

УДК 681.883.2.024

К. Е. Аббакумов, И. С. Бобриков, А. В. Вагин  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Исследование приемного тракта гибкой протяженной буксируемой антенны при круговом обзоре

*Рассмотрен вопрос формирования характеристики направленности в тракте приема гибкой протяженной буксируемой антенны при круговом обзоре. Определена интенсивность сигнала с учетом влияния среды на его распространение. Проанализированы основные параметры среды и сигнала, влияющие на интенсивность. Построена характеристика направленности гибкой протяженной буксируемой антенны для различных углов компенсации. Введен учет направленных свойств антенны посредством умножения характеристики направленности на интенсивность сигнала. Произведено энергетическое суммирование по всему частотному диапазону работы антенны. Определены классификационные признаки: акустическая протяженность и асимметрия сигнала, на основе которых будет вынесено решение о том, от какого объекта пришел сигнал: группового или одиночного. Рассчитаны для разных значений углового положения акустическая протяженность и асимметрия сигнала двумя методами: методом площадей и вероятностным методом.*

### Характеристика направленности, модель сигнала, протяженная антенна, круговой обзор, интенсивность сигнала, коэффициент концентрации

Гибкие протяженные буксируемые антенны (ГПБА) применяются для обеспечения поддержания требуемой эффективности гидроакустических комплексов (ГАК) и станций в таких сигнально-помеховых и гидролого-акустических условиях, когда возможности антенн, установленных на корпусе надводного корабля, существенно снижаются.

Основное назначение гидроакустических станций (ГАС) с ГПБА – прием и пеленгование шумовых сигналов низких звуковых частот, в том числе дискретных составляющих в спектре шумоизлучения корабля. К основным структурным элементам системы с ГПБА относятся протяженная буксируемая антенна, устройство хранения, постановки и выборки антенны (УХПВ), устройства обработки принятых сигналов и отображения информации [1].

Помехи работе ГАС с ГПБА могут быть разделены на собственные и внешние. К собственным относятся следующие помехи: гидродинамические, которые возникают из-за пульсаций давления в потоке обтекания; вибрационные – из-за буксировки антенны и воздействия на гидрофоны через механические связи; обусловленные механическими деформациями антенны и т. д.

Внешние помехи формируются с учетом фонового шума моря; корабельной помехи; помехи из-за движения ГПБА в кильватерном следе корабля-буксировщика и др.

Система буксировки антенны включает в себя кабель-буксир и заглубитель. Она должна обеспечить вывод ГПБА на заданную глубину при требуемом удалении от корабля-буксировщика и последующую стабильность пространственного положения антенны во время работы. Возможны две схемы буксировки: с использованием длинного «тяжелого» или короткого «легкого» кабель-буксира, снабженного гидродинамическим заглубителем.

Кабель-буксир выполняет важнейшую функцию – пространственное разнесение ГПБА и корабля-буксировщика как источника интенсивных помех ее работе. Кабель-буксир соединяет ГПБА либо с заглубляющим устройством, либо непосредственно с подводной лодкой (ПЛ) [1].

Использование буксируемых антенн по отношению к антеннам, устанавливаемым на корпусе корабля, дает следующие преимущества:

– обеспечиваются наилучшие условия для обнаружения целей, в том числе находящихся ниже слоя скачка скорости звука;

– уменьшается уровень помех от собственно корабля-носителя; минимизируется дестабилизирующее влияние качки корабля;

– возможность заглубления антенны на ось подводного звукового канала (ПЗК), что резко увеличивает дальность действия ГАК.

Несмотря на приведенные преимущества использования буксируемых антенн при их эксплуатации необходимо учитывать погодные условия, так как штормовое состояние моря может просто наложить запрет на использование ГПБА. Также имеется сложность в управлении положением буксируемой антенны, связанная с необходимостью учета его вертикальных перемещений в толще воды, особенно при изменении курса или скорости корабля-носителя.

К основным требованиям, которым должна удовлетворять ГПБА, относятся [1]:

– формирование в рабочем диапазоне частот требуемой характеристики направленности (ХН), обеспечивающей необходимую разрешающую способность ГАС по пространству;

– минимальные искажения при передаче сигналов от гидрофонов к бортовой аппаратуре;

– плавучесть, близкая к нейтральной;

– ремонтпригодность.

