

# ГИБКАЯ ПРОТЯЖЁННАЯ БУКСИРУЕМАЯ АНТЕННА НА БАЗЕ КОМБИНИРОВАННЫХ ПРИЁМНИКОВ

П.Д. Груздев, А.И. Машошин, Т.В. Падерина

Целью работы является исследование характеристик гибкой протяжённой буксируемой антенны (ГПБА), построенной на базе комбинированных (векторно-скалярных) приёмников (КП). Показано, что замена в ГПБА приёмников давления на комбинированные приёмники позволяет: в 3 раза повысить помехоустойчивость (конкретно коэффициент концентрации) ГПБА; обеспечить однозначное определение пеленга обнаруженной цели; обеспечить работоспособность ГПБА при маневрировании буксировщика по курсу. Констатируется, что для создания эффективной ГПБА на базе КП нужно решить ряд технологических задач: разработать малогабаритный, помехоустойчивый и надёжный четырёхканальный КП, включающий инклинометр, позволяющий контролировать вращение ГПБА вокруг собственной оси; обеспечить подавление вибраций и шумов обтекания при буксировке. Приведены конструкция КП, разработанная специально для встраивания в ГПБА, а также технические и алгоритмические методы подавления вибраций и шумов обтекания при буксировке. Предложен алгоритм восстановления формы ГПБА при маневрировании буксировщика по курсу.

**Ключевые слова:** гидроакустика, гибкая протяжённая буксируемая антенна, векторно-скалярный приёмник, помехоустойчивость, разрешающая способность, шумы обтекания.

## Введение

Гидроакустические станции с гибкими протяженными буксируемыми антеннами (ГАС с ГПБА) играют заметную роль в гидроакустическом вооружении подводных лодок (ПЛ) и надводных кораблей (НК) [1, 2]. Они также необходимы для поиска углеводородов подо льдом с использованием автономных необитаемых подводных аппаратов.

Отличие ГАС с ГПБА от остального гидроакустического вооружения ПЛ и НК заключено в используемой гидроакустической антенне, конструкция которой схематически изображена на рис.1. Вращающийся токопереход обеспечивает в процессе враще-

ния ГПБА вокруг собственной оси электрический контакт кабелей, расположенных в ГПБА, с кабелями, находящимися в корпусе буксировщика. Кабель-трос предназначен для удаления активной части ГПБА на несколько сотен метров от буксировщика, что обеспечивает отстройку приёмников, расположенных в активной части ГПБА, от шумов буксировщика. Вибросекция устраняет рывки и позволяет уменьшить вибрацию активной части ГПБА, появляющуюся при буксировке. В активной части эквидистантно с шагом, равным половине длины волны сигнала на верхней частоте рабочего диапазона частот, расположены гидроакустические приёмники (ГАП). Концевое тело создаёт механическое сопротивление буксировке



Рис.1. Конструкция ГПБА

и тем самым обеспечивает прямолинейную форму ГПБА.

Функциональными особенностями ГПБА, независимо от типа используемых ГАП, являются [1, 3]:

- направленность приема источников звука в горизонтальной и вертикальной плоскостях;
- большая протяженность, позволяющая эффективно работать в инфразвуковом (ниже 20 Гц) и низком звуковом (от 20 до 500 Гц) диапазонах частот и, как следствие, обнаруживать морские и воздушные шумящие объекты по сплошной части спектра их шумоизлучения и, что более важно, по дискретным составляющим (ДС) спектра их шумоизлучения, обусловленным работой конкретных механизмов [3];
- расположение ГПБА за кормой ПЛ и НК, что позволяет контролировать пространство в кормовом секторе курсовых углов, затененном для носовых и бортовых антенн ПЛ и НК;
- расположение активной части ГПБА в нескольких сотнях метров от буксировщика, что обеспечивает отстройку от генерируемых им шумов;
- в случае буксировки ГПБА за НК имеется возможность её заглубления на оптимальную глубину для обнаружения объектов заданного класса.

Как правило, активная часть ГПБА строится на базе приёмников давления. Но в этом случае ГПБА имеет недостатки, к которым относятся:

- ограниченная помехоустойчивость, что делает её неэффективной для обнаружения малозумных целей по сплошной части спектра [3–5];
- неоднозначность определения пеленга обнаруженной цели [6–9] (в силу симметрии характеристики направленности ГПБА);
- существенное влияние на работу ГПБА шумов обтекания воды, возрастающее с ростом скорости буксировки [10];
- потеря работоспособности при маневрировании буксировщика по курсу (в силу сложности фазирования ГАП при изгибе ГПБА).

Из публикаций [6–15, 16–20] известно, что первые три из перечисленных недостатков можно преодолеть путём построения ГПБА на базе комбинированных (векторно-скалярных) приёмников (КП), используя их направленность, причём не зависящую от частоты. Далее будет показано, что можно преодолеть и последний недостаток.

Согласно работе [11], первое описание принципов использования КП в протяжённых гидроакустических системах относится к 1953 году, когда известный акустик У. Мэзон подал заявку на изобретение вертикальной гирлянды, состоящей из КП и приёмников давления. В конце 70-х годов были поданы заявки на различные варианты использования КП в протяжённых антеннах, как стационарных, так и буксируемых шланговых. В той же работе [11] приведена фотография разработанного в МГУ в 80-е годы свободно дрейфующего крупногабаритного макета линейной антенны на базе КП со встроенными датчиками ориентации КП. Макет использовался для изучения шумов океана. Также были попытки создания ГПБА на базе КП. Однако ни в СССР, ни в России гидроакустические антенны на базе КП до практического использования доведены не были. Основной причиной этого, согласно [11], было отсутствие необходимых технологий.

В то же время за рубежом линейные антенны на базе КП широко используются, причём как в гражданской, так и в военной сфере, например, для измерения динамики океанических шумов и изучения звуков, издаваемых китами [16–18]. Учитывая большое количество зарубежных публикаций, посвящённых ГПБА на базе КП (например, [9]), есть основание полагать, что они широко используются на подводных лодках для противоторпедной защиты.

Для создания эффективной ГПБА на базе КП нужно решить ряд технологических задач:

- 1) создать надёжный малогабаритный 4-канальный КП, который можно разместить в звукопрозрачной оболочке диаметром не более 40–50 мм;
- 2) разработать малогабаритный инклинометр, позволяющий при свободно вращающейся вокруг собственной оси ГПБА определять пространственную ориентацию в вертикальной плоскости каждого КП;
- 3) обеспечить изоляцию КП от вибраций и шумов обтекания при буксировке;
- 4) разработать алгоритмы обработки сигналов с выхода каналов КП.

Целью работы является исследование характеристик ГАС с ГПБА на базе КП, а также изложение конструкции КП, разработанной специально для встраивания в ГПБА.

В разделе 1 приведена модельная сравнительная оценка характеристик ГПБА на базе приёмников давления и КП, в разделе 2 описана конструкция и принцип действия КП, в разделе 3 приведены способы отстройки КП от шумов буксировщика, вибраций и шумов обтекания.

### 1. Сравнительная оценка характеристик ГАС с ГПБА на базе приёмников давления и комбинированных приёмников

На практике длина активной части ГПБА соответствует решаемой задаче. Для обнаружения ПЛ она должна быть более 1 км, для обнаружения торпед и воздушных объектов – 80–90 м. Количество гидроакустических приёмников (ГАП) в активной части ГПБА рассчитывается как отношение длины активной части ГПБА к половине длины волны на верхней частоте рабочего диапазона частот, которая, как правило, составляет 500 либо 1000 Гц. Причём данные соотношения применимы как при использовании приёмников давления, так и при использовании КП.

Для конкретности будем рассматривать ГПБА, буксируемую подводным аппаратом, активная часть которой состоит из  $N_{GAP}=16$  гидроакустических приёмников (ГАП), отстоящих друг от друга на 1,5 м. Рабочий диапазон ГПБА 3–500 Гц.

ГПБА в процессе буксировки в воде осуществляет колебания (вращение) вокруг продольной оси, являющиеся сложным гидродинамическим явлением. Угловая скорость этих колебаний зависит от множества факторов, к которым, в частности, относятся масса, длина, диаметр антенны, а также скорость ее буксировки. Количественных данных об угловой скорости колебаний обнаружить не удалось. Экспертная оценка, сделанная специалистами по гироскопии, привела к выводу, что диапазон 300 °/с является реалистичной оценкой для максимальной угловой скорости колебаний буксируемых антенн.

