

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ГИДРОМЕХАНИКИ

На правах рукописи

АНТОНЮК Сергей Павлович

УГЛОВОЕ РАЗРЕШЕНИЕ
МНОГОЛУЧЕВЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ
В УСЛОВИЯХ ВОЛНОВОДНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ

01.04.06 - Акустика

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Киев 1994

834.4



00357723 (R)

Работа выполнена в Научно-п
Научный руководитель -

- Официальные оппоненты - доктор технических наук
Б. А. ЛАЗУТКИН
кандидат технических наук
А. С. МОСКАЛЕНКО
- Ведущая организация - Киевский политехнический институт

Защита состоится "16" "06" 1994 г. в "14⁰⁰" часов
на заседании специализированного совета Д 01.04.01 Института
гидромеханики АН Украины по адресу 252057, Киев, ул. Желябова, 8/4

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Института
гидромеханики АН Украины

Автореферат разослан "14" "05" 1994 г.

Ученый секретарь
специализированного совета,
доктор технических наук

С. И. КРИЛЬ

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Задача углового разрешения многолучевых гидроакустических сигналов, распространяющихся в морских волноводах, относится к числу наиболее важных проблем современной гидроакустики. Объясняется это тем, что, располагая оценками углов прихода сигналов, можно решать ряд важных обратных задач гидроакустики таких, как ориентирование пространственных координат источника излучения, определение характеристик морской среды, исследование свойств морского грунта и ряд других.

Обычно в гидроакустике для оценки углов прихода сигналов используется традиционный алгоритм пространственной обработки, который состоит в формировании одной диаграммы направленности и сканировании ею в заданном секторе углов. Однако разрешающая способность этого алгоритма ограничена размерами антенной решетки и часто оказывается недостаточной для углового разрешения лучей.

В тоже время, в радиолокации имеется родственная по математической постановке задача пеленгования нескольких источников узкополосных сигналов. Ее решению в последние 10 - 15 лет уделяется очень большое внимание. Благодаря исследованиям Е. Б. Волочко, Л. Г. Доросинского, В. В. Караваева, Ю. С. Шинакова, *G. Bienvenu, J. Cadzow, H. Cox, B. Friedlander, T. Kailath, R. Kumaresan, B. Ottersten, R. Schmidt, P. Stoica, M. Wax* и других было синтезировано и апробировано на практике множество алгоритмов пеленгования, обладающих высокой угловой разрешающей способностью.

Однако непосредственное использование этих алгоритмов в гидроакустике невозможно по целому ряду причин. Во-первых, предположение о некоррелированности сигналов отдельных источников, оправданное в радиолокации, не выполняется для гидроакустических сигналов, распространяющихся в морских волноводах по разным лучевым траекториям. Во-вторых, шумы в гидроакустике существенно анизотропны в вертикальной плоскости, что необходимо учитывать при синтезе алгоритмов углового разрешения. В-третьих, в радиолокации алгоритмы пеленгования синтезированы, в основном, в предположении узкополосности излучаемых сигналов и нуждаются в обобщении на случай широкополосных сигналов. В-четвертых, в радиолокации, как правило, отношение сигнал/шум на элементах приемной антенны велико, тогда как в гидроакустике приходится иметь дело со слабыми (по сравнению с шумами) сигналами.

Кроме указанных причин имеется также ряд вопросов, которые оказались мало исследованными. Во-первых, недостаточно полно проанализированы точностные характеристики оптимального (по критерию максимума функции правдоподобия) алгоритма, что затрудняет анализ энергетических затрат (в терминах отношения сигнал/шум и времени накопления), необходимых для достижения требуемой точности оценки углов прихода лучей в различных гидрологических условиях. Во-вторых, не исследовано влияние на точность углового разрешения амплитудно-фазовых ошибок в антенне, ошибок, возникающих из-за неточности информации о координатах элементов антенны и ошибок определения угловых положений антенны. В-третьих, реализация многих из известных в литературе алгоритмов сопряжена с необходимостью решения весьма сложной вычислительной проблемы - поиска глобального экстремума нелинейной целевой функции от многих оцениваемых параметров. По этому весьма важной является задача синтеза алгоритмов, обеспечивающих не только высокую разрешающую способность, но и требующих малого объема вычислений и ориентированных на применение современных средств вычислительной техники. Восполнению указанных пробелов посвящена настоящая диссертационная работа.

Цель работы - синтез структуры и анализ эффективности алгоритмов углового разрешения широкополосных многолучевых сигналов, при имеющих место на практике ограничения на волновые размеры антенной решетки, отношение сигнал/шум и время накопления информации, а также формулировка требований к приемному тракту и вычислительному устройству, реализующему наиболее эффективные алгоритмы.

Научная новизна работы заключается в следующих основных положениях.

