

системе. Меняя оператор в замкнутой части системы, можно получать, кроме описанных, самые различные последовательности преобразований: растяжение или сжатие по одной координате, разложение изображений по моментам другого изображения, сдвиг изображения с субсветовой скоростью и т. д.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. J. R. Ullmann. A review of optical pattern recognition techniques.—“Opto-electronics”, 1974, vol. 6, № 5, p. 319—332.
2. Е. С. Нежевенко, Б. И. Спектор. Оптическое нелинейное преобразование изображений.—«Автометрия», № 3, 1975, с. 98—103.
3. С. А. Раскутин. Многоходовые оптические линии задержки. М., Изд. Ин-та ТМ и ВТ АН СССР, 1967.
4. O. E. Delange. Losses suffered by coherent light redirected and refocused many times in an enclosed medium.—“The Bell Syst. Techn. J.”, 1965, vol. XLIV, № 2, p. 283—302.

*Поступила в редакцию 15 июня 1976 г.*

УДК 535.317.2

**Н. А. БУХАРИН, В. А. ГРИГОРЬЕВ, Н. А. ЕСЕПКИНА,  
С. В. ПРУСС-ЖУКОВСКИЙ, С. А. РОГОВ**

*(Ленинград)*

### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОКАНАЛЬНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ МОДУЛЯТОРОВ В СИСТЕМАХ ОПТИЧЕСКОЙ СОГЛАСОВАННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ**

Для решения различных задач распознавания образов, корреляционной обработки сигналов, создания запоминающих устройств и других широко используется метод оптической согласованной фильтрации. Реализация оптических систем, использующих принципы согласованной фильтрации, требует изготовления специальных фильтров, функция пропускания которых (передаточная функция) равна комплексно-сопряженному спектру входного сигнала. Как правило, такие фильтры изготавливаются голографическим способом [1, 2].

1. В оптических системах, в которых согласованная фильтрация должна проводиться в реальном масштабе времени, в качестве устройства ввода сигналов можно использовать акустооптические модуляторы света. В этом случае информация о входном сигнале содержится в отклоненном ультразвуковой волной свете, т. е. в дифракционном порядке [3].

При использовании для модуляции света бегущей ультразвуковой волны частота дифрагированного света отличается от частоты света, падающего на модулятор, на величину, равную частоте входного сигнала [3]. Так как устойчивую интерференционную картину дают световые колебания одинаковой частоты, то для формирования опорного луча при записи голограммы необходимо использовать дифракционный порядок одного из каналов ультразвукового модулятора света (если в системе используется многоканальный модулятор) или дифракционный порядок от специального модулятора [4—6]. Второй способ компенсации сдвига частот сигнального и опорного лучей является более выгодным, так как для формирования опорного луча можно использовать более эффектив-

ные одноканальные брэгговские модуляторы, что облегчает запись голограммы в линейном режиме.

Экспериментальное исследование акустооптического устройства, осуществляющего согласованную фильтрацию, проводилось нами применительно к задаче коррекции фазовых ошибок в раскрыве зеркальной антенны. Однако полученные результаты, касающиеся изготовления согласованных фильтров с помощью многоканальных ультразвуковых модуляторов, могут быть использованы и в других оптических системах с согласованной фильтрацией, в частности, при распознавании образов, создании голографической памяти и т. д.

Необходимость коррекции фазовых ошибок возникает при создании остронаправленных зеркальных антенн. Трудности изготовления таких антенн с заданной степенью точности приводят к тому, что не удается осуществить достаточно хорошей фокусировки. Поэтому в фокальной плоскости приходится располагать не один приемник, а решетку приемных рупоров, размеры которой определяются размерами фокального пятна. Сигналы этой решетки можно обрабатывать в акустооптическом устройстве, осуществляющем согласованную фильтрацию. Такой способ обработки был предложен Л. Д. Бахрахом и другими [5—7]. Работа устройства коррекции фазовых искажений сводится к моделированию в оптической системе светового распределения, аналогичного распределению электромагнитного поля на раскрыве зеркальной антенны. С помощью согласованного фильтра корректируются фазовые ошибки этого распределения, связанные с неточностью изготовления антенны, и на выходе устройства формируется исправленная диаграмма направленности зеркальной антенны.

