

На правах рукописи

**Михнюк Александр Николаевич**

**Методы повышения эффективности функционирования мультистатической системы  
подводного наблюдения**

Специальность 01.04.06 – Акустика

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2018

**Работа выполнена** в Научном центре волновых исследований федерального государственного учреждения науки Института общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук

Научный руководитель: **Драченко Владимир Николаевич,**  
кандидат технических наук

Официальные оппоненты: **Хилько Александр Иванович,**  
доктор физико-математических наук

**Глебова Галина Михайловна,**  
кандидат технических наук

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет»

Защита состоится \_\_\_\_\_ 2018 г. в 15<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 002.063.01 при Институте общей физики им. А. М. Прохорова РАН по адресу: г. Москва, ул. Вавилова, д. 38, к. 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института общей физики им. А. М. Прохорова РАН и на сайте [www.gpi.ru](http://www.gpi.ru)

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 002.063.01  
при Институте общей физики  
им. А. М. Прохорова РАН,  
д.ф.-м.н.

Кузькин В.М.

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Интенсивное развитие и освоение акваторий в пределах морской экономической зоны государства, а также освоение морских просторов в масштабе Мирового океана обусловили необходимость разработки и создания систем подводного наблюдения. Одним из наиболее перспективных классов подобных систем являются мультистатические системы подводного наблюдения (МСПН), которые представляют собой систему пространственно разнесенных гидролокационных станций с пересекающимися зонами обзора. Подклассом таких систем являются МСПН для обнаружения малоразмерных подводных объектов, на примере которых ведется рассмотрение в настоящей работе.

В связи со значительным прогрессом в развитии и применении различного рода морских подводных малоразмерных роботизированных средств и комплексов в морской хозяйственной деятельности, возникает необходимость организации наблюдения при выполнении следующих процессов:

- подводный мониторинг акваторий с целью отслеживания перемещений морских животных и рыб;
- охраны акваторий от несанкционированного проникновения различных подводных объектов;
- получение данных по текущим координатам всех обнаруженных в акватории объектах и параметрам их движения;
- навигационное обеспечение для контроля и управления режимами движения подводных роботизированных средств.

Проведенный анализ развития гидроакустических средств позволяет выделить мультистатический режим работы гидроакустических средств обнаружения подводных объектов как приоритетное направление, которое будет совершенствоваться за счет расширения частотного диапазона, перехода функционирования на шумоподобные сигналы, отстройку от реверберационной помехи и внедрения активно-пассивных многопозиционных систем.

На настоящее время разработаны принципы построения мультистатических систем, различные алгоритмы совместной обработки информации в мультистатическом режиме, выполнена оценка ошибок целеуказания, обусловленных неточным позиционированием станций, поднимался вопрос оценки эффективности мультистатической локации. Однако остается ряд специфических задач, корректное решение которых также позволит повысить эффективность функционирования системы.

**Целью** данного исследования является разработка новых методов способствующих повышению эффективности функционирования МСПН применительно к задаче обнаружения и целеуказания для малоразмерных движущихся подводных объектов

Предметом диссертационного исследования являются методы повышения эффективности функционирования мультистатической системы подводного наблюдения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести комплексный анализ эффективности функционирования МСПН применительно к задаче обнаружения малоразмерного движущегося подводного объекта, включающий в себя оценку применения существующих методов обработки информации.
2. Разработать современные методы обработки сигналов, реализующие повышение эффективности функционирования МСПН.
3. Разработать методику оценки вклада в эффективность функционирования МСПН предлагаемых методов.
4. Провести оценку повышения эффективности функционирования МСПН, с учетом предлагаемых методов.

**Научная новизна** заключается в разработке комплекса методов решения задач обработки гидроакустической информации, позволяющих повысить эффективность МСПН. Разработанная в диссертации методика оценки функционирования МСПН позволяет количественно определить вклад предлагаемых алгоритмов в эффективность ее работоспособность.

**Теоретическая значимость** заключается в развитии математического описания методов, повышающих эффективность МСПН.

**Практическая значимость** заключается в развитии цифровой обработки гидроакустической информации, позволяющей улучшать технические характеристики гидроакустических станций функционирующих в мультистатическом режиме. Областью применения результатов является организация мониторинга акваторий с помощью МСПН для решения задачи обнаружения и целеуказания движущихся подводных объектов.

**Методы исследования** включают в себя математическое моделирование сигналов и помех (в лучевом приближении), функционирования МСПН, применение теории обнаружения, статистического анализа и обработку результатов натурных экспериментов.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Режекция мощного прямого поля от соседних ГЛС, входящих в состав МСПН, увеличивает вероятность обнаружения движущихся подводных объектов.

2. Идентификация обнаруженных МСПН эхо-сигналов и комплексирование их параметров повышает точность оценки координат подводных объектов.

3. Динамическое позиционирование ГЛС в составе МСПН уменьшает смещение оценок координат подводных объектов.

4. Методика оценки вклада разработанных методов в эффективность функционирования МСПН, позволяет количественно определить их роль и место в увеличении эффективности функционирования МСПН.

**Достоверность и апробация результатов** основывается на следующих материалах:

- публикация автором 8 печатных работ по теме диссертационного исследования, из них в изданиях рекомендованных ВАК России – 6;

- участие автора в 2 конференциях по задачам диссертационной работы;

- использование результатов диссертационной работы при разработке технических средств подводного мониторинга (2 акта внедрения);

- научно-технические отчеты (более 30 шт.), выпущенные в рамках выполнения НИОКР НЦВИ ИОФ РАН («Самолов», «Аргонавт», «Тильда», «Олимп», «Кижуч–Гидросовместимость», «Валдай»);

- участие автора в многочисленных натуральных морских экспериментальных исследованиях (Охотское море, озеро Тунайча о. Сахалин, Японское море, Баренцево море, Черное море, Пироговское вдхр., Химкинское вдхр., Ивановское вдхр.).

**Личный вклад автора** состоит в разработке методов, повышающих результативность МСПН; исследовании эффективности алгоритмов, реализующих указанные методы путем численного моделирования; в непосредственном участии в многих натуральных экспериментах; в обработке полученной гидроакустической информации и в анализе полученных результатов. Все вошедшие в диссертацию научные результаты получены автором лично или при его непосредственном участии.

**Благодарности.** Автор выражает глубокую благодарность своим научным руководителям д.ф.-м.н. В.В. Бородину и к.т.н. В.Н. Драченко за неоценимую помощь при подготовке диссертационной работы.

## **Содержание работы**

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и 1 приложения, изложена на 173 страницах и содержит 63 рисунка и 15 таблиц. Список литературы содержит 169 наименований.

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы задачи исследований и проведен анализ научной новизны полученных результатов и их практической ценности. Описывается структура диссертации.

**В первой главе** рассмотрены особенности функционирования МСПН применительно к задаче обнаружения малоразмерного движущегося подводного объекта, проведен анализ особенностей построения МСПН, влияющих на эффективность, описаны качественные и количественные критерии и показатели, характеризующие эффективность функционирования МСПН.

Проведен анализ методов обработки сигнально-помеховой ситуации, влияющих на эффективность работы МСПН с учетом особенностей обнаружения малоразмерного движущегося подводного объекта и анализа математических моделей гидроакустических полей. В рамках данной работы используется лучевое представление акустических полей.

*Модель поля прямого сигнала.* Пусть в некоторой точке с координатами  $\mathbf{r}_S$  расположен излучатель с диаграммой направленности  $\mathbf{P}_S(\mathbf{e} - \mathbf{e}_S^0; \omega)$ , где  $\mathbf{e}$  – единичный вектор, определяющий направление излучения,  $\mathbf{e}_S^0$  – единичный вектор, определяющий направление компенсации излучающей антенны, излучающей сигнал  $f(t)$  со спектром  $S(\omega)$ . Тогда поле прямого сигнала, как известно, можно представить в следующем виде:

$$p_S(\mathbf{r}_S, \mathbf{r}_R; \omega) = \sqrt{\frac{W \rho c \gamma_s}{4\pi}} \sum_{\mu=1}^{M(\mathbf{r}_S, \mathbf{r}_R)} A_\mu(\mathbf{r}_S, \mathbf{r}_R) e^{i\omega t_\mu(\mathbf{r}_S, \mathbf{r}_R) + i\frac{\omega}{c}(\mathbf{e}_\mu(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}_S), \mathbf{r}_S - \mathbf{r}_R)} \mathbf{P}_S(\mathbf{e}_\mu(\mathbf{r}_S, \mathbf{r}_R) - \mathbf{e}_S^0; \omega) S(\omega),$$

