

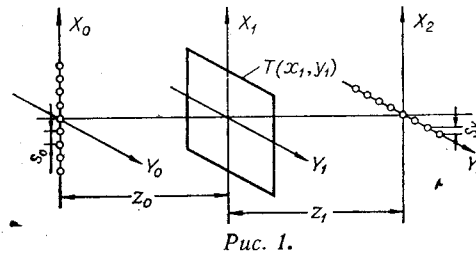
УСТРОЙСТВА ВОСПРИЯТИЯ
 И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ,
 ОСНОВАННЫЕ НА НОВЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПРИНЦИПАХ

УДК 621.373.826 : 772.99

Л. Д. ГИК, В. Н. НЕКУРЯШЕВ, Л. И. ТРЕТЬЯКОВ
 (Новосибирск)

ОБ УМЕНЬШЕНИИ АБЕРРАЦИЙ ПРИ СИНТЕЗИРОВАНИИ
 АПЕРТУРЫ АКУСТИЧЕСКИХ ГОЛОГРАММ

Реализация достаточно хорошего разрешения в длинноволновой голографии требует создания больших апертурных плоскостей и, следовательно, использования большого числа приемников. Одним из методов, позволяющих уменьшить число приемников без ухудшения разрешающей способности, является синтезирование апертуры. Этот метод дает возможность заменить матрицу из $M \times N$ преобразователей на $M+N$ преобразователей [1]. В частности, замену $M \times N$ приемников на M приемников и N излучателей можно осуществить, основываясь на применении теоремы взаимности [2] в одном измерении схемы голографирования, как это показано на рис. 1, по отношению к координате X . Здесь в плоскости X_0Y_0 расположены N излучателей в виде вертикальной линейки с шагом s_x . В плоскости X_1Y_1 находится объект, а в плоскости X_2Y_2 расположена горизонтально линейка из M приемников с шагом s_y .



Однако указанная замена иногда вызывает aberrации восстановленного изображения. В случае матричной регистрации фаза в плоскости голограммы определяется выражением

$$\varphi_m = k_1 z_m = k_1 \left(\sqrt{z_0^2 + x_1^2 + y_1^2} + \sqrt{z_1^2 + (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \right). \quad (1)$$

Здесь $k_1 = 2\pi/\lambda_1$ — величина волнового вектора акустического поля. При синтезировании апертуры по схеме рис. 1 получаем для фазы

$$\varphi_c = k_1 z_c = k_1 \left(\sqrt{z_1^2 + (x_2 - x_1)^2 + y_1^2} + \sqrt{z_0^2 + x_1^2 + (y_2 + y_1)^2} \right). \quad (2)$$

Разлагая выражения (1) и (2) по степеням x/z и y/z и ограничиваясь членами второго порядка, находим соответственно:

$$\begin{aligned} \varphi_m = k_1 \left\{ z_0 + z_1 + \frac{1}{2z_0} (x_1^2 + y_1^2) + \frac{1}{2z_1} [(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2] - \right. \\ \left. - \frac{1}{8z_0^3} (x_1^4 + y_1^4) - \frac{1}{8z_1^3} [(x_2 - x_1)^4 + (y_2 - y_1)^4] - \frac{1}{4z_0^3} x_1^2 y_1^2 - \right. \\ \left. - \frac{1}{4z_1^3} (x_2 - x_1)^2 (y_2 - y_1)^2 \right\}; \quad (3) \end{aligned}$$

$$\varphi_c = k_1 \left\{ z_0 + z_1 + \frac{1}{2z_0} [(x_2 - x_1)^2 + y_1^2] + \frac{1}{2z_1} [x_1^2 + (y_2 - y_1)^2] - \right. \\ \left. - \frac{1}{8z_0^3} [(x_2 - x_1)^2 + y_1^4] - \frac{1}{8z_1^3} [x_1^4 + (y_2 - y_1)^4] - \frac{1}{4z_0^3} (x_2 - x_1)^2 y_1^2 - \right. \\ \left. - \frac{1}{4z_1^3} x_1^2 (y_2 - y_1)^2 \right\}. \quad (4)$$

Непосредственно из этих выражений следует, что когда $z_0 = z_1$, то aberrации вызываются различием лишь тех членов второго порядка, в которые входит произведение xy . Рассмотрение такого случая проведено в [1].

