

## Акустические приборы и системы

УДК 623.983

**А.В. Дерепя**, канд. техн. наук

Центральный научно-исследовательский институт вооружения и военной техники

Вооруженных Сил Украины,

Воздухофлотский проспект, 28, Киев, 03049, Украина

### **Свойства плоской, вертикально ориентированной антенной решетки в присутствии абсолютно жесткой сферы, лежащей на границе разделения сред «вода – воздух»**

При создании перспективных средств гидроакустического вооружения остро стоит вопрос влияния на их электроакустические параметры корпуса корабля, его днища, ребер жесткости, обтекателей и других конструктивных элементов корпуса корабля. В статье проведено исследование количественных оценок звукового поля плоской, вертикально ориентированной антенной решетки в присутствии корпуса надводного корабля, который моделируется абсолютно жесткой сферой, лежащей на границе разделения сред «вода – воздух». Полученные аналитические соотношения использованы для численной оценки звуковых полей в модельных системах «гидроакустическая станция – надводный корабль», «гидроакустическая станция – морская поверхность», «гидроакустическая станция – свободная среда» и сравнения полученных результатов между собой. Библ. 3, рис. 5.

**Ключевые слова:** корпус корабля, жесткая сфера, антенная решетка, граница разделения сред «вода – воздух», диаграмма направленности.

#### **Введение**

Создание перспективных средств гидроакустического вооружения надводных кораблей тесно связано с проблемами повышения эффективности гидроакустических станций (ГАС), которые устанавливаются на этих кораблях. В связи с этим особенную остроту приобретает вопрос о влиянии корпуса корабля, его днища, обтекателей и других конструктивных элементов носителя ГАС на ее электроакустические параметры. Существующая на сегодняшний день схема создания новых ГАС, не привязывает их параметры к конкретному кораблю-носителю. Требования к параметрам станций задаются, исходя из условий эксплуатации их в безграничной морской среде, а разработка но-

вых ГАС ведется без учета влияния условий размещения ГАС на будущем носителе на их характеристики. Опыт эксплуатации корабельных ГАС с подкильными антеннами свидетельствует о том, что их характеристики в условиях эксплуатации испытывают существенные изменения, величина которых зависит от конкретных особенностей как конструкции корабля – носителя ГАС, так и взаимного размещения акустической антенны ГАС и корпуса корабля. Физической причиной этих изменений является возникновение при эксплуатации ГАС в условиях корабля – носителя полей рассеивания звука, как от морской поверхности, так и от элементов его конструкции. Естественно, что каждый корабль создает поля рассеивания звука присущие только ему. И также понятен тот факт, что при создании корабельной ГАС, предназначенной обычно для многих проектов кораблей, учет условий влияния этих полей рассеивания звука не может быть осуществлен. Поэтому и появилась проблема оценки влияния условий эксплуатации корабельной ГАС на ее параметры в условиях корабля – носителя ГАС.

Целью работы является выполнение исследования количественных характеристик звукового поля вертикально ориентированной плоской антенной решетки, в присутствии корпуса корабля, представленного абсолютно жесткой сферой, лежащей на границе разделения сред «вода – воздух».

#### **Результаты исследований**

В работах [1, 2, 3] показано, что наличие на границе разделения сред «вода – воздух» корпуса корабля в виде упругого тела, рассеивающего звук, влияет на акустические характеристики излучающей антенны, которая работает в его присутствии. Построение адекватной модели корпуса носителя, учитывающей все особенности конструкции корабля и проведение на ее

основе количественных оценок свойств антенны, является практически неразрешимой задачей. Относительно выбора формы модели корпуса корабля – ориентируясь на развитие и уточнение полученных потенциальных оценок, представляется целесообразным провести исследование, по крайней мере, для двух предельных ситуаций, что характеризуют форму корпуса корабля. Так, аппроксимируя корпус цилиндром или сферой, можно ожидать, что полученные в каждом случае результаты образуют такую себе «вилку», в рамках которой будут находиться данные, что отвечают реальным

конструкциям кораблей, форма которых является промежуточной между отмеченными типами тел.

