

IV. Гидроакустические измерения

УДК 521.3, 521.92

**К ВОПРОСУ ОБ ИЗМЕРЕНИИ КОЭФФИЦИЕНТА
ОТРАЖЕНИЯ ЗВУКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ВИРТУАЛЬНОЙ МАЛОЭЛЕМЕНТНОЙ
ФАЗИРОВАННОЙ ИЗЛУЧАЮЩЕЙ РЕШЁТКИ****А.Е. Исаев**

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

Аннотация. Рассмотрена схема измерительного эксперимента по определению коэффициента отражения звука от образца материала с использованием виртуальной малоэлементной фазированной излучающей решётки. Приведены результаты моделирования, подтверждающие возможность синтезировать звуковую волну с необходимыми для облучения образца параметрами фронта. Дополнение взвешивания сигналов излучения по амплитуде взвешиванием по фазе позволяет многократно сократить количество узлов решётки — с четырёхсот для схемы измерений с использованием виртуальной решётки Тротта до двадцати пяти в рассмотренных примерах. Это даёт возможность значительно сократить трудоёмкость и продолжительность измерительного эксперимента, снизить риск влияния факторов, обусловленных нестабильностью условий измерений во времени.

Ключевые слова: коэффициент отражения звука, виртуальная фазированная решётка, звуковой пучок с плоским фронтом.

**ON THE ISSUE OF MEASURING THE SOUND
REFLECTION COEFFICIENT USING A VIRTUAL
FEW-ELEMENT PHASED RADIATING ARRAY****A.E. Isaev**

FSUE “VNIIFTRI”, Mendeleevo, Moscow region, Russia,
isaev@vniiftri.ru

Abstract. The scheme of a measurement experiment to determine the reflection coefficient of sound from a material sample using a virtual low-element phased radiating array is considered. The results of modeling are presented, confirming the possibility of synthesizing a sound wave with the front parameters necessary for irradiation of the sample. Supplementing the weighting of the radiation signals by amplitude by weighing by phase makes it possible to reduce the number of array nodes many times — from four hundred for a measurement scheme using a virtual Trott array to twenty-five in the considered examples. This makes it possible to significantly reduce the labor intensity and duration of the measurement experiment, to reduce the risk of the influence of factors caused by the instability of the measurement conditions over time.

Keywords: sound reflection coefficient, virtual phased array, sound beam with a flat front.

«Всё так просто? Да, всё просто. Но совсем не так...»
Альберт Эйнштейн

Введение

В [1] рассмотрены варианты использования виртуальной решётки Тротта для измерения коэффициента отражения звука от образца материала. Тротт применял решётку излучателей для калибровки преобразователей больших размеров [2]. При этом существенным является то, чтобы размер области плоского фронта звуковой волны, облучающей преобразователь, превосходил наибольший размер преобразователя. Поведение волнового фронта и интенсивности звуковой волны за пределами калибруемого преобразователя не существенно.

В отличие от задачи калибровки при измерении коэффициента отражения звука от образца материала ограниченных размеров важно, чтобы при наличии области плоского фронта, падающего на центральную часть облучаемого образца, интенсивность звуковой волны уменьшалась к краям образца. Чем значительней это уменьшение, тем меньше влияние краевых эффектов, ухудшающих точность измерения коэффициента отражения.

В [1] ни звуковой пучок с плоским фронтом, ни тем более плоской волны не создают физически. Интерференционный сигнал, идентичный сигналу при облучении образца звуковым пучком с плоским волновым фронтом, получают расчётным путём — взвешенным суммированием сигналов интерференции, зарегистрированных неподвижным гидрофоном при сканировании узлов решётки излучателем, либо при сканировании узлов решётки гидрофоном при облучении образца неподвижным излучателем.

Практическую реализацию описанных приёмов усложняет большая продолжительность измерительного эксперимента при сканировании преобразователем узлов решётки большой размерности. В бассейне с отражающими звук границами на продолжительность эксперимента влияют длительность реверберационной паузы между излучениями, продолжительность излучения, требуемая для обеспечения необходимого разрешения по частоте. Вместе с тем определяющим фактором является инерционность системы позиционирования преобразователей под водой. Продолжительность постановки преобразователя в заданный узел решётки с требуемой точностью определяется временем установления системы позиционирования, которое увеличивается с глубиной погружения преобразователя и может занимать до нескольких минут. Сканирование узлов решётки большой размерности становится настолько продолжительным, что на результат измерений начинают влиять факторы, обусловленные нестабильностью условий измерений во времени. Один из таких факторов — неконтролируемое изменение чувствительности преобразователей как на приём, так и на излучение вследствие осаждения на поверхностях преобразователей микропузырьков растворённого в воде газа и отрыва микропузырьков с поверхностей преобразователей по мере их накопления.