2. Пусть распределение электромагнитного поля в раскрыве зеркальной антенны имеет вид

$$G(u) = P_a(u) e^{j\varphi(u)},$$

где

$$P_a(u) = \begin{cases} 1, & |u| \leq a/2; \\ 0, & |u| > a/2; \end{cases}$$

$u$  — координата в плоскости раскрыва антенны,  $a$  — размер антенны по координате  $u$ ,  $\varphi(u)$  характеризует фазовые ошибки в раскрыве антенны.

Распределение поля в фокальной плоскости является Фурье-преобразованием от распределения поля на раскрыве:

$$\Phi(v) = \int_{-\infty}^{\infty} P_a(u) e^{j\varphi(u)} e^{-j2\pi uv} du,$$

где  $v = \xi/\lambda_p f$ ,  $\xi$  — координата в фокальной плоскости,  $\lambda_p$  — длина радиоволны,  $f$  — фокусное расстояние антенны.

В фокальной плоскости зеркала располагается решетка приемных рупоров с шагом  $H = \lambda_p f/a$ , сигналы с элементов которой поступают в каналы многоканального модулятора света (рис. 1).

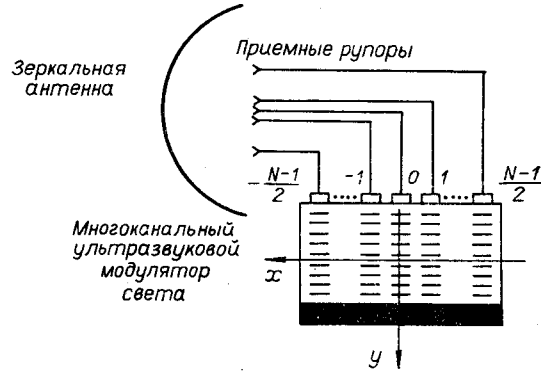


Рис. 1.

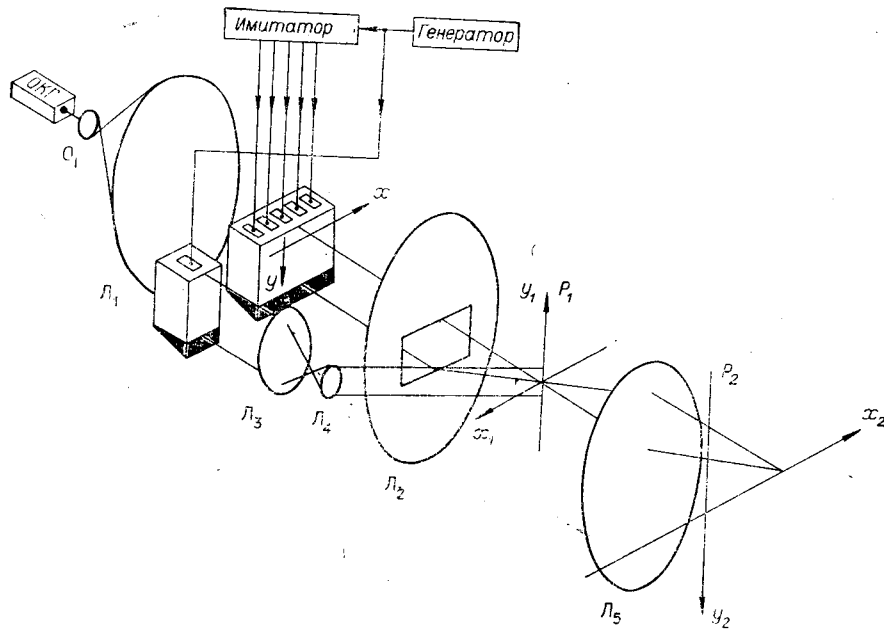


Рис. 2.

