

УДК 681.883.024

© Г.С.Малышкин, Н.Г.Воронина, А.С.Смирнов, В.Н.Тимофеев, 2012
ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург
vigena@yandex.ru

К ВОПРОСУ ОБ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ КОРАБЕЛЬНЫХ БОРТОВЫХ ПРОТЯЖЕННЫХ АНТЕНН ПРИ НЕРАВНОМЕРНОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ УРОВНЯ ПОМЕХИ

Приводится способ оптимизации весовых коэффициентов бортовой протяженной многоэлементной антенны с учетом совокупности требований к ее характеристикам при неравномерном распределении уровня помех по элементам антенны.

Ключевые слова: гидроакустика, линейная протяженная антенная решетка, бортовая антенна, неравномерные помехи, компромиссная оптимизация по совокупности параметров.

В настоящее время широкое распространение получили гидроакустические станции с бортовыми протяженными антеннами. При создании приемных трактов бортовых протяженных антенн одной из основных особенностей является наличие неравномерных корабельных помех, обусловленных приближением части антенны к энергонесущим механизмам и зоне повышенной турбулентности набегающего потока. В связи с этим тенденция распределения помех вдоль антенны заключается в появлении неравномерной компоненты и увеличении уровня помех по мере удаления антенны от носовой оконечности корабля. Между тем для решения функциональных задач общие требования к антенне предполагают:

- обеспечение помехоустойчивости антенны в полях помех носителя и помех внешнего поля;
- минимизация уровня приемных характеристик направленности (ХН) в области бокового поля вне основного лепестка ХН;
- обеспечение максимальной разрешающей способности, что достигается сужением раствора основного лепестка ХН.

Применительно к антеннам, функционирующим в условиях однородных помех, разработаны методы формирования весовых коэффициентов, обеспечивающих совместное выполнение аналогичных требований [1–3]. Как правило, эти требования обеспечиваются распределениями весовых коэффициентов, спадающими к краям антенны, симметричными относительно ее середины и обеспечивающими контроль уровня бокового поля и раствор основного лепестка ХН.

В условиях неравномерных помех включение в состав приемной антенны участков с повышенным уровнем помех приводит к снижению отношения сигнал/неравномерная помеха на выходе антенны. Отключение этих участков означает сокращение размера антенны, что приводит к расширению основного лепестка ХН и увеличению уровня бокового поля, т.е. ухудшению основных функциональных характеристик антенны.

В связи с этим необходимо найти целесообразные пути использования участков антенны, подверженных повышенному уровню помех. Рассматриваемые требования к антенне носят противоречивый характер, т.е. улучшение одного параметра приводит к ухудшению другого и наоборот. Действительно, требование сужения основного лепестка ХН противоречит требованию снижения бокового поля антенны, а оптимизация антенны в поле нарастающих к ее краю помех приводит к асимметричным распределени-

ям, которые противоречат требованиям как снижения бокового поля антенны, так и обеспечения высокой разрешающей способности.

В дальнейшем предполагается, что при размещении антенны на носителе суммарные амплитудно-фазовые ошибки формирования поля на элементах антенны $\Delta = \sqrt{\Delta a^2 + \Delta \varphi^2}$ имеют величину не более 10 % ($\Delta \leq 0.1$), где Δa – СКО ошибки по амплитуде, а $\Delta \varphi$ – по фазе (в радианах).

Теоретические основы метода. В качестве основы метода компромиссного удовлетворения противоречивых требований воспользуемся методом оптимизации весовых коэффициентов оптимального пространственного фильтра для приемника с многоэлементной антенной, вычисляющего отношение правдоподобия¹

$$\mathbf{A}_{\text{опт } c} = \mathbf{Q}_{\Pi}^{-1} \mathbf{V}_c, \quad (1)$$

где $\mathbf{A}_{\text{опт } c}$ – вектор-столбец размерности $L \times 1$ оптимальных весовых коэффициентов в L элементах антенны; $\mathbf{Q}_{\Pi}^{-1}$ – нормированная обратная корреляционная матрица помех размерности $L \times L$; $\mathbf{V}_c$ – вектор-столбец (размерности $L \times 1$) направления, обеспечивающий ориентацию максимума оптимизируемой ХН в заданное направление наблюдения.

Соотношение (1) предполагает, что в конкретной ситуации воздействует помеха с корреляционной матрицей $\mathbf{Q}_{\Pi}$ и максимум отношения сигнал/помеха достигается с использованием весовых коэффициентов (1).

Воспользуемся соотношением (1) и сформируем корреляционную матрицу помех, которая бы способствовала выполнению совокупности перечисленных требований

$$\mathbf{A}_{\Sigma} = \mathbf{Q}_{\Sigma} \mathbf{V}_c, \quad (2)$$

где $\mathbf{A}_{\Sigma}$ – весовые коэффициенты, обеспечивающие совместное компромиссное удовлетворение перечисленным требованиям; $\mathbf{Q}_{\Sigma}$ – нормированная корреляционная матрица помех, сформированная из суммы частных корреляционных матриц, каждая из которых обеспечивает одно из перечисленных требований:

$$\mathbf{Q}_{\Sigma} = \frac{\mathbf{Q}_H + h_1 \mathbf{Q}_B + h_2 \mathbf{Q}_{\text{из}}}{1 + h_1 + h_2}, \quad (3)$$

где $\mathbf{Q}_H$ – матрица, учитывающая свойства неравномерного поля корабельных помех; $\mathbf{Q}_B$ – нормированная матрица помех, поступающих из области бокового поля вне основного лепестка ХН антенны; $\mathbf{Q}_{\text{из}}$ – нормированная матрица изотропного поля помех дальнего поля (вариант плоско-изотропного поля для антенны с развитым вертикальным размером). Весовые коэффициенты h_1 и h_2 характеризуют относительную значимость рассматриваемых компонентов помех, подбор которых позволяет найти варианты распределений для совместного компромиссного удовлетворения подавления неравномерных корабельных помех, снижения бокового поля и повышения разрешающей способности. Обсудим элементы, входящие в правую часть соотношения (3).