Малозлементная виртуальная фазированная решётка

В [1], сканируя излучателем узлы решётки, синтезируют звуковую волну, которая падает плоским участком фронта на центральную часть G размером $l \times l$ испытуемого образца материала (см. рис. 1), при этом звуковое давление в волне уменьшается до нуля к краям образца. Заданной формы фронта добиваются, управляя амплитудами излучения с помощью взвешивающих коэффициентов — действительных чисел. Для получения взвешивающих коэффициентов использовано распределение Тьюки [3], а не биномиальные коэффициенты функции спада классической решётки Тротта.

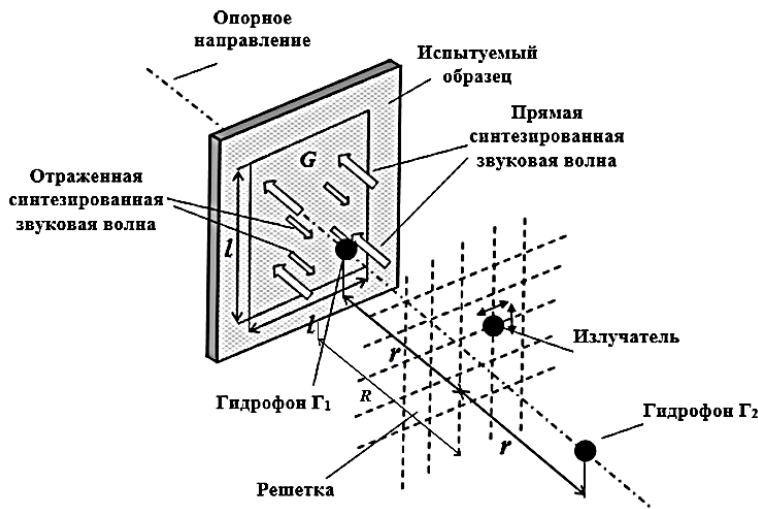


Рис. 1. Схема эксперимента по определению коэффициента отражения звука от образца материала

Преимущество распределения Тьюки применительно к решаемой задаче — возможность уменьшать звуковое давление на краях образца (уменьшать влияние краевых эффектов), управляя шириной падающего на образец акустического пучка. В фазированной решётке, в отличие от решётки Тротта, управляют как амплитудами, так и фазами излучения. Представляющее интерес для решаемой задачи преимущество дополнения взвешивания по амплитуде взвешиванием по фазе — возможность значительно сократить количество узлов решётки.

Для гармонического сигнала частоты f плоский волновой фронт, создаваемый фазированной решёткой из $N \times N$ элементов, может быть представлен суммой вкладов излучателей сферических волн, расположенных в узлах решётки:

$$P_{x,y,z} e^{i\varphi_{x,y,z}} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N a_{n,m} e^{i\varphi_{n,m}} P_{n,m,x,y,z} e^{i\varphi_{n,m,x,y,z}} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N a_{n,m} e^{i\varphi_{n,m}} e^{-ikR_{n,m,x,y,z}} / R_{n,m,x,y,z},$$

где $P_{x,y,z}$ и $\varphi_{x,y,z}$ — амплитуда и фаза звукового давления в точке с координатами x,y,z фронта синтезированной решёткой волны; $P_{n,m,x,y,z}$ и $\varphi_{n,m,x,y,z}$ — амплитуда и фаза звукового давления, создаваемого в точке x,y,z излучателем из узла n,m решётки; $a_{n,m}$, $\varphi_{n,m}$ — коэффициенты взвешивания звуковых давлений излучателей по амплитуде и фазе; $R_{n,m,x,y,z}$ — расстояние от узла n,m до точки x,y,z ; $k = 2\pi f / c$ — волновое число, c — скорость звука.