Целью статьи является изучение параметров сигнала, принимаемого на гибкую протяженную буксируемую антенну. К таким параметрам относятся акустическая протяженность и асимметрия сигнала, рассчитанная двумя методами. С помощью определения пороговых уровней данных величин выносится решение о приеме сигнала от группового или одиночного объекта.

Актуальность данной темы обусловлена тем фактом, что использование гибкой протяженной буксируемой антенны для пеленгования целей обеспечивает оптимальные условия для их обнаружения, в том числе для целей, находящихся ниже слоя скачка скорости звука. Тем самым возникает необходимость рассмотрения наиболее применимых классификационных признаков, используемых при работе ГПБА. Также важным фактором, который влияет на все большее использование ГПБА – это существенное уменьшение влияния собственных помех корабля-носителя и минимизация дестабилизирующего влияния качки корабля.

Рассмотрим приемный тракт гибкой протяженной буксируемой антенны. Пусть на антенну ГПБА поступает сигнал от объекта. Расчет сигнала, пришедшего на ГПБА от предполагаемой це-

ли, выполняется начиная с вычисления интенсивности сигнала относительно среды, в которой происходит распространение. Интенсивность в точке расположения цели на расстоянии  $r$  от источника (без учета отражений от дна и поверхности моря) определяется по формуле [2]:

$$I_{i,j} = \frac{P_0 \sqrt{\Delta f}}{f_i^{\alpha_f} D_i} \left( \frac{v}{v_0} \right)^{\alpha_v} \sqrt{A_j} 10^{-0.05 D_j \beta_i}, \quad (1)$$

где  $i$  – номер отсчета по частоте;  $j$  – номер объекта;  $P_0$  – приведенный уровень шумности;  $\Delta f$  – излучаемая полоса частот;  $f_i$  – частотные отсчеты;  $\alpha_f$  – частотный спектр;  $D_i$  – расстояние до объекта;  $v, v_0$  – скорости буксировки и приведения;  $\alpha_v$  – показатель степени приведения;  $A_j$  – фактор аномалии для  $j$ -го луча, приходящего в точку наблюдения;  $\beta_i$  – коэффициент затухания среды.

Исходя из предположения, что на антенну может приходиться не один сигнал, а несколько, в формуле (1) вводится дополнительный индекс  $j$  – номер объекта, находящегося на дистанции  $D_j$ .

Коэффициент затухания морской среды  $\beta_i$ , отражающий потерю акустической энергии, вычисляется по следующей формуле [2]:

$$\beta_i = \frac{a + b f_i^c}{1000},$$

где  $a, b, c$  – коэффициенты, отражающие специфику (например, структуру мелкого моря) той или иной области морской акватории, в которой происходит поиск объекта.

В представленной математической модели коэффициент затухания среды  $\beta_i$  частотно зависим и показывает закон изменения звукового поля с расстоянием.

Под фактором аномалии  $A_j$  понимается отношение интенсивности акустического поля рефракгирующей среды в точке, удаленной на расстояние  $r$  от источника, к интенсивности звука в однородной безграничной среде на том же расстоянии  $r$  от источника [3].

Следует отметить, что ГПБА работает в диапазоне низких частот. Выбор низкочастотного диапазона обусловлен отсутствием добавочных максимумов у характеристики направленности, затрудняющих принятие решения о направлении прихода полезного сигнала от цели и повышающих вероятность ложной тревоги, а также требованием максимизации дальности действия.

Дискретные отсчеты частоты можно представить в виде следующего выражения:

$$f_i = f_0 + i\Delta f,$$

где  $f_0$  – текущая частота из диапазона;  $\Delta f$  – шаг по частоте.

После прихода сигнала на гибкую протяженную буксируемую антенну необходимо учесть направленные свойства антенны в виде ее характеристики направленности как отношение звукового давления, создаваемого антенной в дальнем поле излучателя в произвольном направлении, к давлению, создаваемому антенной в фиксированном направлении на одинаковом расстоянии от антенны.

Характеристика направленности ГПБА соответствует характеристике направленности линейной дискретной эквидистантной антенне с заданным распределением углов компенсации  $\theta_k$ . Положение пространственных каналов определим как положение оси главного максимума ХН на определенных углах компенсации  $\theta_k(n)$ .

