

## 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

системы с обратной связью. В этих работах экспериментально проверены только пассивные системы. Основные недостатки этих систем связаны, во-первых, с сильным ослаблением светового потока после каждого цикла прохождения сигнала по цепи обратной связи, а во-вторых, с алгебраическим сложением световых пучков по интенсивности, в результате чего возникают трудности вычисления отрицательных и комплексных значений. Конечно, даже пассивные системы обладают рядом интересных возможностей (линейная фильтрация, нелинейное преобразование контраста). Но в системах с пассивной обратной связью возможна реализация только ограниченного количества передаточных функций.

Большой набор новых передаточных функций можно генерировать введением усилителей, нелинейных элементов, фазовых модуляторов либо в плоскость изображения, либо в плоскость Фурье оптической когерентной системы с обратной связью [6]. При этом необходимо выполнение ряда условий. Во-первых, источник света должен иметь длину когерентности, приблизительно в 10 раз большую длины петли. Во-вторых, потери, вносимые пространственными фильтрами и другими оптическими элементами, недопустимы, если внутри петли нет активного или усиливающего элемента для компенсации потерь. Для обеспечения работы когерентно-оптической системы с обратной связью на уровне электронных аналогов должен быть найден усилитель изображения с высоким коэффициентом усиления и низким уровнем шумов, а также быстродействующие фазовые модуляторы.

Другую большую группу систем с оптической обратной связью образуют гибридные телевизионно-оптические системы, работающие по принципу «камера, смотрящая на свой монитор» [7—9]. Телевизионно-оптические системы с обратной связью обладают новыми свойствами по сравнению с чисто электронными или чисто оптическими системами. Электронные сигналы одномерны, независимой переменной в них является «время». Оптические сигналы зависят, по меньшей мере, от двух пространственных переменных. В свою очередь, электрические сигналы могут быть знакопеременными, в то время как некогерентные оптические сигналы являются положительными величинами. Соединение электронных (телевизионных) устройств с оптическими позволяет создать гибкую систему для решения разнообразных задач, так как гибридные системы сочетают параллельность оптической обработки и гибкость электронных устройств. Однако применение гибридных систем для обработки изображений, и в частности для восстановления изображений, имеет серьезные недостатки [7].

Более широкими возможностями обладают телевизионно-оптические системы с цифровой телевизионной памятью. Сравнительно недавно была предложена такая система [10], реализующая итерационный метод восстановления изображений, который широко применяется в вычислительной технике.

Эта система работает в реальном времени и обеспечивает скоростную обработку изображений с высоким разрешением, поскольку трудоемкие операции — двумерная свертка и двумерная корреляция — выполняются в оптическом процессоре. Последним служит оптическая проецирующая система, сопрягающая экран монитора и мишень телевизионной камеры. Остальные операции выполняются цифровыми периферийными устройствами. Причем аппаратная функция, используемая в итерационном алгоритме, задается с помощью заранее изготовленной маски. Основное преимущество такой гибридной оптико-цифровой системы состоит в том, что итерационное восстановление изображений осуществляется за короткое время по сравнению с временем обработки в чисто цифровой системе. Недостатком этой и подобных ей систем является отсутствие гибкости формирования аппаратной функции, быстрой замены ее, внесения в нее поправок или подбора в случае отсутствия априорного знания.

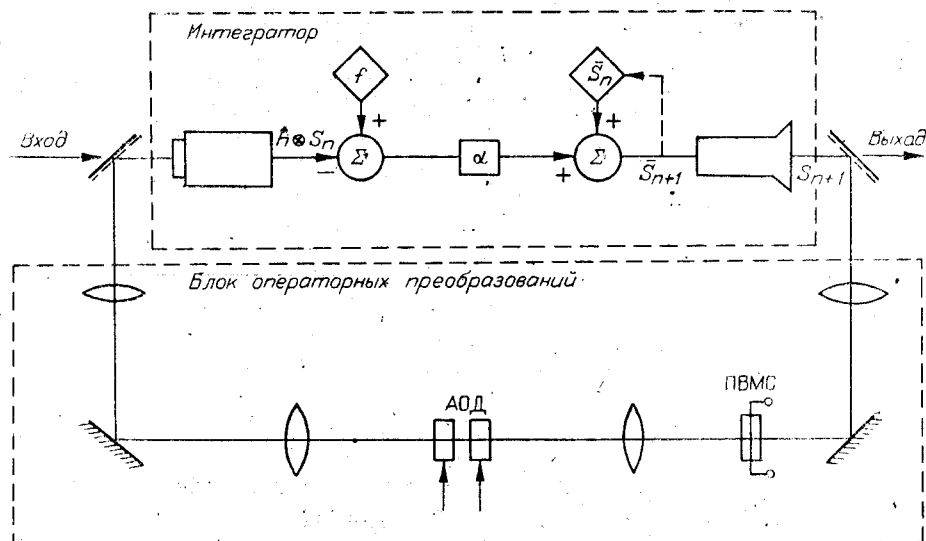


Рис. 1. Блок-схема системы.