Основываясь на принципе суперпозиции для линейных систем, одновременное излучение элементами решетки можно заменить излучением одиночным излучателем, последовательно помещаемым в узлы решётки. При этом звуковое давление $P_{x,y,z} e^{i\varphi_{x,y,z}}$ получают взвешенным по амплитуде и фазе суммированием звуковых давлений $P_{n,m,x,y,z} e^{i\varphi_{n,m,x,y,z}}$. Такое суммирование может быть выполнено по окончании измерительной части эксперимента. Результат суммирования эквивалентен одновременному облучению всеми излучателями решётки и поэтому неотличим от результата воздействия плоской волны. При облучении образца из каждого узла решётки гидрофон Γ_1 , расположенный вблизи решётки, будет регистрировать суперпозицию прямой волны, облучающей образец, и волны, отражённой образцом. Таким образом, если для каждого положения излучателя гидрофоном Γ_1 измерить амплитуду $P_{1,n,m}$ и фазу $\varphi_{1,n,m}$ звукового давления суперпозиции прямой волны излучателя и отражённой волны, то амплитуда и фаза звукового давления $P_{\text{сп}} e^{j\varphi_{\text{сп}}}$ суперпозиции синтезированных облучающей образец и отражённой образцом волн могут быть получены взвешенным суммированием:

$$P_{\text{сп}} e^{j\varphi_{\text{сп}}} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N a_{n,m} e^{j\varphi_{n,m}} P_{1,n,m} e^{j\varphi_{1,n,m}}.$$

Синтезированное звуковое поле симметрично относительно решётки, поскольку при излучении из каждого узла сферическая звуковая волна распространяется во всех направлениях. Расположим гидрофон Γ_2 на оси опорного направления на том же расстоянии r от решётки, что и гидрофон Γ_1 , но с противоположной по отношению к гидрофону Γ_1 стороны решётки (показано на рис. 1). В силу симметричности звукового поля звуковые давления, создаваемые синтезированной волной в точках расположения гидрофонов Γ_1 и Γ_2 , будут одинаковыми. При этом достаточно большая разница расстояний между гидрофоном Γ_2 и решеткой и гидрофоном Γ_2 и испытуемым образцом позволяет отделять в выходном сигнале гидрофона Γ_2 прямой сигнал излучателя от отражённого образцом сигнала методом временной селекции.

Измерив для каждого положения излучателя в решётке амплитуды $P_{2,n,m}$ и фазы $\varphi_{2,n,m}$ звуковых давлений в прямой волне излучателя гидрофоном Γ_2 , амплитуду и фазу $P_{\text{оп}} e^{j\varphi_{\text{оп}}}$ звукового давления прямой синтезированной решёткой волны в точке расположения гидрофона Γ_1 получим взвешенным суммированием:

$$P_{\text{оп}} e^{j\varphi_{\text{оп}}} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N a_{n,m} e^{j\varphi_{n,m}} P_{2,n,m} e^{j\varphi_{2,n,m}}.$$

Амплитуду и фазу звукового давления в синтезированной волне, отражённой образцом, получим как разность комплексных звуковых давлений:

$$P_{\text{отр}} e^{j\varphi_{\text{отр}}} = P_{\text{сп}} e^{j\varphi_{\text{сп}}} - P_{\text{оп}} e^{j\varphi_{\text{оп}}}.$$

Коэффициент отражения вычислим как отношение амплитуд звуковых давлений отражённой и прямой синтезированных волн по формуле:

$$W_{\text{отр}} = \frac{P_{\text{отр}}}{P_{\text{оп}}} K_{\text{св}},$$

где $K_{\text{св}}$ — коэффициент, учитывающий искривление амплитудного фронта синтезированной волны при её распространении.

Ниже приведены результаты моделирования, подтверждающие возможность синтезировать звуковую волну с необходимыми для облучения образца параметрами фронта с помощью малоэлементной фазированной решётки.