Для решения всех задач и устранения перечисленных недостатков КП, формирующие активную часть ГПБА, должны иметь 3 векторных канала и один скалярный канал давления. Для встраивания КП в ГПБА ось одного векторного канала, например  $X$ , совмещается с осью ГПБА, а оси двух других векторных каналов  $Y$  и  $Z$  ориентируются перпендикулярно друг другу и перпендикулярно оси ГПБА. Пространственная ориентация КП относительно ГПБА определяется курсовым углом направления оси векторного канала  $X$  и углом наклона  $\psi$  оси векторного канала  $Z$  относительно зенита, который будем условно называть углом крена ГПБА.

Направление на локальный источник излучения в горизонтальной плоскости определяется курсовым углом (КУ)  $\alpha$  (т.е. углом между направлением на источник и курсом буксировщика), в вертикальной плоскости – углом места (УМ)  $\beta$ .

Нормированные характеристики направленности частотно независимых векторных каналов

$D_x, D_y, D_z$  и скалярного канала давления  $D_p$  КП при расположении оси векторного канала  $X$  вдоль оси ГПБА определяются в виде:

$$\begin{aligned} D_x(\alpha, \beta) &= \sin(\alpha) \times \cos(\beta - \psi) \\ D_y(\alpha, \beta) &= \cos(\alpha) \times \cos(\beta - \psi) \\ D_z(\alpha, \beta) &= \sin(\alpha) \times \sin(\beta - \psi) \\ D_p(\alpha, \beta) &= 1. \end{aligned} \quad (1)$$

Для удобства записи объединим характеристики направленности приёмных каналов КП в вектор  $\mathbf{D}(\alpha, \beta) = \{D_x(\alpha, \beta), D_y(\alpha, \beta), D_z(\alpha, \beta), D_p(\alpha, \beta)\}$

Сравнение ГАС с ГПБА на базе приёмников давления и комбинированных приёмников будем осуществлять путём сравнения пеленгационных рельефов (ПР) при воздействии на ГПБА локальных источников излучения. Под ПР будем понимать распределение акустической энергии, воздействующей на ГПБА, в зависимости от углов  $\alpha$  и  $\beta$ . ПР будем вычислять по формуле [19]:

$$PR(\alpha, \beta) = \int_{f_n}^{f_e} S_{out}(f, \alpha, \beta) df, \quad (2)$$

где  $PR(\alpha, \beta)$  – пеленгационный рельеф, т.е. распределение энергии смеси сигналов и помех, поступающих на вход КП, по горизонтальным и вертикальным углам наблюдения;  $f_n, f_e$  – нижняя и верхняя граничные частоты рабочего диапазона частот;  $S_{out}(f, \alpha, \beta)$  – выходной эффект пространственной обработки, т.е. энергетический спектр смеси сигналов и помех в направлении  $(\alpha, \beta)$ .

При использовании ГПБА на базе приёмников давления [19]

$$\begin{aligned} S_{out}(f, \alpha, \beta) &= \\ &= \mathbf{W}_{GBA-P}^*(f, \alpha, \beta) \times \tilde{\mathbf{K}}_{s+n}(f) \times \mathbf{W}_{GBA-P}(f, \alpha, \beta), \end{aligned} \quad (3)$$

где

$\mathbf{W}_{GBA-P}(f, \alpha, \beta)$  – частотно-зависимый управляющий вектор размерности  $N_{GAP}$ , обеспечивающий компенсацию антенны в направлении  $(\alpha, \psi)$ ;

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_{GBA-P}(f, \alpha, \beta) &= \\ &= \left\{ \exp \left\{ -j \times 2 \times \pi \times f \times \frac{d \times (i-1) \times \cos \alpha \times \cos \beta}{c} \right\} \right\}, \\ i &= 1, \dots, N_{GAP} \end{aligned} \quad (4)$$

$d$  – расстояние между соседними ГАП в ГПБА;

$c$  – скорость звука на глубине ГПБА;

$\tilde{\mathbf{K}}_{s+n}(f)$  – накопленная спектрально-корреляционная матрица (КМ) размерности  $N_{GAP} \times N_{GAP}$  смеси сигналов локальных источников и помехи (шумов моря и шумов обтекания) на выходе приёмников давления антенны:

$$\tilde{\mathbf{K}}_{s+n}(f) = \overline{\hat{\mathbf{G}}_P(f) \times \hat{\mathbf{G}}_P^*(f)}, \quad (5)$$

$\hat{\mathbf{G}}_P(f)$  – вектор оценок комплексных спектров смеси сигналов и помех на выходе ГАП; \* – знак Эрмита сопряжения.

Горизонтальная черта в (5) символизирует накопление КМ по времени.

При использовании ГПБА на базе комбинированных приёмников

$$\begin{aligned} S_{out}(f, \alpha, \beta) = \\ = \mathbf{W}_{GBA-P}^*(f, \alpha, \beta) \times \tilde{\mathbf{K}}_{CR}(f, \alpha, \beta) \times \mathbf{W}_{GBA-P}(f, \alpha, \beta) \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\tilde{\mathbf{K}}_{CR}(f, \alpha, \beta)$  – накопленная матрица размерности  $N_{GAP} \times N_{GAP}$ , вычисляемая в виде:

$$\tilde{\mathbf{K}}_{CR}(f, \alpha, \beta) = \overline{\mathbf{G}_{CR}(f, \alpha, \beta) \times \mathbf{G}_{CR}^*(f, \alpha, \beta)}, \quad (7)$$

$\mathbf{G}_{CR}(f, \alpha, \beta)$  - вектор размерности  $N_{GAP}$  комплексных спектров сигнала на выходе  $N_{GAP}$  комбинированных приёмников при их компенсации в направлении  $(\alpha, \beta)$ :

$$\mathbf{G}_{CR}(f, \alpha, \beta) = \{ \mathbf{D}(\alpha, \beta) \times \mathbf{G}_i(f) \}, i=1, \dots, N_{GAP}, \quad (8)$$

$\mathbf{G}_i(f)$  – вектор из 4 комплексных спектров сигнала на выходе приёмных каналов  $i$ -го КП.

Оценка характеристик ГАС с ГПБА на базе КП выполнялась путём имитационного моделирования шумов локальных источников и шумов моря в заданной полосе частот на выходе 4 приёмных каналов каждого из 16 КП и их последующей обработки с использованием приведённых формул. Шумы локальных источников моделировались в виде розового шума, коррелированного на выходе всех 4 каналов всех КП с учётом их сдвига во времени на входе разных КП в соответствии с курсовым углом источника. Шумы моря на выходе каналов КП моделировались в виде независимых на выходе всех каналов КП розовых шумов в соответствии с корреляционной матрицей

$\mathbf{K}_{shm} = \text{diag} \left\{ 1, \frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3} \right\}$  [11, 12]. При моделировании ГПБА на базе приёмников давления использовались только сигналы на выходе каналов давления ( $P$ -ка-

налов) КП. Моделирование осуществлялось с заданным отношением сигнал/помеха (ОСП), под которым понималось отношение мощности сигнала локального источника к мощности шумов моря на выходе  $P$ -канала одного КП.

### Проверка однозначности определения пеленга источника

На рис. 2 приведён пеленгационный рельеф (ПР) при воздействии на ГПБА одного локального источника шума с ОСП 30 дБ на КУ=90° и УМ=0° для ГПБА на базе приёмников давления и на базе комбинированных приёмников. Моделирование проводилось при условии, что ГПБА не вращается и ориентация векторных каналов  $Y$  и  $Z$  известна.

Из рассмотрения рис. 2 следует, что при использовании ГПБА на базе комбинированных приёмников (в отличие от ГПБА на базе приёмников давления) имеет место однозначное определение курсового угла источника.

