

УДК 681.88

© Г. С. Малышкин, Н. Г. Воронина
 АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, Россия
 voroninang@gmail.com

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЗРАЧНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ АНТЕНН

Статья поступила в редакцию 21.07.2015 г., после доработки 23.12.2015 г.

Приводятся способы оптимизации весовых коэффициентов цилиндрических звукопрозрачных многоэлементных антенн с учетом совокупности требований к их характеристикам. Рассматриваются антенны, состоящие только из ненаправленных элементов. Оптимизация производится для весовых коэффициентов дуги антенны, многократное повторение которой в вертикальной плоскости приводит к формированию цилиндрической конструкции. Рассматриваются следующие варианты построения весовых коэффициентов: в соответствии со спадающим от основного лепестка антенны к тыльной области распределением весов; синтезированным компромиссным методом в полосе частот и на тоне; частично оптимизированным методом. Произведен анализ характеристик направленности антенн, полученных в результате различных способов построения весов. В качестве альтернативной конструкции антенн рассмотрен вариант построения «двухслойных» цилиндрических антенн, в которых каждый элементарный приемник состоит из двух ненаправленных элементов, расположенных вдоль радиальной линии цилиндра. Показано, что характеристики направленности таких антенн близки по своим параметрам к параметрам антенн с внутренним экраном. Представлены исследования оценки качества полученного результата при применении каждого типа оптимизации. Предложенный в статье критерий качества учитывает требования к увеличению коэффициента концентрации антенны, уменьшению ширины основного лепестка характеристики направленности, отсутствию сверхнаправленных решений, а также снижению влияния бокового и тыльного поля. Показано, что при проведении оптимизации весовых коэффициентов наиболее предпочтительным оказывается вариант частичной оптимизации, а наиболее эффективным техническим решением по совокупности технических параметров обладает вариант «двухслойных» цилиндрических антенн.

Ключевые слова: гидроакустика, цилиндрическая звукопрозрачная антенная решетка, компромиссная оптимизация по совокупности параметров, двухслойная звукопрозрачная цилиндрическая антенна.

G. S. Malyshkin, N. G. Voronina
 CSRI «Elektropryor», Saint-Petersburg, Russia

ANALYSIS OF CHARACTERISTICS AND OPTIMIZATION OF SOUND TRANSPARENT CYLINDRICAL ANTENNAS

Received 21.07.2015, in final from 23.12.2015.

The paper focuses on optimization of weight coefficients of cylindrical sound transparent multielement antennas with account for their performance requirements. Only the antennas consisting of nondirectional elements are considered. Optimization is performed for the weight coefficients of the antenna arc, which is multiply repeated in vertical plane to make a cylindrical structure. The following methods of weight coefficient determination are covered: decreasing from the antenna beam to the backside; synthesized compromise method the frequency band and certain frequencies; partly optimized method. Directivity patterns of antennas obtained using different optimization methods are analyzed. As an alternative design, two-layer cylindrical antenna is considered, where each elementary receiver consists of two nondirectional elements arranged along the cylinder radial line. Directivity patterns of such antennas are shown to be close to those of antennas with internal shield. Performance of each optimization type is studied. The proposed performance criterion accounts for the required increase of the antenna concentration factor, reduction of beam width, absence of superdirective solutions, and mitigation of effect of lateral and back fields. The paper demonstrates that partial

Ссылка для цитирования: Малышкин Г. С., Воронина Н. Г. Анализ характеристик и оптимизация прозрачных цилиндрических антенн // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2016. Т. 9, № 3. С. 87—97.

For citation: Malyshkin G. S., Voronina N. G. Analysis of characteristics and optimization of sound transparent cylindrical antennas // *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika*. 2016, 9, 3, 87—97.

optimization of weight coefficients is the most preferable optimization method, and two-layer cylindrical antenna design is the most effective technical solution as regards the set of technical parameters.

Key words: hydroacoustics, cylindrical sound transparent antenna array, compromise optimization using a set of parameters, two-layer sound transparent cylindrical antenna.

Цилиндрические многоэлементные антенны получили достаточно широкое распространение в гидроакустике [1, 2], однако их характеристики формируются, как правило, с учетом наличия экрана, который обеспечивает формирование направленности ее элементов. Задачей настоящей статьи является анализ возможности оптимизации работы прозрачных цилиндрических антенн, посредством использования при обработке данных различных способов построения весовых коэффициентов. Целью использования оптимизированных весовых коэффициентов антенны являлось повышение качества приема сигналов за счет улучшения параметров антенны, а именно, за счет снижения влияния бокового поля, увеличения коэффициента концентрации и уменьшения ширины лепестка характеристики направленности.

Расчет характеристик направленности антенны при различных вариантах оптимизации ее весовых коэффициентов.

В работе рассмотрены антенны, элементы которых ненаправлены, т. е. воспринимают акустическое поле, поступающее из различных направлений с одинаковыми весами.

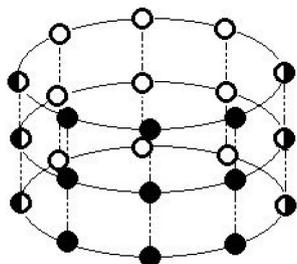


Рис. 1. Цилиндрическая звукопрозрачная антенна.

На первый взгляд достоинства таких конструкций очевидны. Во-первых, антенна обеспечивает круговой обзор. Во-вторых, при формировании характеристики направленности, ориентированной в заданном направлении, имеется возможность использования всех элементов антенны в силу их всенаправленности. Однако очевидны и недостатки такого типа конструкций. Сфазированный прием сигнала происходит в сравнительно узкой области пространства, в окрестности основного лепестка характеристики направленности. В широкой области остального пространства уровень характеристик направленности определяется в результате несфазированного суммирования равновесных сигналов от всех элементов антенны, что приводит к росту бокового и тыльного поля антенны в широкой области пространства.