где  $W$  – мощность излученного сигнала,  $\rho$  – плотность среды,  $c$  – скорость звука в среде,  $\gamma_s$  – коэффициент концентрации излучающей антенны,  $\mathbf{r}_R$  – координаты фазового центра приемной антенны,  $M(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}_S)$  – число лучей, соединяющих точки излучения и приема,  $\mathbf{e}_\mu(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}_S)$  – единичный вектор, касательный к  $\mu$ -му лучу в точке приема,  $\mathbf{e}_\mu(\mathbf{r}_S, \mathbf{r}_R)$  – единичный вектор, касательный к  $\mu$ -му лучу в точке излучения,  $t_\mu(\mathbf{r}_S, \mathbf{r}_R)$  – время распространения сигнала по  $\mu$ -му лучу,  $A_\mu(\mathbf{r}_S, \mathbf{r}_R; \omega) = \frac{F_\mu(\mathbf{r}_S, \mathbf{r}_R; \omega)}{R(\mathbf{r}_S, \mathbf{r}_R)}$  – амплитуда поля, пришедшего по  $\mu$ -му лучу,  $F_\mu(\mathbf{r}_S, \mathbf{r}_R; \omega) = \sqrt{f_\mu(\mathbf{r}_S, \mathbf{r}_R)} \cdot V_\mu(\mathbf{r}_S, \mathbf{r}_R; \omega)$ ,  $f_\mu(\mathbf{r}_S, \mathbf{r}_R)$  – фактор фокусировки для  $\mu$ -го луча,  $V_\mu(\mathbf{r}_S, \mathbf{r}_R; \omega) = (V_{\text{Surf}}(\mu))^{n_{\text{Surf}}} (V_{\text{Bot}}(\mu))^{n_{\text{Bot}}} \cdot 10^{-0.05\beta_{\text{Wat}} c t_\mu(\mathbf{r}_S, \mathbf{r}_R)}$  – коэффициенты, учитывающие ослабление поля при распространении по соответствующим лучам вследствие  $n_{\text{Surf}}$ ,  $n_{\text{Bot}}$  взаимодействий с границами волновода с коэффициентами отражения  $V_{\text{Surf}}(\mu)$ ,  $V_{\text{Bot}}(\mu)$  и вследствие поглощения в воде с коэффициентом затухания  $\beta_{\text{Wat}}$  (в дБ/км),  $R(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$  – расстояние в горизонтальной плоскости между источником и точкой наблюдения.

*Модель поля эхо-сигнала.* Пусть  $\mathbf{r}_S$  – координаты излучающей антенны с диаграммой направленности  $\mathbf{P}_S(\mathbf{e} - \mathbf{e}_S^0; \omega)$ , где  $\mathbf{e}$  – единичный вектор, определяющий направление излучения,  $\mathbf{e}_S^0$  – единичный вектор, определяющий направление компенсации излучающей антенны, излучающей сигнал  $f(t)$  со спектром  $S(\omega)$ ;  $\mathbf{r}_T$  – координаты цели;  $\mathbf{r}_R$  – координаты приемной антенны. В этом случае поле эхо-сигнала имеет в вид:

$$p_T(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}_T, \mathbf{r}_S; \omega) = \sqrt{\frac{W \rho c \gamma_S}{4\pi}} \cdot \sum_{\nu=1}^{N(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}_T)} \sum_{\mu=1}^{M(\mathbf{r}_T, \mathbf{r}_S)} A_\nu(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}_T; \omega) A_\mu(\mathbf{r}_T, \mathbf{r}_S; \omega) \cdot e^{i\omega(t_\mu(\mathbf{r}_T, \mathbf{r}_S) + t_\nu(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}_T))} \times \\ \times \frac{1}{2} R_T(\mathbf{e}_\nu, \mathbf{e}_\mu; \omega) \cdot \mathbf{P}_S(\mathbf{e}_\mu - \mathbf{e}_S^0; \omega) \cdot S(\omega)$$

где  $W$  – мощность излученного сигнала,  $\rho$  – плотность среды,  $c$  – скорость звука в среде,  $\gamma_S$  – коэффициент концентрации излучающей антенны,  $M(\mathbf{r}_T, \mathbf{r}_S)$  – число лучей, соединяющих точки излучения и цели,  $N(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}_T)$  – число лучей, соединяющих точки цели и приема,  $\mathbf{e}_\mu$  – единичный вектор, касательный к  $\mu$ -му лучу в точке излучения,  $\mathbf{e}_\nu$  – единичный вектор, касательный к  $\nu$ -му лучу в точке приема,  $A_\mu(\mathbf{r}_T, \mathbf{r}_S; \omega)$  – амплитуда  $\mu$ -го луча, соединяющего точки излучения и цели,  $A_\nu(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}_T; \omega)$  – амплитуда  $\nu$ -го луча, соединяющего точки цели и приема,  $R_T(\mathbf{e}_\nu, \mathbf{e}_\mu; \omega)$  – эквивалентный радиус цели.

*Модель собственной помехи.* Относительно собственной помехи мы предполагаем, что она гауссова, центрирована, некоррелирована между приемниками и стационарна во времени, так что полностью описывается своей функцией временной корреляции:

$$\mathbf{K}_{N_1}(\mathbf{r}_s, \mathbf{r}_q, t_1, t_2) = \mathbf{K}_{N_1}(t_1 - t_2) \delta(\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_q),$$

где  $\mathbf{r}_s$  и  $\mathbf{r}_q$  – координаты  $s$ -го и  $q$ -го приемников.

*Модель поля шумов моря.* В качестве модели шумов моря принято шумовое поле, создаваемое равномерным распределением источников звука в тонком приповерхностном слое:

$$N(\chi, z; \omega) = N_0(\chi_{\text{Surf}}(\chi, z; \omega) \frac{c^2(0)}{c^2(z)}) \times \begin{cases} e^{-2\beta R_+(\chi)}, & \chi \geq 0, \\ e^{-2\beta R_-(\chi)} |V_{\text{Bot}}(\chi_{\text{Bot}}(\chi, z; \omega))|^2, & \chi < 0, \end{cases}$$

где  $N_0(\chi; \omega) = S_{\text{Surf}}(\chi; \omega) \left(1 - |V_{\text{Surf}}(\chi; \omega) V_{\text{Bot}}(\chi_{\text{Bot}}(\chi, 0); \omega) e^{-\beta R(\chi)}|^2\right)^{-1}$ ,

$S(\chi; \omega) = \kappa_{\text{Surf}}(\omega) \sin^{2u_{\text{Surf}}-1}(\chi)$  – частотно-угловой спектр поверхностных источников шума,  $\kappa_{\text{Surf}}(\omega)$  – спектральная плотность мощности поверхностных источников,  $u_{\text{Surf}}$  – показатель степени в диаграмме направленности поверхностных источников шума,  $R(\chi)$  – длина цикла луча, имеющего угол скольжения  $\chi$  на поверхности,  $\chi_{\text{Bot}}(\chi, z)$  – угол скольжения у дна луча,

вышедшего с горизонта  $z$  по углом  $\chi$ ,  $\beta = 0.1(\ln 10)\beta_{Wat}(\omega)$  – коэффициент затухания в воде,  $R_+(\chi)$  и  $R_-(\chi)$  – длины дуг лучей, соединяющих фазовый центр антенны с поверхностью и вышедших из него соответственно вверх и вниз с углом скольжения  $\chi$ ,  $\chi_{Surf}(\chi; z)$  – УГОЛ скольжения у поверхности луча, вышедшего с горизонта  $z$  под углом  $\chi$ ,  $V_{Bot}(\chi; \omega)$  – коэффициент отражения от дна.

Матрица спектральных плотностей шумов моря имеет вид:

$$\mathbf{K}_{N_2}(\mathbf{r}_r - \mathbf{r}_{r'}, \omega) = \int N(\mathbf{e}, \omega) \exp\left(i \frac{\omega}{c}(\mathbf{e}, \mathbf{r}_r - \mathbf{r}_{r'})\right) d\Omega,$$

где  $\mathbf{N}(\mathbf{e}, \omega)$  – угловой спектр шумов окружающей среды,  $\mathbf{e}$  – единичный вектор наблюдения,  $\mathbf{r}_r$  – координаты  $r$ -го приемника антенны,  $d\Omega$  – элемент телесного угла.

*Модель поля помехи ближнего судоходства.* Пусть вблизи приемной антенны находятся  $N_M$  кораблей в точках с координатами  $\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_{N_M}$ . Будем предполагать, что каждый из них излучает независимый, стационарный гауссовский шум с нулевым математическим ожиданием и спектральной плотностью  $\mathfrak{a}_S(\omega)$ . Тогда матрица спектральных плотностей помехи ближнего судоходства будет иметь вид:

$$\mathbf{K}_{N_3}(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}_{R'}; \omega) = \sum_{s=1}^{N_M} \mathbf{G}(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}_S; \omega) \mathbf{G}^*(\mathbf{r}_{R'}, \mathbf{r}_S; \omega) \mathfrak{a}_S(\omega),$$

где:  $\mathbf{G}(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}_S; \omega)$  – функция Грина для корреспондирующих точек  $\mathbf{r}_R$  и  $\mathbf{r}_S$ ,  $\mathbf{r}_R, \mathbf{r}_{R'}$  – координаты приемников антенны.

