

**КАЛИБРОВКА ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ПРИЁМНОГО
УСТРОЙСТВА С БОЛЬШИМ ОТНОШЕНИЕМ
ПРОДОЛЬНОГО РАЗМЕРА К ПОПЕРЕЧНОМУ**

А.Е. Исаев

*ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,
isaev@vniiftri.ru*

Аннотация. При калибровке гидроакустического приёмного устройства с большим отношением продольного размера к поперечному ограничения, обусловленные проблемой обеспечения условий дальнего поля, можно преодолеть, излучая звуковую волну с цилиндрическим фронтом. Если ось симметрии приёмного устройства в продольном направлении совпадает с касательной к волновому фронту, звуковые давления на продольном размере устройства будут одинаковыми по амплитуде и фазе. Дальнее поле будет определять кривизна фронта волны на поперечном размере. В сравнении с облучением сферической волной расстояние дальнего поля уменьшится пропорционально квадрату отношения поперечного размера устройства к продольному. Приведены результаты моделирования, подтверждающие возможность синтезировать линейной фазированной решёткой звуковую волну с приемлемым для калибровки качеством цилиндрического фронта. Одновременное излучение элементами решётки предложено заменить излучением единственным элементом, последовательно помещаемым в узлы решётки.

Ключевые слова: гидроакустическое приёмное устройство, калибровка, расстояние дальнего поля, синтез цилиндрической волны, виртуальная фазированная решётка излучателей.

**CALIBRATION OF AN UNDERWATER SOUND
RECEIVER WITH A LARGE RATIO
OF LONGITUDINAL SIZE TO TRANSVERSE**

A.E. Isaev

*FSUE «VNIIFTRI», Mendeleevo, Moscow region, Russia,
isaev@vniiftri.ru*

Annotation. When calibrating a underwater sound receiver with a large ratio of the longitudinal to the transverse dimension, the limitations caused by the problem of the far-field conditions ensuring can be overcome by radiating a sound wave with a cylindrical front. If the receiver symmetry axis in the longitudinal direction coincides with the tangent to the wave front, the sound pressures on the device longitudinal dimension will be the same in amplitude and phase. The far field will determine by the wave front curvature at the transverse dimension. The far-field distance decrease in proportion to the square of the ratio of the device longitudinal dimension to transverse compared to irradiation with a spherical wave. The results of modeling, confirming the possibility of synthesizing a sound wave with a cylindrical front with acceptable for calibration quality using a linear phased array are presented. The simultaneous radiation by the array elements replace with radiation by single element sequentially placed in the nodes of the array is proposed.

Key words: underwater sound receiver, calibration, far-field distance, cylindrical wave synthesis, virtual phased radiating array.

Точка — это прямая, если смотреть в торец.

Чтобы выполнить калибровку электроакустического преобразователя, его поверхность должна быть озвучена плоской звуковой волной. На практике это условие обеспечивают, располагая калибруемый преобразователь в дальнем поле излучателя — на достаточно большом расстоянии, чтобы участок сферического фронта волны, который падает на преобразователь, был достаточно мал (или имел достаточно большой радиус кривизны), и падающую волну можно было считать плоской. Консервативный критерий для оценки расстояния дальнего поля даётся в [1]:

$$r_{\text{дп}} \geq 3 \frac{L^2}{\lambda}, \quad (1)$$

где $r_{\text{дп}}$ — расстояние между излучателем и преобразователем; L — размер преобразователя; λ — длина излучаемой звуковой волны.

Из формулы (1) следует: чем больше размеры преобразователя и выше частота калибровки, тем бóльших габаритов потребуются звукомерное помещение, чтобы удовлетворить критерий дальнего поля. Например, чтобы выполнить калибровку гидроакустического преобразователя размером 0,75 м на частоте 20 кГц ($\lambda \approx 0,075$ м), его необходимо отнести от излучателя более чем на 22 м. Такое расстояние можно обеспечить только в природном водоёме, при этом среди прочих трудностей, обусловленных большим числом слабо поддающихся контролю факторов, влияющих на результаты калибровки, возникает проблема малого отношения сигнал/шум.