Однако с практической точки зрения бóльший интерес представляет вариант, когда $z_0 \neq z_1$. При этом основное различие между (3) и (4) будет уже обусловлено членами первого порядка, в результате чего возникнут гораздо большие aberrации, чем в случае $z_0 = z_1$.

В данной работе исследуется возможность устранения aberrаций такого рода за счет оптимального выбора геометрии голографической схемы. Рассмотрение проводится в предположении, что сигнал приемника с координатой ms_{y_2} (см. рис. 1), обусловленный излучателем с координатой $x = ns_0$, подается на источник света с координатами $x = nsx_2$ и $y = ms_{y_2}$. В результате сигнал на источнике света будет соответствовать полю, которое описывается в приближении Френеля следующим образом:

$$F(nsx_2, ms_{y_2}) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} T(x_1, y_1) \exp \left[\frac{ik_1}{2z_0} (x_1 - nsx_2\beta)^2 + \right. \\ \left. + \frac{ik_1}{2z_1} (y_1 - ms_{y_2})^2 \right] \exp \left[\frac{ik_1}{2z_1} x_1^2 + \frac{ik_1}{2z_0} y_1^2 \right] dx_1 dy_1. \quad (5)$$

Здесь $\beta = sx_2/s_{y_2}$. Переходя к непрерывным координатам, получаем

$$F(x_2, y_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} T(x_1, y_1) \exp \left[\frac{ik_1}{2z_0} (x_1 - x_2\beta)^2 + \right. \\ \left. + \frac{ik_1}{2z_1} (y_1 - y_2)^2 \right] \exp \left[\frac{ik_1}{2z_1} x_1^2 + \frac{ik_1}{2z_0} y_1^2 \right] dx_1 dy_1. \quad (6)$$

Полагая, что при формировании голограмм используется плоская опорная волна, создаваемая, в частности, искусственным путем [3], для коэффициента амплитудного пропускания голограммы можно записать

$$t \simeq 1 + |F|^2 + F^* + F. \quad (7)$$

В результате уменьшения голограммы в q раз и выполнения операции восстановления (рассматривается третий член выражения (7)) поле восстановленного изображения в плоскости X_3Y_3 на расстоянии z_1 описывается выражением

$$E(x_3, y_3) = \int_{-\frac{L}{2q}}^{\frac{L}{2q}} \int_{-\frac{L}{2q}}^{\frac{L}{2q}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [T^*(x_1, y_1) \exp \left[-\frac{ik_1}{2z_0} (x_1 - \beta qx_2)^2 - \right. \\ \left. - \frac{ik_1}{2z_1} (y_1 - qy_2)^2 \right] \exp \left[\frac{ik_1}{2z_1} x_1^2 + \frac{ik_1}{2z_0} y_1^2 \right] \exp \left[\frac{ik_2}{2d} (x_2^2 + y_2^2) \right] \times \\ \times \exp \left[\frac{ik_2}{2z_1} (x_2 - x_3)^2 \right] dx_1 dy_1 dx_2 dy_2. \quad (8)$$

Здесь d — расстояние между плоскостью голограммы и положением фокуса расходящегося восстанавливающего светового пучка; k_2 — величина волнового вектора восстанавливающего поля.

Для того чтобы выражение (8) отвечало распределению поля на объекте, необходимо выполнить следующие соотношения, определяющие расстояния z'_{1y} и z'_{1x} до восстановленного изображения по координатам Y_3 и X_3 :

$$\frac{k_2}{z'_{1x}} = \frac{k_1}{z_0} (\beta q)^2 + \frac{k_2}{d}; \quad (9)$$

$$\frac{k_2}{z'_{1y}} = \frac{k_1}{z_1} q^2 + \frac{k_2}{d}. \quad (10)$$

Таким образом, непосредственно из (9) следует, что расстояние до восстановленного изображения по оси X получается таким же, как при восстановлении с голограммы, полученной при голографировании объекта, на расстоянии z_0 и уменьшенной в βq раз. В измерении Y , как это видно из (10), расстояние до восстановленного изображения определяется обычным для трансформированных голограмм образом. Коэффициенты изменения поперечных размеров выражаются соответственно следующим образом:

$$M_x = \frac{k_1 z'_{1x}}{k_2 z_0} \beta q; \quad (11)$$

$$M_y = \frac{k_1 z'_{1y}}{k_2 z_1} q. \quad (12)$$

Вследствие того, что z'_{1x} и z'_{1y} неодинаковы, возникают большие аберрации восстановленного изображения. Разница в величинах M_x и M_y приводит к трансформации изображения в измерении X . Для устранения указанных аберраций необходимо, очевидно, выполнить следующее условие:

$$\frac{z_0}{z_1} = \beta^2. \quad (13)$$

Однако при этом сохраняется трансформация изображения в измерении X . Устранение этой трансформации достигается, в частности, в случае, когда

$$\beta = 1; \quad z_1 = z_0. \quad (14)$$

Отступление от условия (13) возможно, если учесть глубину резкости $\Delta z'$ восстановленного изображения

$$|z'_{1x} - z'_{1y}| \leq \Delta z'. \quad (15)$$

Подставляя в (15) значения для z'_{1x} и z'_{1y} из (9) и (10), получаем

$$\frac{qM |z_1 \beta^2 - z_0|}{\frac{k_1}{k_2} (q\beta)^2 + \frac{z_0}{d}} \leq \Delta z'. \quad (16)$$

Глубину резкости можно выразить [4] через параметры схемы голографирования:

$$\Delta z' = \frac{z_1}{L} M_{\text{прод}} \Delta,$$

где $M_{\text{прод}} = \frac{k_2}{k_1} M_{\text{попер}}^2$; Δ — величина допустимого размытия изображения точки, которая определяется требуемой разрешающей способностью.

Экспериментальная проверка полученных выводов производилась с помощью установки, схема которой изображена на рис. 2. Здесь в качестве излучателя используется высокочастотный громкоговоритель,

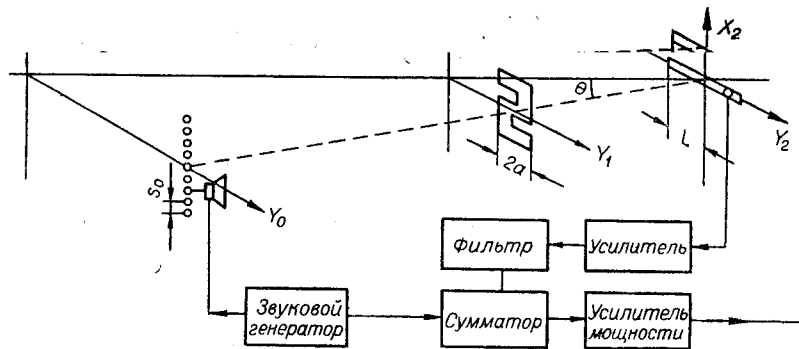


Рис. 2.

который имеет возможность последовательно перемещаться по вертикали в пределах 130 см с шагом s_0 , величина которого выбирается в зависимости от условий эксперимента. Напряжение с частотой 16 кГц подается на излучатель от звукового генератора. В поле излучения находится объект, представляющий собой вырезанный в непрозрачном экране транспарант в виде цифры 5.

Регистрация поля, проходящего через транспарант при каждом новом положении излучателя, регистрируется направленным конденсаторным микрофоном, сканируемым в пределах $2L=65$ см по линии вдоль оси Y_2 . Такая замена линейки приемников одним сканируемым приемником не меняет общности полученных выше выводов. Сигнал с микрофона подается через усилитель на суммирующее устройство.

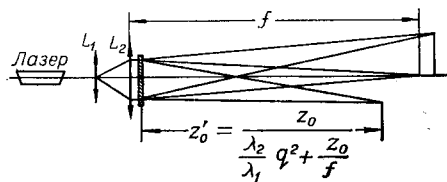


Рис. 3.