*Модель поля реверберационной помехи.* При вычислении реверберационной помехи используются следующие выражения:

- мгновенная интенсивность однократной объемной реверберации, созданная рассеянием на элементе  $dV$  объема:

$$\begin{aligned} dI_{Vol}^{Rev}(t) &= \frac{W\rho c \gamma_S}{4\pi} dV(\mathbf{r}) \sum_{\mu=1}^{M(\mathbf{r}_R, \mathbf{r})} \sum_{\nu=1}^{N(\mathbf{r}, \mathbf{r}_S)} m_{Vol}(-\mathbf{e}_\mu(\mathbf{r}, \mathbf{r}_R), \mathbf{e}_\nu(\mathbf{r}, \mathbf{r}_S); \omega, \mathbf{r}) \cdot \\ &\cdot A_\nu^2(\mathbf{r}, \mathbf{r}_S; \omega) \mathbf{P}_S^2(\mathbf{e}_\nu(\mathbf{r}_S, \mathbf{r}) - \mathbf{e}_S^0; \omega) \cdot A_\mu^2(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}; \omega) \mathbf{P}_R^2(\mathbf{e}_\mu(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}) - \mathbf{e}_R^0; \omega) \cdot \\ &\cdot S^2(t - t_\mu(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}) - t_\nu(\mathbf{r}, \mathbf{r}_S)), \end{aligned}$$

- мгновенная интенсивность однократной граничной реверберации, созданная рассеянием на элементе  $d\Sigma$  границы  $\Sigma$ :

$$\begin{aligned} dI_{Bot}^{Rev}(t) &= \frac{W\rho c \gamma_S}{4\pi} d\Sigma(\mathbf{r}) \sum_{\mu=1}^{M(\mathbf{r}_R, \mathbf{r})} \sum_{\nu=1}^{N_{Surf/Bot}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_S)} m_{Surf/Bot}(-\mathbf{e}_\mu(\mathbf{r}, \mathbf{r}_R), \mathbf{e}_\nu(\mathbf{r}, \mathbf{r}_S); \omega, \mathbf{r}) \cdot \\ &\cdot A_\nu^2(\mathbf{r}, \mathbf{r}_S; \omega) \mathbf{P}_S^2(\mathbf{e}_\nu(\mathbf{r}_S, \mathbf{r}) - \mathbf{e}_S^0; \omega) \cdot A_\mu^2(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}; \omega) \mathbf{P}_R^2(\mathbf{e}_\mu(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}) - \mathbf{e}_R^0; \omega) \cdot \\ &\cdot S^2(t - t_\mu(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}) - t_\nu(\mathbf{r}, \mathbf{r}_S)), \end{aligned}$$



где  $W$  – мощность излученного сигнала,  $\rho$  – плотность среды,  $c$  – скорость звука в среде,  $\gamma_s$  – коэффициент концентрации излучающей антенны,  $\mathbf{r}$  – координаты точки, в которой происходит рассеяние,  $\mathbf{r}_S$  – координаты фазового центра излучающей антенны,  $\mathbf{r}_R$  – координаты фазового центра приемной антенны,  $M(\mathbf{r}_R, \mathbf{r})$  – число лучей, соединяющих приемную антенну  $\mathbf{r}_R$  и точку, в которой происходит рассеяние,  $N(\mathbf{r}, \mathbf{r}_S)$  – число лучей, соединяющих излучатель  $\mathbf{r}_S$  и точку, в которой происходит рассеяние,  $m_{Vol}$  и  $m_{Surf/Bot}$  – коэффициенты обратного рассеяния объемной и граничной реверберации соответственно,  $\mathbf{e}_\nu(\mathbf{r}, \mathbf{r}_S)$  и  $\mathbf{e}_\nu(\mathbf{r}_S, \mathbf{r})$  – единичные векторы падающей волны в точке рассеяния и излучения соответственно,  $\mathbf{e}_\mu(\mathbf{r}, \mathbf{r}_R)$  и  $\mathbf{e}_\mu(\mathbf{r}_R, \mathbf{r})$  – единичные векторы рассеянной волны в точке рассеяния и приема соответственно,  $A_\nu(\mathbf{r}, \mathbf{r}_S; \omega)$  – амплитуда поля, пришедшего по  $\nu$ -му лучу, от излучателя в точку, в которой происходит рассеяние,  $A_\mu(\mathbf{r}, \mathbf{r}_R; \omega)$  – амплитуда поля, пришедшего по  $\mu$ -му лучу, из точки рассеяния в точку приема,  $\mathbf{P}_S(\mathbf{e}_\nu(\mathbf{r}_S, \mathbf{r}) - \mathbf{e}_S^0; \omega)$  и  $\mathbf{P}_R(\mathbf{e}_\mu(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}) - \mathbf{e}_R^0; \omega)$  – диаграммы направленности излучающей и приемной антенн соответственно;  $\mathbf{e}_S^0$  и  $\mathbf{e}_R^0$  – единичные вектора, соответствующие направлениям компенсации излучающей и приемной антенн,  $t_\nu(\mathbf{r}, \mathbf{r}_S)$  и  $t_\mu(\mathbf{r}_R, \mathbf{r})$  – времена распространения по  $\nu$ -му и  $\mu$ -му лучам от излучателя в точку рассеяния и от точки рассеяния к приемнику соответственно,  $S(t)$  – излучаемый сигнал.

Полная интенсивность реверберации определяется интегрированием соответствующих выражений по всему объему волновода или по всей границе.

Формализованную постановку задачи по оценке эффективности функционирования МСПН можно сформулировать исходя из того, что основной целью функционирования МСПН является обнаружение и оценка координат малоразмерного движущегося подводного объекта. В данном случае, эффективность функционирования системы подводного наблюдения – это решение функциональных задач системы наблюдения с требуемой точностью с выдачей результата силам охраны прибрежного или морского объекта. Основным критерием эффективности как отдельной ГЛС, так и МСПН является дальность обнаружения подводного объекта. Однако помимо дальности обнаружения существенным фактором является и точность оценки текущих координат объекта и параметров его движения. Следовательно, для более корректной оценки эффективности функционирования МСПН критерий эффективности необходимо расширить, с учетом точности оценки координат обнаруженных объектов. В качестве комплексного критерия эффективности функционирования МСПН в данной работе применяется вероятность перехвата цели силами охраны.

В результате проведенного анализа особенностей функционирования МСПН выявлены следующие способы повышения ее эффективности: увеличение дальности действия отдельных ГЛС, увеличение вероятности обнаружения цели (в том числе за счет уменьшения мешающего влияния излучения соседних ГЛС), увеличение точности целеуказания (в том числе и за счет увеличения точности позиционирования ГЛС в составе МСПН). С учетом модели функционирования МСПН в целом, поставлена формализованная задача, которая заключается в разработке и создании алгоритмов, реализующих методы повышения эффективности функционирования МСПН в задаче обнаружения малоразмерного движущегося подводного объекта.

**Во второй главе** рассмотрены методы решения задачи гидроакустической совместимости ГЛС в составе МСПН, т.е. задачи преодоления мешающего воздействия прямых полей от соседних станций на работу каждой станции в системе, предложен ряд методов режекции при различной степени априорной неопределенности, проведено исследование их эффективности путем численного моделирования и приведены результаты, полученные при их применении. Под режекцией прямых сигналов в МСПН подразумевается исключение прямого поля от соседних ГЛС из смеси сигналов, принимаемой каждой из станций.

*Адаптивная режекция сигналов с известной формой и временами приема*

Предположим, что форма принятых сигналов  $s_\mu(t)$  ( $\mu = 1..M$ ), которые соответствуют мощному прямому полю  $M$  соседних ГЛС из состава МСПН, и время их приема известны априорно.

В случае, когда форма принятых сигналов  $s_\mu(t)$  ( $\mu = 1..M$ ), которые соответствуют мощному прямому полю  $M$  соседних ГЛС из состава МСПН, и время их приема известны априорно, режекцию можно осуществить в соответствии со следующим выражением:

$$\mathbf{g}_0 = \mathbf{g} - \mathbf{s}\mathbf{z} = \mathbf{g} - \mathbf{s}[\mathbf{s}^+ \mathbf{s}]^{-1} \mathbf{s}\mathbf{g} = \mathbf{Q}\mathbf{g},$$

где  $\mathbf{Q} = \mathbf{E} - \mathbf{s}[\mathbf{s}^+ \mathbf{s}]^{-1} \mathbf{s}$  – проектор на подпространство, ортогональное пространству мешающих сигналов (матричный оператор режекции),  $\mathbf{E}$  – единичная матрица размером  $M \times M$ ,  $\mathbf{s}$  – матрица размером  $Nt \times M$ , в столбцах которой содержатся временные отсчеты известных мешающих сигналов,  $\mathbf{g}$  – вектор-столбец, содержащий временные отсчеты принятой реализации  $g(t) = as_0(t) + \sum_{\mu=1}^M z_\mu s_\mu(t) + n(t)$ ,  $s_\mu(t)$  – мешающие сигналы,  $z_\mu$  – амплитуды мешающих сигналов,  $s_0(t)$  – эхо-сигнал,  $a$  – амплитуда эхо-сигнала ( $a \ll z_\mu$ ),  $n(t)$  – помеха, распределенная по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и СКО  $\sigma_n$  ( $\sigma_n \ll z_\mu$ ),  $t = 1..Nt$  – номера временных отсчетов,

Результаты, полученные при применении данного метода режекции, приведены на рисунке 1. Входная реализация представляет собой сумму:

- 3 мощных мешающих сигнала (ЛЧМ, полоса частот 60 – 90 кГц, длительность 20 мс, амплитуды 1, 0.7 и 2 отн. ед., время приема 2, 4 и 6 мс соответственно),
- слабого эхо-сигнала (ЛЧМ, полоса частот 60 – 90 кГц, длительность 20 мс, амплитуда 0.001 отн. ед., время приема 4.05 мс),
- помехи, распределенной по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и СКО 0.001 отн. ед.