На рис. 2 представлены характеристики направленности прозрачной цилиндрической антенны. Кривая 1 представляет вариант использования равномерных возбуждений всех элементов антенны, а кривая 2 — возбуждений, спадающих к боковым, относительно направления наблюдения, элементам антенны. Расчеты выполнялись для кольцевой антенны с радиусом $R = 1.25$ м, состоящей из $L = 52$ элементов, равномерно размещенных по окружности. Предполагалось, что фазирование антенны производится в направлении первого элемента $\alpha = 0$ под углом 8° вверх относительно горизонтального направления наблюдения, и антенна состоит из $L_v = 10$ идентичных колец, разнесенных друг от друга в вертикальной плоскости на расстояние $d_v = 0.15$ м. Характеристики направленности рассчитаны на частоте 4.9 кГц в азимутальной плоскости при угле компенсации в вертикальной плоскости 8° .

Фазовый сдвиг кольцевой антенны для q -го элемента описывается соотношением:

$$V_q(\alpha, \Theta) = e^{j\frac{\omega}{c} R \cos(\alpha_q - \alpha) \cos \Theta}, \tag{1}$$

а соответствующий вектор для всех элементов антенны определяется как:

$$\mathbf{V}(\alpha, \Theta) = \begin{pmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_q \\ \vdots \\ v_L \end{pmatrix},$$

где R — радиус кольца; c — скорость распространения звука; ω — угловая частота; α — направление прихода сигнала в азимутальной плоскости; Θ — угол скольжения; $\alpha_q = \frac{2\pi}{L}(q-1)$ — угловая координата q -го датчика, $1 \dots q \dots 52$.

Вся область наблюдения должна перекрываться веером характеристик направленности, одна из которых (в направлении расположения первого элемента) представлена на рис. 2.

Высокий уровень первого (и последующих) боковых лепестков обусловлен тем, что в плоскости, перпендикулярной направлению наблюдения, происходит сгущение плотности элементов к краям апертуры, так что результирующее распределение как бы увеличивается к краям, что приводит как к сужению основного лепестка характеристики направленности, так и к росту бокового поля.

Расчет характеристик направленности при равновесном приеме всех элементов проводился с помощью соотношения

$$R(\alpha, \Theta) = \frac{\mathbf{V}^{*T}(\alpha_0, \Theta_0) \mathbf{V}(\alpha, \Theta)}{L},$$

где $\mathbf{V}^{*T}(\alpha_0, \Theta_0)$ — вектор весовых коэффициентов при ориентации характеристики направленности максимум в направление, заданное углами α_0 и Θ_0 .

При использовании весовых коэффициентов с распределением, сформированным для снижения бокового поля

$$R_p(\alpha, \Theta) = \frac{\mathbf{A}_p^{*T}(\alpha_0, \Theta_0) \mathbf{V}(\alpha_0, \Theta_0)}{L},$$

где элементы весового вектора $\mathbf{A}_p^{*T}(\alpha_0, \Theta_0)$ определяются

$$A_{pq} = \frac{0.25 + 1.75 |\cos \alpha_q|}{2} V_q, \tag{2}$$

при этом коэффициент сверхнаправленности определится

$$K_p = \frac{\sqrt{L \cdot \mathbf{A}_p^{*T}(\alpha_0, \Theta_0) \mathbf{A}_p(\alpha_0, \Theta_0)}}{|\mathbf{A}_p^{*T}(\alpha_0, \Theta_0) \mathbf{V}(\alpha_0, \Theta_0)|}. \tag{3}$$

Коэффициент сверхнаправленности определяет, насколько вектор весовых коэффициентов согласован с вектором принимаемого сигнала.

Анализ кривой 1 свидетельствует о том, что первый боковой лепесток такой антенны составляет величину -8 дБ (40 %), а последующие боковые лепестки постепенно спадают, сохраняя достаточно высокий уровень, в диапазоне $(-12 \text{ — } -18)$ дБ или (25—12.5) %. Отметим, что в тыльной области зоны наблюдения, в диапазоне $(120 \text{ — } 180)^\circ$, заметен рост уровня бокового поля до 25 %.

Введение распределения, снижающего ближнее боковое поле (кривая 2), приводит к снижению уровней первых боковых лепестков характеристики направленности на (3—5) дБ. Однако в области, отстоящей от направления наблюдения более чем на 60° , уровень бокового поля оказывается даже выше уровня бокового поля при равномерных возбуждениях.

Как известно, в целом уровень бокового поля прозрачной антенны оказывается существенно выше аналогичной экранированной антенны. Таким образом, возможность разрешения сигналов при использовании прозрачных антенн ограничена, особенно если интенсивность сигналов существенно различается.

Приведенный пример показывает необходимость поиска путей улучшения характеристик направленности в части снижения уровня бокового и тыльного поля, в том числе за счет введения амплитудно-фазового распределения весовых коэффициентов при суммировании сигналов от элементов антенны. Сложность поставленной задачи обусловлена тем, что требования к увеличению коэффициента концентрации (помехоустойчивости в поле изотропных помех), ширине основного лепестка характеристики направленности, а также снижению бокового и тыльного поля противоречивы, и улучшение одного показателя сопровождается ухудшением других показателей.

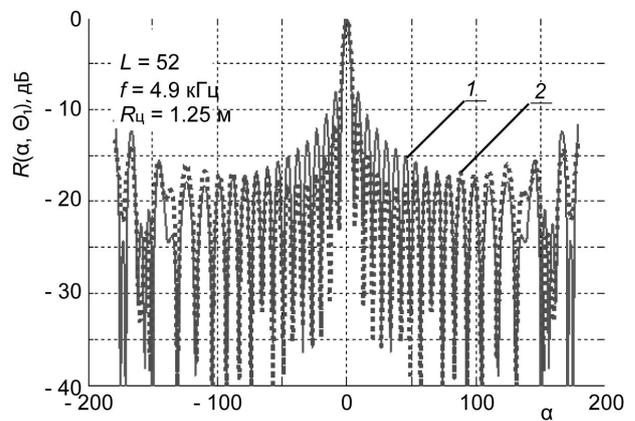


Рис. 2. Характеристика направленности прозрачной цилиндрической антенны. 1 — равномерные весовые коэффициенты; 2 — распределение весовых коэффициентов согласно выражению (2).

