

С. В. БОГДАНОВ, В. Н. ВЬЮХИН, И. С. ГИБИН,
В. М. МАСТИХИН, Ю. Е. НЕСТЕРИХИН, К. М. СОБОЛЕВСКИЙ,
П. Е. ТВЕРДОХЛЕБ, Ю. Н. ТИЩЕНКО, А. В. ТРУБЕЦКОЙ,
А. Ф. ФЕДУЛОВ, Д. В. ШЕЛОПУТ

(Новосибирск)

ДВУХКООРДИНАТНЫЙ АКУСТООПТИЧЕСКИЙ ДЕФЛЕКТОР

Одним из основных структурных элементов голограммного запоминающего устройства (ГЗУ) [1] является двухкоординатный акустооптический дефлектор, обеспечивающий быстродействующее отклонение светового пучка на растре 32×32 позиции по программе от управляющей ЭВМ. Ниже рассматриваются структура, принцип действия и результаты экспериментального исследования созданного дефлектора; приводятся характеристики акустооптических ячеек*, оптической системы и электронной системы управления; кроме того, излагается методика оценки числа разрешимых позиций акустооптического дефлектора, работающего в составе ГЗУ.

В состав дефлектора входят оптическая и электронная системы (рис. 1). Оптическая система (ОС) предназначена для увеличения углов отклонения и уменьшения диаметров отклоненных световых пучков; электронная (ЭС) — для формирования по командам от ЭВМ «Э-100» электрических сигналов, частота которых пропорциональна адресам ячеек (голограмм) памяти. Остановимся на структуре этих систем и взаимодействии их элементов.

Оптическая система. В состав системы, показанной на рис. 1 в двух проекциях, входят коллиматор 1, расширяющий световой пучок лазера; скрещенные акустооптические ячейки 3 и 6, отклоняющие (при возбуждении) световой пучок в двух взаимно перпендикулярных направлениях; цилиндрические 2, 7, 8, 9 и сферический 4 объективы, формирующие узкие ортогональные пучки в светозвукопроводах ячеек и преобразующие результирующий световой пучок в параллельный, отклоняющийся из одной плоскости (плоскость P_1) по обеим координатам; слюдяная пластина 5, поворачивающая плоскость поляризации проходящей световой

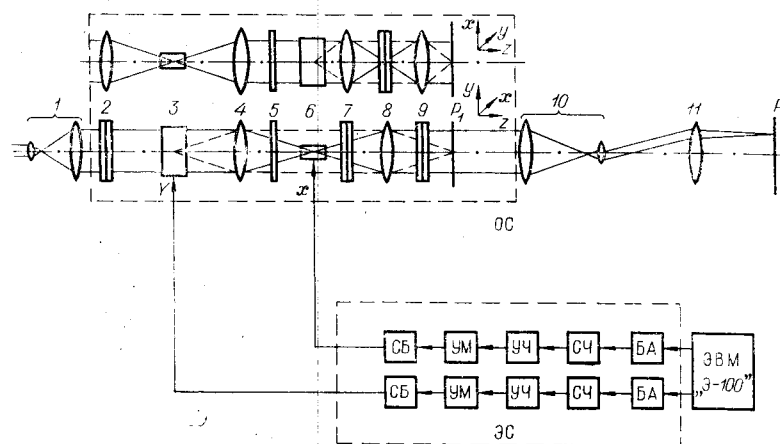


Рис. 1.

* Результаты исследований акустооптических ячеек, выполненные при создании дефлектора, частично изложены в [2].

волны на 90° ; телескоп 10 , формирующий узкие пучки на выходе дефлектора; объектив 11 , фокусирующий отклоненные пучки в плоскости P_2 .

В акустооптических ячейках применены светозвукопроводы из монокристаллов галогенида таллия (КРС-5). Ультразвуковые преобразователи изготовлены из пластин z -среза йодата лития (LiIO_3). Геометрия акустооптического тракта ячеек показана схематически на рис. 2. Ячейки имеют прямоугольную форму с

размерами светозвукопровода $T = 15$ мм и $L = 10$ мм при ширине преобразователя $h_{зв} = 2,5$ мм. Такая форма ячеек выбрана с целью обеспечения выигрыша по управляющей мощности (в сравнении с ячейкой, имеющей квадратную апертуру)* в $T/h_{зв}$ раз (здесь T — апертура ячейки, $h_{зв}$ — высота звукового столба),

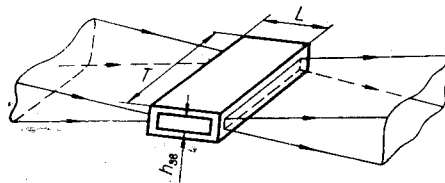


Рис. 2.

