

УДК 534.6.08  
OECD 01.03 AA

## Восстановление распределения импульсных сигналов в пространстве методами ближнепольной акустической голографии

Костеев Д.А.<sup>1</sup>, Салин М.Б.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ст. лаб.-исследователь, ИПФ РАН, Н. Новгород, ул. Ульянова, д. 46

<sup>2</sup>Зав. лаб. виброакустики, ИПФ РАН, Н. Новгород, ул. Ульянова, д. 46

### Аннотация

Одно из направлений развития методов акустических измерений - это переход к измерению уровней шума на том расстоянии от объекта, где это удобно исходя из геометрии и соотношения сигнал-шум, с последующим расчетом уровня сигнала на интересующей дистанции, с применением методов акустической голографии. При этом амплитуда и фаза сигнала должна быть измерена в достаточном количестве точек. Большой интерес представляет измерение характеристик источников широкополосных сигналов. При решении подобной задачи, если речь идет об акустике, наиболее важными являются два параметра: форма временной реализации и средний уровень поля давления. Форму временной реализации нагляднее всего исследовать на примере импульсных сигналов. В настоящей работе описан соответствующий лабораторный эксперимент, проведенный в безэховой камере, методика восстановления дальнего поля, а так же результаты расчетов и сравнение с экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** ближнепольная акустическая голография, дальнее поле, импульсные сигналы.

### *Restoring the distribution of pulse signal in space using methods of near-field acoustic holography*

*Kosteev D.A.<sup>1</sup>, Salin M.B.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Assistant researcher, Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia*

<sup>2</sup>*Head of laboratory, Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia*

### **Abstract**

*The development of acoustic measurement technology gives opportunity to measure noise levels at a convenient distance from the object, with respect to its the geometry and signal-to-noise ratio, and then to calculate signal levels at the desired distance. The methods of acoustic holography is widely used here. To do so, the amplitude and phase of the signal must be measured in a sufficient number of points. Of great interest is the measurement of the characteristics of broadband signal sources is of great interest. When solving such a problem, two parameters are most important: the form of temporary realization and the average level of the pressure field. The calculated waveform as a function of time is best illustrated by the example of pulse signals. In the present work, describe the corresponding laboratory experiment conducted in an anechoic chamber. The technique for reconstructing the far field is given, followed by the results of calculations and comparison with experimental data.*

**Key words:** *nearfield acoustic holography, far field, pulse signal.*

## Введение

Применение методов ближнепольной голографии открывает возможности для измерения характеристик источников при сложной внешней обстановке. Например, ближнепольные методы находят применение, если необходимо измерить поле источника в дальней зоне, а это не представляется возможным, из-за ограниченных размеров лабораторной установки, на которой проводится эксперимент. Гидролокатор с большой апертурой можно поместить в безэховой бассейн, измерить характеристики генерируемого им сигнала в ближней зоне и рассчитать диаграмму направленности в зоне Фраунгофера [1] при том, что размеры бассейна не будут позволять проводить прямые измерения дальнего поля.

В предшествующей работе [4] был изложен ряд методов пересчета результатов ближнепольных измерений в дальнюю зону. В указанной работе рассматривались непрерывные сигналы, но изложенные методы допускают обобщение на случай широкополосных сигналов, что и будет сделано в настоящей работе. Применение ближнепольных методов к анализу источников широкополосных сигналов представляет отдельный интерес для исследователей [2, 3] ввиду большой практической значимости этого вопроса.

При восстановлении поля широкополосного источника в пространстве представляют интерес два аспекта: средний уровень сигнала и его временное развитие. Временное развитие нагляднее всего исследовать на примере импульсных сигналов. В настоящей работе была проведена экспериментальная проверка методов расчета поля в дальней зоне по результатам ближнепольных измерений для импульсных сигналов.

