

### **Частотная коррекция характеристик диаграммы направленности широкополосного излучателя системы акустического зондирования**

А.Ю. Ермакова<sup>1</sup>, Г.С. Васильев<sup>2</sup>, С.М. Курилова-Харчук<sup>1</sup>, И.А.Курилов<sup>3</sup>,  
В.В. Булкин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Муромский институт Владимирского государственного университета  
602264, г. Муром, Владимирской обл., ул. Орловская 23,  
E-mail: [vvbulkin@mail.ru](mailto:vvbulkin@mail.ru)

<sup>2</sup> Белгородский государственный национальный исследовательский университет  
308015, г. Белгород, ул. Победы, 85.  
E-mail: [oldolkuz@yandex.ru](mailto:oldolkuz@yandex.ru)

<sup>3</sup> Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Звукотехника»  
602264, Владимирская обл., г. Муром, Радиозаводское шоссе, д.23а.  
E-mail: [kia\\_s@list.ru](mailto:kia_s@list.ru)

*Предложена система частотной коррекции характеристик диаграммы направленности акустической антенной решетки. Система позволяет улучшать параметры антенны, путем применением частотного разделения спектра излучаемого сигнала с последующим пространственным разделением сигналов по элементам решетки. Проводится анализ характеристик и представлены результаты моделирования системы.*

*Ключевые слова: система акустического зондирования, акустический излучатель, непрерывные кусочно-линейные функции*

### **Formation of the radiation pattern of a broadband emitter acoustic sounding systems**

A.U. Ermakova<sup>1</sup>, G.S. Vasilyev<sup>2</sup>, S.M. Kurilova-Kharchuk<sup>1</sup>, I.A. Kurilov<sup>1</sup>, V.V. Bulkin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Vladimir State University.

<sup>2</sup> Belgorod State University.

<sup>3</sup> Joint Stock Company "Research and Production Enterprise "Zvukotekhnika"

*A system for frequency correction of the radiation pattern characteristics of an acoustic antenna array is proposed. The system allows you to improve the parameters of the antenna by using frequency division of the spectrum of the emitted signal, followed by spatial division of the signals across array elements. The characteristics are analyzed and the results of system modeling are presented.*

*Keywords: acoustic sounding system, acoustic sound, continuous piecewise linear functions*

### **Введение**

Развитие и совершенствование метода акустического зондирования предполагает, наряду с совершенствованием теоретических моделей, и совершенствование технических составляющих систем [1,2]. Эффективным методом формирования акустического сигнала является применение акустических излучающих систем на базе антенных решеток.

Недостатком антенной решетки (АР) является зависимость её диаграммы направленности (ДН) от частоты сигнала [1]. Так, с увеличением частоты на характеристике направленности появляются лепестки бокового излучения, уровень и количество которых возрастает пропорционально росту частоты. При этом возрастает мощность излучаемого сигнала в боковых направлениях и, соответственно, возрастает уровень принятых информационных сигналов с данных направлений. Это вносит дополнительные искажения в принятый сигнал и негативно влияет на результаты проводимых исследований.

Кроме того, при обеспечении заданного давления акустического сигнала АР в области нижних частот рабочего диапазона, при больших мощностях с увеличением частоты наблюдается появление нелинейного эффекта воздушной среды, что приводит к дополнительному искажению зондирующего сигнала и результатов исследований.

В работе рассматривается метод коррекции характеристик направленности формирователя акустического сигнала, основанный на изменении линейных размеров задействованной части АР, в зависимости от частот, составляющих спектр зондирующего сигнала.