- Синтезирована структура оптимального алгоритма углового разрешения многолучевых сигналов. Установлено, что при характерных для практики ограничениях на время накопления исходных данных и отношение сигнал/шум реально достижимо разрешение только двух-трех не разрешимых по Рэлею групп лучей;

- Синтезированы квазиоптимальные алгоритмы углового разрешения, основанные на свойствах собственных векторов спектрально-корреляционных матриц широкополосных гидроакустических сигналов и пространственно коррелированных шумов. Исследована эффективность этих алгоритмов в условиях волноводного распространения звука;

- Исследовано влияние конечного объема выборки, используемой для оценивания спектрально-корреляционной матрицы шумов, на точностные

характеристики квазиоптимальных алгоритмов углового разрешения;

- Исследовано влияние амплитудно-фазовых ошибок в антенне, ошибок, возникающих из-за неточной информации о координатах элементов антенны, и ошибок определения углового положения антенны на точностные характеристики квазиоптимальных алгоритмов углового разрешения;

- Предложен алгоритм определения числа групп лучей и углов их прихода в условиях произвольной корреляции сигналов между группами лучей. Экспериментально исследованы статистические характеристики этого алгоритма и проанализированы вычислительные затраты, необходимые для его технической реализации.

На защите выносятся следующие основные положения диссертационной работы.

1. Результаты исследований потенциальных возможностей углового разрешения лучей с помощью оптимального (по критерию максимума функции правдоподобия) алгоритма.

2. Результаты синтеза структуры и анализа эффективности квазиоптимальных алгоритмов углового разрешения широкополосных многолучевых сигналов, в основу которых положены свойства собственных векторов спектрально-корреляционных матриц гидроакустических сигналов и шумов.

3. Результаты анализа дестабилизирующего влияния на точностные характеристики синтезированных квазиоптимальных алгоритмов ошибок измерения спектрально-корреляционной матрицы шумов, амплитудно-фазовых ошибок в антенне, ошибок, возникающих из-за неточной информации о координатах элементов антенны и ошибок определения углового положения антенны.

4. Результаты синтеза структуры и анализа эффективности алгоритма оценивания числа групп лучей и углов их прихода в условиях ограничений на отношение сигнал/шум и время накопления исходных данных.

5. Результаты анализа вычислительных затрат, необходимых для технической реализации алгоритма оценивания числа групп лучей и углов их прихода.

Достоверность полученных результатов подтверждается:

1) использованием физически обоснованных моделей и строгих математических постановок;

2) последовательным и корректным использованием методов математической статистики, линейной алгебры, вычислительной математики, теории оценивания параметров, теории проверки гипотез и теории возмущения матриц;

3) экспериментальным подтверждением полученных теоретических результатов;

4) непротиворечивостью результатам и выводам других авторов.

Практическая ценность работы состоит в том, что ее результаты позволяют выяснить реальные возможности углового разрешения многолучевых широкополосных сигналов, а также необходимые для этого энергетические, временные и вычислительные ресурсы. Полученные результаты могут быть использованы как при проектировании трактов пространственно-временной обработки гидроакустических систем, так и при оценивании потенциальных возможностей разрешения многолучевых сигналов в различных гидрологических условиях. Некоторые результаты работы могут быть использованы при решении родственных (по математической постановке) гидроакустических задач.

Апробация работы.

Основные результаты диссертационной работы докладывались на научно-техническом семинаре "Системы, средства и алгоритмы первичной обработки информации" (ИПО океанприбор, Ленинград, 1989); на VIII научно-технической конференции по цифровой обработке информации (Таганрог, НИИ "Бриз", 1990); на межотраслевом научно-техническом семинаре "Разработка архитектуры и программного обеспечения вычислительных систем обработки информации в реальном времени, использующих микромощную элементную базу", (Усть-Нарва, 1991), на конференциях и семинарах в ИПО "Славутич".

Диссертационная работа в полном объеме обсуждалась на республиканском семинаре по гидромеханике в Институте гидромеханики АН Украины (руководитель - член-корр. АН Украины, проф. Гринченко В.Т., Киев 1994).

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 4 научных статьях, список которых приведен в конце автореферата, а также изложены в 4 отчетах по научно-исследовательским и опытно-конструкторским работам.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 203 страницах, включая 21 страницу с иллюстрациями, библиография содержит 116 источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность диссертации, дан обзор работ, касающихся ее темы, указана цель проводимых исследований, научная новизна и практическая ценность работы, изложен круг вопросов, выходящих на защиту.

Первая глава посвящена синтезу оптимального (по критерию максимума функции правдоподобия) алгоритма оценивания углов прихода лучей и исследованию его потенциальных возможностей.

Исходная задача формулируется следующим образом. В волноводе, с зависящей от глубины скоростью звука, расположен точечный источник, который излучает широкополосный сигнал в звуковом диапазоне частот. Излученный сигнал распространяется по M лучевым траекториям и создается на приемной антенне поле $s(t, \vec{r}_n)$, преобразование Фурье $s(\omega; \vec{r}_n)$ которого имеет вид:

$$s(\omega; \vec{r}_n) = \sum_{m=1}^M A_m(\omega) \exp\left\{-j\omega\left[t_m - \frac{\vec{r}_n \hat{\alpha}_m}{c}\right]\right\}, \quad (1)$$

где $A_m(\omega)$ - амплитуда m -го луча, t_m - время распространения сигнала от источника до фазового центра антенны по m -у лучу, \vec{r}_n - пространственные координаты n -го элемента антенны, $\hat{\alpha}_m = (\sin(\theta_m)\cos(\varphi_0), \sin(\theta_m)\sin(\varphi_0), \cos(\theta_m))$ - вектор, определяющий направление прихода m -го луча, θ_m и φ_0 - соответственно углы прихода m -го луча в вертикальной и горизонтальной плоскости, c - средняя скорость звука в точке расположения фазового центра антенны.