В данной работе предлагается телевизионно-оптическая система с обратной связью, предназначенная для восстановления изображений методом десвертки на основе итерационного алгоритма. В системе аппаратная функция формируется программным путем и одновременно параллельно-последовательным способом [11] вычисляется свертка аппаратной функции с обрабатываемым изображением. В основу работы системы положен алгоритм ван Циттерта:

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

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

Здесь  $f(x, y)$  — обрабатываемое изображение;  $S_n(x, y)$  — изображение на  $n$ -й итерации;  $h(x, y)$  — аппаратная функция;  $\otimes$  — операция свертки.

Блок-схема предлагаемой системы приведена на рис. 1 и содержит интегратор и блок операторных преобразований. В состав интегратора входят телевизионные передающая (на основе видикона) и приемная трубки в качестве входного и выходного элементов, а также телевизионная цифровая память и электронные устройства, позволяющие осуществлять арифметические операции. Блок операторных преобразований представляет собой оптический коррелятор, в частотной плоскости которого имеется двухкоординатный акустооптический дефлектор, а во входной плоскости — пространственно-временной модулятор света. Узловым моментом в функционировании системы являются формирование аппаратной функции акустооптическим дефлектором и вычисление свертки параллельно-последовательным способом [11], который применительно к предлагаемой системе сводится к следующему. Двухкоординатный акустооптический дефлектор последовательно отклоняет световой пучок, а вместе с ним изображение  $S(x, y)$  в ряд позиций  $(x_i, y_j)$ , образующих квадратную матрицу  $(i, j = 1, \dots, N)$  с постоянным шагом дискретизации  $d = x_i - x_{i-1} = y_j - y_{j-1}$ . Время экспонирования  $\tau_{i,j}$  в каждой позиции пропорционально значению аппаратной функции  $h(x, y)$  в точке  $(x_i, y_j)$ . Накопление сигнала в данной системе осуществляется видиконом (работа его в этом режиме рассмотрена в [12]). Реализуемая аппаратная функция  $h_{\text{АОД}}(x, y)$  в общем случае не совпадает с реальной аппаратной функцией  $h(x, y)$ :

$$h_{\text{АОД}}(x, y) = \sum_{i,j=1}^N \tau_{i,j} \delta(x - x_i) \delta(y - y_j),$$

$$\tau_{ij} = h(x_i, y_j) d^2.$$

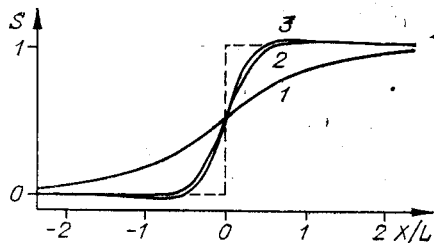


Рис. 2. Восстановление сигнала дискретной аппаратной функцией (ДФ):

кривая 1 — размытая «ступенька», кривая 2 — результат восстановления за 10 итераций дискретной ДФ (число дискрет  $N=13$ ), кривая 3 — результат восстановления за 10 итераций непрерывной ДФ.

Свертка функции  $h_{\text{АОД}}(x, y)$  с изображением  $S(x, y)$

$$\begin{aligned} K_{\text{АОД}}(x, y) &= \int h_{\text{АОД}}(x', y') S(x - x', y - y') dx' dy' = \\ &= \sum_{i,j=1}^N h(x_i, y_j) S(x - x_i, y - y_j) d^2 \end{aligned}$$

при достаточно малом шаге дискретизации  $d$  близка к свертке реальной аппаратной функции  $h(x, y)$  с тем же изображением

$$K(x, y) = \int h(x', y') S(x - x', y - y') dx' dy'.$$

Замена непрерывной функции  $h(x, y)$  дискретной  $h_{\text{АОД}}(x, y)$  ограничивает полосу восстанавливаемых в изображении алгоритмом 1 пространственных частот величиной  $\pi/d$ . На рис. 2 в качестве примера сравнивается восстановление «ступеньки», размытой аппаратной функцией

$h(x) = \frac{1}{2L} e^{-\frac{|x|}{L}}$ , с помощью непрерывной аппаратной функции (кривая 3) и дискретной (кривая 2) с шагом дискретизации  $d = 0,5L$  (кривые получены путем расчетов на ЭВМ). Выбор «ступеньки» обусловлен тем, что восстановление границ объектов — наиболее распространенная задача в оптике. Видно, что даже при таком большом шаге дискретизации результаты восстановления за 10 итераций мало отличаются друг от друга.