Соответствующие углы компенсации определяются по следующей формуле:

$$\theta_k(n) = \frac{180}{\pi} \arcsin \left\{ \frac{[n - (N + 1)/2]}{[(N - 1)/2]} \right\},$$

где номер пространственного канала  $n = 1, \dots, N$ ,  $N = 81$  – количество пространственных каналов.

Заданием угла компенсации формируется направление главного максимума характеристики направленности на этот угол и происходит скани-

рование требуемой области пространства в определенном угловом диапазоне без физического поворота самой антенны. При сканировании области пространства формируется веер характеристик направленности для различных направлений [4].

Характеристика направленности эквидистантной линейной решетки вычисляется по следующей формуле [4]:

$$R(\theta, \theta_k) = \frac{\sin[nZ(\theta, \theta_k)]}{n \sin[Z(\theta, \theta_k)]}, \quad (2)$$

где  $Z(\theta, \theta_k) = \frac{\pi d}{\lambda_i} [\sin(\theta) - \sin(\theta_k)]$ ;  $d$  – расстояние между преобразователями антенны;  $\lambda_i$  – длина излучаемой волны на  $i$ -м частотном диапазоне.

Построим характеристики направленности по формуле (2) для углов компенсации  $\theta_k$  (рис. 1).

Направленные свойства антенны учтены за счет умножения характеристики направленности для каждого угла компенсации  $\theta_k$  на интенсивность сигнала, пришедшего от объекта, рассчитанную относительно влияния среды [5]:

$$S(\theta_k) = I_{i,j} R(\alpha, \theta, \theta_k),$$

где  $\alpha$  – заданный пеленг на объект.

Учитывая отсутствие информации о параметрах принимаемого сигнала, необходимо произвести суммирование по всему частотному диапазону приема антенны для охвата всех составляю-