Корреляционная матрица корабельных помех $\mathbf{Q}_H$, нормированная по первому элементу антенны (где уровень неравномерных корабельных помех минимален), характеризуется двумя параметрами, один из которых определяет корреляцию между элементами антенны, а другой – характер нарастания помехи вдоль антенны. Заметим, что характер

¹ Аналогичным соотношением описываются весовые коэффициенты, максимизирующие отношение сигнал/помеха и минимизирующие искажения принимаемого сигнала [3, 4].

корреляционных связей неравномерных помех описывается сложными соотношениями, зависящими от характера возбуждающих колебаний корабельного оборудования, способа его размещения на объекте, вида колебаний, распространяющихся по корпусу корабля и в водной среде.

Адаптивная реализация подавления корабельных помех [5] требует развертывания сложных систем датчиков, фиксирующих возбуждающие колебания, определяющих корреляцию колебаний с помехами, воздействующими на приемные элементы и компенсирующими наведенные помехи с учетом разнообразия источников и режимов их работы. По степени сложности эта система соизмерима с защищаемой системой гидроакустического наблюдения, и вопрос о ее реальной эффективности остается.

Меры по кардинальному снижению уровня возбуждающих вибраций и их передачи к приемным элементам бортовой протяженной антенны сопряжены со значительной затратой сил и средств, требуют резкого улучшения акустических и вибрационных параметров всего корабельного оборудования, поставляемого и эксплуатируемого на корабле, а также разработки и внедрения средств защиты акустических антенн на значительной части площади корабля.

При известном характере роста уровня помехи вдоль бортовой протяженной антенны корреляционные характеристики помех ближнего поля трудно прогнозируемы. Во-первых, эти характеристики нестабильны, поскольку зависят от режима работы корабельного оборудования и режима движения корабля. Во-вторых, интервалы пространственной корреляции неравномерной помехи невелики, поскольку они формируются локальными источниками возбуждения (ребра жесткости, локальные источники вибраций), достаточно быстро затухающими при распространении по корабельным конструкциям. В связи с этим выигрыши от адаптивного регулирования весовых коэффициентов могут оказаться невеликими. Кроме того, так как адаптивное регулирование весовых коэффициентов индивидуально для каждого направления наблюдения, то это потребует дополнительного расхода ограниченного вычислительного ресурса цифровой системы пространственной обработки.

Между тем при приемлемом качестве корабельного оборудования и средств защиты от помех возможна реализация бортовых антенн, где уровень помех вдали от носовой оконечности корабля не носит катастрофического характера (рост по сравнению с минимальным уровнем помех – полпорядка, максимум порядок) и использование таких участков антенны может оказаться целесообразным.

В связи с изложенным представляется целесообразным исследовать возможности оптимизации антенны на основе стационарных весовых коэффициентов, обеспечивающих одновременно:

- приемлемые характеристики помехоустойчивости в поле ближних помех и помех дальнего поля;
- снижение уровня бокового поля;
- высокую разрешающую способность ГАС по направлению.

Эти коэффициенты должны быть (по возможности) универсальными по частотным диапазонам и направлениям наблюдения.

Таким образом, при формировании корреляционной матрицы неравномерных помех следует учесть изменение уровня помехи вдоль антенны, но предположить их некоррелированный характер между элементами антенны.

Это предположение о характере неравномерных помех учитывает главный фактор – рост уровня помехи вдоль антенны и обеспечивает возможность снижения веса элементов с большим уровнем помех, что, в свою очередь, снижает уровень этой компоненты на выходе антенны независимо от деталей корреляционных характеристик помехи. Во-вторых, использование некоррелированной модели помех позволит избежать осцил-

лирующего неустойчивого характера весовых коэффициентов, возникающих (как правило) при учете детальнх корреляционных связей помехи. Более того, наличие некоррелированных составляющих корреляционной матрицы $\mathbf{Q}_\Sigma$ в формуле (2) будет носить характер регуляризации процедуры вычисления весовых коэффициентов.

Применение модели неравномерных помех является важным шагом в формировании устойчивых, стабильных весовых коэффициентов, универсальных для различных направлений наблюдения и используемых частот.

При формировании корреляционной матрицы помех бокового поля воспользуемся моделью линейной антенны (в жестком экране) с размерами бортовой антенны на верхней частоте рассматриваемого диапазона $\frac{d_0}{\lambda} \leq \frac{1}{2}$. В этом случае корреляционная матрица модельного интегрального бокового поля определяется соотношениями (согласно рис.1)

$$\mathbf{Q}_B = \int_{-\Delta\alpha}^{-\frac{\pi}{2}} H(\alpha) e^{jkd_q \sin \alpha} d\alpha + \int_{\frac{\pi}{2}}^{\Delta\alpha} H(\alpha) e^{jkd_q \sin \alpha} d\alpha, \quad (4)$$

где $kd_q = \frac{2\pi}{c} fd_0(q-1)$ – волновое расстояние от 1-го до q -го элемента; d_0 – межэлементное расстояние, м (c – скорость звука; f – частота, на которой производится оптимизация антенны); $2\Delta\alpha$ – полный раcтвор основного лепестка оптимизируемой антенны; $H(\alpha)$ – симметричная весовая функция, определяющая область подавления бокового поля (два варианта бокового поля на рис.1).

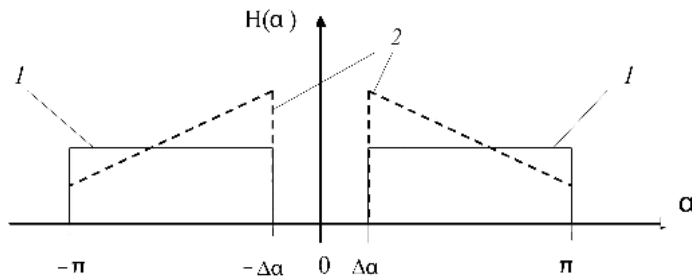


Рис.1. Варианты распределения модельного интегрального бокового поля:

1 – равномерное, 2 – для подавления ближних лепестков.