## 1. Экспериментальная установка

Аналогично эксперименту, описанному в [4], измерения, представленные в данной работе, проводились в безэховой камере. Схема установки приведена на Рис. 1. Установка состояла из громкоговорителя без корпуса и приемного микрофона. Измерения проводились в плоскости, где была натянута система тонких металлических тросов, позволяющих закреплять микрофон в узлах прямоугольной сетки. Микрофон, с сохранением ориентации в пространстве, поочередно устанавливался в узлы сетки, динамик оставался неподвижным. За начало координат  $(0, 0, 0)$  принято положение громкоговорителя. В каждой точке производилось воспроизведение одной и той же реализации импульсного сигнала, время начала воспроизведения и время начала записи были синхронизованы. После объединения всех записей, была получена общая картина поля в данной плоскости. Были сделаны записи при двух значениях высоты закрепления громкоговорителя, которые соответствовали ближней и дальней зоне. В первом случае динамик располагался на расстоянии  $z_{near} = 18$  см от зоны измерения над ее центром и излучал последовательность импульсов, каждый из которых имел частоту 1 кГц, длительность 4 мс, время между импульсами составляло 5 с. Оценка значения параметра Френеля  $F_r = \lambda z_{near} / D^2$  составляет:  $F_r = 1,53$  (здесь:  $\lambda$  - длина волны (м),  $D$  - размер апертуры громкоговорителя (м)). Зона измерения представляла собой прямоугольник со сторонами 192 см и 131 см. Расстояние между узлами по обеим координатам было переменным и в среднем составляло 12 см. Во втором случае источник располагался на расстоянии  $z_{far} = 215$  см от зоны измерения, что соответствует зоне Фраунгофера ( $F_r = 18,27$ ). На Рис. 2 построен волновой фронт по линии датчиков  $y = -84$  см,  $z = z_{near}$ .