Конструкциям широкого класса гидроакустических приёмных устройств (гидрофон с корпусом предусилителя, многоэлементная линейная антенна, регистратор подводного звука и т.п.) характерно большое отношение продольного размера к поперечному. Для приёмных устройств (ПУ) с конструкцией такого типа ограничения, обусловленные проблемой обеспечения условий дальнего поля, можно преодолеть, излучая при калибровке волну с цилиндрическим фронтом.

Выигрыш в расстоянии дальнего поля продемонстрируем на примере широко распространённого в практике гидроакустических измерений регистратора подводного звука типа AURAL, изображённого на рис. 1.



Рис. 1. Регистратор подводного звука AURAL

Регистратор имеет вытянутую осесимметричную конструкцию с активным элементом (гидрофоном), установленным на торце корпуса, длиной $L \approx 0,75$ м и диаметром $d \approx 0,15$ м. Чтобы в результатах калибровки правильно учесть влияние дифракции звука на корпусе, при облучении регистратора сферической волной в формулу (1) следует подставлять его наибольший размер — длину L . Как было показано выше, полученное расстояние дальнего поля может оказаться неприемлемым для практики.

Если излучать цилиндрическую звуковую волну, а сам регистратор расположить так, чтобы его ось симметрии в продольном направлении совпала с касательной к волновому фронту (как это показано на рис. 2), звуковые давления на продольном размере регистратора будут одинаковыми по амплитуде и фазе. Дальнее поле будет определять кривизна фронта волны на поперечном размере регистратора, и для расчёта расстояния дальнего поля в формулу (1) вместо длины L следует подставить диаметр корпуса d .

При этом расстояние дальнего поля $r_{\text{ип}}$ уменьшится пропорционально квадрату отношения продольного размера регистратора к поперечному $\left(\frac{L}{d}\right)^2$ — примерно в 25 раз в сравнении со сферической волной. Соответственно для одного и того же расстояния $r_{\text{ип}}$ в 25 раз увеличится верхняя частота калибровки — с 1,7 кГц в поле сферической волны до 43 кГц в поле цилиндрической волны при расстоянии 2 м между излучателем и регистратором.

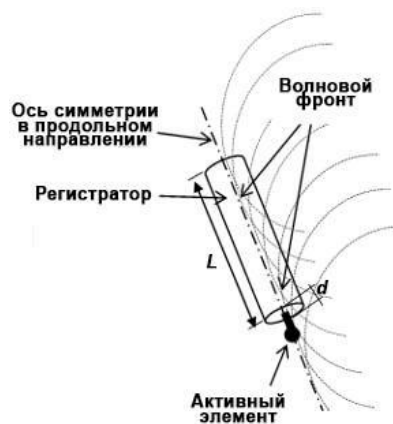


Рис. 2. Расположение преобразователя при калибровке в поле цилиндрической волны

Волну с цилиндрическим фронтом создаёт линейная решётка источников сферических звуковых волн. Излучатели решётки, действуя одновременно, синтезируют звуковую волну в соответствии с классической концепцией Гюйгенса. В подводной акустике излучающие решётки называют решётками Тротта [1]. Поскольку решётка Тротта состоит из конечного числа излучателей,

фронт волны будет отличаться от цилиндрического. Близость формируемой волны к цилиндрической обеспечивают надлежащим подбором амплитуд излучения.

