

Лихоеденко Андрей Константинович

**АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ
В АВТОНОМНЫХ СИСТЕМАХ ПЕЛЕНГАЦИИ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ
С ШИРОКОПОЛОСНЫМИ СИГНАЛАМИ**

Специальность 2.3.1.

Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель: **Сидоркина Юлия Анатольевна**,
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры автономных информационных и управляющих систем МГТУ им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: **Акиншин Руслан Николаевич**,
доктор технических наук, профессор,
заместитель директора центра, Акционерное общество «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца»

Бритенков Александр Константинович,
кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный университет»

Защита состоится «17» октября 2023 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.2.331.14, созданного на базе МГТУ им. Н.Э. Баумана, по адресу: 105005, Москва, Госпитальный пер., 10, ауд. 613м.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по адресу: 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1 на имя ученого секретаря диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Автореферат разослан «__» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., доцент



Игорь Валентинович Муратов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Проблема контроля, защиты и охраны периметра стационарных объектов, таких как электростанции различного назначения, гидроузлы, специализированные складские комплексы, приобретает все большую значимость. Потенциальную опасность для таких объектов могут представлять аэродинамические и наземные объекты, в том числе самолеты и вертолеты, гусеничная и колесная техника. С точки зрения физики такие объекты представляют собой источники широкополосных акустических излучений.

Пассивные акустические системы обеспечивают скрытность и длительное время функционирования вследствие малого потребления энергии. Поэтому развитие методов пеленгации объектов применительно к таким системам является актуальной. Информация о параметрах движения подвижных объектов и их координатах может использоваться системой принятия решений как оператором, так и автономно. При этом также должны решаться задачи обнаружения и распознавания.

В системах контроля и доставки грузов могут решаться задачи определения углового положения и позиционирования объектов. Установка идентификационных меток различного типа (например, радиочастотных) может вызывать определенные сложности, связанные с отсутствием непосредственного доступа к объекту контроля. В этом случае могут использоваться радиолокационные (РЛ) методы пеленгации с использованием широкополосных и сверхкороткоимпульсных (СКИ) сигналов.

Однопозиционные системы, построенные на акустическом принципе действия, позволяют в пассивном режиме решать вопросы распознавания, пеленгации и сопровождения наземной техники и аэродинамических объектов. Для РЛ систем в активном режиме также имеется возможность оценки дальности до объекта. Поскольку скорость движения потенциально опасных объектов может изменяться в достаточно широком диапазоне, актуальной является задача обеспечения адаптации алгоритмов обработки сигналов к скоростям движения наземных и аэродинамических объектов при их обнаружении и распознавании.

Исследование рабочих характеристик и повышение точности слежения за объектами в системах пеленгации с широкополосными сигналами (акустических, РЛ с СКИ сигналами и системах с синтезированными фазированными антенными решетками (ФАР)) является одним из актуальных направлений развития систем обнаружения и сопровождения различных объектов.

Автономные информационные системы (АИС) ближней локации осуществляют обнаружение, распознавание и пеленгацию объектов в условиях сложной помеховой обстановки на расстояниях от единиц до сотен метров при малых временах взаимодействия. Случайные сигналы и помехи в таких системах имеют большой динамический диапазон амплитудных, частотных и временных характеристик и ярко выраженный нестационарный характер. Информативные параметры сигналов часто являются нецентрированными случайными величинами или процессами, для которых априорно не известны математические ожидания. В ближней локации получение оценок математических ожиданий по одной реализации часто затруднено из-за нестационарности процессов и ограниченного объема выборки, а также высокого быстродействия таких

систем. Из-за отсутствия сведений о математических ожиданиях нецентрированных случайных параметров в АИС ближней локации часто нет возможности применить известные корреляционные методы обработки сигналов.

В литературе для решения указанных проблем при обосновании алгоритмов обработки информации широко используются адаптивные методы преодоления априорной неопределенности, основанные на регрессионных методах. Адаптивные методы требуют времени на адаптацию, что при малых временах принятия решений в ближней локации не всегда приемлемо. Актуальными являются вопросы обоснования инвариантных алгоритмов обработки нецентрированных нестационарных сигналов на ограниченных интервалах наблюдения, с учетом специфики АИС.

Наибольший вклад в исследования методов обработки информации в области обнаружения, распознавания и пеленгации подвижных объектов среди российских и зарубежных ученых внесли Б.Р. Левин, А.А. Коростелев, К. Фукунага, Дж. Бендат, В.К. Хохлов и другие.