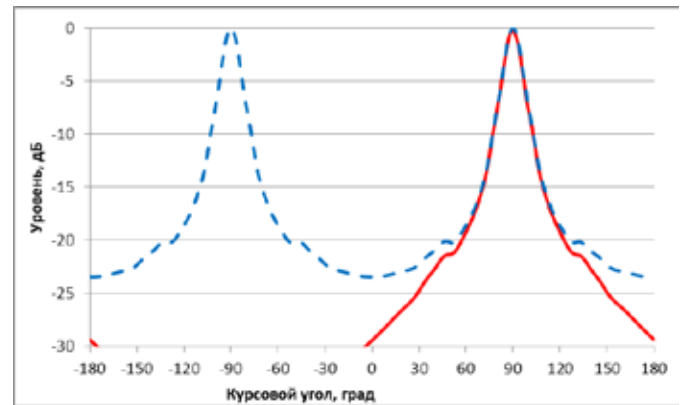


Рис. 2. Пеленгационный рельеф при воздействии на ГПБА одного локального источника шума с ОСП 30 дБ на курсовом угле 90° при использовании ГПБА на базе приёмников давления (штриховая линия синего цвета) и на базе комбинированных приёмников (сплошная линия красного цвета)

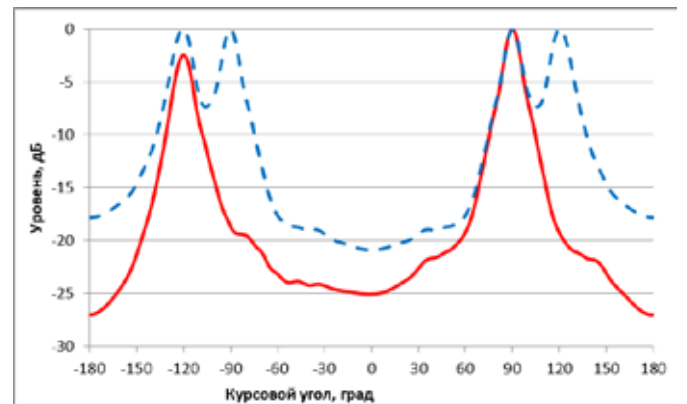


Рис. 3. Пеленгационный рельеф при воздействии на ГПБА двух локальных источников шума с ОСП 30 дБ на курсовых углах -130° и 90° при использовании ГПБА на базе приёмников давления (штриховая линия синего цвета) и на базе комбинированных приёмников (сплошная линия красного цвета)

На рис. 3 изображена ситуация воздействия на ГПБА двух источников с ОСП 30 дБ на КУ  $-130^\circ$  и  $90^\circ$  при условии отсутствия вращения ГПБА. Рис. 3 подтверждает сделанный вывод об однозначном определении курсового угла источника.

**Определение коэффициента концентрации**

Рассчитаем коэффициент помехоустойчивости ГПБА в поле изотропных помех, называемый коэффициентом концентрации [3, с. 58]:

$$\kappa(f) = \frac{4 \cdot \pi}{\int_0^{2\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} W(f, \alpha, \beta, \alpha_0, \beta_0) \times \cos(\beta) \times d\alpha \times d\beta} \tag{9}$$

где  $W(\alpha, \psi, \alpha_0, \psi_0)$  – характеристика направленности ГПБА, т.е. нормированный отклик ГПБА на плосковолновой сигнал, пришедший с направления  $(\alpha_0, \beta_0)$  при компенсации ГПБА в направлении  $(\alpha, \beta)$ . В качестве  $W(\alpha, \psi, \alpha_0, \psi_0)$  можно использовать пеленгационный рельеф при воздействии на антенну единственного источника с большим ОСП.

Расчёт, выполненный для частоты 500 Гц, показал следующее:

- для ГПБА на базе приёмников давления коэффициент концентрации составил 16, что соответствует известной зависимости для линейной антенны [4]  $\kappa(f) = \frac{2 \times L}{\lambda}$ , где  $L$  – длина ГПБА,  $\lambda$  – длина волны сигнала;
- для ГПБА на базе КП коэффициент концентрации составил 48, т.е. в 3 раза больше, чем в случае использования приёмников давления. Это объясняется тем, что по теореме умножения [4] характеристика направленности многоэлементной антенны, составленной из идентичных направленных приёмников, равна произведению характеристики направленности одного приёмника на характеристику направленности всей антенны, составленной из ненаправленных приёмников. В результате коэффициент концентрации ГПБА на базе

КП равен  $\kappa_{GPA-CR}(f) = \frac{6 \times L}{\lambda}$ , т.е. произведению коэффициента концентрации ГПБА на базе приёмников давления и коэффициента концентрации КП, равного 3 [5, 12].

В качестве иллюстрации повышения помехоустойчивости ГПБА при использовании КП на рис. 4 приведены ПР при малых ОСП входного сигнала. Из рассмотрения рис. 4 следует, что при пороговом ОСП

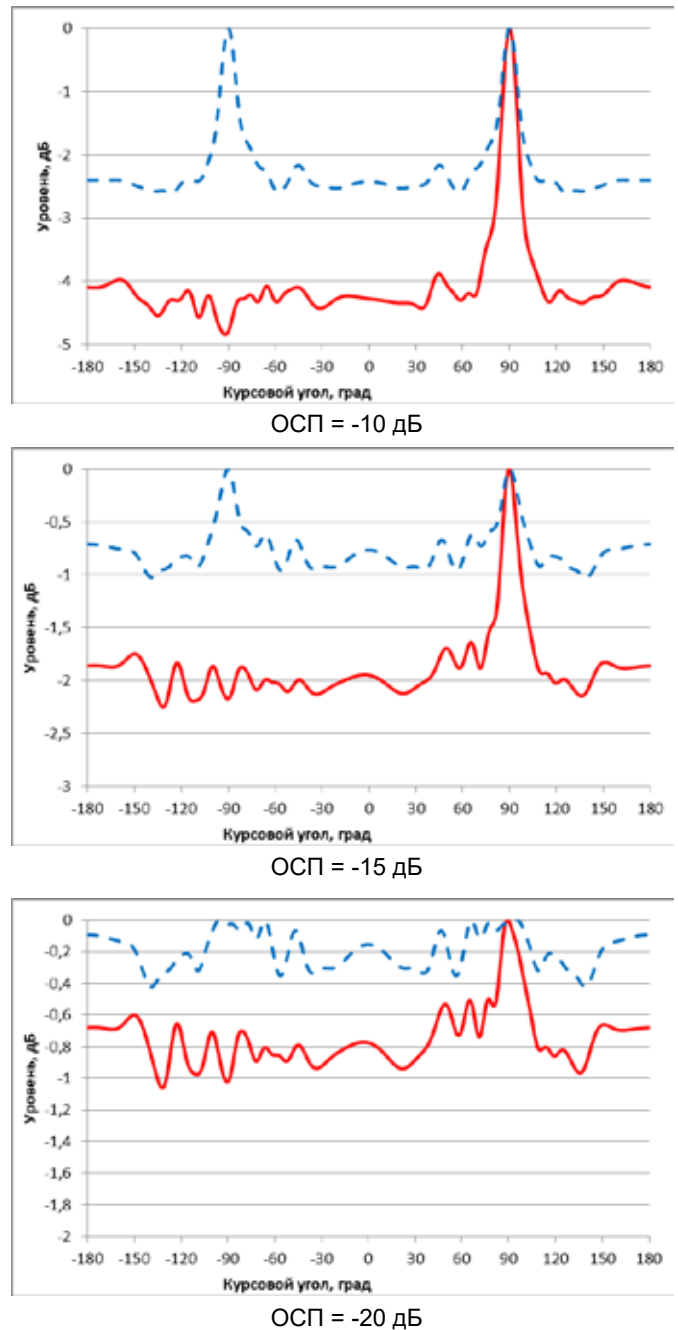


Рис. 4. Пеленгационный рельеф при воздействии на ГПБА одного локального источника шума с ОСП -20...-10 дБ на курсовом угле 90° при использовании ГПБА на базе приёмников давления (штриховая линия синего цвета) и на базе комбинированных приёмников (сплошная линия красного цвета)

для обнаружения локального источника 2 дБ при использовании ГПБА на базе приёмников давления он обнаруживается, начиная с -10 дБ, при использовании ГПБА на базе КП – начиная с -15 дБ.

