

ИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ

534

## УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ГОЛОГРАФИЯ

## ВВЕДЕНИЕ

Ультразвуковая (УЗ) или акустическая голография, так же как оптическая, радио- и другие виды голографии, представляет собой двухступенчатый процесс получения информации об объектах за счет восстановления этой информации из УЗ интерференционной картины (голограммы), создаваемой опорной волной и волной, облучающей предмет. При сравнении УЗ голографии<sup>1-17</sup> с другими видами голографии (см., например, <sup>18-20</sup>) следует отметить, что ее особенности в основном связаны со спецификой записи и реконструкции голограмм в УЗ диапазоне. В силу способности УЗ волн распространяться в непрозрачных средах с помощью УЗ голографии возможно получение изображений невидимых предметов<sup>1, 21-26</sup>, внутренних органов живых организмов<sup>27-28</sup>, дефектов в изделиях<sup>1, 21-23</sup>, изображений источников УЗ излучения<sup>29-30</sup> и т. д. Кроме указанных областей применения УЗ голографии представляют интерес попытки использования методов УЗ голографии для моделирования живых организмов, например<sup>31</sup>, где представлена модель эхолокационного аппарата китообразных животных.

Настоящий обзор посвящен анализу методов УЗ голографии и рассмотрению некоторых областей ее применения. В обзор включены работы, появившиеся в печати до 1 января 1971 г.

## 1. НЕКОТОРЫЕ ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Общая схема получения информации голографическими методами в случае УЗ голография<sup>1, 18, 19</sup>, как и в случае других видов голографии, сводится к восстановлению записанной интерференционной картины (голограммы) двух монохроматических и взаимно когерентных волн  $U_R$  и  $U_0$ , первая из которых может рассматриваться как опорная волна, а вторая как предметная. Коэффициент пропускания  $t$  такой голографической записи пропорционален интенсивности  $I$  суммы этих волн, зафиксированной на каком-либо носителе, чувствительном к УЗ излучению:

$$t = \beta I = \beta [(U_0 + U_R)(U_0 + U_R)^*],$$

где множитель  $\beta$  характеризует записывающую среду.

Восстановление (реконструкция) голограммы происходит за счет освещения ее волной  $U_C$ . В результате взаимодействия освещающей волны  $U_C$  с голограммой после нее, кроме составляющих, пропорциональных опорной и предметной исходным волнам, появляются также и составляющие, пропорциональные действительной  $U_0$  и комплексно-сопряженной  $U_0^*$  предметной волне. Таким образом, информация, содержащаяся в исходной предметной волне  $U_0$ , после голограммы восстанавливается.

В УЗ голографии предложен ряд способов формирования и реконструкции голограмм:

а) Запись УЗ голограммы на какой-либо поверхности за счет ее деформации и реконструкция с помощью отраженного от такой деформированной поверхности излучения ОКГ<sup>3, 32-40</sup>. Схема подобной записи и реконструкции представлена на рис. 1. Преимуществом подобного метода записи является одновременность фиксации всей УЗ голограммы на поверхности, однако подверженность такой голограммы влиянию самых незначительных поверхностных вибраций и натяжений ограничивает применение этого метода лабораторными условиями.

б) Запись УЗ голограммы по точкам с помощью сканируемого УЗ приемника или источника за счет преобразования этой голограммы в оптическую голограмму. Реконструкция полученной оптической голограммы производится обычными методами. Подобная запись УЗ голограммы может осуществляться с помощью одного

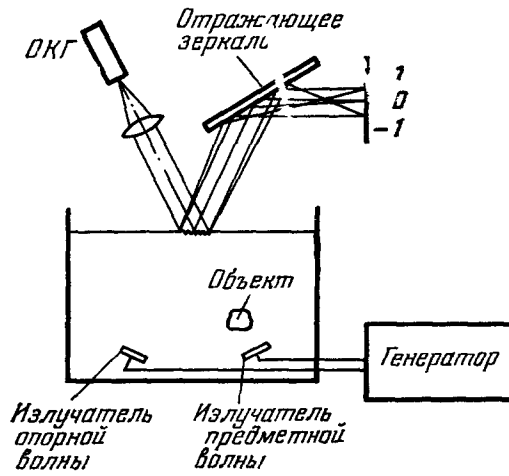


Рис. 1. Голографирование на поверхности жидкости.

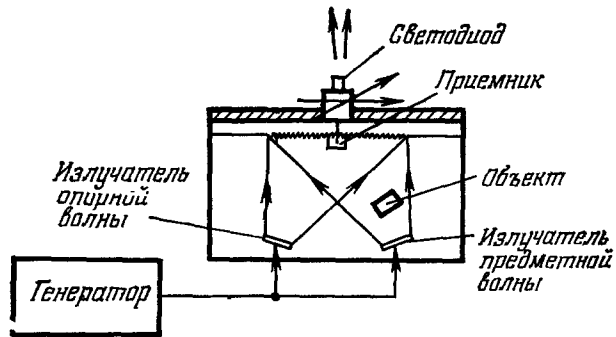


Рис. 2. Голографирование со сканирующим приемником.

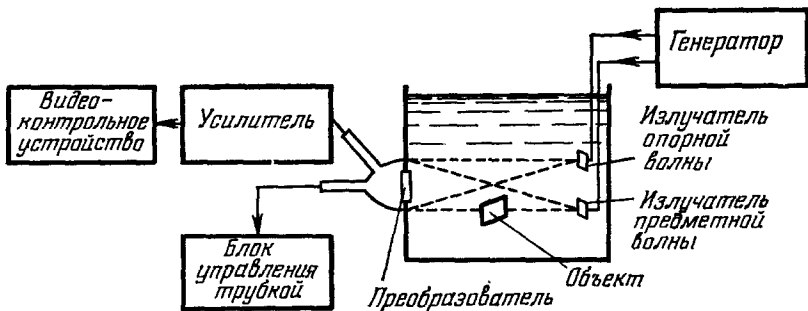


Рис. 3. УЗ голографическая камера.

сканируемого пьезопреобразователя <sup>33, 37, 38, 41-44</sup> с модуляцией излучения светодиода (рис. 2). Для аналогичных целей применяется также матрица пьезопреобразователей <sup>45</sup>, сопряженная с соответствующей матрицей светодиодов. В обоих случаях возможна замена светодиодов, как источников вторичного излучения, электронно-лучевой трубкой (ЭЛТ).

Разновидностью этого метода является построение оптической голограммы, эквивалентной исходной УЗ голограмме, с помощью электронно-акустического преобразователя (рис. 3) <sup>45, 46, 51-53</sup>.

