что для уменьшения интерференционных шумов в системе применяется разрушитель когерентности.

На рис. 4 приведены результаты обработки полутонового изображения на нескольких итерациях: а — результат свертки исходного изображения с девятипозиционной одномерной аппаратной функцией $h(x) = \frac{1}{L} e^{-\frac{|x|}{L}}$; б — в — результаты итерирования на первой, третьей и седьмой итерациях соответственно. Сравнение рис. 4, а, в позволяет сделать вывод об уменьшении смаза в процессе итерирования. Шум телевизионного канала, наблюдаемый на рис. 4, в, может быть уменьшен путем усреднения. Ввиду нецелесообразности усложнения работы электронно-цифровой части системы эта операция не производилась.

Основные технические характеристики системы: максимальный размер входного кадра 50×50 мм²; размерность обрабатываемого изображения 512×512 эл.; вид аппаратной функции произвольный, программируемый; режим работы интерактивный; производительность системы ~ 5 ТВ-кадр./итер.

ВЫВОДЫ

Разработана итеративная оптико-электронная система с оптической обратной связью, реализующая итерационный алгоритм восстановления изображений и управляемая от УВК СМ-4.

Экспериментальные исследования подтвердили работоспособность системы при решении задачи восстановления изображений и продемонстрировали достаточность нескольких итераций (<10) для реставрации смазанных изображений.

ЛИТЕРАТУРА

- нике.— В кн.: Оптическая обработка информации/Под ред. С. Б. Гуревича. Л.: ЛФТИ, 1979, с. 35—60.
5. Астафьев Б. А. К вопросу об оптическом итерационном методе решения обратных задач.— *Опт. и спектр.*, 1981, т. 51, вып. 3, с. 520—523.
 6. Ferraro Y., Häusler Y. TV optical feedback systems.— *Opt. Eng.*, 1980, v. 19, N 4, p. 442—451.
 7. Collins S. A. Feedback in optics.— *Opt. Eng.*, 1980, v. 19, N 4, p. 441.
 8. Ferraro Y., Maitre H. TV optical iterative picture restoration: experimental results.— *Opt. Commun.*, 1981, v. 38, p. 336.
 9. Гибин И. С., Разумова И. И., Худик В. Н. Оптико-электронная система с программным формированием аппаратной функции в цепи обратной связи.— *Автометрия*, 1986, № 2.
 10. Гудова Г. И., Котенко В. П., Михайлова Н. А., Шурман В. Л. Оптически управляемый транспарант на основе жидкого кристалла.— В кн.: IV Всесоюз. школа молодых ученых и специалистов по оптической обработке информации: Тез. докл. Минск: ЛФТИ, 1982, ч. II, с. 228—229.
 11. Гибин И. С., Разумова И. И., Тарков В. А. и др. Исследование двумерного параллельно-последовательного коррелятора изображений с интегрированием во времени.— Там же, ч. I, с. 9—10.
 12. Разумова И. И., Худик В. Н. Прикладные вопросы реализации алгоритма ван Циттерта в оптико-электронной системе с обратной связью.— В кн.: Оптическая обработка изображений/Под ред. С. Б. Гуревича. Л.: Наука, 1985, с. 56—66.

Поступила в редакцию 27 августа 1985 г.

УДК 621.391 : 681.3.01

И. С. ГИБИН, И. И. РАЗУМОВА, В. Н. ХУДИК

(Новосибирск)

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА С ПРОГРАММНЫМ ФОРМИРОВАНИЕМ АППАРАТНОЙ ФУНКЦИИ В ЦЕПИ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Использование принципа обратной связи в оптике характеризуется множеством разнообразных аспектов. Оптические устройства с обратной связью расширяют область применения оптики при обработке информации. В оптике успешно используются некоторые концепции электроники такие, как частотная фильтрация и теория информации. Внедрение другой важнейшей концепции электроники — принципа обратной связи — до недавнего времени представлялось весьма затруднительным.

Рядом авторов [1—5] разработаны и исследованы чисто оптические