Заметим, что параллельно-последовательный способ вычисления свертки применим только для положительных аппаратных функций. В случае знакопеременной аппаратной функции процедура вычисления свертки разбивается на два такта: в первом такте вычисляется свертка с положительной частью аппаратной функции, во втором — с отрицательной.

Важный вопрос при практической реализации системы согласно блок-схеме рис. 1 — учет влияния ряда систематических искажающих воздействий, вносимых базовыми элементами системы. При наличии искажений алгоритм ван Циттерта с некоторым упрощением может быть записан в виде

$$\begin{aligned} \bar{S}_0 &= C_v f; S_0 = C_l \bar{S}_0; \\ \bar{S}_{n+1} &= C_p [\bar{S}_n + \alpha (C_v f - C_v h_{\text{АОД}} \otimes C_g C_m S_n)]; \\ S_{n+1} &= C_l \bar{S}_{n+1}, n = 0, 1, \dots, \end{aligned}$$

где  $\bar{S}_n$  — оцифрованное изображение;  $S_n$  — изображение, высвечиваемое на экране электронно-лучевой трубки (ЭЛТ). Операторы  $C_v$ ,  $C_l$  учитывают нелинейные характеристики соответственно видикона и ЭЛТ, оператор  $C_p$  — пороговые ограничения электронно-цифровой части системы;  $C_g$  — оператор проекционного сдвига и расфокусировки,  $C_m$  — интерференционной модуляции.

Влияние этих искажающих факторов на восстановление изображений алгоритмом ван Циттерта исследовано в [13]. Перечислим результаты этих работ.

Воздействие оператора  $C_v$  сводится к нелинейному искажению сигнала  $S: C_v S = \varphi_v(S)$ , где  $\varphi_v$  — нелинейная характеристика видикона в ре-

жине накопления. Аналогично  $C_i S = \varphi_i(S)$  ( $\varphi_i$  — нелинейная характеристика ЭЛТ). Нелинейные искажения, вносимые видиконом (или ЭЛТ), приводят к неравномерности восстановления по полю изображения, не влияя на предельное изображение, определяемое алгоритмом ван Циттерта. Восстановление деталей изображения происходит за большее число итераций на участках с теми значениями интенсивности, где нелинейная характеристика видикона имеет меньший наклон. В случае когда эта характеристика близка к линейной, ее конкретный вид слабо влияет на процесс восстановления.

Оператор  $C_p$  пороговых ограничений для диапазона электронно-цифровой части системы (0, 1) равен

$$C_p S = \begin{cases} 0, & S < 0; \\ S, & 0 \leq S \leq 1; \\ 1, & S > 1. \end{cases}$$

Пороговые ограничения, вносимые электронно-цифровой частью системы, повышают устойчивость и скорость сходимости алгоритма ван Циттерта, если интенсивность восстанавливаемого изображения находится вблизи пороговых значений рабочего диапазона системы (но не выходит за пределы этого диапазона), и не влияют на процесс восстановления в противном случае.

Наличие в цепи обратной связи проекционных оптических элементов приводит к возникновению проекционного сдвига и расфокусировки. Действие оператора  $C_g$ , например, при проекционном сдвиге величиной  $d$  в направлении  $x$  определяется формулой  $C_g S(x, y) = S(x - d, y)$ . Полоса восстанавливаемых в изображении алгоритмом ван Циттерта частот ограничивается величиной  $\pi/d$ . Такая же оценка имеет место и при расфокусировке (в этом случае  $d$  — характерный размер расфокусировки).

Использование когерентного света в цепи обратной связи системы приводит к появлению систематической интерференционной модуляции поля изображения. Воздействие оператора  $C_m$  сводится к умножению сигнала  $S(x, y)$  на искажающую функцию  $\varphi_m(x, y)$ , а искажения, вносимые интерференционной модуляцией в процессе восстановления, не превышают величины  $\max_{x,y} |1 - \varphi_m(x, y)|$ .

Подробное описание итеративной оптико-электронной системы с оптической обратной связью приведено в [12]. Разработка этой системы проводилась с учетом влияния систематических искажающих воздействий, рассмотренных в данной работе.