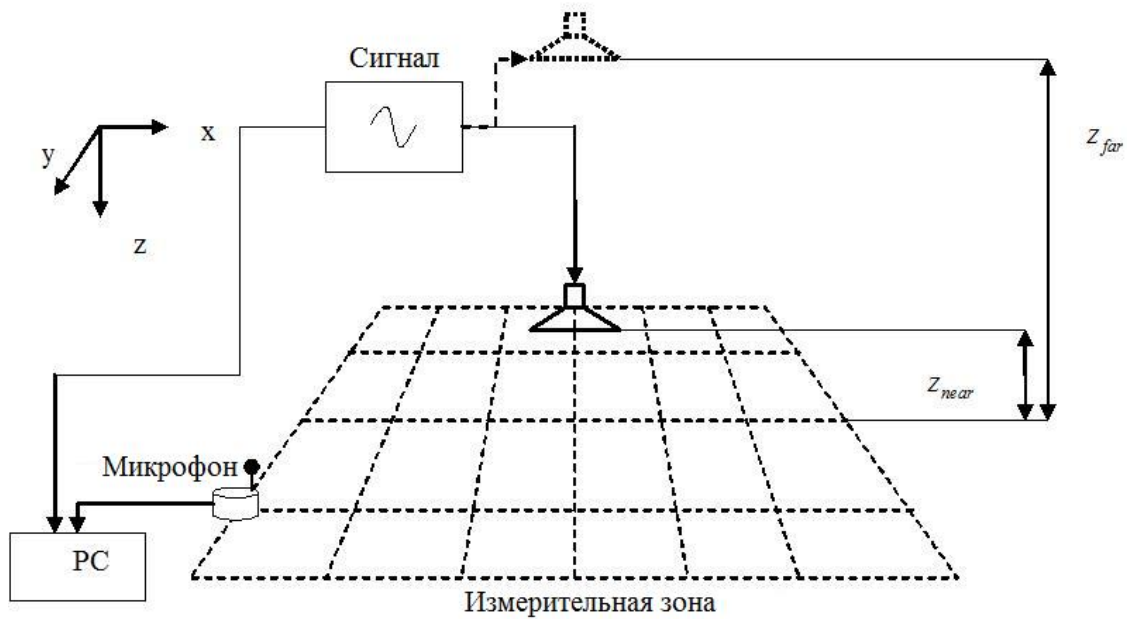


Рис. 1. Схема установки

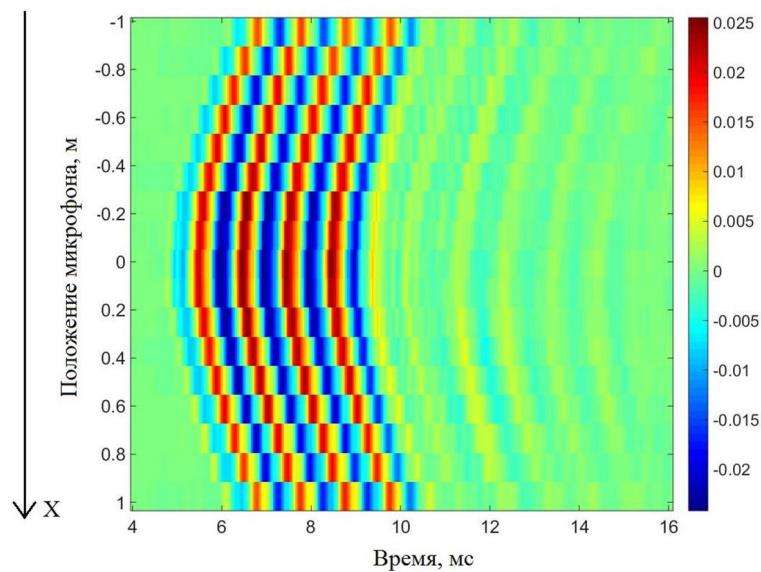


Рис. 2. Временная развертка сигнала в нескольких точках вдоль линии на границе измерительной зоны

## 2. Анализ результатов

### 2.1. Обработка сигналов планарной антенны

Для расчета поля воспользуемся рассуждениями, приведенными в [4, 5]. Принимая во внимание то, что размер измерительного участка плоскости в ближней зоне был взят достаточно большим, чтобы поле источника спадало по краям, и на участках вне ее не возникало точек стационарной фазы, и, используя функцию Грина для мягкой границы, запишем интеграл Кирхгофа-Гельмгольца [6]:

$$p(\mathbf{R}) = -\frac{1}{2\pi} \iint_S p(x,y) \frac{\partial}{\partial n} \left( \frac{e^{ikR}}{R} \right) dS \quad (1)$$

в данной формуле и далее по тексту:  $i$  - мнимая единица,  $p$  - комплексная амплитуда давления [обычно Па, но в данной статье используются условные единицы - В], здесь рассматривается одна частота, переход к широкому спектру будет сделан ниже,  $k$  - волновой вектор [ $\text{м}^{-1}$ ],  $S$  - площадка в плоскости ( $z = z_{near}$ ), в которой производились измерения давления,  $\mathbf{R}$  - набор векторов из узлов в ближней зоне ( $x, y, z_{near}$ ) до необходимой точки наблюдения [м],  $n$  - нормаль к плоскости измерения. Формула (1) также называется второй интегральной формулой Гюйгенса. Она определяет значение звукового давления в полупространстве по известной величине звукового давления на плоскости.

Если расстояние до точки наблюдения много больше других линейных размеров задачи, то формулу (1) можно преобразовать следующим образом:

$$p(\mathbf{R}) \approx -\frac{ik \cos(\alpha)}{2\pi R} \iint_S p(x,y) e^{ikRr} dS \quad (2)$$

где  $r$  - набор векторов из начала координат в узлы измерительной зоны ( $x, y, z_{near}$ ) [м],  $\alpha$  - угол [рад] между нормалью к плоскости измерения и  $\mathbf{R}$ . Ввиду сделанного приближения  $R \gg r$  теперь под  $\mathbf{R}$  можно понимать радиус-вектор из центра плоскости до необходимой точки наблюдения в дальней зоне. Такой подход для расчета поля в дальней зоне был назван FPK (Far Plane Kirchhoff).