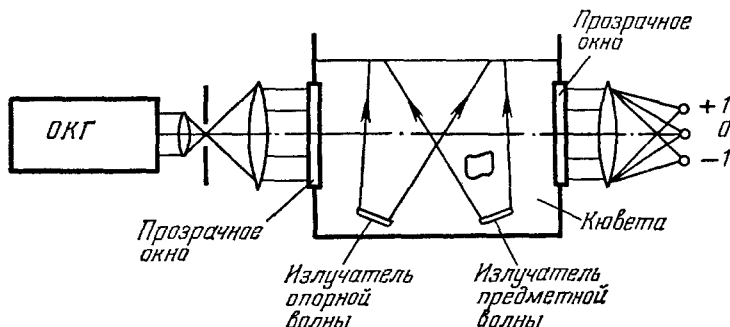


Рис. 4. Голографирование при помощи дифракции света на УЗ голограмме.

В ходе исследований различных УЗ голограмм со сканированием было выяснено, что получение таких голограмм значительно упрощается при замене реальной УЗ опорной волны электрическим сигналом <sup>1, 45-50</sup>, представляющим собой искусственную опорную волну. В качестве такого сигнала используется электрический сигнал, питающий излучатель предметной волны. В этом случае процесс формирования голограммы происходит в электрическом тракте.

в) Запись УЗ голограммы за счет дифракции света на УЗ интерференционной картине, соответствующей этой голограмме (рис. 4) <sup>54</sup>. Преимуществом подобного метода является его динамичность, так как изображение получается одновременно с формированием УЗ голограммы.

Приведенное деление методов УЗ голографирования основывается на схематических различиях процесса записи и реконструкции. Кроме такой классификации, УЗ голограммы, как и оптические голограммы, в зависимости от толщины записывающей среды и расстояния между соседними интерференционными полосами можно разделить на плоские и объемные <sup>18-19</sup>. Для плоских голограмм их толщина соизмерима с расстоянием между полосами, для объемных толщина среды значительно больше этого расстояния.

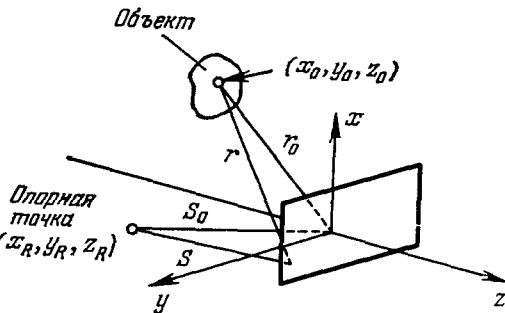


Рис. 5. Схема записи голограммы.

В свою очередь все голограммы, в зависимости от взаимного расположения источника излучения, объекта и места формирования голограммы, делятся на френелевские и фраунгоферовские. Разновидностью последних являются фурье-голограммы.

Приведем некоторые соотношения, справедливые для различных голограмм <sup>19</sup>.

1.1. Плоская френелевская голограмма формируется при близком расположении объекта к плоскости голограммы для сферических предметной и опорной волн. Пусть предметная и опорная волны (рис. 5) имеют вид

$$u_0 = U_0(x, y) e^{i\varphi_0(x, y)}, \tag{1,1}$$

$$u_R = U_R(x, y) e^{i\varphi_R(x, y)}, \tag{1,2}$$

где  $\varphi_0(x, y)$ ,  $\varphi_R(x, y)$  — пространственные фазовые изменения. Коэффициент пропускания голограммы

$$t(x, y) = \beta [U_0^2 + U_R^2 + U_0 U_R e^{i(\varphi_0 - \varphi_R)} + U_0 U_R e^{-i(\varphi_0 - \varphi_R)}]. \tag{1,3}$$

Если для реконструкции используется волна вида

$$\mathcal{U}_C = U_C(x, y) e^{i\varphi_C(x, y)},$$

то после голограммы (1,3) будут присутствовать следующие составляющие:

$$\psi(x, y) = \beta [U_C U_0^2 e^{i\varphi_C} + U_C U_R^2 e^{i\varphi_C} + U_C U_0 U_R e^{i(\varphi_C + \varphi_0 - \varphi_R)} + U_C U_0 U_R e^{i(\varphi_C - \varphi_0 + \varphi_R)}]. \quad (1,4)$$

Выражение (1,4) является общим уравнением. Характер фазовых множителей определяет тип голограммы.

Наглядное представление для координат действительного и сопряженного восстановленного изображения в выражении (1,4) возможно в простейшем случае, когда оба источника (1,1) и (1,2) излучают сферические волны:

$$U_0(x, y) e^{i\varphi_0(x, y)} = B \frac{e^{ikr}}{r}, \quad (1,5)$$

$$U_R(x, y) e^{i\varphi_R(x, y)} = A \frac{e^{iks}}{s}, \quad (1,6)$$

причем координаты для  $r$ ,  $r_0$ ,  $s$ ,  $s_0$  (см. рис. 5) определяются следующими выражениями:

$$\left. \begin{aligned} r &= [(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + z_0^2]^{1/2}, \\ r_0 &= (x_0^2 + y_0^2 + z_0^2)^{1/2}, \\ s &= [(x-x_R)^2 + (y-y_R)^2 + z_R^2]^{1/2}, \\ s_0 &= (x_R^2 + y_R^2 + z_R^2)^{1/2}. \end{aligned} \right\} \quad (1,7)$$

Радиус  $Z$  и координаты центра  $X$ ,  $Y$  сферической волны, восстановленной по голограмме при идентичности опорной и восстанавливающей волн, связаны с координатами (1,7) следующими выражениями: для действительного изображения

$$Z_P = z_0, \quad X_P = x_0, \quad Y_P = y_0$$

и для сопряженного изображения

$$Z_C = -z_0, \quad X_C = \frac{2x_R z_0 - x_0 z_R}{2z_0 - z_R}, \quad Y_C = \frac{2y_R z_0 - y_0 z_R}{2z_0 - z_R}.$$

В случае неидентичности опорной и восстанавливающей волн координаты реконструированного изображения зависят от углов между направлениями распространения этих волн.

1.2. Плоская фраунгоферовская голограмма может быть сформирована в случае, когда размеры объекта малы по сравнению с расстоянием до плоскости голограммы. Обычно в силу трудностей формирования голограмм вдали от объекта плоскость записи приближают с помощью линзы. Такую голограмму называют фурье-голограммой. Наглядные результаты в случае фурье-голографии получают для одномерного случая <sup>10</sup>:

$$\left. \begin{aligned} U_0(x) &= U_0 e^{-ikx \sin \alpha_0}, & U_R(x) &= U_R e^{-ikx \sin \alpha_R}, \\ t(x) &= \beta [U_0^2 + U_R^2 + U_0 U_R e^{-ikx(\sin \alpha_0 - \sin \alpha_R)} + \\ & & & + U_0 U_R e^{-ikx(\sin \alpha_R - \sin \alpha_0)}], \\ U_C(x) &= U_C e^{-ikx \sin \alpha_C}, \\ \Psi(x) &= \beta [U_C U_0^2 e^{-ikx \sin \alpha_C} + U_C U_R^2 e^{-ikx \sin \alpha_C} + \\ & & + U_C U_0 U_R e^{-ikx(\sin \alpha_0 - \sin \alpha_R + \sin \alpha_C)} + \\ & & + U_C U_0 U_R e^{-ikx(\sin \alpha_R - \sin \alpha_0 + \sin \alpha_C)}]. \end{aligned} \right\} \quad (1,8)$$

Первые два члена в (1,8) представляют нулевые составляющие. Третий и четвертый — составляющие первых порядков, распространяющиеся в направлениях, симметричных нулевому порядку. При  $\alpha_C = \alpha_R$  третий член представляет реконструированную волну объекта.

