

VII. Гидроакустические измерения. Проблемы исследований

УДК 521.3, 521.92

**ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
АКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ
МЕТОДАМИ БЛИЖНЕГО ПОЛЯ****А.Е. Исаев, Ю.М. Айвазян, А.М. Поликарпов***ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.
isaev@vniiftri.ru*

На примере результатов эксперимента по измерению коэффициента отражения звука от образца материала продемонстрирована некорректность облучения образца сферической звуковой волной. Обсуждаются преимущества и недостатки генерации акустического пучка с плоским фронтом решёткой Тротта как альтернативы исследования акустических свойств материалов в дальнем поле. Замена решётки Тротта виртуальной решёткой, синтезирующей акустический пучок методом сканирующего излучателя (приёмника), позволяет обойтись без громоздких и сложных в технической реализации конструкций и создать акустически прозрачную решётку с любым шагом из любого количества элементов. Рассмотрены варианты постановки измерительного эксперимента с использованием виртуальных излучающей и приёмной решёток. Значительно сократить продолжительность измерительного эксперимента позволяет использование малоэлементной разреженной сканирующей ячейки излучателей (приёмников). Приведены результаты математического моделирования в подтверждение перспективности предложенного подхода.

Ключевые слова: измерительный прибор, компьютерные узлы, системы массового обслуживания, аналитическое моделирование.

**PROBLEMS OF RESEARCH OF ACOUSTIC PROPERTIES
OF MATERIALS BY METHODS OF NEAR FIELD****A.E. Isaev, Yu.M. Aivazian, A.M. Polikarpov***FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region
isaev@vniiftri.ru*

On the example of the results of an experiment on measuring the sound reflection coefficient from a material sample, the incorrectness of irradiation of the sample with a spherical sound wave is demonstrated. The advantages and disadvantages of an acoustic beam generation with a flat front by the Trott array, as an alternative to investigation the acoustic properties of materials in a far field, are discussed. Replacing the Trott array with a virtual array synthesizing an acoustic beam using the scanning projector (receiver) allows you to avoid the bulky and complicated constructions in technical implementation and create an acoustically transparent array with any step from any number of elements. The options for setting up a measurement experiment using virtual radiating and receiving arrays are considered. The use of a low-element sparse scanning cell of projectors (receivers) allows reducing significantly the duration of the measurements. The results of mathematical modeling are presented to confirm the prospects of the proposed approach.

Key words: measuring device, computer units, queuing systems, analytical modeling.

*«Проблему никогда не решить, если размышлять как те, кто её создал...»
Альберт Эйнштейн*

Введение

Исследование свойств гидроакустических материалов, несмотря на всю важность этой проблемы, в силу недостаточной изученности до настоящего времени остаётся в разряде, не получившего стандартизованных решений.

Сегодня в ТК87 МЭК разработан проект стандарта МЭК 63081 «Ультразвук — Методы характеристики ультразвуковых свойств материалов», в котором сформулированы определения основных величин, принятых для описания акустических свойств материалов. В этих определениях используется понятие «плоская бегущая волна». В условиях реальных измерений вместо плоской бегущей волны вынужденно применяют сферическую (или близкую к ней) волну. Таким образом, трудности возникают уже на этапе формулировки определений. Используемые методы и технические приёмы привносят свой вклад, в конечном итоге стандарт признаёт, что численные значения измеренных параметров материалов зачастую действительны только в условиях эксперимента.

Исходя из общепринятых принципов метрологии, ключом к правильности является обеспечение согласованности результатов измерений, которые должны быть воспроизводимы и передаваемы. Отсюда следует важное требование к измерительному эксперименту — обеспечение условий дальнего поля, то есть измерение величины в соответствии с её определением. Нарушение этого принципа приводит к тому, что получаемые в эксперименте результаты в большей степени отражают не свойства исследуемого материала, а влияние эффектов, обусловленных конфигурацией эксперимента.

Существующие методы обеспечения условий плоской волны, как то волноводы в режиме поршневой моды или сферическая волна большого радиуса, имеют значительные ограничения. Если увеличить частоту выше критической, в волноводе возникнут разнообразные моды распространяющихся волн. Чтобы получить сферическую волну большого радиуса, нужно использовать большой водоём и очень мощный излучатель.

Крайне желательно иметь возможность обеспечивать условия плоской бегущей волны, выполняя измерения в ближней зоне. Такой подход позволит выполнять измерительный эксперимент в бассейне ограниченных размеров в контролируемых условиях.

При исследованиях образца материала малого размера существенен вклад краевых эффектов. Если взять большой образец, возникает проблема интерпретации результатов вследствие сферичности фронта волны: на разные участки образца волна падает и, соответственно, отражается под разными углами. Проблема усугубляется для образцов с рельефной поверхностью или неоднородной внутренней структурой.

Использование широкополосных сигналов позволяет уменьшать влияние эффектов, обусловленных рассеянием звука на краях образца материала. Так, рассеяние звука корпусом рекордера (приёмника подводного звука больших габаритов) вынуждает определять при его калибровке значения энергетической чувствительности в 1/3-октавных полосах частот. При этом одно из преимуществ — возможность многократно сокращать расстояние дальнего поля на высоких частотах, где ширина 1/3-октавной полосы становится значительной. Замена временного интервала Δt отношением $\Delta r / c$ (где Δr — расстояние; c — скорость звука) переводит частотно-временное соотношение неопределённостей $\Delta t \geq 1 / \Delta f$ в частотно-пространственное соотношение $\Delta r / c \geq 1 / \Delta f$. Из последнего следует ограничение акустического размера приёмника значением Δr . Для больших Δf акустический размер приёмника сокращается до размеров гидрофона, встроенного в рекордер, при этом критерий дальнего поля выполняется на небольших расстояниях. Этого не происходит на средних частотах, где граница Δr вследствие уменьшения ширины полосы Δf увеличивается настолько, что выходит за пределы физических размеров рекордера [1, 2]. В этой ситуации, так же как при калибровке линейных протяжённых многоэлементных антенн или при моделировании вторичного акустического поля подводного объекта, нет альтернативы использованию плоской звуковой волны.

Традиционные решения

В описанных в [3] экспериментах по определению акустических характеристик материала исследуемый образец облучают сферической волной (схема эксперимента изображена на рис. 1).



Рис. 1. Схема эксперимента по исследованию акустических свойств материала

Отражающую способность (коэффициент отражения по амплитуде) оценивают по максимуму и минимуму сигнала интерференции облучающей и отражённой исследуемым образцом звуковых волн, который регистрируют гидрофоном 1 при изменении частоты облучающего сигнала. Амплитудный коэффициент пропускания звука оценивают по соотношению звуковых давлений, измеренных с помощью гидрофона 1 и гидрофона 2. На рисунке 1 показаны прямая, отражённая и краевые дифрагированные волны, положения излучателя и гидрофонов. Поскольку облучающая волна — сферическая, помимо интерференции, создаваемой дифракцией звука на краях образца, свой вклад в погрешность измерений вносит сферичность (радиус кривизны) падающей на образец волны. Чем радиус кривизны меньше, тем больше эта погрешность. Уменьшению влияния краевых эффектов использованием широкополосного сигнала препятствует нарушение условия наблюдаемости интерференционной картины.

Консервативная оценка расстояния дальнего поля для сферической волны даётся в [3]:

$$r \geq 3L^2 / \lambda,$$

где r — расстояние дальнего поля; L — размер облучаемого объекта; λ — длина волны. При размере исследуемого образца 1 м и длине волны 0,075 м (частота 20 000 Гц) излучатель должен находиться на расстоянии, превышающем 39 м. Такое расстояние можно обеспечить только в природном водоёме, при этом среди прочих трудностей, обусловленных большим числом слабо поддающихся контролю влияющих факторов, возникает проблема малого отношения сигнал/шум.

В качестве иллюстрации проблем, возникающих при исследованиях отражения звука от материала с плоской поверхностью, на рис. 2 и 3 приведены частотные зависимости коэффициента отражения для образцов размером 1×1 м (рис. 2) и 2×2 м (рис. 3), полученные при изменении расстояния между образцом и излучателем при неподвижном гидрофоне и перемещении излучателя и гидрофона параллельно поверхности образца.

Поскольку в качестве излучателя использовали источник сферической волны, под коэффициентом отражения понимали отношение амплитуды давления в отражённой звуковой волне к амплитуде давления в падающей звуковой волне, что не соответствует общепринятой формулировке коэффициента отражения, в которой падающая волна — плоская.

Коэффициент отражения — объективный параметр, характеризующий акустические свойства, и он не должен изменяться при перемещениях излучателя, использованных в эксперименте. Представленные зависимости демонстрируют обратное: измеренные свойства изменяются в десятки раз в зависимости от положения излучателя. Такая картина характерна при облучении образца сферической волной. Кроме самих свойств материала, на результаты эксперимента оказывают влияние другие эффекты: незначитель-

ные изменения в ориентировании поверхности образца относительно излучателя и приёмника, рассеяние звука на краях образца, изменение радиуса кривизны фронта падающей на образец волны и соответствующее изменение углов падения волны при изменении расстояния до излучателя.

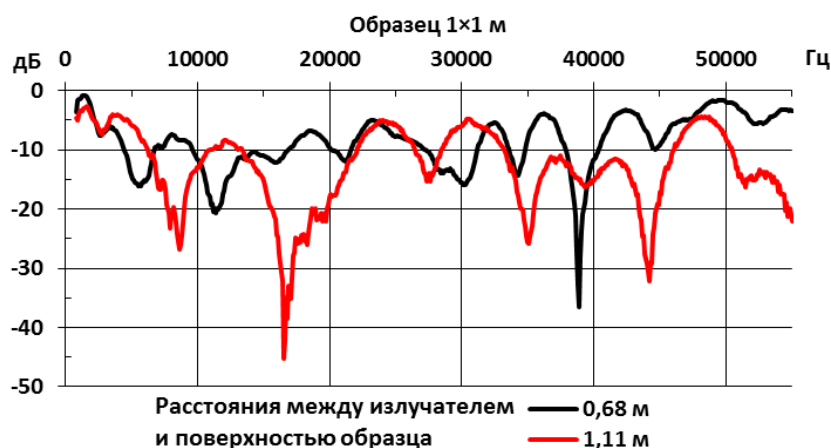


Рис. 2.

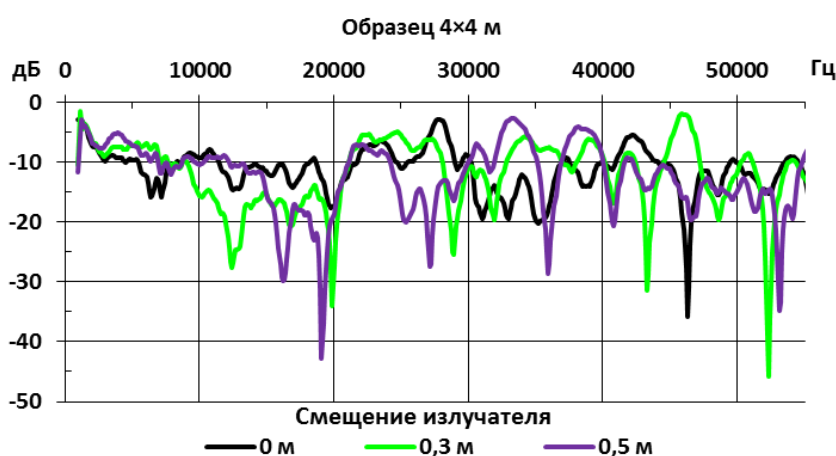


Рис. 3.