В отличие от решётки Тротта в фазированной решётке управляют как амплитудами, так и фазами сигналов излучения. Для гармонического сигнала частоты f волновой фронт, создаваемый фазированной решёткой из N элементов, может быть представлен суммой вкладов излучателей сферических волн (рис. 3):

$$p(x, y, z, f) = \sum_{n=1}^N A_n \exp(i\varphi_n) p_n(x, y, z, f) = \sum_{n=1}^N A_n \exp(i\varphi_n) \frac{\exp(-ikR_n)}{R_n}, \quad (2)$$

где $p(x, y, z, f)$ — звуковое давление, создаваемое решёткой в точке x, y, z ; $P_n(x, y, z, f)$ — звуковое давление, создаваемое в точке x, y, z излучателем из узла n решётки; A_n, φ_n — коэффициенты взвешивания звуковых давлений излучателей по амплитуде и фазе; R_n — расстояние от узла n до точки x, y, z ; $k = 2\pi f / c$ — волновое число, c — скорость звука; зависимость от времени $\exp(i2\pi ft)$ опущена.

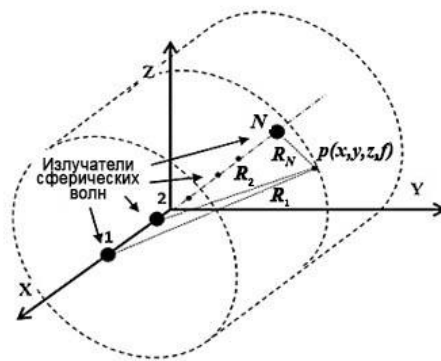


Рис. 3. Синтез цилиндрической волны источниками сферических волн, образующими линейную решётку из N элементов

Ряд причин препятствует распространению излучающих решёток в метрологической практике. Чтобы сгенерировать однородную цилиндрическую волну линейной решёткой Тротта, расстояние между излучателями должно быть не более $0,8\lambda$ [1]. Этому требованию трудно удовлетворить для коротких волн вследствие трудоёмкости и сложности создания протяжённой решётки с плотным расположением излучателей. Взаимное влияние близко расположенных излучателей с их кабелями и элементами крепления приводит к нарушению справедливости представления реального элемента решётки изотропным точечным источником. Необходимость точно устанавливать амплитуды и фазы сигналов возбуждения в каждом канале излучения значительно усложняет аппаратную реализацию.

Особенностью предлагаемого подхода является не стремление физически реализовать звуковую волну, а создать условия, при которых результаты измерительного эксперимента эквивалентны облучению калибруемого преобразователя звуковой волной требуемой формы. Эту задачу предлагается решать, заменив одновременное излучение элементами решётки излучением единственным элементом, последовательно помещаемым в узлы решётки.

Выражение для выходного напряжения $U_{\text{кп}}(f)$ калибруемого ПУ при облучении его цилиндрической волной получим заменой звуковых давлений в правой части формулы (2) выходными напряжениями ПУ $U_{\text{кп}}(f)$ при облучении его сферическими волнами излучателей решётки:

$$U_{\text{кп}}(f) = \sum_{n=1}^N A_n \exp(i\varphi_n) U_{\text{кп}_n}(f). \quad (3)$$

Из формулы (3) следует, что эффекты, возникающие при падении на ПУ цилиндрической звуковой волны, можно получить, разнеся во времени излучение отдельными элементами решётки. То есть, основываясь на принципе суперпозиции для линейных систем, одновременное излучение элементами решётки можно заменить излучением одиночным излучателем, последовательно помещаемым в узлы решётки. При этом выходное напряжение $U_{\text{кп}}(f)$ получают взвешенным по амплитуде и фазе суммированием зарегистрированных на выходе ПУ напряжений $U_{\text{кп}_n}(f)$. Такое суммирование может быть выполнено по окончании измерительной части эксперимента. Результат суммирования эквивалентен выходному напряжению калибруемого ПУ при одновременном облучении его всеми излучателями решётки и поэтому неотличим от результата воздействия цилиндрической волны.

Чувствительность калибруемого ПУ определяют методом сравнения с опорным приёмником, чувствительность $M_{\text{оп}}(f)$ которого известна. Для этого опорный приёмник располагают на том же расстоянии от решётки (синтезируемой перемещениями излучателя), что и калибруемое ПУ, и регистрируют выходные напряжения опорного приёмника $U_{\text{оп}_n}(f)$ при его облучении из каждого узла решётки.