Функция прозрачности модулятора для  $+1$ -го дифракционного порядка запишется в виде [8]

$$T(x, y) = j\Psi \sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} P_D(y) P_W(x - nl) A_n(x/la) e^{j\left[\Omega\left(t - \frac{y}{S}\right) + \alpha_n\left(\frac{x}{la}\right)\right]}, \quad (1)$$

где  $\Psi$  — индекс модуляции света ультразвуковыми волнами;  $N$  — число каналов модулятора света, равное числу приемных рупоров;

$$P_D(y) = \begin{cases} 1, & |y| \leq D/2; \\ 0, & |y| > D/2; \end{cases} \quad P_W(x - nl) = \begin{cases} 1, & |x - nl| \leq W/2; \\ 0, & |x - nl| > W/2; \end{cases}$$

$D$  — размер модулятора по оси  $y$ ;  $W$  — ширина одного канала модулятора;  $l$  — шаг, с которым расположены каналы модулятора по оси  $x$ ;  $A_n$  и  $\alpha_n$  — соответственно амплитуда и фаза функции  $\Phi(v)$  в точках  $v = x/la$  ( $x = nl$ ), соответствующим точкам, где расположены приемные рупоры;  $\Omega$  — частота сигнала, поступающего на ультразвуковой модулятор.

3. Схема акустооптического устройства, осуществляющего согласованную фильтрацию, представлена на рис. 2. Луч гелий-неонового лазера ЛГ-36А разводился телескопической системой линз  $O_1$  и  $L_1$  и освещал многоканальный ультразвуковой модулятор света, на пьезопреобразователи которого подавались сигналы от специального многоканального устройства, способного вырабатывать совокупность сигналов с различными фазами и амплитудами. В нашем случае это устройство имитировало сигналы приемной решетки, расположенной в фокальной плоскости зеркальной антенны. Амплитудно-фазовое распределение на входе модулятора, соответствующее распределению на выходе приемной решетки, рассчитывалось исходя из заданной фазовой ошибки на раскрытие антенны.

Согласованный фильтр записывался на фотопластинке ВРЛ, помещенной в области первого порядка дифракции в фокальной плоскости линзы  $L_2$ . Распределение света в этом дифракционном порядке опреде-

ляется Фурье-преобразованием функции прозрачности модулятора (1) и равняется

$$E \approx E_0 e^{j(\omega+\Omega)t} \frac{\Psi W D}{2\pi} \frac{\sin \frac{D}{2} \left( \frac{2\pi y_1}{\lambda f_2} - \frac{\Omega}{S} \right)}{\frac{D}{2} \left( \frac{2\pi y_1}{\lambda f_2} - \frac{\Omega}{S} \right)} P_{\lambda f_2/l}(x_1) e^{-j\varphi \left( -x_1 \frac{at}{\lambda f_2} \right)}, \quad (2)$$

где  $E_0$ ,  $\omega$ ,  $\lambda$  — амплитуда, круговая частота и длина волны света, падающего на модулятор;  $x_1$  и  $y_1$  — координаты в фокальной плоскости линзы  $L_2$ ;

$$P_{\lambda f_2/l}(x_1) = \begin{cases} 1, & |x_1| \leq \frac{f\lambda_2}{2l}; \\ 0, & |x_1| > \frac{\lambda f_2}{2l}. \end{cases}$$

Выражение (2) получено для случая, когда число элементов антенной решетки, а следовательно, и число каналов модулятора бесконечно. При небольших фазовых ошибках в антенне это приближение не накладывает серьезных ограничений, так как в этом случае почти вся энергия, принятая зеркальной антенной, концентрируется вблизи фокуса зеркала и вклад крайних элементов приемной решетки незначителен.

Множитель  $P_{\lambda f_2/l}(x_1)$  в выражении (2) появился вследствие того, что распределение света в фокальной плоскости в нашем случае было ограничено по координате  $x_1$  щелью размером  $\lambda f_2/l$  с центром в начале координат. Эта щель необходима для того, чтобы на выходе акустооптического устройства получить исправленную диаграмму направленности зеркальной антенны, а не автокорреляционную функцию входного сигнала, как это бывает в обычных системах обработки с согласованной фильтрацией.

Для формирования опорного луча в фокальной плоскости линзы  $L_2$  нами использовался дифракционный порядок крайнего канала многоканального модулятора света или дифракционный порядок специального одноканального брэгговского модулятора, выполненного на воде и имевшего дифракционную эффективность  $\sim 30\%$ . В сигнальные и опорный каналы подавались сигналы с одного генератора. При необходимости сигнальный луч ослаблялся нейтральными светофильтрами.