В дальнейшем оптимизацию будем проводить, управляя весовыми коэффициентами дуги, а весовые коэффициенты вертикальных групп будем использовать для формирования характеристик направленности антенны в вертикальной плоскости. При выборе метода оптимизации приемного тракта прозрачных цилиндрических антенн наряду с требованием высокой помехоустойчивости и снижением бокового поля необходимо учитывать дополнительные требования:

- необходимость приема в широком частотном диапазоне;
- сохранение оптимизированных характеристик в необходимом секторе обзора в вертикальной плоскости;
- получение устойчивых несверхнаправленных весовых коэффициентов при минимальной чувствительности к технологическим ошибкам при их реализации;
- сужение основного лепестка характеристики направленности (по возможности);
- простота реализации и настройки.

В основе оптимизации весовых коэффициентов используем идею о компромиссном удовлетворении противоречивых требований к антенне [3, 4]

$$\mathbf{A}_K = \mathbf{Q}_K^{-1} \mathbf{A}_P; \quad (4)$$

$$\mathbf{Q}_K = (\mathbf{Q}_\Pi + h\mathbf{Q}_B + h_1\mathbf{Q}_T + m\mathbf{E}) / (1 + h + h_1 + m), \quad (5)$$

где \mathbf{A}_K — вектор-столбец весовых коэффициентов, удовлетворяющих компромиссным требованиям по учету изотропного, бокового и тыльного полей антенны; \mathbf{Q}_K — корреляционная матрица, искусственно сформированная из корреляционной матрицы компонентов помех, которые необходимо ослабить.

В соотношении (5) первый элемент суммы \mathbf{Q}_Π — корреляционная матрица плоско-изотропных помех, действующих равномерно по всем направлениям в азимутальной плоскости; \mathbf{Q}_B — корреляционная матрица помех бокового поля, действующих на антенну из области вне основного лепестка характеристики направленности; h — весовой коэффициент, учитывающий вес этого вида помех; \mathbf{Q}_T — корреляционная матрица помех из области тыльного пространства, где велик уровень тыльного бокового поля; — вес этого вида поля; \mathbf{E} — диагональная матрица размерности L , учитывающая необходимость получения устойчивых несверхнаправленных решений и m — ее вес, который назовем параметром регуляризации оптимизационной задачи.

В результате весовые коэффициенты (4) учитывают необходимость оптимизации кольца в поле плоскоизотропных помех, снижения бокового и тыльного поля антенны, а также меры для уменьшения сверхнаправленности решений. Элементы матрицы \mathbf{Q}_{IP} , \mathbf{Q}_B , \mathbf{Q}_T рассчитывались в результате интегрирования по области формирования соответствующей составляющей компоненты помехи в азимутальной плоскости

$$Q_{q,p} = \frac{1}{\Delta\alpha_\Pi} \int_{\alpha_H}^{\alpha_K} e^{i\frac{\omega}{c}R[(\sin\alpha_q - \sin\alpha_p)\sin\alpha + (\cos\alpha_q - \cos\alpha_p)\cos\alpha] \cos\Theta_1} d\alpha, \quad (6)$$

где q и p — номера элементов цилиндрической антенны; α_H и α_K — начальная и конечная область рассматриваемого варианта поля; $\Delta\alpha_\Pi$ — ширина области пространства для рассматриваемого варианта помехи.

В рассматриваемых вариантах

- для плоскоизотропного поля $\alpha_H = 0$; $\alpha_B = 2\pi$; $\Delta\alpha_\Pi = 2\pi$;
- для бокового поля $\alpha_H = \Delta\alpha_{\text{ЛЕП}}/2$; $\alpha_B = 2\pi - \Delta\alpha_{\text{ЛЕП}}/2$; $\Delta\alpha_\Pi = 2\pi - \Delta\alpha_{\text{ЛЕП}}$; где $\Delta\alpha_{\text{ЛЕП}}$ — раствор основного лепестка характеристики направленности антенны на соответствующей частоте;
- для тыльного поля $\alpha_H = \pi/2$; $\alpha_K = 3\pi/2$; $\Delta\alpha_\Pi = \pi$, т. е. вся тыльная область характеристики направленности.

Все расчеты выполнялись для ориентации характеристики направленности в направлении первого элемента. Для других направлений наблюдения весовые коэффициенты определяются после сдвига на число элементов, соответствующих разнице ориентаций направлений наблюдения. При проведении модельных исследований экспертные весовые коэффициенты отдельных составляющих помех выбирались следующим образом:

- плоскоизотропное поле -1 ;
- боковое поле $h = 2$;
- тыльное поле $h_1 = 2$;

— параметр регуляризации $m = 0.08; 0.16; 0.3$.

В последней строке увеличение параметра регуляризации m от 0.08 до 0.3 приводило к увеличению устойчивости решений и уменьшению значения коэффициента сверхнаправленности (3), что определяло лучшее согласование используемых весовых коэффициентов с сигналом, поступающим из направления максимума характеристики направленности.

На рис. 3, а приведены две кривые: 1 — характеристика направленности для $\Theta = 8^\circ$ при равномерных весовых коэффициентах, сфазированных для приема сигнала из максимума характеристики направленности, и 2 — аналогичная характеристика направленности, весовые коэффициенты которой определены с помощью соотношения (4), для частоты 4.9 кГц, при параметре регуляризации 0.3 (коэффициент сверхнаправленности 1.47). Как видно из рис. 3, а, использование синтезированных весовых коэффициентов привело к существенному снижению тыльного и бокового поля антенны, однако при этом весовые коэффициенты становятся сверхнаправленными и обеспечивают снижение бокового и тыльного поля только в узкой полосе частот. При расстройке частоты более чем на ± 50 Гц выигрыш от оптимизации характеристики направленности практически исчезает.

Использование меньшего уровня параметра регуляризации 0.16 и 0.08 приводит к дополнительному снижению бокового и тыльного поля при еще большем увеличении коэффициента сверхнаправленности и сужении полосы частот используемых весовых коэффициентов.

Узкополосность весовых коэффициентов является крупным недостатком, поскольку при практической реализации такого приемного тракта необходимо общую полосу приема перекрывать набором из многих узкополосных вариантов, каждый из которых обеспечивает оптимизированный прием своей узкой полосы приема. Одновременно, увеличение коэффициента сверхнаправленности используемых весовых коэффициентов означает рост чувствительности формируемой характеристики направленности к случайным ошибкам пропорционально квадрату коэффициента сверхнаправленности.