Чувствительность $M_{\text{кп}}(f)$ калибруемого ПУ рассчитывают по формуле:

$$M_{\text{кп}}(f) = M_{\text{оп}}(f) \frac{\sum_{n=1}^N A_n \exp(i\varphi_n) U_{\text{кп}_n}(f)}{\sum_{n=1}^N A_n \exp(i\varphi_n) U_{\text{оп}_n}(f)}.$$

Взвешивающие коэффициенты по амплитуде A_n и фазе φ_n , обеспечивающие близость синтезируемого волнового фронта к цилиндрическому, получают решением оптимизационной задачи.

Ниже приведены результаты моделирования, подтверждающие возможность синтезировать линейной фазированной решёткой звуковую волну с приемлемым для калибровки качеством цилиндрического фронта. При моделировании в качестве продольного и поперечного размеров калибруемого

ПУ принимали длину $L = 0,75$ м и диаметр $d = 0,15$ м регистратора AURAL соответственно, скорость звука в воде — 1470 м/с, расстояние от решётки — 2 м. Как было упомянуто выше, при выбранных параметрах моделирования верхняя частота калибровки ПУ при облучении цилиндрической волной составляет 43 кГц. Критерием при расчёте коэффициентов взвешивания по амплитуде и фазе служило минимальное отличие синтезируемого решёткой волнового фронта от цилиндрического на участке протяжённостью не менее продольного размера преобразователя.

Коэффициенты взвешивания по амплитуде и фазе, полученные на частоте 32 кГц для линейной решётки из 24 узлов с шагом 8 см, представлены на рис. 4а и б.

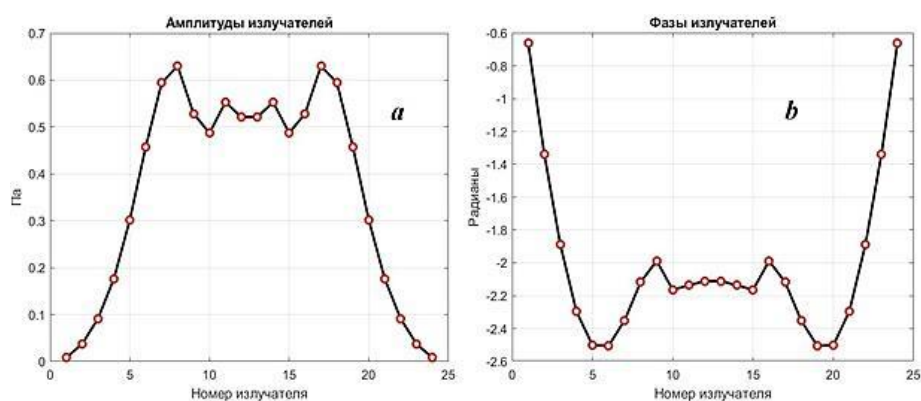


Рис. 4. Коэффициенты взвешивания по амплитуде (а) и фазе (б) для линейной решётки из 24 элементов

На рис. 5а и б приведены амплитудные и фазовые распределения волновых фронтов, синтезированных решёткой на частотах 18, 32 и 36 кГц.