#### ВЫВОДЫ

Предложена телевизионно-оптическая система с обратной связью, предназначенная для восстановления изображений. Применение параллельно-последовательного метода для вычисления свертки делает систему функционально гибкой и позволяет формировать различные аппаратные функции программно в реальном времени. Рассмотрены вопросы, связанные с работоспособностью итерационного алгоритма при практической реализации системы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Нежевенко Е. С., Спектор Б. И. Оптическое нелинейное преобразование изображений. — Автометрия, 1975, № 3, с. 98.
2. Нежевенко Е. С., Спектор Б. И. Аффинные преобразования изображений в оптических системах с обратной связью. — Автометрия, 1976, № 6.
3. Астафьев Б. А. Использование оптической обратной связи для обработки изображений и решение интегральных уравнений. — В кн.: Оптическая обработка информации/Под ред. С. Б. Гуревича. Л.: ЛФТИ, 1979, с. 138.
4. Ауслендер А. Л. и др. Решение неоднородных линейных интегральных уравнений второго рода в оптическом процессоре. — Там же, с. 107.

5. Соколов В. К., Малый А. Ф. Когерентные оптические системы с обратными связями для обработки изображений.— Там же, с. 116.
6. Нежевенко Е. С. Новый подход к оптической аналоговой вычислительной технике.— Там же, с. 35—60.
7. Ferraro J., Häusler J. TV optical feedback systems.— Opt. Eng., 1980, v. 19, N 4, p. 442—451.
8. Collins S. A. Feedback in optics.— Opt. Eng., 1980, v. 19, N 4, p. 441.
9. Гаврилов Г. А. и др. Оптико-телевизионный процессор с инерционной обратной связью.— В кн.: Оптические и оптико-электронные методы обработки изображений и сигналов/Под ред. С. Б. Гуревича, В. К. Соколова. Л.: ЛФТИ, 1982, с. 77.
10. Matsuoka K. et al. Iterative image restoration by means of optical-digital hybrid system.— Appl. Opt., 1982, v. 21, N 24, p. 4493.
11. Гибин И. С., Разумова И. И., Тарков В. А. и др. Исследование двумерного параллельно-последовательного коррелятора изображений с интегрированием во времени.— В кн.: IV Всесоюз. школа молодых ученых и специалистов по оптической обработке информации: Тез. докл. Минск; ЛФТИ, 1982, ч. 1, с. 9—10.
12. Афанасьева О. А., Борзов С. М., Гибин И. С. и др. Восстановление изображений в итеративной оптико-электронной системе с обратной связью.— Автометрия, 1986, № 2.
13. Разумова И. И., Худик В. П. 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 537.226.4 : 539.12.043

Г. Ж. ГРИНВАЛДС, С. С. ДИНДУН, А. Н. РУБУЛИС,  
А. А. СПРОГИС, У. А. УЛМАНИС,  
Л. А. ШЕБАЛОВ, А. Р. ШТЕРНБЕРГ  
(Рига)

## ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ НА СВОЙСТВА ПРОЗРАЧНЫХ СЕГНЕТОКЕРАМИК ЦТСЛ И СНС

**Введение.** Благодаря технологичности и доступности исходного сырья, полифункциональности, а также коррозионной и радиационной устойчивости керамика считается перспективным материалом для решения ряда научно-технических проблем. Уникальные электрооптические и фотоэлектрические свойства прозрачной сегнетокерамики (ПСК) уже находят применение в ряде твердотельных оптоэлектронных устройств, в том числе при создании быстродействующих модуляторов света, свето- и термозащитных фильтров, электрически управляемых цветных фильтров, пространственно-временных модуляторов света и дисплеев, оптоэлектронных измерителей напряжения (см., например, [1, 2]).

Одним из методов исследования и изменения параметров вещества является его радиационная обработка. Создаваемые радиацией дефекты могут путем влияния на электронную подсистему объекта изменить стабильность решетки и взаимодействовать с дефектами, уже существующими в исследуемом материале до облучения. Последнее свойство наиболее вероятно у сегнетоэлектриков с неупорядоченной структурой (в сегнетоэлектриках с размытым фазовым переходом). Классический модельный материал подобных сегнетоэлектриков — магнелинит свинца (PMN), а также прозрачная сегнетокерамика ЦТСЛ (цирконат — титанат свинца, модифицированный лантаном), являющаяся объектом настоящего исследования. Сильнодефектная структура ЦТСЛ (вакансии в подрешетках А и В перовскитовой структуры с концентрацией порядка  $10^{21} \text{ см}^{-3}$ , кислородные вакансии, возможность внедрения ионов лантана в подрешетку В) предопределяет существование локальных диполей при