1.3. Плоская фазовая голограмма отличается от описанных выше амплитудно-фазовых голограмм тем, что запись проявляется либо в изменении коэффициента преломления записывающей среды, либо в изменении толщины (рельефа). Рассматривая одномерный случай, имеем

$$U_0(x) = U_0 e^{i\varphi_0(x)}, \quad U_R(x) = U_R e^{i\beta R},$$

где  $\beta R = k \sin \alpha_R$ . Комплексная функция передачи фазовой голограммы имеет вид

$$t(x) \approx t_0 \exp \left[ i \left( U_0^2 + U_R^2 + \frac{\pi}{2} \right) \right] J_1(2U_0 U_R) e^{i(\varphi_0 - \beta x)}.$$

Освещая фазовую голограмму волной  $U_C(x) = U_R(x)$ , получим следующее выражение для восстановленной волны, справедливое в случае малых значений аргумента бесселевой функции:

$$\psi_D(x) \approx \frac{t_0}{2} e^{i \left( U_0^2 + U_R^2 + \frac{\pi}{2} \right)} U_0^2 U_R e^{i\varphi_0}. \quad (1,9)$$

Следует отметить высокую дифракционную эффективность фазовых голограмм, доходящую до 30% и более. Эффективность обычных голограмм не превышает 6%.

1.4. Объемная голограмма. В случае такой голограммы интерференционные полосы формируются по глубине записывающей среды. В зависимости от величины угла между предметной и опорной волнами различают следующие типы объемных голограмм: угол меньше  $10^\circ$  — голограмма близка к двумерной голограмме; угол от  $10$  до  $120^\circ$  — общий случай; угол  $120-180^\circ$  — отражательная голограмма.

Остановимся на последнем типе голограмм. Пусть

$$U_0 = U_0(x, y, z) e^{i\varphi_0(x, y, z)}, \quad U_R = U_R(x, y, z) e^{i\varphi_R(x, y, z)}.$$

Результирующая интенсивность стоячей волны, образованной этими волнами,

$$I = U_0^2 + U_R^2 + 2U_0 U_R \cos \delta,$$

где  $\delta = \varphi_0 - \varphi_R$ .

Представим записывающую среду состоящей из тонких слоев, и для каждого слоя величина  $\delta$  постоянна. Волна, отраженная слоем

$$d\psi = b (U_C U_R \sin \delta d\delta e^{-i\delta}) U_0 e^{i\varphi_C},$$

пропорциональна первоначальной волне от объекта. Суммарная волна, отраженная голограммой, имеет вид <sup>19</sup>

$$\Psi(r) = \frac{-ik U_C U_0(r)}{2} (\rho_2 - \rho_1) \int_{k - \frac{\Delta k}{2}}^{k + \frac{\Delta k}{2}} U_R(k') e^{ih'L(r)} dk', \quad (1,10)$$

где  $\Delta k = \frac{2\pi}{\rho_2 - \rho_1}$ ,  $\rho_1, \rho_2$  — оптический путь между двумя лучами,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $L(r)$  — функция, описывающая оптический путь света и удовлетворяющая уравнению эйконала.

Таким образом, волна света, отраженная от такой голограммы, состоит из набора различных волн. Их фазы согласуются с фазами волн, отраженных объектом, их амплитуды пропорциональны амплитуде волны от объекта и величине пути  $\rho_2 - \rho_1$ , который реконструирующая волна проходит через голограмму. Это свойство позволяет восстанавливать такие голограммы в белом свете.

1.5. Параметры УЗ голограмм. При рассмотрении параметров УЗ голограмм можно отметить наличие двух подходов. Первый подход основан на рассмотрении голограммы как элемента оптической системы <sup>18, 19, 61-63</sup>, например как линзы, составной зонной пластины и т. п., которому свойственны величины продольного и поперечного увеличений, глубина поля, координаты восстановленного изображения, абберации, разрешающая способность и др. При втором — голограмма рассматривается как устройство для записи и воспроизведения информации, например как устройство динамической памяти, согласованный фильтр и др. <sup>18, 33, 64</sup>. В этом случае голограмму характеризуют величиной вносимых ею в реконструируемое изображение амплитудно-фазовых искажений, влиянием ее характеристик на передачу информации, скоростью записи и считывания и др. Подобное деление является условным и связано, по-видимому, с индивидуальными вкусами исследователей.

Наиболее часто приводятся формулы, определяющие продольное и поперечное увеличение изображения при восстановлении УЗ голограмм. Они имеют следующий вид (см., например, <sup>48</sup>):

$$M_{\text{прод}} = m \left( \frac{u' - v'}{u'} \right) \left( \frac{u}{u - v} \right),$$

$$M_{\text{попер}} = \left( \frac{\mu}{m^2} \right) \left( \frac{1}{v^2} \right) \left[ \left( \frac{\mu}{m^2} \right) \left( \frac{u - v}{uv} \right) + \left( \frac{1}{u'} \right) \right]^{-2},$$

где  $\mu = \frac{\lambda_{\text{св}}}{\lambda_{\text{уз}}}$ ,  $v$ ,  $u$  — радиусы кривизны соответственно предметной и опорной волн,  $v'$ ,  $u'$  — расстояние от голограммы до действительного изображения и до источника,  $m$  — масштабный множитель

## 2. АНАЛИЗ МЕТОДОВ УЗ ГОЛОГРАФИИ

В предыдущем разделе были упомянуты три типа УЗ голограмм: голограммы, сформированные за счет деформации поверхности, голограммы со сканированием, использующие как реальный, так и синтезированный опорный луч, и голограммы, полученные за счет дифракции света на ультразвуковой картине. Рассмотрим особенности формирования этих голограмм.

2.1. При использовании в качестве среды для записи УЗ голограмм какой-либо поверхности последней является квадратичным детектором, регистрирующим распределение давления в УЗ поле в виде всплесков и впадин. По своей идее метод формирования УЗ голограммы на поверхности совпадает с давно известными методами рельефа для визуализации звуковых изображений <sup>65</sup>. В качестве поверхности для записи УЗ голограммы наиболее часто применяется граница раздела жидкость — газ <sup>34, 36</sup>. Считывание УЗ голограммы при таком методе записи производится лазерным лучом. Кроме границы раздела жидкость — газ подобная запись информации возможна и на поверхности твердых тел <sup>38</sup>. К этому типу УЗ голограмм можно отнести голограммы, регистрируемые на поверхности пьезопреобразователя (например, кварца), в электронно акустической камере.