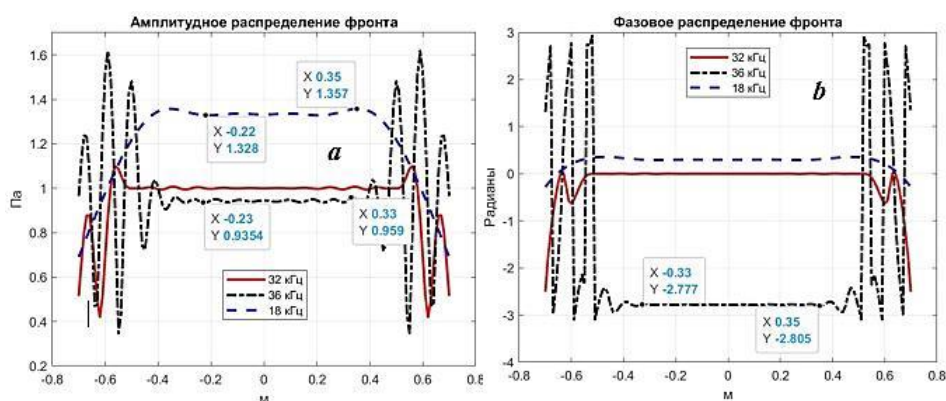


Рис. 5. Амплитудные (а) и фазовые (б) распределения волновых фронтов, синтезированных на частотах 18, 32 и 36 кГц

На срединных участках волновых фронтов распределения амплитуды и фазы близки к равномерным. Протяжённость этих участков составляет не менее 0,8 м, что вполне достаточно для облучения ПУ с продольным размером 0,75 м. Далее при анализе результатов моделирования под амплитудами, фазами и их распределениями будем понимать амплитуды, фазы и их распределения на срединных (близких к равномерным) участках волновых фронтов. На частоте 32 кГц, для которой получили коэффициенты взвешивания, неравномерность фронта не превышает по амплитуде 0,3 %, по фазе — 0,01 рад. К краям рассматриваемого частотного диапазона качество синтезируемого волнового фронта ухудшается. На частоте 36 кГц неравномерность по амплитуде увеличивается до 2 %, по фазе — до 0,02 рад. На частоте 18 кГц неравномерность фронта максимальна и достигает 2,5 % по амплитуде и 0,04 рад по фазе.

Чтобы на частоте калибровки не нарушался критерий дальнего поля необходимо, чтобы для синтезированного волнового фронта суммарная неравномерность по фазе на продольном и поперечном размерах ПУ не превысила неравномерность фазы на поперечном размере для верхней частоты калибровки. На частоте 43 кГц неравномерность фазового фронта на поперечном размере 0,15 м составляет 0,25 рад. Суммарная неравномерность синтезированной волны по фазе на частоте 36 кГц не превышает 0,23 рад, на частоте 32 кГц — 0,21 рад и на частоте 18 кГц — 0,15 рад. Соответственно критерий дальнего поля выполняется во всём рассматриваемом диапазоне.

Погрешность калибровки рабочих средств измерений подводного звука установлена межгосударственной поверочной схемой [2] и составляет от 2 (примерно 24 %) до 5 дБ. При этом наибольшая в рассматриваемом диапазоне частот неравномерность волнового фронта по амплитуде 2,5 % внесёт в бюджет погрешности пренебрежимо малую составляющую.

Зависимости на рис. 6 демонстрируют результаты моделирования, выполненного с целью проверки устойчивости качества синтезируемого волнового фронта к изменению расстояния от решётки.

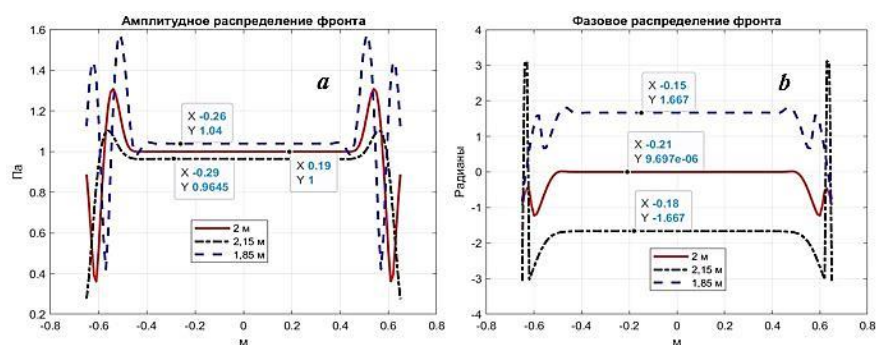


Рис. 6. Амплитудные (а) и фазовые (б) распределения волновых фронтов на расстояниях 1,8; 2,0 и 2,15 м от решётки, частота — 32 кГц