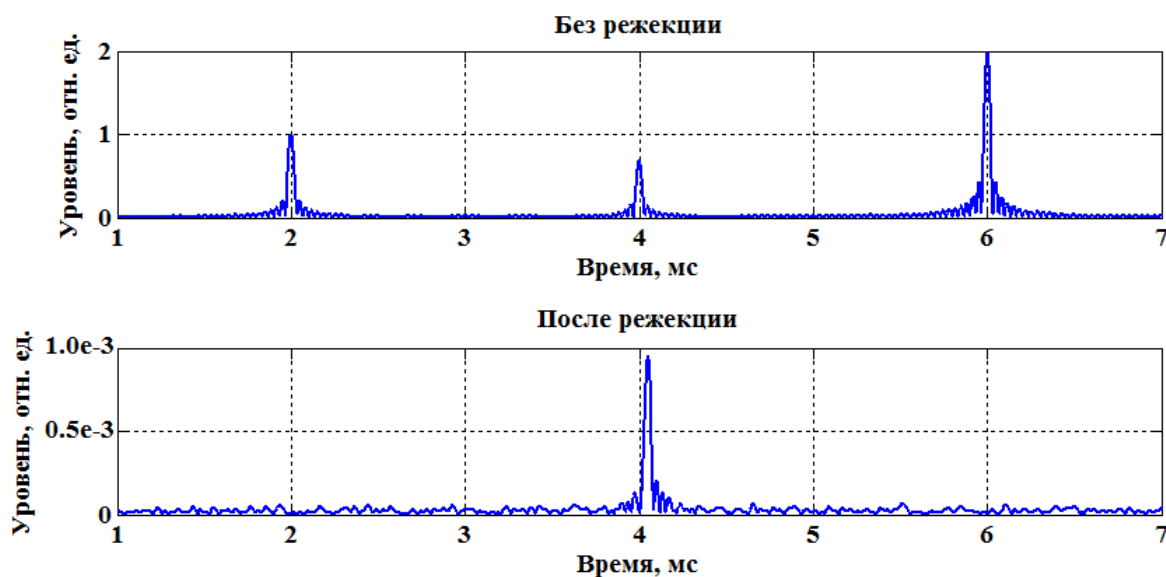


Рисунок 1. Результаты согласованной фильтрации входной реализации (сверху) и реализации, полученной после режекции мешающих сигналов (снизу).

На рисунке 1 приведены результаты согласованной фильтрации входной реализации (сверху) и реализации, полученной после режекции мешающих сигналов (снизу).

Полученные результаты подтверждают высокую эффективность данного метода режекции. Однако для того чтобы иметь возможность применения данного метода, мы должны априори знать форму принимаемых мешающих сигналов и время их приема. В реальных системах мы не сможем точно спрогнозировать форму сигналов, даже если измерим искажения, вносимые конкретным излучателем, так как при распространении звука возникают дополнительные искажения, вызываемые многолучевостью, а также частотной зависимостью поглощения.

*Адаптивная режекция мощного прямого поля при неизвестной форме мешающих сигналов*

В случае, когда вследствие ряда причин форма мешающих сигналов априорно известна с точностью недостаточной для эффективного применения метода режекции сигналов известной формы, сначала требуется оценить их точную форму. Оценка формы

мешающего сигнала при применении предлагаемого метода осуществляется на основании предположения, что она одинакова во всех приемных каналах принимающей станции.

Непосредственно режекция осуществляется вычитанием из спектра смеси, принятой  $k$ -ым приемником, оценки спектров сигналов соседних станций:

$$G_k^{(0)}(\omega) = G_k(\omega) - \sum_{\mu=1}^M \hat{S}_\mu(\omega) \varepsilon_{k,\mu}(\omega),$$

где  $G_k(\omega)$  – спектр смеси, принятой  $k$ -ым приемником,  $\hat{S}_\mu(\omega)$  – оценка спектра сигнала  $\mu$ -ой станции,  $\varepsilon_{k,\mu}(\omega) = e^{-i\omega\Delta t_{k,\mu}}$  – набег фазы в  $\mu$ -го сигнала для  $k$ -го приемника антенны,  $\Delta t_{k,\mu}$  – задержки во времени прихода сигнала  $\mu$ -ой станции на  $k$ -ый приемник, определяемые геометрией антенны.

Оценка спектров сигналов соседних станций осуществляется по следующей формуле:

$$\hat{\mathbf{S}}(\omega) = [\mathbf{P}(\omega)]^{-1} \mathbf{Q}(\omega),$$

где  $\hat{\mathbf{S}}(\omega)$  – вектор-столбец, состоящий из значений спектров мешающих сигналов от соседних станций  $\hat{S}_\mu(\omega)$ ,  $\mathbf{Q}(\omega)$  – вектор-столбец, элементами которого являются величины

$$q_\mu(\omega) = \sum_{k=1}^N G_k(\omega) \varepsilon_{k,\mu}^*(\omega), \quad \mathbf{P}(\omega) \text{ – матрица, элементами которой являются величины}$$

$$P_{\mu,\mu'}(\omega) = \sum_{k=1}^N \varepsilon_{k,\mu}^*(\omega) \varepsilon_{k,\mu'}(\omega).$$

Зная геометрию приемной антенны и направления на соседние ГЛС, мы можем вычислить задержки  $\Delta t_{k,\mu}$ , т. е. сформировать матрицы  $P(\omega)$  и  $Q(\omega)$ , и, следовательно, оценить спектр мешающих сигналов. Если же направления на соседние ГЛС  $\varphi_\mu$  априорно неизвестны или известны с недостаточной точностью, то их можно определить путем численной минимизации по направлениям  $\varphi_\mu$  следующей величины:

$$J = \sum_{\omega} \sum_{k=1}^N \left| G_k(\omega) - \sum_{\mu=1}^M \hat{S}_\mu(\omega) \varepsilon_{k,\mu}(\omega) \right|^2.$$

Результаты, полученные при применении метода режекции мощного прямого поля при неизвестной форме мешающих сигналов, приведены на рисунке 2. Исходные данные: антенна – кольцевая, радиус 0.15 м, 96 приемных элементов. Входные реализации с приемников антенны представляют собой сумму:

- мощного мешающего сигнала (ЛЧМ, полоса частот 60 – 90 кГц, длительность 3 мс, амплитуда 1 отн.ед., время приема 3.5 мс, пеленг 182°),
- эхо-сигнала (ЛЧМ, полоса частот 60 – 90 кГц, длительность 3 мс, амплитуда 0.002 отн. ед., время приема 3.6 мс, пеленг 200°),

- помехи, распределенной по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и СКО 0.002 отн. ед.

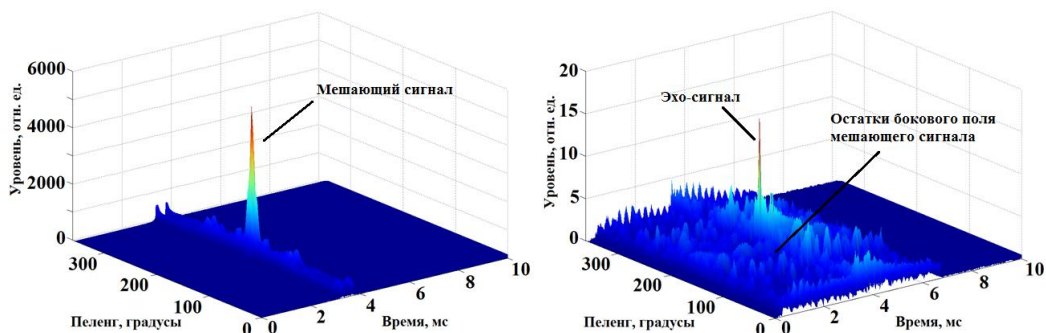


Рисунок 2. Пространственно-временной отклик приемной АР в случае мощного мешающего сигнала и результат режекции.