Для анализа формирования и реконструкции УЗ голограммы на поверхности представим предметную и опорную волну в следующем виде <sup>66</sup>:

$$U_0(x, y, z) = p_0 \exp [i(\eta_s y + \xi_s z)], \quad (2,1)$$

$$U_R(x, y, z) = p_R \exp [i(\eta_s y + \xi_s z)], \quad (2,2)$$

где  $\eta_s = (2\pi/\Lambda) \sin \theta_s$ ,  $\xi_s = (2\pi/\Lambda) \cos \theta_s$ ,  $p$  — давление,  $\theta_s$  — углы между нормалью к поверхности и направлением прихода волны. На поверхности  $z=0$ , где образуется голограмма, выражения (2,1) и (2,2) принимают вид

$$U_0(x, y) = p_0(x, y) \exp \{i[-\eta_s y - \varphi(x, y)]\}, \quad (2,3)$$

$$U_R(x, y) = p_R \exp(i\eta_s y). \quad (2,4)$$

Соответствующее распределение интенсивности от предметной и опорной волн находится по (2,3) и (2,4) следующим образом:

$$I(x, y) = (U_0 + U_R)^2 / 2\rho V,$$

где  $\rho$  — плотность жидкости,  $V$  — скорость ультразвука в жидкости. Выражение, описывающее УЗ голограмму, сформированную на поверхности, находится из решения уравнения баланса и имеет следующий вид:

$$z(x, y) = A [\exp(i(2\eta_s y + \varphi)) + \exp(-i(2\eta_s y + \varphi))] + B, \quad (2,5)$$

где

$$A = A(x, y) \approx \frac{P_R P_0(x, y)}{4\rho V^2 \eta_s^2}, \quad B = B(x, y) = \frac{P_R^2 + P_0^2(x, y)}{g\rho_0^2 V^2},$$

$g$  — ускорение силы тяжести,  $\rho_0$  — поверхностное натяжение.

Сформированная УЗ голограмма может реконструироваться либо в реальном времени за счет освещения поверхности светом ОКГ, либо фотографироваться и затем восстанавливаться как обычная оптическая голограмма. Если угол между нормалью к поверхности и направлением распространения освещающего луча составляет  $\theta_l$ , то при достаточно малых величинах  $z(x, y)$  по (2,5) изменение фазы можно принять равным  $2\xi_l z$  и отраженный сигнал представить так:

$$U(x, y, z) = D \exp(2i\xi_l z) \exp[4i\xi_l A \cos(2\eta_s y + \varphi)] \exp[i(\eta_l y + \xi_l z)]. \quad (2,6)$$

Более наглядное физическое представление последнее уравнение приобретает, если воспользоваться выражением

$$\exp(i\sigma \cos \alpha) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} i^n J_n(\sigma) e^{-in\alpha},$$

с помощью которого формула (2,6) преобразуется следующим образом:

$$U(x, y, z) = D \exp\{i\xi_l [z + 2B(x, y)]\} \sum_{n=-\infty}^{\infty} i^n J_n(4\xi_l A(x, y)) \exp\{i[(\eta_l - 2n\eta_s)y - n\varphi(x, y)]\}. \quad (2,7)$$

Каждый член суммы соответствует одной из дифракционных составляющих. Для достаточно малых значений величины  $4\xi_l A(x, y)$  можно использовать аппроксимацию выражения (2,7) составляющими нулевого и первых порядков:

$$U(x, y) = D \exp\{i\xi_l [z + 2B(x, y)]\} \{ \exp(i\eta_l y) + 2i\xi_l A(x, y) \exp\{i[(\eta_l + 2\eta_s)y - \varphi(x, y)]\} + 2i\xi_l A(x, y) \exp\{i[(\eta_l + 2\eta_s)y + \varphi(x, y)]\} \}. \quad (2,8)$$

Второе слагаемое в (2,8) подобно по своему виду выражению, описывающему предметную волну. Если угол падения освещающего луча выбрать таким, чтобы  $\eta_l = \eta_s$ , то интенсивность отраженного света  $UU^*$  будет пропорциональна интенсивности акустической волны  $U_0 U_0^*$ . При этом мнимое изображение будет формироваться в +1-дифракционном максимуме, а действительное — в -1. Условие  $\eta_l = \eta_s$  не является критичным, и хорошее изображение с малыми искажениями создается почти при всех  $\eta_l$ . Улучшение качества УЗ голограмм на поверхности жидкости достигается при использовании импульсного режима излучения, а также защитой от помех в виде поверхностных волн и акустических потоков участка поверхности, где сформирована УЗ голограмма.

2.2. УЗ голограммы со сканированием. Первые голограммы подобного вида были созданы с механическим или с электронным сканированием приемника (или считывающего электронного луча) при использовании реальной опорной волны<sup>72, 73</sup>. Возможно сканирование излучателя и приемника при неподвижном объекте<sup>24</sup>, сканирование только приемника<sup>41</sup>, сканирование излучателя<sup>41</sup>. Эквивалентность последних вариантов следует из теоремы взаимности<sup>3, 67</sup>.

В дальнейшем широкое распространение нашли УЗ голограммы со сканированием, реализуемые при замене реальной опорной волны синтезированной волной, формируемой непосредственно из электрического сигнала, питающего излучатель предметной волны<sup>46, 47, 68, 69</sup>. Метод синтеза опорной волны также нашел применение в электроакустической камере со считыванием информации электронным лучом с пьезоэлектрической пластины и с последующим построением оптической голограммы на экране электронно-лучевой трубки<sup>45, 51</sup>.

Удобство формирования опорной волны в электрических цепях состоит прежде всего в возможности реализации с помощью не очень сложных электронных устройств опорной волны с требуемыми характеристиками. Например, в работе<sup>48</sup> описывается использование плоской и сферической опорной волн. Возможна динамическая регулировка и коррекция параметров опорной волны в процессе формирования УЗ голограммы<sup>50</sup> и т. п.