Для уменьшения узкополосности и величины коэффициентов сверхнаправленности синтезируемых весовых коэффициентов модернизируем соотношение (5), осуществив вычисление корреляционных матриц рассматриваемых вариантов полей на нескольких частотах при последующем использовании взвешенной суммы таких матриц

$$\mathbf{Q}_{\Sigma CP} = (\mathbf{Q}_{вч} + \mathbf{Q}_{сч} + \mathbf{Q}_{нч})/3. \quad (7)$$

Далее вектор весовых коэффициентов вычисляется с помощью усредненной матрицы (7)

$$\mathbf{A}_{CP} = \mathbf{Q}_{\Sigma CP}^{-1} \mathbf{A}_H, \quad (8)$$

где $\mathbf{Q}_{вч}$, $\mathbf{Q}_{сч}$, $\mathbf{Q}_{нч}$ — матрицы, вычисленные согласно соотношению (6) для верхней, средней и нижней частоты расширенного поддиапазона, в пределах которого желательно получить единые весовые коэффициенты;

$$\mathbf{A}_H = \frac{\mathbf{A}_{CP} \sqrt{L}}{\sqrt{\mathbf{A}_{CP}^{*T} \mathbf{A}_{CP}}},$$

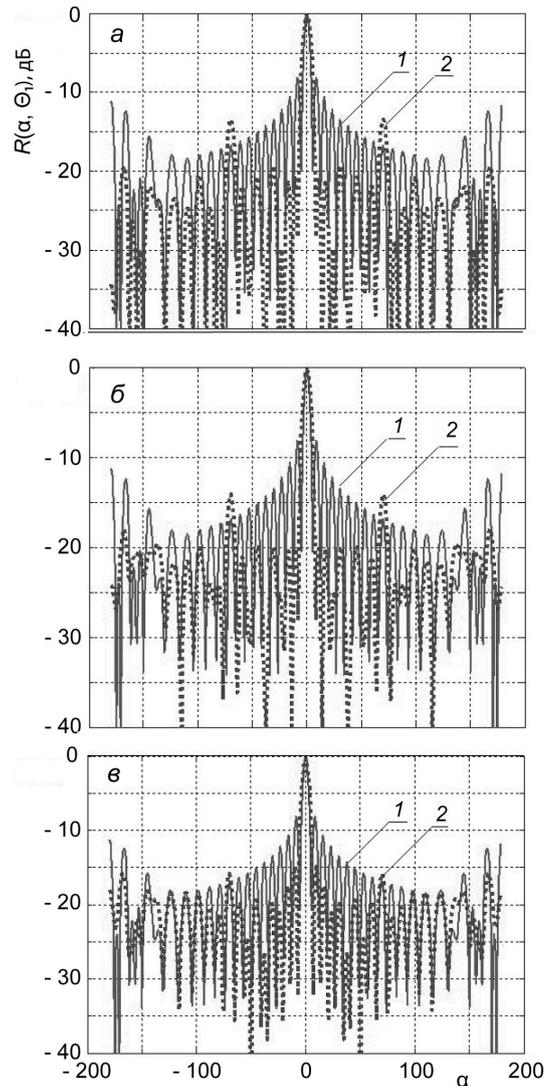


Рис. 3. Характеристика направленности прозрачной цилиндрической антенны. 1 — равномерные весовые коэффициенты; 2 — распределение весовых коэффициентов: согласно выражению (4) — а, (8) — б, (9) — в.

весовые коэффициенты (2), нормированные так, чтобы $\mathbf{A}_H^{*T} \mathbf{A}_H = L$.

Использование усредненной матрицы (7) вместо матрицы (6) позволило несколько расширить диапазон частот, обеспечиваемых одним вариантом весовых коэффициентов, до ~ 100 Гц при меньшем значении коэффициента сверхнаправленности (3), однако и при меньшей эффективности подавления бокового и тыльного полей.

На рис. 3, б представлены характеристики направленности антенны с равномерными весовыми коэффициентами (кривая 1) и с весовыми коэффициентами, синтезированными при использовании в усредненной матрице (7) компонент с различием частот ± 50 Гц относительно средней частоты 4.9 кГц.

Еще большее значение полосы частот позволяет получить вариант частичной оптимизации, когда обращаемая матрица возводится в степень 0.5. Вместо соотношения (8) весовые коэффициенты вычисляются по формуле

$$\mathbf{A}_{\text{СРЧ}} = \mathbf{Q}_{\text{СРЧ}}^{-1} \mathbf{A}_P \quad (9)$$

В соотношении (9) требование по снижению бокового и тыльного полей реализуется в более мягкой форме, что позволяет получить весовые коэффициенты, обеспечивающие полосу частот ± 100 Гц при низком значении коэффициента сверхнаправленности (1.08), однако при более высоком уровне тыльного и бокового поля по сравнению с результатами, приведенными на рис. 3, а и б (рис. 3, в).

Расчет характеристик направленности антенны альтернативной конструкции. Наряду с рассмотренными вариантами однослойных прозрачных цилиндрических антенн, представляет интерес анализ «двухслойных» цилиндрических антенн, в которых каждый элементарный приемник состоит из двух ненаправленных приемных элементов, расположенных вдоль радиальной линии цилиндра на расстоянии, равном четверти длины волны на верхней границе используемого частотного диапазона. В этом случае появляется возможность сформировать из каждой пары приемников приемный элемент с кардиоидной характеристикой направленности, ориентированной максимумом во внешнюю сторону цилиндра. Характеристики такой антенны приближаются по своим параметрам к параметрам антенны с внутренним экраном. Такой вариант антенны, с одной стороны, усложняет ее конструкцию, и усиливает искажения звукового поля за счет увеличения числа конструктивных элементов в области размещения элементов антенны, но с другой стороны позволяет существенно улучшить ее характеристики направленности в области бокового и тыльного полей. Характеристика направленности кардиоидного элемента такой антенны представится в виде.

$$r_{Kq}(\alpha, \Theta) = \left(\frac{1 + \cos(\alpha - \alpha_q) \cos \Theta}{2} \right) V_q \quad (10)$$

Первый множитель соотношения (10) характеризует амплитудную характеристику q -го элемента антенны, а фазовая характеристика этого элемента V_q описывается соотношением (1). Рабочий сектор такой антенны ограничивается величиной $120\text{--}140^\circ$, а весовые коэффициенты при формировании характеристики направленности всего рабочего сектора целесообразно выбрать с весами пропорциональными уровню направленности элемента и фазированию антенны в направлении середины рабочего сектора.