### Система частотной коррекции характеристик акустической антенны

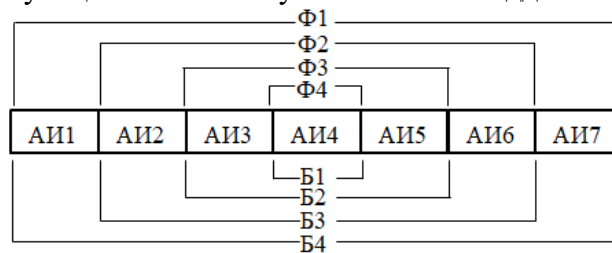
Рассмотрим АР, состоящую из рупорных акустических излучателей. Конструкция каждого акустического излучателя (АИ) решетки аналогична конструкции излучателей звуковещательной станции [3]. Устья рупорных АИ соединены между собой и образуют непрерывную излучающую поверхность. Раскрыв рупора имеет форму квадрата со стороной  $l_0 = 0,12$  м. Общее количество АИ в решетке определяется требованиями к рабочему диапазону частот и к характеристикам направленности АР.

В начале рассмотрим линейную антенну, состоящую из одного ряда рупорных АИ, в которой конструктивно устья рупоров соединены между собой и образуют излучающую линейку.

Для коррекции пространственно-частотной характеристики антенны диапазон рабочих частот системы акустического зондирования распределяется на поддиапазоны, а совокупность АИ распределяется на блоки. Выбор оптимальных вариантов распределения на поддиапазоны и блоки определяется исходя из границ рабочего диапазона частот, требований к характеристикам ДН (ширина главного лепестка, количество и уровень боковых лепестков), из обеспечения требуемого звукового давления и др.

Особенностью распределения на блоки является то, что каждый последующий блок, начиная со второго, включает в себя все АИ предыдущего блока и ещё дополнительные АИ.

Один из вариантов распределения семи излучателей на четыре блока представлен на рис. 1. Здесь обозначено: Б1...Б4 – блоки; Ф1...Ф4 – полосовые фильтры, обеспечивающие работу соответствующих блоков излучателей в их поддиапазонах частот.



**Рис. 1** Распределение семи излучателей на четыре блока. Б1...Б4 – блоки; Ф1...Ф4 – полосовые фильтры, обеспечивающие работу соответствующих блоков излучателей в их поддиапазонах частот.

Схема системы частотной коррекции (СЧК) ДН акустической решетки, реализующая данный вариант распределения, структурно включает в себя четыре последовательно соединенных каскада: входной каскад, каскад фильтрации, каскад регуляторов уровня, каскад суммирования и каскад выходных усилителей. Система имеет четыре выхода. Выходы подключены к объединенным в группы акустическим излучателям решетки. Входной каскад содержит предварительный усилитель, обеспечивающий повышение уровня сигнала до значения, необходимого для нормальной работы каскада фильтрации.

Система работает следующим образом. Входной сигнал поступает на вход предварительного усилителя и далее на каскад фильтрации. В рассматриваемом варианте, из-

лучатели АР распределены на четыре блока, поэтому каскад фильтрации содержит четыре полосовых фильтра (Ф1...Ф4). После каждого фильтра выделенный участок спектра входного сигнала поступает на соответствующий (один из четырех) регулятор уровня сигнала каскада регуляторов уровня. Применение регуляторов уровня позволяет формировать требуемую амплитудно-частотную характеристику системы и корректировать характеристики изменения звукового давления АИ от частоты. Далее, все сигналы, кроме выходного сигнала первого регулятора, поступают на сумматоры, при помощи которых они направляются в группы АИ. В рассматриваемом варианте четыре блока (Б1...Б4) формируются при помощи последовательного «суммирования» четырех групп излучателей: АИ1 и АИ7; АИ2 и АИ6; АИ3 и АИ5; АИ4. Так фильтр Ф4 подсоединяется к блоку Б1, который включает в себя только АИ4.

Фильтр Ф3 подключается к блоку Б2, который включает в себя Б1(АИ4) и группу АИ3, АИ5 и т.д., в соответствии с рис. 1. Четыре усилителя мощности каскада выходных усилителей, обеспечивают требуемый уровень усиления сигналов для нормального функционирования каждой группы излучателей.

