

Е. С. БОГДАНОВА, С. И. СОСКИН

(Новосибирск)

ВЛИЯНИЕ АБЕРРАЦИЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ЕМКОСТЬ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ПАМЯТИ

ВВЕДЕНИЕ

Информационная емкость голографических запоминающих устройств (ГЗУ) ограничивается дифракцией световых пучков на ячейках матрицы входных данных и голограмм, нелинейным характером регистрации голограмм, рассеянием на оптических элементах и голограмме, а также аберрациями оптических элементов. Задача оптимизации ГЗУ рассматривалась в ряде работ [1—3]. В [1] влияние аберраций на емкость не учитывалось, в [2, 3] оценивались аберрации, слабо влияющие на величину регистрируемого сигнала и емкости. Однако при создании ГЗУ на серийной оптике нередки случаи, когда величины аберраций превышают допустимые, в связи с чем ГЗУ оказываются неработоспособными. В этих случаях необходимо изменить методы расчета и учесть аберрационные ограничения.

Дальнейшее изложение разбито на две части. В первой части на основе рассмотрения оптической схемы дается постановка задачи оптимизации, а также описываются методы синтеза и аберрационных измерений фрагментов схемы. Во второй части рассмотрены ограничения емкости, обусловленные аберрациями. На основе аберрационных измерений произведены выбор оптимальных параметров и оценка достижимой емкости памяти.

Часть I

ИЗМЕРЕНИЕ АБЕРРАЦИЙ ФРАГМЕНТОВ ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ГЗУ

Постановка задачи. Рассмотрим принципиальную схему ГЗУ, совмещающего функции записи и считывания информации (рис. 1). Здесь Л — лазер; Д — дефлектор; СД — светоделительный кубик; $O_1—O_5$ — объективы; Z_1, Z_2 — поворотные зеркала; П — призма, устраняющая искажения, которые возникают за счет наклонного падения опорной волны на матрицу голограмм; Г — матрица голограмм; Т — матрица входных данных и ФП — фотоприемник.

Реализация большой емкости ГЗУ требует точной адресации объектного пучка на растр (Р), совмещения обоих пучков в плоскости голограммы, а также малых аберраций отображающих объективов: объектива O_3 , переносящего изображение точечного источника, сформированного растром, на голограмму, и объектива O_5 , переносящего изображение прозрачного в плоскость матричного фотоприемника ФП. Первое из указанных требований заключается в том, что погрешность адресации пучка на линзовый растр должна быть мала по сравнению с шагом растра. Иначе часть матрицы входных данных окажется неосвещенной, вследствие чего произойдет потеря информации при записи. Неточность совмещения объектного и референтного пучков в пло-

скости голограммы приведет [3] к уменьшению сигнала, регистрируемого фотоприемником. Отметим, что в приведенной оптической схеме реализуются как точная адресация на растр, так и совмещение на голограмме двух регистрируемых пучков. Первое условие реализуется подбором соответствующего управления дефлектором, второе — использованием идентичных объективов O_1 и O_2 .

Наиболее серьезные требования предъявляются к отображающим объективам O_3 и O_5 , первый из которых оптически сопрягает фокальную плоскость растра с голограммой, а второй — матрицу входных данных с фотоприемником.

Для реализации памяти большой емкости диаметры и поля зрения этих объективов должны быть насколько возможно большими [1]. Однако с ростом указанных параметров возрастают aberrации объективов, и емкость уменьшается. В связи с этим возникает задача оптимального выбора параметров ГЗУ с целью получения наибольшей емкости. Эта задача может быть решена для объективов с известными aberrационными характеристиками.

Далее обсуждаются возможные методы синтеза и aberrационных исследований отображающих систем. При создании ГЗУ на основе серийной оптики наиболее доступным является синтез отображающей системы единичного увеличения. Такая система может быть получена из пары идентичных объективов, предназначенных для получения изображений удаленных объектов. При встречном расположении объективов каждый из них работает в режиме, на который рассчитан, и можно ожидать малых aberrаций отображающей системы в целом.

Нами исследовалась возможность синтеза системы на основе объектива с фокусным расстоянием 450 мм и относительным отверстием 1:2,25. Для выбора системы с наименьшими aberrациями были исследованы различные варианты расположения объективов: на фокусном расстоянии (рис. 2, а), вплотную (см. рис. 2, б) и на двойном фокусном расстоянии (см. рис. 2, в). При синтезе отображающей системы мы стремились сделать эту систему насколько возможно симметричной с тем, чтобы скомпенсировать aberrации, присущие одиночному объективу. В частности, ожидалась значительная компенсация дисторсии и частично-наклонных aberrаций, свойственных одиночному объективу.