**Определение разрешающей способности**

На рис. 5 показан результат оценки разрешающей способности ГПБА, под которой понимается гори-

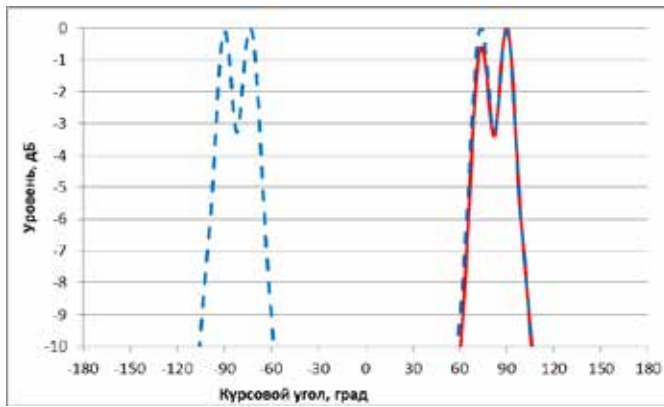


Рис. 5. Пеленгационный рельеф при воздействии на ГПБА двух локальных источников шума с ОСП 30 дБ на курсовых углах 90° и 107° при использовании ГПБА на базе приёмников давления (штриховая линия синего цвета) и на базе комбинированных приёмников (сплошная линия красного цвета)

горизонтальное угловое расстояние между двумя локальными источниками излучения с одинаковыми большими ОСП, при котором провал между максимумами в пеленгационном рельефе, соответствующими направлениям на локальные источники, равен -3 дБ. Из рассмотрения рис. 5 следует, что для названных параметров разрешающая способность ГПБА составляет 17° и не зависит от вида используемых ГАП.

#### Определение зависимости пеленгационного рельефа от точности контроля угла крена КП

Одним из условий правильного функционирования ГПБА на базе КП является контроль угла крена каждого КП. Оценим влияние ошибки определения угла крена КП на характеристики ГПБА.

Проведённое моделирование показало, что ошибка определения угла крена не влияет на помехоустойчивость антенны, но влияет на корректность определения курсового угла источника излучения. На

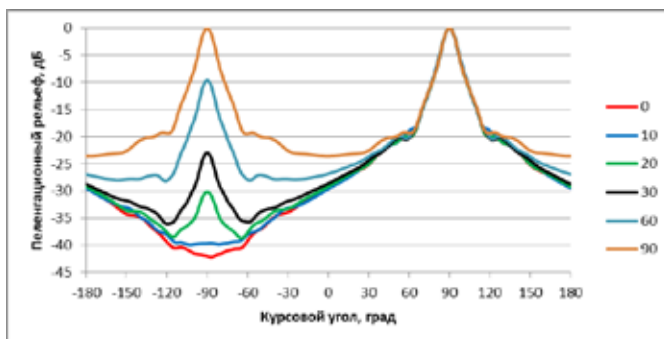


Рис. 6. Пеленгационные рельефы при воздействии на ГПБА, построенную на базе КП, одного локального источника излучения с ОСП 30 дБ по курсовому углу 90°. Параметром графиков является ошибка определения угла крена КП в градусах

рис. 6 приведены пеленгационные рельефы при воздействии на ГПБА одного локального источника излучения с ОСП 30 дБ по курсовому углу 90°. При вычислениях при ошибках определения угла крена ГПБА от 0° до 90°. Из рассмотрения графиков следует, что при ошибках 0° и 10° ложная зеркальная отметка источника на курсовом угле -90° отсутствует, при ошибке в 20° она появляется, но её уровень на 30 дБ меньше уровня истинной отметки. При дальнейшем увеличении ошибки определения угла крена уровень зеркальной отметки увеличивается, достигая уровня истинной отметки при ошибке в 90°. Из этого можно сделать вывод, что предельная ошибка определения угла крена КП не должна превышать 20°.

#### Алгоритм функционирования ГАС с ГПБА при циркуляции буксировщика

Применение КП позволяет контролировать форму ГПБА при циркуляции буксировщика. Покажем это, воспользовавшись рис. 7, на котором обозначены:

- Б – буксировщик ГПБА;
- ИИ – локальный удалённый источник излучения шумового сигнала (цель);
- КП<sub>*i*</sub> – *i*-й КП, расположенный в активной части ГПБА;
- $\alpha$  – курсовой угол цели, т.е. угол между направлением на цель и линией курса буксировщика;
- $b_i$  – угол цели в системе координат *i*-го КП, т.е. угол между направлением на цель и касательной к ГПБА в месте *i*-го КП;
- $g_i$  – угол с вершиной в месте *i*-го КП между направлением на буксировщик и касательной к ГПБА в месте расположения *i*-го КП со знаком «+», если направление на буксировщик находится правее касательной, и со знаком «-» в противном случае;
- $R_i$  – расстояние по прямой между кормой буксировщика и *i*-м КП;
- $\Delta R_i(\alpha)$  – длина пути плоской волны сигнала ИИ, находящегося на курсовом угле буксировщика  $\alpha$ , от кормы буксировщика до *i*-го КП;
- $h_i$  – угол с вершиной в месте кормы буксировщика между прямой линией, соединяющей корму буксировщика с *i*-м КП, и линией фронта звуковой волны, проходящей через корму буксировщика.

При изменении курса буксировщика ГПБА начинает изгибаться. Если при формировании пеленгационного рельефа (т.е. распределения энергии акусти-

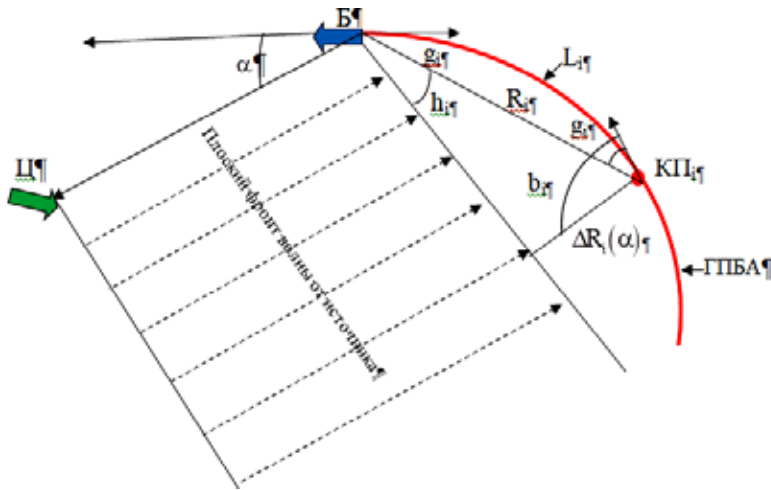


Рис. 7. Схематическое изображение положения ГПБА при изменении курса буксировщика

ческих сигналов по курсовым углам буксировщика) этот факт не учитывать, картина обстановки будет искажена. Далее это будет показано.

При встраивании в ГПБА 4-канального КП, включающего 3 векторных канала (колебательной скорости либо колебательного ускорения, либо градиента давления) и один скалярный канал давления, ось одного векторного канала, например  $X$ , жёстко совмещается с осью ГПБА, а оси двух других векторных каналов  $Y$  и  $Z$  ориентируются перпендикулярно друг другу и перпендикулярно оси ГПБА. При таком расположении КП его пространственная ориентация относительно ГПБА определяется нулевым углом между осью ГПБА (в точке крепления КП) и осью векторного канала  $X$ , а также углом  $\psi$  отклонения оси векторного канала  $Z$  от зенита, который предполагается известным.

Предположим, что ГПБА при изменении курса буксировщика принимает форму дуги окружности [20]. Тогда из рис. 7 следует (обозначения приведены выше):

$$R_i = \frac{L_i}{g_i} \times \sin g_i. \quad (10)$$

Таким образом, измерив с помощью  $i$ -го КП угол  $g_i$  (в радианах) и определив  $L_i$  по длине вытравленного кабель-троса, можно вычислить расстояние  $R_i$ .

На рис. 8 приведен пеленгационный рельеф на выходе  $i$ -го КП, соответствующий ситуации, изображённой на рис. 7. По оси абсцисс отложены углы  $g$  в градусах между касательной к ГПБА в месте крепления  $i$ -го КП и направлениями на источники. По оси ординат отложены уровни источников излучения. Наибольший уровень излучения соответствует направлению  $g_i = -10^\circ$  на корму буксировщика, где расположен гребной винт, являющийся основным источником шумоизлучения буксировщика. Учиты-

вая, что активная часть ГПБА отнесена от кормы буксировщика не далее, чем на несколько сотен метров, уровень сигнала на входе каждого  $i$ -го КП будет большим, что позволяет для более точного определения направления на корму буксировщика применить один из алгоритмов сверхразрешения, например алгоритм Кейпона [19], что и показано на рис. 8.

Для фазирования искривлённой ГПБА по курсовому углу буксировщика  $\alpha$  нужно каждый КП сфазировать в направление

$$b_i = \alpha + 2 \times g_i. \quad (11)$$

Чтобы это сделать, нужно для этого направления определить длину пути плоской волны с этого направления от некоторого фиксированного положения её фронта (например, от кормы буксировщика) до каждого КП ( $\Delta R(\alpha)$  на рис. 7).