Помимо сигнала на антенну также воздействуют шумы $N(\omega; \vec{r}_n)$, состоящие из шумов поверхности моря и собственных шумов антенны. В результате преобразование Фурье поля $u(t, \vec{r}_n)$, наблюдаемого на антенне имеет вид:

$$u(\omega; \vec{r}_n) = s(\omega; \vec{r}_n) + N(\omega; \vec{r}_n). \quad (2)$$

Задача состоит в оценивании углов θ_m прихода лучей в вертикальной плоскости и количества M этих лучей по результатам пространственно-временной обработки поля $u(t, \vec{r}_n)$.

В статистической теории оценивания известен метод решения этой задачи - синтез оптимального (по критерию максимума функции правдоподобия) алгоритма. В первой главе выполнен синтез такого алгоритма в предположении, что поле $u(t, \vec{r}_n)$ гауссово и стационарно на временном интервале наблюдения $[t, t + T_u]$. Кроме того, предположительно, что количество N элементов антенны превышает количество M лучей ($N > M$).

Структура оптимального алгоритма описывается выражением:

$$V_0(\hat{\theta}) = \sum_{k=1}^{k_2} \text{Sp} \left\{ \Pi_S(\omega_k) \hat{R}_{SN}(\omega_k) R_N^{-1}(\omega_k) - \ln \left[\Pi_S(\omega_k) \hat{R}_{SN}(\omega_k) R_N^{-1}(\omega_k) \right] \right\}, \quad (3)$$

где $\hat{\theta} = \{\theta_1, \dots, \theta_M\}$; $\Pi_S(\omega_k) = S(\omega_k) \left[S^*(\omega_k) R_N^{-1}(\omega_k) S(\omega_k) \right]^{-1} S^*(\omega_k) R_N^{-1}(\omega_k)$ - проекционная матрица; $S(\omega_k)$ - матрица, столбцы $S(\omega_k; \theta_m)$ которой следует трактовать как отклики в различных точках приемного тракта (выходы элементов антенны, выходы ДП) на сигналы единичной амплитуды, приходящие под углом θ_m ; * - символ комплексного сопряжения и транспонирования; $R_N^{-1}(\omega_k)$ - матрица, обратная к спектрально-корреляционной матрице (СКМ) $R_N(\omega_k)$ шумов; $[R_N(\omega_k)]_{nm} = \langle N(\omega_k; \hat{r}_n) N^*(\omega_k; \hat{r}_m) \rangle$ - nm -й элемент матрицы $R_N(\omega_k)$; $\langle \cdot \rangle$ - символ статистического усреднения; * - символ комплексного сопряжения;

$$\hat{R}_{SN}(\omega_k) = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L Y_l(\omega_k) Y_l^T(\omega_k)$$

оценка СКМ $R_{SN}(\omega_k)$ поля $u(\omega, \hat{r}_n)$; $Y_l(\omega_k) = \{u_1(\omega_k; \hat{r}_1), \dots, u_l(\omega_k; \hat{r}_N)\}^T$;

$$u_l(\omega_k; \hat{r}_n) = \int_{t+(l-1)T}^{t+lT} u(t; \hat{r}_n) \exp(j\omega_k t) dt$$

преобразование Фурье напряжения $u(t, \hat{r}_n)$, вычисленное на временном интервале $[t+(l-1)T, t+lT]$; L - количество парциальных временных интервалов; $\omega_k = 2\pi k/T$, $k_1 = \text{ent}(f_H T)$, $k_2 = \text{ent}(f_B T)$; f_H и f_B - верхняя и нижняя частоты спектра сигнала; $\text{ent}(\cdot)$ - символ целой части числа; T - символ транспонирования.

В соответствии с оптимальным алгоритмом основными процедурами измерения углов прихода лучей являются: формирование пространственных каналов, число которых совпадает с числом лучей; сканирование диаграммами направленности этих каналов в пределах заданного сектора углов; некогерентное накопление (по частоте и времени) выходных напряжений пространственных каналов. Сканирование диаграммами направленности осуществляется до тех пор, пока не будет обеспечен максимум напряжения (3). При этом диаграмма направленности m -го пространственного канала окажется ориентированной под углом $\hat{\theta}_m$ и будет содержать $m-1$ нулей, соответствующих углам $\hat{\theta}_1, \dots, \hat{\theta}_{m-1}$. Направления $\hat{\theta}_1, \dots, \hat{\theta}_m$

являются оценками максимального правдоподобия углов прихода лучей.

Важной характеристикой найденных оценок $\hat{\theta}_m$ является граница Рао-Крамера, которая характеризует предельную точность измерения. В диссертационной работе рассмотрены два подхода к вычислению границы Рао-Крамера. Первый из них - классический, связанный с вычислением элементов и обращением информационной матрицы Фишера, приводит к крайне сложной для анализа формуле. Второй подход основан на использовании асимптотических свойств оценок максимального правдоподобия и состоит в разложении в ряд Тейлора функции (3). С помощью этого подхода в работе было получено компактное выражение для корреляционной матрицы $K_{\hat{\theta}\hat{\theta}} = \langle (\hat{\theta} - \langle \hat{\theta} \rangle) (\hat{\theta} - \langle \hat{\theta} \rangle)^T \rangle$ ошибок оценок $\hat{\theta}_m$:

$$K_{\hat{\theta}\hat{\theta}} = \left[2L \sum_{k=R-1}^{k_2} \operatorname{Re} \left\{ H(\omega_k) \circ \left[P(\omega_k) S^*(\omega_k) R_{SN}^{-1}(\omega_k) S(\omega_k) P(\omega_k) \right]^T \right\} \right]^{-1}, \quad (4)$$