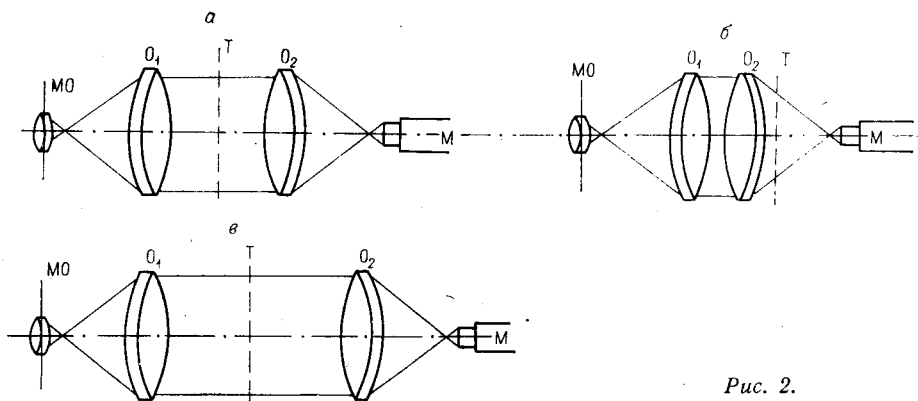


Рис. 2.

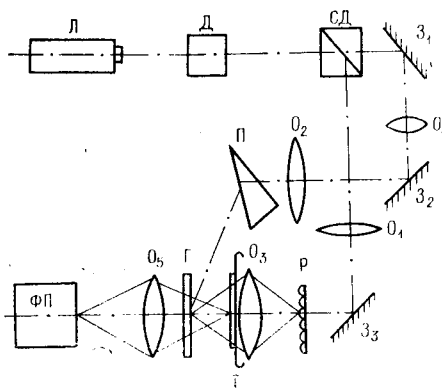


Рис. 1.

Схема для исследования aberrаций показана на рис. 2. Луч He-лазера направляется на плоское зеркало, установленное в фокусе коллиматорного объектива, и попадает на подвижный микрообъектив МО, формирующий точечный источник для испытания оптической системы O_1, O_2 . Измерение aberrаций проводилось по методу Гартмана с помощью транспаранта Т с отверстиями, расположенными по узлам прямоугольной сетки. В задней фокальной плоскости объектива O_2 и вблизи от нее с помощью микроскопа МО с окуляром—микрометром производилось измерение поперечных лучевых aberrаций отображающей системы O_1, O_2 . Следы лучей, проходящих через различные отверстия диафрагмы Гартмана, увеличенные микрообъективом МО, регистрировались на фотопленке. В зависимости от величины смещения микрообъектива (перпендикулярно оптической оси системы O_1, O_2) изменялось положение точечного источника в поле зрения. При аксиальном расположении МО регистрировалась сферическая aberrация, а при неаксиальном — наклонные aberrации. Такой метод исследования моделирует процесс распространения световых пучков в оптической схеме ГЗУ. Из рис. 1, 2 видно, что диафрагма Гартмана с отверстиями по прямоугольной сетке имитирует матрицу входных данных в первой отображающей системе ГЗУ и моделирует матрицу голограмм во второй системе. В первом случае микрообъектив МО на рис. 2 имитирует одну из линз раstra Р, во втором — точечный рассеивающий центр на матрице входных данных Т (см. рис. 1). Размеры отверстий в диафрагме желательно выбирать большими, поскольку при этом уменьшается диаметр дифракционного кружка в фокальной плоскости исследуемого объектива и повышается точность измерения aberrаций. Однако с возрастанием отверстия начинает сказываться астигматизм объектива и точность измерений уменьшается. Для исследуемых объективов оптимальный диаметр отверстий подбирался экспериментально и был равен 6 мм. При этом точность измерения как продольных, так и поперечных aberrаций ограничивалась преимущественно погрешностями устройств, с помощью которых измерялись перемещения, и составляла для поперечных aberrаций 0,01 мм, для продольных — 0,1 мм. В качестве плоскости отсчета aberrаций была выбрана гауссова плоскость. Положение гауссовой плоскости определялось также по методу Гартмана с помощью четырех отверстий, расположенных на одинаковом расстоянии h от оптической оси. Микрообъектив МО устанавливался на оптическую ось, затем открывались четыре отверстия, близких к оси, и микроскоп устанавливался так, чтобы в поле зрения наблюдалась четкая интерференционная картина. При этом фиксировалось продольное положение микроскопа, которое и определяло приблизительное положение гауссовой плоскости. Более точное определение производилось затем по расфокусированной картине следов

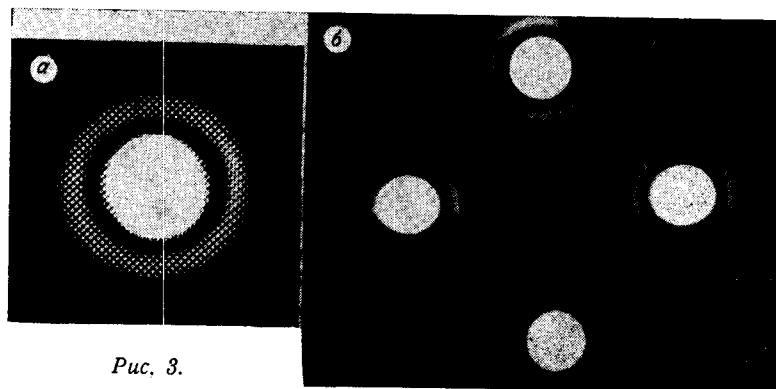


Рис. 3.