Как видно из рис. 7, эта длина пути определяется выражением:

$$\Delta R_i(\alpha) = R_i \times \sin \alpha = \frac{L_i}{g_i} \cdot \sin g_i \times \cos(\alpha + g_i). \quad (12)$$

В результате вычисления коэффициентов, фазирующих КП искривлённой ГПБА в горизонтальное направление  $\alpha$  и вертикальное направление  $\beta$ , нужно осуществлять по формуле:

$$W_i(f, \alpha, \beta) = \exp \left\{ -j \times 2 \times \pi \times f \times \frac{\Delta R_i(\alpha)}{c} \times \cos \beta \right\}, \quad i=1, \dots, N_{CR}, \quad (13)$$

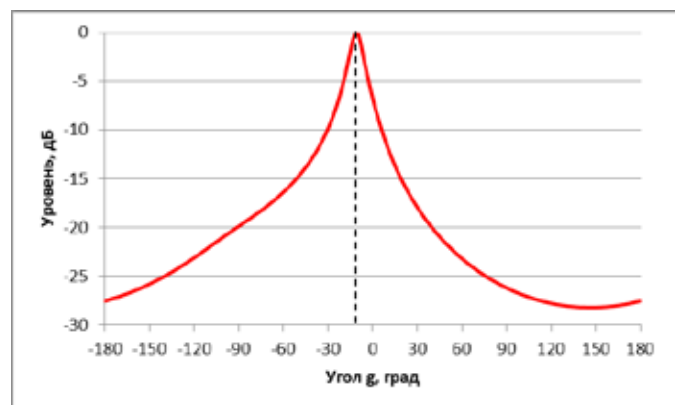


Рис. 8. Пеленгационный рельеф, сформированный по сигналам на выходе одного КП с использованием алгоритма Кейпона

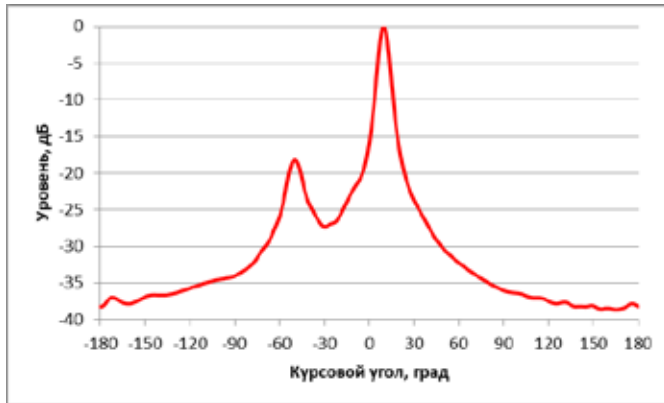


Рис. 9. Пеленгационный рельеф на выходе ГПБА, соответствующий ситуации, изображённой на рис. 7

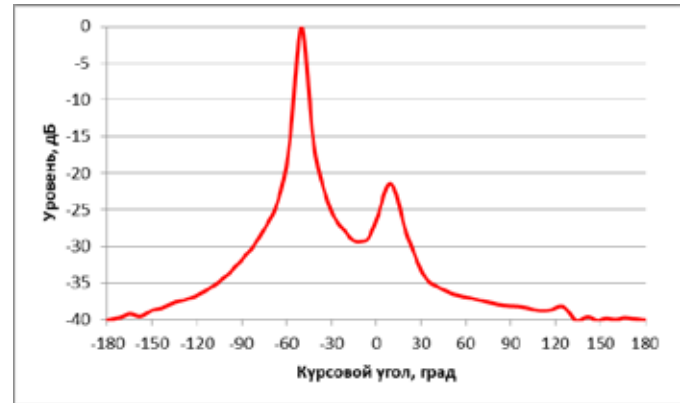


Рис. 10. Пеленгационный рельеф на выходе ГПБА, соответствующий ситуации, изображённой на рис. 7, при подавлении шума буксировщика

в которой  $\Delta R_i(\alpha)$  определяется по формуле (12);  $c$  – скорость звука;  $N_{CR}$  – количество КП в активной части ГПБА.

На рис. 9 приведён пеленгационный рельеф, соответствующий ситуации рис. 7, при фазировании ГПБА в соответствии с формулой (13). В пеленгационном рельефе наблюдаются 2 максимума: наибольший по уровню максимум соответствует шуму буксировщика, второй максимум соответствует шуму цели, находящейся на курсовом угле  $\alpha = -50^\circ$  относительно буксировщика, что соответствует действительности.

Поскольку шум буксировщика на данной стадии обработки не несёт полезной информации, его можно подавить одним из методов, описанных в [19]. Воспользуемся следующим методом: сформируем корреляционные (взаимно-спектральные) матрицы (КМ) сигналов на выходе всех 4 каналов каждого  $i$ -го КП, вычислим собственные вектора и соответствующие им собственные числа каждой КМ, уменьшим в каждой КМ значение старшего собственного числа до уровня младшего собственного числа и с такими преобразованными КМ сформируем пеленгационный рельеф на выходе ГПБА. Результат такой процедуры приведён на рис. 10, из сравнения которого с рис. 9 следует, что шум буксировщика оказался подавленным на 40 дБ и наблюдается в пеленгационном рельефе в виде максимума небольшого уровня.

Точность формирования пеленгационного рельефа при искривлении ГПБА зависит от двух факторов:

- точности измерения углов  $g_i$ ;
- отличия формы ГПБА от дуги окружности.

Что касается точности измерения углов  $g_i$ , то ввиду большого уровня шума буксировщика на входе КП она является достаточно высокой. Тем не менее ошибки в определении углов  $g_i$  влияют на помехоустойчивость сфазированной антенны. На рис. 11

приведена зависимость величины снижения помехоустойчивости ГПБА от величины среднеквадратической погрешности (СКП) определения углов  $g_i$  (при условии центрированного нормального распределения этой погрешности).

Что касается формы ГПБА, то её позиционирование можно начинать, когда выполнится одно из двух условий:

- когда для всех КП углы  $g_i$  равны 0 (с учётом точности их измерения). В этом случае форма ГПБА считается прямой линией и её фазирование осуществляется традиционным способом;
- когда диаметры окружностей  $D_i$ , соответствующие отрезкам дуги ГПБА от кормы буксировщика до каждого  $i$ -го КП и вычисляемые по формуле

$$D_i = \frac{L_i}{|g_i|}, \quad (14)$$

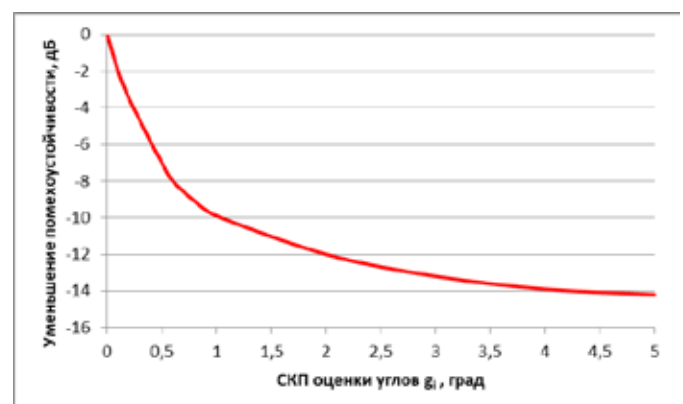


Рис. 11. Зависимость величины снижения помехоустойчивости ГПБА от величины СКП определения углов  $g_i$

равны между собой (с учётом точности их вычисления). В этом случае форму ГПБА можно считать дугой окружности. Если данному условию соответствуют не все диаметры  $D_i$ , то для фазирования антенны выбираются только те КП, которые удовлетворяют условию.

## 2. Конструкция комбинированного приёмника

Известные конструкции КП приведены в [11, 12], а также в описании множества патентов на изобретения. Конструкция КП для применения в ГПБА с векторными каналами на основе приёмников градиента давления либо колебательного ускорения описана в [10, 13–15].

При выборе конструкции КП для использования в ГПБА необходимо исходить из следующего.

1. В качестве векторных каналов КП следует применять приёмники колебательной скорости либо колебательного ускорения соколеблющегося типа, поскольку характеристики приёмников градиента давления, предлагаемые для использования в ГПБА в ряде работ, существенно зависят от волнового расстояния между каналами [11], которое должно составлять десятые доли от длины волны. Для ГПБА это условие не выполняется, поскольку длины волн входного сигнала ГПБА лежат в интервале от сотен до единиц метров, а размеры КП не должны превышать 40–50 мм.