### Распределение рабочего диапазона частот сигнала на поддиапазоны

Для линейных АР с равномерным амплитудным и фазовым распределением множитель решетки определяется выражением [1]

$$F = \frac{\sin\left(\frac{Ekd\cos(\theta)}{2} - \varphi_\varepsilon\right)}{E\sin\left(\frac{kd\cos(\theta)}{2} - \varphi_\varepsilon\right)}, \quad (1)$$

где  $E$  - число излучателей,

$k$  - волновое число,

$d$  - расстояние между элементами решетки,

$\theta$  - угол между плоскостью решетки и точкой наблюдения,

$\varphi_\varepsilon$  - фазовый сдвиг, вносимый излучателем с номером  $\varepsilon$ . Примем  $\varphi_\varepsilon = 0$ .

Согласно [4] рупор излучает волны, почти плоские в его устье. Устья рупоров прижимают друг к другу так, что образуется непрерывная излучающая поверхность. Поэтому антенную систему можно рассматривать как непрерывную, состоящую из большого числа излучателей с расстоянием между ними  $d \rightarrow 0$ . Обозначим  $n$  - количество АИ в блоке,  $N$  - максимальное число АИ в АР, тогда длина блока АР  $L = nl_0$ . Также обозначим  $\theta$  - угол между осью визирования и точкой наблюдения,  $\lambda$  - длина волны звукового сигнала,  $v$  - скорость звука и  $f$  - частота сигнала. Тогда  $k = 1/\lambda$  и  $\lambda = v/f$ .

Подставим всё в (1), учтем, что синус малого угла равен самому углу, и после преобразования получим

$$F(\theta, f) = \frac{\sin\left(\frac{nl_0 f}{2v} \sin(\theta)\right)}{\frac{nl_0 f}{2v} \sin(\theta)}, \quad (2)$$

Характеристики драйверов АИ могут быть учтены введением дополнительного сомножителя в (2).

В качестве критерия при распределении диапазона рабочих частот может быть принято постоянство (минимум отклонения), половинного значения ширины главного лепестка ДН  $\theta_h$ , где  $h$  - уровень, на котором определяется  $\theta_h$ ,  $h \in [0, 1]$ .

Обозначим  $f_n$  - частота для блока с  $n$  АИ, при которой значении  $\theta_h$  соответствует заданному. Для определения  $f_n$  в виде аналитического выражения, аппроксимируем функцию  $\sin(\theta_h)$  при помощи аппарата непрерывных кусочно-линейных функций (НКЛФ) [5,6], далее подставим  $F(\theta, f) = h$  в (2) и после решения полученного уравнения находим

$$f_n = \frac{\sum_{m=0}^{M-1} B_m Q_m(f)}{\frac{nl_0 n \sin(\theta_h)}{2v} h - \sum_{m=0}^{M-1} K_m Q_m(f)}, \quad (3)$$

где  $K_m$  и  $B_m$  - коэффициенты аппроксимации,

$M$  и  $m$  - максимальный и текущий номера точек аппроксимации,

$Q_m(f)$  – включающая НКЛФ.

В качестве примера зададим  $h=0,5$  и  $\theta_h=0,44$  рад ( $25,4^\circ$ ). Для блоков излучателей АР, изображенных на рис. 1 ( $N=7$ ) из выражения (3) получим следующие значения частот, при которых ширина главного лепестка ДН каждого блока точно равна  $0,44$  рад:  $f_1=25,4$  кГц,  $f_3=8446$  Гц,  $f_5=5080$  Гц и  $f_7=3628$  Гц.

Определение границ поддиапазонов можно проводить и по  $\theta_{0n}$ , соответствующему заданному значению  $\theta_h$ . Выражение для  $\theta_{0n}$  определим из (2), полагая  $h=0$  и  $f=f_n$

$$\theta_{0n} = \arcsin \frac{2v\pi}{nl_0f_n}. \quad (4)$$

При отклонении частоты  $f$  от частоты  $f_n$ , изменяется  $\theta_h$ . При этом в каждом блоке с  $n$  излучателями, происходит отклонение  $\theta$  от значения  $\theta_{0n}(f_n)$  по закону

$$\theta_{0n}(f) = \arcsin \frac{2v\pi}{nl_0f}.$$

Величина отклонения

$$\theta_{0n}(f) = \arcsin \frac{2v\pi}{nl_0f_n} - \arcsin \frac{2v\pi}{nl_0f} \quad (5)$$

Для двух соседних блоков отклонения носят противоположный характер и являются нелинейными функциями частоты.