На это же устройство поступает сигнал от генератора, питающего излучатель, что отвечает случаю электрического моделирования плоской опорной волны. Суммарный сигнал поступает через усилитель мощности на источник света, который перемещается непрерывно по горизонтали синхронно с микрофоном, а по вертикали — с шагом s_2 одновременно с перемещением излучателя. Интенсивность свечения регистрируется на

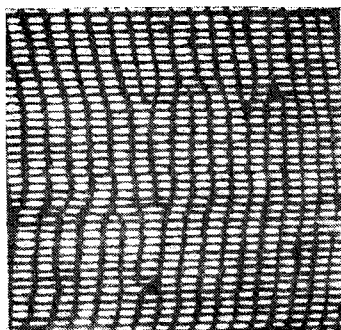


Рис. 4.

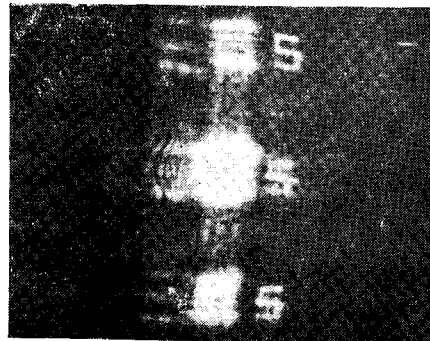


Рис. 5.

пленке с помощью фотоаппарата, сфокусированного на плоскость, в которой перемещается источник света.

Акустическая голограмма, зарегистрированная таким способом на фотопленке, уменьшилась затем до размеров 6×6 мм и освещалась пучком света гелий-неонового лазера, как это показано на рис. 3. Здесь линзы L_1 и L_2 формируют сходящийся пучок с фокусным расстоянием f , величину которого можно менять за счет расстояния между линзами.

На рис. 4 приведена фотография акустической голограммы, а на рис. 5 — фотография восстановленного с ее действительного изображения при выполнении условия (13), которое обеспечивает устранение рассмотренных в данной работе aberrаций. Параметры схемы голографирования: $z_1 = 80$ см; $\beta = 1,4$; $s_2 = 2,1$ см; $2a = 30$ см; $\theta = 45^\circ$.

Для сравнения на рис. 6 приведена фотография действительного изображения, восстановленного с акустической голограммы, которая получена при сканировании приемником в пределах реальной апертурной плоскости, аналогичной по размерам синтезируемой. Таким образом, изображения, восстанавливаемые с акустических голограмм, полученных при синтезировании апертуры с учетом полученных в данной работе соотношений, не уступают по качеству изображениям, восстановленным с обычных акустических голограмм.

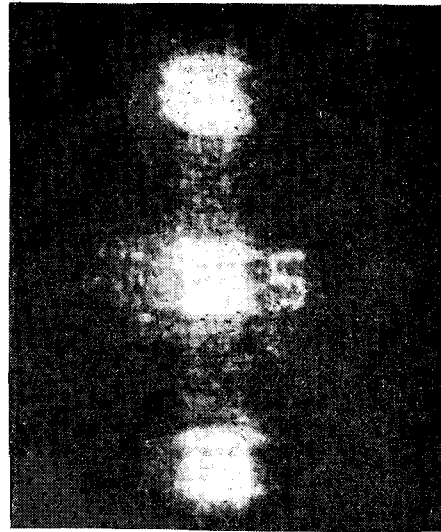


Рис. 6.

ЛИТЕРАТУРА

1. W. H. Wells. Acoustical imaging with linear transducer arrays Acoustical holography, v. 2. N.-Y., Plenum Press, 1970.
2. Ю. Н. Денисюк, М. М. Пархоменко. Об одном следствии теоремы взаимности в голографии. — Оптика и спектроскопия, 1968, т. 25, № 2.
3. A. F. Metherell, H. M. A. El-Sum. Simulated Reference in a Coarsely Sampled Acoustical Hologram. — Applied Physics Letters, 1967, v. 11, № 11.
4. Б. Н. Бегунов, Н. П. Закаэнов. Теория оптических систем. М., Машиностроение, 1973.

Поступила в редакцию 17 июля 1973 г.