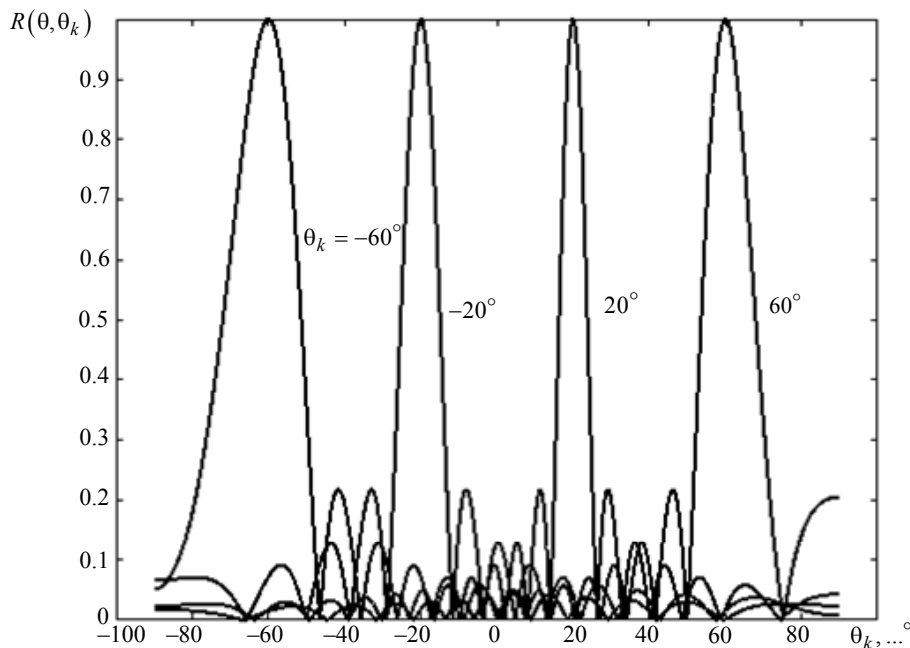


Рис. 1

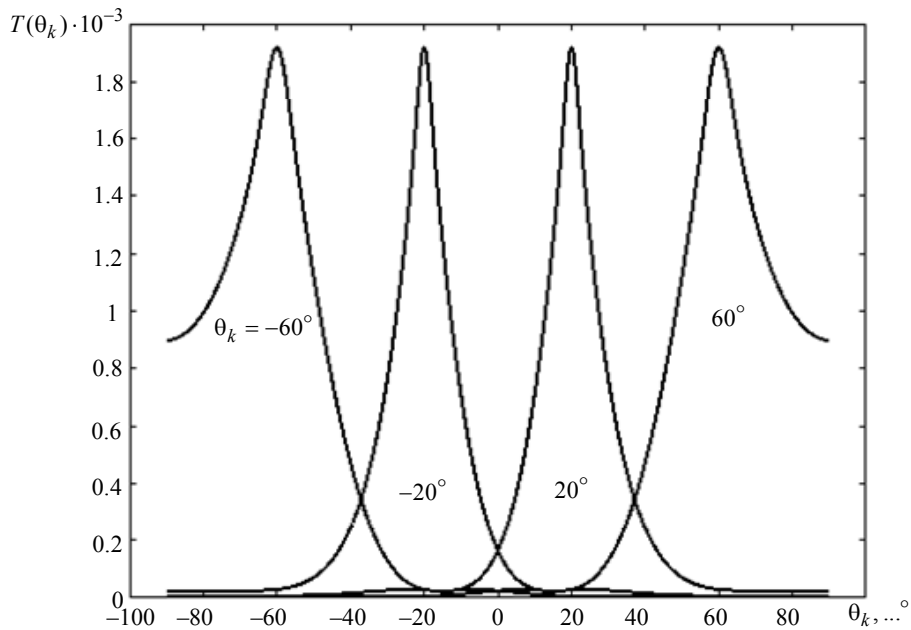


Рис. 2

щих излучения волны от цели. Исходя из этого получим сигнал в рассматриваемом частотном диапазоне:

$$T(\theta_k) = \sum_{i=f_H}^{f_B} I_{i,j}^2 R^2(\alpha_j, \theta_k), \quad (3)$$

где  $f_H, f_B$  – нижняя и верхняя границы рассматриваемого частотного диапазона.

После суммирования по формуле (3) характеристика направленности будет иметь вид, как на рис. 2.

Как видно из рисунка, ширина характеристики направленности увеличилась и отсутствуют дополнительные максимумы, что положительно сказывается на точности пеленгования целей.

В условиях помехо-сигнальной обстановки на антенну ГПБА приходит не только полезный сигнал, но и помехи, которые обусловлены шумами различных источников надводного и подводного мира: надводные корабли, подводные лодки, шумы биологических животных, гражданские суда. Наибольший вклад в естественные шумы вносят активные средства обнаружения: гидролокаторы, эхолоты и т. д. Таким образом, представляется необходимым оценить влияние помехи на характеристику направленности в условиях реальной обстановки.

Вид сигнала  $A(\theta)$ , который поступает на антенну ГПБА от объекта, имеет вид, представленный на рис. 3, а сигнал с учетом влияния на него помехи  $A_{ш}(\theta)$  – на рис. 4.

Расчет принимаемой помехи и ее влияния на уровень и качество принимаемого сигнала можно

осуществить исходя из принимаемого уровня дисперсии полезного сигнала равного 10 %.