Выражение (2) можно обобщить на случай широкополосных сигналов, и в частности для импульсных сигналов, проведя стандартную процедуру перехода от спектрального представления к временному [7]. Тогда (2) принимает вид:

$$p(\mathbf{R},t)R = \frac{\Delta s \cos \alpha}{2\pi c} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \sum_j p \left( \mathbf{r}_j, t - \frac{\mathbf{R}\mathbf{r}_j}{Rc} \right) \quad (3)$$

где  $c$  - скорость звука [м/с],  $\Delta s$  - площадь "ячейки" [ $\text{м}^2$ ],  $\mathbf{r}_j$  - вектор в  $j$ -ую точку измерения в ближней зоне [м].

Значения, полученные по формуле (3), сравнивались с сигналами, записанными в данной точке в дальней зоне. На Рис. 3 приведены сигналы: рассчитанные на основе ближнепольных измерений (синяя кривая) и контрольные измерения (красная).

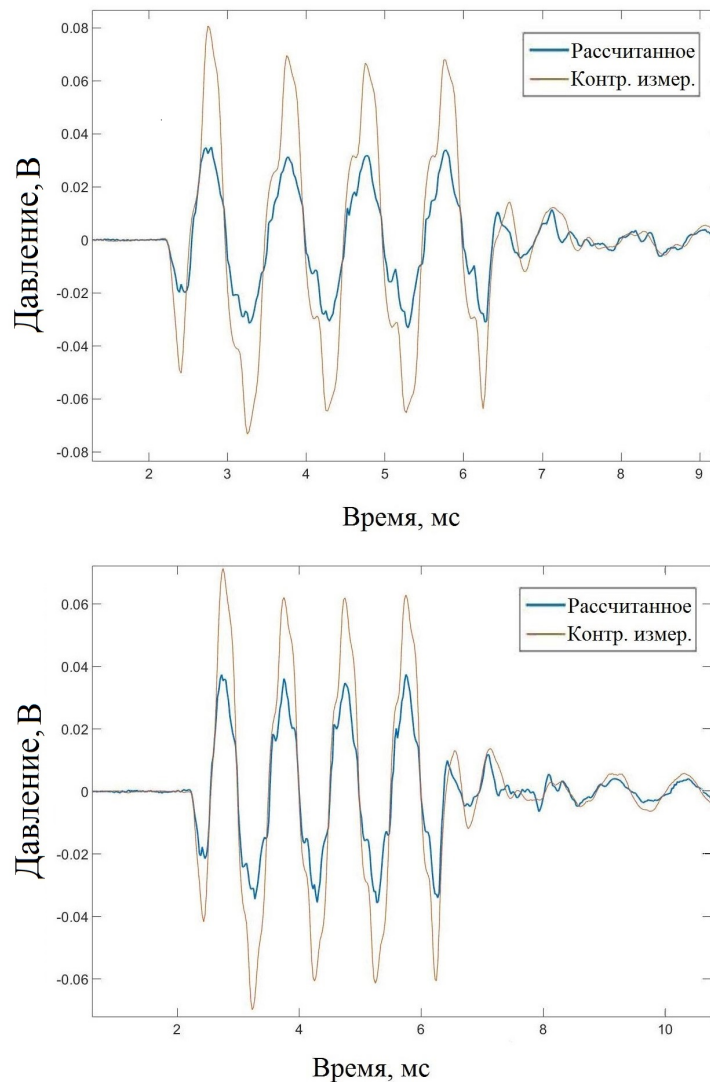


Рис. 3. Сравнение результатов прямых измерений в дальней зоне и расчетов на основе ближнеполюсных измерений. Вверху -  $x = 0$  см,  $y = 0$  см,  $z = z_{far} = 215$  см, внизу -  $x = 24$  см,  $y = 24$  см,  $z = z_{far}$  Метод «ФРК». По оси ординат отложено акустическое давление в относительных единицах