Отношения средних значений амплитуд фронтов на рис. 6а очень близки к значениям квадратного корня из обратного отношения расстояний, для которых они получены. Изменение на 7,5 % расстояния, для которого были рассчитаны коэффициенты взвешивания, приводит к близким к 4 % изменениям в соответствующую сторону амплитуды фронта, фазы — на $1,67\pi$. Полученные результаты хорошо согласуются с законом изменения амплитуды $|p|$ и набега фазы $\Delta\varphi$ звукового давления с расстоянием от излучателя цилиндрической волны:

$$|p| \propto 1 / \sqrt{r_{\text{ин}}};$$

$$\Delta\varphi = k\Delta r_{\text{ин}}.$$

Неравномерность фронта достигает наибольших значений при расстоянии 1,85 м до решётки и составляет не более 2 % по амплитуде и 0,02 рад по фазе, что, как было показано выше, не нарушает условия дальнего поля и установленных норм точности калибровки средств измерений подводного звука.

Чтобы синтезировать волновой фронт с протяжённым равномерным участком на более высоких частотах, необходимо уменьшить её шаг, сохранив при этом достаточную апертуру решётки. Это приводит к увеличению количества элементов решётки. На рис. 7 представлены коэффициенты взвешивания по амплитуде и фазе, полученные на частоте 43 кГц для линейной решётки из 32 узлов с шагом 6 см.

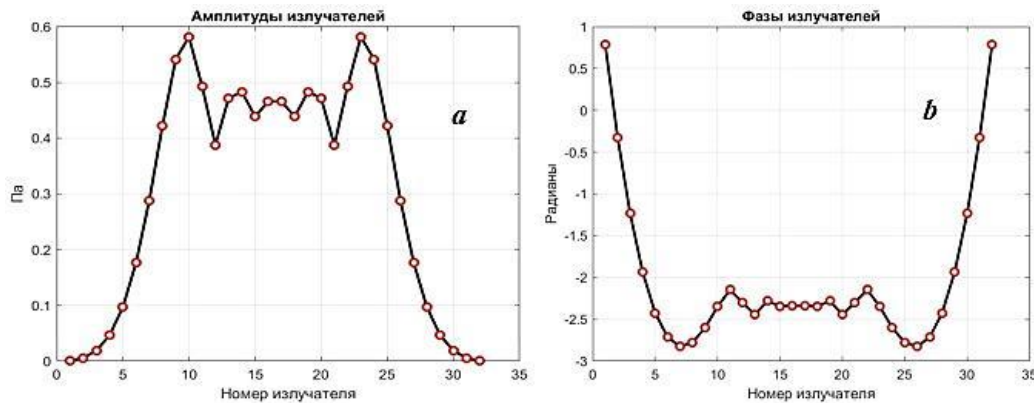


Рис. 7. Коэффициенты взвешивания по амплитуде (а) и фазе (б) для линейной решётки из 32 элементов

Распределения амплитуд и фаз волновых фронтов, синтезированных решёткой на частотах 32, 43 и 50 кГц, изображены на рис. 8. С увеличением количества узлов решётки качество синтезируемых волновых фронтов улучшается. На участке протяжённостью 0,75 м неравномерность фронта по амплитуде и фазе на нижней частоте диапазона 32 кГц не превышает 2,0 % и

0,03 рад соответственно, и на более высоких частотах распределения амплитуды и фазы практически не отличаются от горизонтальных прямых. Столь малая неравномерность синтезированных волновых фронтов позволяет применять решётку для калибровки на частотах до 43 кГц включительно.