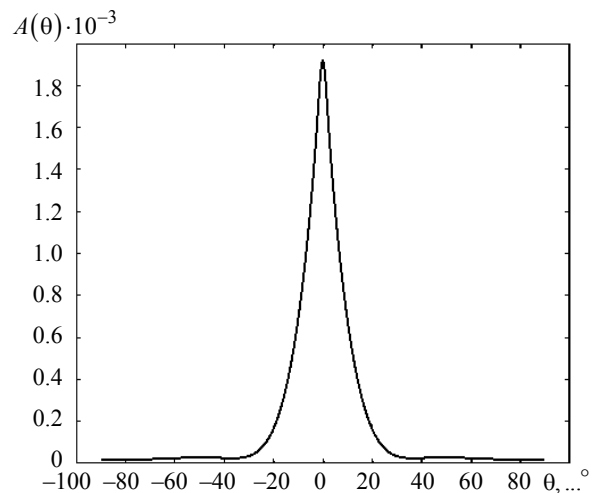


Рис. 3

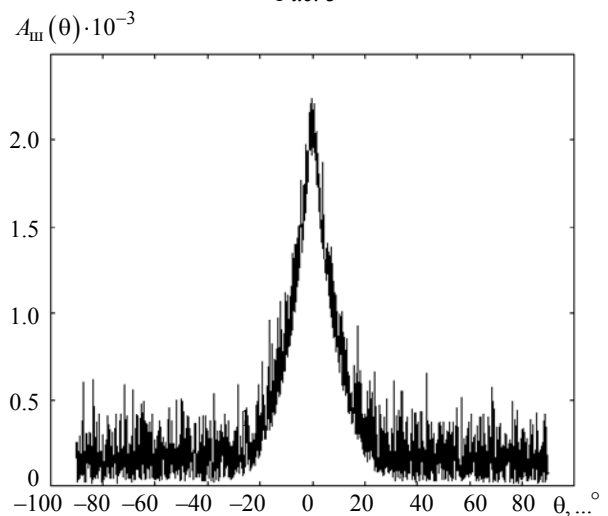


Рис. 4

Также уровень принимаемой на ГПБА помехи можно оценить в частотном диапазоне с помощью следующей формулы:

$$W(\theta_k) = \sum_{i=f_n}^{f_B} \frac{P^2}{K(\theta_k, \lambda_i) f_i^2},$$

где  $P$  – давление сигнала в точке излучения;  $K(\theta_k, \lambda_i)$  – коэффициент осевой концентрации.

Коэффициент осевой концентрации будем искать в виде [6]

$$K(\theta_k, \lambda_i) = \frac{\left| \sum_{q=1}^n A_q \right|^2}{\sum_{q=1}^n \sum_{a=1}^n \left\{ A_q A_a \cos \left[ k_i d (q-a) \sin(\theta_k) \right] \right\} \frac{\sin \left[ k_i d (q-a) \right]}{k_i d (q-a)}}, \quad (4)$$

где  $A_q$  – амплитудное частотно-зависимое распределение антенны ГПБА (в рассматриваемой задаче равно 1);  $q, a$  – индексы суммирования;  $k_i$  – волновое число;  $d$  – шаг антенной решетки.

В табл. 1 приведены расчетные значения коэффициента концентрации по формуле (4) при значении  $n = 81$ .

Таблица 1

Номер пространственного канала	Угол компенсации, ...°	Коэффициент концентрации
1	-90	96
2	-86.43	81
3	-82.257	62
4...78	-77.161...77.161	48
79	82.257	62
80	86.43	81
81	90	96

Имея значения коэффициента концентрации на определенных углах компенсации с учетом соответствующего номера пространственного канала можно определить уровень шумовой помехи для каждого канала.

Классификация обнаруженных объектов может идти по многим характеристикам самой цели: по скорости хода, по шумности объекта, по дискретной составляющей спектра пришедшего сигнала. В данной статье основным признаком, по которому реализуется алгоритм классификации, служит вынесение решения о том, от какого количества объектов пришел сигнал: от одиночного объекта либо от группы объектов. В таком случае классификации основной признак – это уровень сигнала в частотном диапазоне. В большинстве случаев имеется некоторая ограниченность в ма-

невировании обнаруживаемого объекта и возникают ситуации, когда скорости и курсы движения объектов таковы, что их невозможно классифицировать по изменению пеленга. Может возникнуть случай, когда направление движения объекта, который находится на расстоянии  $z$  от корабля-носителя, совпадает с его курсовым углом, а близкорасположенный источник движется в направлении, совпадающем с курсом корабля-носителя. В таком случае классификация обнаруженного объекта будет невозможна.

Для нахождения акустической протяженности сигнала по уровню 0.707 (-3 дБ) относительно максимального значения сигнала и по отношению сигнал/помеха реализуется алгоритм расчета, с помощью которого выполняется сравнение каждого значения массива, состоящего из значений принятого сигнала с некоторым заданным порогом – либо уровнем сигнала, равным 0.707 от максимального значения, либо отношением сигнал/помеха [7].

Отношение сигнал/помеха для сравнения со значением сигнала вычисляется по следующей формуле:

$$\text{ОСП} = 20 \log \left( \frac{A}{A_N} \right),$$

где  $A$  – уровень полезного сигнала;  $A_N$  – уровень шумовой помехи.