Полученные результаты демонстрируют, что данная методика, при своей простоте, позволяет с достаточной точностью восстанавливать форму сигнала и фазовый центр в дальней зоне по ближнеполюсным измерениям, что показано при сравнении с контрольными сигналами. Расхождение по амплитуде связано с неустойчивостью метода, т.к. интеграл в формуле (2) в общем случае может расходиться. Чтобы показать это примем участок  $S$  бесконечно большим и подставим в качестве  $p$  – сферическую волну от точечного источника с координатами  $(0, 0, z_0)$ . Для сокращения выкладок пусть  $\alpha = 0$ , т.е.  $\mathbf{R}$  сонаправлено с осью  $z$ . После произведенных подстановок и в пределе  $r \gg z_0$  выражение (2) можно записать в следующем виде:

$$p(\mathbf{R}) \approx -\frac{ik}{R} \left( \int_0^r \cos(2kr) dr + i \int_0^r \sin(2kr) dr \right)$$

где  $\lambda$  – длина волны [м],

Рассматривая зону интегрирования как набор колец  $\lambda/4$ , можно заметить, что оба

интеграла превращаются в знакопеременные ряды, члены которых не убывают по модулю:

$$p(\mathbf{R}) \approx -\frac{ik \cos(\alpha)}{R} \left( \int_0^{\lambda/8} \cos(2kr) dr + \sum_n \int_{\lambda/8+n\lambda/4}^{3\lambda/8+n\lambda/4} \cos(2kr) dr + i \sum_n \int_{n\lambda/4}^{\lambda/4+n\lambda/4} \sin(2kr) dr \right)$$

Следовательно, уравнение (2) содержит расходящийся интеграл.

Однако для источников с более высоким порядком мультиполя используемый интеграл будет сходящимся. И возвращаясь к практической задаче обработки результатов измерения, заметим, что вычисление по формуле (3) будет давать конечный результат ввиду конечного размера  $S$  и введения аподизирующего множителя, но увеличение измерительного участка плоскости может не приводить к ожидаемому результату повышения точности. Поэтому метод является работоспособным, и в ряде задач продемонстрированная точность считается достаточной.

## 2.2. Обработка сигналов линейной антенной

Далее рассмотрим методику, описанную в [5], и опробованную в [4], где она получила название Far Line Transfer (FLT). Данная методика позволяет восстановить поле в дальней зоне, по результатам измерения линейной антенной [7]. Здесь это имитируется выборкой для обработки данных с датчиков, расположенных на одной прямой, расположенной в плоскости источника и точки, в которой восстанавливается поле, в данном случае прямая –  $y = 0, z = 0$ .

Введем цилиндрическую систему координат с осью  $x$ ,  $\varphi$  – угол между осью  $z$  и осью приемной антенны [рад], радиус  $\rho = \sqrt{y^2 + z^2}$  [м]. Акустическое поле может быть разложено по цилиндрическим волнам:

$$p(x, \varphi, \rho) = \sum_l \sum_m [b_{lm} H_l(\kappa_m \rho) \cos(l\varphi) + c_{lm} H_l(\kappa_m \rho) \sin(l\varphi)] e^{(ik_{xm}x)} \quad (4)$$

где  $b_{lm}, c_{lm}$  – коэффициенты,  $H_l$  – функция Ханкеля  $l$ -го порядка, 1-го рода (задает расходящуюся волну при временной зависимости  $e^{-i\omega t}$ ), волновое число  $\kappa_m = \sqrt{k^2 - k_{xm}^2}$  [м<sup>-1</sup>], если  $k^2 \geq k_{xm}^2$ , в противном случае  $\kappa_m = i\sqrt{k_{xm}^2 - k^2}$  и  $H_l(\kappa_m \rho)$  затухает при увеличении  $\rho$ .

Основная идея предлагаемого метода заключается в устранении суммирования по  $l$  в формуле (4). Для этого необходимо указать следующее ограничение метода измерения.