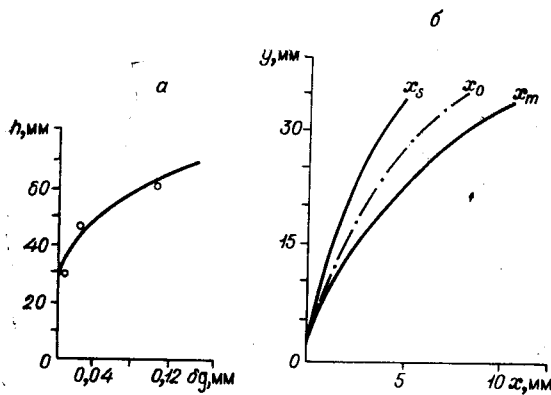


Рис. 4.

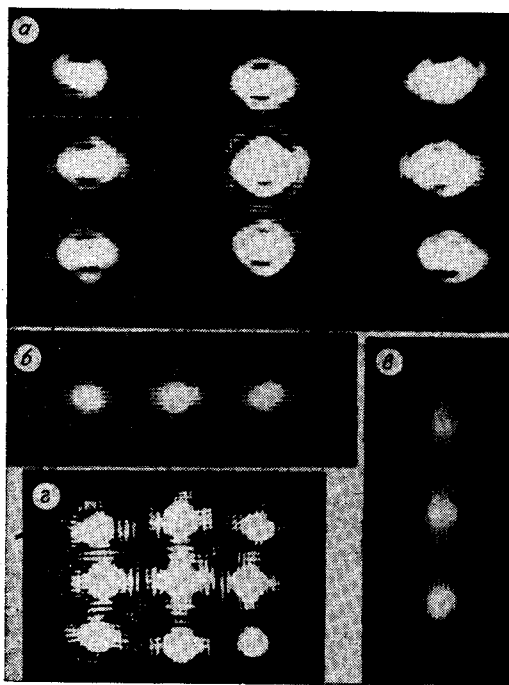


Рис. 5.

(рис. 3, б). Микроскоп сначала смещали в предфокальную, а затем в зафокальную область и с помощью окуляра-микрометра обусловили два положения, для которых расстояние между следами лучей одинаково. Среднее из двух продольных отсчетов определяло положение гауссовой плоскости. Измерение продольной сферической aberrации производилось аналогичным образом. Отличие состоит лишь в том, что открывались отверстия с любыми значениями h . При больших h лучи сходились в плоскости, не совпадающей с параксиальной. Расстояние между указанными плоскостями определяло величину продольной aberrации. Измерения поперечной сферической aberrации производились в гауссовой плоскости. Величина aberrаций в этом случае определялась расстоянием между центрами следов четырех лучей. Примеры регистрируемых следов для $h = 70$ мм показаны на рис. 3: a — картина следов в точке схода, b — в параксиальном фокусе. Проведенные измерения показали, что величина поперечной сферической aberrации δg и характер зависимости ее от h одинаковы для всех трех схем (см. рис. 2). График δg от h представлен на рис. 4, a . Здесь показана кривая,

полученная в результате расчета схем на ЭВМ, а также значения, найденные из измерений (на графике обозначены точками). Расчет лучевых aberrаций производился по стандартной методике [4]. Расчетные и экспериментальные результаты совпадают с точностью до 0,01 мм, что согласуется с оценкой погрешности экспериментальной методики.

Измерения наклонных aberrаций всех исследуемых схем производились с помощью диафрагмы Гартмана, представляющей собой матрицу из 3×3 отверстий. Характерная картина следов лучей представлена на фотографиях (рис. 5). Здесь a — изображение в параксиальной плоскости, $b, в$ — в плоскостях меридионального и сагиттального фокусов, $г$ — в плоскости наименьшего кружка рассеяния. Из приведенных фотографий видно, что исследуемые схемы обладают астigmatизмом, так как положения меридионального x_m и сагиттального x_s фокусов не совпадают. Кроме того, присутствует кривизна поля зрения.

Кома незначительна, поскольку асимметрия картин следов не наблюдалась. Дисторсия в пределах точности измерений не была обнаружена, хотя для каждого из составляющих объективов O_1 , O_2 в отдельности дисторсия была значительной. Этот результат является следствием симметрии схем на рис. 2, а, в, а также незначительной несимметрии схемы на рис. 2, б. Величина наклонных aberrаций, определяемая в данном случае астигматизмом и кривизной, оказалась наименьшей для второй схемы (см. рис. 2, б), вследствие чего этой схеме было отдано предпочтение. На рис. 4, б приведены экспериментальная (обозначена точками) и расчетная зависимости положения меридионального фокуса x_m , сагиттального фокуса x_s и поверхности кривизны x_0 от линейного смещения y точечного источника перпендикулярно оптической оси. Здесь расстояние x также отсчитывается от параксиального фокуса системы.