Для реализации алгоритма необходимо создать массив, в который в реальном времени в режиме шумопеленгования записывается значение «1» в случае превышения значением сигнала уровня отношения сигнал/помеха или уровня 3 дБ, либо «0», если значение сигнала меньше рассматриваемого уровня. Таким образом, в процессе работы формируется массив значений, в котором находятся начальное и конечное превышения (изменения значения массива с «0» на «1» и с «1» на «0») заданного уровня отношения сигнал/помеха, т. е. фактически акустическая протяженность будет находиться как разность углов, на которых произошли изменения значения в массиве.

Введем еще один классификационный признак – асимметрию сигнала, по которой также можно определить, от какой цели пришел сигнал – одиночной или групповой. Асимметрия – это центральный момент третьего порядка при оценке и математически может быть определена следующим образом [8]:

$$\eta = \frac{\mu_3}{\sigma_x^3},$$

где  $\eta$  – коэффициент асимметрии;  $\mu_3$  – центральный момент третьего порядка;  $\sigma_x^3$  – среднеквадратическое отклонение.

Оценку асимметрии сигнала можно провести двумя методами – методом площадей и вероятностным методом.

При оценке асимметрии сигнала методом площадей необходимо найти угловую координату, на которой принятый сигнал имеет максимальное значение. Затем по уровню 0.707 от максимального значения сигнала находят две угловые координаты. Под полученной областью на графической зависимости вычисляются площади сигнала слева и справа относительно максимума сигнала. Исходя из того что сигнал моделируется по дискретным отсчетам углов пеленга, то для нахождения площади под сигналом на графике необходимо определить интегральную сумму на заданном промежутке от первого углового отсчета до положения максимума для «левой части» сигнала и от положения максимума до последнего углового отсчета для «правой части» сигнала. Полученная интегральная сумма будет определять площади двух половин сигнала.

Формула для расчета «левой части» сигнала вычисляется по следующей формуле:

$$S_1 = \sum_{i=\theta_1}^{\theta_m} A_i \Delta\theta_k,$$

где  $\theta_1$  – первый отсчет акустической протяженности сигнала;  $\theta_m$  – угол, при котором наблюдается максимум сигнала;  $A_i$  – значения уровней сигнала при каждом значении угла;  $\Delta\theta_k$  – разность между  $(i + 1)$ -м и  $i$ -м угловыми отсчетами.

Формула для расчета «правой части» сигнала вычисляется по следующей формуле:

$$S_2 = \sum_{i=\theta_1}^{\theta_{m2}} A_i \Delta\theta_k,$$

где  $\theta_{m2}$  – конечный отсчет акустической протяженности сигнала.

Вычисляя отношение  $S_1/S_2$ , можно определить степень симметрии сигнала. Если отношение  $S_1/S_2 = 1$ , то можно говорить о симметричности сигнала, в противоположном случае сигнал имеет некоторую асимметрию.

При использовании вероятностного метода, основанного на аппарате математической статистики, ставится задача определения асимметрии зависимости уровня сигнала, измеренного на разных пеленгах тракта кругового обзора. Для определения асимметрии этим методом вводится в рассмотрение уровень сигнала  $A_i$  как плотность распределения случайной величины – пеленга объекта. Для наглядности представления результатов вводится нормировка, чтобы сумма всех отсчетов, аналогично плотности распределения, была равна 1.

Тогда коэффициент асимметрии уровней сигнала рассчитывается по следующей формуле [9]:

$$\eta = \frac{\sum_{i=0}^N \frac{P_i}{y} (x_i - x_{cp})^3}{\left[ \sqrt{\sum_{i=0}^N \frac{P_i}{y} (x_i - x_{cp})^2} \right]^3},$$

где  $P_i$  – значения уровней сигнала;  $y$  – сумма всех отсчетов сигнала по значениям пеленга;  $x_i$  – уровень сигнала;  $x_{cp}$  – математическое ожидание уровней сигнала.

Если  $\eta = 0$ , то значения уровней сигнала на различных пеленгах симметричны, а в противоположном случае – нет.