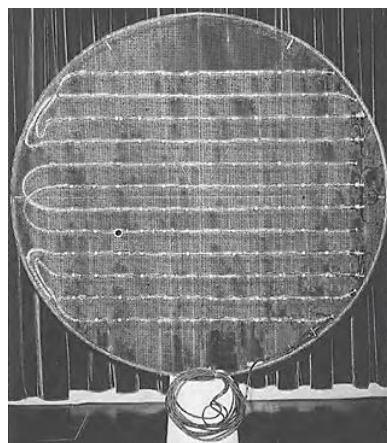
Попытка разделить влияние различных эффектов успехом не увенчалась. Чтобы выявить влияние краевых эффектов, четыре метровых образца были собраны в блок размером 2×2 м. Излучатель и гидрофон смещали от оси, проходящей через центр блока, к краю блока на 30 и 50 см (см. рис. 3). При перемещении излучателя на 0,5 м, что соответствует положению излучателя в эксперименте с образцом размером 1×1 м (см. рис. 2), на частотной зависимости возникли характерные провалы. Однако утверждать, что они обу-

словлены краевыми эффектами, не представляется возможным. Причина — возникновение подобных провалов в этом же эксперименте при других положениях излучателя.

В идеале проблемы, обусловленные сферичностью волнового фронта и краевыми эффектами, удалось бы решить, облучая образец с малых расстояний узким звуковым пучком с плоским фронтом. При больших расстояниях такой пучок будет «размываться» в полном соответствии с принципом Гюйгенса.

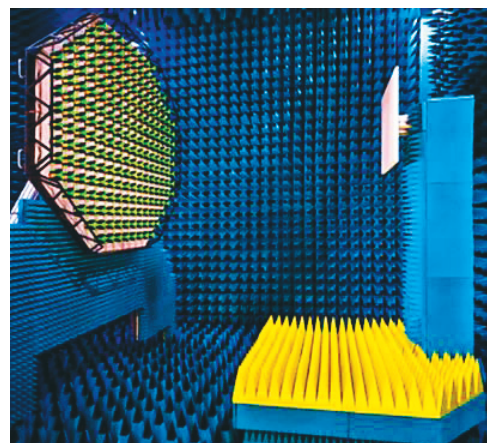
Генерация плоской волны

Практической альтернативой исследованиям акустических свойств материалов в дальнем поле является генерация плоской волны методами ближнего поля. Основываясь на том же принципе Гюйгенса, плоскую волну получают одновременным излучением точечных источников, расположенных в узлах плоской решётки. Плоский волновой фронт, падающий на облучаемый объект, позволяет измерять характеристики объекта для дальнего поля. В подводной акустике плоские излучающие решётки ближнего поля называют решётками Тротта [3], в радиотехнике такие системы называют преобразователями плоских волн [4] (см. рис. 4).



а

140-элементная решётка Тротта [3], частоты менее 12 кГц ($\lambda > 125$ мм)



б

Rohde & Schwarz 156-элементная антенна [5], частоты менее 6 ГГц ($\lambda > 50$ мм)

Рис. 4. Плоская излучающая решётка ближнего поля — а; преобразователь плоских волн — б

Опыт ВНИИФТРИ

Узкий луч создаёт обычный фонарик, то есть точечный источник и отражатель. Этот принцип пригоден и для создания акустического пучка, но тре-

бует весьма габаритного отражателя, размеры которого многократно превышают длину звуковой волны.

Во ВНИИФТРИ была предпринята попытка использовать похожий принцип создания звуковой волны. Если плоскую излучающую поверхность заменить прямой линией, сформируется цилиндрическая волна. Идея оригинального приёма, предложенного в 80-е годы Л.Е. Павловым, заключалась в создании звуковой волны с плоским фронтом преобразованием цилиндрической волны линейного протяжённого излучателя с помощью параболического акустического зеркала. Многоэлементный линейный излучатель изображён на рис. 5. Несомненным преимуществом предложенного Л.Е. Павловым подхода является многократное сокращение количества излучающих элементов и соответственное этому упрощение установки.

К сожалению, из-за несовершенства технологий тех лет получить практически приемлемые результаты не удалось. Цилиндрическую волну будет излучать линейный источник бесконечной длины. Как будет показано ниже, волновой фронт, формируемый источником конечной длины из конечного числа излучателей, будет искажён значительными осцилляциями, форма фронта будет изменяться по мере удаления от источника.



Рис. 5. Многоэлементный линейный излучатель ВНИИФТРИ

Тем не менее полученный отрицательный опыт оказался полезным, поскольку позволил осознать уровень сложности проблем при технической реализации методов ближнего поля.

Создание акустического пучка с помощью решетки Тротта

Принцип формирования плоской волны с использованием решётки Тротта применим и для измерения акустических характеристик материалов.

Для гармонического сигнала частоты f создаваемый плоской решёткой из $N \times M$ элементов волновой фронт может быть представлен суммой вкладов точечных излучателей сферических волн (см. рис. 6):

$$p(x, y, z, f) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N a_{nm} \exp(i\phi_{nm}) p_{nm}(x, y, z, f) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N a_{nm} \exp(i\phi_{nm}) \exp(-ikR_{nm}) / R_{nm}, \quad (1)$$

где $p(x, y, z, f)$ — звуковое давление, создаваемое решёткой в точке x, y, z ; $p_{nm}(x, y, z, f)$ — звуковое давление, создаваемое в точке x, y, z излучателем

из узла nm решётки ($n = 1, \dots, N$; $m = 1, \dots, M$), a_{nm} и ϕ_{nm} — коэффициенты взвешивания создаваемых излучателями звуковых давлений по амплитуде и фазе; R_{nm} — расстояния от узла nm решётки до точки x, y, z ; $k = 2\pi f / c$ — волновое число, зависимость от времени $\exp(i 2\pi f t)$ опущена.

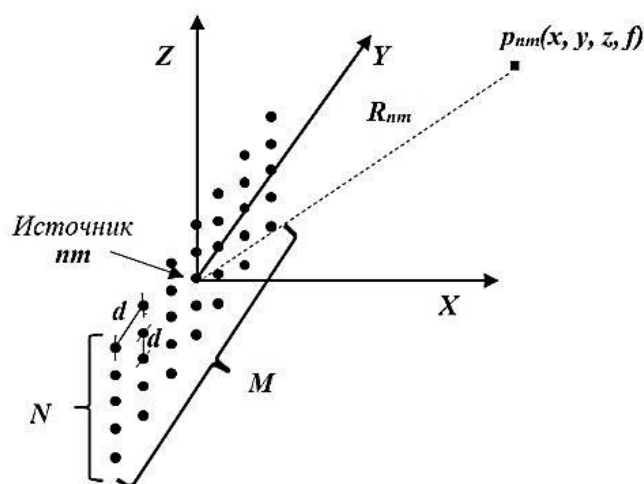


Рис. 6. Моделирование плоской волны точечными источниками, образующими двумерную решётку из $N \times M$ элементов с шагом d

Обратим внимание на особенность формулы (1). Суммируемые члены формулы $a_{nm} \exp(i\phi_{nm}) p_{nm}(x, y, z, f)$ представляют собой взвешенные по амплитуде и фазе звуковые давления единовременно излучающих источников. Получить взвешенные давления можно двумя способами. Либо подобрать соответствующим образом чувствительности излучателей, расположенных в разных узлах решётки, либо возбуждать идентичные излучатели сигналами, подобранными по амплитуде и фазе в соответствии с их положением в решётке.

Если решёткой Тротта облучать образец материала, а гидрофон расположить между образцом и решёткой, как это показано рис. 7, звуковое поле в месте расположения гидрофона будет представлять собой результат интерференции облучающей образец плоской звуковой волны и волны, отражённой образцом.

Чтобы между решёткой и исследуемым образцом не возникали стоячие волны, а расположенный близко к решётке образец не оказывал влияния на импеданс излучения, решётка должна быть акустически прозрачной — излучатели решётки должны быть достаточно малых размеров и удалены друг от друга. В то же время, поскольку излучателей в решётке конечное число, фронт волны будет отличаться от плоского. Близость фронта, падающего

на образец участка волны, к плоскому обеспечивают надлежащим подбором размера решётки, и амплитуд, и фаз излучателей — коэффициенты a_{nm} и ϕ_{nm} в формуле (1). При этом чтобы сгенерировать однородную плоскую волну, расстояние между излучателями должно быть не более $0,8\lambda$ [3].

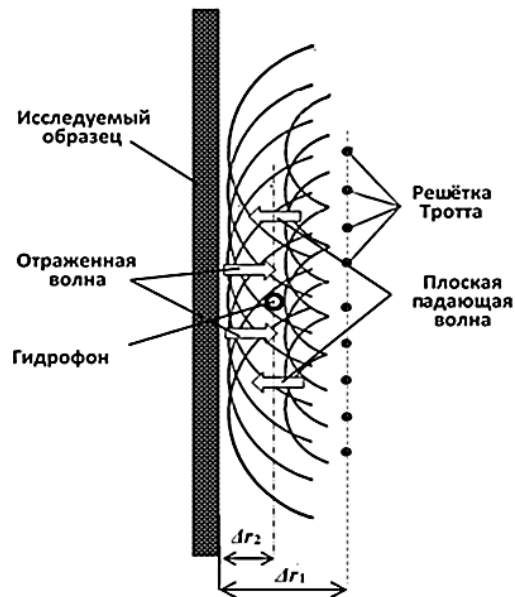


Рис. 7. Синтез плоской волны решёткой Тротта

Этим критериям трудно удовлетворить для малых длин волн вследствие трудоёмкости и сложности создания большой плоской матрицы с плотной сеткой излучателей. Взаимное влияние близко расположенных излучателей с элементами их крепления и электрическими кабелями приводит к нарушению справедливости замены реального элемента решётки изотропным точечным источником. Перечисленные недостатки дополняют проблемы, связанные с технической реализацией идентичных излучателей и многоканального тракта излучения, включающего индивидуальные прецизионные аттенюаторы и фазовращатели.

Моделирование

Приведённые ниже результаты моделирования не следует рассматривать как полноценное планирование измерительного эксперимента, тем более как попытку обеспечить условия для создания классической плоской волны в соответствии с её определением. Задача выполненного моделирования заключалась в демонстрации эффектов от применения взвешивающих коэффициентов к амплитудам излучаемых в узлах решётки сигналов.

Начнём с обсуждения понятия локально-плоской волны. Обычно под этим понимают мысленно выделяемый участок реально распространяющейся сферической волны, падающий на облучаемый объект, который находится в так называемом дальнем поле излучателя.

Понимая, что звуковая волна, создаваемая решёткой, также является локально-плоской, для неё мы не будем применять термин «локально-плоская волна». Поскольку свойства волнового фронта будут рассматриваться в пределах поперечных размеров акустического пучка, будем пользоваться выражением «локально-плоский волновой фронт». Если для сферической волны амплитуды и фаз звуковых давлений подчинены известным аналитическим выражениям, то при создании пучка распределение амплитуд и фаз на его фронтальной части будут определяться соотношением амплитуд и фаз излучателей решётки. Таким образом, задача создания акустического пучка с заданными свойствами сводится к подбору взвешивающих коэффициентов.