В целях сокращения размерности задачи комплексные взвешивающие коэффициенты $a_{n,m} e^{j\varphi_{n,m}}$ малоэлементной плоской решётки получали в два этапа. На первом этапе с помощью малоэлементной линейной эквидистантной решётки из N узлов синтезировали звуковую волну, которая падает на поверхность испытуемого образца цилиндрическим фронтом на участке длиной l , и звуковое давление в которой уменьшается до нуля к краям образца. Комплексные взвешивающие коэффициенты $b_n e^{j\varphi_n}$ ($n = 1, \dots, N$) и шаг линейной решётки получали решением оптимизационной задачи исходя из частоты облучения, размеров исследуемого образца, размеров участка плоского фронта синтезированной волны и расстояния между решёткой и образцом. Комплексные взвешивающие коэффициенты плоской решётки получали по формуле:

$$a_{n,m} e^{j\varphi_{n,m}} = b_n b_m e^{j(\varphi_n + \varphi_m)}, (n=1, \dots, N; m=1, \dots, N).$$

На рис. 2а и б представлены взвешивающие коэффициенты b_n и φ_n , полученные на частоте 10 кГц для линейной решётки из 5 узлов. Шаг решётки — 20 см. Испытуемый образец с размерами 1×1 м расположен на расстоянии 2 м от решётки, гидрофон Γ_1 — на расстоянии 15 см от образца.

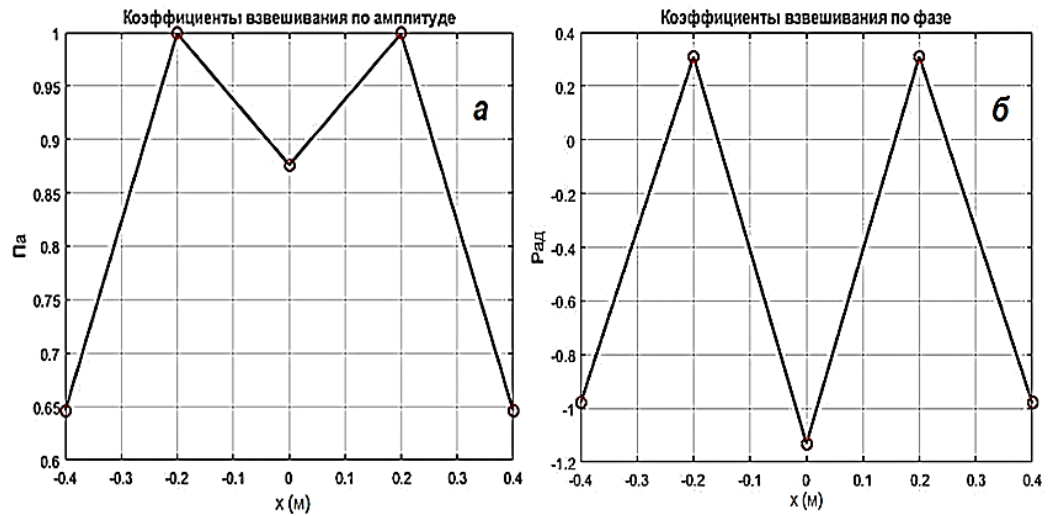


Рис. 2. Коэффициенты взвешивания по амплитуде (а) и фазе (б) линейной решётки с шагом 20 см на частоте 10 кГц

На рис. 3а и б приведены распределения амплитуд и фаз звукового давления в волне, синтезированной плоской решёткой из 5×5 узлов с шагом 20 см. В синтезированной волне на расстоянии 2 м от решётки участок с плоским фронтом имеет размеры 45×45 см. Неравномерность амплитуды звукового давления на этом участке составляет $\pm 1,0\%$, фазы — $\pm 0,05$ рад. Эти величины меньше соответствующих погрешностей калибровки гидрофона первичными методами, и их можно считать несущественными. Амплитуда звукового давления плавно уменьшается к краям испытуемого образца практически до нуля, благодаря чему уменьшается влияние краевых эффектов.