где $\hat{\theta} = [\hat{\theta}_1, \dots, \hat{\theta}_M]$; $\operatorname{Re}(\cdot)$ - символ вещественной части числа; $H(\omega_k) = D^*(\omega_k) R_N^{-1}(\omega_k) \Pi_O(\omega_k) D(\omega_k)$; $[D(\omega_k)]_{nm} = \partial [S(\omega_k)]_{nm} / \partial \theta_m$; $\Pi_O(\omega_k) = I - \Pi_S(\omega_k)$; I - единичная матрица; \circ - символ поэлементного произведения матриц; $[P(\omega_k)]_{nm} = \langle A_n(\omega_k) A_m^*(\omega_k) \exp(-j\omega_k(t_n - t_m)) \rangle$.

На основе формулы (4) были проанализированы потенциальные (предельные) возможности оптимального алгоритма (3) по разрешению соседних лучей. В качестве критерия разрешения выбран критерий, согласно которому два соседних луча считаются разрешенными, если среднее значение углового расстояния между ними больше суммы средне-квадратичных отклонений (СКО) ошибок оценок углов прихода лучей.

Для гидролого-акустических условий распространения звука в Черном море, были выполнены расчеты структуры звуковых полей сигнала и шумов моря. На рис. 1 показана характерная для летних условий структура звукового поля сигнала на апертуре антенны. Амплитуды вертикальных отрезков пропорциональны амплитудам сигналов, распространяющимся по разным лучам, а их горизонтальные координаты - углам прихода этих лучей. При расчетах предполагалось, что источник излучает случайный гауссовский сигнал в октавной полосе частот 12-4 кГц. Сигнал принимался вертикальной эквидистантной антенной, состоящей из 12 гидрофонов, расположенных на расстоянии $d = c/2f_B$ друг от друга.

Представленные на рис. 2 зависимости (сплошные кривые) позволяют определить время наблюдения T_O , необходимое для разрешения двух соседних лучей при заданном отношении сигнал/шум (B_{SA}/B_N) на апертуре

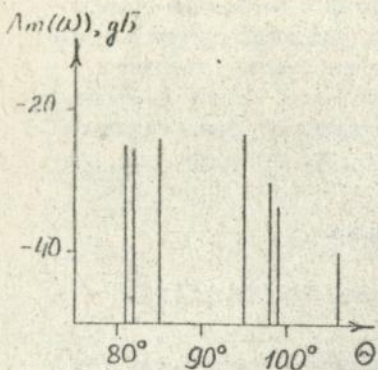


Рис. 1

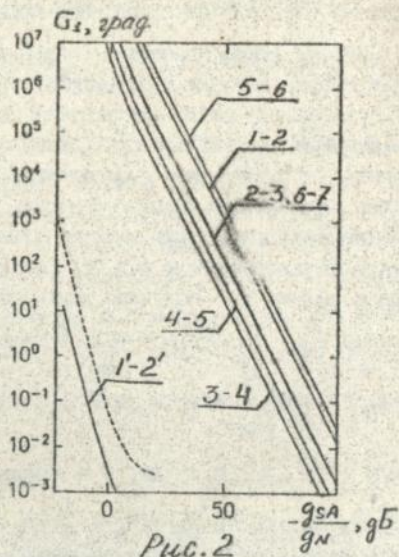


Рис. 2

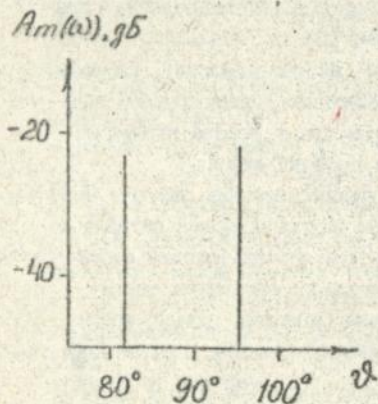


Рис. 3

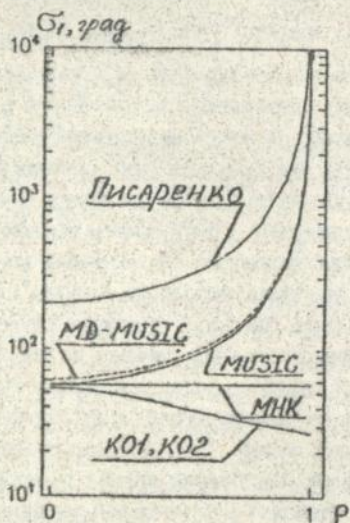


Рис. 4

антенны. Анализ этих зависимостей показывает, что для разрешения всех семи лучей (неразрешимых по Рэлею) с помощью антенны малых волновых размеров (порядка нескольких длин волн) необходимы значительные энергетические или временные затраты: превышение на 50-100дБ пороговых отношений сигнал/шум (пунктирная кривая), достаточных для обнаружения источника сигнала, или увеличения времени T_0 до сотен часов. Следовательно можно говорить о невозможности углового разрешения всех лучей в реальных морских условиях.