Взвешивающая функция

Для простоты и наглядности ограничимся рассмотрением взвешивания по амплитуде для квадратной эквидистантной плоской решётки из $N \times N$ элементов с шагом d между узлами, схематично изображённой на рис. 8. Размер стороны решётки $L = (N - 1) \cdot d$. Для узла nm с координатами (x_n, y_m) , $x_n, y_m \in (-L/2, L/2)$ коэффициент a_{nm} будем получать произведением значений взвешивающей функции при значениях аргумента x_n и y_m . Для нечётного N координаты центрального элемента решётки совпадают с началом координат.

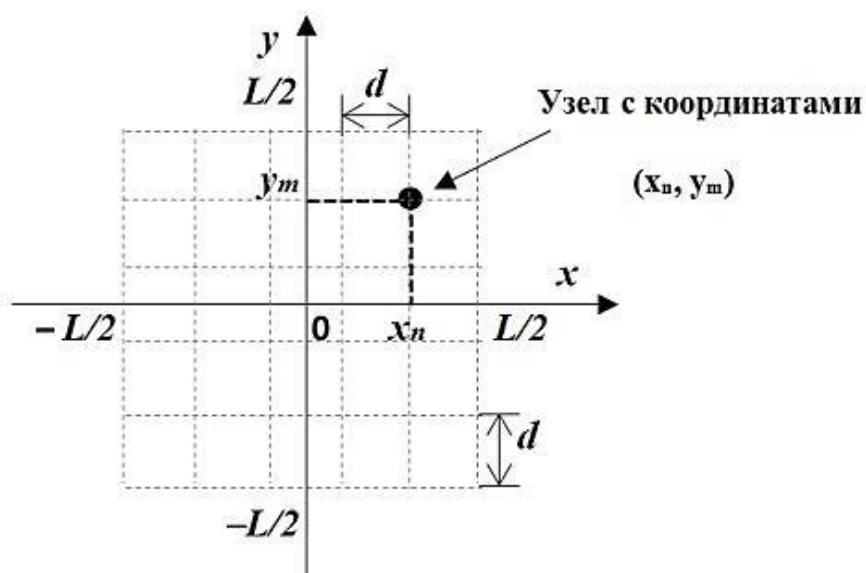


Рис. 8.

В качестве взвешивающей выберем функцию окна Тьюки:

$$W(\xi, \beta) = \begin{cases} \frac{1 + \cos\left(\frac{2\pi\left[\xi + 0,5 - \frac{\beta}{2}\right]}{\beta}\right)}{2}, & -0,5 \leq \xi < -0,5 + \frac{\beta}{2}, \\ 1, & -0,5 + \frac{\beta}{2} \leq \xi < 0,5 - \frac{\beta}{2}, \\ \frac{1 + \cos\left(\frac{2\pi\left[\xi - 0,5 + \frac{\beta}{2}\right]}{\beta}\right)}{2}, & 0,5 - \frac{\beta}{2} \leq \xi < 0,5, \end{cases}$$

где переменная $\xi \in [-0,5, 0,5]$, а параметр $\beta \in [0, 1]$. Значения аргумента ξ_n получают нормированием абсциссы x_n либо ординаты y_n узла на длину стороны решётки L . Коэффициент a_{nm} вычисляют как произведение $W(\xi_n, \beta) \times W(\xi_m, \beta)$. Преимущество использования функции Тьюки — управляя параметром β , можно изменять форму окна от прямоугольной при $\beta = 0$ до окна Ханна при $\beta = 1$ (см. рис. 9).

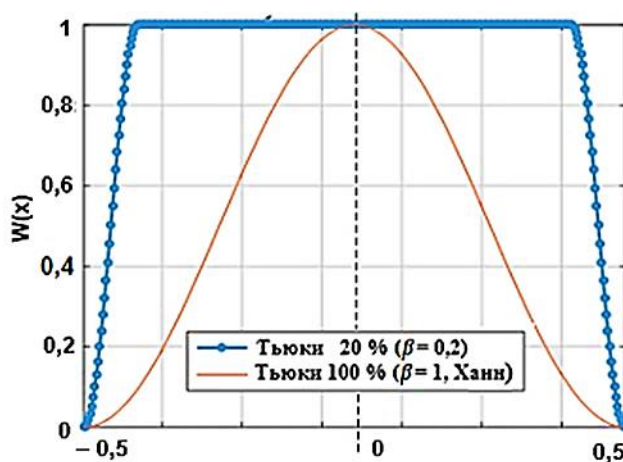


Рис. 9. Форма взвешивающей функции для $\beta = 0,2$ и $\beta = 1$

Решётки конечных размеров можно рассматривать как усечения бесконечной решётки, которая при выполнении условия $d \leq 0,8\lambda$ создаёт плоскую волну. В результате усечения возникают боковые лепестки и осцилляции волнового фронта пучка. Тем самым происходит переход от понятия плос-

кой волны к понятию диаграммы направленности излучателя. Под диаграммой направленности принято понимать характеристику направленных свойств излучателя в дальнем поле. Однако нас будет интересовать не дальнее поле, а расстояния между решёткой и облучаемыми объектами, укладываемые в размеры гидроакустического измерительного бассейна. При этом боковые лепестки нас будут интересовать на расстояниях до стенок бассейна, а фронт создаваемого пучка — на расстоянии облучаемого образца.

Использование взвешивающих коэффициентов призвано «сгладить» влияние краевых эффектов излучающей апертуры. При конструировании решёток обычно применяют численные методы с использованием сложных многопараметрических оптимизирующих алгоритмов [6]. При создании своих решёток Тротт экстраполировал линейную группу излучателей с биномиальным распределением амплитуд (взвешивающих коэффициентов) на случай плоского излучателя [3]. Для получения двумерного распределения взвешивающих коэффициентов можно использовать функции различных других взвешивающих окон. При выборе способа взвешивания следует помнить, что такие аналитические функции создавали под специальные критерии для решения задач, отличных от создания акустического пучка с плоским фронтом.

В рассматриваемой задаче нас будет интересовать возможность создания достаточно плоского волнового фронта облучающего пучка в определённом диапазоне расстояний вблизи решётки и интервале частот, достаточном для наблюдения интерференционной картины отражённой образцом волны. Отличие от задачи, стоящей при создании радиолокатора, в том, что наличие заднего лепестка не является мешающим фактором. Из опыта создания решёток известно, что наличие малых боковых лепестков — признак выравнивания волнового фронта пучка. Нас боковые лепестки будут интересовать как источник помех, вызванных отражёнными от стенок бассейна волнами.

Распределение амплитуд

На рисунке 10 изображено полученное по формуле (1) распределение амплитуд звукового давления на расстоянии 1 м от плоской решётки 20×20 элементов с шагом 5,5 см на частоте 20 кГц при $\beta = 0$ (взвешивание отсутствует). При тех же параметрах решётки $\beta = 0,4$ даёт картину, изображённую на рис. 11. Поскольку для узлов на краях решётки взвешивающий коэффициент равен нулю, применение взвешивания уменьшает фактический размер решётки — в данном случае с 20×20 до 18×18 элементов. Учёт этого обстоятельства при планировании эксперимента позволяет получать выигрыш в трудоёмкости измерений.

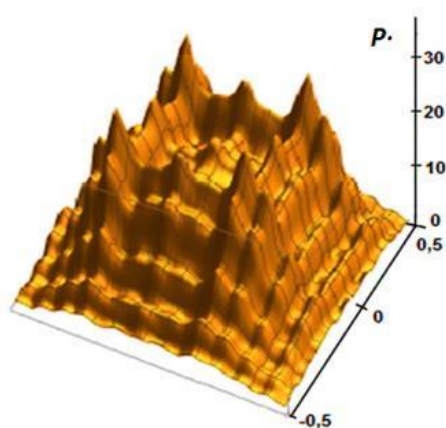


Рис. 10. Параметр окна Тьюки $\beta = 0$ (взвешивание отсутствует)

По внешнему виду амплитудного распределения на рис. 11 можно судить, насколько существенно примененное взвешивание подавляет влияние краевых эффектов. Центральная часть волнового фронта размером $0,5 \times 0,5$ м выровнялась и не имеет острых пиков, амплитуды плавно уменьшаются к краям пучка. Однако требования к формируемому звуковому пучку этим не ограничиваются, поскольку волновой фронт пучка меняется с расстоянием от решетки z . Причём под расстоянием z будем понимать длину пути, пройденного звуковым пучком не только в прямом направлении, но и в обратном после отражения.

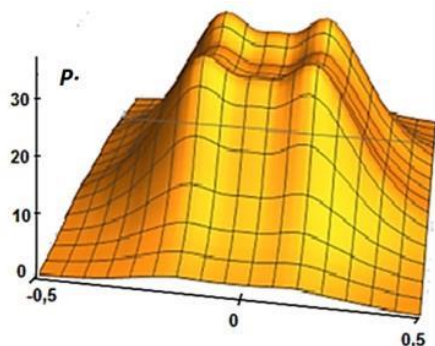


Рис. 11. Параметр окна Тьюки $\beta = 0,4$

Если образец не плоский, а имеет значительный рельеф (например, в виде пирамид высотой 20 см), важно, чтобы волновой фронт пучка сохранял свои свойства как минимум на всю глубину рельефа поверхности образца. Поскольку гидрофон располагают между решёткой и образцом (см. рис. 7), это расстояние увеличивается на длину пути, пройденного отражённым пучком до гидрофона (т.е. в обратном направлении).

На рисунке 12 приведены распределения амплитуд звуковых давлений пучка на различных расстояниях z от решётки. К краям пучка амплитуды звуковых давлений уменьшаются не менее чем в 5 раз. При расстоянии от решётки $z = 0,4$ м (вершины рельефа образца) волновой фронт достаточно плоский — неравномерность звуковых давлений δ составляет не более $\pm 4\%$. Однако на расстоянии $z = 0,6$ м, что соответствует положению оснований рельефа образца, волновой фронт ухудшается ($\delta \approx \pm 4,4\%$). Это ухудшение ($\delta \approx \pm 5,4\%$) ещё более заметно при $z = 0,8$ м (отражённая волна у вершин пирамид).