а также для упрощения технологии их изготовления. Плоскостность оптических поверхностей светозвукопровода не превышает двух интерференционных полос на длине в 1 см. Коэффициент пропускания ячеек на длине волны $\lambda = 0,63$ мкм составляет 70%. Полоса рабочих частот на уровне 50% -й дифракционной эффективности составляет 30 МГц в диапазоне $65 \div 95$ МГц. Электрическая мощность возбуждения ультразвуковых преобразователей порядка 1 Вт, управляющие напряжения в полосе рабочих частот изменяются в пределах 5,5—12В. Вопросы выбора материала светозвукопроводов и исследования их характеристик рассмотрены в [3].

Оптическая система работает следующим образом. Расширенный коллиматором 1 световой пучок лазера цилиндрическим объективом 2 преобразуется так, что в области взаимодействия света и звука ячейки 3 , отклоняющей пучок по вертикали (по оси Y), образуется узкая вертикальная полоска света. Световой пучок после ячейки 3 преобразуется сферическим объективом 4 так, что в светозвукопроводе ячейки 6 , установленной в задней фокальной области объектива 4 и отклоняющей световой пучок по горизонтали (по оси X), появляется горизонтальная световая полоса. Так как световой пучок лазера линейно поляризован, а дифракционная эффективность акустооптических ячеек на основе кристаллов КРС-5 зависит от угла поляризации падающего света, то световые пучки, проходящие через ячейки 3 и 6 , должны быть ортогонально поляризованы. Для этой цели перед ячейкой 6 установлена слюдяная пластина 5 , поворачивающая плоскость поляризации световой волны на 90° . После ячейки 6 волновой фронт цилиндрическим объективом 8 снова преобразуется в плоскую световую волну; при этом цилиндрические объективы 7 и 9 , ортогонально расположенные по отношению к объективу 8 , совмещают изображение акустооптической ячейки 6 с изображением ячейки 3 , формирующимся в задней фокальной плоскости объектива 8 **. Таким образом, оптическая система, составленная из элементов $2-9$, позволяет применять ячейки прямоугольной формы с большим отношением $T/h_{зв}$. Далее с помощью телескопа 10 происходит увеличение углов отклонения световых пучков и уменьшение их диаметров, а объектив 11 преобразует угловое смещение пучка в пространственное. Очевидно, что для обеспечения одинакового разрешения по координатам X и Y фокусные расстояния F объективов $2, 4, 8$ должны быть равны. Фокусные расстояния объективов 7 и 9 выбираются из соотношения $f = F/2$.

* В указанных ячейках достигнут шестикратный выигрыш по управляющей мощности.

** Исключение объективов 7 и 9 приводит к нарушению взаимной параллельности световых пучков на выходе дефлектора.

Особенностью рассматриваемой оптической системы является то, что отклоненный ячейкой 3 световой пучок смещается в плоскости ячейки 6 на величину $\delta = \Theta F$, где Θ — рабочий диапазон углов отклонения, обеспечиваемый ячейкой 3. В случае, когда пучок фокусируется в центре светозвукопровода, ширина пучка на поверхности ячейки 6 равна

$$d \simeq \frac{DL}{2F}, \quad (1)$$

где D — диаметр гауссова пучка на выходе коллиматора 1, L — размер светозвукопровода вдоль оптической оси.