Анализ УЗ голографирования при использовании синтезированной опорной волны, называемый также голографированием с временной опорной волной, приведен в ряде работ<sup>46, 47, 69</sup>. Так, в работе<sup>46</sup> анализ проводился в предположении, что объект с координатами  $x, y, z$  облучается когерентной монохроматической УЗ волной частоты  $\omega$ . Отраженная волна с амплитудой  $A_1$  и фазой  $\varphi_1$  содержит информацию об объекте:

$$U_1(x, y, z) = A_1(x, y, z) \exp[i(\omega t + \varphi_1(x, y, z))]. \quad (2,9)$$

В плоскости  $H(x_h, y_h, z_h)$ , где формируется УЗ голограмма (рис. 6), волна  $U_1$  детектируется линейным детектором. Если детектор позволяет получать информацию сразу со всей плоскости голограммы, то момент записи  $t = t_h$  постояен для каждой точки плоскости. Такой случай имеет место, например, при многоканальном матричном УЗ преобразователе. Случай отличающихся  $t_h$  для каждой точки плоскости  $H$  характерен для сканирующего УЗ приемника. Полученный сигнал  $A_1 \cos(\omega t_h + \varphi_1)$  суммируется с постоянным сигналом  $B$ , и результирующее колебание используется для модуляции источника света, излучение которого, записанное на фотоносителе, является оптической голограммой. Реконструкция такой голограммы происходит при освещении записанного сигнала оптическим колебанием

$$U_0 = A_0 \exp[i(\omega t + \varphi_0)]$$

с постоянной амплитудой и фазой  $\varphi_0$ , связанной с функцией  $t_h(x_h, y_h, z_h)$  выражением вида

$$\omega t_h = -\varphi_0. \quad (2,10)$$

После реконструкции

$$\psi = BU_0 + \frac{1}{2} A_0 U_1 + \frac{1}{2} A_0 A_1 \exp [i(\omega t - \varphi_1)] \exp (2i\varphi_0),$$

где последнее слагаемое содержит информацию об объекте (2,9).

Время записи каждой точки определяется из уравнения (2,10) и зависит от характера реконструирующей волны (формы фронта, длины волны) и от угла падения волны на плоскость голограммы.

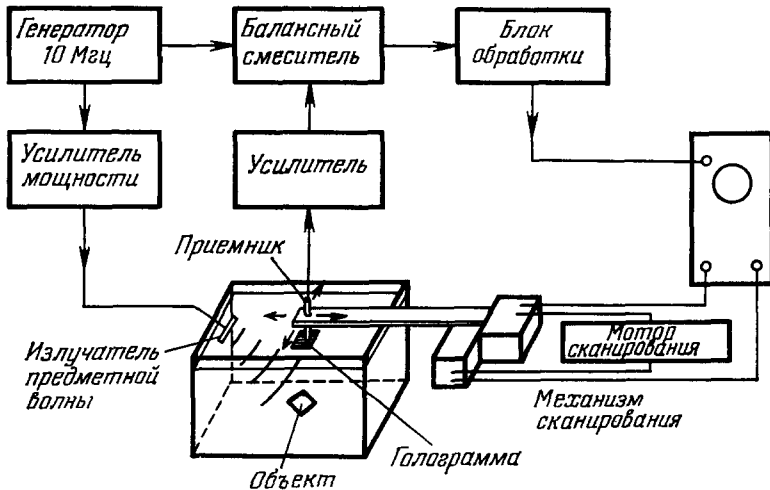


Рис. 6. Схема голографирования с синтезированной опорной волной.

В другой работе<sup>69</sup> по УЗ голографированию с помощью сканирующего приемника при синтезировании опорной волны анализ работы устройства проводится с использованием преобразования Фурье. Схема голографирования аналогична схеме, показанной на рис. 4. Предполагается, что фаза в любой точке плоскости  $H$  имеет вид

$$\varphi_1(x, y) = k[(x^2 + y^2 + R^2)^{1/2} - R] \approx k \left[ \frac{x^2 + y^2}{2R} \right],$$

где  $x, y, z$  — координаты отверстия в плоскости объекта и  $z = R$ .

При регистрации светового сигнала на фотоносителе записывается оптическая голограмма

$$t(x, y) = f_0^2 + |h(x, y)|^2 + 2f_0 h_0 \cos k \frac{(x^2 + y^2)}{2R}. \quad (2,11)$$

Учет влияния на голограмму апертурных ограничений, вызванных детектором, производится за счет перемножения  $t(x, y)$  на функцию  $a(x, y)$  вида

$$a(x, y) = 1, \quad |x| \leq x_0, \quad |y| \leq y_0, \\ a(x, y) = 0, \quad |x| > x_0, \quad |y| > y_0,$$

где  $\pm x_0, \pm y_0$  — границы апертуры.

В дальнейшем уравнение (2,11) преобразуется в плоскость пространственных частот  $\xi, \eta$  и может быть записано как сумма переменного и постоянного членов

$$T(\xi, \eta) = T_1 \sin \frac{\lambda R}{2\pi} (\xi^2 + \eta^2) + T_0 \delta(\xi, \eta).$$

Информацию о предмете содержит составляющая

$$T_A(\xi, \eta) = 4x_0, y_0 \left( \frac{\sin \xi x_0}{\xi x_0} \right) \left( \frac{\sin \eta y_0}{\eta y_0} \right) * T_1 \sin \frac{\lambda R}{4\pi} (\xi^2 + \eta^2).$$

Кроме рассмотренных выше работ по анализу УЗ голографирования с синтезированной опорной волной из работ в этой области можно указать также на работу<sup>45</sup>,



где приведен анализ электронно-акустического преобразователя с электрическим формированием опорного сигнала, на работу<sup>24</sup> по УЗ лоцированию, а также на работы<sup>70, 71</sup>, посвященные вопросу обработки информации при сканировании. Следует отметить, что в большинстве работ указывается, что использование синтезированной опорной волны в силу легкости формирования заданных характеристик этой волны является весьма перспективным направлением УЗ голографии.

2.3. УЗ голографирование за счет дифракции света. В основе этого метода лежит использование явления дифракции света в прозрачной среде, возмущенной ультразвуковыми колебаниями. Подробное теоретическое рассмотрение дифракции света на УЗ колебаниях содержится в работе<sup>74</sup>, а технические аспекты даны, например, в работе<sup>66</sup>. Согласно<sup>74</sup> продифрагированная световая волна может быть представлена набором плоских волн, каждая из которых имеет различное направление распространения. Анализ формирования изображения за счет дифракции света на УЗ колебаниях выполнен в ряде работ<sup>54-60, 66</sup>. В частности, еще в работах, посвященных дифракции света на стоячих ультразвуковых волнах, например<sup>65</sup>, показано, что согласно теории Рамана — Ната интенсивность света в  $k$ -м дифракционном максимуме определяется следующим выражением:

$$I_k = C' \sum_{s=-\infty}^{\infty} J_{k-s}^2 \left( \frac{a}{2} \right) J_s^2 \left( \frac{a}{2} \right),$$

где  $C'$  — амплитуда световой волны,  $a$  — амплитуда фазовой модуляции, возникающей в световой волне при изменении коэффициента преломления среды за счет УЗ колебаний. Угол отклонения луча света при прохождении УЗ волны определяется в виде

$$\theta = k \frac{l}{\Lambda} \Delta p,$$

где  $l$  — длина пути света в УЗ волне,  $\Delta p$  — изменение давления ультразвука,  $\Lambda$  — длина УЗ волны.