Объектом исследования являются акустические и радиолокационные системы пеленгации подвижных объектов, функционирующие в условиях сложной помеховой обстановки и использующие для получения информации широкополосные сигналы.

Предметом исследования являются алгоритмы обработки информации в автономных системах пеленгации с широкополосными сигналами.

Целью работы является обоснование алгоритмов обработки информации в автономных системах пеленгации с широкополосными сигналами на основе регрессионных методов и модифицированных дискриминаторов для улучшения рабочих характеристик алгоритмов.

Задачи исследования:

1) разработка алгоритмов формирования диаграмм направленности и дискриминационных характеристик пеленгаторов со спектральной и временной обработкой широкополосных сигналов;

2) исследование и разработка алгоритмов обработки информации и структурных схем следящих акустических и радиолокационных пеленгаторов с широкополосными сигналами с классическими и модифицированными дискриминаторами и анализ их рабочих характеристик;

3) разработка программ математического моделирования широкополосных сигналов для проведения исследований алгоритмов автономных информационных систем пеленгации.

Соответствие паспорту научной специальности. Диссертация соответствует специальности 2.3.1 «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки)». Полученные в ней результаты соответствуют паспорту специальности по п. 4 «Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта».

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1) предложен регрессионный алгоритм обнаружения подвижных объектов по относительной ширине полосы энергетического спектра сигнала, инвариантный к средней частоте и дисперсии широкополосных случайных процес-

сов;

2) разработаны алгоритмы формирования диаграмм направленности и дискриминационных характеристик фазированных антенных решеток пеленгаторов со спектральной и временной обработкой широкополосных сигналов;

3) разработан алгоритм следящего пеленгатора подвижных объектов с модифицированным дискриминатором;

4) предложен алгоритм следящего измерителя регрессионного тракта обнаружения (распознавания) сигнала вертолета акустического пеленгатора с блоком адаптации к скорости движения.

Практическая значимость результатов исследования:

1) инвариантность регрессионного алгоритма обнаружения к средней частоте и дисперсии широкополосных случайных процессов позволяет обеспечивать независимость качества рабочих характеристик от скорости и дальности до подвижных объектов;

2) разработанная структурная схема и рабочие характеристики следящего пеленгатора с модифицированным дискриминатором позволяют формировать технические требования к проектированию перспективных вариантов пеленгаторов подвижных объектов в сложной помеховой обстановке.

Достоверность и обоснованность научных положений и результатов подтверждены корректным использованием методов и математических моделей. Полученные в диссертации выводы сформированы на основе анализа результатов исследований и сопоставления их с экспериментальными данными.

Внедрение результатов работы. Результаты диссертации использованы при разработке ООО «НПП «ИТЭЛМА» радиолокационного датчика системы контроля мертвых зон, в научно-исследовательской работе «Фундаментальные проблемы создания автономных информационных и управляющих систем (АИУС)» и в учебном процессе на кафедре автономных информационных и управляющих систем МГТУ им. Н.Э. Баумана в рамках дисциплин «Теория обработки информации» и «Бортовые автономные системы принятия решений».

Методы исследования. При решении поставленных задач использованы методы математического анализа, теории вероятностей и математической статистики, статистической радиотехники и математического моделирования.

Положения, выносимые на защиту:

1) регрессионный алгоритм обнаружения подвижных объектов по относительной ширине полосы энергетического спектра сигнала, инвариантный к средней частоте и дисперсии широкополосных случайных процессов;

2) алгоритмы формирования диаграмм направленности и дискриминационных характеристик фазированных антенных решеток пеленгаторов со спектральной и временной обработкой широкополосных сигналов;

3) алгоритм и структурная схема следящего акустического пеленгатора подвижных объектов с модифицированным дискриминатором;

4) алгоритм следящего измерителя регрессионного тракта обнаружения (распознавания) сигнала вертолета акустического пеленгатора с блоком адаптации к скорости движения.