В качестве критериев распределения на поддиапазоны частот могут использоваться: среднеарифметическое значение частоты между соседними поддиапазонами; равенство нулю разности отклонений  $\theta_{0n}(f)$  и  $\theta_{0n+2}(f)$  т.е.  $\Delta\theta_{0n,n+2}(f_{гр}) = 0$ , где  $f_{гр}$  - граничная частота поддиапазонов  $n$  и  $n+2$ ; равенство  $F_n(f_{гр}) + F_{n+2}(f_{гр}) = 0$ , где  $F_n(f)$  и  $F_{n+2}(f)$  – амплитудные характеристики ДН для блоков с  $n$  и  $n+2$  АИ.

Наиболее оптимальным представляется осуществлять определение границ поддиапазонов, по критерию равенства амплитудных характеристик ДН.

С учетом (2), выражения частотных характеристик ДН для двух соседних поддиапазонов для  $\theta = \theta_{0n} = \theta_{0(n+2)} = \theta_0$ , принимают вид

$$F_n(f) = \frac{\sin\left(\frac{nl_0f}{2v} \sin(\theta_0)\right)}{\frac{nl_0f}{2v} \sin(\theta_0)}, \quad (6)$$

$$F_{n+2}(f) = \frac{\sin\left(\frac{(n+2)l_0f}{2v} \sin(\theta_0)\right)}{\frac{(n+2)l_0f}{2v} \sin(\theta_0)}. \quad (7)$$

Значение  $f_{гр}$  является решением уравнения  $\Delta F_{n,n+2}(f_{гр})=0$ . Оно так же осуществляется на основе НКЛФ. Для блоков АИ с  $n=7$  и  $n=5$  получаем значение  $f_{гр}=4367$  Гц.

### Характеристики системы частотной коррекции

На рис. 2 представлен построенный по (2) трехмерный график ДН системы зондирования без СЧК ( $n=4$ ) при изменении частоты сигнала от 1кГц до 10 кГц. Секущая плоскость  $h=0,5$ . При увеличении частоты меняется форма главного лепестка в пространстве. Ширина главного лепестка уменьшается и на ДН появляются боковые лепестки.

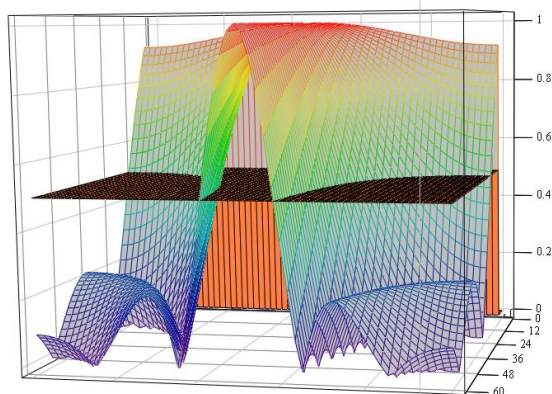
Введем СЧК. Определим границы частотных поддиапазонов. Для каждого блока АИ введем соответствующие им полосовые фильтры с передаточными характеристиками  $W_n(f)$  и  $W_{n+2}(f)$ . Тогда выражение для результирующей характеристики ДН на участках  $n$  и  $n+2$  примет вид