На рисунке 2 приведены индикаторные процессы на выходе антенны соответствующие входным реализациям (слева) и после режекции мешающего сигнала (справа). На рисунке слева различим только один мощный пик, соответствующий мешающему сигналу, на фоне его боковых лепестков по пространству и времени слабый эхо-сигнал не обнаруживается. На рисунке справа можно обнаружить пик, соответствующий эхо-сигналу, на фоне не полностью режектированных пространственно-временных боковых лепестков мешающего сигнала.

Алгоритм, основанный на разработанных методах режекции сигналов, был применен и подтвердил свою эффективность при обработке экспериментальных записей, которые были получены при проведении натурных испытаний с экспериментальными образцами ГЛС подводного мониторинга в Охотском море в 2016 и 2017 году в рамках выполняемой НЦВИ ИОФ РАН СЧ ОКР. При обработке указанных записей данный алгоритм применялся с целью режекции мощных помех.

На рисунке 3 приведены участки пространственно-временного отклика приемной антенны ГЛС, содержащие эхо-сигнал от движущегося подводного объекта, для пяти последовательных периодов обзора ГЛС в хронологическом порядке (первый период соответствует верхним откликам). На откликах, приведенных слева, из-за мощной электрической помехи эхо-сигнал от цели не наблюдается. На откликах справа, которые соответствует обработке с применением разработанных методов режекции мощных сигналов, хорошо видны эхо-сигналы от цели, расстояние до которой с течением времени уменьшается.

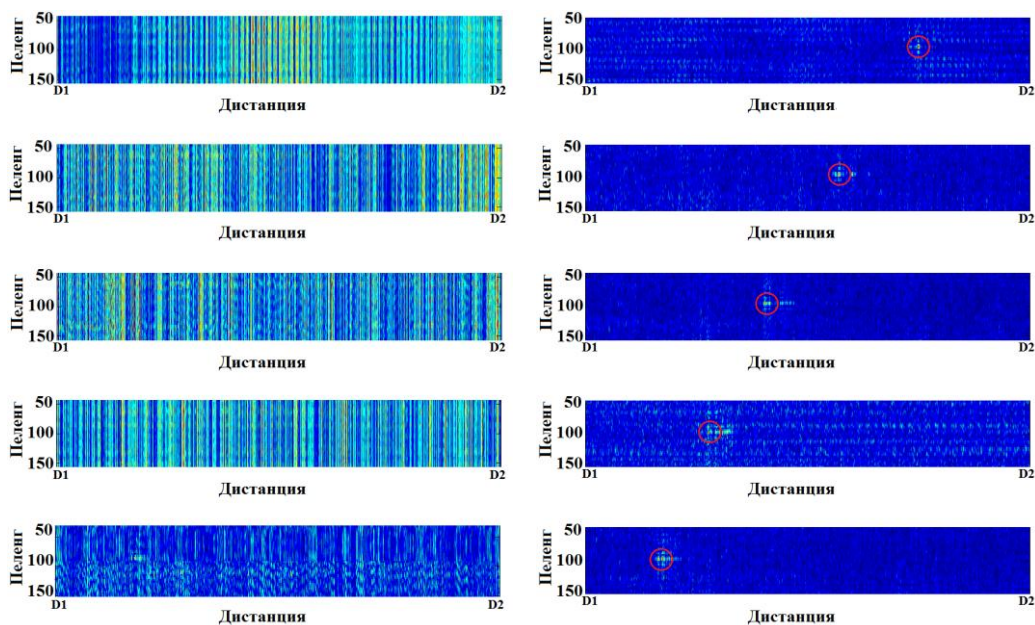


Рисунок 3. Индикаторный процесс при обнаружении подводного объекта по вторичному гидроакустическому полю.

Исследования, выполненные в этой главе, показывают, что предлагаемые адаптивные методы режекции позволяют снизить отношение уровня мощных мешающих сигналов к уровню слабого эхо-сигнала от цели до 1000 раз. Такие результаты приводят к существенному увеличению (80% и более) вероятности обнаружения малоразмерных движущихся подводных объектов в областях, засвеченных прямым полем соседних ГЛС в составе МСПН.

**В третьей главе** предлагаются методы решения задач идентификации эхо-сигналов и комплексирования их параметров (оценок текущих координат), основанные на максимизации суммарного логарифма плотности вероятности измерения МСПН и проводится исследование эффективности данных методов путем численного моделирования.

Исходными данными алгоритмов идентификации эхо-сигналов, обнаруженных мультистатической системой, и комплексирования их параметров, являются все эхо-сигналы от подводных объектов, как моностатические, так и бистатические, полученные со всех ГЛС системы. Для каждого обнаруженного эхо-сигнала имеется следующая информация: идентификационный номер обнаружившей его ГЛС, номер текущего импульса (периода обзора), номер эхо-сигнала в наборе всех эхо-сигналов обнаруженных данной ГЛС на данном импульсе, время приема эхо-сигнала, а также соответствующий ему пеленг и ОСП.

#### *Идентификация эхо-сигналов обнаруженных МСПН*

Под идентификацией эхо-сигналов в данной работе подразумевается сопоставление эхо-сигнала обнаруженному объекту и определение номера станции в составе системы, излучение которой обусловило данный эхо-сигнал.

Идентификация осуществляется путем максимизации суммарного логарифма плотности вероятности измерения всей МСПН по номерам излучающих ГЛС (индексу  $S$ ):

$$L(\mathbf{x}_T) = \sum_{R=1}^M \sum_{S=1}^M \ln f_{RS}(\mathbf{x}_T),$$

где  $f_{RS}(\mathbf{x}_T) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{RS}} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma_{RS}^2}(t_{RS} - t(\mathbf{x}_T, \mathbf{x}_S) - t(\mathbf{x}_R, \mathbf{x}_T))^2\right\}$  – плотность вероятности оценки времени  $t_{RS}$ ,  $t_{RS}$  – измеренное  $R$ -ой ГЛС время прихода отраженного от цели эхо-сигнала, порожденного излучением  $S$ -ой ГЛС,  $\sigma_{RS}$  – СКО измерения этого времени,  $\mathbf{x}_R$ ,  $\mathbf{x}_S$ ,  $\mathbf{x}_T$  – координаты принимающей, излучающей ГЛС и цели соответственно,  $R, S = 1..M$  – номера принимающей и излучающей ГЛС.

Результаты, полученные при применении предлагаемого метода идентификации целей, приведены на рисунке 4.

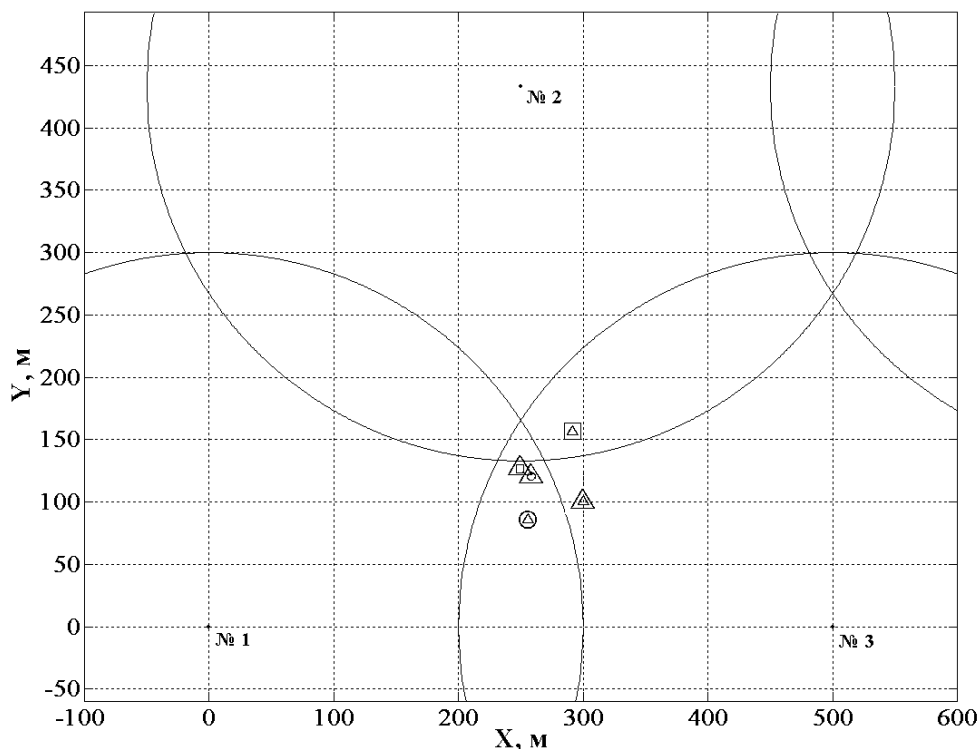


Рисунок 4. Эхо-сигналы, соответствующие единственной в зоне обзора МСПН цели с координатами (300, 100), и результат их идентификации.