Апробация работы. Результаты исследований докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах: 2015 5th International

Workshop on Computer Science and Engineering: Information Processing and Control Engineering (2015 г.); 2016 International Conference on Frontiers of Sensors Technologies (2016 г.); Международный форум «Цифровые технологии в инженерном образовании: новые тренды и опыт внедрения» (2019 г.); Международные конференции «Моделирование в инженерном деле» в рамках Международных конгрессов «Моделирование сложных технических систем» (2020, 2021 гг.); XV Всероссийская конференция молодых учёных и специалистов (с международным участием) «Будущее машиностроения России» (2022 г.); научный семинар кафедры автономных информационных и управляющих систем МГТУ им. Н.Э. Баумана (2023 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 18 научных работ, из них 9 статей в журналах, входящих в Перечень ВАК РФ, 3 статьи, индексируемые в международных базах цитирования SCOPUS и Web of Science, один Патент РФ и одно Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Текст диссертации изложен на 142 машинописных страницах, содержит 77 рисунков. Список литературы включает 103 наименования работ.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении проанализирована актуальность диссертационной работы, определены цель, задачи, объект и предмет исследования, изложены научная новизна, теоретическая значимость и практическая ценность, приведены основные научные результаты, выносимые на защиту, а также сведения о реализации и публикациях полученных результатов.

В первой главе диссертации рассмотрены регрессионные алгоритмы формирования областей принятия решений в автономных информационных системах. Исследованы алгоритмы обнаружения широкополосных случайных сигналов и алгоритмы модифицированных дискриминаторов. Представлены результаты расчетов и анализ дискриминационных характеристик (ДХ) пеленгаторов.

Алгоритм обнаружения и распознавания двумерного нецентрированного вектора в системе с регрессионным алгоритмом при учете только парной корреляции двух соседних отсчетов τ_i, τ_{i+1} длительностей интервалов между нулями входного сигнала можно представить в виде:

$$\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} \left\{ \tau_i + \tau_{i+1} - K \left| \tau_i - \beta_{\tau_i/\tau_{i+1}} \tau_{i+1} \right| \right\} \geq U_{\text{пор}}, \quad (1)$$

где n – количество отсчетов τ_i на интервале T_c ; $\beta_{\tau_i/\tau_{i+1}}$ – коэффициент начальной регрессии интервала τ_i на τ_{i+1} ; $U_{\text{пор}}$ – порог принятия решения.

Использование в качестве информативного признака интервалов между нулями реализации случайного процесса на входе системы, осуществляющей обнаружение и распознавание по относительной ширине полосы энергетического спектра α в широком динамическом диапазоне изменения уровней сигналов и средней частоты энергетического спектра, позволяет обосновать регрессионный алгоритм принятия решений. При учете только парной корреля-

ции двух соседних отсчетов τ_i, τ_{i+1} алгоритм такой системы может быть представлен в виде

$$\frac{1}{\tau_n} \int_{z-T_c}^z U_0 [2 \cdot 1(t) - K \xi(t)] dt \geq U_{\text{пор}}, \quad (2)$$

где τ_n – постоянная времени, выбираемая исходя из условия $\tau_n \gg T_c$; $\xi(t)$ – реализация случайного импульсного процесса с длительностями импульсов, равными разностям длительностей интервалов между нулями соседних импульсов; U_0 – амплитуда импульсов случайного импульсного процесса; K – весовой коэффициент; $U_{\text{пор}}$ – пороговый уровень; T_c – длительность реализации.

Регрессионные алгоритмы ограничивают относительное расстояние от линии начальной регрессии, имеют четкий геометрический смысл и поэтому могут применяться независимо от закона распределения информативных параметров.

Анализ показал, что математическое ожидание μ_z и среднеквадратическое отклонение σ_z процесса $\{2U_0 - U_0 K \xi(t)\}$ на входе порогового устройства при постоянном объеме выборки N не зависят от дисперсии процесса и средней частоты ω_0 энергетического спектра входной реализации, а определяются его относительной шириной полосы α и параметром алгоритма K .

Помимо собственно решения задач обнаружения и распознавания, одной из важных функций автономных систем пеленгации является определение углового положения объектов локации и слежения за ними. При этом существенное влияние на качество функционирования системы пеленгации оказывает полоса захвата и характер изменения ДХ в окрестности нуля.

В пеленгаторах с широкополосными сигналами для обработки информации целесообразно использовать алгоритм модифицированного дискриминатора, ДХ которого определяется выражением

$$D(\tau_c - \tau_0) = \frac{K \hat{C}_{\xi\eta}(\tau_c - \tau_0, \pi/2)}{\hat{C}_{\xi\eta}(\tau_c - \tau_0)}, \quad (3)$$

где K – постоянный множитель, $\hat{C}_{\xi\eta}(\tau_c - \tau_0, \pi/2)$ и $\hat{C}_{\xi\eta}(\tau_c - \tau_0)$ – оценки взаимных корреляционных функций (ВКФ) соответственно квадратурных и синфазных сигналов с выходов приемных каналов, τ_0 – опорная точка (задержка), соответствующая максимуму ВКФ синфазных сигналов, τ_c – текущая задержка.