2. КП должен иметь 3 векторных канала, характеристика направленности одного из которых направлена вдоль линии ГПБА, чтобы следить за направлением на буксировщик в интересах контроля формы антенны.

3. КП должен включать инклинометр для контроля текущего положения антенны при её вращении вокруг собственной оси и учёта его при фазировании антенны.

4. Конструкция КП должна иметь минимально возможные габариты и при этом ограничивать влияние деформации корпуса на векторные каналы.

С учётом этих факторов была разработана приведённая на рис. 12 конструкция КП, встраиваемого в ГПБА.

Цифрами на рис. 12 обозначены:

- цилиндрический внутренний корпус КП (1);
- внутренние крышки (2);
- инерционная масса (3);
- тонкий пьезоэлемент (4);
- латунная пластина (5);
- винтовая шпилька (6);

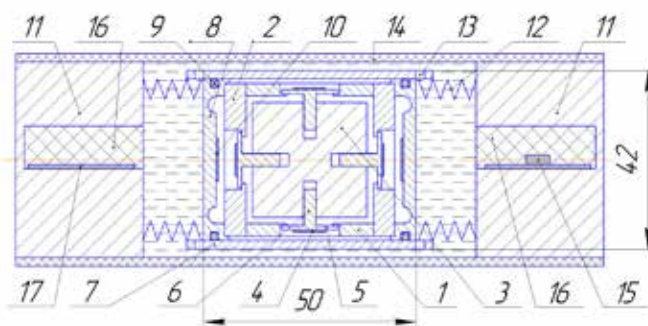


Рис. 12. Конструкция КП, встроенного в ГПБА. Сечение в продольной плоскости

- внешний цилиндрический корпус КП (7)
- внешние крышки (8);
- радиальные уплотнения (9);
- пьезоэлемент (10);
- опоры упругих подвесов (11);
- упругие подвесы (12);
- отверстия (13);
- оболочка ГПБА (14);
- инклинометр (15);
- герметизирующий компаунд (16);
- согласующее устройство каналов КП (17).

Цилиндрический внутренний корпус (1) КП с двух сторон закрыт двумя внутренними крышками (2), внутри него находится цилиндрическая латунная инерционная масса (3). Биморфные пьезокерамические преобразователи состоят из тонкого пьезоэлемента (4) из материала ЦТСНВ-1 и латунной пластины (5). В центре обратной стороны пластины имеется винтовая шпилька (6). Пластина и шпилька выполнены как единая деталь. В цилиндрической поверхности корпуса и крышках сделаны выточки для установки пластин. Инерционная масса центрируется в корпусе, снаружи устанавливаются пластины с пьезоэлементами и вкручиваются шпильками в инерционную массу. За счет того, что пластины опираются на выточки в корпусе, инерционная масса растягивается на шпильках. Герметизация конструкции обеспечена внешним цилиндрическим корпусом (7) с двумя внешними крышками (8) на радиальных уплотнениях (9). За счет отдельного внешнего корпуса снижается влияние давления на векторные каналы, установленные во внутреннем корпусе. Во внешних крышках находятся биморфные приёмники давления (ПД), состоящие из металлической мембраны и наклеенного на неё изнутри пьезоэлемента (10) из материала ЦТСНВ-1. Мембрана ПД конструктивно выполнена как часть внешней крышки (8).

КП размещается между опорами (11) и закрепляется на четырех упругих подвесах (12) за четыре

отверстия (13) в корпусе, что позволяет ему колебаться при воздействии гидроакустической волны, проходящей сквозь оболочку (14) ГПБА. В углублении в опоре находится трехосный микромеханический акселерометр (инклинометр) (15) размером 6×5,6× 2,2 мм на плате с электроникой управления, герметизированный компаундом (16). Выходные сигналы инклинометра (15), представляющие углы крена и дифферента, вырабатываемые электроникой платы по показаниям акселерометра, поступают на 20-контактный разъем стандартизированного интерфейса PMOD, поддерживающего различные протоколы цифровой связи, такие как SPI, UART, к которому подключены проложенные внутри ГПБА линии связи, другие концы которых подключены ко входу процессора гидроакустической станции. Инклинометр располагается на центральной оси ГПБА и сориентирован относительно КП в соответствии со своим рабочим положением. При необходимости исключения погрешности определения ориентации КП, обусловленной возможным поворотом КП вокруг продольной оси относительно опор в пределах упругости подвеса, возможно размещения инклинометра в корпусе КП.

Согласующее устройство (17) для усиления сигналов от каналов КП также герметизировано компаундом (16) и имеет проводную связь с КП.

При движении КП инерционная масса под действием силы инерции смещается внутри корпуса, изгибая соответствующие биморфные преобразователи в направлении колебаний. При этом поперечно расположенные биморфные преобразователи сдвигаются вдоль корпуса, претерпевая одинаковые незначительные деформации. Электрический сигнал, возникающий на выводах их пьезоэлементов, компенсируется за счет электрически противофазного включения двух преобразователей одного канала. Преобразователи же, расположенные вдоль оси воздействия сигнала, претерпевают противоположные по знаку деформации и, соответственно, их выходные сигналы противофазны. В данном случае электрически противофазное включение преобразователей позволяет получить с них общий выходной сигнал.

Выходные сигналы каналов КП и каналов инклинометра по проложенной внутри ГПБА линии связи передаются в процессор, находящийся на борту буксировщика, где производится их обработка.

Основу инклинометра составляет трехосный микромеханический акселерометр типа ADXL 355 либо ADXL 357 с низкой плотностью шума, малым собственным энергопотреблением и выбираемыми диапазонами измерений (см. таблицу). Наличие гер-

метичного корпуса акселерометра типа ADXL 355 помогает обеспечить повторяемость характеристик и высокую стабильность в течение длительного времени.

Характеристики акселерометра ADXL 355

Название характеристики	Диапазон значений
Диапазон измерения	± 2g , ± 4g, ± 8g
Уровень шума	не более 22мкг/√Гц
Уровень смещения нуля	не более 0,0014g
Диапазон рабочих температур	от минус 40° С до 125° С
Уровень потребляемого тока	200 мкА
Габариты	6×5.6×2.2 мм

Выходные сигналы инклинометров, представляющие углы крена  $\psi$  и дифферента  $\gamma$  каждого КП, выработанные по следующим формулам [21]:

$$\psi = \arctg\left(\frac{-n_x}{n_z}\right), \quad \gamma = \arctg\left(\frac{n_y}{\sqrt{n_x^2 + n_z^2}}\right), \quad (15)$$

по проложенной внутри ГПБА линии связи передаются в процессор ГАС, находящийся на борту буксировщика. В (15)  $n_x, n_y, n_z$  – проекции вектора линейного ускорения  $\vec{n}$  на оси связанного с корпусом КП трехгранника OXYZ, которые формируются по показаниям акселерометров  $u_{ni}, i = x, y, z$  в соответствии с выражением:

$$\begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} = CN \times \begin{bmatrix} Mnx & 0 & 0 \\ 0 & Mny & 0 \\ 0 & 0 & Mnz \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u_{nx} - Snx \\ u_{ny} - Sny \\ u_{nz} - Snz \end{bmatrix}, \quad (16)$$

где  $S_{ni}, i = x, y, z$  – смещение нуля  $i$ -го акселерометра;  $Mni$  – масштабный коэффициент  $i$ -го акселерометра;  $CN$  – матрица, характеризующая переход от измерительных осей акселерометров к осям трехгранника OXYZ, имеющая вид:

$$CN = \begin{bmatrix} CNxx & CNxy & CNxz \\ CNyx & CNyy & CNyz \\ CNzx & CNzy & CNzz \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Для минимизации погрешностей измерений осуществляется калибровка датчика крена. Работы по калибровке, целью которой является определение параметров  $S_{ni}, M_{ni}, i = x, y, z$ , и матрицы  $CN$ , проводятся на поворотном стенде. Для калибровки акселерометров  $n_x, n_y, n_z$  используются различные положения измерительных осей относительно вектора силы тяжести  $g$ .

При угловой скорости колебаний буксируемой антенны вокруг продольной оси до 300 %/с и установ-

ке каждого акселерометра как можно ближе к центру этих колебаний предельная погрешность акселерометров  $n_x, n_z$  не превышает  $1^\circ$ , при этом погрешность выработки углов крена  $\Delta\psi = \frac{\Delta n_x \cos\psi + \Delta n_z \sin\psi}{\cos\gamma}$  с

учетом малых значений  $\gamma$  будет составлять не более  $1,4^\circ$ .