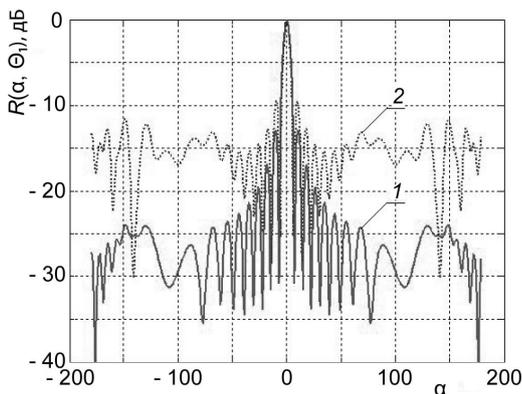


Рис. 4. Характеристика направленности прозрачной антенны с ограниченным рабочим сектором 140° .

1 — с кардиоидной характеристикой направленности элементов; 2 — с использованием ненаправленных элементов.

Нормированная характеристика направленности такой антенны, ориентированной максимумом в направлении α_1, Θ_1 , описывается соотношением

$$R_H(\alpha, \Theta, \alpha_1, \Theta_1) = \frac{|\mathbf{A}^{*T}(\alpha, \Theta) \mathbf{A}(\alpha_1, \Theta_1)|}{|\mathbf{A}^{*T}(\alpha_1, \Theta_1) \mathbf{A}(\alpha_1, \Theta_1)|},$$

где $R_H(\alpha, \Theta, \alpha_1, \Theta_1)$ — нормированная характеристика направленности антенны на частоте 4.9 кГц с максимумом в направлении первого элемента под углом Θ_1 относительно горизонтального

направления; $\mathbf{A}^{*T}(\alpha, \Theta)$ — вектор направления (10) с учетом амплитудных и фазовых характеристик используемого рабочего сектора и $\mathbf{A}(\alpha_1, \Theta_1)$ — весовые коэффициенты, обеспечивающие ориентацию характеристики направленности в направлении, например, первого элемента антенны.

На рис. 4 приведена характеристика направленности антенны с рабочим сектором 140° из кардиоидных элементов (кривая 1), там же приведена характеристика направленности такой же антенны, но при использовании ненаправленных элементов антенны (кривая 2). Анализ рис. 4 показывает, что применение кардиоидных элементов антенны позволяет резко снизить боковые и тыльные поля прозрачной антенны, а использование ограниченного рабочего сектора с ненаправленными элементами приводит к весьма высокому уровню тыльного и бокового полей антенны.

Оценка интегральных эффектов, полученных при применении различных методов оптимизации. С целью оценки интегральных эффектов различных вариантов синтезирования однослойных звукопрозрачных цилиндрических антенн на рис. 5 представлены характеристики направленности, полученные в результате синтеза весовых коэффициентов на каждой из 16 частот в диапазоне от 1.2 до 4.9 кГц.

На каждой частоте производилось вычисление компонентов матриц (5) и (7), вычислялись весовые коэффициенты (4) (для узкополосного варианта синтеза — а) и (8) (для широкополосного варианта синтеза — б), с последующим расчетом суммарных характеристик направленности во всем рассматриваемом диапазоне частот с помощью соотношения

$$R_{\text{РЕЗ}}(\alpha, \Theta) = \sqrt{\frac{1}{16} \sum_{i=1}^{16} R_i^2(\alpha, \Theta)},$$

где $R_i(\alpha, \Theta)$ — характеристика направленности, синтезированная на i -й частоте рассматриваемого диапазона.

На рис. 5, а представлены результаты расчета, когда синтез осуществлялся в полосе частот ± 50 Гц, на рис. 5, б — синтез осуществлялся на тоне, а на рис. 5, в — синтез проводился в полосе ± 50 Гц и с помощью субоптимального соотношения (9). Анализ рис. 5 показывает, что использование синтезированных весовых коэффициентов позволяет снизить уровень бокового поля (по сравнению с кривой 2 на 3—7 дБ при широкополосном синтезе, на 5—12 дБ при узкополосном синтезе и на 2—5 дБ при субоптимальной оптимизации).

Расчет акустических параметров антенн. Для количественной оценки эффективности применения синтезированных и других вариантов распределений весовых коэффициентов определялись коэффициенты помехоустойчивости дуги в полях плоскоизотропных, тыльных и боковых помех, которые рассчитывались с помощью следующих соотношений

$$K_{\Pi_i} = \frac{\mathbf{A}_i^{*T}(\alpha_1, \Theta_1) \mathbf{A}_i(\alpha_1, \Theta_1)}{\mathbf{A}_i^{*T}(\alpha_1, \Theta_1) \mathbf{Q}_{\Pi} \mathbf{A}_i(\alpha_1, \Theta_1)},$$

$$K_{\text{Б}_i} = \frac{\mathbf{A}_i^{*T}(\alpha_1, \Theta_1) \mathbf{A}_i(\alpha_1, \Theta_1)}{\mathbf{A}_i^{*T}(\alpha_1, \Theta_1) \mathbf{Q}_{\text{Б}} \mathbf{A}_i(\alpha_1, \Theta_1)},$$

$$K_{\text{Т}_i} = \frac{\mathbf{A}_i^{*T}(\alpha_1, \Theta_1) \mathbf{A}_i(\alpha_1, \Theta_1)}{\mathbf{A}_i^{*T}(\alpha_1, \Theta_1) \mathbf{Q}_{\text{Т}} \mathbf{A}_i(\alpha_1, \Theta_1)},$$