На основе использования явления дифракции света на УЗ волнах основан предложенный в работах<sup>56-57</sup> голографический метод исследования спектрального состава света, дифрагированного стоячими УЗ волнами. В качестве сигнальной волны использовался свет, прошедший через кювету с исследуемой УЗ стоячей волной, а в качестве опорной волны — свет, пропущенный через кювету с бегущей УЗ волной.

Анализ процесса получения изображения объектов с помощью брэгговской дифракции проведен в работах<sup>53, 54, 60</sup>. Сформулировано правило оптического изображения акустического поля для квазилинейного источника света и установлено соответствие между спектрами УЗ и оптического полей.

В случае неидеального линейного источника нарушение разрешимости деталей изображения оценивается как результат пространственной фильтрации УЗ спектра в процессе дифракции.

Оценивая работы по рассмотренному в данном разделе методу УЗ голографирования следует отметить их незавершенность по сравнению с работами, описанными в разделах 2.1 и 2.2. В основном они ограничиваются лишь оценками возможности использования этих эффектов, не касаясь таких практических вопросов, как искажения, коэффициент полезного действия, влияние посторонних засветок и т. п.

### 3. НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ УЗ ГОЛОГРАФИРОВАНИЯ

К настоящему времени в литературе по УЗ голографии сформировались два направления предполагаемого применения УЗ голографических устройств. К первому направлению можно отнести использование этих устройств для получения изображений различных предметов или самих источников УЗ излучения в непрозрачных средах (контроль качества изделий<sup>25, 51, 75, 79</sup>, геофизические и океанографические исследования<sup>76-79, 83</sup>, медицинская диагностика<sup>37, 79</sup>, обнаружение источников УЗ излучения<sup>7, 80, 81</sup> и т. п.)

Второе направление применения УЗ голографии — моделирование биологических систем, например создание моделей эхолокационного аппарата морских животных<sup>31</sup>.

Обе области весьма заманчивы, но пока ни одно из предложенных устройств УЗ голографирования не нашло широкого практического применения. Тем не менее к настоящему времени опубликовано большое число описаний установок для УЗ голографирования<sup>51, 82-86</sup>. Остановимся на некоторых наиболее типичных примерах. Генерирование и детектирование УЗ сигналов в этих системах производится обычными методами УЗ техники<sup>65, 87-89</sup> и в настоящем обзоре не обсуждается.

3.1. Установка для получения УЗ голограмм с реальной опорной волной<sup>76</sup>. Изображение предметов, погруженных в воду в этой

установке (рис. 7), создается за счет восстановления с помощью излучения ОКГ снятой по точкам оптической голограммы, соответствующей исходной амплитудно-фазовой УЗ голограмме.

При описании работы указывается, что голографирование производилось в импульсном режиме (длительность импульса 400 мксек, частота следования импульсов 50 гц, частота заполнения импульса 500 кГц). Для создания предметной и опорной волн использовались излучатели диаметром 10 мм, формирующие излучение с диаграммой направленности порядка 25°. Сканирующий приемный элемент (диаметр 20 мм, диаграмма направленности 180°) перемещался по площадке 250 × 250 мм<sup>2</sup>. Принятый

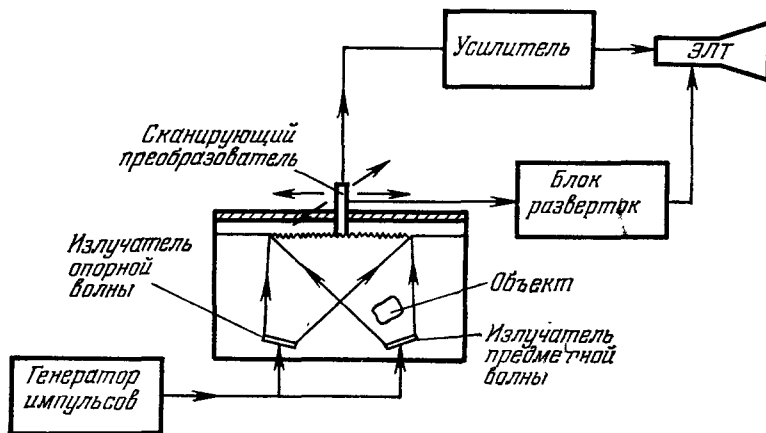


Рис. 7. Блок-схема установки для голографирования погруженных в воду предметов.

сигнал после усиления использовался для модуляции по яркости луча ЭЛТ, причем перемещение пятна на экране трубки происходило синхронно с перемещением приемного элемента.

В случае использования в качестве приемника прозрачной стеклянной пластинки, покрытой слоем термопластика<sup>94</sup>, УЗ голограмма может формироваться непосредственно на термопластике. Восстановление голограммы производится оптическими методами.

3.2. Установка для получения УЗ голограмм с синтезированием опорной волны<sup>48, 91</sup>. Изображение предметов создавалось за счет восстановления снятой по точкам оптической голограммы. Сигналы для модуляции источника света формировались в сумматоре, на который поступали сигналы с УЗ приемника, соответствующие предметной волне, и электрические колебания, эквивалентные синтезированной опорной волне.

Схема установки для голографирования в воздухе представлена на рис. 8. Голографирование происходило в непрерывном режиме на частоте 18 кГц. Расстояние от источника звука до приемника было выбрано равным 6 м. Приемником служил микрофон с апертурой 19 мм, которым сканировалась площадка 250 × 300 мм<sup>2</sup>. Положение микрофона синхронизовалось с положением пятна на экране ЭЛТ. Исследовалась амплитудно-фазовая и чисто фазовая УЗ голограмма. Для получения голограммы принятый сигнал поступал на один из входов суммирующего усилителя, причем в случае фазовой голограммы он дополнительно пропусклся через фазоформирующую цепь. Опорный электрический сигнал подавался на второй вход усилителя.

Примером установки для голографирования в воде с использованием искусственной опорной волны может служить установка, блок-схема которой изображена на рис. 6<sup>86, 90</sup>. Для облучения использовался сигнал с частотой 10 МГц.

Система, использующая приемную решетку, описана в<sup>95</sup>. Для излучения применялся узкий луч, сканирующий поверхность объекта, прием осуществлялся с помощью решетки при одновременном обзоре всего сектора сканирования. Предполагается, что принятые сигналы модулируются опорным сигналом и используются либо для управления электрооптическим модулятором света, либо для управления яркостью электронно-лучевой трубки.