Фокусное расстояние F необходимо выбирать так, чтобы размер $\delta + d$ светового пучка не превышал высоту звукового столба, т. е.

$$\Theta F + \frac{DL}{2F} \leq h_{зв}. \quad (2)$$

Решая неравенство (2) относительно F с учетом того, что $\Theta = \lambda \Delta f / V$, где Δf — рабочая полоса частот, а V — скорость звука в светозвукопроводе, получим ограничения сверху и снизу на фокусное расстояние:

$$D \frac{h_{зв} - A}{2\lambda\tau\Delta f} \leq F \leq D \frac{h_{зв} + A}{2\lambda\tau\Delta f}, \quad (3)$$

где $A = (h_{зв}^2 - 2\lambda L\tau\Delta f)^{1/2}$, $\tau = D/V$ (здесь τ — время прохождения ультразвуковой волны через апертуру ячейки размером $T = D$). Поскольку произведение $\tau\Delta f$ определяет количество разрешимых положений отклоненного пучка в соответствии с критерием Релея ($N' = \tau\Delta f$), то (3) можно переписать в виде

$$D \frac{h_{зв} - A}{2\lambda N'} \leq F \leq \frac{h_{зв} + A}{2\lambda N'} D. \quad (4)$$

Дополнительное ограничение, накладываемое оптической системой на параметры ячейки 6 и вытекающее из условия существования действительного решения неравенства (2), определяется соотношением

$$h_{зв} \geq \sqrt{2\lambda L N'}. \quad (5)$$

В применяемых ячейках ($N' = 220$, $L = 10$ мм) для $\lambda = 0,63 \cdot 10^{-3}$ мм требуется $h_{зв} \geq 1,2$ мм, что и выполнено. С учетом параметров светозвукопровода ($h_{зв} = 2,5$ мм, $T = 15$ мм) из (4) получим $33 \leq F \leq 300$.

В созданной оптической системе дефлектора применены объективы с $F = 230$ мм и $f = 115$ мм. Коэффициент расширения светового пучка коллиматором 1 составляет 5, а коэффициент увеличения углов отклонения пучков света телескопом 10 $d_T = 30$; фокусное расстояние объектива 11 $f_{11} = 500$ мм.

Количество разрешимых положений пучка, обеспечиваемое дефлектором, оценивалось по формуле

$$N = \frac{\Theta}{K\nu}, \quad (6)$$

где Θ — максимальный угол отклонения, а ν — угловая расходимость светового пучка после дефлектора. Коэффициент K в выражении (6) выбирается из условия обеспечения заданного отношения сигнал/фон на выбранной позиции. Остановимся на специфике выбора этого коэффициента.

Поле в выходной плоскости дефлектора можно найти в результате преобразования Фурье над амплитудным распределением светового по-

ля в плоскости отклоняющей ячейки. Полагая, что на ячейку падает световой поток с гауссовым распределением амплитуды

$$a(p) = \exp(-RP^2), \quad (7)$$

где R — коэффициент затухания гауссоиды, $P=2x/T$ — нормированная координата в плоскости ячейки, T — размер апертуры ячейки, найдем световые потоки, характеризующие сигнал S и фон Φ в выходной плоскости дефлектора:

$$S = 2C \int_0^{H/2} \left[2 \int_0^1 \exp(-RP^2) \cos UPdP \right]^2 dU; \quad (8)$$

$$\Phi = 4C \int_{-H/2}^{H/2} \left[2 \int_0^1 \exp(-RP^2) \cos(U + QH) PdP \right]^2 dU, \quad (9)$$

где C — коэффициент пропорциональности; $H=\pi aT/\lambda f$ — угловой размер считываемой голограммы; $U = \frac{2\pi}{\lambda f} x$ — пространственная частота; $Q = g/a$ — скважность голограмм в матрице, a — линейный размер голограммы, g — расстояние между центрами голограмм, f — фокусное расстояние объектива. Формула (9) учитывает световой фон на четырех соседних позициях.

На рис. 3 показан характер зависимости отношения S/Φ от параметров R и Q , полученной с помощью ЭВМ. Можно видеть, что максимальные значения S/Φ расположены в области $1 \leq R \leq 2$. При расчетах угловая расходимость пучка принималась равной $2\lambda/T$; вследствие этого $H=2\pi$ или $\alpha=2\lambda f/T$. В этом случае скважность голограмм Q равна значению коэффициента K из выражения (6).

