

Ю. В. ВОВК, В. К. САПОЖНИКОВ, Д. В. ШЕЛОПУТ,  
Ю. А. ЩЕПЕТКИН

(Новосибирск)

## ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ЗАПИСЬ ДВОИЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ С ПОМОЩЬЮ МНОГОКАНАЛЬНЫХ АКУСТООПТИЧЕСКИХ МОДУЛЯТОРОВ СВЕТА

Для оптической записи информации в реальном времени большое значение имеют управляемые модуляторы света, которые преобразуют входной электрический сигнал в оптический. Разработке управляемых модуляторов света (транспарантов) посвящено большое число работ [1—4]. Из всех этих устройств наиболее быстродействующими являются те, в которых для преобразования электрического сигнала в оптический используются многоканальные (32 и более каналов) акустооптические модуляторы света (АОМ) [2].

Цель настоящей работы — качественный анализ основных способов представления двоичной информации, позволяющих достигнуть предельной скорости регистрации с помощью АОМ, разработка и экспериментальное исследование 32-канального модулятора и устройства записи на его основе.

Если каждую двоичную единицу записываемой информации рассматривать как некоторое элементарное сообщение, то, оперируя понятиями теории связи, можно представить 3 способа разделения сообщений: временное, частотное и разделение по форме.

В первом случае записываемая информация  $A(t)$  представлена в виде последовательности не перекрывающихся во времени прямоугольных электрических импульсов, которые модулируют амплитуду напряжения несущей частоты  $f_0$  [2, 5]. Сигнал  $S(t)$  на входе АОМ может быть представлен в виде

$$S(t) = A(t) \cos(\omega_0 t + \varphi). \quad (1)$$

Этот метод известен под названием метода импульсного заполнения АОМ.

При частотном способе разделения двоичная информация представлена в виде набора синусоидальных сигналов различных частот, причём каждому двоичному разряду соответствует своя частота (многочастотное заполнение) [1, 6]. Другими словами, для записи двоичного сообщения используются сигналы с неперекрывающимися спектрами

$$S(t) = \sum_{k=1}^n A_k \cos(\omega_k t + \varphi_k), \quad (2)$$

где  $A_k$  принимает значения 0 или 1 в зависимости от значения записываемого элементарного сообщения.

Можно показать, что предельная скорость преобразования информации у обоих методов одинакова. Различаются они оптическими схемами записи. При импульсном методе запись голограммы ведется в фурье-плоскости, а при многочастотном заполнении — в плоскости изображения АОМ. Вследствие этого неодинаково влияние различного рода несовершенств оптических и электрических характеристик АОМ на качество восстановленного изображения.

Например, наличие оптических неоднородностей светозвукопровода, таких, как свили, царапины и др., в случае импульсной записи

может привести к полной потере информации в местах повреждения светозвукопровода. Такое же влияние оказывает затухание звука. При многочастотном заполнении эти погрешности вызывают ухудшение качества всего восстановленного изображения, т. е. в конечном итоге снижают лишь скорость записи информации. Совершенно противоположное влияние оказывает несовершенство амплитудной и амплитудно-частотной характеристик: в случае импульсного заполнения происходит искажение формы импульсов и снижение скорости записи, а при многочастотном заполнении возможна полная потеря информации для тех разрядов, которым соответствует провал в амплитудно-частотной характеристике.

Оценивая оба метода в целом, следует отметить, что, на первый взгляд, метод многочастотного заполнения имеет больше преимуществ. Однако практическая реализация устройства управления АОМ при многочастотном заполнении намного сложнее, чем в случае импульсной модуляции. Дело в том, что многочастотное заполнение АОМ должно начинаться одновременно всем числовым массивом формируемой страницы. Если  $N$  — число слов в массиве, а  $n$  — разрядность слова, то для формирования страницы необходимы  $n$  генераторов гармоник, буферная память объемом  $(N \times n)$  бит и  $N \times n$  коммутаторов. Другими словами, при многочастотном заполнении запоминающие свойства светозвукопровода АОМ не используются и система управления должна быть построена по мозаичному типу. Импульсное заполнение позволяет упростить устройство управления, как минимум, в  $n$  раз. При этом если скорость поступления информации извне совпадает со скоростью ввода в АОМ, то потребность в буферной памяти отпадает и устройство управления получается предельно простым.