В связи с этим, в диссертационной работе предложено решать задачу разрешения лучей и традиционной постановкой, а именно, перейти к модели группы лучей. Эта модель аппроксимирует поле $s(\omega, \vec{r}_R)$ (рис. 1) меньшим количеством M лучей (обычно, двумя или тремя). Эти лучи (рис. 3), именуемые в дальнейшем группами лучей, несут в себе основную информацию о структуре поля сигнала. С позиции практических нужд часто оказывается достаточно оценить углы \vec{U}_m , прихода группы лучей.

На основе минимизации квадратичного критерия ошибки аппроксимации поля сигнала, выполнен синтез алгоритма определения параметров групп лучей. Показано (кривая Г'-2' на рис. 2), что с помощью оптимального алгоритма (3) теперь возможно разрешение групп лучей на дистанциях обнаружения.

В принципе, для оценивания углов прихода групп лучей также может быть использован оптимальный алгоритм (3), однако его техническая реализация сопряжена со значительными трудностями. Поэтому представляется целесообразным использовать на практике более простые в реализации квазиоптимальные алгоритмы. Синтезу и анализу точностных характеристик таких алгоритмов посвящена **вторая** глава диссертационной работы.

Прежде всего были проанализированы два известных алгоритма: традиционный алгоритм пространственной обработки и алгоритм Кейпона. Установлено, что при имеющихся место на практике ограничениях на размер антенны, применение традиционного алгоритма пространственной обработки не позволяет разрешить по углу группы лучей, показанные на рис. 3. Алгоритм Кейпона, в ряде случаев, способен разрешить группы лучей, но при этом нужно иметь достаточно большое отношение сигнал/шум на элементах антенны, которое примерно на 20-30дБ превышает отношение сигнал/шум, необходимое для обнаружения источника сигнала.

В связи с этим во второй главе значительно внимание уделено синтезу структуры и анализу эффективности алгоритмов, использующих свойства собственных векторов (СВ) $\varphi_R(\omega_R)$ уравнения

$$R_{SN}(\omega_k)\varphi_n(\omega_k) = \lambda_n(\omega_k)R_N(\omega_k)\varphi_n(\omega_k), \quad (5)$$

где $\lambda_1(\omega_k) \geq \dots \geq \lambda_{Mc}(\omega_k) \geq \lambda_{Mc+1}(\omega_k) = \dots = \lambda_N(\omega_k) = 1$ - упорядоченные по убыванию собственные значения (СЗ) уравнения (5).

Выполнен синтез квазиоптимального алгоритма оценивания углов прихода групп лучей, в основу которого положено использование свойства с и г н а л ь н ы х собственных векторов $\varphi_n(\omega_k)$ $n=1, \dots, Mc$ уравнения (5). При синтезе учтена широкополосность излучаемого источника сигнала и пространственная коррелированность шумов.

В соответствии с синтезированным алгоритмом для нахождения оценок $\hat{\mathbb{V}}_m$ углов прихода групп лучей необходимо искать глобальный минимум функции

$$V_S(\mathbb{V}) = \sum_{k=R\bar{1}}^{k\bar{2}} Sp\left\{P_O(\omega_k)R_N(\omega_k)\Psi_S(\omega_k)W(\omega_k)\Psi_S^+(\omega_k)\right\}, \quad (6)$$

где $\mathbb{V} = [V_1, \dots, V_{M\Gamma}]$; $\Psi_S(\omega_k) = [\hat{\varphi}_1(\omega_k), \dots, \hat{\varphi}_{Mc}(\omega_k)]$ - матрица, составленная из Mc ($Mc \geq M\Gamma$) сигнальных СВ уравнения $R_{SN}(\omega_k)\hat{\varphi}_n(\omega_k) = \hat{\lambda}_n(\omega_k)R_N(\omega_k)\hat{\varphi}_n(\omega_k)$; $\hat{\lambda}_1(\omega_k) \geq \dots \geq \hat{\lambda}_N(\omega_k)$; $W(\omega_k)$ - положительно определенная весовая эрмитова матрица. Координата глобального минимума функции (6) дает искомые оценки углов прихода групп лучей.

Целевая функция (6) фактически порождает целое семейство алгоритмов, соответствующих разным весовым матрица $W(\omega_k)$. Все алгоритмы этого семейства дают асимптотически несмещенные оценки углов прихода групп лучей, отличающиеся друг от друга корреляционными матрицами ошибок, то есть точностями. В работе показано, что самую высокую точность обеспечивает весовая матрица $W(\omega_k) = \Lambda^2(\omega_k)\Lambda_S^{-1}(\omega_k)$, где $\Lambda(\omega_k) = \Lambda_S(\omega_k) - I$; $\Lambda_S(\omega_k) = \text{diag}(\hat{\lambda}_1(\omega_k), \dots, \hat{\lambda}_{Mc}(\omega_k))$; $\text{diag}(\cdot)$ - символ диагональной матрицы. Этой весовой матрице соответствует квазиоптимальный алгоритм I (КОI). При других весовых матрицах, квазиоптимальный алгоритм (6) переходит в известные в литературе алгоритмы. Так для $W(\omega_k) = \Lambda(\omega_k)$ из (6) следует алгоритм метода наименьших квадратов (МНК), а для $W(\omega_k) = I$ - алгоритм MD-MUSIC.