Конструкция КП с общей инерционной массой для трех векторных каналов выбрана с целью уменьшения габаритов КП без уменьшения инерционной массы, прямо определяющей величину чувствительности. Биморфные пьезокерамические преобразователи использованы ввиду возможности достижения относительно высокого значения чувствительности при малых габаритах, а также высокой электрической емкости, облегчающей согласование с предварительным усилителем.

В перспективе улучшить данные параметры КП можно применением в качестве канала давления цилиндрического пьезоэлемента, одновременно являющегося внешним корпусом КП [15].

Параметры разработанного КП определялись расчётным путём с использованием программы ANSYS с помощью конечно-элементной модели.

В результате расчётов получены следующие характеристики КП на частотах от 10 до 500 Гц:

- частота резонанса 10 кГц;
- чувствительность канала давления 105 мкВ/Па с неравномерностью по частоте менее 0,5 дБ;
- чувствительность векторных каналов 100 мВ/(м/с<sup>2</sup>);
- коэффициент деления 21 дБ.

### 3. Способы отстройки КП от шумов буксировщика, вибраций и шумов обтекания

Поскольку ГАС с ГПБА предназначена для работы в низком звуковом и инфразвуковом диапазонах частот, важное значение имеет отстройка гидроакустических приёмников ГПБА от воздействия на них шумов буксировщика, а также вибрации и шумов обтекания, возникающих при буксировке. Проблема существенно обостряется при создании ГПБА на базе КП, поскольку векторные каналы КП имеют более высокую восприимчивость к низкочастотным шумам и вибрациям, чем приёмники давления.

Поскольку шумы буксировщика и шумы обтекания имеют ярко выраженную направленность, они частично подавляются самими КП, векторные кана-

лы которых, ортогональные линии ГПБА, слабо восприимчивы к шумам, распространяющимся вдоль линии ГПБА [10, 13–15].

Для отстройки от вибрации и шумов обтекания целесообразно воспользоваться известными отработанными конструктивными решениями, показавшими свою эффективность на практике. К ним относятся:

- включение в состав ГПБА виброрезонансной демпфирующей рывки при буксировке;
- уменьшение расстояния между приёмниками и соответственно увеличение их количества, что обеспечивает сглаживание всех видов помех;
- применение многослойной оболочки ГПБА, уменьшающей воздействие на приёмники шумов обтекания.

Далее целесообразно воспользоваться известными алгоритмическими решениями, в частности, адаптивными алгоритмами пространственной обработки [19]. Одно из них описано выше (рис. 10).

Также целесообразно вспомнить, что создание отечественных ГПБА на рубеже 1980-х годов началось с применения старт-стопного режима буксировки, при котором приём и обработка сигналов с выхода приёмников осуществлялись при нахождении ГПБА в покое. Для этого при движении буксировщика ГПБА за счёт наматывания кабель-троса на барабан подтягивалась ближе к корме буксировщика, а затем барабан снимался со стопора, кабель-трос при движении буксировщика свободно сматывался с барабана, а ГПБА оставалась неподвижной. В результате исчезали шумы, обусловленные буксировкой.

Тогда от старт-стопного режима пришлось отказаться ввиду того, что в процессе намотки кабель-троса на барабан издавались шумы большого уровня, демаскирующие буксировщика. В настоящее время эту проблему можно преодолеть.

## Заключение

1. Замена в ГПБА приёмников давления на комбинированные приёмники позволяет:

- повысить в 3 раза помехоустойчивость (конкретно коэффициент концентрации) ГПБА;
- обеспечить однозначное определение пеленга обнаруженной цели;
- обеспечить работоспособность ГПБА при маневрировании буксировщика по курсу.

2. В работе путём моделирования выполнена сравнительная оценка ГПБА на базе приёмников давления и на базе КП по помехоустойчивости, разреша-

ющей способности и способности однозначно определять пеленг обнаруженной цели.

3. Для ГПБА на базе КП в работе предложены:

- конструкция четырёхканального КП со встроенным инклинометром, позволяющим контролировать вращение ГПБА вокруг собственной оси;

- технические и алгоритмические методы подавления шумов буксировщика, вибраций и шумов обтекания при буксировке.
- алгоритм восстановления формы ГПБА при маневрировании буксировщика по курсу.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект №25-29-01261).*

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Корякин Ю.А., Смирнов С.А., Яковлев Г.В. Корабельная гидроакустическая техника. Состояние и актуальные проблемы // СПб.: Наука, 2004.
2. Jane's Fighting Ships 2025–2026. Jane's Grope United Kingdom Limited. TJ Books. 1068 p.
3. Урик Р. Дж. Основы гидроакустики. Л.: Судостроение, 1978.
4. Смарышев М.Д. Направленность гидроакустических антенн. Л.: Судостроение, 1973. 278 с.
5. Смарышев М.Д. Об использовании комбинированных приёмников и антенн в корабельной гидроакустике // Гидроакустика. 2016. Вып. 25 (1). С. 5–16.
6. Каришнев Н.С., Полканов К.И., Белова Н.И., Кузнецов Г.Н. Однозначное пеленгование целей протяжённой антенной со скалярными и векторно-скалярными модулями // Гидроакустика. 2012. Вып. 15. С. 42–47.
7. Кузнецов Г.Н., Михнюк А.Н., Смирнов Н.М., Полканов К.И. Использование буксируемого векторно-скалярного модуля и согласованной фильтрации для однозначной оценки координат штрополюсного источника в пассивном режиме // Гидроакустика. 2015. Вып. 24. С. 36–51.
8. US 7599253B1. Hybrid pressure and vector sensor towed array. 2009.
9. Poulsen A.J. Robust vector sensor array processing and performance analysis. PhD thesis. Massachusetts Institute of Technology, 2009. 186 p.
10. Коренбаум В.И. Защита акустических устройств от ближних полей собственных помех: дис. ... д-ра техн. н. / Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН. Владивосток, 1999.
11. Гордиенко В.А. Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Физматлит, 2007. 480 с.
12. Скреби́н Г.К. Комбинированные гидроакустические приёмники. СПб: Элмор, 1997. 200 с.
13. Коренбаум В.И., Тагильцев А.А., Мальцев Ю.В. Векторная гибкая протяжённая буксируемая антенна для океанологических исследований // Приборы и техника эксперимента. 2015. № 3. С. 122–124.
14. Патент РФ № 2501043 с приоритетом от 17.07.2012. Комбинированный гидроакустический приёмник для гибкой протяжённой буксируемой антенны / Коренбаум В.И., Тагильцев А.А. Оpubл. 10.02.13; бюлл. № 34.
15. Тагильцев А.А., Коренбаум В.И. Векторно-скалярный приемник инерционного типа для ГПБА // Технические проблемы освоения Мирового океана. 2015. Т. 6. С. 185–188.
16. Schmidt H., Kuperman W.A. Estimation of surface noise source levels from low-frequency seismo-acoustic ambient noise measurements // J. Acoust. Soc. Am. 1988. Vol. 84. P. 2153–2162.
17. Thode A.M., D'Spain G.L., Kuperman W.A. Matched-field processing, geoacoustic inversion, and source signature recovery of blue whale vocalizations // J. Acoust. Soc. Am. 2000. Vol. 107. P. 1286–1300.
18. Greene Jr.C.R., McLennan M.W., Norman R.G., McDonald T.L., Jakubczak R.S., Richardson W.J.. Directional frequency and recording (DIFAR) sensors in seafloor recorders to locate calling bowhead whales during their fall migration // J. Acoust. Soc. Am. 2004. Vol. 116. P. 799–813.
19. Мальшкин Г.С. Оптимальные и адаптивные методы обработки гидроакустических сигналов: В 2-х томах. Т. 2. Адаптивные методы. СПб: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2011. 374 с.
20. Мальцева С.А. Разработка методов и средств оценки формы ГПБА. Дис. ... канд. техн. н. СПб: ГЭТУ «ЛЭТИ», 2018.
21. Анучин О.Н., Емельянцева Г.И. Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов. СПб.: ГИЦ РФ – ЦНИИ «Электроприбор», 2003. 390 с.