В основе современных методов разделения сигналов по форме (или кодового разделения) лежит получившая в последние годы широкое распространение концепция сложных сигналов [7, 8]. В отличие от обычных сигналов с базой  $B$  (где  $B$  — произведение ширины спектра на длительность сигнала), близкой к единице, в системах с разделением по форме для представления каждого двоичного разряда используются сигналы, для которых  $B \gg 1$ . Подобно методу многочастотного заполнения применяемые при кодовом разделении сложные сигналы имеют длительность  $T$ , равную максимальному времени распространения звука в апертуре светозвукопровода. Ширина спектра  $\Delta f$  сложного сигнала соответствует максимальной полосе пропускания АОМ, т. е. по спектральным характеристикам сложные сигналы подобны сигналам при импульсном заполнении АОМ. Отсюда следует значительное повышение помехоустойчивости против ряда импульсных и узкополосных помех.

Серьезные недостатки систем с разделением по форме — это высокий уровень внутрисистемных помех [8], большая сложность аппаратуры управления и необходимость оптимальной обработки (сжатия [1]) при чтении записанной информации.

В данной работе рассмотрен наиболее простой метод голографической записи с импульсным кодированием двоичной информации. Блок-схема системы управления представлена на рис. 1. Входные данные от ЭВМ «Электроника-100» поступают по каналу прямого доступа через интерфейс 1 в буферную память 2, назначение которой — согласовать высокую скорость ввода информации в АОМ с относительно медленной скоростью поступления информации от ЭВМ. Буферная память выполнена на сдвиговых регистрах. Количество регистров  $n$  соответствует числу разрядов записываемых слов. Каждый регистр имеет разрядность, равную количеству двоичных слов  $N$ , записываемых на одну голограмму. Для каждой голограммы в буферной памяти формируется новый массив.

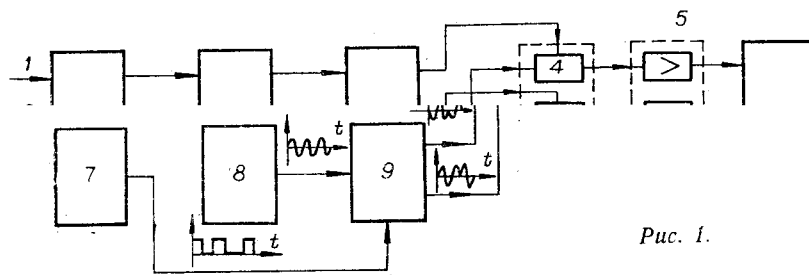


Рис. 1.

Данные из буферной памяти 2 поступают на преобразователь кода 3. Предусмотрено два вида кодирования: обычный код, когда состояние 1 или 0 представлено соответственно наличием или отсутствием импульса, и парафазный, при котором информация закодирована в положении импульса. В последнем случае суммарная интенсивность дифрагированного света не зависит от массива данных, что позволяет получать голограммы одинаковой эффективности независимо от их содержания [9].

С выхода преобразователя кода 3 сигнал через амплитудный модулятор 4 и усилитель мощности 5 поступает на акустооптический модулятор 6. Блоки 7—9 предназначены для формирования высокочастотной (62,5 МГц) фазоманипулированной несущей. Этот сигнал подается на один из входов амплитудного модулятора 4. Действие фазоманипулированной несущей аналогично действию маски случайной фазы [10].

Псевдослучайный закон изменения фазы задается генератором двоичной последовательности Хаффмена (блок 7). Напряжение этого генератора подается на вход фазового модулятора 9 и переключает фазу высокочастотного напряжения (генератор 8) так, что состоянию 0 соответствует фаза  $\pi$ , а состоянию 1 — фаза 0.

Одним из основных элементов установки, предназначенной для оперативной записи голограмм, является 32-канальный акустооптический модулятор света (рис. 2). Важнейшие параметры устройства (скорость записи, количество записываемых в одной голограмме слов, энергетические параметры записи) в значительной степени определяются характеристиками АОМ.

В настоящее время в качестве светозвукопроводов для многоканальных АОМ в диапазоне частот 50—100 МГц используются оксидные стекла марки ТФ и СТФ, акустооптическая добротность которых в 5—10 раз больше, чем у плавленого кварца. В разработанном нами 32-канальном АОМ светозвукопровод изготовлен из теллуридного стекла СТФ-3.

Для возбуждения наиболее эффективных в СТФ-3 продольных ультразвуковых волн применен пластинчатый пьезопреобразователь из ниобата лития ( $35^\circ Y$ -срез). Пластина имеет общую площадь  $46 \times 7$  мм<sup>2</sup> и толщину 0,060 мм. Electroды на преобразователь нанесены вакуумным напылением серебра через маску в соответствии с шириной каналов 1 мм и расстоянием между ними 0,5 мм.