Результаты работы могут быть сформулированы следующим образом. Применительно к ГЗУ предложены простые методы синтеза отображающих систем и разработана методика их aberrационных измерений с точностью определения поперечных aberrаций 0,01 мм. Учитывая, что типичные разрабатываемые устройства, как правило, не содержат ячеек с размером меньше 0,1 мм, достигнутая точность измерений является удовлетворительной.

Часть II

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГЗУ И ОЦЕНКА ЕМКОСТИ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ПАМЯТИ

Оценка емкости ГЗУ при наличии aberrаций. Рассмотрим ограничения емкости, обусловленные aberrациями отображающих объективов O_3 и O_5 (см. рис. 1), в предположении, что не допускаются ни потеря бит информации, ни появление ложных бит при записи и считывании, а также потери энергии при считывании информации. Здесь не учитывается снижение емкости, обусловленное нелинейностью записи и рассеянием света. Эффекты, связанные с дифракцией света на ячейках матриц входных данных и голограмм, рассмотрены упрощенно. Общее количество бит информации N , которое может быть записано с помощью ГЗУ, определяется соотношениями

$$N = N_r N_t; \quad (1)$$

$$N_r = \left(\frac{\sqrt{2} y}{\Delta_r} \right)^2; \quad (2)$$

$$N_t = \left(\frac{\sqrt{2} h}{\Delta_t} \right)^2, \quad (3)$$

где N_r — количество голограмм в матрице, N_t — количество ячеек в матрице входных данных, Δ_r и Δ_t — расстояние между соседними ячейками для первой и второй матриц соответственно. Обе матрицы принимаются квадратными со стороной, равной $y\sqrt{2}$ и $h\sqrt{2}$ ($2y$ и $2h$ — размеры диагоналей матрицы голограмм и матрицы входных данных соответственно).

При отсутствии aberrаций линейный размер объектного пучка в плоскости голограммы (l_r) определяется по формуле

$$l_r \approx 2 \frac{\lambda}{l_t} f_1, \quad (4)$$

где l_r — размер ячейки транспаранта, λ — длина волны, f_1 — расстояние от транспаранта до плоскости регистрации голограммы. Если положить, что ширина опорного пучка в плоскости голограммы также равна l_r , а амплитуда постоянна, то размер голограммы определяется формулой (4). При использовании того же опорного пучка для восстановления объектный пучок воспроизводится без амплитудных и фазовых искажений. Поэтому двухступенчатый процесс записи и восстановления голограммы эквивалентен одноступенчатому процессу — отображению транспаранта на фотоприемник системой O_5 с входным зрачком l_r .

Амплитудное распределение поля на фотоприемнике определяется сверткой амплитудного распределения на транспаранте с амплитудной функцией рассеяния этой системы [5]. Размеры области, занятой этой функцией l'_ϕ , приблизительно равны

$$l'_\phi = \frac{2\lambda}{l_r} f_2, \quad (5)$$

где f_2 — расстояние от выходного зрачка системы O_5 до фотоприемника. При этом размер изображения ячейки матрицы входных данных в плоскости фотоприемника можно определить соотношением

$$l_\phi \approx l'_\phi + l_r = \frac{2\lambda}{l_r} f_2 + l_r. \quad (6)$$

При наличии aberrаций в отображающей системе O_3 область, занятая объектным пучком на голограмме, увеличится из-за aberrационных смещений дифракционных кружков, образованных частями пучка, прошедшими через различные ячейки транспаранта. Величина смещения в первом приближении равна поперечным лучевым aberrациям. Положим, что максимальные по величине поперечные aberrации в плоскости голограммы равны $\pm l_1/2$. В этом случае линейный размер области, занятой объектным пучком на голограмме \bar{l}_r , будет равен

$$\bar{l}_r \approx l_1 + l_r, \quad (7)$$

где l_r определяется формулой (4). Если не учитывать aberrации и принять ширину опорного пучка по-прежнему равной l_r , то не запишутся на голограмме и не воспроизведутся на фотоприемнике те ячейки транспаранта, через которые прошли лучи с aberrациями, большими, чем l_r . Очевидно, что для получения неискаженной записи следует увеличить размер опорного пучка и сделать его равным \bar{l}_r . При отсутствии aberrаций в отображающей системе O_5 размер ячейки восстановленного изображения \bar{l}'_ϕ определяется соотношением, аналогичным (6), в котором, учитывая увеличение ширины опорного пучка, следует заменить l_r на \bar{l}_r :

$$\bar{l}'_\phi = \frac{2\lambda}{\bar{l}_r} f_2 + \bar{l}_r. \quad (8)$$

Aberrации системы O_5 приведут к смещению изображений ячеек матрицы входных данных. Эти смещения равны поперечным лучевым aberrациям системы O_5 . Положим, что максимальное значение этих aberrаций равно $l_2/2$. Тогда следует увеличить размер фотоприемника по крайней мере до величины, равной

$$\bar{l}_\phi = \bar{l}'_\phi + l_2 = \frac{2\lambda}{\bar{l}_r} f_2 + \bar{l}_r + l_2. \quad (9)$$