Во второй главе выполнен также синтез квазиоптимального алгоритма оценивания углов прихода групп лучей, в основу которого положено использование свойства шумовых собственных векторов $\varphi_n(\omega_k)$ $n = M\Gamma+1, \dots, N$ уравнения (5).

Согласно этого алгоритма оценки $\hat{\mathbb{V}}_m$ углов прихода групп лучей являются координатами глобального минимума функции

$$V_N(\mathbb{B}) = \sum_{k=K1}^{K2} Sp \left\{ S^*(\omega_k) \Psi_N(\omega_k) \Psi_N^*(\omega_k) S(\omega_k) W(\omega_k) \right\}. \quad (7)$$

где $\Psi_N(\omega_k) = [\hat{\varphi}_{N1}(\omega_k), \dots, \hat{\varphi}_{Nl}(\omega_k)]^T$ - матрица, составленная из $N - M_l$ шумовых СВ.

Целевая функция (7) порождает второе семейство алгоритмов, каждому из которых соответствует своя весовая матрица $W(\omega_k)$. В данном случае, самые точные оценки углов прихода группы лучей обеспечивает весовая матрица $W(\omega_k) = [S^*(\omega_k) \hat{\Psi}_S(\omega_k) \Lambda_S(\omega_k) \Lambda_S^{-2}(\omega_k) \hat{\Psi}_S(\omega_k) S(\omega_k)]^{-1}$; ей соответствует квазиоптимальный алгоритм 2 (КО2). Как частные случаи алгоритм (7) включает известные в литературе алгоритмы метода наименьших квадратов (МНК) ($W(\omega_k) = P(\omega_k)$), MUSIC и Писаренко ($W(\omega_k) = I$).

Сравнительный анализ алгоритмов КО1, КО2, МНК, MUSIC, MD-MUSIC и Писаренко, показал, что наименьшее СКО оценок углов прихода групп лучей удается достичь с помощью квазиоптимальных алгоритмов 1 и 2. Причем, с увеличением времени наблюдения T_0 оба алгоритма обеспечивают потенциальную точность оценок, т.е. достигают границы Рао-Крамера (4). Наибольшее СКО оценок (наихудшая точность) получается при использовании алгоритмов MD-MUSIC, MUSIC и Писаренко. Алгоритм МНК занимает промежуточное положение между этими двумя группами алгоритмов.

В работе показано, что точностные характеристики алгоритмов КО1, КО2, МНК, MD-MUSIC, MUSIC и Писаренко зависят от степени коррелированности сигналов в между группами лучей. При малых значениях коэффициента корреляции ρ ($\rho < 0,2$) алгоритмы КО1, КО2, МНК, MUSIC, и MD-MUSIC дают близкие друг к другу значения СКО σ_m ошибок (рис. 4). При сильной корреляции сигналов ($\rho > 0,8$) наиболее точные оценки обеспечивает алгоритмы КО1 и КО2. Алгоритм МНК уступает им примерно в 1,5 - 2 раза, алгоритмы MD-MUSIC, MUSIC и Писаренко - более чем в сто раз.

В третьей главе исследуется влияние на точностные характеристики алгоритмов КО1 и КО2 различных дестабилизирующих факторов: ошибок измерения СКМ $R_N(\omega_k)$ шумов; амплитудно-фазовых ошибок в антенне; ошибок, возникающих из-за неточной информации о координатах элементов антенны; ошибок определения углового положения антенны.

В результате выполненных исследований получены конкретные формулы, которые позволяют оценивать возможности гидроакустических систем по угловому разрешению многолучевых сигналов при наличии перечислен-

ных дестабилизирующих факторов, а также формулировать требования к параметрам приемного тракта, реализующего пространственно-временную обработку гидроакустических сигналов.

Установлено, что для уменьшения влияния ошибок измерения СКМ $R_N(\omega_k)$ шумов следует увеличивать время T_N , отводимое для оценивания элементов этой матрицы. В частности, при $\sigma_{SA}/\sigma_N \sim \text{ОдБ}$ достаточно выбрать $T_N \geq 5T_0$, чтобы практически устранить дестабилизирующее влияние ошибок измерения корреляционной матрицы шумов. Что же касается амплитудно-фазовых ошибок в антенне и ошибок, возникающих из-за неточной информации о ее пространственном положении, то их влияние на угловое разрешение лучей можно уменьшить путем повышения точности калибровки приемной антенны и использования в приемном тракте элементной базы с высокой временной стабильностью параметров.

Для практического применения квазиоптимальных алгоритмов I и 2 необходимо знать количество сигнальных или шумовых собственных векторов, а так же количество M групп лучей. Как правило, эти два параметра неизвестны и подлежат оцениванию.

В результате исследований, выполненных в третьей главе, установлено, что в условиях ограниченного времени наблюдения T_0 , корреляция сигналов между группами лучей может стать существенным препятствием, не позволяющим правильно оценить количество шумовых собственных векторов. По этой причине, квазиоптимальный алгоритм 2 дает заниженную оценку количества групп лучей и его практическое применение становится неэффективным.

Для квазиоптимального алгоритма I предложен алгоритм оценивания числа групп лучей. В процессе работы этого алгоритма оценивается также количество сигнальных собственных векторов и углы прихода групп лучей.