В результате вычисления интегралов (4) сформируется строка теплицевой корреляционной матрицы (которая нормируется по первому элементу), а квадратная матрица $\mathbf{Q}_B$ сформируется в результате распространения элементов строки $\mathbf{Q}_B$ на все соответствующие диагональные элементы квадратной матрицы.

Изотропное поле помех может быть учтено (для линейной антенны) с помощью корреляционной матрицы вида $\frac{\sin(kd_q)}{kd_q}$, где k – волновое число; d_q – расстояние от первого до q -го элемента.

Применительно к бортовой антенне, развитой в вертикальном направлении (вертикальные элементы объединены в гирлянду), для оптимизации антенны можно использовать модель плоско-изотропного поля, для чего в соотношении (4) следует положить $\Delta\alpha = 0$ и $H(\alpha) = 1$.

Теоретическая оценка помехоустойчивости антенны в поле некоррелированных неравномерных помех. Рассмотрим принципиальный вопрос о том, насколько ухудшается помехоустойчивость антенны с равномерными (или оптимальными) весовыми коэффициентами при появлении роста уровня некоррелированных помех к кормовым элементам антенны.

Используем модель некоррелированных помех, уровень которых растет по экспоненциальному закону

$$S(l) = e^{\Delta(l-1)} \quad (5)$$

так, что уровень помех на первом элементе антенны ($l=1$) равен единице, а на последнем элементе (с номером L) возрастает в B раз:

$$S(L) = e^{\Delta(L-1)} = B$$

и параметр Δ в соотношении (5) определяется соотношением

$$\Delta = \frac{\ln B}{L-1}. \quad (6)$$

В дальнейшем помехоустойчивость антенны с оптимальными и равномерными весовыми коэффициентами в поле неравномерных помех будем сравнивать с помехоустойчивостью антенны при некоррелированной однородной помехе (уровень помехи равен единице на всех элементах), где помехоустойчивость антенны равна числу элементов L .

Составим выражения для помехоустойчивости антенн с равномерными K , оптимальными весовыми коэффициентами G и получим приближенные соотношения для этих параметров:

$$K = \frac{(\mathbf{V}_c^{*T} \mathbf{V}_c)^2}{\mathbf{V}_c^{*T} \mathbf{Q}_\Pi \mathbf{V}_c} = \frac{L^2}{\sum_{l=1}^L q_l} = \frac{L^2}{\sum_{l=1}^L e^{\Delta(l-1)}} = \frac{L^2(1-e^{-\Delta})}{1-e^{-\Delta L}} \approx \frac{L \ln B}{B-1}, \quad (7)$$

$$G = \mathbf{V}_c^{*T} \mathbf{Q}_\Pi^{-1} \mathbf{V}_c = \sum_{l=1}^L \frac{1}{q_l} = \sum_{l=1}^L e^{-\Delta(l-1)} = \frac{1-e^{-\Delta L}}{1-e^{-\Delta}} \approx \frac{(B-1)L}{B \ln B}. \quad (8)$$

В соотношениях (7) и (8) используются свойства геометрической прогрессии модели (5), в соотношении (7) знаменатель прогрессии больше единицы, а в (8) – меньше единицы.

Последние приближенные равенства получены с учетом некоторых упрощений, пренебрегающих краевыми эффектами с несущественной ошибкой при $L > 50$ и $B < 10$. Из соотношений (7) и (8) видно, что в рамках принятой модели коэффициенты K и G определяются числом элементов антенны L и относительным ростом помехи B .

Следует отметить, что относительное уменьшение помехоустойчивости по отношению к варианту однородной помехи равно

$$\frac{K}{L} = \frac{\ln B}{B-1}, \quad (9)$$

$$\frac{G}{L} = \frac{B-1}{B \ln B} \quad (10)$$

и зависит только от параметра B , т.е. относительного увеличения уровня помехи вдоль антенны.

Проведем количественную оценку потерь помехоустойчивости двух вариантов антенн с оптимальными и равномерными весовыми коэффициентами при различных значениях параметра B . Результаты расчетов, выполненные по формулам (9) и (10), обобщены в табл.1 и на рис.2.

Таблица 1

Относительные потери помехоустойчивости (B) для неравномерной помехи (в дБ)

	1.5	2	2,23	3	4	5	7	8	10
$10\lg \frac{1}{B}$	-1.76	-3	-3.48	-4.78	-6	-7	-8.5	-9	-10
$\frac{K}{L}$	0.81	0.693	0.652	0.547	0.462	0.402	0.324	0.257	0.256
$10\lg \frac{K}{L}$	-0.9	-1.6	-1.85	-2.60	-3.35	-3.96	-4.90	-5.27	-5.92
$\frac{G}{L}$	0.822	0.72	0.687	0.606	0.54	0.497	0.44	0.42	0.39
$10\lg \frac{G}{L}$	-0.85	-1.42	-1.62	-2.17	-2.7	-3.03	-3.57	-3.76	-4.1