Далее, исходя из условия получения максимальной емкости, примем шаг на матрице голограмм, равным размеру голограммы, а шаг на

матрице фотоприемников и транспаранте — равным размеру фотоприемника:

$$\Delta_r = l_r; \quad (10) \quad \bar{\Delta}_r = \bar{l}_r; \quad (10a)$$

$$\Delta_\tau = l_\tau; \quad (11) \quad \bar{\Delta}_\tau = \bar{l}_\tau. \quad (11a)$$

Подставляя (11a), (10a), (9), (7), (3), (2) в (1), определим емкость голографической памяти при наличии aberrации:

$$\bar{N} = \left[\frac{2yh}{2\lambda f_2 + (l_1 + l_r)(l_2 + l_\tau)} \right]^2. \quad (12)$$

Емкость памяти при отсутствии aberrаций можно найти из (12), полагая $l_1 = l_2 = 0$ и подставляя (4):

$$N = \frac{1}{4\lambda^2 f_1^2} \left(\frac{yh}{1 + f_2/f_1} \right)^2. \quad (13)$$

Оценим справедливость полученных соотношений, воспользовавшись более точными данными из [1] с учетом линейных перекрестных помех в плоскостях голограммы и считывающего фотоприемника, а также гауссового распределения интенсивности в опорном пучке. В соответствии с видом отображающих систем, рассмотренных в [1], положим, что каждая из отображающих систем на рис. 1 образована парой идентичных тонких объективов с фокусным расстоянием f и диаметром D , размеры y , h равны $D/2$, а расстояния f_1 , f_2 в (13) равны f . При этом емкость при отсутствии aberrаций, согласно (13), равна

$$N = \frac{1}{4\lambda^2} D^2 \left(\frac{D}{f} \right)^2. \quad (14)$$

Та же емкость в соответствии с [2] определяется выражением

$$N = \frac{\pi^2}{64\lambda^2 (\beta_r \beta_\phi)^2} D^2 \left(\frac{D}{f} \right)^2, \quad (15)$$

где β_r , β_ϕ — относительное расстояние между голограммами и фотоприемниками соответственно (шаг, отнесенный к размеру).

Как видно из (14), (15), если положить $\beta_r = \beta_\phi = 1$, то произведенная нами оценка окажется завышенной в $16/\pi^2 = 1,6$ раз. Таким образом, полученные выражения для емкости (12), (13) позволяют достаточно точно оценивать влияние aberrаций на емкость памяти. В соответствии с (12) появление поперечных aberrаций l_1 , l_2 в обеих отображающих системах приводит к уменьшению емкости голографической памяти. Это уменьшение, очевидно, несущественно, если l_1 , l_2 малы по сравнению с размерами голограммы l_r и ячейки матрицы входных данных l_τ (12).

Выбор оптимальных параметров ГЗУ. Для достижения максимальной емкости (12) необходимо оптимально выбрать размеры ячеек голограммы и транспаранта (l_r , l_τ), а также размеры голограммной пластинки и транспаранта ($2y$ и $2h$).

1) *Выбор размеров ячеек.* Рассмотрим случай, когда размеры $2y$ и $2h$ заранее выбраны и не включаются в число оптимизируемых параметров. Пусть при этом поперечные aberrации отображающих систем O_3 и O_5 (см. рис. 1) равны l_1 и l_2 . Тогда оптимальный размер l_r определим, подставляя (4) в (12), дифференцируя (12) по l_r и полагая производную равной нулю. В результате получим

$$l_r = \sqrt{2\lambda f_1} \sqrt{\frac{l_2}{l_1}}. \quad (16)$$

Параметр l_r определим, подставляя (16) в (4):

$$l_r = \sqrt{2\lambda f_1} \sqrt{\frac{l_2}{l_1}}. \quad (17)$$

Остальные параметры ГЗУ могут быть найдены из (7), (9), (10а), (11а) с учетом (16), (17). Величину емкости \bar{N}_{\max} , которая может быть достигнута в ГЗУ с aberrациями l_1, l_2 , найдем, подставляя (16), (17) в (12):

$$\bar{N}_{\max} = \frac{1}{4\lambda^2 f_1^2} \left[\frac{2yh}{(m+1) + \frac{f_1}{f_2}} \right]^2, \quad (18)$$

где

$$m = \sqrt{\frac{l_1 l_2}{2\lambda f_1}}. \quad (19)$$

Степень снижения емкости из-за aberrаций K можно определить отношением (13) и (18):

$$K = \frac{N}{\bar{N}_{\max}} = \left[\frac{(m+1)^2 + \frac{f_2}{f_1}}{1 + \frac{f_2}{f_1}} \right]^2. \quad (20)$$

Полученные соотношения могут быть использованы как для выбора оптимальных размеров ячеек, так и для определения допустимых aberrаций.

Пример расчета.

Рассмотрим ГЗУ, построенное на основе двух идентичных отображающих систем с единичным увеличением, исследованных в ч. I:

$$f_1 = f_2 = 450 \text{ мм}; \lambda = 0,63 \text{ мкм}. \quad (21)$$

Примем, что размеры матриц также одинаковы ($2y = 2h$). В этом случае независимо от размера матриц $l_1 = l_2$.