Акустическая связь и крепление преобразователя к светозвукопроводу осуществлялись с помощью индиевого связывающего слоя. Для подвода высокочастотного напряжения к отдельным каналам АОМ служит прижимной контакт, изготовленный в соответствии с размерами и числом каналов.

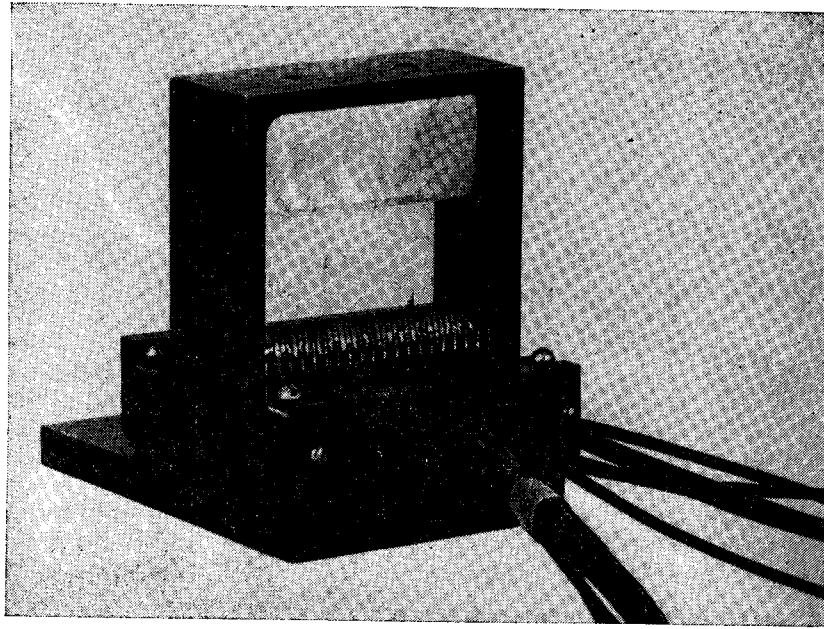


Рис. 2.

С целью устранения стоячей волны противоположная грань светозвукопровода срезана под углом  $5^\circ$  и соединена с поглотителем из дюралюминия посредством связки из эпоксидной смолы с алюминиевым наполнителем. Размеры светозвукопровода обеспечивают максимальную длительность задержки ультразвукового импульса, равную 7 мкс.

Модулятор работает в переходной области между дифракцией Рамана — Ната и областью брэгговской дифракции: параметр Брэгга  $Q = 2\pi L\lambda(n_0\Lambda^2)^{-1} = 4,4$ , где  $L = 7$  мм — размер светозвукопровода в направлении распространения света;  $\lambda = 0,63$  мкм — длина волны излучения лазера;  $n_0 = 2,16$  — коэффициент преломления света для СТФ-3;  $\Lambda = 54$  мкм — длина волны ультразвука. При напряжении на пьезопреобразователе 9 В ( $P_{вх} = 1$  Вт) дифракционная эффективность  $\eta$  достигает 30–40%. Однако при продолжительной работе модулятора в этом режиме наблюдался эффект искажения дифракционного пятна, обусловленный появлением температурных градиентов в светозвукопроводе. В реальных режимах работы, когда скважность информационных импульсов не менее двух, средняя рассеиваемая мощность снижается, как минимум, вдвое и модулятор устойчиво работает при  $\eta = 30\%$ .

Максимальная скорость ввода информации в многоканальный АОМ определяется оптико-электронной полосой пропускания  $\Delta f$  одного канала и числом каналов модулятора  $n$ . При амплитудной модуляции несущая располагается в середине полосы  $\Delta f$ , поэтому максимальная скорость преобразования информации по одному каналу имеет величину порядка  $\Delta f/2$ , а суммарная скорость ввода для многоканального АОМ —  $n\Delta f/2$ .

Согласование АОМ с устройством управления с целью расширения полосы пропускания — один из основных методов повышения скорости преобразования информации. При большом числе каналов АОМ согласование с помощью многоэлементных фильтров в каждом канале существенно усложняет устройство в целом. Более простым является расширение  $\Delta f$  путем выбора длины линии, соединяющей АОМ с устройством управления, и установки одного-двух элементов фильтра [11].