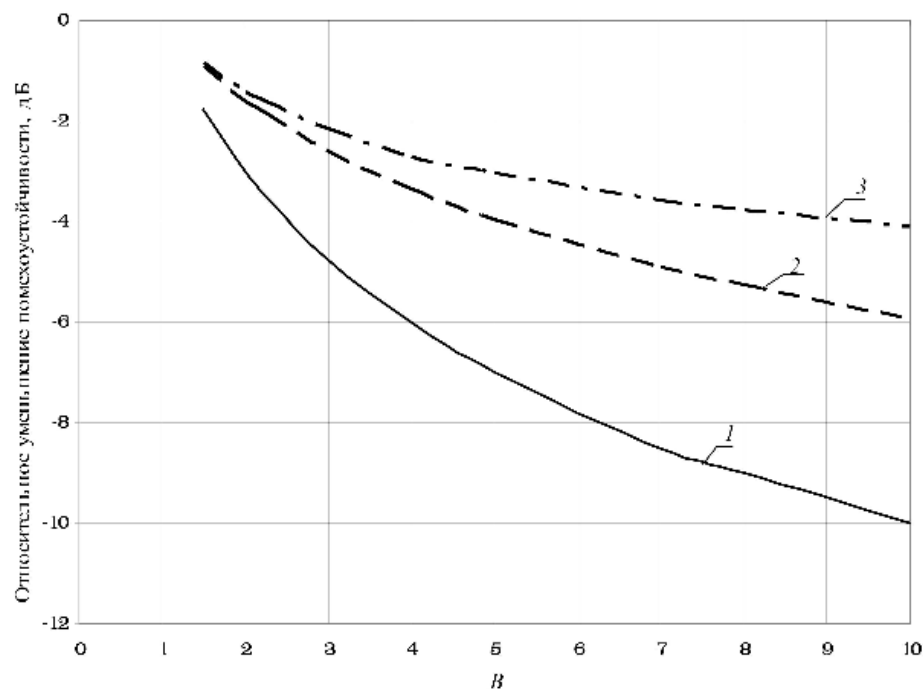


Рис.2. Увеличение уровня помех $10\lg \frac{1}{B}$ (кривая 1) и рост потерь помехоустойчивости антенны с равномерными (кривая 2) и оптимальными весовыми коэффициентами (кривая 3).

Как видно из рис.2 и табл.1, увеличение неравномерной помехи на B дБ приводит к росту уровня помехи на $(0.52-0.6)B$ (дБ) на выходе антенны с равномерными и $(0.48-0.4)B$ (дБ) для антенны с оптимальными весовыми коэффициентами. Следует отметить, что различие между равномерными и оптимальными коэффициентами невелико и составляет ~ 1 дБ при $10\lg B = 7$, ~ 2 при $10\lg B = 10$ дБ.

Основной результат оценок, полученных в табл.1 и на рис.2, заключается в том, что при росте помехи на B дБ на выходе антенны уровень помехи возрастает примерно на $B/2$ дБ даже при использовании оптимальных весовых коэффициентов.

Следовательно, единственно надежным способом снижения помех на выходе антенны является снижение помех на всем ее протяжении либо улучшением условий ее размещения на корабле, либо с помощью компенсации вибрационных составляющих.

Следует отметить, что увеличение размера антенны сопровождается ростом ее помехоустойчивости, несмотря на увеличенный уровень помех. Сравним два варианта ан-

тенны при общей величине Δ – относительном росте помехи при смещении на один элемент в формуле (6). Один вариант – антенна меньшего размера, число элементов $L/2$ и относительный рост помехи $B = \sqrt{5}$ (3.48 дБ), другой вариант – число элементов L и $B = 5$ (7 дБ).

Используем данные табл.1. Тогда параметры $K = L \left(\frac{K}{L} \right)$ и $G = L \left(\frac{G}{L} \right)$ определяются величинами помехоустойчивости антенны с равномерными и оптимальными весовыми коэффициентами:

$$K_{0.5} = \frac{L}{2} \cdot 0.652 = 0.326L \text{ и } K_1 = L \cdot 0.402 = 0.402L,$$

$$G_{0.5} = \frac{L}{2} \cdot 0.687 = 0.343L \text{ и } G_1 = L \cdot 0.497 = 0.497L.$$

При этом в первом случае помехоустойчивость антенны за счет подключения L элементов увеличилась на $10 \lg \frac{0.402L}{0.326L} = 0.91$ дБ, во втором случае $10 \lg \frac{0.497L}{0.343L} = 1.61$ дБ и превышение помехоустойчивости оптимизированной протяженной антенны над неоптимизированной «укороченной» антенной равно $10 \lg \frac{0.497L}{0.326L} = 1.8$ дБ.

Это несколько ниже, чем вариант равномерной помехи, когда увеличение горизонтального размера антенны в 2 раза сопровождается ростом помехоустойчивости антенны тоже в 2 раза (на 3 дБ). Однако необходимо учесть что, кроме того, протяженная антенна может обеспечить улучшение других характеристик антенны: больший коэффициент концентрации в поле изотропных помех, большую разрешающую способность и сниженный уровень бокового поля.

Вернемся к задаче оптимизации антенны с целью компромиссного удовлетворения помехоустойчивости, разрешающей способности и сниженного бокового поля. Для этого приведем конкретный пример расчета антенны в поле неравномерных помех.

Исходные данные и определение весовых коэффициентов. Бортовая антенна содержит $L = 240$ элементов, расположенных на расстоянии $d_0 = 0.5\lambda_B$, где λ_B – длина волны на верхней частоте рабочего диапазона антенны.

Уровень помех ближнего поля представлен на рис.3, из которого видно, что на элементы антенны действует неравномерная помеха, уровень которой нарастает к корме от единицы до B . Диагональные элементы корреляционной матрицы помехи рассчитываются

по формуле $Q_{pq} = \frac{B-1}{L-1}(q-1) + 1$.

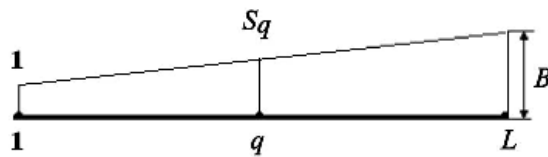


Рис.3. Уровень помех на датчиках решетки.

Весовые коэффициенты рассчитывались по формуле (2) с использованием суммарной корреляционной матрицы помех (3), в которой вес изотропной составляющей $h_2 = 0.5$, а вес интегральных помех из области вне основного лепестка h_1 взят со значениями 0, 5, 10, 20, 100.

Для сравнения различных вариантов весовых коэффициентов рассматривались такие субоптимальные (частично оптимизированные) весовые коэффициенты, где в отличие от оптимальных (2) используются матрица в степени -0.5

$$\mathbf{A}_{\text{сонт}} = \mathbf{Q}_{\Sigma}^{-0.5} \mathbf{V}_c, \quad (11)$$

случай с равномерными коэффициентами (модуль всех весовых коэффициентов равен единице) и вариант использования половины антенны, при котором задействованы только 120 элементов, расположенных в области минимальных уровней неравномерных помех. При расчетах весовых коэффициентов рассматривались два варианта распределения помех бокового поля – равномерное (кривая 1 на рис.1) и неравномерное, задачей которого была попытка снизить боковые лепестки антенны, расположенные вблизи ее основного лепестка (кривая 2 на рис.1).