Оптимальные размеры l_r, l_t определяются из (16), (17):

$$l_r = l_t = \sqrt{2\lambda f_1} = 0,75 \text{ мм} \quad (22)$$

(l_r, l_t в этом случае не зависят от величины aberrаций). При заданных $2y$ и $2h$ aberrации l_1, l_2 находятся по aberrационным кривым, а величины шага на матрицах голограмм и фотоприемников рассчитываются из формул (5)–(9), (10а), (11а). Емкость ГЗУ рассчитывается по формулам (18), (19). Если отображающие системы специально разрабатываются, методика расчета несколько видоизменяется. В этом случае следует задаться величиной допустимого уменьшения емкости и определить допуски на aberrации отображающих систем. Например, при $K_{\text{дон}} = 1,25$ из (20) определяется $m_{\text{дон}} = 0,11$, а из (19) — допуски на aberrации:

$$l_1 = l_2 = m_{\text{дон}} \sqrt{2\lambda f_1} = 0,08 \text{ мм}. \quad (23)$$

Оптимальные размеры l_r, l_t по-прежнему равны (22). Величины шагов матриц рассчитываются из (5)–(9), (10а), (11а) при значениях aberrаций (23).

2) *Оптимальный выбор размеров матриц.* Величины поперечных aberrаций (l_1, l_2) зависят от используемых апертур и полей зрения отображающих объективов. С увеличением размеров матрицы голограмм и матрицы входных данных ($2y, 2h$) происходит увеличение емкости памяти, однако, одновременно возрастают aberrации l_1, l_2 , что

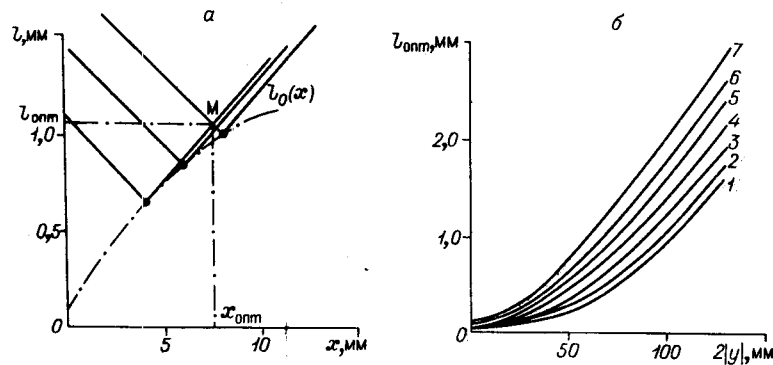


Рис. 6.

приводит к снижению емкости [см. (12)]. Таким образом, при синтезе ГЗУ на основе серийной оптики возникает задача оптимального выбора размеров матриц.

Следует учесть также, что aberrации зависят не только от размеров $2y$, $2h$, но также от выбора плоскостей установки матриц. Для минимизации aberrаций положения плоскостей установки также должны включаться в число оптимизируемых параметров.

Поставленная задача обычно не решается аналитически, поскольку aberrационные характеристики объективов даются в виде графиков. Ниже излагается методика оптимизации на основе графических построений, пригодная для объективов с любым характером aberrаций.

Положим, что для синтеза обеих отображающих систем (O_3 и O_5 на рис. 1) используется один и тот же фрагмент (см. рис. 2, б) с исследованными aberrационными характеристиками (см. рис. 4, а, б). Для достижения максимальной емкости необходимо минимизировать l_1 , l_2 выбором плоскостей установки голограммы и фотоприемника, а также выбором параметров y , h , l_r .

Методика нахождения оптимальной плоскости установки заключается в следующем (рис. 6, а). Первоначально строится зависимость размера наименьшего кружка рассеяния l_0 , соответствующего различным полям зрения от продольной координаты x . Затем для каждого значения l_0 проводится пара прямых, соответствующих изменению размера пятна, обусловленного расфокусировкой. Наклон этих прямых определяется задним апертурным углом оптической системы и зависит от размера транспаранта h . Далее определяются точки взаимного пересечения построенных наклонных прямых для всех значений поля y и находится точка пересечения M , для которой ордината имеет наибольшее значение. Абсцисса точки M $x_{\text{опт}}$ определит положение плоскости наилучшей фокусировки изображения, а ордината $l_{\text{опт}}$ — размер кружка рассеяния в этой плоскости. Действительно, из рис. 6, а видно, что в любой другой плоскости установки для одного из полей зрения l будет больше $l_{\text{опт}}$ и значение aberrаций для данного поля увеличится. В рассматриваемом методе семейство наклонных прямых (см. рис. 6, б) проводится параллельно друг другу. Это обусловлено тем, что все построения производятся в первом приближении (величина заднего апертурного угла не зависит от aberrаций), справедливом для оптических систем, у которых величина продольных aberrаций (произвольного характера) мала по сравнению с фокусным расстоянием.