На рис. 4 показаны зависимости S/Φ от K для случаев $R=1$ и $R=1,5$, по которым можно определить значение K по заданному отношению S/Φ и, наоборот, найти значение S/Φ , соответствующее заданной скважности голограмм $Q=K$. Например, если $S/\Phi=100$, то из рис. 4 находим, что $K=2$; если $Q=K=1,25$, то $S/\Phi \approx 80$ (для $R=1,5$). Заметим, что при $R=1$ интенсивность гауссова светового пучка затухает по краям отклоняющей ячейки в $1/e^2$ раз, а при $R=1,5$ в $1/e^3$ раз относительно максимального значения. При этом оптимальное значение K , соответствующее зоне перегиба кривой $S/\Phi(K)$ (см. рис. 4), находится в пределах $1,2 \leq K \leq 1,5$ и формула (6) принимает вид

$$N = \frac{\Theta T}{2,5\lambda} \approx 0,4\tau\Delta f. \quad (10)$$

Из (10) следует, что реальное количество разрешимых положений отклоненного пучка, определяемое по критерию отношения сигнал/фон, в 2,5 раза меньше, чем по критерию Релея*.

Электронная система. ЭС (см. рис. 1) выполнена на основе серийных синтезаторов частоты (СЧ) типа Ч6-31, которые усовершенствованы нами с целью уменьшения времени переключения частоты до 15—20 мкс на четырех старших декадах.

* Эти результаты хорошо согласуются с данными, полученными ранее Н. Г. Прохоровым и В. Н. Шахгедановым [4].

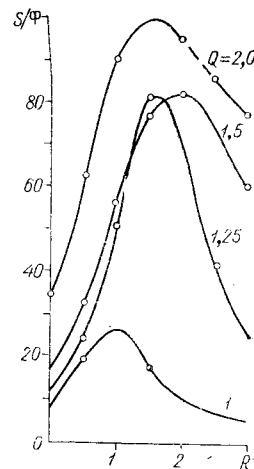


Рис. 3.

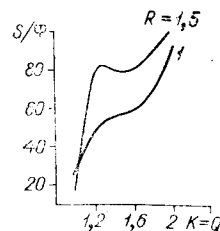


Рис. 4.

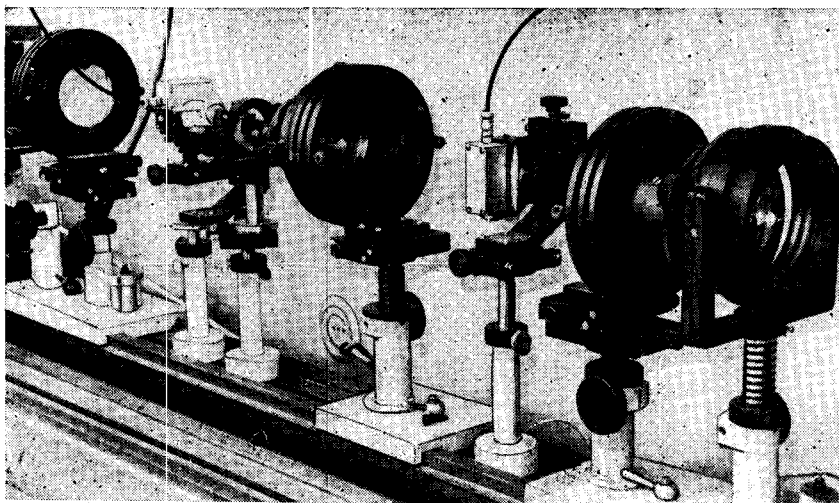


Рис. 5.

В состав системы входят также блоки автоматики (БА), в которых осуществляется прием, шифрация и преобразование команд от управляющей ЭВМ «Э-100»; удвоители частоты (УЧ), расширяющие диапазон частот синтезаторов до 100 МГц; усилители мощности (УМ), обеспечивающие усиление выходных сигналов удвоителей частот (УЧ) до 2 Вт на согласованной нагрузке в диапазоне 50—100 МГц; согласующие блоки (СБ), повышающие коэффициент бегущей волны акустооптических отклоняющих ячеек и обеспечивающие максимальную возможную полосу управляющих частот. Изменения, произведенные в синтезаторах Ч6-31, и принципиальные схемы остальных блоков ЭС описаны в [5].

Для обеспечения автономной работы дефлекторов (визуализация раstra, исследование элементов дефлектора, запись голограмм) разработано несколько управляющих программ: «Растр» (32×32, 16×16 и другие), «Линейка» (произвольно выбранная из раstra), «Точка». Программы состоят из управляющей части и массива частот. Адреса позиций дефлектора привязаны к номерам ячеек оперативного ЗУ ЭВМ «Э-100», в котором записаны коды частот. Частота смены адресов переменная — 10 кГц и ниже. Объем занимаемой памяти 1 страница, что соответствует 128 двенадцатиразрядным словам.