На рисунке 4 точками указано расположение ГЛС (№ 1 – 3), дугами окружностей большого радиуса – их зоны обзора. Цель с координатами (300, 100) попадает только в зону обзора станции № 3. Геометрическими фигурами здесь обозначены обнаруженные МСПН отражения от данной цели. Причем, тип внешней фигуры соответствует обнаружившей эхо-сигнал станции: окружность – станция № 1, квадрат – станция № 2 и треугольник – станция № 3. Результатом работы алгоритма идентификации является номер станции, излучение

которой порождает отметку: этот номер на рисунке обозначен типом внутренней фигуры. Для моностатических эхо-сигналов типы внутренней и внешней фигур совпадают, для бистатических различаются.

### *Комплексирование параметров эхо-сигналов обнаруженных МСПН*

В результате идентификации получена информация о соответствии обнаруженных эхо-сигналов определенным подводным объектам и о номерах ГЛС, излучение которых породило данные эхо-сигналы. Поэтому для оценки текущих координат цели помимо моностатической отметки, можно также использовать информацию, содержащуюся в бистатических отметках. В данной работе под комплексированием параметров цели подразумевается возможность повышения точности текущих координат цели при использовании всех обнаруженных эхо-сигналов. То есть на основании измеренных времен обнаружения  $t_{RS}$  и известных координат станций  $\mathbf{x}_R$  и  $\mathbf{x}_S$  нам необходимо получить координаты цели  $\mathbf{x}_T$ .

Путем максимизации суммарного логарифма плотности вероятности измерения всей МСПН  $L(\mathbf{x}_T)$  по координатам цели  $\mathbf{x}_T$  получим оценки текущих координат цели. Максимизация  $L(\mathbf{x}_T)$  выполняется с применением различных численных методов, например, метода Ньютона:

$$\mathbf{x}_{T(i)} = \mathbf{x}_{T(0)} - \left( \frac{\partial^2 L}{\partial \mathbf{x}_T^2} \right)_{\mathbf{x}_{T(0)}}^{-1} \left( \frac{\partial L}{\partial \mathbf{x}_T} \right)_{\mathbf{x}_{T(0)}}.$$

На рисунке 5 приведены значения ошибок оценки координат цели в метрах при использовании одного моностатического эхо-сигнала (синяя кривая) и при использовании всех эхо-сигналов, обнаруженных МСПН и сопоставленных данной цели (красная кривая), то есть при комплексировании. Под ошибкой оценки ТКЦ здесь понимается расстояние между истинным положением цели и его оценкой.

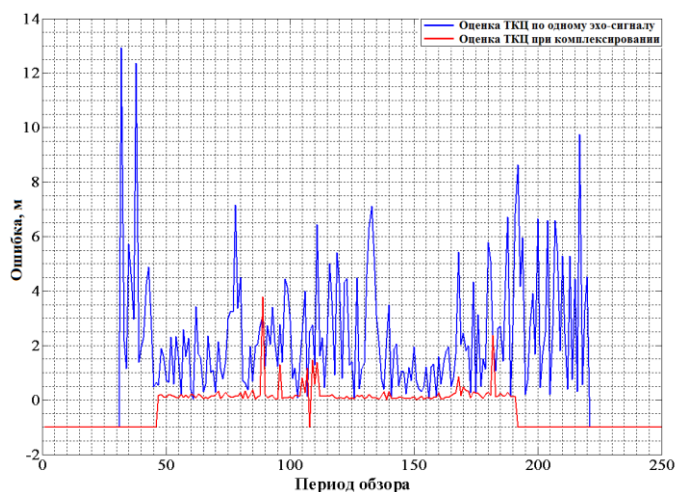


Рисунок 5. Ошибки оценки координат цели.



Значение минус единица для синей кривой означает, что во время текущей посылки в зоне обзора системы нет ни одной цели. Для красной кривой помимо этого минус единица может означать, что комплексирование провести невозможно. Невозможность комплексирования может быть обусловлена следующими причинами: во время текущего периода обзора в зоне действия МСПН нет ни одной цели, цель не идентифицирована (пропущена), цели соответствует только один эхо-сигнал.

Работоспособность разработанных методов идентификации эхо-сигналов и комплексирования их параметров была также проверена экспериментально при испытаниях МСПН, состоящей из двух ГЛС (Иваньковское вдхр. 2012 г.). На рисунке 6 приведены снимки экрана оператора МСПН при функционировании без применения (слева) и с применением (справа) данных методов, где изображены результаты двух различных галсов при буксировке подводного объекта, которые выполнялись в течение одного дня. МСПН была установлена в конфигурации соответствующей условиям эксплуатации. По этой причине отсутствовала возможность сохранения исходных данных для их последующей обработки с применением различных алгоритмов.

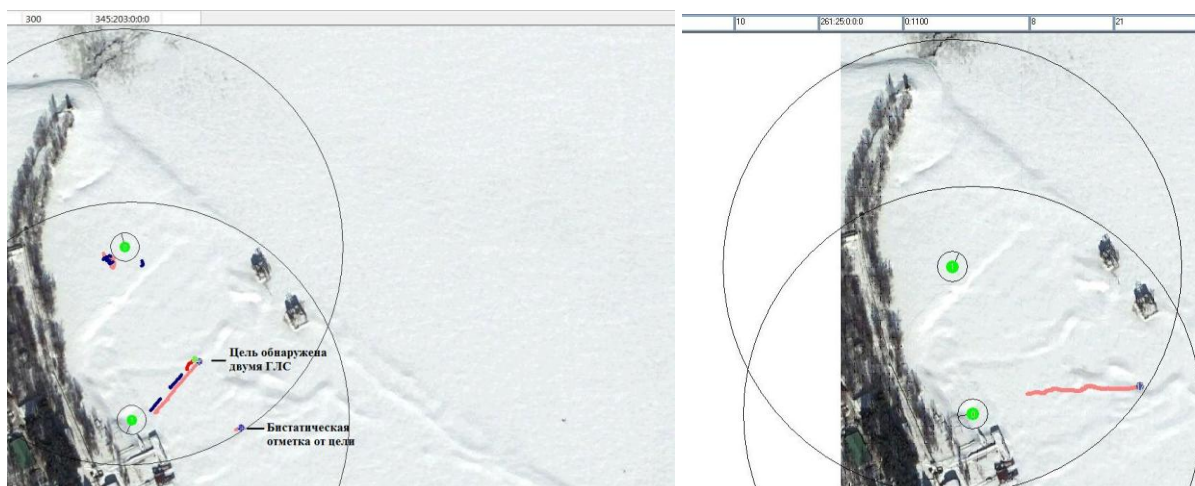


Рисунок 6. Снимки экрана оператора МСПН.

Исследование, выполненное в этой главе, показывает, что разработанные методы идентификации эхо-сигналов и комплексирования их параметров позволяют существенно снизить поток отметок от целей, поступающих в тракт траекторного анализа, а также значительно повысить (в 3–10 раз) точность оценки текущих координат цели. Эти алгоритмы могут быть легко реализуемы при проектировании и функционировании МСПН, так как они не требуют существенных вычислительных затрат.

**В четвертой главе** рассмотрены методы позиционирования ГЛС, проводится исследование их эффективности, как путем моделирования, так и путем обработки данных, полученных при проведении натуральных экспериментов. Позиционировать станции требуется в тех случаях, когда они не имеют жесткой постановочной конструкции и могут

перемещаться в пределах некоторого расстояния, определяемого длиной якорного троса. Знание точного пространственного расположения каждой из ГЛС в составе МСПН необходимо для корректной оценки текущих координат целей, а также для возможности применения методов идентификации эхо-сигналов и комплексирования их параметров.

В однородной среде координаты станций  $\mathbf{x}_R$  и  $\mathbf{x}_S$  можно получить путем минимизации по этим координатам следующей величины:

$$T \approx \sum_{R \neq S=1}^M i_{RS} \left( \hat{t}_{RS} - \frac{\|\mathbf{x}_R - \mathbf{x}_S\|}{c} + t_S \right)^2,$$

где  $t_S$  – момент времени, соответствующий излучению сигнала станцией с координатами  $\mathbf{x}_S$ ,  $\hat{t}_{RS}$  – время прихода сигнала, излученного станцией с координатами  $\mathbf{x}_S$ , в станцию с координатами  $\mathbf{x}_R$ ,  $i_{RS} = \left( \partial^2 q_R(t) / \partial t^2 \right) |_{t=\hat{t}_{RS}}$  – точность оценки времени,  $q_R(t)$  – взаимнокорреляционная функция сигнала, принятого  $R$ -ой станцией, с эталонным сигналом.

Максимальную точность оценки координат станций при взаимном позиционировании можно оценить из информационной матрицы Фишера. Расчеты, выполненные для нескольких вариантов расположения станций в системе, показали, что точность позиционирования сильно зависит от точности измерения времен распространения сигналов, в то время как учет измерения направлений приема сигналов практически не влияет на результирующую точность.