Указанным способом построены зависимости значений $l_{\text{опт}}$ от линейных размеров поля зрения $2y$, приведенные на рис. 6, б. Здесь кривые 1—7 соответствуют различным значениям линейного размера апертуры, равной соответственно 30, 50, 70, 90, 110, 130, 150 мм. Вслед-

стве идентичности выбранных $N \cdot 10^6$ отображающих систем график l_{opt} определяет как l_1 , так и l_2 [см. (14)]. Следует, однако, учесть, что в первой системе размер регистрируемого транспаранта $h\sqrt{2}$, определяет апертуру первой системы O_3 (см. рис. 1) и одновременно поле зрения системы O_5 . В то же время размер голограммной пластинки $y\sqrt{2}$ определяет поле зрения системы O_3 и одновременно апертуру O_5 . Поэтому при нахождении l_1 кривые должны использоваться с указанными на рис. 6, б обозначениями, а при определении l_2 следует заменить y на h , а h на y .

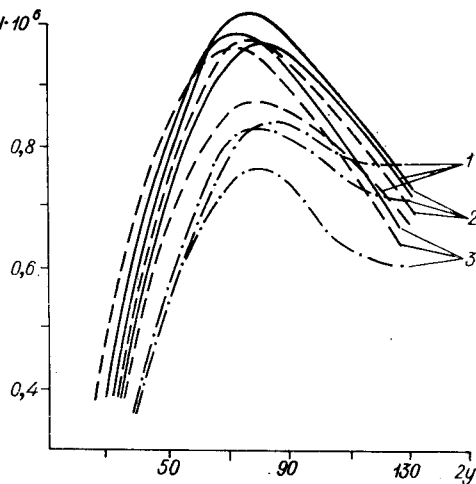


Рис. 7.

Для определения оптимальных значений размеров голограммной пластинки в дальнейшем следует задаться в качестве параметров размерами матрицы входных данных $2h$, размерами ячейки транспаранта l_t и, используя (6), (14), построить зависимости емкости \bar{N} (14) от размера голограммной пластинки ($2y$). При этом одна из пар значений $l_t, 2h$ дает график с наибольшим максимумом \bar{N} . На рис. 7 приведены результаты расчетов для $l_t, 2h$, близких к оптимальным. Здесь показаны три семейства кривых, соответствующие трем значениям $2h$: 50 мм (штрихпунктирные линии), 70 мм (сплошные линии) и 90 мм (пунктирные линии) с различными размерами ячеек транспаранта: 1 — $l_t = 0,5$ мм, 2 — $l_t = 0,7$ мм и 3 — $l_t = 1$ мм. Для уменьшения количества вычислений мы учли, что из-за идентичности отображающих систем оптимальная величина l_t должна быть близка к ранее определенной (22). Из приведенных графиков видно, что максимальная емкость реализуется при $l_t = 0,7$ мм. Оптимальные диагональные размеры матриц при этом равны

$$2y = 75 \text{ мм}; 2h = 70 \text{ мм}. \quad (24)$$

С целью проверки графических расчетов следует определить l_1, l_2 , соответствующие найденным $2y$ и $2h$ (см. рис. 6, б):

$$l_1 = 0,70 \text{ мм}; l_2 = 0,64 \text{ мм}, \quad (25)$$

а затем вычислить l_t по формуле (16): $l_t = 0,72$ мм. Результат вычислений свидетельствует о близости графически определенных параметров к оптимальным. Параметры $l_t, \bar{\Delta}_r, \bar{\Delta}_\phi$ рассчитываются по формулам (4) — (9), (10а), (11а), (25):

$$l_t = 0,81 \text{ мм}; \bar{\Delta}_r = 1,5 \text{ мм}; \bar{\Delta}_\phi = 1,73 \text{ мм}.$$

Число голограмм в матрице равно

$$N_r = \left(\frac{y\sqrt{2}}{\bar{\Delta}_r} \right)^2 = 1260;$$

число ячеек в матрице входных данных (число фотоприемников)

$$N_t = N_\phi = \left(\frac{h\sqrt{2}}{\bar{\Delta}_\phi} \right)^2 = 815;$$

общая емкость памяти

$$\bar{N} = 1,03 \cdot 10^6 \text{ бит.} \quad (26)$$

Сравним емкость ГЗУ с выбранными оптимальными параметрами и емкость безабберационной системы, которая может быть достигнута при тех же размерах матриц ($2y=75$ мм и $2h=70$ мм). Параметр m , определяющий влияние aberrаций на емкость, найдем, подставляя (24) в (19): $m=0,89$. Степень снижения емкости из-за aberrаций в соответствии с (20) равна

$$K = 5,2. \quad (27)$$

Действительно, aberrации осевой точки поля зрения, как видно из рис. 6, б, при $2y=70$ мм составляют 0,06 мм, что оказывается меньше допустимой величины (23), а наклонные aberrации (25) почти на порядок величины превосходят допустимые. Это снижение емкости обусловлено aberrациями наклонных пучков, присутствующими в отображающих системах.