## Сведения об авторах

**ГРУЗДЕВ Павел Дмитриевич**, ведущий инженер  
АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»  
Адрес: 197046, г. Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, д. 30  
**Область научных интересов:** гидроакустические антенны  
**E-mail:** pdgruzdev@yandex.ru  
**Тел. (моб.):** +79112860051  
**ORCID:** 0009-0006-2873-9861

**МАШОШИН Андрей Иванович**, д.т.н., профессор, начальник научно-исследовательского центра  
АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»  
Адрес: 197046, г. Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, д. 30  
**Область научных интересов:** гидроакустика, разработка систем управления АНПА

**E-mail:** aimashoshin@mail.ru  
**Тел. (моб.):** +79217632345  
**ORCID:** 0000-0002-4785-966X

**ПАДЕРИНА Татьяна Владимировна**, к.т.н., старший научный сотрудник  
АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»  
Адрес: 197046, г. Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, д. 30  
**Область научных интересов:** разработка гироскопических приборов  
**E-mail:** paderinata@gmail.com  
**Тел. (моб.):** +79112106379  
**ORCID:** 0000-0001-5293-6351

# A FLEXIBLE LONG-RANGE TOWED ANTENNA BASED ON VECTOR-SCALAR RECEIVERS

**P.D. Gruzdev, A.I. Mashoshin, T.V. Paderina**

The aim of the work is to investigate the characteristics of a flexible long-range towed antenna (TA) based on combined (vector-scalar) receivers (CR). It is shown that the replacement of pressure receivers in the TA with combined receivers allows: to increase the noise immunity (specifically the concentration coefficient) of the TA by 3 times; to ensure an unambiguous determination of the bearing of the detected target; to ensure the operability of the TA when maneuvering the towboat along the course. It is stated that in order to create an effective TA based on the CR, it is necessary to solve a number of technological problems: to develop a small-sized, interference-resistant, and reliable four-channel CR, which includes an inclinometer that allows for the control of the TA's rotation around its own axis; and to ensure the suppression of vibrations and flow noise during towing. The article presents the design of the CR, which was specifically developed for integration into the TA, as well as the technical and algorithmic methods for suppressing vibrations and flow noise during towing. Additionally, an algorithm for restoring the shape of the TA during the tugboat's course maneuvering is proposed.

**Keywords:** hydroacoustics, flexible long-range towed antenna, vector-scalar receiver, noise immunity, resolution capacity, flow noise.

## References

1. Koryakin Yu.A., Smirnov S.A., Yakovlev G.V. Korabelnaya gidroakusticheskaya tehnika. Sostoyanie i aktualnii problem. Sankt-Peterburg: Nauka, 2004.
2. Jane's Fighting Ships 2025-2026 // Jane's Grope United Kingdom Limited. TJ Books. 1068 p.
3. Urick R.J. Principles of underwater sound. McGraw-Hill Book Company. 1975. 433 p.
4. Smarishev M.D. Napravlenost gidroakusticheskikh antenn. Leningrad: Sudostroenie. 1973. 278 p.
5. Smaryshev M.D. Ob ispol'zovanii kombinirovannykh priyomnikov i antenn v korabel'noy gidroakustike // Gidroakustika. 2016. №25 (1). S.5-16.
6. Karishnev N.S., Polkanov K.I., Belova N.I., Kuznetsov G.N. Odnoznachnoye pelengovaniye tseley protyazhonnoy antennoy so skalyarnymi i vektorno-skalyarnymi modulyami // Gidroakustika. 2012. Vyp.15. S.42-47
7. Kuznetsov G.N., Mikhnyuk A.N., Smirnov N.M., Polkanov K.I. Ispol'zovaniye buksiruyemogo vektorno-skalyarnogo modulya i soglasovannoy fil'tratsii dlya odnoznachnoy otsenki koordinat shtrokopolosnogo istochnika v passivnom rezhime // Gidroakustika. 2015. Vyp.24. S.36-51
8. US 7599253B1. Hybrid pressure and vector sensor towed array. 2009.
9. Poulsen A.J. Robust vector sensor array processing and performance analysis. PhD thesis. Massachusetts Institute of Technology. 2009. 186 p.
10. Korenbaum V.I. Zashchita akusticheskikh ustroystv ot blizhnikh poley sobstvennykh pomekh // Diss. dokt. tekhn. n. Tikhookeanskiy okeanologicheskii institut im. V.I.Ilicheva DVO RAN.- Vladivostok. 1999.
11. Gordiyenko V.A. Vektorno-fazovyye metody v akustike. M.: Fizmatlit. 2007. 480s.
12. Skrebnov G.K. Kombinirovannyye gidroakusticheskiye priyomniki. – SPb: Elmor, 1997. 200 s.
13. Korenbaum V.I., Tagiltsev A.A., Mal'tsev YU.V. Vektornaya gibkaya protyazhonnoy buksiruyemaya antenna dlya okeanologicheskikh issledovaniy // Pribory i tekhnika eksperimenta. 2015. №3. S.122-124.
14. Patent RF № 2501043 s prioritom ot 17.07.2012. Kombinirovannyy gidroakusticheskii priyomnik dlya gibkoy protyazhonnoy buksiruyemoy antennoy. Avtory: Korenbaum V.I., Tagiltsev A.A. Opubl. 10.02.13, byull. № 34.
15. Tagiltsev A.A., Korenbaum V.I. Vektorno-skalyarnyy priyemnik inertsionnogo tipa dlya GPBA // Tekhnicheskiye problemy osvoyeniya Mirovogo okeana. 2015. T. 6. S. 185-188.
16. Schmidt H., Kuperman W.A.. Estimation of surface noise source levels from low-frequency seismo-acoustic ambient noise measurements // J. Acoust. Soc. Am. 1988. V.84. P.2153-2162.
17. Thode A.M., D'Spain G.L. Kuperman W.A.. Matched-field processing, geoacoustic inversion, and source signature recovery of blue whale vocalizations // The Journal of the Acoustical Society of America. 2000. V.107. P.1286-1300.
18. Greene Jr.C.R., McLennan M.W., Norman R.G., McDonald T.L., Jakubezak R.S., Richardson W.J.. Directional frequency and recording (DI-FAR) sensors in seafloor recorders to locate calling bowhead whales during their fall migration // The Journal of the Acoustical Society of America. 2004. V.116. P.799-813.
19. Mal'yshkin G.S. Optimal'nyye i adaptivnyye metody obrabotki gidroakusticheskikh signalov. V 2-kh tomakh. Tom 2. Adaptivnyye metody. OAO "Kontsern" "TSNII "Elektropribor". 2011. 374 s.
20. Mal'tseva S.A. Razrabotka metodov i sredstv otsenki formy GPBA. Dissertatsiya na soiskaniya uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk SPb GETU «LETI». 2018.
21. Anuchin O.N., Yemel'yantsev G.I. Integrirovannyye sistemy orientatsii i navigatsii dlya morskikh podvizhnykh ob'yektov // SPb.: GNTS RF – TSNII «Elektropribor», 2003. 390 s.

## Information about the authors

**GRUZDEV Pavel Dmitrievich**, leading engineer

JSC «Concern «Elektropribor»

**Scientific interests** in hydroacoustic antenna

**Work address:** 197046, Saint-Petersburg, Malaya Posadskaya str., 30

**E-mail:** pdgruzdev@yandex.ru

**Phone:** +79112860051

**ORCID:** 0009-0006-2873-9861

**MASHOSHIN Andrey Ivanovich**, doctor of science, professor, chief of the research center

JSC «Concern «Elektropribor»

**Scientific interests** in underwater acoustic, AUV control systems

**Work address:** 197046, Saint-Petersburg, Malaya Posadskaya str., 30

**E-mail:** aimashoshin@mail.ru

**Phone:** +79217632345

**ORCID:** 0000-0002-4785-966X

**PADERINA Tatyana Vladimirovna**, senior researcher

JSC «Concern «Elektropribor»

**Scientific interests** in gyroscopic devices

**Work address:** 197046, Saint-Petersburg, Malaya Posadskaya str., 30

**E-mail:** paderinata@gmail.com

**Phone:** +79112106379

**ORCID:** 0000-0001-5293-6351



### Recommended citation:

Gruzdev P.D., Mashoshin A.I., Paderina T.V. A FLEXIBLE LONG-RANGE TOWED ANTENNA BASED ON VECTOR-SCALAR RECEIVERS. UNDERWATER INVESTIGATIONS AND ROBOTICS. 2026. No. 2 (56). P. 80–93. DOI: 10.37102/1992-4429\_2026\_56\_02\_08. EDN: WVUMJE.