Формирование опорного луча осуществлялось с помощью линз  $L_3$  и  $L_4$  (см. рис. 2), расположенных софокусно. Между  $L_4$  и  $L_2$  формировалось уменьшенное изображение канала модулятора опорного пучка, а в плоскости фильтра — пространственный спектр этого изображения. Совмещение центров предметного и опорного пучков в плоскости голограммы осуществлялось за счет перемещения  $L_4$ . Уменьшение изображения канала опорного луча зависит от соотношения фокусных расстояний  $L_3$  и  $L_4$  и выбирается таким, чтобы основной лепесток распределения опорного луча перекрывал весь записываемый на фотопластинку сигнал. При этом в области, занятой сигналом, опорный пучок получается плоским и достаточно однородным. На рис. 3 показана фотография голограммы, полученной в первом дифракционном порядке многоканального ультразвукового модулятора света. На фотографии видны интерференционные полосы, образованные предметным и опорным пучками.

Коэффициент пропускания линейно-записанной голограммы пропорционален:

$$T_\phi \sim |E+R|^2 = |E|^2 + |R|^2 + ER^* + E^*R, \quad (3)$$

где  $R = R_0 e^{j(\omega+\Omega)t} e^{j \left( \frac{2\pi \sin \gamma}{\lambda} x_1 \right)}$  — опорный пучок,  $\gamma$  — угол падения опорного луча на фотопластинку,  $E$  — сигнальный пучок, определяющийся в нашем случае выражением (2).

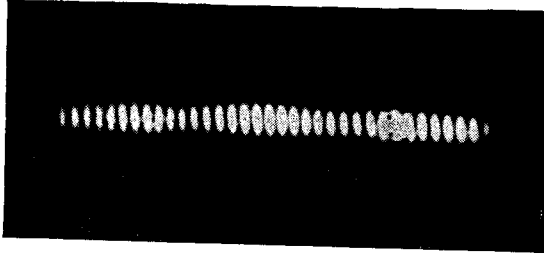


Рис. 3.

Схема записи голограммы с наклонным опорным пучком позволяет пространственно разделить выходные сигналы системы обработки, соответствующие различным членам коэффициента пропускания голограммы, и выделить необходимые нам составляющие. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать только член  $E^*R$  в выражении (3), содержащий необходимую информацию.

Если голограмму осветить снова сигнальным лучом  $E$ , то распределение светового поля непосредственно за голограммой будет пропорционально:

$$EE^*R \sim \Psi_0 e^{j(\omega+\Omega)t} P_{\lambda f_2/l}(x_1) e^{j \frac{2\pi \sin \gamma}{\lambda} x_1} \frac{\sin^2 \frac{D}{2} \left( \frac{2\pi y_1}{\lambda f_2} - \frac{\Omega}{S} \right)}{\left[ \frac{D}{2} \left( \frac{2\pi y_1}{\lambda f_2} - \frac{\Omega}{S} \right) \right]^2},$$

где  $\Psi_0$  характеризует дифракционную эффективность голограммы.

Линза  $L_5$  (см. рис. 2) выполняет преобразование Фурье распределения света в фокальной плоскости линзы  $L_2$ . Следовательно, в выходной плоскости акустооптического устройства распределение света вдоль линии  $y_2=0$  будет определяться выражением

$$E_{\text{вых}} \sim \Psi_0 e^{j(\omega+\Omega)t} \frac{\sin \frac{\pi f_2}{l} \left( \sin \gamma - \frac{x_2}{f_5} \right)}{\frac{\pi f_2}{l} \left( \sin \gamma - \frac{x_2}{f_5} \right)}. \quad (4)$$

Из полученного выражения видно, что на выходе оптической системы за счет специальным образом изготовленного согласованного фильтра формируется исправленная диаграмма направленности зеркальной антенны. Главный максимум диаграммы направленности имеет координаты  $x_2=f_5 \sin \gamma$ ,  $y_2=0$ .