3.3. УЗ голографическая камера (электронно-акустический преобразователь). Принцип действия ее основан на создании УЗ волной, падающей на поверхность пьезоэлектрического кристалла, на другой его стороне потенциального рельефа. Этот рельеф считается электронным лучом и регистрируется с помощью телевизионной камеры. Так, в работе<sup>52</sup> описывается УЗ

камера с реальной опорной волной (см. рис. 3) с использованием в качестве пьезопреобразователя кристалла кварца, диаметром 50 мм. Для облучения предмета и для формирования опорной волны использовались одинаковые преобразователи диаметром 6 мм с рабочим участком в 3 мм. Частота излучения была выбрана равной 7 Мгц. Угол между предметным и опорным лучами составлял 10°. Голографируемые предметы размещались на расстоянии 20 см от кварцевой пластины.

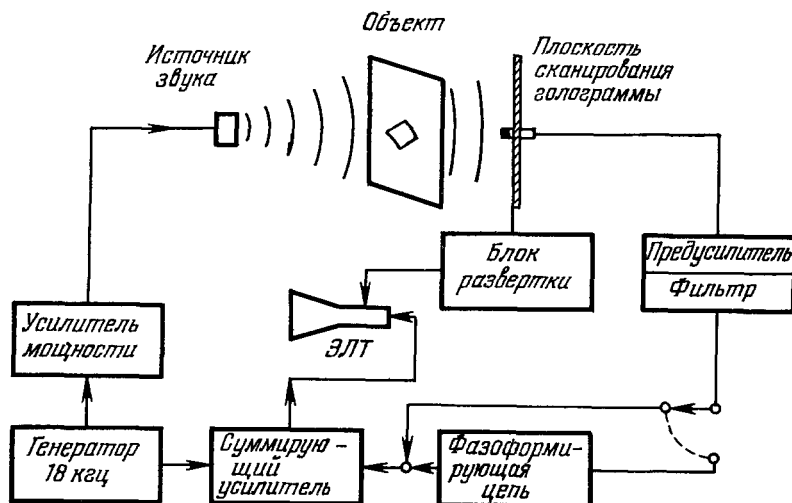


Рис. 8. Блок-схема установки с синтезированием опорной волны для голографирования в воздухе.

Более перспективное построение подобных УЗ камер состоит в использовании синтезированного опорного луча (рис. 9) <sup>45, 46, 52</sup>. При этом исключаются потери из-за наклонного падения предметной волны и упрощаются методы управления опорным колебанием.

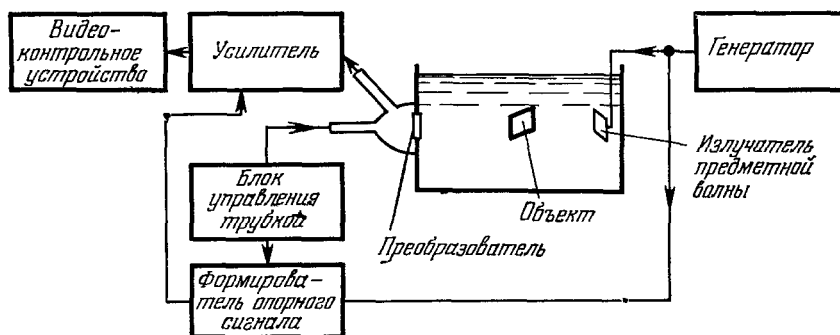


Рис. 9. Блок-схема УЗ голографической камеры с синтезированием опорной волны.

Восстановление полученных оптических голограмм, соответствующих исходным УЗ голограммам, производилось обычными методами <sup>18</sup> с использованием в качестве источника света гелий-неонового ОКГ, работающего на длине волны 632,8 нм в непрерывном режиме.

Весьма интересны эксперименты по восстановлению УЗ голограмм с помощью ЦВМ <sup>96</sup>. Голограмма разбивалась на 64 × 64 ячеек, и интенсивность почернения фотоматериала в каждой ячейке квантовалась по трем уровням. Величины почернения вместе с параметрами голографирования вводились в ЦВМ, и по ним рассчитывался фурье-образ, соответствующий действительному изображению объекта.

## 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ультразвуковая голография принадлежит к числу технических средств, с помощью которых человечество сможет получить ранее недоступную ему информацию в различных областях науки и техники.

В теоретическом и экспериментальном изучении этой области пока сделаны лишь первые шаги, но и они весьма многообещающи. Число работ по УЗ голографии непрерывно растет, и только за последние три года состоялись два симпозиума<sup>1, 2</sup>, посвященные исключительно этому виду голографии.

Поиск путей получения УЗ голограмм хорошего качества при медицинской диагностике, наблюдении невидимых предметов, изображений излучающих звук объектов и т. п. является задачей ближайших исследований.

*Р. Р. Красовский*

## ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Acoustical Holography. I, Proc. of the First Int. Symp., Plenum Press, N. Y., 1969 \*).
2. A. F. Metherell, H. M. El-Sum, JASA 42, 733 (1967) (см. перевод: Зарубежная радиоэлектроника, № 12, 28 (1968)).
3. A. F. Metherell, Science J. 4 (11), 57 (1968) (см. перевод: УФН 98, 525 (1969) или «Зарубежная радиоэлектроника», № 9, 60 (1969)).
4. E. L. Thurstone, JASA 45, 895 (1969).
5. D. Holt, J. R. Coldrick, Wireless World 75, 425 (1969).
6. D. Holt, Spectrum 57, 8 (1969).
7. D. C. Greene, JASA 46, 44 (1969).
8. D. C. Greene, B. P. Hildebrand, Ocean Ind. 4, 43 (1969).
9. D. C. Greene, B. P. Hildebrand, 1st Annual Offshore Technol. Conf. (Houston) 2, 201 (1969).
10. F. W. Holder, Electron World 83, 32 (1970).
11. E. Aisberg, Toutel'electronique 4 (344), 105 (1970).
12. D. Ensminger, Instr. and Control Syst. 42, 101 (1969).
13. E. E. Aldridge, Engineering 208, 71 (1969).
14. J. L. Kreuzer, Proc. Sympos. Mod. Optics, N. Y., 1967, p. 97.
15. J. Stambler, Industr. Res. 9, 30 (1967).
16. F. Closets, Sci. et avenir, Nr. 277, 215—223, 258, 261, 262 (1970).
17. J. Aoki, J. Instrum. Electron. and Commun. 51, 536 (1968).
18. Дж. Струок, Введение в когерентную оптику и голографию, М., «Мир», 1967.
19. H. M. Smith, Principles of Holography, Wiley-Interscience, New York—London—Sydney—Toronto, 1969.
20. Ю. И. Островский, Голография, М., «Наука», 1970.
21. J. L. Kreuzer, P. E. Vogel, A. H., ch. 5, p. 73.
22. Oceanology 8, 245 (1970).
23. Laser Focus 5, 40 (1969).
24. D. C. Greene, B. P. Hildebrand, Ocean Ind. 4, 47 (1969).
25. D. Silverman, Wavelet Reconstruction Process for Sonic, Seismic and Radar Exploration, Патент США, кл. 340-3, № 3400363.
26. A. Korpel, IEEE Spectrum 5, 45 (1968).
27. E. L. Thurstone, A. H., ch. 7, p. 113.
28. J. D. Redman, Non-Destruct. Test. 1, 360 (1968).
29. J. R. Coldrick, Proc. Joint Conf. on Lasers and Opto-Electronics, University of Southampton, IERE, London, 1969.
30. Oceanology 8, 245 (1970).
31. J. J. Dreher, A. H., ch. 8, p. 127.
32. Н. В. Вернов, В. Г. Прохоров, Изв. Ленингр. электротехн. ин-та, вып. 63, 33 (1968).
33. J. Halstead, Ultrasonics 6, 79 (1968).
34. R. V. Smith, B. V. Brenden, Ultrasonics 7, 125 (1969).
35. A. Korpel, P. Desmares, JASA 45, 881 (1969).
36. R. K. Mueller, P. N. Keating, A. H., ch. 3, p. 49.
37. C. Planta, Bull. Schweiz., electrotechn. Vereins 60, 93 (1969).
38. F. W. Holder, Electronics World 83, 32 (1970).
39. A. J. Slobodnik, Proc. IEEE 58, 488 (1970).
40. Jizuka Keigo, Appl. Phys. Lett. 16, 91 (1970).
41. A. F. Metherell, S. Spinak, Appl. Phys. Lett. 13, 22 (1968).
42. Y. Aoki, Bull. Fac. Eng. Hokkaido Univ., No. 54, 249 (1969).
43. Y. Aoki, Proc. IEEE 57, 358 (1969).