Идея алгоритма состоит в следующем. Поскольку целевая функция (6) является мерой близости между исходными данными и аппроксимирующей их моделью групп лучей, то последовательно увеличивая число групп лучей и вычисляя соответствующие им оценки углов можно повышать точность аппроксимации исходных данных. Этот процесс начинается со значения числа групп лучей совпадающего с оценкой \hat{M}_c числа сигнальных СВ, и прекращается как только значение целевой функции (6) станет меньше некоторого порога. В работе показано, что порог должен устанавливаться исходя из того, что нормированная статистика \hat{M}_c/\hat{M} квазиоптимального алгоритма I асимптотически ($T_0 \rightarrow \infty$) распределена

по закону хи квадрат с $2\hat{M}(N - \hat{M})N_f - \hat{M}^2$ степенями свободы, где \hat{M} - текущая оценка количества групп лучей, $N_f = (k2 - k1 + 1)$ - количество частот накопления.

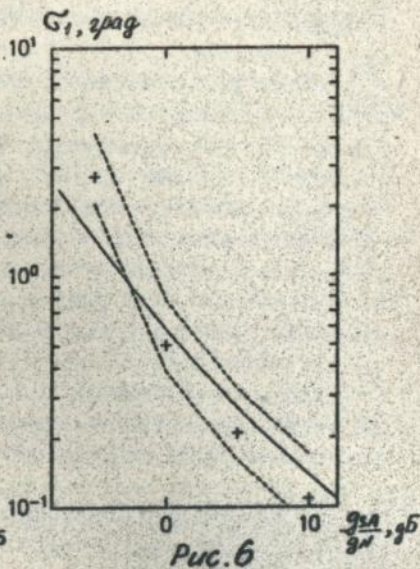
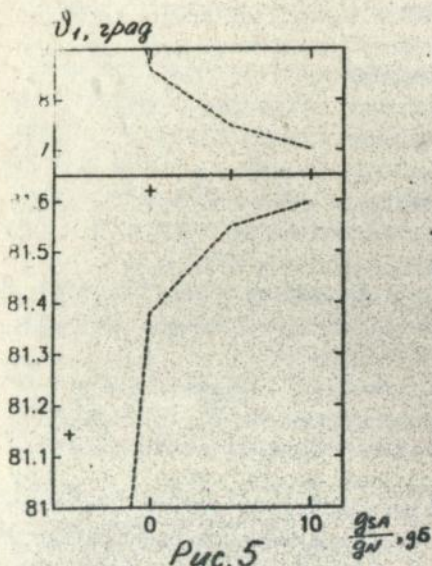
Теоретические результаты, относящиеся к точностным характеристикам алгоритма оценивания числа групп лучей и квазиоптимального алгоритма I носят асимптотический характер и получены в предположении, что время наблюдения $T_O \rightarrow \infty$. В реальных условиях оно всегда ограничено и редко превышает несколько секунд. В связи с этим, в четвертой главе диссертационной работы выполнены экспериментальные исследования эффективности алгоритма оценивания числа групп лучей и квазиоптимального алгоритма I в условиях ограниченного времени наблюдения. В этой главе проанализированы также вычислительные затраты, необходимые для технической реализации этих алгоритмов.

Для глобальной минимизации целевой функции (6) предложено использовать двухэтапную вычислительную процедуру. На первом ее этапе с помощью метода покоординатного спуска находятся предварительные оценки направлений прихода групп лучей. На физическом уровне этому этапу соответствует формирование пространственных каналов, число которых совпадает с числом групп лучей, и поочередное сканирование диаграммами направленности этих каналов в заданном секторе вертикальных углов. На втором этапе производится уточнение найденных оценок углов с помощью метода Гаусса-Ньютона. Физически эта процедура эквивалентна сканированию уже всеми диаграммами направленности одновременно. Анализ вычислительных затрат, сопутствующих оцениванию направлений прихода групп лучей, показал, что техническая реализация КОГ (6) оказывается проще, чем оптимального алгоритма (3).

На основании вычислительных экспериментов установлено, что на дистанциях обнаружения с помощью квазиоптимального алгоритма I можно получить несмещенные (рис. 5) и эффективные (рис. 6) оценки углов прихода двух групп лучей (не разрешимых по Рэлею), если длительность T_O временного интервала наблюдения составляет 0,5 секунды. Результаты расчетов, представленные на рис. 5, 6 относятся к лучу первой группы (рис. 3, $\theta = 81,65^\circ$). Сплошная линия на рис. 5, 6 соответствует теоретическим результатам, крестиками указаны экспериментальные результаты, пунктирной линией - границы 99% доверительного интервала.

Если количество групп лучей заранее неизвестно и подлежит оцениванию, то как показано в работе, время наблюдения T_O должно быть увеличено до 1,8с.

Экспериментально подтверждена эффективность синтезированного



алгоритма оценивания числа групп лучей в условиях Черного моря при характерных для практики ограничениях на время наблюдения ($T_0 < 10$ с) и отношении сигнал/шум ($B_{SA}/B_N \leq 0$ дБ). Показано, что с его помощью можно разрешить две группы лучей (не разрешимые по Рэлею) на дистанции обнаружения источника сигнала.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Основные результаты работы сводятся к следующему.

1. Синтезирован оптимальный (по критерию максимума функции правдоподобия) алгоритм оценивания углов прихода сигналов, распространяющихся в гидроакустическом волноводе по различным лучевым траекториям. Алгоритм учитывает широкополосность источника излучения, наличие анизотропных шумов моря и пригоден для обработки напряжений как на выходах элементов антенны, так и на выходах пространственных каналов.