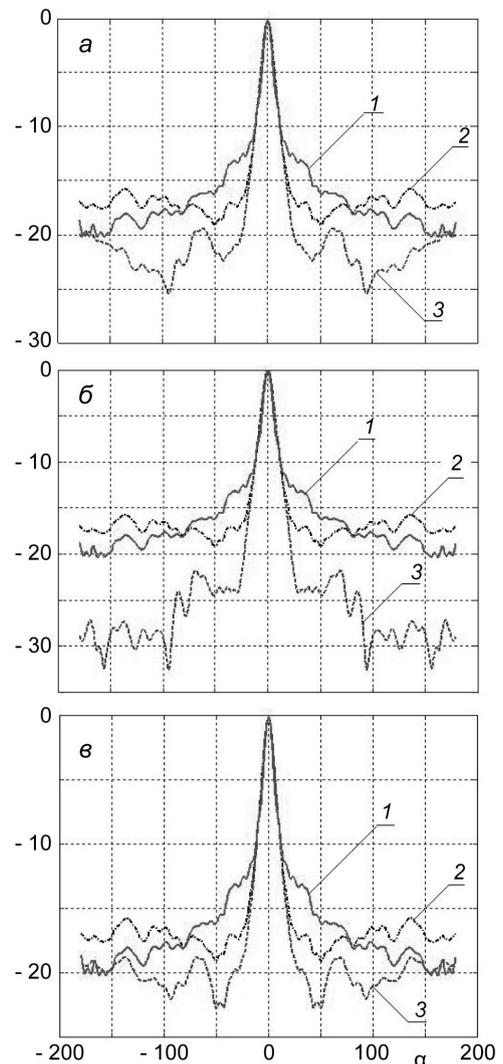


Рис. 5. Интегральные в полосе частот характеристики направленности для $\Theta_1 = 8^\circ$.

1 — с равномерными весовыми коэффициентами; 2 — с весовыми коэффициентами, рассчитанными по формуле (2); 3 — синтезированные характеристики направленности.

а — широкополосный вариант;

б — узкополосный вариант;

в — вариант частичной оптимизации.

где $\mathbf{A}_i(\alpha, \Theta)$ — i -й вариант используемых весовых коэффициентов возбуждений (равномерные, с распределением (2), при узкополосной (4) и широкополосной (8) оптимизации и при направленных элементах (10)); $\mathbf{Q}_П$, $\mathbf{Q}_Б$, $\mathbf{Q}_Т$ — корреляционные матрицы плоскоизотропного, бокового и тыльного полей согласно (6). При этом для случая направленных элементов антенны при вычислении корреляционных матриц в соотношении (6) учитывается направленность элементов.

С учетом синтезированных вариантов распределения весовых коэффициентов дуги и наличия вертикального размера антенны рассчитывался коэффициент концентрации антенны на ряде частот в диапазоне 1.4—4.9 кГц

$$K_K = \frac{4\pi}{\int_{-\pi-\frac{\pi}{2}}^{\pi-\frac{\pi}{2}} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} R^2(\alpha, \Theta) \cos(\Theta) d\Theta d\alpha}, \quad (11)$$

где

$$R(\alpha, \Theta) = \frac{|\mathbf{V}^{*T}(\alpha, \Theta, \omega) \mathbf{A}_H(\alpha_1, \Theta_1, \omega)|}{|\mathbf{V}^{*T}(\alpha_1, \Theta_1, \omega) \mathbf{A}_H(\alpha_1, \Theta_1, \omega)|} \cdot \frac{\sin\left(\pi L_v \frac{d_v}{\lambda} (\sin \Theta - \sin \Theta_1)\right)}{L_v \sin\left(\pi \frac{d_v}{\lambda_i} (\sin \Theta - \sin \Theta_1)\right)}, \quad (12)$$

α_1 и Θ_1 — направления ориентации характеристики направленности в азимутальной и вертикальной плоскостях; d_v и L_v — разнос элементов антенны и число элементов в вертикальной плоскости ($d_v = 0.15$, $L_v = 10$); $\mathbf{A}(\alpha_1, \Theta_1, \omega)$ — весовые коэффициенты при формировании характеристики направленности дуги (равномерные, спадающие к краям апертуры, синтезированные при расчетах).

На рис. 6—9 представлены зависимости частных параметров антенны в зависимости от частоты и варианта использованных весовых коэффициентов. Описание вариантов весовых коэффициентов представлено в таблице.

На рис. 6 приведены зависимости раствора характеристики направленности по уровню 0.7 от варианта использования весовых коэффициентов. Из анализа рисунка видно, что наиболее узкую характеристику и направленности обеспечивает применение равномерных весовых коэффициентов (кривая 1). Далее, несколько большие растворы характеристики направленности обеспечиваются вариантами 2 и 3. Еще большие растворы характеристики направленности возникают для вариантов 4 и 5, в которых синтезируются сниженные боковые и тыльные поля характеристик направленности. И самые большие растворы соответствуют варианту 6. Сужение характеристики направленности улучшает параметры антенны.

На рис. 7, а приведены зависимости помехоустойчивости кольца антенны в плоскоизотропном поле помех в коническом сечении максимума характеристики направленности ($\Theta_1 = 8^\circ$). Вследствие большого уровня тыльных и боковых полей варианты 1 и 2 обладают наихудшей помехоустойчивостью в плоскоизотропном поле, а синтезированные варианты 3—6 обладают большей помехоустойчивостью (на 20—30 %) по сравнению с вариантом 1.

На рис. 7, б, в представлены коэффициенты, характеризующие ослабление бокового и тыльного полей при использовании рассмотренных вариантов весовых коэффициентов антенн. Как видно из приведенных кривых, худшие результаты по подавлению бокового и тыльного поля реализуют варианты 1 и 2 (равномерные и сниженные по краям весовые коэффициенты), некоторое улучшение обеспечивает частичная оптимизация и более высокие результаты обеспечивают варианты кардиоидных характеристик направленности элементов и синтезированные варианты 4 и 5.

На рис. 8 представлены значения коэффициентов концентрации антенны, состоящей из 10 колец, для рассматриваемых вариантов весовых коэффициентов кольца. Расчет коэффициента концентрации проводился с помощью соотношений (11) и (12), при этом используемые весовые коэффициенты совпадали с весовыми коэффициентами, использованными при построении графиков 6—9.