Выражение (4) получено для случая использования модулятора света с нерасходящимися ультразвуковыми пучками от отдельных каналов. Аналогичное выражение можно получить и для случая использования модулятора с расходящимися ультразвуковыми лучами\*.

В экспериментах использовались модуляторы обоих типов.

4. В наших устройствах ввод информации в оптическую систему осуществлялся с помощью жидкостного и твердотельного модуляторов света. Звукопроводом жидкостного модулятора служила дистиллированная вода, пьезопреобразователи выполнялись из ниобатной керамики, каналы в модуляторе располагались с шагом 3 мм, размер одного канала составлял 2 мм. Апертура модулятора в направлении распространения ультразвука выбиралась таким образом, что ультразвуковые пучки от отдельных каналов практически не расходились и не перекрывались между собой. На рис. 4, а показано распределение ультразвука в звукопроводе модулятора при параллельном включении 16 каналов, полученное теневым методом.

Звукопровод твердотельного модулятора был изготовлен из стекла ТФ-3, пластина пьезопреобразователей из ниобата лития крепилась к звукопроводу с помощью индиевой связки, каналы в модуляторе располагались с шагом 1,5 мм, размер одного канала составлял 0,75 мм.

\* Работа модулятора с расходящимися ультразвуковыми пучками рассмотрена в [9].

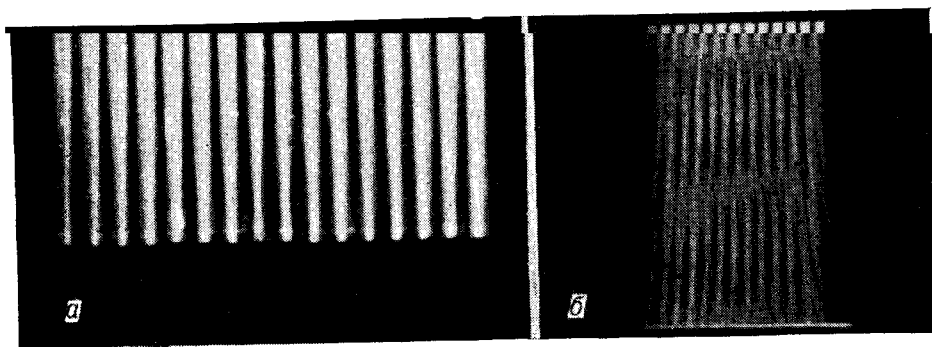


Рис. 4.

В звукопроводе этого модулятора ультразвуковые лучи от отдельных каналов существенно расходились и перекрывались, что хорошо видно на рис. 4, б, где представлено распределение ультразвука в звукопроводе модулятора при параллельном включении 12 каналов.

Центральная частота модуляторов равнялась  $\sim 30$  МГц. С помощью устройства, имитировавшего приемную решетку рупоров, запитывались 11 каналов модулятора. Схемы работали с непрерывными сигналами.

Эксперимент проводился для случая, когда фазовая ошибка на раскрыве зеркальной антенны имеет вид ступеньки со скачком, равным  $\pi$  (рис. 5).

На рис. 6, а, б показаны выходные сигналы устройства, в котором используется жидкостный модулятор света с нерасходящимися каналами. Диаграмма направленности антенны с фазовой ошибкой приведена на рис. 6, а. Сигнал в этом случае регистрировался в плоскости  $P_2$  (см. рис. 2) в нулевом дифракционном порядке голограммы. Исправленная диаграмма направленности приведена на рис. 6, б. Это распределение получено в плоскости  $P_2$  в соответствующем дифракционном порядке голограммы.

Аналогичные распределения для устройства обработки с твердотельным модулятором света с расходящимися каналами показаны на рис. 7, а, б.

Сравнение диаграмм, представленных на рис. 6, а, б и 7, а, б, показывает, что с помощью согласованного фильтра, записанного с использованием ультразвуковых модуляторов, можно корректировать фазовые ошибки зеркальных антенн.

Для контроля юстировки и качества оптического устройства в каналы модулятора подавалось распределение, соответствующее идеальной антенне. Полученные результаты хорошо совпадали с расчетными.

Следует отметить, что после проявления голографического фильтра необходимо устанавливать с высокой степенью точности.