Распределение весовых коэффициентов оптимизированной антенны в зависимости от номера элемента при различных значениях весового уровня бокового поля $h_1 = 0, 5, 10, 20, 100$ при равномерной по пространству помехе бокового поля представлено на рис.4, а, а при неравномерном распределении бокового поля по пространству – на рис.4, б.

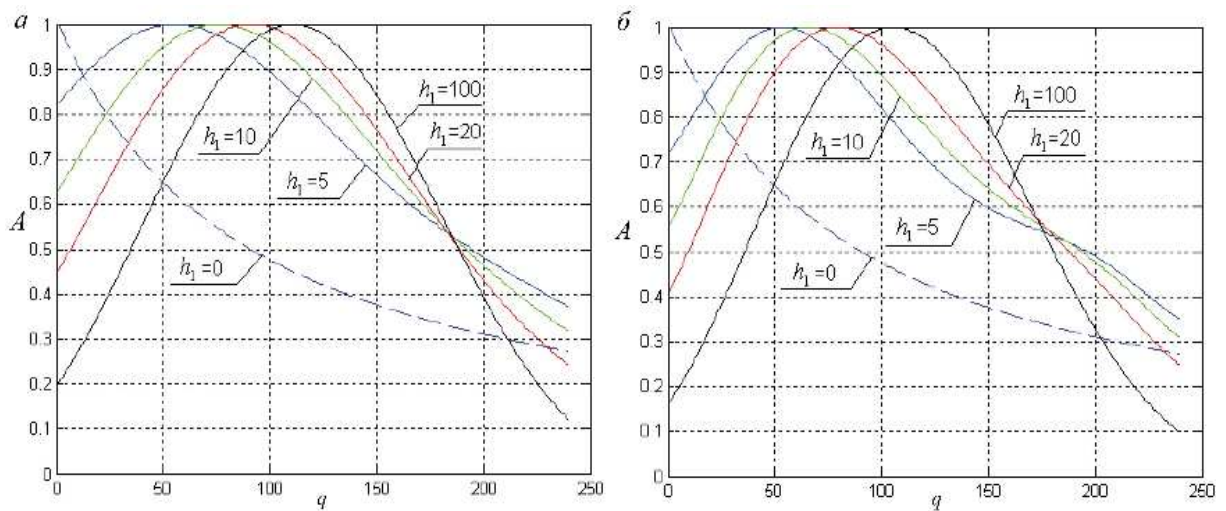


Рис.4. Весовые коэффициенты при разных значениях весового уровня бокового поля h_1 .

а – кривая 1; б – кривая 2 на рис.1.

Как следует из рис.4, при оптимизации без учета бокового поля ($h_1 = 0$) распределение весовых коэффициентов существенно неравномерно, при этом их уровень значительно понижается на участках антенны, подверженных большому уровню неравномерных помех.

По мере роста в составе помехи составляющей бокового поля характер распределений видоизменяется так, чтобы сочетать подавление неравномерной помехи с подавлением бокового поля, которое достигается распределениями, снижающими уровень к краям антенны (по мере роста коэффициента h_1 этот эффект усиливается), а ослабление влияния неравномерных помех достигается снижением весовых коэффициентов в области их наиболее высокого уровня. Следует отметить, что различие весовых коэффициентов для двух вариантов бокового поля невелико и поэтому в дальнейшем будет приведен вариант с равномерным уровнем бокового поля.

Расчет помехоустойчивости антенны. Помехоустойчивость антенны рассчитывалась по формулам

$$K_H = \frac{|\mathbf{A}^{*T} \mathbf{V}|^2}{\mathbf{A}^{*T} \mathbf{Q}_H \mathbf{A}}, \quad K_B = \frac{|\mathbf{A}^{*T} \mathbf{V}|^2}{\mathbf{A}^{*T} \mathbf{Q}_B \mathbf{A}}, \quad K_{из} = \frac{|\mathbf{A}^{*T} \mathbf{V}|^2}{\mathbf{A}^{*T} \mathbf{Q}_{из} \mathbf{A}}, \quad K_{изп} = \frac{|\mathbf{A}^{*T} \mathbf{V}|^2}{\mathbf{A}^{*T} \mathbf{Q}_{изп} \mathbf{A}},$$

где K_H , K_B , $K_{из}$, $K_{изп}$ – коэффициенты, характеризующие помехоустойчивость антенны в неравномерном ближнем поле антенны, в интегральном боковом, изотропном, плоско-изотропном полях соответственно; A – вектор-столбец используемых весовых коэффициентов для различных вариантов коэффициента $h_1 = 0, 5, 10, 20, 100$, а также равномерных весовых коэффициентов, субоптимальных (11) и весовых коэффициентов при использовании половины антенны; Q_H , Q_B , $Q_{из}$, $Q_{изп}$ – варианты нормированных корреляционных матриц неравномерных помех, интегрального бокового поля, изотропного и плоского изотропного полей соответственно.

Для последних вариантов корреляционные матрицы рассчитывались по формуле

$$Q_{изq} = \frac{\sin(kd_q)}{kd_q},$$

где $k = \frac{2\pi}{c}f$ – волновое число при расчетной частоте f и скорости звука в воде c , $d_q = (q-1)d_0$ – расстояние от первого до q -го элемента антенны, d_0 – межэлементное расстояние;

$$Q_{изпq} = J_0(kd_q),$$

где J_0 – функция Бесселя нулевого порядка первого рода.