При этом, в отличие от оптимального и субоптимального алгоритмов пеленгации, знак отклонения ординаты ДХ от нуля определяется без вычисления производных по параметру от ВКФ сигналов между каналами. Для реализации (3) целесообразно использовать физически реализуемое дискретное преобразование Гильберта (ДПГ) со сдвигом импульсной характеристики на $(N-1)/2$ отсчетов, где N – число отсчетов конечной импульсной характеристики.

Во второй главе исследованы алгоритмы обработки информации пеленгаторов источников широкополосных сигналов. Проанализирован спектральный способ обработки. Исследовано формирование диаграмм направленности

(ДН) и ДХ в синтезированных ФАР. Обоснован алгоритм акустической системы распознавания вертолета с блоком адаптации к скорости движения.

В двухэлементной антенной решетке (Рисунок 1) и широкополосными сигналами на входе возможна реализация следующих функций: формирование ДН и ДХ, сканирование главным максимумом ДН и сопровождение объекта по углу пеленга.

Для обоснования указанных возможностей исследованы аргументы взаимного дискретного спектра $\varphi_{\zeta\eta}^D(\theta_n, \theta_c, k)$ и функций когерентности $\gamma_{\zeta\eta}^2(\theta_n, \theta_c, k)$ на входах пеленгатора. При расчетах относительная частота $k = \omega/\omega_0$ изменялась с шагом $h = 10^{-2}$ в пределах от 0 до 2. На Рисунке 2 приведены зависимости $\varphi_{\zeta\eta}(k)$ (а) и $\gamma_{\zeta\eta}^2(k)$ (б) для угла визирования локализованного источника $\theta_c = 45^\circ$, равномерно распределенной помехи θ_n в диапазоне углов от -90° до $+90^\circ$; $\alpha = 0,5$ для сигнала и $\alpha = 1$ для помехи при совпадающих центральных частотах спектра.

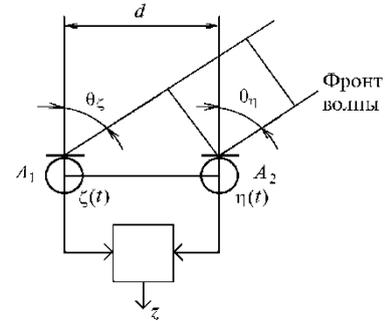


Рисунок 1. Функциональная схема приемной части двухканального пеленгатора

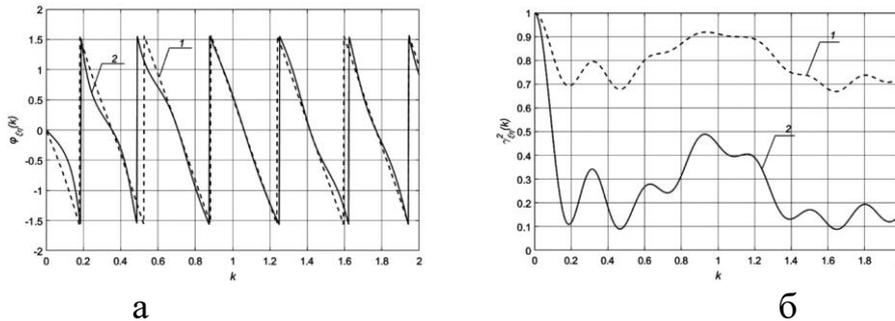


Рисунок 2. Зависимости $\varphi_{\zeta\eta}^D(\theta_n, \theta_c, k)$ (а) и $\gamma_{\zeta\eta}^2(\theta_n, \theta_c, k)$ (б), $a^2 = 10$ (график 1), $a^2 = 1$ (график 2), $d/\lambda_0 = 2$, $\theta_c = 45^\circ$