Как видно из рис. 8, наиболее высокие значения коэффициента концентрации достигаются для варианта 6, потери коэффициентов концентрации для вариантов 1 и 2 составляют величины до 1 дБ.

На рис. 9 приведены значения коэффициентов сверхнаправленности при использовании весовых коэффициентов для синтезированных вариантов 3—5. Как видно из рис. 9, выигрыши подавления

Номер кривой на графике	Вариант используемых весовых коэффициентов	Номер формулы для расчета весовых коэффициентов
1	Использование равномерных весовых коэффициентов от всех 52 ненаправленных элементов дуг антенны	(1)
2	Введение в элементы дуг антенны распределений, сформированных для снижения бокового поля	(2)
3	Введение распределений, относящихся к частичной оптимизации весовых коэффициентов в полосе частот	(9)
4	Оптимизация весовых коэффициентов в полосе частот	(8)
5	Оптимизация на тональных частотах	(4)
6	Использование элементов антенны с кардиоидными характеристиками направленности	(10)

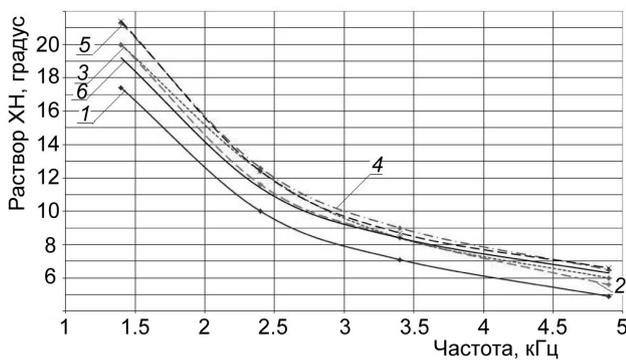


Рис. 6. Частотная зависимость раствора основного лепестка характеристики направленности на уровне 0.7 от максимума. Номера кривых соответствуют вариантам, представленным в таблице.

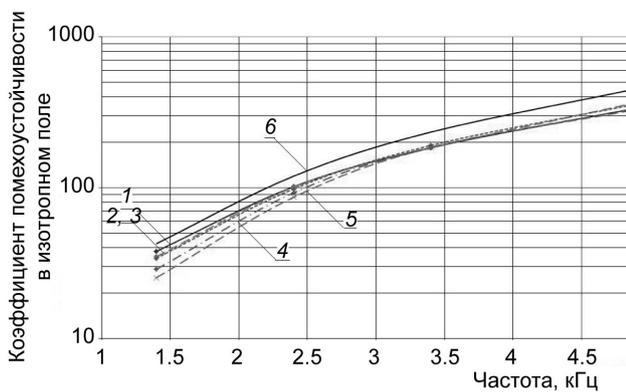


Рис. 8. Зависимость коэффициента концентрации в изотропном поле от частоты. Номера кривых соответствуют вариантам, представленным в таблице.

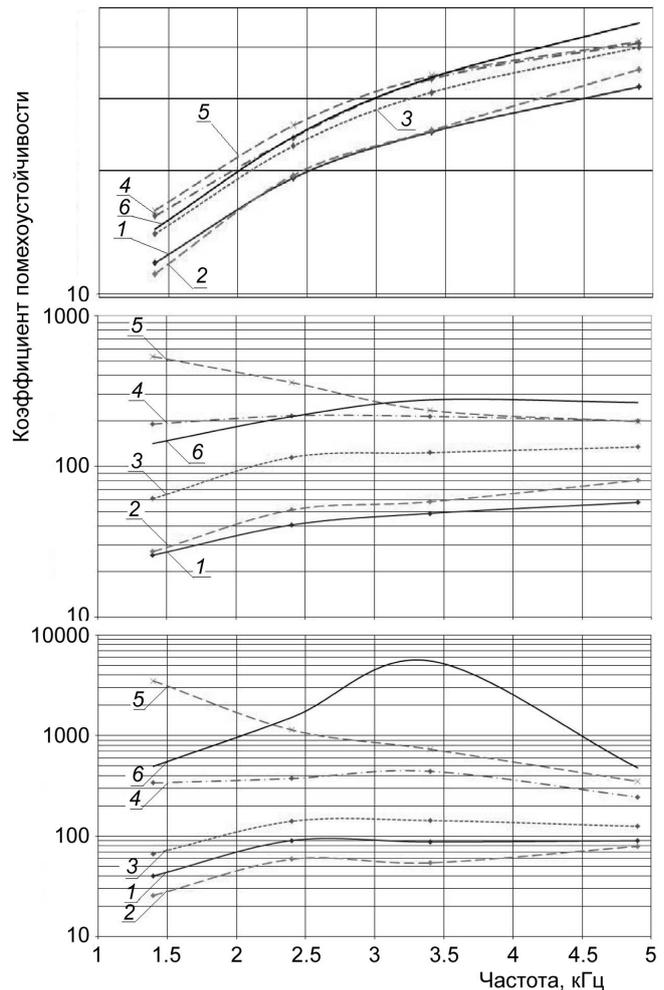


Рис. 7. Зависимость коэффициента помехоустойчивости в плоскостропном (а), боковом (б) и тыльном (в) поле от частоты. Номера кривых соответствуют вариантам, представленным в таблице.

бокового и тыльного полей низкочастотной части частотного диапазона на рис. 9, б, в достигаются за счет использования сверхнаправленных весовых коэффициентов. При частичной оптимизации умеренный коэффициент сверхнаправленности, равный 1.13, оказывается стабильным во всем частотном диапазоне и может оказаться приемлемым для реализации.