Таблица 2

Основные параметры рассматриваемых вариантов антенн (в дБ)

	$h_1 = 0$	$h_1 = 5$	$h_1 = 10$	$h_1 = 20$	$h_1 = 100$	Равномерные весовые коэффициенты	Субоптимальное возбуждение	1/2
K_H	19.82	19.54	19.35	19.08	18.46	19.03	19.4	17.85
Π_H	0	-0.27	-0.47	-0.74	-1.32	-0.79	-0.42	-1.97
$K_{и}$	22.4	22.68	22.65	22.54	22.23	23.1	22.88	19.84
$\Pi_{и}$	-0.61	-0.33	-0.36	-0.47	-0.78	0	-0.13	-3.16
$K_{пи}$	24.05	24.33	24.31	24.21	23.89	24.66	24.55	21.56
$\Pi_{пи}$	-0.61	-0.33	-0.35	-0.45	-0.77	0	-0.11	-3.1
K_B	32.6	36.48	38.24	40.34	43.97	35.92	35.86	31.66
Π_B	-3.32	0.56	2.32	4.42	8.05	0	-0.06	-4.26
$\Delta_{0.7}^\circ$	0.52	0.54	0.56	0.6	0.64	0.5	0.5	1
Π_{pc}	-0.34	-0.67	-0.98	-1.58	-2.16	0	0	-6
Σ	-4.88	-1.04	0.86	1.17	3.04	-0.79	-0.67	-18.67

В табл.2 обобщены все исследуемые параметры антенн (помехоустойчивость в поле неравномерных помех ближнего поля, в поле изотропных и плоско-изотропных помех, в поле помех бокового поля в децибелах и раствор основного лепестка ХН на уровне 0.7 в градусах $\Delta_{0.7}$) в зависимости от весового уровня бокового поля h_1 , использованного при расчетах весовых коэффициентов. Там же приведены оценки параметров антенны при равномерных весовых коэффициентах, при субоптимальных возбуждениях, рассчитанных по формуле (11) и при использовании половины элементов антенны, расположенных в области, где уровень помехи минимален.

В нижних строках каждой графы табл.2 приведены величины потерь каждого из рассматриваемых параметров (в дБ) по отношению к значению параметра, обладающего

наиболее высоким значением (либо наиболее стабильным параметром)
 $\Pi = 10 \lg K_i - 10 \lg K_{\max}$.

Максимальное значение помехоустойчивости антенны в поле неравномерных помех $K_H = 19.82$ соответствует оптимизации антенны без учета бокового поля ($h_1 = 0$), а потери помехоустойчивости в этом поле помех изменяются от 0 до -1.32 дБ при использовании всей антенны и -1.97 дБ при использовании половины антенны.

Максимальное значение помехоустойчивости антенны в поле изотропных и плоско-изотропных помех достигается при равномерных коэффициентах возбуждения (потери 0 дБ) и потери для различных вариантов коэффициентов возбуждения составляют от 0.13 до 3.16 дБ.

Потери величины бокового поля оценивались по отношению к антенне с равномерными коэффициентами возбуждения так, что знак потерь изменяется от -4.26 дБ и -3.32 дБ для половины антенны и антенны, оптимизированной без учета подавления бокового поля, до положительных величин, характеризующих ослабление бокового поля по сравнению с антенной, характеризующейся равномерными весовыми коэффициентами.

Потери разрешающей способности i -го варианта коэффициентов учитывались соотношением

$$\Pi_{\text{PCi}} = 20 \lg \frac{\Delta_{0.7i}}{\Delta_{0.7P}},$$

где $\Delta_{0.7i}$ и $\Delta_{0.7P}$ – растворы ХН на уровне 0.7 для i -го варианта антенны и антенны с равномерными коэффициентами возбуждения.

В последней графе приведены значения параметра, равного сумме частных параметров, рассмотренных выше, который можно условно рассматривать как обобщенный параметр, характеризующий каждый из проанализированных вариантов. Вариант $h_1 = 0$ (оптимальный для неравномерных помех) имеет максимальную помехоустойчивость в поле неравномерных помех, проигрывает по 0.61 дБ в полях изотропных и плоско-изотропных помех, имеет большее на 3.32 дБ боковое поле и небольшие потери по разрешающей способности (-0.34 дБ).

Учет подавления бокового поля приводит к увеличению потерь, нарастающих по мере роста коэффициента h_1 , как в поле неравномерных помех, так и в поле изотропных и плоско-изотропных помех, увеличиваются потери разрешающей способности, но происходит снижение бокового поля.

Равномерные весовые коэффициенты имеют наилучшие характеристики по трем параметрам: помехоустойчивость в поле изотропного и плоско-изотропного полей и минимальный раствор ХН на уровне 0.7, но проигрывают по помехоустойчивости в поле неравномерных помех и уровню бокового поля.

Использование половины антенны приводит к значительным проигрышам по всем параметрам и наихудшему обобщенному параметру.

Использование варианта субоптимальных весовых коэффициентов (расчет по формуле (11)) обеспечивает параметры антенн несколько лучшие, чем вариант равномерных весовых коэффициентов.

Наибольший практический интерес представляют варианты, соответствующие $h_1 = 10, 20$ и 100 , которые имеют максимальные обобщенные параметры. Вариант $h_1 = 10$ имеет проигрыш по трем видам помех в среднем -0.39 дБ, по разрешающей способности -0.98 дБ, но выигрыш по величине бокового поля $+2.32$ дБ.