Рассмотрим модель плоской, вертикально ориентированной антенной решетки в присутствии абсолютно жесткой сферы радиусом  $R$ , что лежит на границе разделения сред «вода – воздух» (рис. 1), где  $h$  – заглубление антенны относительно оболочки сферы,  $a$  и  $b$  – соответственно высота и ширина плоской антенной решетки,  $k$  – волновое число воды,  $\vec{r}$  – радиус-вектор точки наблюдения.

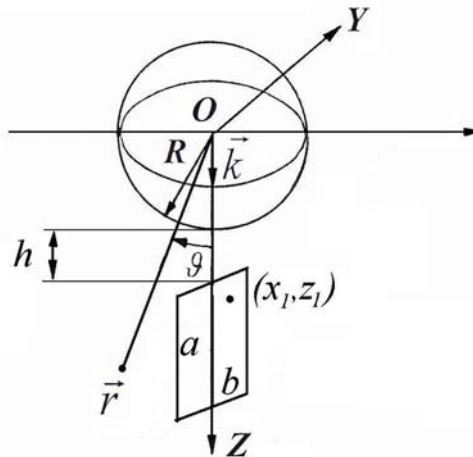


Рис. 1. Модель плоской, вертикальной антенной решетки в присутствии абсолютно жесткой сферы, лежащей на границе разделения сред «вода – воздух»

Задача определения звукового поля точечного источника в присутствии абсолютно жесткой сферы сводится к определению решения уравнения Гельмгольца [1]

$$\Delta \Phi + k^2 \Phi = 0$$

при таких предельных условиях:

$$\Phi(\vec{r})|_{r \in S_r} = 0, \quad \frac{d\Phi(\vec{r})}{dn}|_{r \in S_c} = 0,$$

где  $\Phi$  – потенциал акустического поля систе -

мы «источник – сфера – граница»;  $k$  – волновое число воды;  $\vec{r}$  – радиус-вектор точки наблюдения;  $S_r$  – поверхность границы распределения сред «вода – воздух»;  $S_c$  – поверхность сферы.

В работе [1] получено соотношение, определяющее поле источника звука при произвольном его размещении в точке  $\vec{r}_1 : (r_1, \vartheta_1, \varphi_1)$  относительно сферы. Это соотношение имеет вид

$$\begin{aligned} \Phi(\vec{r}, \vec{r}_1) = & \frac{\exp\{-ik|\vec{r} - \vec{r}_1|\}}{|\vec{r} - \vec{r}_1|} - \frac{\exp\{-ik|\vec{r} - \vec{r}_2|\}}{|\vec{r} - \vec{r}_2|} + i8k \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l P_{2l+1}^{(2m)}(\cos \vartheta_1) \bar{P}_{2l+1}^{(2m)}(\cos \vartheta_1) \times \\ & \times \frac{\cos[2m(\phi_1 - \phi)]}{1 + \delta_{m,0}} \frac{j'_{2l+1}(kR) h_{2l+1}^{(2)}(kr_1)}{h_{2l+1}^{(2)}(kR)} h_{2l+1}^{(2)}(kr) + i8k \times \\ & \times \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l \bar{P}_{2l}^{(2m+1)}(\cos \vartheta_1) \bar{P}_{2l}^{(2m+1)}(\cos \vartheta) \cos[(2m+1)(\phi_1 - \phi)] \times \frac{j'_{2l}(kR) h_{2l}^{(2)}(kr_1)}{h_{2l+1}^{(2)}(kR)} h_{2l}^{(2)}(kr), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\vec{r}_2 : (r_1, \pi - \vartheta_1, \varphi_1)$  – координаты воображаемого источника;

$$|\vec{r} - \vec{r}_{1(2)}| = \left\{ r^2 + r_{1(2)}^2 - 2rr_{1(2)} [\cos \vartheta_{1(2)} \cos \vartheta + \sin \vartheta_{1(2)} \sin \vartheta \cos(\varphi_{1(2)} - \varphi)] \right\}^{1/2};$$

