

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ БРЭГГОВСКОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПРИ ДИФРАКЦИИ СФЕРИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ СВЕТА НА ТОРОИДАЛЬНЫХ ВОЛНАХ УЛЬТРАЗВУКА

М. И. Старшин

Традиционное использование клиновидных оптических пучков в брэгговских системах визуализации [1, 2] делало их, по существу, двумерными, так как уже начиная с числовых апертур порядка 0,1 собственные aberrации акустооптического взаимодействия цилиндрической волны падающего света с ультразвуковыми сферическими волнами трехмерного объектного поля заметно ухудшали разрешающую способность по сравнению с дифракционным пределом [3], так что практически она не превышала 10λ (λ — длина волны ультразвука).

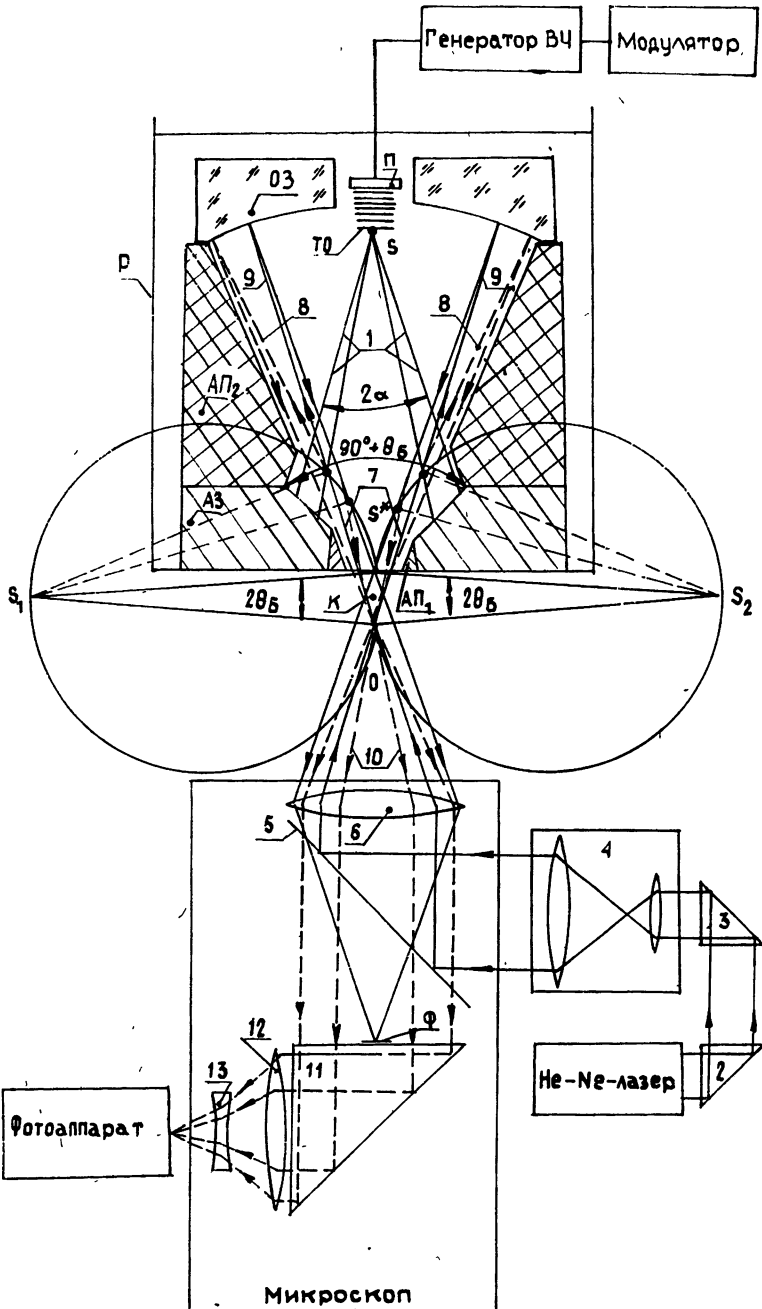


Рис. 1.

Для брэгговской визуализации трехмерного объектного ультразвукового поля предложено [4, 5] с помощью конического акустического зеркала трансформировать каждую из составляющих его элементарных сферических волн в тороидальную и осуществить дифракцию падающей сферической волны света на суперпозиции тороидальных волн.

В данной работе приводятся результаты экспериментального исследования брэгговской визуализации при дифракции сферической волны света на тороидальных волнах ультразвука.

1. Экспериментальная система брэгговской визуализации. Блок-схема экспериментальной установки и лучевая диаграмма процесса формирования изображения показаны на рис. 1.