Теперь, когда имеются все необходимые данные для реализации алгоритма, рассмотрим различные варианты приема сигнала антенной ГПБА в зависимости от его частоты, расстояния до объекта, его шумности и расположения цели относительно азимута.

Для начала необходимо провести анализ зависимости акустической протяженности и асимметрии сигнала, вычисленной по двум представленным методам, со следующими исходными данными: расстояние до объекта – 3000 м, приведенная шумность –  $1 \text{ Па}/\sqrt{\text{Гц}}$ , номер отсчета по частоте – 100, угловое положение относительно траверза –  $0^\circ$ .

Тогда, выполняя построение характеристики направленности  $R(\theta)$  для угла приема ГПБА, равного  $0^\circ$ , можно получить необходимые характеристики. Характеристика направленности для данного случая представлена на рис. 5.

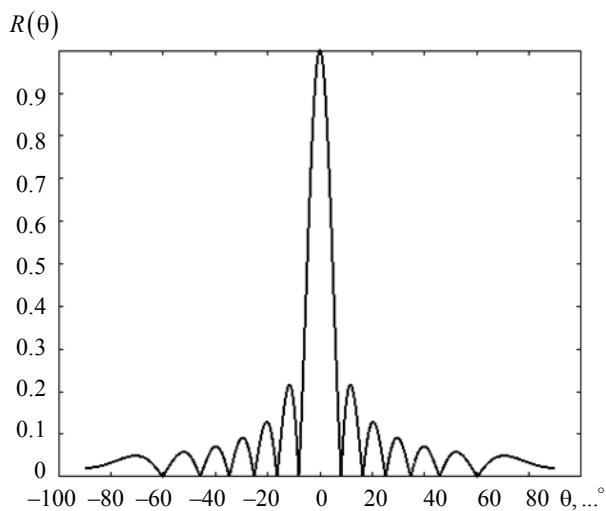


Рис. 5

Выполняя энергетическое суммирование, добавление помехи и пересчет сигнала с учетом влияния среды, получим вид характеристики направленности  $R_{ш}(\theta)$ , представленный на рис. 6.

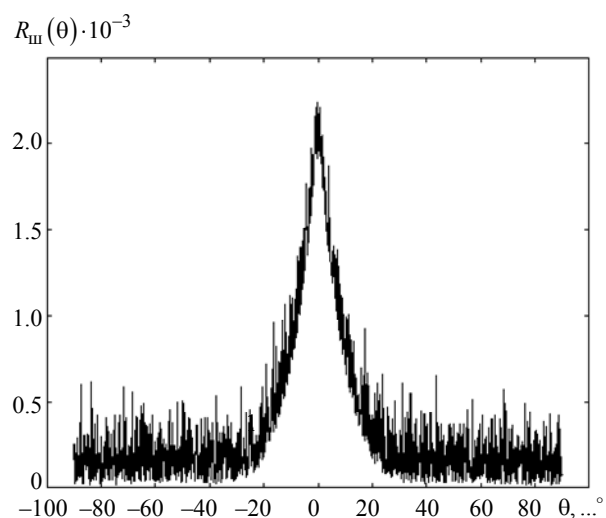


Рис. 6

Изменяя значение углового положения относительно траверза, например на  $30^\circ$ , получим аналогичные графики для характеристики направленности после энергетического суммирования (рис. 7).

Имея построенные значения изменения давления в зависимости от углового положения, получим характеристики, представленные в табл. 2.