В описываемой экспериментальной установке для согласования применялись индуктивности, шунтирующие электроды пьезопреобразователей [12]:

$$L_{ш} \approx \frac{\pi^4}{(\pi^2 - 4K_{п}^2)^2 C_{пн} (1 - K_{п}^2) \omega_{п}^2},$$

где  $K_{п}$ ,  $\omega_{п}$ ,  $C_{пн}$  — соответственно коэффициент электромеханической связи материала, круговая частота полуволнового резонанса и емкость пьезопреобразователя, измеренная на низкой частоте  $f \ll f_{п} = \omega_{п}/2\pi$ . Для  $K_{п} = 0,5$  (ниобат лития),  $C_{пн} = 40 \times 10^{-12} \Phi$ ,  $f_{п} = 70 \cdot 10^6$  Гц получаем  $L_{ш} \approx 0,2$  мкГ.

Частотные характеристики оптико-электронного тракта и коэффициента стоячей волны (КСВ) в линии связи до коррекции 1 и после коррекции 2 приведены на рис. 3 и 4 соответственно. Из рис. 3 видно, что даже простейшая коррекция позволяет расширить  $\Delta f$  примерно в 2 раза.

Измерения длительности фронтов импульсов путем визуализации теневым методом движущегося изображения в АОМ показали, что длительность их по уровням  $0,1 \div 0,9$  составляет примерно  $20 \cdot 10^{-9}$  с. Это обеспечивает максимальную скорость преобразования информации по одному каналу  $\approx 10^7$  бит/с.

На рис. 5, а приведено изображение 12 каналов АОМ, полученное теневым методом (каналы включены через один). Для визуализации движущегося изображения применено импульсное освещение, длительность импульса  $\approx 20$  нс (по уровню 0,5). Скорость преобразования информации по каждому из каналов  $6 \cdot 10^6$  бит/с. Средняя электрическая мощность, подаваемая на один канал АОМ, равна  $0,25 \div 0,5$  Вт, пиковая мощность  $1 \div 2$  Вт. Дифракционная эффективность  $\eta \approx 30\%$ .

Влияние затухания на качество восстановленного изображения может быть устранено двумя путями: созданием неравномерного освещения апертуры светозвукопровода либо путем программной регулировки усиления так, чтобы амплитуда у первых вводимых в АОМ импульсов была больше, чем у последних. Результаты коррекции по второму методу показаны на рис. 5, б. Здесь приведен фрагмент записи парафазным кодом. Левый канал — пример перерегулировки, правый — оптимальной коррекции.

Ширина  $W$  одного канала АОМ выбирается из условия допустимой расходимости звукового столба

$$W \geq \sqrt{\Lambda D},$$

где  $\Lambda = V/f_0$  — длина звуковой волны в светозвукопроводе,  $D$  — максимальный размер изображения в направлении распространения звука. При скважности импульсов, равной 2, и длине их  $l$   $D = 2Nl$ , поэтому  $W \geq (2Nl\Lambda)^{1/2}$ . Далее, учитывая, что у оптимально согласованных АОМ

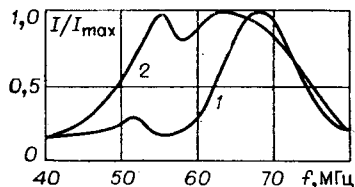


Рис. 3.

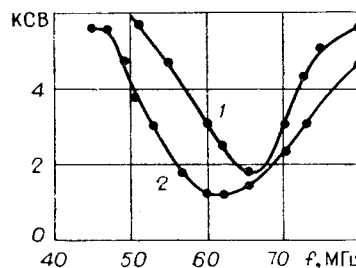


Рис. 4.

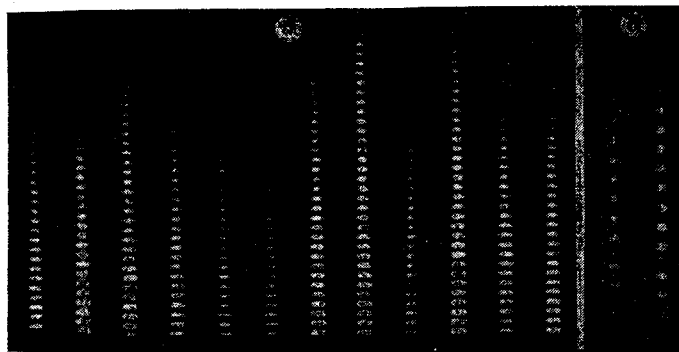


Рис. 5.