При использовании аргументов взаимного дискретного спектра $\varphi_{\zeta\eta}^D(\theta_n, \theta_c, k)$ имеется возможность определения угла визирования объекта для углов от единиц градусов до 90° . Оценки односторонних энергетических спектральных плотностей (СП) $\tilde{G}_\eta(n2\pi f_1)$ или $\tilde{G}_\zeta(n2\pi f_1)$ и аргумента взаимной СП $\tilde{\varphi}_{\zeta\eta}(n2\pi f_1)$ позволяют сформировать ДН и ДХ ФАР и осуществить в синтезированной ФАР сканирование главным максимумом ДН. При этом ДН при использовании синфазных сигналов, квадратурных сигналов и ДХ имеют, соответственно, вид:

$$F^c(\theta, \theta_0) = \sum_{n=1}^N \chi_n (N - n + 1) \tilde{G}(n2\pi f_1) \cos[\tilde{\varphi}_{\zeta\eta}(n, \theta) - n\Delta\psi(\theta_0)] \quad (4)$$

$$F^k(\theta, \theta_0) = \sum_{n=1}^N \chi_n (N - n + 1) \tilde{G}(n2\pi f_1) \sin[\tilde{\varphi}_{\zeta\eta}(n, \theta) - n\Delta\psi(\theta_0)] \quad (5)$$

$$D(\theta, \theta_0) = \frac{F^k(\theta, \theta_0)}{F^c(\theta, \theta_0)}, \quad (6)$$

где χ_n – множители пространственного окна для эквидистантной решетки;

$\tilde{\varphi}_{\xi\eta}(n, \theta)$ – оценка аргумента взаимной СП; $\Delta\psi(\theta_0) = \frac{2\pi d}{\lambda_1} \sin \theta_0$; $\lambda_1 = \frac{V}{f_1}$.

На Рисунке 3 приведены результаты моделирования нормированных ДН

$E^c(\theta, \theta_0) = \frac{F^c(\theta, \theta_0)}{F^c(\theta_0)}$, $E^k(\theta, \theta_0) = \frac{F^k(\theta, \theta_0)}{F^k(\theta_0)}$ и ДХ двухканального пеленгатора при ра-

боте на фоне распределенных в пространстве гауссовских помех в диапазоне от

-90° до $+90^\circ$ при $\alpha = 0,5$, $N = 8$, $\chi_n = 1$, $a^2 = 0,1$.

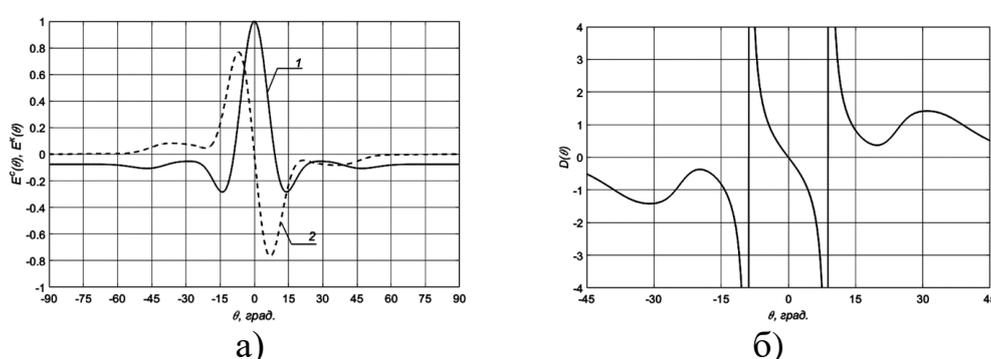


Рисунок 3. ДН для $E^c(\theta, \theta_0)$ (график 1) и $E^k(\theta, \theta_0)$ (график 2) широкополосных сигналов (а) и ДХ пеленгатора (б) при $\theta_0 = 0^\circ$

Анализ Рисунка 3 показывает, что в сформированных ДН подавлены боковые лепестки. Использование двух квадратур сигналов позволяет сформировать ДХ для слежения за сосредоточенным объектом на фоне распределенных в пространстве помех в окрестности опорной точки.

Одним из классов объектов, которые необходимо обнаруживать и сопровождать при решении задач пеленгации, являются вертолеты. При построении алгоритма акустической системы распознавания вертолета от других подвижных объектов может быть решена задача адаптации к скорости его движения.

Информативным признаком при этом является периодический характер спектральных плотностей мощности (СПМ) реализаций акустических сигналов вертолета. На Рисунке 4 приведены примеры нормированных оценок СПМ.