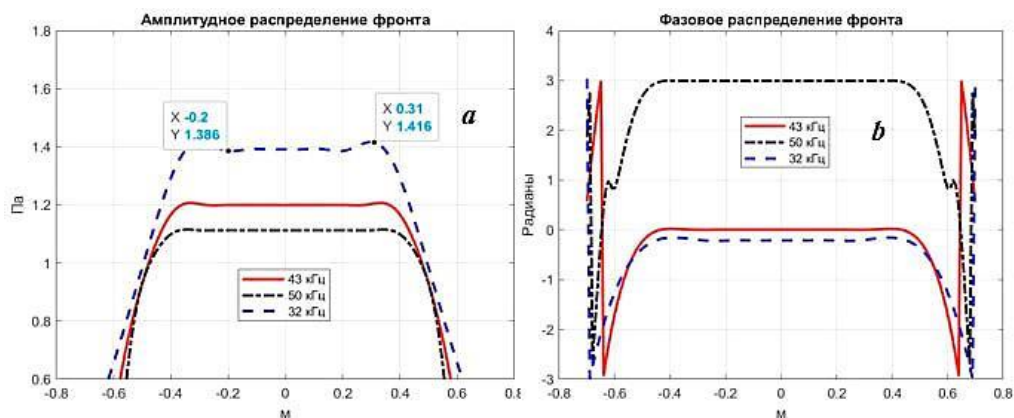


Рис. 8. Амплитудные (а) и фазовые (б) распределения волновых фронтов, синтезированных на частотах 32, 43 и 50 кГц

На рис. 9 представлены коэффициенты взвешивания по амплитуде и фазе, полученные на частоте 8 кГц для линейной решётки из 9 узлов с шагом 30 см.

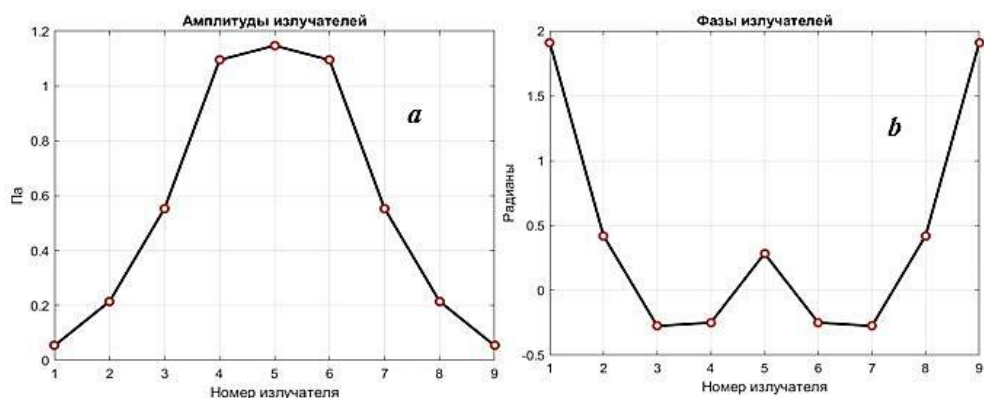


Рис. 9. Коэффициенты взвешивания по амплитуде (а) и фазе (б) для линейной решётки из 9 элементов

С уменьшением количества узлов качество синтезированных фронтов осталось высоким, но частотный диапазон решётки существенно сократился. Распределения амплитуд и фаз волновых фронтов на частотах 7, 8 и 9 кГц изображены на рис. 10. В представленном диапазоне неравномерность фронта по амплитуде не превысила 1,0 %, неравномерность по фазе близка к нулю.

Высокая устойчивость качества волновых фронтов к изменению расстояния от решёток из 32 и 9 излучающих элементов была подтверждена моделированием аналогично тому, как это было сделано для решётки из 24 элементов.