$\bar{P}_\lambda^\mu(\chi)$  – нормированный присоединенный полином Лежандра:

$$\bar{P}_\lambda^\mu(\chi) = \sqrt{\frac{(2\lambda+1)(\lambda-\mu)}{2(\lambda+\mu)!}} P_\lambda^\mu(\chi);$$

$P_\lambda^\mu(\chi)$  – присоединенный полином Лежандра:

$$P_\lambda^\mu(\chi) = (1-\chi^2)^{\mu/2} \frac{d^\mu}{d\chi^\mu} P_\lambda(\chi) = \frac{1}{2^\lambda \lambda!} (1-\chi^2)^{\mu/2} \frac{d^{\lambda+\mu}}{d\chi^{\lambda+\mu}} [(\chi^2-1)^\lambda];$$

$P_\lambda(\chi)$  – полином Лежандра.

Используя соотношение (1) построим выражение, что определяет поле совокупности точечных источников, распределенных по плоскости. Пусть поверхность, на которой размещены источники звука, представляет собой прямоугольник высотой  $a$  и шириной  $b$ , расположенный так, что его вертикальная ось проходит через центр разделения сред и перпендикулярна плоскости границы распределения сред, а заглабление прямоугольника относительно оболочки ровно  $h$ ; размер сферы характеризуется ее радиусом  $R$ . Очевидно, что акустическое поле данной системы можно записать как:

$$\psi(\vec{r}) = \frac{1}{ab} \int_{-a/2}^{a/2} dx_1 \int_{R+h}^{R+h+b} \Phi(\vec{r}, \vec{r}_1) dz_1.$$

При этом расчетное соотношение имеет вид

$$\psi(\vec{r}) = \frac{16k}{ab} \int_0^{a/2} dx_1 \int_{R+h}^{R+h+b} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l \bar{P}_{2l+1}^{(2m)}\left(\frac{z_1}{r_1}\right) \bar{P}_{2l+1}^{(2m)} \times (\cos \vartheta) \frac{\cos 2m\varphi}{1 + \delta_{m,0}} \frac{j_{2l+1}(kr) + in_{2l+1}(kr)}{j_{2l+1}(kr) - in_{2l+1}(kr)} \times [j_{2l+1}(kR)n_{2l+1}(kr_1) - n'_{2l+1}(kR)j_{2l+1}(kr_1)] dz_1,$$

где  $(x_1, z_1)$  – декартовы координаты точки на прямоугольной поверхности, занятой точечными источниками;  $n_\lambda(x)$  – сферические функции Бесселя второго рода;

$$j_\lambda(x) + n_\lambda(x) = h_\lambda^{(2)}(x);$$

штрих – производная соответствующей функции по ее аргументу.

Для сравнения выполнен также расчет потенциала колебательной скорости в дальнем поле прямоугольной поверхности как в свободной среде

$$\psi(\vec{r}) = \frac{1}{ab} \int_0^{a/2} dx_1 \int_{-b/2}^{b/2} \frac{\exp\{-ik|\vec{r} - \vec{r}_1|\}}{|\vec{r} - \vec{r}_1|} dz_1,$$

так и при отсутствии оболочки на границе распределения сред «вода – воздух»

$$\psi_1(\vec{r}) = \frac{1}{ab} \int_0^{a/2} dx_1 \int_{R+h}^{R+h+b} \left\{ \frac{\exp\{-ik|\vec{r} - \vec{r}_1|\}}{|\vec{r} - \vec{r}_1|} - \frac{\exp\{-ik|\vec{r} - \vec{r}_2|\}}{|\vec{r} - \vec{r}_2|} \right\} dz_1.$$

Характерные особенности, что вытекают из полученных результатов, анализируются ниже.