В неоднородной среде можно получить координаты станций  $\mathbf{x}_R$  и  $\mathbf{x}_S$  путем минимизации величины:

$$H = \sum_{R \neq S=1}^M \sum_{\mu=1}^{N_{RS}} i_{RS\mu} \left( \hat{t}_{RS\mu} - \min_{\mu'} (t_{\mu'}(\mathbf{x}_R, \mathbf{x}_S) + t_S) \right)^2,$$

где  $N_{RS}$  – число лучей, соединяющих точки с координатами  $\mathbf{x}_R$  и  $\mathbf{x}_S$ ,  $\hat{t}_{RS\mu}$  – оценка времени прихода сигнала по  $\mu$ -му лучу от  $S$ -ой к  $R$ -ой ГЛС,  $t_S$  – момент излучения  $S$ -ой ГЛС,  $t_{\mu'}(\mathbf{x}_R, \mathbf{x}_S)$  – время распространения сигнала из  $S$ -ой и  $R$ -ую ГЛС по  $\mu'$ -му лучу, рассчитанное для заданной гидрологии,  $i_{RS\mu}$  – точностные характеристики (определяются погрешностями измерений  $\hat{t}_{RS\mu}$  и точностью прогноза  $t_{\mu'}(\mathbf{x}_R, \mathbf{x}_S)$ ).

В некоторых случаях момент излучения сигнала удаленным излучателем  $t_S$  неизвестен. Поэтому отсутствует возможность измерения времен распространения сигналов вдоль различных лучей  $\hat{t}_{RS\mu}$ . В данном случае вместо времен распространения можно использовать задержки между приемом сигналов, пришедших по первому лучу и последующим, а координатами  $\mathbf{x}_R$  и  $\mathbf{x}_S$  оценить путем минимизации следующей величины:

$$J = \sum_{R \neq S=1}^M \sum_{\mu=2}^{N_{RS}} i_{RS\mu} \min_{\mu'} (\hat{t}_{RS\mu} - \tau_{\mu'}(\mathbf{x}_R, \mathbf{x}_S))^2,$$

где  $\tau_{\mu'}(\mathbf{x}_R, \mathbf{x}_S) = (t_{\mu'}(\mathbf{x}_R, \mathbf{x}_S) + t_S) - (t_1(\mathbf{x}_R, \mathbf{x}_S) + t_S)$  – рассчитанные задержки между сигналами, пришедшими по первому лучу и последующим,  $\hat{t}_{RS\mu} = \hat{t}_{RS\mu} - \hat{t}_{RS1}$  – измеренные экспериментально оценки задержек между сигналами.

Работоспособность такой модификации разработанного метода была подтверждена экспериментально (Черное море). Во время работы удаленной ГЛС с помощью контрольного гидрофона была получена запись, обработка которой проводилась в соответствии с предлагаемым методом позиционирования в неоднородной среде. Полученный результат, зависимость от дистанции и глубины величины обратной квадратному корню из невязки  $J$ , приведен на рисунке 7, на котором хорошо виден большой пик, соответствующий максимуму величины обратной квадратному корню из невязки  $J$ , т. е. минимуму самой невязки (остаточной суммы квадратов).

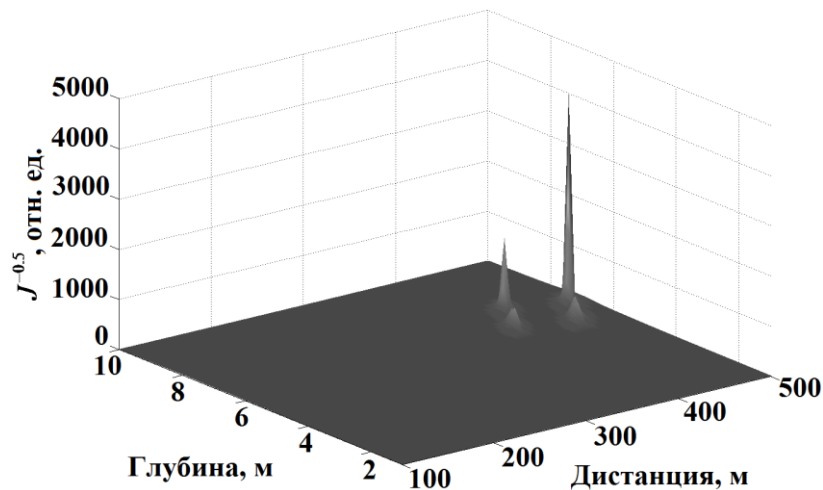


Рисунок 7. Оценка глубины и дистанции до удаленного источника звука.

Положение максимального пика соответствует дистанции 478 м и глубине 6.8 м (истинные дистанция и глубина 471 м и 6 м соответственно). Точность оценки глубины в данном эксперименте составила единицы метров, а точность оценки расстояния – десятки метров на дистанциях до километра.

Следует отметить, что с помощью данной модификации разработанного метода, помимо позиционирования станций в мультистатической системе, можно производить оценку координат и глубины удаленных источников звука с достаточной для практических задач точностью.

#### *Позиционирования ГЛС по неподвижным отражателям*

В отличие от взаимного позиционирования нескольких ГЛС существует возможность позиционирования отдельной ГЛС относительно неподвижных отражающих звук объектов –

расположенных на дне отражателей. К таким отражателям относятся обычно во множестве присутствующие камни, выступы скал, затопленные предметы и т.п. Для получения максимально правдоподобных оценок текущего положения ГЛС минимизируем величину, пропорциональную минус логарифму функции правдоподобия измерения координат неподвижных отражателей:

$$\begin{aligned}
-\ln(L_{\Sigma}) = & -\ln(L_{анп}) - \ln(L_{изм}) = \sum_{n=1}^N \left\{ i_{0,n}^{(\varphi)} (\delta\varphi_0(t_n))^2 + \frac{1}{D} \|\delta\bar{x}_0(t_n)\|^2 \right\} + \\
& + \sum_{n=1}^N \sum_{\mu=1}^M \left\{ i_{\mu,n}^{(R)} \left( \hat{R}_{\mu}(t_n) - \|\bar{x}_{\mu} - \bar{x}_H - \delta\bar{x}_0(t_n)\| \right)^2 + \right. \\
& \left. + i_{\mu,n}^{(\varphi)} \left( \hat{\varphi}_{\mu}(t_n) - \varphi_K(t_n) - \arctg \left( \frac{y_{\mu} - y_H - \delta y_0(t_n)}{x_{\mu} - x_H - \delta x_0(t_n)} \right) - \delta\varphi_0(t_n) \right)^2 \right\}.
\end{aligned}$$

где  $\delta\varphi_0(t_n) = \varphi_0(t_n) - \varphi_K(t_n)$  – поправка на угол поворота ГЛС,  $\varphi_0(t_n)$  – полный угол поворота ГЛС,  $\varphi_K(t_n)$  – показания встроенного компаса ГЛС,  $\delta\bar{x}_0(t_n) = \bar{x}_0(t_n) - \bar{x}_H$  – смещение ГЛС,  $\bar{x}_0(t_n)$  – текущие координаты ГЛС,  $\bar{x}_H$  – начальные координаты ГЛС,  $\hat{R}_{\mu}(t_n)$  – оценка расстояния до  $\mu$ -го отражателя,  $\hat{\varphi}_{\mu}(t_n)$  – оценка направления на  $\mu$ -ый отражатель,  $\bar{x}_{\mu}$  – координаты  $\mu$ -го отражателя,  $i_{\mu,n}^{(R)} = \left(1/\sigma_{\mu,n}^{(R)2}\right)$  и  $i_{\mu,n}^{(\varphi)} = \left(1/\sigma_{\mu,n}^{(\varphi)2}\right)$  – вес одиночного измерения (оценки дистанции и пеленга отражателя),  $i_{0,n}^{(\varphi)} = \left(1/\sigma_{0,n}^{(\varphi)2}\right)$  – вес измерения с помощью компаса,  $D$  – дисперсия измерения начальных координат ГЛС (с помощью GPS/ГЛОНАСС). Оптимальное значение вектора искомых параметров  $\theta = (\bar{x}_{\mu}, \delta\bar{x}_0(t_n), \delta\varphi_0(t_n))$  можно найти, применяя различные численные методы.

Результаты, полученные при численном моделировании функционирования ГЛС с применением метода позиционирования по неподвижным отражающим звук объектам, приведены на рисунке 8, на котором приведены отметки целей, обнаруженные ГЛС в течение 100 периодов обзора (цвет отметок плавно меняется от синего к красному с увеличением номера периода обзора). Вдоль координатных осей на этих рисунках отложено расстояние в метрах. На рисунке 8а представлены отметки с искажениями вносимыми движением ГЛС, а на рисунке 8б изображен результат после внесения коррекции на смещение и поворот ГЛС, которые были получены при применении метода позиционирования по неподвижным отражателям. Помимо неподвижных отражателей на данных рисунках присутствует движущаяся прямолинейно цель.