1. источник должен быть вытянутым вдоль оси, параллельной оси линейной антенны, здесь – вдоль оси  $x$ ,

2. длина антенны должна превосходить длину источника плюс два радиуса 1-й зоны Френеля,

3. требуется рассчитать поле в полу плоскости, образованной осью источника и осью антенны, здесь – полуплоскость  $y = y_0 = 0, z > 0 (\varphi = 0)$ .

4. источник не должен иметь слишком сложную диаграмму направленности в плоскости  $y, z$ . Разложение (4) поля источника можно ограничить по азимутальным индексам до  $l \leq l_{max}$ , и восстановленном распределении по  $x$  в дальней зоне можно будет ограничиться гармониками  $k_{xm} \leq k_{x,max} = \sqrt{k^2 + \kappa_{min}^2}$ , где  $\kappa_{min} z_{near} \gg \sqrt{l_{max} + 1}$

Метод FLT был описан в [5]. Согласно указанной работе можно произвести расчет поля в дальней зоне в точке  $(R \sin \alpha, y_0, R \cos \alpha)$  следующим образом:

$$p(\alpha, R) = \frac{b_{m^*} N \Delta x}{R} \sqrt{\frac{\omega z_{near} \cos \alpha}{2\pi c}} \quad (5)$$

где  $\alpha$  – угол между направлением, перпендикулярным оси антенны, и вектором в точку в дальней зоне [рад],  $N$  – количество измерительных точек, коэффициент  $b_{m^*}$  находится по формулам (6):

$$b_{m^*} = \int b_m e^{ik\omega} d\omega \quad (6)$$

$$b_m = \frac{1}{N} \sum_{n=-N/2}^{N/2} h_1(x_n) p(x_n, y_0, z_{near}) e^{-ik_{xm} x_n}$$

где  $m^*$  (индекс коэффициента  $b_{m^*}$ ) выбирается так, чтобы  $k_{xm^*}/k = \sin \alpha$ .

$h_1$  – функция Ханнинга, определяемая следующей формулой (7):

$$h_1(x_n) = \frac{1}{W} \left( 1 - \cos \frac{2\pi(x_n - x_1 + \Delta x/2)}{x_N - x_1 + \Delta x} \right). \quad (7)$$

$W$  находится из условия нормировки  $\sum_{n=1}^N h_1^2(x_n) = N$ .

Сигнал, рассчитанный с помощью уравнения (5), представлен на Рис. 4

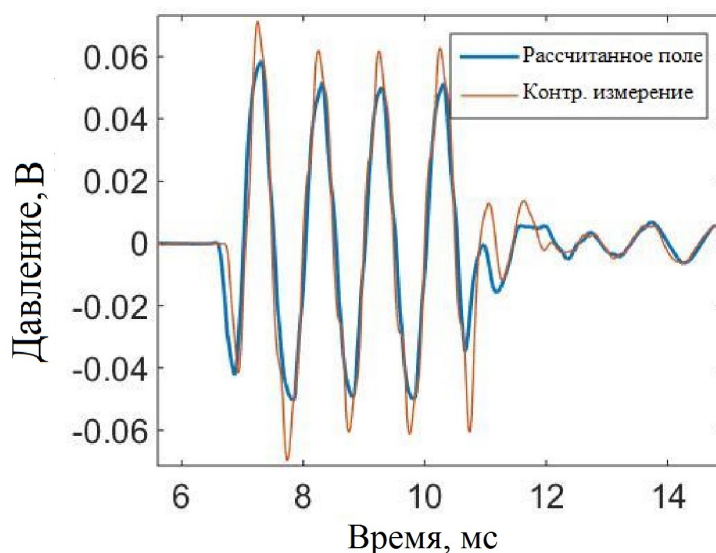


Рис. 4. Восстановление поля в точке  $(0,0,z_{far})$  с использованием линейной антенны методом «FLT». По оси ординат отложено акустическое давление в относительных единицах

Данный метод с хорошей точностью позволяет рассчитать поле в дальней зоне, используя однократное измерение линейной антенной.