Режимы работы акустооптического дефлектора в составе ГЗУ изложены в [1].

Результаты экспериментов. Внешний вид созданного макета двухкоординатного акустооптического дефлектора показан на рис. 5.

С целью оценки влияния качества элементов оптики на «размытие» выходного светового пучка получено распределение интенсивности пучка в выходной плоскости дефлектора по одному из направлений отклонения. Измерение производилось с помощью ФЭУ, имеющего точечную диа-

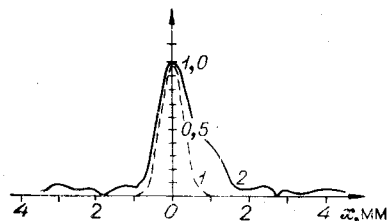


Рис. 6.

фрагму $l \approx 0,05$ мм; при этом акустооптические ячейки в оптической системе отсутствовали. Результаты измерений приведены на рис. 6 (кривая 1). Можно видеть, что диаметр выходного пучка на уровне интенсивности $1/e^2$ составляет $d = 1,1$ мм и близок к расчетному значению, полученному по формуле $d = \frac{1,27\lambda}{D} \alpha T f_{11} = 1,0$ мм, где $D \frac{T}{\sqrt{1,5}}$ — диаметр гаус-

сового пучка на апертуре ячейки, определенный на уровне $1/e^2$ при условии, что на краю ячейки интенсивность пучка затухает в $1/e^3$ раз. Аналогичные измерения проведены при наличии в оптической системе акустооптических ячеек (см. рис. 6, кривая 2). Видно, что ячейки приводят к «размытию» светового пучка (это объясняется недостаточным оптическим качеством кристаллов светозвукопроводов), которое ухудшает разрешение дефлектора.

Для оценки количества разрешимых положений дефлектора и соотношения сигнал/фон измерялся световой поток в выходном пучке. Измерение производилось при помощи ФЭУ с квадратной диафрагмой, размер которой вычислялся по формуле $d = \frac{2\lambda}{T} \alpha_T f_{11} \approx 1,3 \text{ мм}$.

Отношение сигнал/фон определялось путем вычисления отношения максимального значения светового потока, измеренного в центре пучка, к значению светового потока, измеренному при сдвиге диафрагмы ФЭУ относительно центра пучка по направлению отклонения. На рис. 7 приведены зависимости отношения сигнал/фон от расстояния между центрами голограмм g или от количества разрешимых положений отклоненного пучка $N = \Delta/g$, где Δ — максимальное отклонение светового пучка в выходной плоскости (120 мм при полосе частот возбуждения 30 МГц), а g выбирается по рис. 7 для заданного соотношения S/Φ . Из графика видно, что при отношении $S/\Phi = 100$ дефлектор обеспечивает $\sim 16 \times 16$ положений отклоненного пучка и $\sim 32 \times 32$ положения при отношении $S/\Phi = 40$. Отметим, что при указанных параметрах ячеек теоретическое разрешение дефлектора, определяемое в соответствии с (10), 88×88 .

Общий к. п. д. дефлектора (с учетом потерь света в оптических элементах) $\sim 10\%$.

На рис. 8 приведена фотография двумерного раstra из 32×32 точек, полученного при помощи экспериментального акустооптического дефлектора. Заметны геометрические искажения раstra. Они обусловлены недостаточным качеством оптических элементов, в частности, аберрациями цилиндрических объективов и короткофокусного объектива телескопа 10.

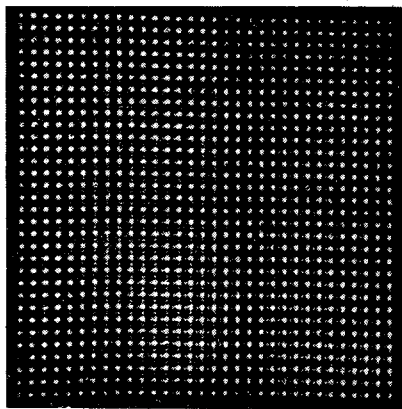


Рис. 8.