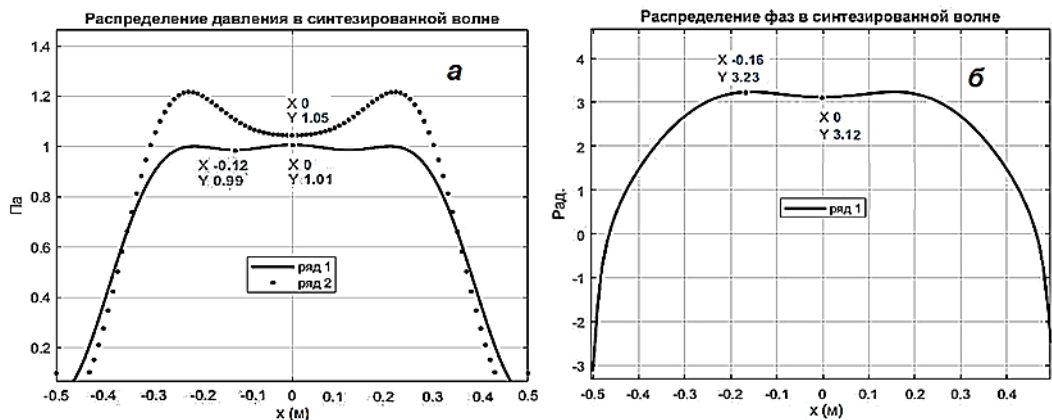


Рис. 3. Распределения волнового фронта на частоте 10 кГц по амплитуде (а) и по фазе (б): ряд 1 — на расстоянии 2 м от решётки; ряд 2 — на расстоянии 15 см от образца

С удалением от поверхности образца центральный участок синтезированного волнового фронта искривляется. Звуковое давление в точках расположения гидрофонов Γ_1 и Γ_2 (точка с координатой $x = 0$ на зависимости 2 ряда) отличается на 5 % от среднего звукового давления на плоском участке зависимости 1 ряда. Это отличие обуславливает введение в формулу коэффициента отражения звука поправочного коэффициента $K_{св}$, учитывающего искривление синтезированного фронта. Коэффициент $K_{св}$ определяют экспериментально (либо по результатам моделирования волновых фронтов) на расстояниях от решётки, соответствующих расположению испытуемого образца и гидрофона Γ_1 .

На рис. 4а и б представлены взвешивающие коэффициенты b_n и φ_n , полученные на частоте 50 кГц для линейной решётки из 5 узлов. Шаг решётки — 2,5 см. Испытуемый образец с размерами $0,25 \times 0,25$ м расположен на расстоянии 1 м от решётки, гидрофон Γ_1 — на расстоянии 10 см от образца.

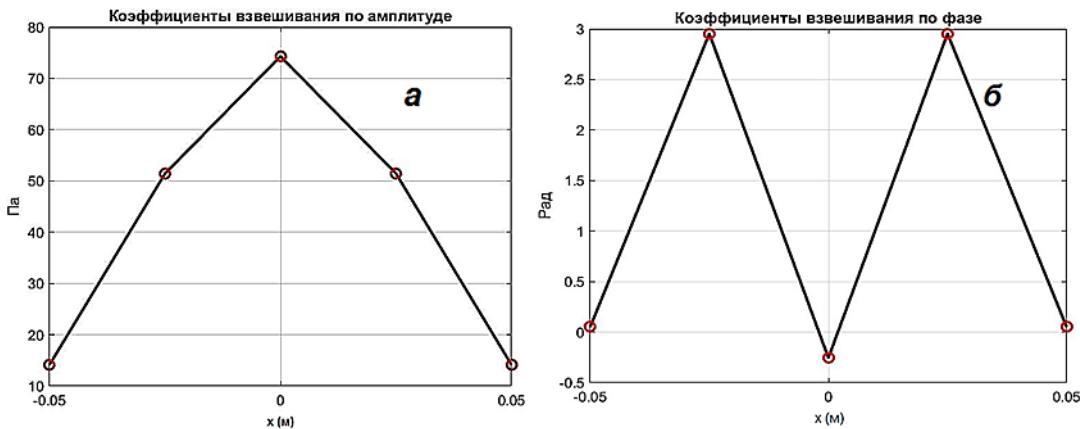


Рис. 4. Коэффициенты взвешивания по амплитуде (а) и по фазе (б) линейной решётки с шагом 0,025 м на частоте 50 кГц

На рис. 5а и б приведены распределения амплитуд и фаз звукового давления в волне, синтезированной плоской решёткой из 5×5 узлов с шагом 2,5 см. В синтезированной волне на расстоянии 1 м от решётки участок с плоским фронтом имеет размеры 14×14 см. Неравномерность амплитуды звукового давления и фазы на этом участке фронта так же, как и в рассмотренном выше примере, меньше соответствующих погрешностей калибровки гидрофона первичными методами. Амплитуда звукового давления плавно уменьшается к краям образца практически до нуля. Звуковое давление в точках расположения гидрофонов Γ_1 и Γ_2 (точка с координатой $x = 0$ на зависимости 2 ряда) отличается на 6 % от среднего звукового давления на плоском участке зависимости 1 ряда. Это отличие учитывают поправочным коэффициентом $K_{св}$.