### Заключение

Проведено сравнение методов ближнепольной акустической голографии при использовании импульсных сигналов. Восстановление поля в дальней зоне по результатам измерений хорошо совпадает с контрольными измерениями по фазе и

форме сигнала. При использовании метода «линейной антенны» также с высокой точностью восстанавливается амплитуда. Предложенные методы позволяют, например, производить измерения импульсной передаточной функции акустической системы без применения безэховой камеры, при условии, что длительность генерируемого импульса позволяет подавить отражение от стен помещения методом стробирования.

Авторы выражают благодарность профессору Хуанцай Лу (Huancai Lu) за полезные обсуждения.

### Список литературы

1. W.-Q. Jing, Y.-B. Zhang, C.-X. Bi, Nearfield acoustic holography-based method for measuring the sensitivity of a particle velocity sensor // *Acta Acustica*. 2015. Vol. 101, №5. p. 855-858.

2. J.-M. Attendu, A. Ross. Time domain nearfield acoustical holography without wrap-around error and spectral leakage for forward propagation // *J. Acoust. Soc. Am.* 2017. Vol. 141, №2, p. 1039

3. Г.Ю. Годзиашвили. Определение полей отражений по измерениям в ближней зоне // Тр. X всерос. Конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». Спб.: «Наука», 2010. С. 386-389.

4. M.B. Salin, D.A. Kosteev. Examples of usage of nearfield acoustic holography methods for far field estimations: Part 1. CW signals // arXiv:1812.03826 (2018) (<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1812/1812.03826.pdf>).

5. М.Б. Емельянов, Б.М. Салин, М.Б. Салин, А.В. Цибереv. Восстановление временной зависимости и параметров сигнала широкополосных протяженных акустических источников в дальней зоне. Часть 1. Методы восстановления и технические средства // *Акуст. журн.* 2014. Т. 60, №5. С. 608-616.

6. Е. Скучик. Основы акустики. Т. 2. Мир. М., 1976.

7. Б.М. Салин, В.И. Турчин. Голографическое воспроизведение волновых полей с произвольной зависимостью от времени // *Акуст. журн.* 1992. Т. 38. № 1. С. 150-155.

### References

1. W.-Q. Jing, Y.-B. Zhang, C.-X. Bi, Nearfield acoustic holography-based method for measuring the sensitivity of a particle velocity sensor // *Acta Acustica*. 2015. Vol. 101, №5. p. 855-858.

2. J.-M. Attendu, A. Ross. Time domain nearfield acoustical holography without wrap-around error and spectral leakage for forward propagation // *J. Acoust. Soc. Am.* 2017. Vol. 141, №2, p. 1039

3. *G. Yu Godziashvili*. Determination of reflection fields from measurements in the near zone // Proceedings of the 10th All-Russian Conference "Applied technologies of hydroacoustics and hydrophysics". Spb. : "Science", 2010. p.386-389. [*in Russian*]

4. M.B. Salin, D.A. Kosteev. Examples of usage of nearfield acoustic holography methods for far field estimations: Part 1. CW signals // arXiv:1812.03826 (2018) (<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1812/1812.03826.pdf>).

5. M.B. Emelyanov, B.M. Salin, M.B. Salin, A.V. Tsiberev, Reconstruction of the time dependence and signal parameters of far-field extended wideband sources: Part 1.



Reconstruction techniques and technical instruments // Acoustical physics 2014 Vol. 60, №5. p. 608-616.

6. *E. Skudrzyk*. The foundation of acoustics. Basic mathematics and basic acoustics. Springer - Verlag, Wien, New York, 1971

7. *B.M. Salin, V.I. Turchin*. Holographic reconstruction of wave field with arbitrary time dependence // Sov. Phys. Acoust. 1992 Vol. 38, 77.