Ультразвуковое излучение от пьезопреобразователя П из ниобата лития Z-среза интенсивностью $I \sim 100$ мВт/см² и частотой 10 МГц ($\lambda = 0,15$ мм) в виде импульсов длительностью 70 мс и периодом повторения 350 мс поступало в резервуар Р с дистиллированной водой и «просвечивало» тестовый объект ТО, представляющий собой дюралюминиевый диск диаметром 8 мм, толщиной 0,3 мм, в котором симметрично относительно его центра просверлены четыре отверстия диаметром 0,2 мм, расположенные в узлах квадрата с диагональю 2,4 мм.

Диаметр отверстий тестового объекта составляет $\approx 1,3\lambda$, и практически они хорошо моделируют точечные источники, так что трехмерное объектное ультразвуковое поле можно считать состоящим из четырех сферических волн.

Для одной из таких волн с центром в точке S (с целью упрощения построений выбрана точка, лежащая на оси) на рис. 1 показаны ортогональные волновым фронтам лучи ультразвука 1, которые отражаются от стального конического акустического зеркала АЗ; диаметр основания зеркала 36 мм, а угол раскрытия $\theta = 90^\circ + \theta_B = 90^\circ 5' 25'' \pm 40''$ (угол Брэгга $\theta_B = \arcsin \lambda / 2\lambda = 5' 25''$, где λ — длина волны света в воде).

Излучение He-Ne лазера ($\lambda_0 = 0,63$ мкм) мощностью 25 мВт отклонялось поворотными призмами 2, 3, расширялось коллиматором 4 и поступало на полупрозрачное зеркало 5 микроскопа МИМ-8М, после чего отраженная часть его, пройдя фокус О объектива 6, в виде расходящегося пучка вводилась в воду через полупрозрачное стеклянное окно толщиной 0,15 мм в дне резервуара (для простоты преломление лучей падающего света 7 при прохождении границ раздела воздух—стекло, стекло—вода не изображено).

Лучи падающего света 7, встречаясь под брэгговскими углами с лучами ультразвука, формируют дифракционные лучи 8, создающие мнимое изображение в точке S*. Точки, в которых лучи падающего света и ультразвука встречаются под брэгговскими углами, располагаются на двух окружностях, проходящих через О, S* и мнимые источники S₁ и S₂.

В дальнейшем дифракционные лучи и лучи непродифрагировавшей части света 9 свободно распространялись в воде и отражались от погруженного в нее оптического зеркала ОЗ.

Оптическое зеркало диаметром 60 мм и радиусом кривизны 64 мм с центральным отверстием диаметром 12 мм располагалось так, что его центр кривизны К находился посередине между точками О и S*, поэтому после отражения дифракционные лучи попадали в фокус объектива О, а лучи непродифрагировавшей части света начинали сходиться к точке S*.

На обратном пути лучи непродифрагировавшей части света опять встречаются с лучами ультразвука под брэгговскими углами, и дифракционными лучами 10 вторично формируется (теперь уже действительное) изображение в фокусе объектива О.

Вершина конического акустического зеркала совпадала с точкой S*, поэтому при обратном движении падающего света, сходящегося к S*, оптимальные условия формирования изображения (требующие [4, 6], чтобы угол раскрытия конического зеркала равнялся $\theta = 90^\circ \pm \theta_B$, а его вершина совпадала с фокусом падающего света) выполнялись полностью. При движении в прямом направлении фокус падающего света О отстоял от вершины конуса всего лишь на $OS^* \approx 186$ мкм (эта величина, как нетрудно видеть, в $\lambda/\Lambda \approx 317$ раз меньше, чем расстояние SS^* от тестового объекта до вершины конуса, которое равнялось 59 мм), и такое отклонение, как показал численный анализ, не сильно нарушало оптимальность условий формирования изображения, оставляя величину aberrаций на уровне дифракционного предела разрешающей способности. В этот же предел укладывались и aberrации, связанные с отклонением на $OS^*/2 \approx 92$ мкм фокусов падающего света О и S* от центра кривизны оптического зеркала К.

Форма и размеры двух пенопластовых акустических поглотителей АП₁ и АП₂ выбирались так, чтобы после завершения процесса формирования изображения в максимальной степени предотвратить возможность вторичного попадания ультразвукового излучения в пространство взаимодействия с падающим светом, и с этой целью центральная часть объектных сферических ультразвуковых волн даже не использовалась совсем, а сразу же поглощалась расположенным в приосевой области поглотителем АП₁. Доля ультразвуковой мощности, отраженной от прозрачного окна (диаметром 0,65 мм) в дне поглотителя, была незначительна из-за малости его размеров.