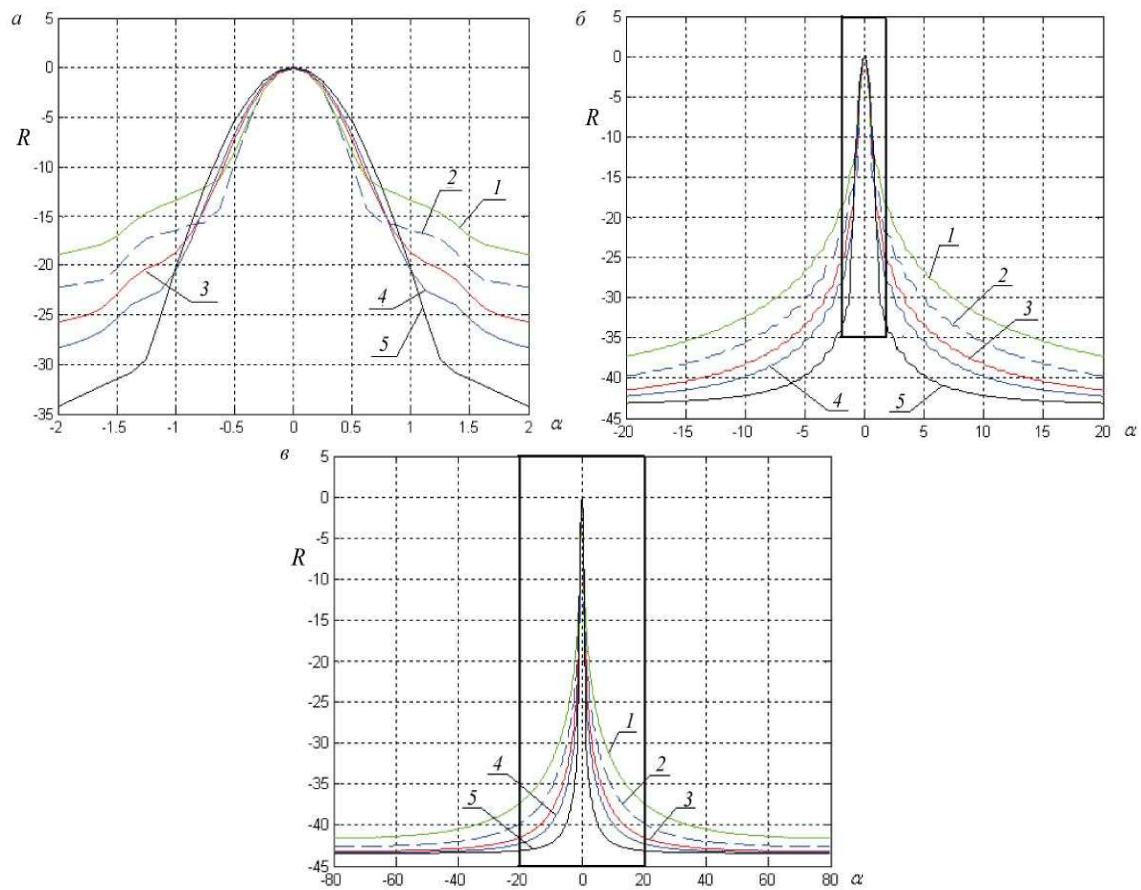


Рис.5. Нормированная ХН антенны (угол компенсации 0°) при равномерных весовых коэффициентах (2) и при $h_1 = 0, 10, 20, 100$ (1, 3, 4, 5 соответственно).

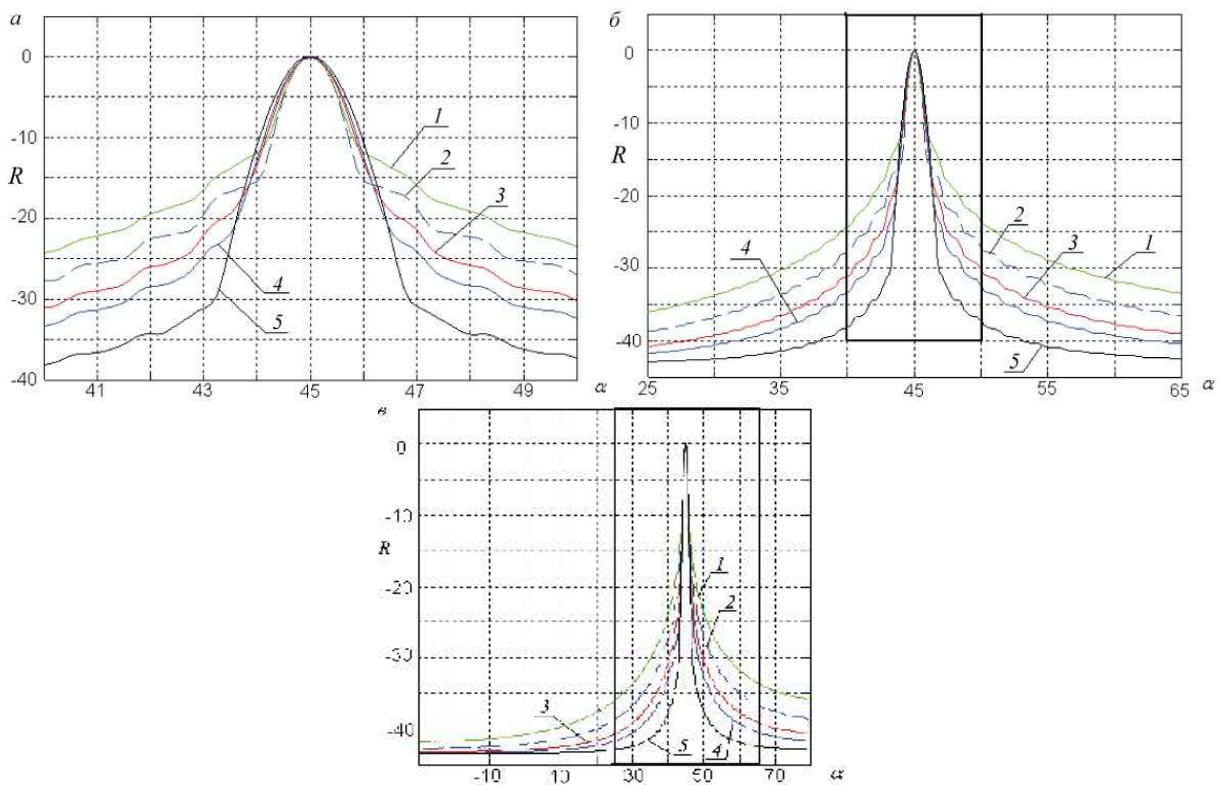


Рис.6. Нормированная ХН антенны (угол компенсации 45°) при равномерных весовых коэффициентах (2) и при $h_1 = 0, 10, 20, 100$ (1, 3, 4, 5 соответственно).

Увеличение весового коэффициента до $h_1 = 20$ приводит к росту потерь в трех видах помех в среднем до -0.56 дБ, потери разрешающей способности на -1.58 дБ, но выигрышу в величине бокового поля на 4.42 дБ. Дальнейшее увеличение параметра h_1 до 100 приводит к росту потерь помехоустойчивости в трех видах помех в среднем до -0.96 дБ, потерь разрешающей способности на -2.16 дБ, но улучшению подавления бокового поля на 8.05 дБ.