Исследования, выполненные в этой главе, показывают, что предлагаемые алгоритмы позиционирования позволяют достичь точности порядка 10 см при оценке перемещения ГЛС и 1 градуса при оценке ее поворота.

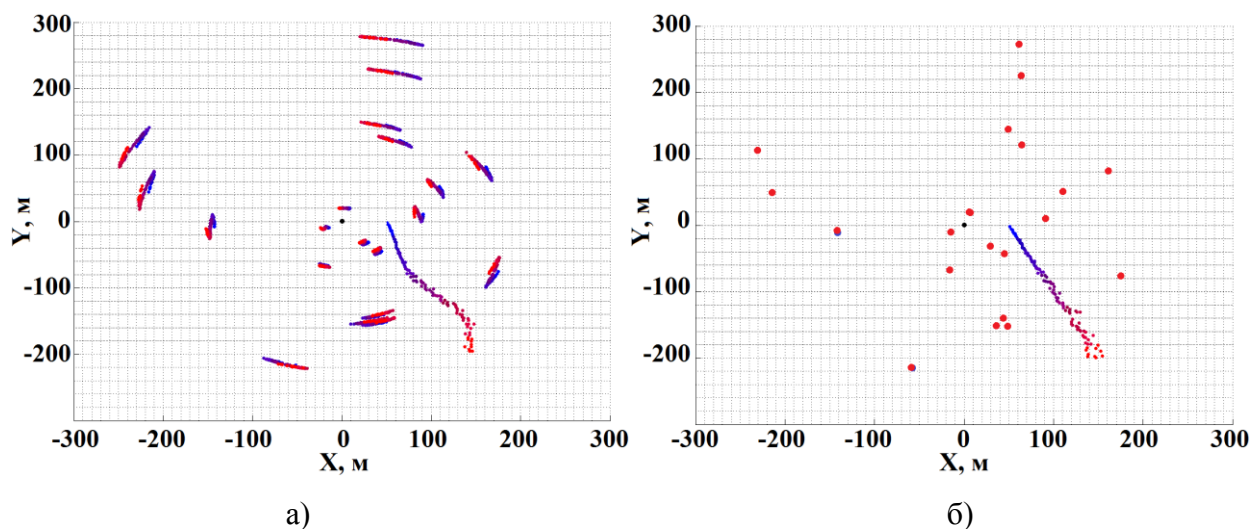


Рисунок 8. Отметки, обнаруженные ГЛС: а) до введения компенсации ее сдвига и поворота; б) после компенсации ее сдвига и поворота.

**В пятой главе** описана разработанная методика оценки вклада в эффективность функционирования МСПН предлагаемых методов повышения ее эффективности. Суть методики: проводится обработка информации, полученной на основе метода Монте-Карло, с применением различных методов с последующей сравнительной оценкой их эффективности.

Проведен анализ полученных результатов по эффективности разработанных методов для показателей качества наблюдения МСПН, в качестве которых в данной работе применены вероятность правильного обнаружения объекта и точности оценки (или СКО) его координат и параметров движения (скорость, курс).

Для наглядного представления повышения эффективности используется лучевая диаграмма, вдоль лучей которой отложены величины, количественно описывающие показатели качества наблюдения. Диаграмма эффективности МСПН, получаемая при применении всего комплекса разработанных методов повышения эффективности функционирования МСПН, приведена на рисунке 9. Красный цвет соответствует классической обработке сигналов при обнаружении цели по вторичному гидроакустическому полю, зеленый – обработке с применением всего комплекса разработанных методов. Вдоль лучей диаграммы отложены следующие величины: средняя по всей зоне обзора ГЛС вероятность пропуска цели, которая равна единице минус вероятность правильного обнаружения ( $1 - P_D$ ); СКО оценки координат цели ( $\sigma_R$  и  $\sigma_\varphi$  – СКО дистанции и пеленга соответственно); СКО оценки параметров движения цели ( $\sigma_V$  и  $\sigma_C$  – СКО скорости и курса соответственно). Диаграмма построена в предположении

статистической независимости компонент ошибок оценки местоположения цели, обусловленных собственной точностью МСПН и точностью позиционирования ГЛС.

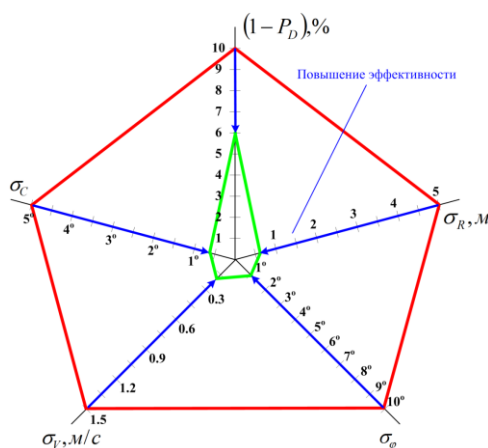


Рисунок 9. Диаграмма, отображающая эффективность МСПН при применении всего комплекса предлагаемых методов повышения эффективности МСПН.

По результатам, полученным для отдельных показателей качества наблюдения, рассчитан комплексный количественный критерий эффективности МСПН – вероятность перехвата подводного объекта силами охраны.

В **приложении** рассмотрены малоразмерные движущиеся подводные объекты.

В **заключении** приведены основные результаты работы:

1. Разработанные методы адаптивной режекции мощного прямого поля, позволяют уменьшить уровень прямых сигналов соседних ГЛС в составе МСПН до 1000 раз, что приводит к увеличению вероятности обнаружения движущихся подводных объектов в зоне влияния мешающих сигналов на 80 % и более.

2. Разработанные методы идентификации обнаруженных МСПН эхо-сигналов и комплексирования их параметров:

2.1. повышают точность оценки координат подводных объектов в 3–10 раз по сравнению с оценкой по одному моностатическому эхо-сигналу,

2.2. сопоставляют все обнаруженные МСПН эхо-сигналы соответствующим целям и передают на дальнейшую обработку (траекторный анализ) только одну отметку от каждой цели, что увеличивает ее быстродействие и эффективность.

3. Разработанные методы динамического позиционирования (уточнения координат и ориентации) ГЛС в составе МСПН уменьшают смещение оценки координат подводных объектов в 3–5 раз.

4. Разработанный метод оценки дистанции до удаленного источника звука и его глубины позволяет оценить данные параметры с достаточной в практических задачах точностью.

5. Методика оценки вклада разработанных методов в эффективность функционирования МСПН, позволила количественно оценить суммарный вклад комплекса разработанных методов в повышение эффективности, который в случае применения высокоточных спецсредств составляет до 50 %.

#### **Публикации автора по теме диссертации**

1. Михнюк А. Н. Определение координат источника звука с помощью согласованных с морским волноводом алгоритмов обработки сигналов // Акуст. журн. 2009. Т. 55. № 3. С. 401–406.

2. Mikhnyuk A. N. Hydroacoustic Compability of Sonars in a Multistatic Underwater Observation System // Physics of Wave Phenomena, 2011, Vol. 19, No. 1, pp. 74 – 81.

3. Михнюк А. Н. Идентификация и уточнение координат целей, обнаруживаемых мультистатической системой подводного наблюдения // Научно-технический сборник «Гидроакустика». С.-Петербург: ОАО «Концерн Океанприбор», 2013. Выпуск 18(2). С. 81–89.

4. Drachenko V.N., Karishnev N.S., Kuznetsov G.N., Mikhnyuk A.N. Estimation of the Source Distance and Depth in a Multipath Waveguide Using a Vector-Scalar Antenna // Physics of Wave Phenomena, 2014, Vol. 22, No. 4, pp. 1–12.

5. Кузнецов Г.Н., Михнюк А.Н., Полканов К.И., Смирнов Н.М. Использование буксируемого векторно-скалярного модуля и согласованной фильтрации для однозначной оценки координат широкополосного источника в пассивном режиме // Научно-технический сборник «Гидроакустика». С.-Петербург: ОАО «Концерн Океанприбор», 2015. Выпуск 24(4). С. 36–51.

6. Lunkov A.A., Malykhin A.Yu., Mikhnyuk A.N. Effect of internal waves on interference pattern of bottom reverberation // Proceedings of Meetings on Acoustics. 2016. V. 24. <http://dx.doi.org/10.1121/2.0000160>.

7. Драченко В.Н., Кузнецов Г.Н., Михнюк А.Н. Пространственные спектры и помехоустойчивость скалярных и векторно-скалярных антенн // Доклады XIII школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских «Акустика океана», совмещенной с XXIII сессией Российского Акустического Общества. М.: ГЕОС, 2011, с. 332–335.

8. Луньков А.А., Михнюк А.Н. Оценка характеристик интенсивных внутренних волн по сигналам донной реверберации.// Доклады XV школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских «Акустика океана», совмещенной с XXIX сессией Российского Акустического Общества. М.: ГЕОС, 2016, с. 228–231.