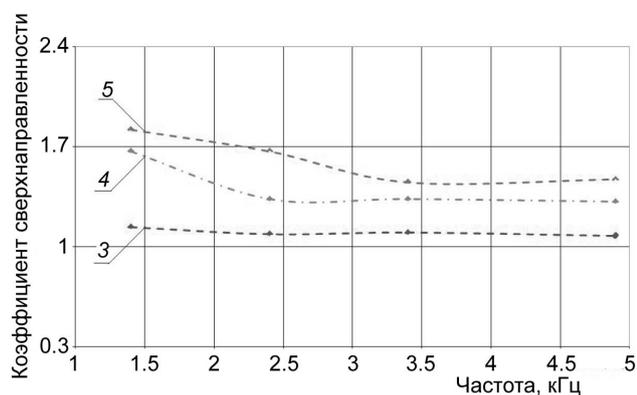


Рис. 9. Зависимость коэффициента сверхнаправленности от частоты. Номера кривых соответствуют вариантам, представленным в таблице.

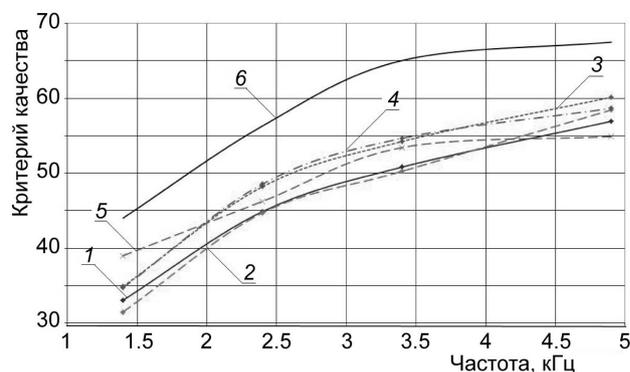


Рис. 10. Зависимость критерия качества от частоты. Номера кривых соответствуют вариантам, представленным в таблице.

Оценка качества проведенной оптимизации антенны. Поскольку в результате анализа получены разнообразные противоречивые данные по отдельным показателям, попробуем сформировать критерий, обобщенно характеризующий качество каждого из рассмотренных вариантов построения звукопрозрачных цилиндрических антенн.

Критерий качества рассчитывался по формуле:

$$KK = 10\lg K_{\text{и}} + 10\lg K_{\text{пи}} + 10\lg K_{\text{б}} - 40\lg K_{\text{сн}} - 10\lg \alpha_{0.7} + 3\lg K_{\text{т}}$$

где $K_{\text{и}}$ — коэффициент помехоустойчивости антенны в изотропном поле; $K_{\text{пи}}$ — коэффициент помехоустойчивости антенны в плоскоизотропном поле; $K_{\text{б}}$ — коэффициент помехоустойчивости дуги в боковом поле; $K_{\text{т}}$ — коэффициент помехоустойчивости дуги в тыльном поле; $K_{\text{сн}}$ — коэффициент сверхнаправленности; $\alpha_{0.7}$ — ширина раствора основного лепестка ХН.

Построение итогового критерия качества основано на следующих соображениях:

- величина коэффициента концентрации прямо определяет основной параметр антенны;
- помехоустойчивость в поле плоскоизотропного, бокового и тыльного полей прямо улучшают характеристику направленности и должны быть взяты со знаком плюс;
- расширение основного лепестка является фактором, ухудшающим итоговую характеристику направленности антенны;
- коэффициент сверхнаправленности должен быть учтен отрицательным, ввиду роста чувствительности к случайным ошибкам, а главное, сверхнаправленные решения сужают рабочую полосу частот каждого вида весовых коэффициентов, что существенно усложняет формирование и настройку антенны в необходимой полосе частот.

Таким образом, итоговый критерий учитывает как выполнение функциональных задач антенны, так и технические аспекты реализации прозрачной цилиндрической антенны.

Величина итогового критерия для всего рабочего частотного диапазона антенны представлена на рис. 10. Как видно из рисунка, варианты равномерных возбуждений и снижения боковых весовых коэффициентов (кривые 1 и 2) наиболее просты при реализации, но обеспечивают сравнительно невысокий уровень решения функциональных задач ввиду высокого уровня бокового и тыльного полей.

Оптимизация весовых коэффициентов (кривые 4 и 5) позволяет несколько снизить уровни бокового и тыльного полей, но этот результат обесценивается усложнением технических решений при реализации весовых коэффициентов — узкополосностью оптимизированных весовых коэффициентов и необходимостью реализации многих вариантов весовых коэффициентов в рабочей полосе частот. Кроме того, использование сверхнаправленных весовых коэффициентов усиливает чувствительность характеристик направленности к технологическим ошибкам при настройке антенны.

Использование синтеза на основе частичной оптимизации (кривая 3) обеспечивает наиболее приемлемые результаты как с точки зрения отсутствия сверхнаправленных решений, так и с точки зрения

упрощения реализации, т. к. такое решение позволяет получить весовые коэффициенты, пригодные для большего диапазона частот.

Наиболее эффективным техническим решением по совокупности технических параметров обладает вариант б, т. к. обеспечивает максимальное значение коэффициента концентрации, сниженный уровень бокового и тыльного поля и отсутствие сверхнаправленных решений.

При проведении оптимизации весовых коэффициентов наиболее предпочтительным оказывается вариант частичной оптимизации з, т. к. он обеспечивает достаточно высокое значение коэффициента концентрации, уровня бокового и тыльного поля, а также возможность обеспечения достаточно широкополосных решений, что позволяет реализовать его с помощью ограниченного варианта весовых коэффициентов при минимальных значениях коэффициентов сверхнаправленности.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 15-08-02907).

Литература

1. *Смарышев М. Д.* Параметры круговой цилиндрической антенны при введении двухпараметрического амплитудного распределения Бикмора-Спилмаера // *Гидроакустика*. 2014. Вып. 19(1). С. 13—20.
2. *Малашенко А. Е., Карачун Л. Э., Перунов В. В., Чудаков А. И.* Исследование пространственно-временных характеристик гидроакустических сигналов и помех с использованием объемных звукопрозрачных антенн // *Подводные исследования и робототехника*. 2013. № 1(15). С. 33—37.
3. *Воронина Н. Г., Малышкин Г. С., Смирнов А. С., Тимофеев В. Н.* К вопросу об оптимизации параметров корабельных бортовых протяженных антенн при неравномерном распределении уровня помехи // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2012. Т. 5, № 3. С. 56—68.
4. *Малышкин Г. С.* Оптимальные и адаптивные методы обработки гидроакустических сигналов. Т. 2. СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», 2011. 375 с.