Оценим также емкость N , которая может быть получена в случае, когда в оптической схеме используются безабберационные объективы с тем же диаметром и фокусным расстоянием. Величина емкости определяется из (14) при $D=200$ мм, $f=450$ мм, $\lambda=0,63$ мкм:

$$N = 5 \cdot 10^9 \text{ бит.} \quad (28)$$

Результаты (26)—(28) показывают, что исследованные нами отображающие системы в пределах оптимально рассчитанной рабочей зоны (24) по информативной емкости всего в 5,2 раза хуже, чем безабберационные. Однако вследствие aberrаций не могут использоваться полные световые диаметры систем ($2y=200$ мм, $2h=200$ мм) и достижимая емкость оказывается в 5000 раз ниже той, которая может быть достигнута при отсутствии aberrаций.

ВЫВОДЫ

Задача реализации максимально возможной емкости при использовании объективов с известными aberrационными характеристиками должна решаться с учетом aberrаций. При этом в число оптимизируемых параметров должны быть включены размеры ячеек, размеры матриц голограмм и фотоприемников, а также положение плоскостей установки голограммы и фотоприемника.

В оптических схемах ГЗУ большой емкости наиболее серьезными оказываются требования по aberrациям, предъявляемые к двум отображающим системам, проецирующим линзовый растр на голограмму и матрицу входных данных на фотоприемник. Искажения, обусловленные aberrациями, можно устранить, увеличивая размеры голограммы и фотоприемника, что приводит к уменьшению емкости ГЗУ.

Предложена несложная методика оптимального выбора параметров ГЗУ с учетом дифракционных и aberrационных ограничений. Методика пригодна для ГЗУ, включающего отображающие системы с любым характером aberrаций.

Приведены результаты синтеза, aberrационных измерений и оптимизации отображающих систем на основе серийных объективов с большими наклонными aberrациями. Предельно достижимая емкость ГЗУ, включающего такие системы, оказалась в 5000 раз ниже, чем емкость безабберационного ГЗУ.

Авторы благодарны И. В. Сипотенко за проведение aberrационных расчетов на ЭВМ, И. С. Гибину и Е. Ф. Пену — за полезные обсуждения результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Hill. Some Aspects of a Large Capacity Holographic Memory.— "Appl. Opt.", 1972, v. 11, № 1.
2. И. С. Гибин. Расчет и выбор параметров оптических систем голограммных запоминающих устройств.— «Автоматика», 1974, № 6.
3. Н. А. Костров. К вопросу оптимизации голографических запоминающих устройств.— «Квантовая электроника», 1974, т. 1, с. 2148.
4. Г. Г. Слюсарев. Методы расчета оптических систем. Л., «Машиностроение», 1969.
5. Д. Ж. Гудмен. Введение в Фурье-оптику. М., «Мир», 1970.

Поступила в редакцию 3 декабря 1974 г.

УДК 535.318; 681.327

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

АНАЛИЗ ОПТИЧЕСКИХ СХЕМ ДВУХКООРДИНАТНЫХ ШЛЕЙФОВЫХ ДЕФЛЕКТОРОВ

Двухкоординатные дефлекторы, основными элементами которых являются магнитоэлектрические светолучевые гальванометры (шлейфы), обеспечивают время отклонения световых пучков порядка 1 мс (без принятия специальных мер) и отличаются простотой, малыми потерями света и низкой стоимостью. Их целесообразно применять тогда, когда требование по быстродействию в решаемой задаче не является определяющим.

Основные параметры дефлекторов этого типа, такие, как количество разрешимых положений отклоненного пучка и точность вывода луча в заданную позицию, во многом зависят от параметров и геометрии оптической схемы.

В данной работе проведен анализ оптических схем шлейфовых дефлекторов, изучен характер aberrаций отклоняемых лучей и описаны варианты схем с минимальными aberrациями, позволяющие увеличить число разрешимых точек дефлектора.

Оптическая схема дефлектора и его aberrации. Оптическая схема шлейфового дефлектора приведена на рис. 1. Лазерный пучок линзой L_1 фокусируется на зеркальце шлейфа горизонтального отклонения $Ш_x$, затем изображение светового пятна с зеркальца $Ш_x$ проектируется линзой L_2 на зеркальце шлейфа вертикального отклонения $Ш_y$. При работе дефлектора световой пучок, отраженный зеркальцем $Ш_y$, отклоняется по двум взаимно ортогональным направлениям и направляется на плоскость Π [1]. В идеальном случае закон перемещения светового пятна в плоскости сканирования должен соответствовать закону изменения управляющих сигналов. Однако реально такого соответствия не наблюдается и световой пучок отклоняется с aberrациями. Рассмотрим характер этих aberrаций.

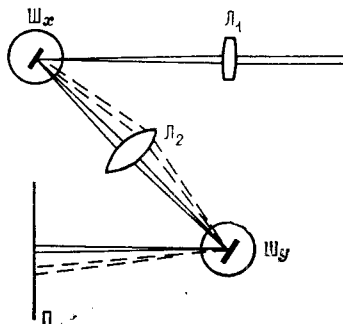


Рис. 1.