В нашем устройстве линза  $L_2$  имела фокусное расстояние 1600 мм, и голографический фильтр необходимо было устанавливать с точностью  $\pm 5$  мкм.

Таким образом, из полученных результатов следует, что согласованную фильтрацию можно

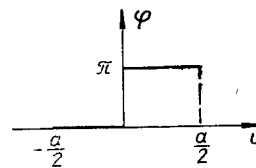


Рис. 5.

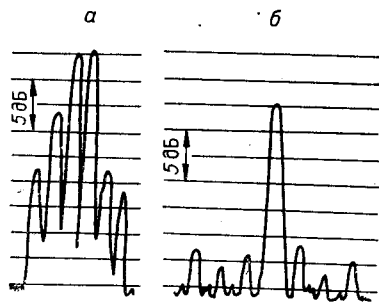


Рис. 6.

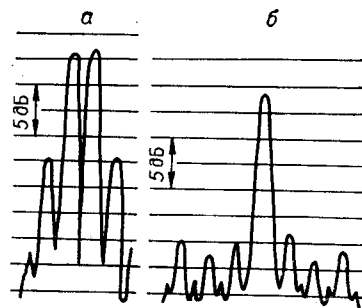


Рис. 7.

осуществлять в многоканальных акустооптических устройствах, использующих ультразвуковые модуляторы как с нерасходящимися, так и с перекрывающимися каналами. Последнее особенно существенно, когда число обрабатываемых сигналов, а следовательно, и число каналов модулятора велико.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. A. Vander Lugt. Signal detection by complex spatial filtering.— "IEEE Trans. Inform. Theory", 1964, vol. IT-10, № 2, p. 139—145.
2. Д. ж. Гудмен. Введение в Фурье-оптику. М., «Мир», 1970.
3. С. М. Рытов. Дифракция света на ультразвуковых волнах.— «Изв. АН СССР. Сер. физ.», 1937, № 2, с. 223—259.
4. M. Arnt, M. King. Holographic storage of electric signals.— "Appl. Opt.", 1969, vol. 8, № 7, p. 1413—1419.
5. Л. Д. Бахрах, В. А. Макеев. Коррекция фазовых неоднородностей в раскрыве антенн с использованием голографических согласованных фильтров.— «Радиотехника и электроника», 1973, т. XVIII, № 4, с. 741—748.
6. Л. Д. Бахрах, А. П. Курочкин, О. Б. Овезов, С. Г. Руднева, В. Б. Шверин-Кашин. Использование многоканальных модуляторов света для решения задач фокального синтеза и коррекции искажений поверхности антенны.— «Вопросы радиоэлектроники. Сер. общетехн.», 1974, вып. 6, с. 3—12.
7. Л. Д. Бахрах, О. Б. Овезов, С. Г. Руднева, В. Б. Шверин-Кашин. Коррекция антенн СВЧ- и оптического диапазонов с использованием ультразвуковых модуляторов и голографических фильтров.— II Всес. конференция по голографии. Тезисы докладов. Ч. II. Киев, Изд. Ин-та физики АН УССР, 1975.
8. Ламберт, Арм, Аймет. Электронно-оптическая обработка сигналов в фазированных антенных решетках.— «Зарубеж. радиоэлектроника», 1968, № 8, с. 3—30.
9. Е. Т. Аксенов, Н. А. Бухарин, В. А. Григорьев, С. В. Прусс-Жуковский. Многоканальный акустооптический модулятор с перекрывающимися ультразвуковыми пучками.— «Квантовая электроника», Л., 1975, № 344, с. 52—56.

Поступила в редакцию 2 февраля 1976 г.

УДК 681.327.6

И. С. ГИБИН, М. А. ГОФМАН, С. Ф. КИБИРЕВ,  
П. Е. ТВЕРДОХЛЕБ  
(Новосибирск)

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОГО ВАРИАНТА ГОЛОГРАММНОЙ ПРИЗНАКОВОЙ ПАМЯТИ

Голограммное признаковое ЗУ — составная часть ассоциативных оптических систем памяти [1]. Оно предназначено для хранения признаков массивов данных и поиска адресов этих массивов по запросу.