Некоторые результаты расчетов, выполненных при  $R = 10\lambda$ ,  $a = 3\lambda$ ,  $b = 2\lambda$  для разных заглаблений поверхности, занятой источниками звука, относительно сферы, приведены на рис. 2-5. Группа рис. 2-3 отвечает сечению поля, что проходит через максимум диаграммы направленности, реализуемой данным поверхностным источником в свободной среде ( $\varphi = 0^\circ$ ); группа рис. 4-5 отвечает боковому полю ( $\varphi = 60^\circ$ ). Рис. 2, 4 отвечают заглаблению  $h = 0,125\lambda$ ; рис. 3, 5 отвечают заглаблению  $h = 0,875\lambda$ . Кривые 1 соответствуют диаграмме направленности при наличии сферы, кривые 2 – при ее отсутствии, кривые 3 соответствуют свободной среде.

Произведем анализ полученных результатов. Как и следовало ожидать, в свободной среде плоская вертикально ориентированная антенна формирует двустороннюю диаграмму направленности (кривые 3). Размещение такой антенны вблизи плоской границы раздела сред «вода – воздух» обуславливает появление провала в диаграмме направленности антенны вдоль оси  $\vartheta = 90^\circ$ , параллельной границе раздела сред (кривые 2). Последнее обусловлено участием в формировании звукового поля антенной, расположенной вблизи акустически мягкой границы раздела сред, звукового поля отраженного от этой границы в противофазе. Размещение же на этой границе еще и абсолютно жесткой сферы, отражающей звуковое поле антенны, размещенной вблизи нее, в фазе, оказывает дополнительное влияние (кри-

вые1) на формирование звукового поля системой «гидроакустическая антенна – сфероподобный корпус – морская поверхность». Это дополнительное влияние проявляется в обострении разделенного нулевым провалом по оси ос-

новного лепестка диаграммы направленности (рис. 2, 4). При этом увеличение величины заглубления антенны (рис. 3, 5) существенно расширяет область основного лепестка с провалом вдоль оси диаграммы направленности.

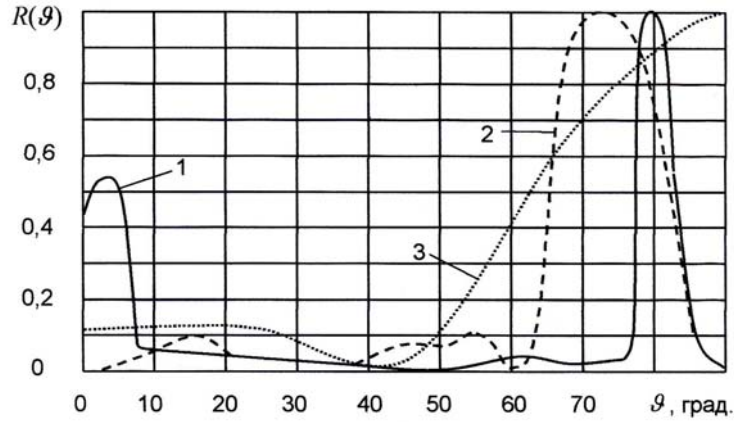


Рис. 2. Диаграммы направленности вертикальной плоской антенной решетки в присутствии абсолютно жесткой сферы при  $h = 0,125\lambda$ ,  $\varphi = 0^\circ$

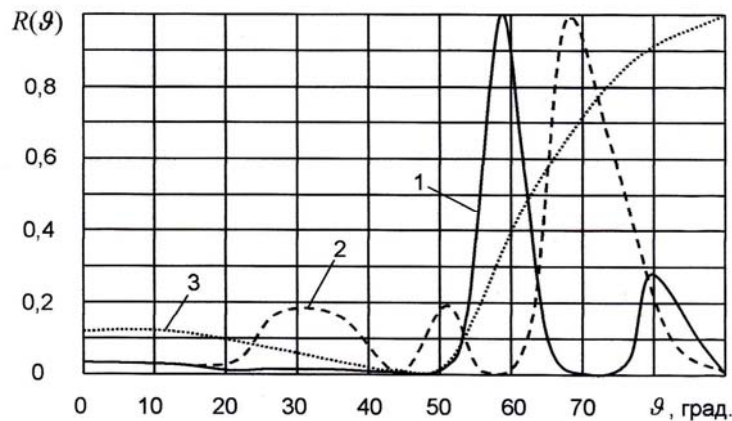


Рис. 3. Диаграммы направленности вертикальной плоской антенной решетки в присутствии абсолютно жесткой сферы при  $h = 0,875\lambda$ ,  $\varphi = 0^\circ$