На рис.5 и 6 приведены ХН для пяти из рассмотренных вариантов коэффициентов возбуждения элементов антенны в полосе частот, равной одной октаве при углах компенсации 0 и 45° соответственно. Для удобства различные участки ХН (отмеченные рамками) показаны в разных масштабах.

Расчеты ХН для весовых коэффициентов, представленных на рис.4, выполнены с использованием соотношения

$$R_{\Delta f}(\alpha) = 10 \lg \frac{1}{\Delta f} \int_{f_H}^{f_B} \left[R^2(f, \alpha) + \Delta^2 \frac{\sum_{q=1}^L A_q^2}{\left(\sum_{q=1}^L A_q \right)^2} \right] df,$$

где $R(f, \alpha) = \frac{\sum_{q=1}^L A_q e^{j 2 \pi f (q-1) \frac{d_0}{c} (\sin \alpha - \sin \alpha_0)}}{\sum_{q=1}^L A_q}$ – нормированная ХН на частоте f ; d_0 – межэлемент-

ное расстояние антенны; q – текущий номер элемента; L – число элементов; α – направление расчета уровня ХН (отсчитывается от нормали антенны); α_0 – направление максимума ХН; $\Delta f = f_B - f_H$, где f_B – верхняя (при $d_0 = \frac{\lambda_B}{2}$) и $f_H = 0.5 f_B$ – нижняя граница диапазона; A_q – весовой коэффициент q -го элемента антенны (рис.4), а соотношение

$\frac{\sum_{q=1}^L A_q^2}{\left(\sum_{q=1}^L A_q \right)^2}$ определяет чувствительность антенны к случайным ошибкам приемного тракта.

Анализ рис.5 и 6 показывает, что уровень бокового поля имеет наибольшее значение при $h_1 = 0$, несколько меньшее при равномерных весовых коэффициентах, постепенно уменьшается по мере роста весового коэффициента h_1 . Различие уровней бокового поля (вблизи основного лепестка ХН) примерно соответствует различию расчетных уровней бокового поля в таблице.

Необходимо отметить, что раствор ХН на уровне 0.7 не является единственным критерием разрешающей способности антенны при разрешении целей с существенно разной интенсивностью; лучшую разрешающую способность могут обеспечить антенны со сниженным боковым полем, ХН которых представлены кривыми 3, 4 и 5 на рис.5, 6.

Особенность расчетных ХН заключается в том, что при больших отклонениях от направления наблюдения их уровень ограничивается фоном, обусловленным случайными ошибками формирования весовых коэффициентов элементов антенны, принятыми в расчетах $\Delta^2 = 0.01$. При этом любые коэффициенты имеют ограниченные возможности снижения бокового поля до уровня, обусловленного их ошибками реализации.

Следует отметить, что рассматриваемая методика предоставляет широкие возможности для определения весовых коэффициентов и компромиссного удовлетворения противоречивых требований, предъявляемых к антенне в условиях неравномерных помех.

Так, вариант при $h_1 = 0$ соответствует оптимальным весовым коэффициентам, вариант весовых коэффициентов при $h_1 = 10$ позволяет получить помехоустойчивость в поле неравномерных помех примерно на 10 % ниже максимально возможной; при этом помехоустойчивость в изотропном и плоско-изотропном полях оказывается на 8 % ниже потенциально возможной, а боковое поле примерно в 1.7 раз ниже, чем для антенны с равномерными весовыми коэффициентами.

Рост параметра h_1 до 20 приводит к снижению помехоустойчивости в поле неравномерных помех на 16 % относительно максимально возможной, при этом помехоустойчивость в поле изотропных и плоско-изотропных помех ухудшается на 10 %, но боковое поле снижается в 2.76 раз по сравнению с вариантом равномерных весовых коэффициентов. Дальнейшее увеличение требований к снижению бокового поля ($h_1 = 100$) приводит к снижению бокового поля антенны, но ценой ухудшения ее помехоустойчивости в поле неравномерных помех ближнего поля, изотропных и плоско-изотропных помех.

Необходимо отметить, что оптимизированные весовые коэффициенты, приведенные на рис. 4, а и 4, б, сохраняют свои свойства в широком диапазоне частот и углов сканирования, о чем свидетельствуют ХН при компенсации на 45° (рис.6). При этом увеличение раствора ХН и уровня бокового поля обусловлено сокращением проекции размера антенны в направлении наблюдения.

Подводя итоги проведенного анализа вариантов весовых коэффициентов, следует отметить, что при не очень большом росте уровня помех на кормовых элементах антенны (до 7–8 дБ по отношению к элементам с минимальным уровнем помех) использование этих элементов позволит улучшить такие параметры антенн, как сниженный уровень интегрального бокового поля при сохранении разрешающей способности и минимальном ухудшении помехоустойчивости антенны в поле неравномерных помех, изотропном и плоско-изотропном полях.

При уровне помех на кормовых элементах антенны до 3–4 дБ использование рассмотренной методики позволит получить антенны с высокой разрешающей способностью и сниженным уровнем бокового поля при минимальном ухудшении помехоустойчивости в поле корабельных и внешних (изотропных и плоско-изотропных) помех.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 11-08-01097-а).

Литература

1. Шерман Дж. Теория апертурных антенн. Справочник по радиолокации. Т.2. М.: Сов. радио, 1977.
2. Смартышев М.Д. Направленность гидроакустических антенн. Л.: Судостроение, 1973.
3. Edelblute D., Fisk J., Kinnison G. Criteria for optimum-signal-detection. Theory for arrays // JASA. 1967. V.41, N 1. P.189–199.
4. Мальшикин Г.С. Оптимальные и адаптивные методы обработки гидроакустических сигналов. Т.2. СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», 2011. 375 с.
5. Клячкин В.И., Селезнев И.А. Алгоритм подавления вибрационной составляющей поля помех для протяженной бортовой антенны // Науч.-техн. сб. «Гидроакустика». 2000. Вып.2.

Статья поступила в редакцию 06.12.2011 г.