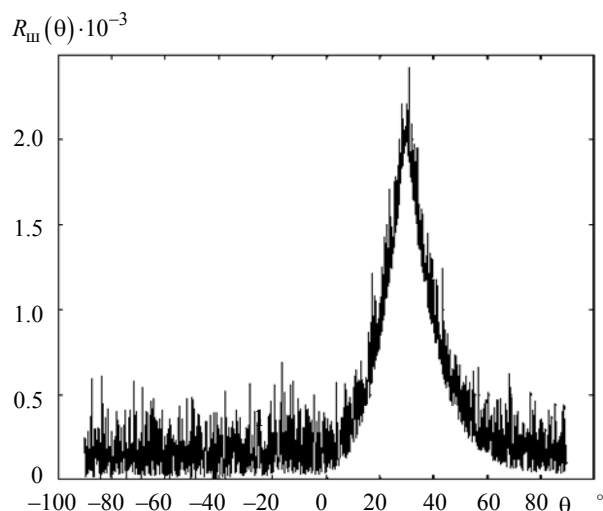


Рис. 7

Из таблицы видно, что по мере увеличения отклонения направления приема от направления траверза (т. е. по мере увеличения угла сканирования) происходит увеличение значения акустической протяженности, что обуславливается увеличением ширины характеристики направленности. При увеличении углового положения значение асимметрии по методу площадей плавно возрастает, что свидетельствует об асимметрии исследуемого сигнала в одну из сторон. Асимметрия по вероятностному методу уменьшается, что соответствует физическому смыслу [9].

В статье исследован тракт приема гибкой протяженной буксируемой антенны при круговом обзоре. Определена интенсивность сигнала относительно среды, в которой происходит распространение. Рассмотрены основные параметры сигнала и среды, влияющие на интенсивность сигнала. Характеристика направленности ГПБА соответствует характеристике направленности линейной дискретной эквидистантной антенны с заданным распределением углов компенсации  $\theta_k$ . Приведенная характеристика направленности построена для различных углов компенсации антенны. Учтены направленные свойства антенны за счет умножения характеристики направленности

Таблица 2

Угловое положение, ...°	Акустическая протяженность (по уровню 0.707), ...°	Асимметрия (метод площадей)	Асимметрия (вероятностный метод)
0	9.1	0.90	0.12
20	9.9	1.09	0.05
40	11.2	1.13	0.02
60	22.4	2.00	-0.02

для каждого угла компенсации  $\theta_k$  на интенсивность сигнала. Проведено энергетическое суммирование по всему частотному диапазону приема антенны для учета всех составляющих излучения волны от цели. Введено в рассмотрение два классификационных признака: отражение от количества объектов и асимметрия сигнала. В соответствии с этим для

разных угловых положений найдены двумя способами асимметрия сигнала и акустическая протяженность сигнала. Полученные данные используются в задачах классификации обнаруженных объектов на основе приема излучаемых ими шумовых сигналов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корякин Ю. А., Смирнов С. А., Яковлев Г. В. Корабельная гидроакустическая техника: состояние и актуальные проблемы. СПб.: Наука, 2004.
2. Свердлин Г. М. Прикладная гидроакустика. Л.: Судостроение, 1990.
3. Сташкевич А. П. Акустика моря Л.: Судостроение, 1996.
4. Крылов В. В. Основы теории излучения и рассеяния звука. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1989.
5. Гийес Л., Сабате П. Основы акустики моря. Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1967.
6. Справочник по гидроакустике / А. П. Евтютов, А. Е. Колесников, А. П. Ляликов и др. Л.: Судостроение, 1982.
7. Дмитриев А. Н. Проектирование подводных аппаратов. Л.: Судостроение, 1978.
8. Ольшевский В. В. Статистические методы в гидролокации. Л.: Судостроение, 1973.
9. Kinsler L. E., Frey A. R. Fundamentals of acoustics. New York: John Wiley & Sons, 1950.

---

К. Е. Abbakumov, I. S. Bobrikov, A. V. Vagin  
*Saint Petersburg Electrotechnical University*

### THE STUDY OF THE RECEPTION TRACT OF A FLEXIBLE EXTENDED TOWED ANTENNA AT A CIRCULAR OVERVIEW

*The question of the formation of the directivity characteristic in the path of receiving flexible long towed antenna with a circular review has been reviewed. The intensity of the signal was determined taking into account the influence of the environment on its propagation. The main parameters of the environment and the signal affecting on the intensity value are analyzed. The directivity characteristic of a flexible long towed antenna for different compensation angles is described. Accounting for the directional properties of the antenna is introduced by multiplying the directional characteristic on the signal intensity. Energy summation was produced over the entire frequency range of the antenna. The classification signs are determined: the acoustic length and asymmetry of the signal. This signs are the basis by which will be decided: is the signal came from a group or a single object. The acoustic length and asymmetry of the signal are calculated for different angular positions by two methods: the area method and the probabilistic method.*

**Directivity characteristic, signal model, extended antenna, circular view, intensity of the signal, concentration ratio**

---