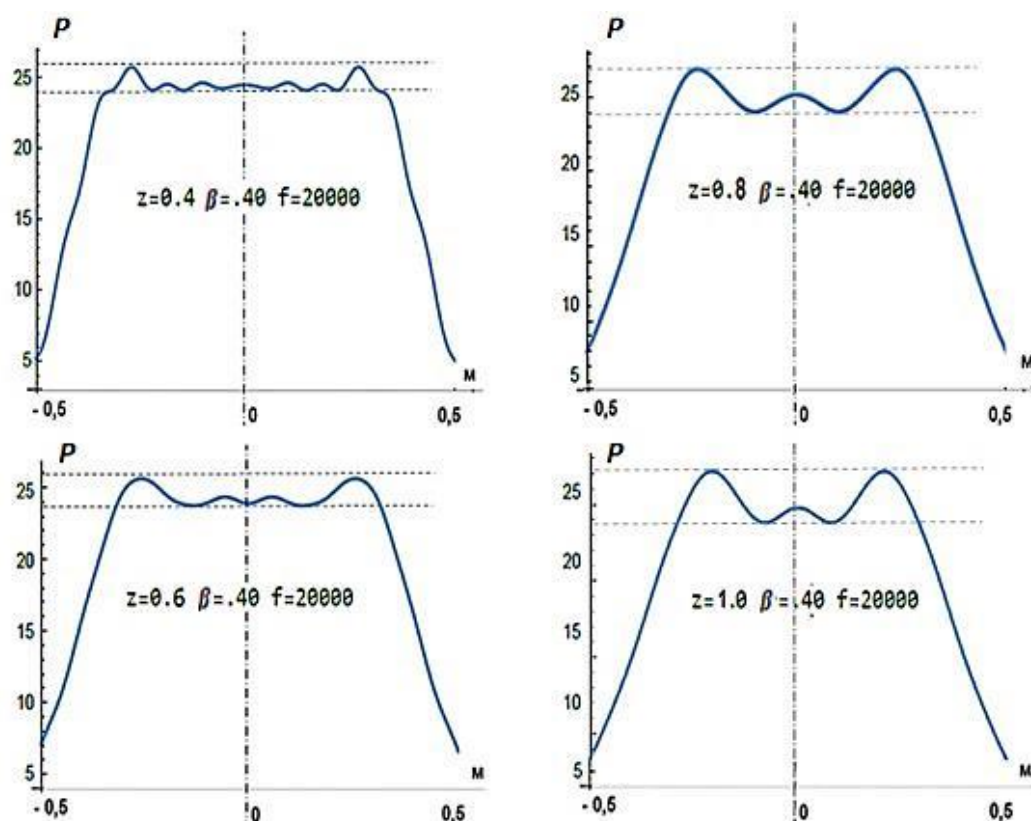


Рис. 12. Распределения амплитуд звуковых давлений пучка на различных расстояниях от решётки, $\beta = 0,4$

Для выполнения измерений коэффициента отражения необходимо найти максимум и минимум интерференции падающей и отражённой волн. Поэтому положение гидрофона будет определяться выбранным способом наблюдения интерференционной картины. Так, для поиска максимума и минимума интерференции перемещением гидрофона необходимо обеспечить диапазон

перемещений не менее половины длины волны. Если применять описанный в [3] способ перестройки частоты в небольших пределах, то расстояние от образца до неподвижного гидрофона должно обеспечивать необходимую разность хода падающих на гидрофон прямой волны решётки и отражённой образцом волн. Однако при увеличении z до 1 м неравномерность волнового фронта увеличивается до $\pm 6\%$. Таким образом, при выборе взвешивания появляется дополнительное требование — минимальное изменение неравномерности волнового фронта на длине пути z от падения пучка на поверхность образца до точки расположения гидрофона. В рассматриваемом примере — от 0,4 до 1 м.

Воспользуемся возможностью изменять форму взвешивающей функции изменением параметра окна Тьюки. На рисунках 13 и 14 для решётки с теми же параметрами изображены распределение амплитуд звукового давления на расстоянии 1 м и сечения пучка для различных z при $\beta = 0,66$.

По внешнему виду амплитудного распределения на рис. 13 и сечений пучка на рис. 14 можно сказать, что задача формирования звукового пучка решена. Сформирован волновой фронт с плоской центральной частью и плавным уменьшением амплитуд к краям пучка до 8 раз. Это означает, что при облучении образца размером 1×1 м влияние краевых эффектов будет уменьшено как минимум на 18 дБ. Наилучшие распределения звукового давления получены при z равных 0,4 и 1 м ($\delta \leq \pm 1,6\%$). На промежуточных расстояниях фронт ухудшается незначительно ($\delta \leq \pm 2\%$). Однако обратным эффектом такого улучшения качества волнового фронта стало заметное сужение пучка.

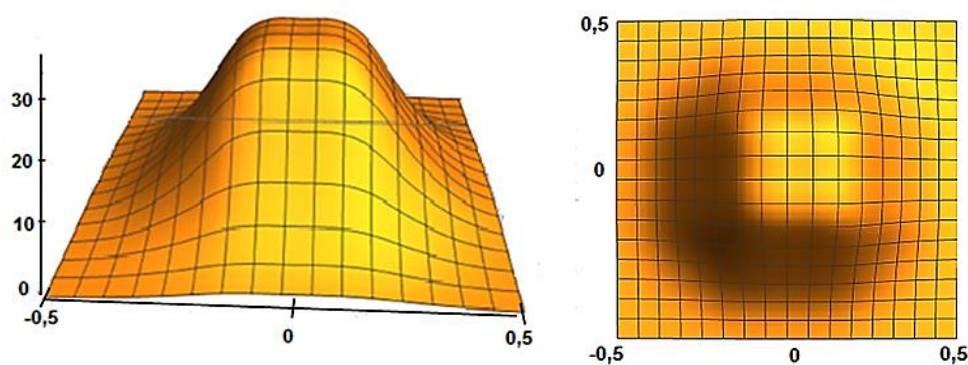


Рис. 13. Распределение амплитуд звукового давления для окна Тьюки при $\beta = 0,66$

Количественные оценки распределения звукового давления на фронте пучка приведены на рис. 15 и 16. Графики в условных единицах демонстрируют изменение среднего давления с расстоянием z , барами показано изменение отклонения звукового давления от среднего значения.

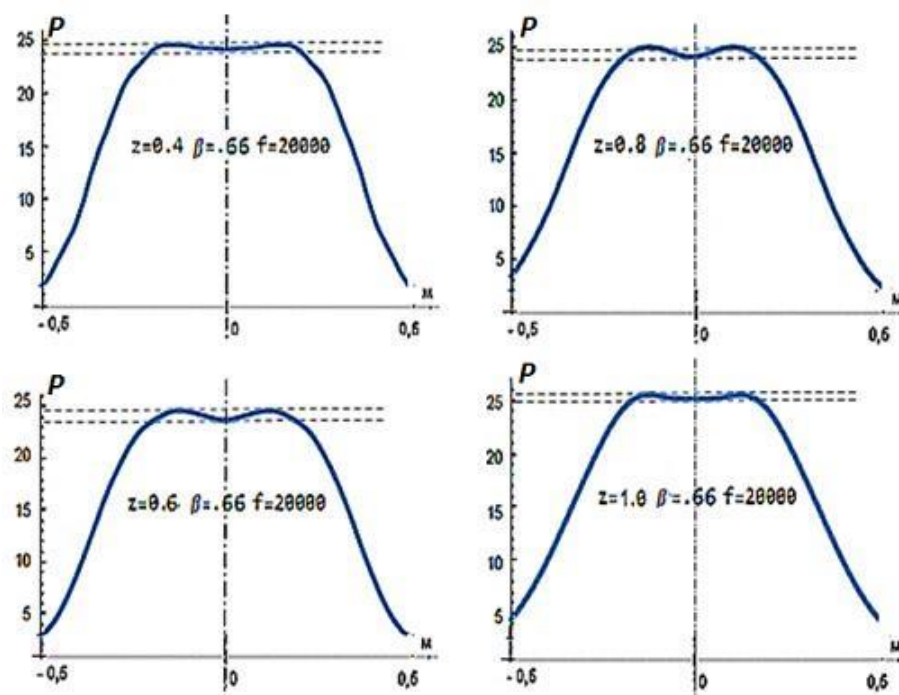


Рис. 14. Распределения амплитуд звуковых давлений пучка на различных расстояниях от решётки, $\beta = 0,66$

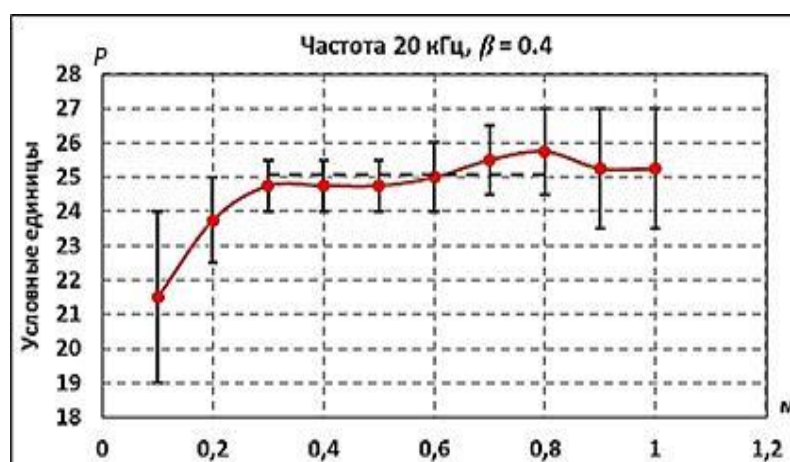


Рис. 15. Изменение звукового давления с расстоянием от решётки

На рисунке 15 ($\beta = 0,4$) звуковое давление изменяется от 21,5 до 25,3 единиц в диапазоне z от 0,1 до 1 м. Изменения звукового давления при $\beta = 0,66$ (рис. 16) находятся в пределах от 23,6 до 25,4 единиц.

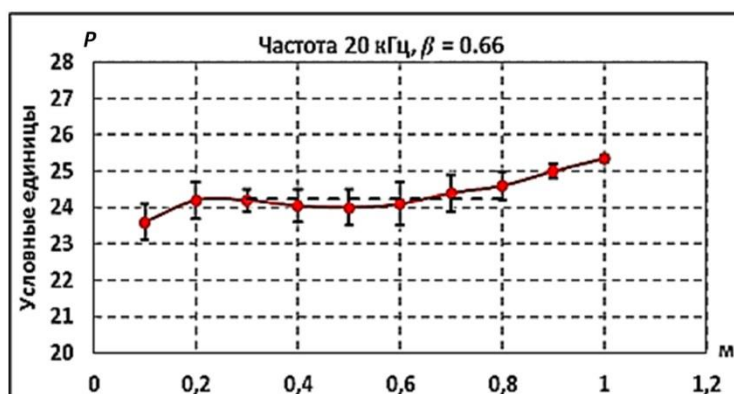


Рис. 16. Изменение звукового давления с расстоянием от решётки

Таким образом, появляется необходимость при планировании эксперимента принимать во внимание ещё один параметр — изменение звукового давления в требуемом диапазоне z . Так, при изменении β от 0,4 до 0,66 показанный барами размах заметно уменьшается, однако в интересующем нас диапазоне z изменения среднего уровня звукового давления практически не уменьшились.

Распределение фаз

При облучении объекта сферической волной расстояние дальнего поля выбирают исходя из геометрических величин — длины волны и размера объекта. Изменение фазы на участке локально-плоской волны, падающей на объект, обычно не рассматривают. Это обусловлено тем, что само расстояние дальнего поля выбирают исходя из минимальной длины волны в эксперименте.

При этом для больших длин волн изменение фазы на участке локально-плоской волны всегда меньше. Для решётки Тротта эта закономерность не выполняется. В рассмотренных примерах получилась обратная зависимость — с увеличением расстояния от решётки изменение фазы не уменьшается, а увеличивается. Этот эффект можно проследить по зависимостям на рис. 17 и 18.