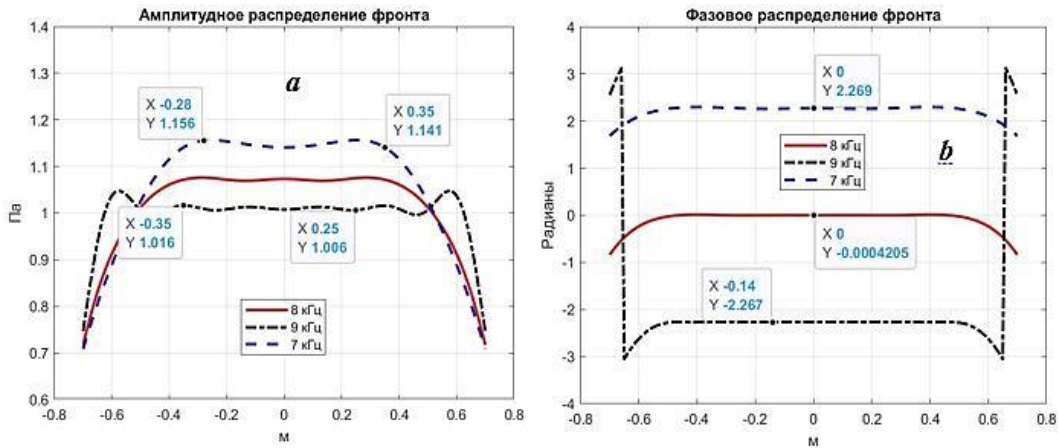


Рис. 10. Амплитудные (а) и фазовые (б) распределения волновых фронтов, синтезированных на частотах 7, 8 и 9 кГц

Выполненное моделирование подтверждает возможность выполнить калибровку ПУ с большим отношением продольного размера к поперечному за счёт облучения ПУ звуковой волной с цилиндрическим фронтом, а также синтезировать цилиндрическую волну линейной фазированной излучающей решёткой.

Замена решётки излучателем с механическим сканированием для создания виртуальной цилиндрической волны взвешенным суммированием сигналов позволяет составить решётку с любым шагом из любого количества элементов и даёт ряд преимуществ, включая экономию на оборудовании и устранение взаимного влияния близко расположенных излучателей. Операция взвешивания при суммировании по формуле (3) выполняется в результате математической обработки по окончании измерительной части эксперимента и значительно превышает по точности возможности её аппаратной реализации.

Автоматизация процесса измерений и сканирования излучателем узлов решётки не представляет технических проблем и в значительной степени компенсирует недостатки, связанные с продолжительностью измерений.

Отметим, что не представляет труда распространить полученные результаты на случай синтеза плоской волны. Если линейная виртуальная решётка состоит из N узлов с шагом d , квадратную эквидистантную виртуальную решётку составляют N параллельных линейных решёток, расположенных в одной плоскости с шагом d . Для узлов квадратной решётки комплексные

взвешивающие коэффициенты получают произведением взвешивающих коэффициентов узлов линейных решёток. Так, для узла с номером n ($n = 1, \dots, N$) линейной решётки с номером k ($k = 1, \dots, N$) взвешивающий коэффициент $b_{n,k} = b_n \cdot b_k$.

Квадратную решётку целесообразно применять для облучения ПУ с одинаковыми продольным и поперечным размерами. Если эти размеры не равны, ПУ достаточно облучать волной с фронтом, плоским в пределах прямоугольного участка со сторонами соответственно равными продольному и поперечному размерам ПУ. Поскольку количество линейных решёток сократится при этом с N до K , переход к прямоугольной решётке потребует пересчёта коэффициентов b_k ($k = 1, \dots, K$), однако выигрыш от такого перехода — уменьшение количества узлов на $N \cdot (N - K)$.

Список литературы

1. Боббер Р. Дж. Гидроакустические измерения / Пер. с англ. под ред. А.Н. Голленкова. — М.: Мир, 1974.
2. ГОСТ 8.650-2015 «Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Государственная поверочная схема для средств измерения и воспроизведения звукового давления в водной среде в диапазоне частот от $1 \cdot 10^{-3}$ до $1 \cdot 10^6$ Гц».

Статья поступила в редакцию: 09.03.2021 г.

Статья прошла рецензирование: 22.03.2021 г.

Статья принята в работу: 01.04.2021 г.