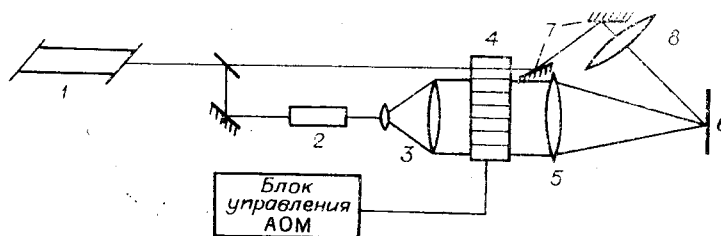


Рис. 6.

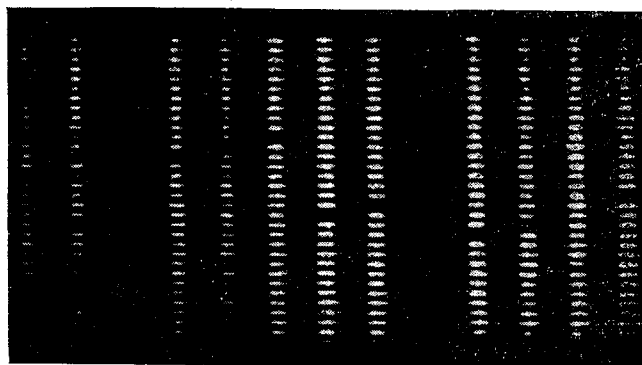


Рис. 7.

$\Delta f \approx (0,3 \div 0,5) f_0$ , скорость ввода  $F = 0,5 \Delta f = (0,15 \div 0,25) f_0$ , длина импульса  $l = V/2F$ , получим

$$W/l \geq ((0,6 \div 1,0) N)^{1/2}. \quad (3)$$

Из (3) следует, что при предельной скорости ввода ширина бита  $W$  больше его размера  $l$  вдоль направления распространения звука. Согласование такого изображения с наиболее распространенными фотоприемными устройствами, имеющими квадратную или круглую апертуру приемных элементов, возможно лишь оптическим путем на этапе записи или восстановления голограммы.

Оптическая схема установки для записи голограмм приведена на рис. 6, где 1 — He-Ne-лазер, 2 — электрооптический модулятор, 3 — коллиматор, 4 — многоканальный акустооптический модулятор (направле-

ние распространения звука перпендикулярно плоскости чертежа), 5, 8 — фурье-объективы предметного и опорного каналов, 6 — фотосреда, 7 — система зеркал для формирования опорного луча.

Для компенсации доплеровского сдвига частоты в качестве опорной используется световая волна, полученная в результате дифракции лазерного луча на ультразвуковом импульсе в одном из каналов АОМ. Длительность опорного импульса выбирается меньше или в крайнем случае равной длительности информационных импульсов [5]. Прерывание светового пучка в промежутке времени между экспозициями осуществляется только в сигнальном канале. Во время ввода информации в АОМ модулятор 2 закрыт, а в опорном канале отсутствует ультразвуковая волна. Как только в АОМ будет введен весь набор из двоичных слов, предназначенных для регистрации, модулятор 2 открывается и одновременно в опорный канал поступает ультразвуковой импульс. Таким образом, функции затвора в опорном канале выполняет АОМ. Длительность экспонирования фотосреды ( $\approx 0,6$  мкс) равна времени, в течение которого ультразвуковой импульс проходит апертуру опорного луча. Размещение электрооптического затвора в одном канале (сигнальном) позволило уменьшить общие потери света.

На рис. 7 приведено изображение 32 12-разрядных слов, восстановленных с голограммы размером  $0,2 \times 0,7$  мм и дифракционной эффективностью 5%. Фотометрическая обработка этого изображения показала, что основные параметры, наиболее существенные на этапе считывания двоичной информации, значительно изменяются от канала к каналу.

Так, например, интегральная яркость каналов и пропорциональный ей средний по каналу уровень энергии двоичной единицы изменяются в зависимости от канала не более чем в 2,5 раза, а максимальный разброс интенсивностей двоичных единиц в пределах одного канала достигает  $2,5 \div 4$  по отношению к среднему уровню.

Отношение интенсивности двоичной единицы к интенсивности двоичного нуля колеблется от 12 до 107.

### ВЫВОДЫ

1. Наиболее простым является устройство управления при импульсном заполнении АОМ.