\*) В дальнейшем ссылка на<sup>1</sup> будет обозначена только начальными буквами А. Н.

44. Y. A o k i, J. Appl. Phys. 40, 2294 (1969).
45. R. K. M u e l l e r et al., Appl. Optics 8, 1537 (1969).
46. A. F. M e t h e r e l l et. al., Appl. Optics 8, 1543 (1969).
47. A. F. M e t h e r e l l, M. A. E l - S u m, Appl. Phys. Lett. 11, 20 (1967).
48. L. L a r m o r e et. al., Appl. Optics 8, 1533 (1969).
49. R. B. M a s A n a l l y, Appl. Phys. Lett. 11, 266 (1967).
50. R. K. M u e l l e r et. al., Appl. Phys. Lett. 12, 394 (1968).
51. E. M a r o n et. al., Appl. Phys. Lett. 12, 26 (1968) (см. перевод: Зарубежная радио-электроника, № 10, 132 (1969)).
52. D. F r i t z l e r et. al., A. H., ch. 16, p. 249.
53. A. K o r p e l, IEEE Spectrum 5, 45 (1968).
54. A. K o r p e l, IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics 15, 153 (1968).
55. A. A l i p p i, L. P a l m i e r i, Acustica 20, 84 (1968).
56. A. A l i p p i, L. P a l m i e r i, Acustica 21, 104 (1969).
57. A. A l i p p i, L. P a l m i e r i, JASA 46 (pt. 2), 1121 (1969).
58. U. M i t s u h i r o, S. T a k u s o, Bull. Tokyo Inst. Technol., No. 92, 21 (1969).
59. U. M i t s u h i r o, S. T a k u s o, Trans. Soc. Instr. and Contr. 5, 73 (1969).
60. A. K o r p e l, A. H., ch. 10, p. 149.
61. J. R. C o l d r i c k, D. H o l t, Electron. Lett. 5, 168 (1969).
62. Y. A o k i, A. H., ch. 15, p. 223.
63. O. K. M a w a r d i, A. H., ch. 13, p. 187.
64. A. M. S h e r w o o d, Proc. IEEE 58, 268 (1970).
65. Л. Б е р г м а н, Ультразвук и его применение в науке и технике, М., ИЛ, 1956.
66. В. В. В р е н д е н, A. H., ch. 4, p. 57.
67. V. J. N e e l y, Phys. Letts. A28, 475 (1969).
68. R. L. W h i t m a n, Appl. Opt. 9, 1375 (1970).
69. J. M. S m i t h, N. F. M o o d y, A. H., ch. 6, p. 97.
70. L. V. S k a t t e b o l, Electron. Lett. 4, 583 (1968).
71. Ultrasonics 7, 219, 221 (1969).
72. Ingénieurs et techniciens 6, (№ 243), 37 (1970).
73. L. V. S k a t t e b o l, IEEE Trans. on Audio and Electroacoust. AU-18, 59 (1970).
74. М. Б о р н, Э. В о л ь ф, Основы оптики, М., «Наука», 1970
75. Y. A o k i, Appl. Optics 7, 1402 (1968).
76. J. T o m l i n s o n, N. H. J. A l v e s, J. Sci. Instr. E2, 652 (1969).
77. Ultrasonics 7, 156 (1969).
78. G. W a d e, Proc. IEEE 57, 2051 (1969).
79. D. H o l t, J. R. C o l d r i c k, Ultrasonics 7, 219, 221, 240 (1969).
80. W. К о с к, Proc. IEEE 57, 100 (1969).
81. W. К о с к, Proc. IEEE 58, 1287 (1970).
82. K. A. S t e t s o n, H. A. E l i o n, Holographic Method and Apparatus for Acoustical Field Recording, Патент США, кл. 73-67.6, № 3434339.
83. G. A. M a s s e y, Apparatus and Method for Producing Holograms with Acoustic Waves, Патент США, кл. 181-5, № 3467216.
84. M. A. P l o n u s, Proc. IEEE 56, 1134 (1968).
85. M. A. P l o n u s, Proc. IEEE 56, 125 (1968).
86. M. G. M a g i n n e s s, L. K a y, Repts. 6th Internat. Congr. Acoustics (Tokyo), vol. 6, K49-K52 (1968).
87. Физическая акустика, под ред. Ч. Мэзона, М., «Мир», 1967.
88. J. K l e r k, A. H., ch. 9, p. 139.
89. H. B e r g e r, A. H., ch. 2, p. 27.
90. В. В. В р е н д о н, Mater. Evaluat. 27, 140 (1969).
91. A. F. M e t h e r e l l, A. H., ch. 14, p. 203.
92. Acoustical Holography. II, Proc. of the Second Int. Symp. Реклама приведена, например, в Optical Spectra 4, 35 (1970).
93. S. C. D a u b i n, IEEE Trans. on Geoscience Electronics GE-8, X, No. 4, 313 (1970).
94. J. E. W o l f e, J. D. Y o u n g, Acoustic Holographic Apparatus with Visual Display, Патент США, кл. 181-5, № 3493073.
95. D. G a b o r et. al., Sonar System Employing Holographic Techniques to Produce a Picture of an Object Field, Патент США, кл. 340-3, № 3506952.
96. Y. A o k i, IEEE Trans. Audio and Electroacoust. 18, 258 (1970).