Таким образом, в определяемом параметрами эксперимента диапазоне z помимо требований к распределению амплитуд добавляется требование к распределению фаз. При изменении β с 0,4 до 0,66 неравномерность фазы для z 0,5 и 1 м уменьшается с $\pm 5,7^\circ$ и $\pm 9,2^\circ$ до $\pm 3,5^\circ$ и $\pm 6,3^\circ$ соответственно. Для рассматриваемой модели изменением параметра окна Тьюки удалось значительно улучшить как распределение амплитуд, так и фаз волнового фронта пучка.

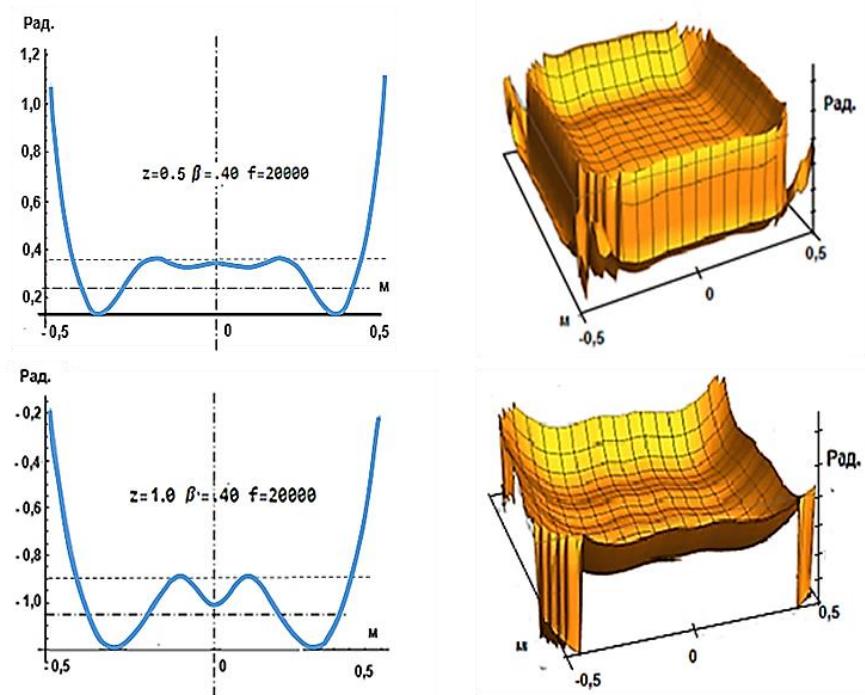


Рис. 17. Изменение фазового фронта пучка с расстоянием от решётки, $\beta = 0,4$

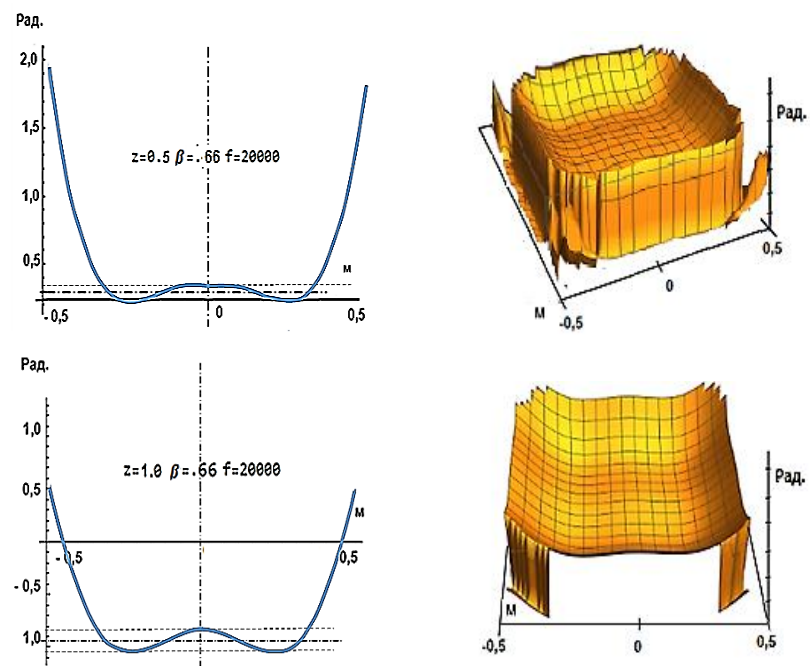


Рис. 18. Изменение фазового фронта пучка с расстоянием от решётки, $\beta = 0,66$

Частотный диапазон

Звукопоглощающее покрытие измерительного бассейна должно быть эффективным во всём частотном диапазоне бассейна, т.е. от сотен герц до сотен килогерц. Обеспечить исследования звукопоглощающих свойств материала в таком широком диапазоне частот с помощью одной решётки Тротта не удаётся. Возможности генерировать плоские волны решёткой Тротта ограничены достаточно узкими диапазонами частот, для которых подбирают параметры решётки. Чтобы настроить решётку на другой диапазон частот, необходимо как минимум изменить расстояние между узлами решётки, что влечёт за собой изменение всей конструкции.

Верхняя граничная частота решётки определяется соотношением $f \leq 0,8 c / d$, где c — скорость звука в воде; d — шаг между узлами решётки. Для нижнего предела строгого критерия не существует. Однако по мере увеличения длины волны свойства решётки конечных размеров приближаются к свойствам точечного излучателя. На практике действуют гораздо более жёсткие ограничения.

Одно из них — выполнение всех рассмотренных выше требований в диапазоне частот. Минимальные требования к этому диапазону определяют пригодность решётки для измерений отражающих свойств материала. При измерениях с неподвижным гидрофоном диапазон перестройки частоты облучающего пучка должен охватывать частоты, по крайней мере, одного максимума и одного минимума интерференции падающей и отражённой волн в точке расположения гидрофона.

Грубую оценку минимально необходимого для этих целей интервала перестройки частоты можно получить, воспользовавшись соотношением $\Delta f = 0,5 c / \Delta r$, где Δr — расстояние между гидрофоном и образцом материала. Например, при $\Delta r = 0,5$ м минимальный интервал перестройки частоты составит 1,5 кГц. При выполнении измерений, как правило, используют больший интервал, чтобы надёжно выделить максимум и минимум интерференции.

Поскольку гидрофон попадает в максимумы и минимумы на разных частотах, очевидным недостатком рассматриваемого способа измерений является неопределённость частоты, к которой следует относить полученный результат. Эта неопределённость увеличивается с уменьшением частоты. При исследовании материалов с существенно неравномерной частотной зависимостью отражающих свойств эта неопределённость увеличивает погрешность результатов. Используя те же экспериментальные данные, можно применить свободный от этого недостатка способ измерений частотной зависимости коэффициента отражения звука, изложенный в [7].

На рисунке 19 приведены результаты моделирования звукового пучка на расстоянии 1 м до решётки с шагом 5,5 см из 20×20 не нулевых взвешива-

ющих коэффициентов в октавном диапазоне частот от 12 000 до 24 000 Гц, $\beta = 0,66$. Максимальные отклонения звукового давления во фронтальной части пучка от среднего значения на нижней $\delta \approx \pm 4,4\%$ и верхней $\delta \approx \pm 2,7\%$ граничных частотах выбранного диапазона.

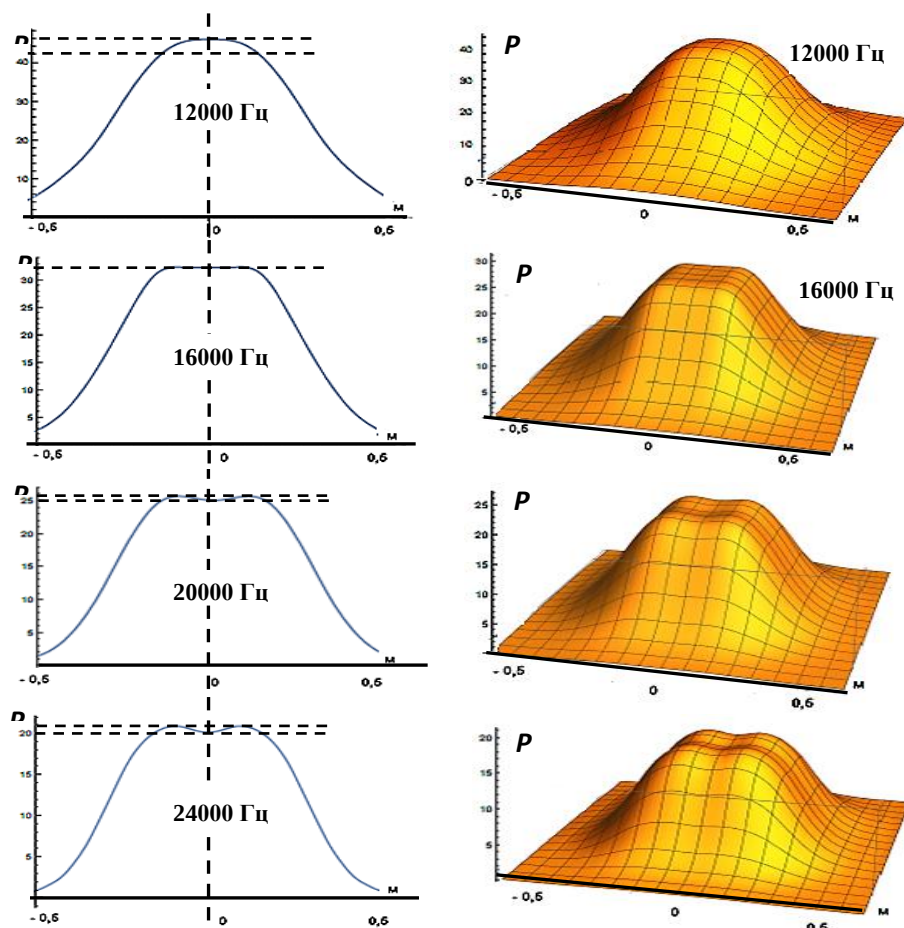


Рис. 19. Результаты моделирования звукового пучка, $z = 1$, $\beta = 0,66$

Представленные на рис. 19 результаты демонстрируют известный эффект: с увеличением частоты в пучке проявляется структура излучающей решётки, с уменьшением частоты фронт пучка по форме приближается к фронту точечного источника — становится куполообразным.

Похожий эффект можно наблюдать на рис. 12 и 13 — при увеличении параметра β фронт пучка сглаживается. На рисунке 19 форма фронта на частоте 16 000 Гц близка к равномерной, то есть можно считать, что использованное при моделировании значение параметра β оказалось удачным для этой частоты. С увеличением частоты до 20 000 Гц возникли заметные осцилля-

ции фронта пучка, которые с увеличением частоты возрастают. Возможная причина — значение параметра β недостаточно для выравнивания фронта на этих частотах. На частоте 12 000 Гц проявляется обратный эффект, соответственно уменьшение параметра β должно выровнять фронт, убрав купол. Таким образом, если применять частотно зависимый параметр β можно добиться, чтобы фронт пучка был выровнен и на границах диапазона частот эксперимента.

Для проверки этой возможности было выполнено моделирование пучка в том же диапазоне частот при изменении параметра β от 0,61 на нижней частоте до 0,72 на верхней частоте. Результаты моделирования на граничных частотах диапазона приведены на рис. 20. Формы фронта пучков практически не различаются. Применение частотно зависимо взвешивания убрало купол на нижней и осцилляции фронта пучка на верхней граничных частотах диапазона. Неравномерность фронта пучка на всех частотах, включая граничные частоты диапазона, уменьшилась до величин, не превосходящих $\pm 1\%$.