$$F_{n,n+2}(f) = W_n(f)F_n(f) + W_{(n+2)}(f)F_{(n+2)}(f). \quad (8)$$

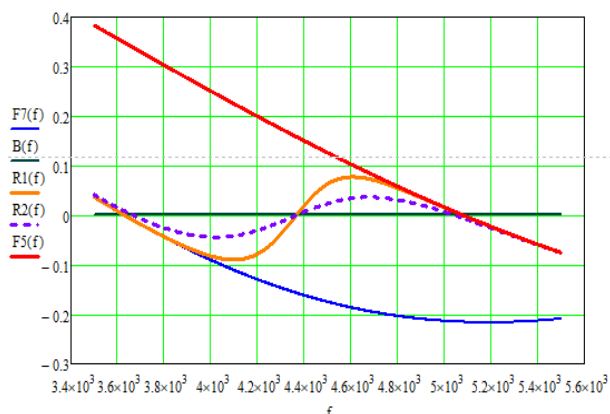
Результирующие графики (8) для блоков АИ с  $n=5$  и  $n=7$  представлены на рис. 3. Сплошные линии: красная –  $F_5(f)$ , синяя –  $F_7(f)$ , обе эти характеристики соответствуют отсутствию СЧК; коричневая сплошная линия – включена СЧК с фильтрами, при значениях коэффициентов характеристик фильтров равных  $0,01$ . Пунктирная фиолетовая линия – СЧК включена, коэффициенты фильтров равны  $0,05$ .

Из рассмотрения графиков следует, что для блоков АИ с  $n=5$  и  $n=7$  при  $\theta_0=45^\circ$  максимальные отклонения характеристик ДН на частотах  $f_5$  и  $f_7$ , без системы коррекции, составляют  $\Delta F_5=0,36$  и  $\Delta F_7=0,22$ .

При включении СЧК с коэффициентами фильтров 0,01 максимальное отклонение суммарной характеристики обеих групп АИ уменьшилось и не превышает  $\Delta F_{5,7}=0,08$ . С увеличением коэффициентов фильтров до 0,05 максимальное отклонение характеристики еще уменьшилось до значения  $\Delta F_{5,7}=0,034$ , что свидетельствует об эффективности предложенного метода коррекции.



**Рис. 2** Трехмерный график ДН системы зондирования без СЧК ( $n=4$ ) при изменении частоты сигнала от 1кГц до 10 кГц.



**Рис. 3** Результирующие графики для блоков АИ с  $n=5$  и  $n=7$ . Сплошные линии: красная –  $F_5(f)$ , синяя –  $F_7(f)$ , коричневая сплошная линия – включена СЧК с фильтрами. Пунктирная фиолетовая линия – СЧК включена.

### Заключение

Предложена СЧК характеристик ДН акустической АР, улучшающая пространственные параметры антенны системы акустического зондирования. Для коррекции используется частотное разделение спектра рабочих частот излучаемого сигнала с последующим разделением сигналов по пространственным элементам АР. Проведенные исследования и полученные числовые значения характеристик подтверждают эффективность применения СЧК ДН.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-10100*

### Литература

1. Acoustic remote sensing applications / Ed. S.P. Singal. New Delhi, Narosa Publishing House, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1997, 585 p.
2. Красненко, Н.П. Методы и средства дистанционного акустического зондирования атмосферы // Методы и устройства передачи и обработки информации. – 2009. № 11. – С.143-154.
3. Звуковещательная станция ЗС-ВС / АО «Муромский радиозавод». URL: [http://site.muromrz.com/?page\\_id=156](http://site.muromrz.com/?page_id=156).
4. Dinsdale, J. Horn Loudspeaker Design // Wireless World. - 1974 .- P. 19-24.
5. Булкин В.В., Кузичкин О.Р., Васильев Г.С., Суржик Д.И., Курилова-Харчук С.М., Курилов И.А. Обобщенная схема преобразователя сигналов в акустолокационных системах на основе аппарата непрерывных кусочно-линейных функций // Всероссийские открытые Армандовские чтения: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн / Материалы Всероссийской открытой научной конференции. –Муром: МИ ВлГУ, 2023. С.405-411.
6. Кузичкин О.Р., Булкин В.В., Суржик Д.И., Васильев Г.С., Курилова-Харчук С.М., Курилов И.А. Анализ радиоустройств на основе обобщенного преобразования сигналов и непрерывных кусочно-линейных функций // Проблемы дистанционного зондирования, распространения и дифракции радиоволн: конспекты лекций. –Муром: МИ ВлГУ, 2021. С. 22-46.