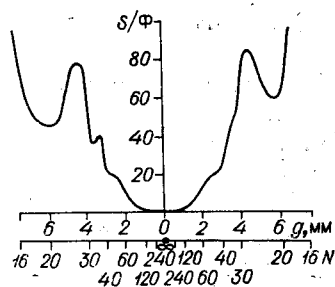


Рис. 7.

Заключение. Таким образом, практически достигнуты характеристики двухкоординатного дефлектора, приемлемые для использования этого устройства в составе ГЗУ с записью и считыванием информации [1].

Созданный дефлектор управляется от ЭВМ «Э-100»; к. п. д. дефлектора по свету не менее 10% ; время переключения луча 25—30 мкс; разрешение дефлектора: теоретическое — 220×220 (по критерию Релея), экспериментальное — 32×32 (при отношении сигнал/фон $\sim 40:1$).

ЛИТЕРАТУРА

1. И. С. Гибин, Т. Н. Мантуш, Ю. Е. Нестерихин, Б. Н. Панков, Е. Ф. Пен, П. Е. Твердохлеб. Программируемое голограммное ЗУ с записью и считыванием информации. — «Автометрия», 1975, № 3.

2. С. В. Богданов и др. О некоторых возможностях построения и исследования акустооптических дефлекторов для голограммных запоминающих устройств.— В кн.: Оптические устройства для хранения и обработки информации. Новосибирск, Изд. ИАЭ СО АН СССР, 1974.
3. В. М. Мастихин, В. К. Сапожников, М. Г. Сербуленко, К. М. Соболевский, Ю. Н. Тищенко, Д. В. Шелопут. К выбору материала и исследованию акустооптических параметров светозвукопроводов дефлекторных ячеек.— «Автометрия», 1975, № 3.
4. Н. Г. Прохоров, В. Н. Шахгеданов. Расчет разрешения ультразвуковых дефлекторов для голографических запоминающих устройств.— «Вопросы радиоэлектроники. Сер. общетехническая», 1974, вып. 2.
5. В. Н. Вьюхин, А. Е. Ковалев, В. В. Курочкин, В. П. Юношев. Система управления акустооптическим дефлектором.— «Автометрия», 1975, № 3.

Поступила в редакцию 14 января 1975 г.

УДК 772.99 : 681.327

**А. АКАЕВ, Л. В. КОВАЛЕВСКИЙ,
С. А. МАЙОРОВ, Э. В. СТАРОДУБЦЕВ**
(Ленинград)

РАСЧЕТ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОПТИМАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ПАМЯТИ БОЛЬШОЙ ЕМКОСТИ

Геометрический аспект конструирования голографических цифровых запоминающих устройств (ГЦЗУ) изучался в ряде работ [1—4]. В результате были получены общие выражения для емкости голографической памяти и некоторые соотношения между геометрическими параметрами с учетом геометрических и дифракционных ограничений, а также ограничений, вносимых оптическими элементами системы записи и восстановления изображения. Оптимизация геометрии конструкции ГЦЗУ проводилась лишь по одному параметру за счет соответствующего выбора размеров накопительной пластины (пластины голограмм) и согласованной матрицы фотоприемников [1, 3] или расстояния между ними [2], а также определенного выбора числа голограмм, связанного с объемом входного массива [4].

В настоящей работе даны расчетные соотношения между геометрическими параметрами основных компонент ГЦЗУ (транспарант данных, пластина голограмм и матрица фотоприемников), геометрически оптимизированного по всем указанным выше параметрам. При этом рассматривается более общая конструкция с массивом входных данных и матрицей фотоприемников, имеющих прямоугольные форматы в отличие от схемы с квадратными матрицами, описанной в цитированных выше работах [1—4].

Конструктивная схема, состоящая из основных компонент системы записи, хранения и восстановления массива информации, показана на рис. 1. На рисунке не показаны оптические линзы L_1 , L_2 , формирующие Фурье-образ массива данных в плоскости голограммы L_1 и восстановленное изображение в плоскости считывания L_2 .

В качестве критерия оптимальности геометрии конструкции ГЦЗУ выбран максимум общей емкости памяти при заданных габаритах системы и предельной плотности хранения информации в голограмме, определяемой дифракционным ограничением, при дополнительном требовании инвариантности разрешения соседних бит по всему полю