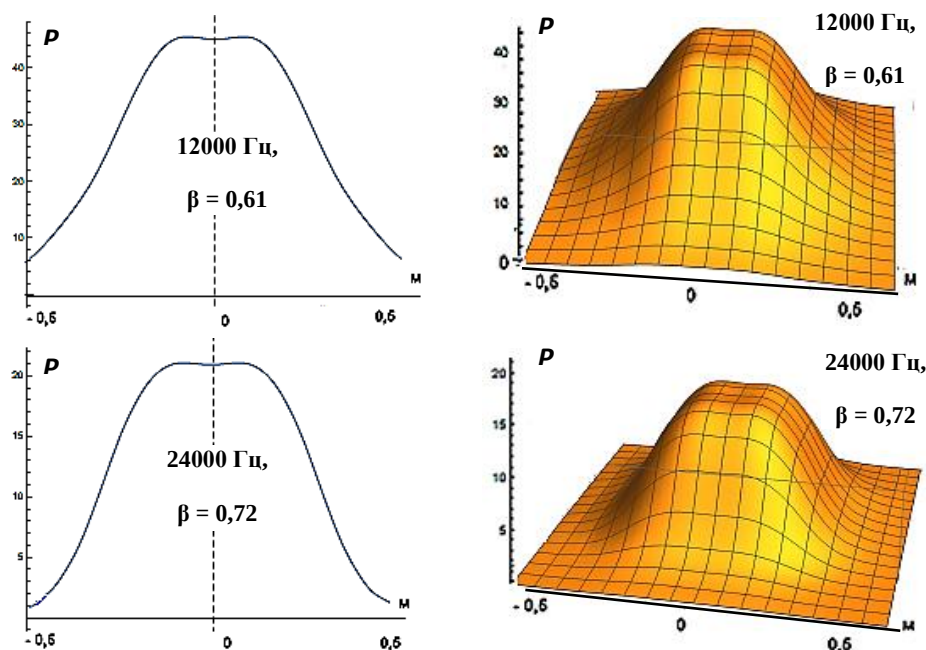


Рис. 20. Результаты моделирования звукового пучка при изменении параметра β с частотой

Опираясь на принцип подобия, можно утверждать, что расчёт, выполненный для решётки в выбранном октавном диапазоне частот, не потеряет справедливости при изменении масштабов эксперимента. Изменению шага решётки будет соответствовать пропорциональное изменение верхней и нижней частот её диапазона. Обратим внимание на то обстоятельство, что в той же степени изменятся диапазон z и поперечный размер звукового пучка.

Использование симметрии направленности

При обсуждении принципа формирования звукового пучка мы ограничились рассмотрением звуковых волн в одном, принятом за положительное, направлении от решётки. Однако все приведённые соотношения справедливы для волн, распространяющихся в противоположном направлении. Таким образом, полная диаграмма направленности излучателя в виде решётки Тротта имеет вид, показанный на рис. 21.

Диаграмма не имеет боковых лепестков, т.е. решётка практически не излучает звук в плоскости расположения её узлов. Это существенно облегчает борьбу с отражениями звука. Если в бассейне ВНИИФТРИ (условно изображён на рис. 21 пунктирными прямыми) расположить решётку в плоскости, параллельной торцевым стенкам, не будет возникать звуковых волн, отражённых дном, поверхностью и боковыми стенками бассейна.

Такая диаграмма может быть получена только для акустически прозрачной решётки, конструкция которой не искажает звуковое поле. На практике наличие заднего лепестка часто является нежелательным, и для его уменьшения принимают различные конструктивные приёмы. Если бы удалось создать решётку с абсолютно симметричной диаграммой направленности, это позволило бы расширить возможности использования решётки для исследований материалов.

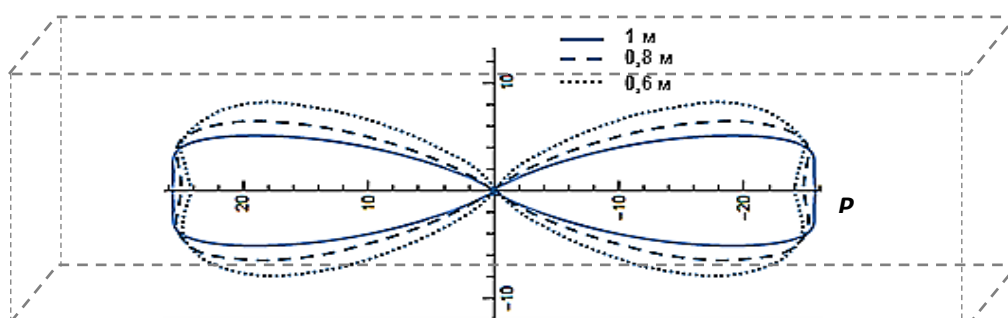


Рис. 21. Диаграммы направленности решётки 20×20 элементов на частоте 20 000 Гц, расстояния $z = 0,6; 0,8; 1$ м, $\beta = 0,66$

Рассмотрим конфигурацию эксперимента (см. рис. 22), при которой акустически прозрачная решётка расположена посередине между облучаемым образцом и гидрофоном.

Несомненным преимуществом такого расположения будет идентичность волновых фронтов, падающих на образец и гидрофон на всех частотах. В сравнении со схемой на рис. 7 такое расположение позволяет увеличивать расстояние между образцом и гидрофоном, а также разность хода падающих на гидрофон прямой и отражённой от образца звуковых волн. Соответственно

этому сокращается частотный интервал между максимумом и минимумом сигнала интерференции, что позволяет с большей точностью определять зависимость коэффициента отражения от частоты. Ещё одно преимущество — возможность применять для обработки суммарного сигнала интерференции технику СКВУ и получать частотную зависимость комплексного коэффициента отражения по отношению частотных зависимостей передаточных импедансов пары излучатель — приёмник в свободном звуковом поле и в поле, возмущённом звуковой волной, отражённой от исследуемого образца материала [8, 9].

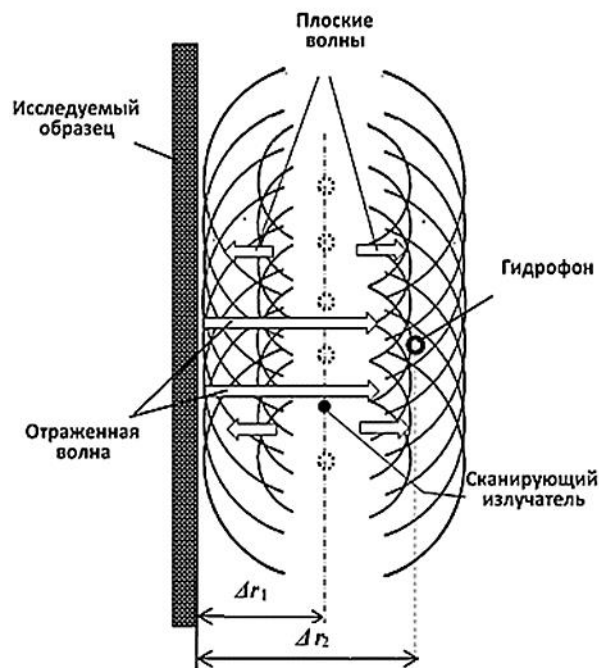


Рис. 22. Схема эксперимента с использованием сканирующего излучателя

Виртуальная решётка Тротта

Предложенное в настоящей работе решение позволяет обойтись без громоздких и сложных в реализации конструкций и создать максимально акустически прозрачную решётку. Решение состоит в замене решётки сканирующим излучателем.

Из формулы (1) следует, что эффекты, возникающие при падении плоской звуковой волны на объект с линейной амплитудной характеристикой, можно получить, разнеся во времени излучение отдельными элементами решётки и обеспечив требуемые фазовые соотношения суммируемых сигнала-

лов, например, синхронизацией по времени излучения. Другими словами, основываясь на принципе суперпозиции для линейных систем, одновременное излучение элементами решётки Тротта можно заменить излучением единственным элементом, последовательно помещаемым в узлы решётки.

При этом взвешенное суммирование звуковых давлений в формуле (1) заменяется взвешенным суммированием сигналов интерференции падающей и отражённой звуковых волн, зарегистрированных приёмником для каждой позиции излучателя.

Обозначим $u_{nm}(f)$ ($n = 1, \dots, N$; $m = 1, \dots, M$) сигнал интерференции падающей и отражённой звуковых волн, зарегистрированный гидрофоном при облучении образца из узла решётки nm . Заменяя взвешенное суммирование звуковых давлений $p_{nm}(x, y, z, f)$ в формуле (1) взвешенным суммированием сигналов интерференции $u_{nm}(f)$, получим суммарный сигнал интерференции падающей на образец и отражённой образцом звуковых волн:

$$u_{\Sigma}(f) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N a_{nm}(f) \exp(i\phi_{nm}(f)) u_{nm}(f). \quad (2)$$

Формулы (1) и (2) идентичны с точностью до обозначения взвешиваемой величины. Принципиальное отличие состоит в том, что в формуле (1) суммируются звуковые давления одновременно излучающих источников, а в формуле (2) суммируются сигналы интерференции, зарегистрированные одним и тем же приёмником в разное время. Второе отличие — частотно зависящие взвешивающие коэффициенты. При этом в формуле (2) взвешивание по амплитуде и фазе выполняют при математической обработке, которую выполняют по окончании измерительной части эксперимента.

Результат суммирования зарегистрированных сигналов интерференции эквивалентен сигналу интерференции при одновременном облучении образца материала всеми излучателями решётки и поэтому неотличим от результата воздействия плоской волны. При расстоянии Δr между гидрофоном и исследуемым образцом период Δf интерференционной осцилляции полученного по формуле (2) суммарного сигнала будет составлять $c / \Delta r$ герц. Коэффициент отражения звука от образца определяют, например, по максимуму и минимуму суммарного сигнала интерференции, наблюдаемых при изменении частоты облучающей волны в пределах периода интерференционной осцилляции [3].

Замена решётки излучателем с механическим сканированием для создания виртуальной плоской волны взвешенным суммированием позволяет составить решётку с любым шагом из любого количества элементов и даёт ряд преимуществ, включая экономию на оборудовании, увеличенные пространственное разрешение и частотный диапазон, устранение взаимного влияния близко расположенных излучателей. Автоматизация процесса измерения не представляет технических проблем и в значительной степени компенсирует недостатки, связанные с увеличением продолжительности измерений.

Оптимизация эксперимента

В классической решётке Тротта взвешивающие коэффициенты не зависят от частоты, причём аппаратно удавалось устанавливать значения коэффициентов с точностью, не превышающей второго десятичного знака [3]. Проведённое моделирование показало, что в рамках поставленной задачи точность до второго знака в значениях взвешивающих коэффициентов недостаточна. Ещё одно преимущество виртуальной решётки — осуществить взвешивание по частоте перед суммированием зарегистрированных гидрофоном сигналов не составляет проблемы. Поскольку эксперимент выполняют в частотном диапазоне, в качестве излучаемого сигнала целесообразно применять шумовой либо ЛЧМ-сигнал. При этом операция взвешивания по частоте сводится к перемножению расчётной зависимости взвешивающего коэффициента от частоты и спектра зарегистрированного сигнала в первом случае, во втором — временных отсчётов сигнала. В обоих случаях не возникает трудностей с аппаратной реализацией взвешивания с точностью выше второго знака.