2. Получено компактное выражение для границы Раю-Крамера оценок углов прихода лучей, найденных с помощью оптимального алгоритма. Ре-

результаты расчетов, выполненных на основе этого выражения, показывают, что в реальных морских условиях для разрешения пяти и более неразрешимых по Рэлею лучей необходимы значительные энергетические или временные затраты: превышение на 50 - 100дБ пороговых отношений сигнал/шум, достаточных для обнаружения сигнала источника, или увеличения времени наблюдения до десятков и сотен часов. В связи с этим, можно говорить о практической невозможности углового разрешения всех лучей.

3. Предложено решать задачу разрешения лучей в нетрадиционной постановке, связанной с концепцией модели группы лучей. Модель группы лучей аппроксимирует исходное поле небольшим (обычно двумя-тремя) количеством лучей, которые несут в себе основную информацию о структуре поля сигнала. Показано, что с помощью оптимального алгоритма возможно разрешение групп лучей на дистанции обнаружения источника сигнала.

4. Выполнен синтез квазиоптимальных алгоритмов (КО1 и КО2) оценивания углов прихода группы лучей, в основу которого положено использование свойства сигнальных и шумовых собственных векторов спектрально-корреляционной матрицы поля на апертуре приемной антенны. При синтезе учтена широкополосность излучаемого источником сигнала и пространственная коррелированность шумов.

Показано, что принятый в работе метод синтеза порождает целое семейство алгоритмов, которые как частные случаи включают известные в литературе алгоритмы метода наименьших квадратов (МНК), многомерный MUSIC (MD-MUSIC), MUSIC и Писаренко.

5. Выполнен сравнительный анализ эффективности алгоритмов КО1, КО2, МНК, MUSIC, MD-MUSIC и Писаренко, в результате которого установлено, что на дистанции обнаружения источника сигнала самые точные оценки углов прихода групп лучей дают квазиоптимальные алгоритмы КО1 и КО2. Причем, с увеличением времени наблюдения оба алгоритма позволяют достичь границы Рао-Крамера.

Показано также, что точность оценок углов прихода групп лучей существенно зависит от степени корреляции сигналов между группами лучей. С увеличением значения коэффициента корреляции становится особенно очевидным преимущество алгоритмов КО1 и КО2 перед остальными алгоритмами.

6. Исследовано влияние на точностные характеристики квазиоптимальных алгоритмов КО1 и КО2 различных дестабилизирующих факторов: ошибок измерения спектрально-корреляционной матрицы шумов; амплитуд-

и системных ошибок в алгоритме; ошибок, возникающих из-за неточной информации о координатах элементов антенны; ошибок определения углового положения антенны. Показано, что за счет повышения точности калибровки антенны и использования элементной базы с высокой временной стабильностью можно уменьшить влияние этих ошибок до практических приемлемых значений средне-квадратических отклонений равных $0,5^{\circ}$ - $-1,5^{\circ}$.

7. Синтезирован алгоритм оценивания числа групп лучей с произвольной степенью коррелированности сигналов. С помощью вычислительных экспериментов подтверждена эффективность этого алгоритма в условиях Черного моря при характерных для практики ограничениях на время наблюдения и отношение сигнал/шум.

8. Предложена двухэтапная вычислительная процедура оценки углов прихода групп лучей с помощью квазиоптимального алгоритма КОИ. На первом ее этапе с помощью метода покоординатного спуска находятся предварительные оценки направлений прихода групп лучей. На втором этапе производится их уточнение с помощью метода Гаусса-Ньютона.

Проанализированы вычислительные затраты, необходимые для технической реализации квазиоптимального алгоритма КОИ и показано, что его реализация оказывается значительно проще, чем оптимального алгоритма.

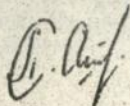
Основные результаты работы отражены в следующих публикациях:

1. Антонюк С. П., Красный Л. Г. Разрешение источников акустических сигналов в волноводе // Акустический журнал. - 1993. - Т. 39, №. - С. 404-413.

2. Антонюк С. П., Красный Л. Г. Точностные характеристики проекционного алгоритма сверхразрешения широкополосных многолучевых сигналов // Судостроительная промышленность. Сер. Акустика. - 1991. - Вып. 47с. - С. 37-45.

3. Антонюк С. П., Красный Л. Г. Алгоритмы сверхразрешения широкополосных многолучевых сигналов, ориентированные на применение многопроцессорных вычислительных средств // Тез. докл. межотр. науч.-техн. семинара, Усть-Нарва, апр. 1991 г. - Л.: НИО "Океанприбор": Ленингр. электротехн. инст., 1991. - С. 14.

4. Антонюк С. П., Красный Л. Г. Точностные характеристики проекционных методов сверхразрешения многолучевых сигналов // Судостроительная промышленность. Сер. Акустика. - 1989. Вып. 31с. - С. 31-38.



Подписано к печати 10.05.1994г. Формат 60×84/Т7
Бумага офсетная Усл.-печ. лист. 1,0, Уч.-изд. лист 1,0.
Тираж 100. Заказ 387. Бесплатно.

Полиграф.уч-к Института электродинамики АН Украины
252057, Киев-57, проспект Победы, 56

AB 30.113

AB 30.113