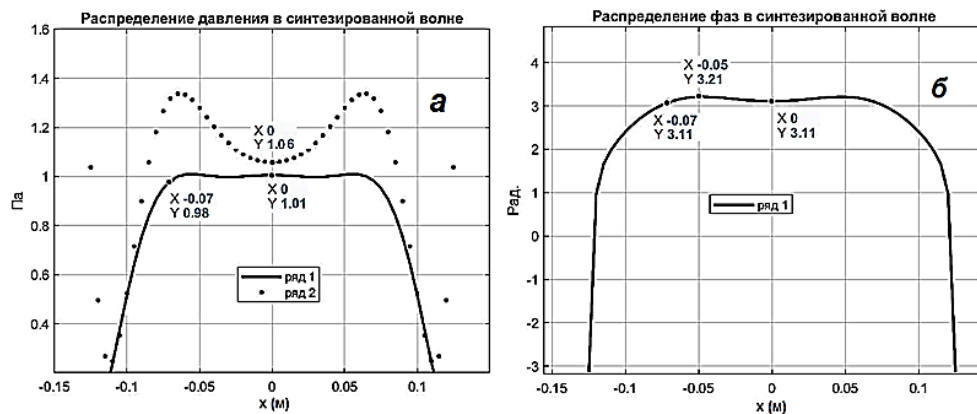


Рис. 5. Распределения волнового фронта на частоте 50 кГц по амплитуде (а) и по фазе (б): ряд 1 — на расстоянии 1 м от решётки; ряд 2 — на расстоянии 10 см от образца

Дополнение взвешивания по амплитуде взвешиванием по фазе позволяет многократно сократить количество узлов решётки — с четырёхсот в [1] до двадцати пяти в рассмотренных примерах. Использование двух гидрофонов, расположенных на одинаковых расстояниях от решётки, снимает ограничения, обусловленные неопределённостью частоты и возможностью выполнять измерения только на частотах минимумов и максимумов сигнала интерференции.

Заключение

В настоящей работе автор не ставил задачи детально изложить либо предложить новый способ расчёта параметров решётки. Сегодня существует большое количество источников, в которых отражено многообразие подходов к методам расчёта решёток различного назначения. Рекомендации по проектированию генераторов плоских волн можно найти, например, в [4, 5]. Для уменьшения краевых эффектов при измерениях коэффициента отражения звука в Национальной физической лаборатории Великобритании на образце закрепляют несколько приёмников, размещая их случайным образом по поверхности образца [6].

Цель выполненного моделирования — подтвердить возможность значительно сократить трудоёмкость и продолжительность измерительного эксперимента, тем самым повысить точность измерения коэффициента отражения звука за счёт исключения погрешности, обусловленной нестабильностью условий измерений во времени.

Список литературы

1. Исаев А.Е., Айвазян Ю.М., Поликарпов А.М. Проблемы исследования акустических свойств материалов методами ближнего поля // Альманах современной метрологии. — 2020. — № 2 (22). — С. 112–170.
2. Боббер Р. Дж. Гидроакустические измерения / Пер. с англ. под ред. А.Н. Голенкова. — М.: Мир, 1974.

3. Luigi Troiano 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 UACE2019. — Heronissos, Crete, Greece, 2019. — P. 55–59.
4. Bucci O.M., Panariello G., Migliore M.D., Pinchera D. Plane-Wave Generators: Design Guidelines, Achievable Performances and Effective Synthesis // IEEE transactions on Antennas and Propagation. — 2013. — V. 61. — No. 4. — P. 2005–2018.
5. Hill D.A. A Circular Array for Plane-Wave Synthesis // IEEE transactions on Electromagnetic Compatibility. — 1988. — V. 30. — No. 1. — P. 3–8.
6. Beamiss G.A., Robinson S.P., Wang L.S., Hayman G., Humphrey V.F., Smith J.D., Martin M. J. The use of a sparse planar array sensor for measurement of the acoustic properties of panel materials at simulated ocean conditions // Proceedings of 3rd Underwater Acoustics Conference and Exhibition UACE2015. — Platania, Greece, 2015. — P. 235–242.

Статья поступила в редакцию: 01.11.2021 г.

Статья прошла рецензирование: 13.12.2021 г.

Статья принята в работу: 14.01.2022 г.