Образованное в результате двукратного процесса дифракции, уменьшенное в $\lambda/\lambda \approx 317$ раз изображение, пройдя через объектив, полупрозрачное зеркало, поворотную призму 11, фокусирующую линзу 12 и гомаль 13 микроскопа, увеличивалось им в тысячу раз и поступало на пленку фотоаппарата. Затвор фотоаппарата сраба-

тывал синхронно с первым импульсом ультразвука, экспозиция равнялась 70 мс, чувствительность применяемой пленки 250 единиц ГОСТ.

Недифрагировавший свет фокусировался объективом и задерживался фильтром Ф 2. Разрешающая способность. Фотография изображения тестового объекта приведена на рис. 2.

Отверстия, моделировавшие точечные источники ультразвука, изобразились светлыми пятнами, расположенными в узлах квадрата. Разрешающая способность δ оценивалась по радиусу пятен, который приблизительно составляет шестнадцатую часть от диагонали квадрата величиной 2,4 мм, и, следовательно, $\delta \approx 0,15 \text{ мм} = \Lambda$.

Числовая апертура волн, участвовавших в акустооптическом взаимодействии, равнялась $\sin \alpha = 0,4$, и определяемый ею дифракционный предел разрешающей способности $\xi = 0,61 \Lambda / \sin \alpha \approx 1,5 \Lambda$ даже несколько превышал δ .

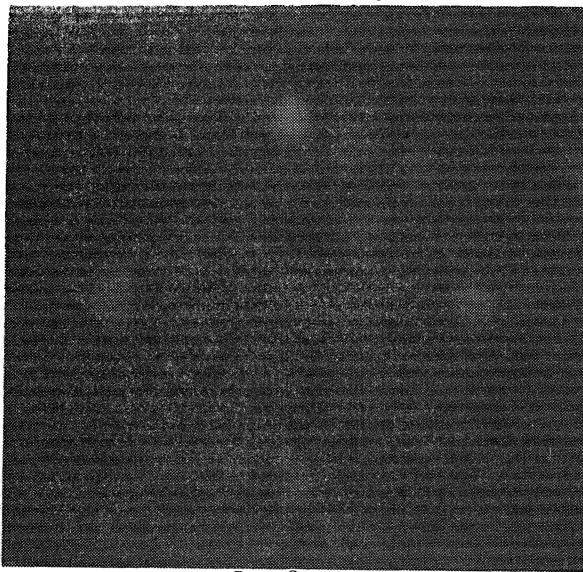


Рис. 2.

По-видимому, более строгая теоретическая оценка дифракционного предела разрешающей способности, учитывающая центральное экранирование (его числовая апертура равнялась 0,12) и двукратное ограничение апертуры света при распространении в прямом и обратном направлении, оказалась бы в лучшем согласии с экспериментальным значением. Однако необходимо подчеркнуть главное — проведенный эксперимент убедительно подтверждает как малость собственных aberrаций акустооптического взаимодействия при дифракции сферической волны света на объектном ультразвуковом поле, трансформированном коническим зеркалом, так и возможность достижения значительно более высокого, чем ранее [2], разрешения в брегговских системах.

Важно заметить, что данный эксперимент свидетельствует также и о применимости лучевого метода [7] при анализе акустооптического взаимодействия трехмерных волновых полей сложной конфигурации.

Автор выражает благодарность Б. М. Гурьеву, М. И. Перченко, Е. И. Сычеву за помощь при подготовке эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Когрел А. — J. Acoust. Soc. Amer., 1971, 49, № 3, p. 1059.
2. Ахмед М., Уэйд Г. — ТИИЭР, 1979, 67, с. 170.
3. Smith R. A., Wade G., Powers J., Landry J. — J. Acoust. Soc. Amer., 1971, 49, № 3, p. 1062.
4. Зюрюкин Ю. А., Старшин М. И. Авторское свидетельство № 1116380. — Бюл. изобрет., 1984, № 36, с. 130.
5. Зюрюкин Ю. А., Старшин М. И. Материалы XII Всесоюзной конференции по акустоэлектронике и квантовой акустике. — Саратов, 1983, ч. 1, с. 345.
6. Старшин М. И. В кн. Некоторые вопросы прикладной физики. — Саратов: Гос. ун-т, 1985, ч. 1, с. 39.
7. Когрел А. — Acoustical Holography. — New York: Plenum Press, 1970, vol. 2, ch. 4, p. 39.

Саратовский государственный университет

Поступила в редакцию 17 июля 1986 г.