Большая продолжительность эксперимента предполагает стабильность условий проведения измерений. Сегодня возможно обеспечить требуемую стабильность излучателя, гидрофона и электрических трактов измерительной установки. Наиболее заметное влияние на условия измерений оказывает нестабильность среды. Экспериментально показано, что суточная нестабильность передаточного импеданса пары излучатель — приёмник в бассейне ВНИИФТРИ может достигать 0,5 дБ. Типичная причина — осаждение, накопление и отрыв микропузырьков газа с поверхностей преобразователей. Это вынуждает максимально сокращать время эксперимента.

Тротт оптимизировал размер решётки, исключая из неё узлы с пренебрежимо малыми для решаемой задачи взвешивающими коэффициентами. Тот же подход справедлив и для виртуальной решётки. Исключение узлов с малыми весами приводит к искажениям фронта пучка характерными осцилляциями в виде «ряби», которую можно видеть на рис. 23, также несколько ухудшается характеристика спадания.

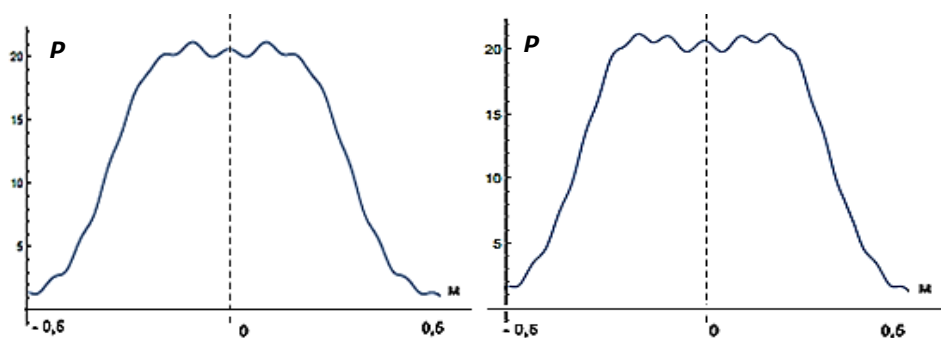


Рис. 23.

Во многих случаях влиянием этого эффекта можно пренебречь. Тротту было достаточно, чтобы размах осцилляций волнового фронта находился в пределах ± 1 дБ, при этом он исключал узлы с коэффициентами менее 0,04. Этого может быть достаточно и для многих задач по исследованию свойств материалов. В ситуации, когда исследуемый материал не обладает свойствами акустического зеркала, его поверхность выполняет усреднение отражённого пучка, тем самым уменьшая влияние «ряби» на получаемый результат.

Сокращение продолжительности эксперимента

На продолжительность эксперимента в бассейне с отражающими звук границами влияют как длительность реверберационной паузы между излучениями, так и собственно продолжительность излучения, требуемая для обеспечения необходимого разрешения по частоте. Однако определяющим фактором являются особенности функционирования системы позиционирования преобразователей под водой. Время постановки преобразователя в заданную точку с требуемой точностью определяется продолжительностью установления системы позиционирования и может превышать несколько минут.

Чтобы уменьшить продолжительность эксперимента, виртуальную решётку можно построить, используя группу жёстко связанных и вместе перемещаемых излучателей. Для линейной решётки использование группы из двух излучателей позволяет сократить время эксперимента примерно в два раза. Чтобы минимизировать взаимное влияние, излучатели должны быть максимально удалены друг от друга, при этом количество перемещений при сканировании также должно быть минимальным. Чтобы удовлетворить этим требованиям, расстояние между излучателями нужно выбирать близким к половине стороны решётки. Для двумерной решётки оптимальным будет использование группы из четырёх излучателей, образующих плоскую ячейку со стороной, примерно равной половине стороны решётки.

Преимущества — разреженная малоэлементная ячейка обеспечивает минимальное нарушение акустической прозрачности и минимально возможное взаимное влияние излучателей. Количество переустановок ячейки при сканировании сокращается почти в четыре раза, соответственно уменьшается накапливаемая при переустановках ошибка позиционирования.

К недостаткам использования сканирующей малоэлементной разреженной ячейки излучателей следует отнести ухудшение акустической прозрачности синтезируемой виртуальной решётки. Также возникает необходимость устанавливать параметры сигнала возбуждения по каждому каналу излучения в соответствии с матрицей взвешивающих коэффициентов. Одновременный приём гидрофоном сигналов нескольких излучателей не допус-

кает возможности обратного разложения зарегистрированного гидрофоном сигнала, что ограничивает возможности последующей обработки. По сложности реализации единовременное излучение ячейкой источников занимает промежуточное положение между одиночным сканирующим излучателем и классической решёткой Тротта.

Этот недостаток можно устранить. Последовательное излучение элементами ячейки несколько увеличивает продолжительность эксперимента, однако преимущества последовательного излучения с лихвой перекрывают этот недостаток.

Калибровка габаритных преобразователей

При калибровке преобразователей необходимо выполнить два противоречивых требования. Первое — точно определить звуковое давление в точке размещения приёмника. Второе — создать плоскую звуковую волну, что на практике решается на основе критерия L^2 / λ . Для приёмника больших габаритов это задача далеко не тривиальна.

Возвращаясь к упомянутой во введении задаче калибровки гидроакустического рекордера на средних частотах, обратим внимание, что рекордер (изображён на рис. 24) имеет вытянутую осесимметричную конструкцию с активным элементом, удалённым от корпуса. При калибровке в опорном направлении в формулу расчёта расстояния дальнего поля следует подставлять диаметр d корпуса. При боковом падении звуковой волны в этой же формуле нужно использовать значение длины L рекорда, т.е. расстояние дальнего поля увеличится многократно.

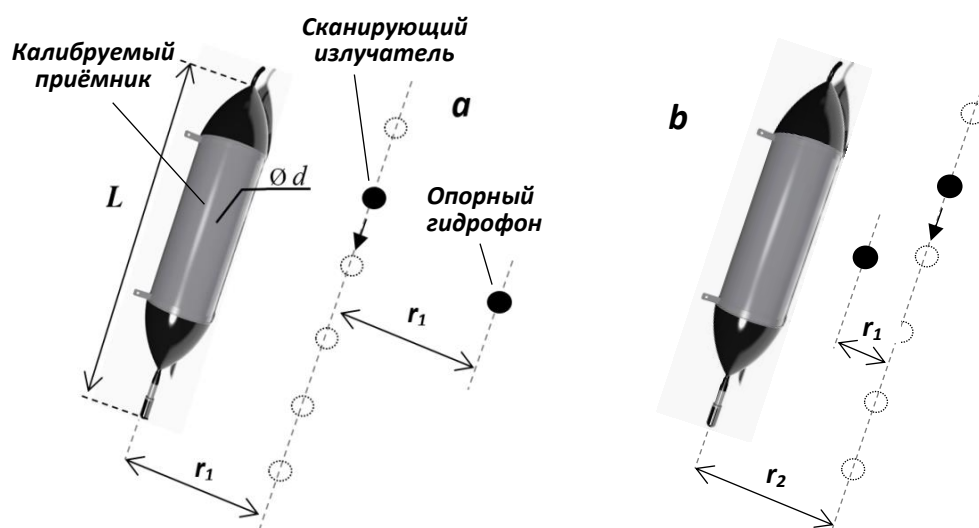


Рис. 24.

Выходом из этой ситуации может быть применение линейной виртуальной решётки (см. рис. 24), формирующей цилиндрическую волну. При этом расстояние дальнего поля будет определяться не длиной рекордера L , а его диаметром d .

Размещать опорный гидрофон и калибруемый рекордер предпочтительно равноудалённо от решётки по разные её стороны, как это показано на рис. 24а. В отличие от размещения согласно рис. 24b, когда рекордер и опорный гидрофон находятся на разных расстояниях от решётки, при равноудалённом размещении задача фокусировки решётки значительно упрощается — в силу симметрии направленности задачу нужно решать для единственного расстояния. Ещё одно преимущество такого расположения — кривизна фронта волны и фазовые соотношения между колебательной скоростью и звуковым давлением идентичны, что может оказаться весьма полезным при калибровке приёмников векторных величин.

При размещении по схеме на рис. 24а преобразователи максимально разнесены в пространстве, при этом их взаимное влияние минимально, также отсутствует эффект затенения опорным гидрофоном.

Похожий приём, основанный на использовании свойств цилиндрической волны, был применён в [10] для калибровки многоэлементного излучателя SONAR. Размер излучателя составляет 108 длин волн на резонансной частоте 300 кГц. Исходя из критерия $r \geq L^2 / \lambda$, расстояние дальнего поля должно составлять 58 м. Основываясь на соотношении длины и поперечного размера излучателя, калибровку выполнили при расстоянии 67 см между линейной решёткой и излучателем. На точности результата сказалось размещение преобразователей по схеме на рис. 24b, отсутствие частотно зависимого взвешивания ограничило возможности калибровки только резонансной частотой.

Использование принципа взаимности излучения и приёма

На первый взгляд, решение, которое предложено ниже, выглядит парадоксальным.

Принцип взаимности излучения и приёма — один из основополагающих принципов акустики — означает, что если излучатель и приёмник поменять местами, результат не изменится. Возможность практической реализации этого принципа накладывает ряд ограничений. Излучающая и приёмная системы должны быть линейными, а преобразователи — обратимыми. При этом требования изотропности и однородности относятся ко всему акустическому окружению излучателя и приёмника.

В современных эталонных установках, реализующих принцип взаимности, требования линейности и обратимости выполняются с высокой степенью точности. Для того, чтобы принцип взаимности сохранялся при иссле-

дованиях акустических свойств материалов, необходимо, чтобы исследуемый образец сохранял свойства изотропности и однородности при изменении угла падения звуковой волны. В отсутствие априорной информации об этом необходима экспериментальная проверка.

Такую проверку можно выполнить, используя два обратимых преобразователя T_1 и T_2 . Один устанавливают в месте расположения гидрофона, другой помещают в узлы виртуальной решётки. Для каждого положения преобразователей измеряют два передаточных импеданса пары излучатель —

приёмник $\Omega_{1-2}(f) = \frac{U_{T_1}(f)}{I_{T_2}(f)}$ и $\Omega_{2-1}(f) = \frac{U_{T_2}(f)}{I_{T_1}(f)}$, где $U_{T_i}(f)$ — напряжение

на выходе преобразователя в режиме приёма; $I_{T_i}(f)$ — ток через преобразователь в режиме излучения, изменяя направление излучения. Предположение об однородности и изотропности материала принимается, если при изменении направления излучения передаточные импедансы пары не меняются: $\Omega_{1-2}(f) = \Omega_{2-1}(f)$.

Такую проверку желательно выполнять и при использовании рассмотренных выше способов, поскольку нарушение свойств однородности и изотропности материала может усложнить интерпретацию или поставить под сомнение полученные результаты.