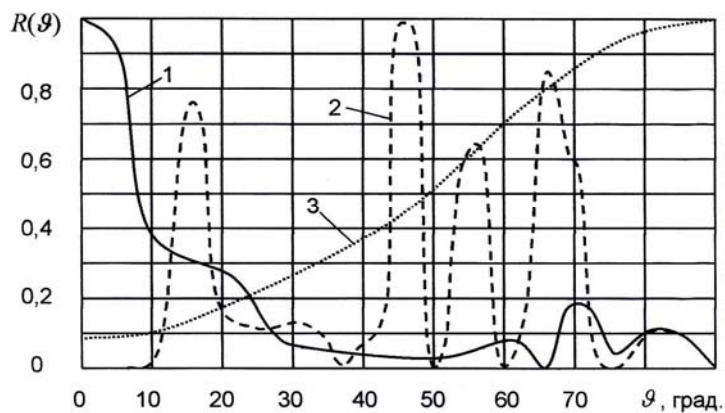
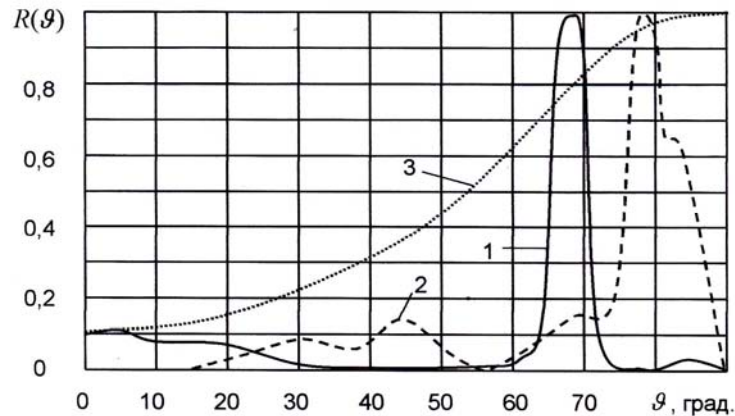


Рис. 4. Диаграммы направленности вертикальной плоской антенной решетки в присутствии абсолютно жесткой сферы при  $h = 0,125\lambda$ ,  $\varphi = 60^\circ$



**Рис. 5. Диаграммы направленности вертикальной плоской антенной решетки в присутствии абсолютно жесткой сферы при  $h = 0,875\lambda$ ,  $\varphi = 60^\circ$**

Таким образом, анализ кривых, приведенных на рис. 2-5 показывает, что роль абсолютно жесткой сферы, лежащей на границе разделения сред «вода – воздух» оказывается очень существенной в формировании акустического поля вертикальной плоской антенной решеткой, которая работает в ее присутствии.

#### Выводы

Полученные аналитические выражения позволяют выполнить количественные оценки влияния жесткой сферы на параметры плоской антенны в вертикальной плоскости. Их анализ показывает, что в случае аппроксимации корпуса надводного корабля жесткой сферой, влияние корпуса на формирование акустического поля вертикальной гидроакустической антенной решеткой является существенным и его необходимо учитывать при определении параметров гидроакустической станции в условиях эксплуатации. Возможность применения полученных соотношений для количественной оценки в данной ситуации продемонстрирована на конкретных примерах.

Полученные данные позволяют выявить некоторые механизмы, посредством которых возможно управлять направленными свойствами системы «гидроакустическая станция – надводный корабль» с гидроакустической антенной,

размещенной в корпусе корабля. К этим механизмам следует отнести выбор размеров корпуса корабля относительно волновых размеров гидроакустической антенны, их взаимного размещения относительно друг друга, а также амплитудно-фазового распределения сигналов, которые вводятся в каналы антенны.