2. Разработанный 32-канальный модулятор обеспечивает скорость преобразования информации 320 Мбит/с при средней управляющей мощности  $0,25 \div 0,5$  Вт на 1 канал и дифракционную эффективность 30%.

3. Система записи позволяет получить голограммы с дифракционной эффективностью  $4 \div 5\%$  и отношением сигнал/шум в восстановленном изображении  $\approx 10 \div 100$ .

В заключение авторы выражают благодарность И. С. Гибину и Е. Ф. Пену за ряд ценных советов, а также П. Е. Твердохлебу за постоянное внимание к работе и полезное обсуждение полученных результатов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Престон К. Когерентные оптические вычислительные машины. М., «Мир», 1974.
2. Roberts H. N., Watkins J. W., Jonson R. H. High speed holographic digital recorder.— "Appl. Opt.", 1974, vol. 13, N 4, p. 841.
3. Гарбуз Н. Г., Жаботинский В. А., Компанец И. Н., Костина Т. М., Семочкин П. Н., Соболев А. Г., Яшин Э. М. Исследование электрооптических свойств прозрачной ЦТСЛ-керамики.— «Автометрия», 1975, № 3, с. 59—67.
4. Балбашов А. М., Комлев А. А., Микаэлян А. Л., Столяров А. К., Червоненкис А. Я. Управляемые транспаранты на магнитных кристаллах.— «Квант. электроника», 1977, т. 4, № 9, с. 1933—1943.

5. Вовк Ю. В., Гибин И. С., Пен Е. Ф., Щепеткин Ю. А. Об одном способе записи голограмм с помощью акустооптического модулятора света.— «Автометрия», 1976, № 6, с. 95—97.
6. Eshler H. Multifrequency acoustooptic wave composers for holographic data storage.  
10. Вовк Ю. В., Щепеткин Ю. А. Формирование маски случайной фазы в устройстве голографической записи информации с помощью многоканального акустооптического модулятора света.— «Автометрия», 1979, № 1, с. 60—65.
11. Бухарин Н. А., Григорьев В. А., Кузнецов Н. В., Прусс-Жуковский С. В., Саенко И. И. Частотные характеристики акустооптических модуляторов.— В кн.: IV Всесоюзная конференция по физическим основам передачи информации лазерным излучением. (Тезисы докладов). Киев, 1976, с. 218.
12. Залесский В. В. Анализ и синтез пьезоэлектрических преобразователей. Ростов-на-Дону, изд. ун-та, 1971.

*Поступила в редакцию 30 января 1978 г.;  
окончательный вариант — 11 апреля 1978 г.*

УДК 621.376.52 : 535.8 : 535.241.13

**Ю. В. ВОВК, Ю. А. ЩЕПЕТКИН**

(Новосибирск)

### **ФОРМИРОВАНИЕ МАСКИ СЛУЧАЙНОЙ ФАЗЫ В УСТРОЙСТВЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ЗАПИСИ ИНФОРМАЦИИ С ПОМОЩЬЮ МНОГОКАНАЛЬНОГО АКУСТООПТИЧЕСКОГО МОДУЛЯТОРА СВЕТА**

Известно, что при голографической записи двоичной информации вследствие регулярной структуры изображения его фурье-образ имеет вид резких пиков интенсивности. Это приводит к нелинейной регистрации и, как следствие, к сильным искажениям восстановленного изображения, а также к низкой дифракционной эффективности голограммы. Обычно для получения более равномерного распределения интенсивности применяют маску случайной фазы [1, 2].

Одним из существенных достоинств транспарантов, построенных на основе акустооптических модуляторов света (АОМ), является то, что для управления ими необходим сигнал в виде амплитудно-модулированного высокочастотного напряжения. Благодаря этому появляются еще два управляемых параметра — частота и начальная фаза этого сигнала. Эффект, аналогичный действию фазовой маски, достигается, если частоту или фазу изменять так, чтобы модуль спектра в плоскостях с АОМ имел наиболее равномерный вид. В принципе в устройствах с АОМ может быть решена задача создания адаптивной фазовой маски, т. е. такой маски, которая генерируется в зависимости от массива исходных данных и обеспечивает запись голограмм с максимальной дифракционной эффективностью.

Цель настоящей работы — экспериментальное исследование наиболее простого метода генерирования фазовой маски, когда фаза высокочастотного напряжения принимает два значения: 0 или  $\pi$ .

Электрический сигнал  $S(t)$  на входе акустооптического модулятора света представлен в виде последовательности не перекрывающихся во