Предположим, что исследуемый образец материала не нарушает принципа взаимности излучения и приёма. Опираясь на принципы взаимности приёма и излучения и суперпозиции для линейной системы, приходим к следующей схеме измерений. Если в качестве излучателя и гидрофона применять обратимые преобразователи, электроакустическая система, состоящая из такого излучателя, гидрофона и облучаемого образца материала, линейна, пассивна и взаимна. Эти свойства системы позволяют изменять направление распространения сигнала на противоположное — гидрофон использовать не как приёмник, а как излучатель, при этом сканирующую ячейку строить не из группы излучателей, а из группы приёмников — гидрофонов.

На рисунке 25 приведена схема эксперимента с использованием излучателя сферической волны и сканирующей четырёхэлементной разреженной ячейки приёмников. Ячейкой сканируют узлы решётки Тротта. Для каждого положения ячейки из одной и той же точки, которая не меняет своего положения на протяжении всего эксперимента, образец облучают сферической волной излучателя. С помощью многоканального АЦП регистрируют сигналы интерференции одновременно в четырёх узлах решётки. По завершении сканирования суммарный сигнал интерференции получают взвешенным суммированием по формуле (2).

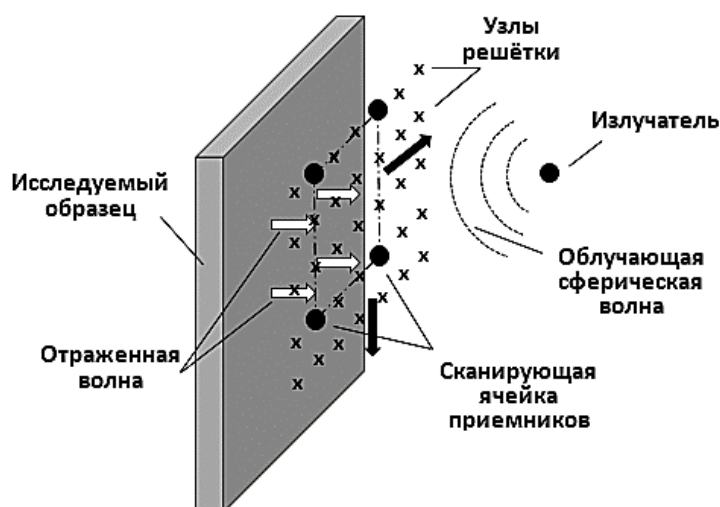


Рис. 25. Схема эксперимента с использованием излучателя сферической волны и сканирующей ячейки приёмников

Выигрыш — значительное упрощение измерительной установки при сохранении всех преимуществ использования малоэлементной разреженной ячейки излучателей. При использовании единовременно облучающей ячейки на приёме невозможно выделить сигнал отдельного излучателя, что исключает возможность его взвешивания при последующей обработке. При использовании приёмной ячейки сигнал одного излучателя принимается четырьмя независимыми гидрофонами, что позволяет при обработке выполнить взвешивание перед суммированием. Такую схему измерений сегодня несложно реализовать на стандартных, доступных в продаже приборах. В отличие от излучателя, размер гидрофона в значительно меньшей степени обусловлен рабочим частотным диапазоном. Использование гидрофонов малого размера позволяет улучшить акустическую прозрачность приёмной ячейки в сравнении с ячейкой излучателей.

Приведённая на рис. 25 схема эксперимента весьма похожа на схему, изображённую на рис. 1. В некоторых работах приёмник перемещали параллельно поверхности, однако условия наблюдаемости интерференционной картины не соблюдали, взвешивание не применяли. При выполнении описанного в [3] эксперимента с неподвижными излучателем и гидрофоном соблюдали условия наблюдаемости интерференции. Если этот эксперимент выполнять, устанавливая гидрофон в узлы решётки и применяя взвешенное суммирование, получим новое качество — результат измерений приближается к результату для плоской волны. Повторимся, этого не произойдёт для

материала, не отвечающего требованиям однородности и изотропности, например вследствие возникновения в образце поверхностных и внутренних волн.

Взвешивание по фазе

Известно, что подбором фаз излучающих элементов решётки можно изменить как направление излучения, так и фокусировку луча. Фокусируя луч, обычно стараются получить диаграмму направленности, как можно близкую по форме к игольчатой. При исследованиях образца материала цели взвешивания по фазе существенно отличаются.

В рассматриваемой задаче целями являются как изменение направления пучка, так и увеличение диапазона расстояний, в котором фронт пучка остаётся плоским. Особенность также в том, что при повороте пучка форма его фронта должна сохраняться.

Разворот пучка на α градусов получают фазовым взвешиванием:

$$\phi_{nm}(f) = \frac{4\pi \cdot n \cdot d \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot f}{c}.$$

На рисунке 26 представлены диаграммы направленности на частоте 20 000 Гц для решётки с шагом 5,5 см из 20×20 ненулевых взвешивающих коэффициентов по амплитуде, расстояние — 1 м.

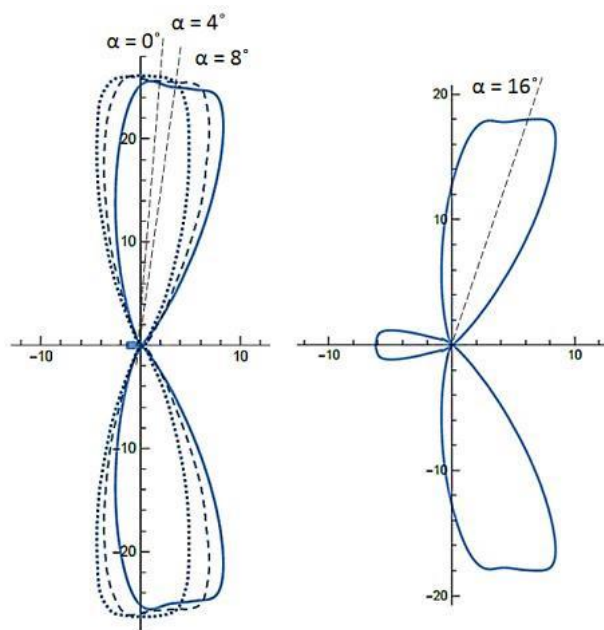


Рис. 26. Диаграммы направленности пучка для $\alpha = 0^\circ, 4^\circ, 8^\circ, 16^\circ$

При небольших углах наклона пучка фронт остаётся плоским. С увеличением угла наклона фронт пучка искажается, возникает боковой, на жаргоне, принятом в радиолокации, уравнивающий лепесток, который увеличивается с увеличением α .

Возможность управлять углом наклона пучка даёт то преимущество, которое позволяет, не изменяя положения образца, изменять угол падения на него звукового пучка с плоским фронтом, т.е. измерять зависимость коэффициента отражения от угла падения волны.

Заключение

Побудительным мотивом настоящей работы стало стремление адаптировать методы, применяемые для исследования акустических свойств образца материала, к условиям бассейна. Помимо ограничений физического характера (сферическая звуковая волна вследствие небольших расстояний между излучателем и приёмником, краевые эффекты, возникающие у образца ограниченных размеров, отражения звука от границ бассейна), существуют и технические трудности, в том числе: большое время переустановки преобразователя под водой, стабильность среды, недостаточная для выполнения продолжительного эксперимента.

Авторы старались по-новому осмыслить подходы к решению поставленной задачи, опираясь на такие основополагающие принципы, как принцип Кирхгофа, принципы суперпозиции, подобия, взаимности излучения и приёма. Основное внимание сосредоточили на обеспечении плоскостности фронта звукового пучка. Особенностью подхода авторов является не стремление физически реализовать звуковой пучок, а создать условия, при которых результаты эксперимента будут соответствовать определению — падающая на образец звуковая волна плоская.

Отправная идея — формирование пучка многоэлементным преобразователем согласно принципу Кирхгофа. В качестве такого преобразователя выбрана решётка Тротта в её виртуальном представлении. Исходя из принципов суперпозиции и взаимности излучения и приёма, было предложено реализовать виртуальную решётку методом сканирующего преобразователя в двух вариантах — на излучение и на приём, обеспечивать требуемый рабочий частотный диапазон перепланировкой узлов виртуальной решётки с использованием принципа подобия.

Целью выполненного моделирования была проверка возможности получать приемлемо плоский фронт акустического пучка в условиях большого количества взаимосвязанных ограничений, в том числе:

- достаточный размер поперечного сечения акустического пучка;
- интервал частот, обеспечивающий наблюдение интерференционной картины;

- достаточный диапазон расстояний, охватывающий положения излучателя, исследуемого образца и приёмника;
- разумные размеры решётки и количество её узлов;
- использование образцов, размеры которых позволяют выполнить измерения другими способами;
- ограниченные размеры бассейна с отражающими звук поверхностями;
- необходимость выполнять исследования в требуемом диапазоне частот.

Чтобы продемонстрировать возможность удовлетворить перечисленным ограничениям, использовали взвешивающие коэффициенты окна Тьюки, отличительная особенность которого — способность управлять формой окна.

Выполненное моделирование показало потенциальную возможность в условиях бассейна решать задачу измерения отражающих свойств образца материала с помощью виртуальной плоской решётки. Полученные результаты и сделанные оценки дают основания судить о целесообразности продолжения предпринятых исследований.

Литература

1. Исаев А.Е. Точная градуировка приёмников звукового давления в водной среде в условиях свободного поля. Менделеево: ВНИИФТРИ, 2008.
2. Исаев А.Е., Матвеев А.Н., Николаенко А.С., Поликарпов А.М. Чувствительность гидроакустического приёмника при измерениях подводного шума // Измерительная техника. 2018. № 9. С. 61–65.
3. Боббер Р.Дж. Гидроакустические измерения. М.: Мир, 1974.
4. Rowell R.C., Tankielun A. Plane Wave Converter for 5G Massive MIMO Base-station Measurements // 12th European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2018. London, United Kingdom.
5. R&S®PWC200 Plane Wave Converter for 5G massive MIMO base station testing [Electronic resource]. Official website Rohde & Schwarz USA, Inc. URL: https://www.rohde-schwarz.com/us/product/pwc200-productstartpage_63493-533696.html.
6. Bucci O.M., Migliore M.D., Panariello G., Pinchera D. Plane-wave generators: Design Guidelines, Achievable Performances and Effective Synthesis // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. April 2013. V. 61. No. 4. P. 2005–2018.
7. Исаев А.Е., Николаенко А.С., Поликарпов А.М. Измерение частотной зависимости коэффициента отражения звука в условиях незаглушенного бассейна // Измерительная техника. 2018. № 04. С. 53–56.
8. Исаев А.Е., Николаенко А.С. Способ измерения частотной зависимости коэффициента отражения звука от поверхности. Патент на изобретение № 2655478, С1. МПК G01N 29/00. Опубликовано: 28.05.2018. Бюл. № 16.

9. Исаев А.Е., Матвеев А.Н. Способ измерения частотной зависимости комплексного коэффициента отражения звука от поверхности с использованием шумового сигнала. Патент на изобретение № 2695287, С1. МПК G01N 29/00. Опубликовано: 22.07.2019. Бюл. № 21.
10. Luigi Troiano, Viale San Bartolomeo Plane/cylindrical wave synthesis in a small tank applied to far-field beam pattern measurement of a 300 kHz sonar transducer // Proceedings of 5th Underwater Acoustics Conference and Exhibition UACE 2019. Hersonissos, Crete-Greece, 2019. P. 55–60.