#### Список использованных источников

1. Дерепя А.В. До питання формування звукового поля системою «гідроакустична станція – надводний корабель» / А.В. Дерепя, О.Г. Лейко, О.С. Ісаєнко // Зб. наук. праць. – К.: ЦНДІ ОВТ ЗС України. – 2013. – Вип. 1(48). – С. 122-129.
2. Карновский А. М. О работе акустической антенны при наличии границы раздела сред / А. М. Карновский, А. В. Кошуков, И. С. Скокин // Антенны и преобразователи: сб. – Владивосток : ДВГУ, 1988. – С. 25–29.
3. Карновский А. М. Влияние импедансной поверхности на направленные свойства акустических антенн // Дальневосточный акустический сб. – Вып. 2. – Владивосток : ДВГУ, 1976. – С. 46–50.

Поступила в редакцию 01 апреля 2014 г.

УДК 623.983

**А.В. Дерепя**, канд. техн. наук

Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України,  
Повітрофлотський проспект, 28, Київ, 03049, Україна.

## **Властивості пласкої, вертикально орієнтованої антенної решітки в присутності абсолютно жорсткої сфери, що лежить на границі розподілу середовищ «вода-повітря»**

*При створенні перспективних засобів гідроакустичного озброєння гостро стоїть питання впливу на їх електроакустичні параметри корпусу корабля, його днища, ребер жорсткості, обтічників і інших конструктивних елементів корпусу корабля. В статті проведено дослідження кількісних оцінок звукового поля плоских, вертикально орієнтованих антенних решіток у присутності корпусу надводного корабля, який моделюється абсолютно жорсткою сферою, що лежить на границі розподілу середовищ «вода – повітря». Отримані аналітичні співвідношення використані для чисельної оцінки звукових полів в модельних системах «гідроакустична станція – надводний корабель», «гідроакустична станція – морська поверхня», «гідроакустична станція – вільне середовище» і порівняння отриманих результатів між собою. Бібл. 3, рис. 5.*

**Ключові слова:** корпус корабля, жорстка сфера, антенна решітка, границя розподілу середовищ, діаграма направленості.

UDC 623.983

**A.V. Derepa**, Ph.D.

Central scientific research institute of weapons and military equipment of the Armed Forces of Ukraine,  
Vozdukhoflotsky Avenue, 28, Kyiv, 03049, Ukraine.

## **Properties of flat, vertically-aligned antenna array in presence of absolutely hard sphere, lying at the border of distribution of media “water – air”**

*While creating the perspective facilities for hydroacoustic weapons there is the urgent question about influence of ship girder, its bottom, ribs, fins and other structural units in ship girder on their electroacoustic parameters. The article describes the research on quantitative evaluations of sound field in flat, vertically-aligned antenna array in presence of surface ship girder, modeled with absolutely hard sphere that lies at the border of distribution of media “water – air”. The analytical correlations, being received, are used for numerical evaluation of sound fields in model systems “hydroacoustic station – surface ship”, “hydroacoustic station – free medium” and for comparison of received results between themselves. Bibl. 3, fig. 5.*

**Keywords:** ship girder, hard sphere, antenna array, border of distribution of media “water – air”, polar diagram.

### **References**

1. *Derepa A.V., Leyko O.G., Isayenko O.S. (2013), “To issue about formation of sound field by system “hydroacoustic station – surface ship”. Collection of scientific works. Kyiv, CSRI WME AF of Ukraine Vol. 1(48), pp. 122-129 (Ukr).*
2. *Karnovskiy A.M., Koshukov A.V., Skokin I.S. (1988), “On the acoustic antenna operation in the presence of the media interface”. Antennas and converters collection of scientific works. Vladivostok, FEFU, pp. 25-29 (Rus).*
3. *Karnovskiy A.M. (1976), “The influence of impedance surface on directional properties of acoustic antennas”. Far Eastern acoustic collection of scientific works. Vladivostok, FEFU Vol. 2, pp. 46-50 (Rus).*