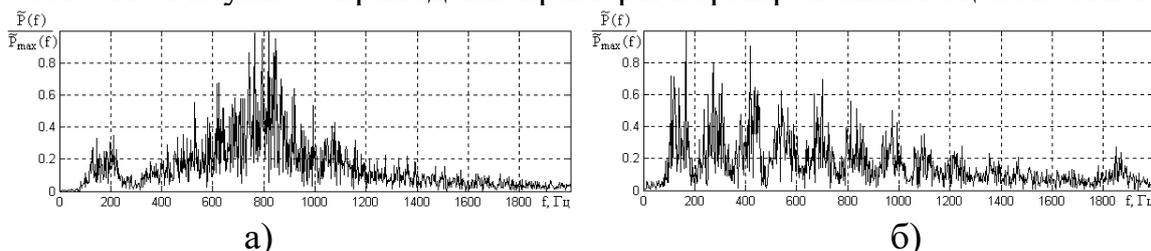


Рисунок 4. Нормированные оценки СПМ сигналов самолета (а) и вертолета (б)

Блок-схема алгоритма адаптивной системы распознавания приведена на

Рисунке 5, где обозначено $s[n]$ – входная числовая последовательность, $Z[1]$ – результат обнаружения и распознавания сигнала от помехи.

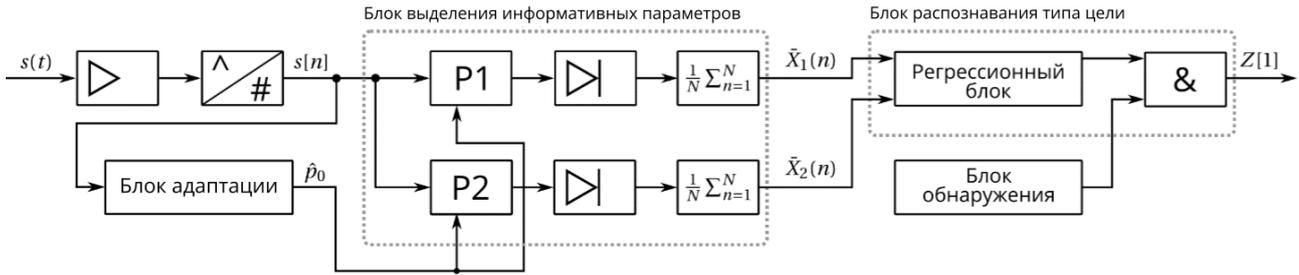


Рисунок 5. Блок-схема алгоритма адаптивной системы распознавания

В качестве блока выделения информативных параметров можно использовать два гребенчатых фильтра (рециркуляторы P1, P2), настроенных, соответственно, на частоты, кратные локальным максимумам сглаженной СПМ $f_{(1)}$ и на частоты минимумов сглаженной СПМ $f_{(1)}/2 + nf_{(1)}$ ($n = 0, 1, 2..$). Для измерения параметра $f_{(1)}$ при захвате сигнала вертолета используется наличие глобального максимума оценки нормированной АКФ сигнала $r_s(p, p_0)$ в точке p_0 . Точка p_0 определяется в блоке адаптации на основе оценки коэффициента регрессии квадратурных сигналов, выделяемых из $s[n]$ на интервале принятия решения, что обеспечивает инвариантность к скорости движения вертолета.

Блок распознавания реализуется на основе регрессионного алгоритма

$$\bar{X}_1(n) + \bar{X}_2(n) - K |\bar{X}_2(n) - \beta_{21} \bar{X}_1(n)| \geq U_{II}, \quad (7)$$

где $\bar{X}_1(n)$ и $\bar{X}_2(n)$ – оценки информативных параметров, K – весовой коэффициент, определяющий ширину области принятия решения, β_{21} – коэффициент начальной регрессии нецентрированных параметров $\bar{X}_1(n)$ и $\bar{X}_2(n)$.

В третьей главе исследованы алгоритмы обработки информации пеленгаторов с временным способом обработки сигналов. Исследованы алгоритмы РЛ пеленгаторов СКИ сигналами. Проведено математическое моделирование их функций направленности (ФН) и ДХ. Обоснованы алгоритмы регрессионной обработки сигналов в пеленгаторе с ФАР.

На основании статистической независимости случайных фаз α_{ki} нормированная ВКФ синфазных и квадратурных сигналов на выходах антенн двухканальной РЛ системы пеленгации будут иметь вид, соответственно

$$r_{\zeta\eta}(\tau, \theta_c, \theta_n) = \frac{\sum_i \sum_{k=-m}^{k=m} [D_{ki}^c(\theta_c) + D_{ki}^n(\theta_n)] \cos[\omega_{ki}\tau - \Delta\varphi_{ki}(\theta)]}{\sum_i \sum_{k=-m}^{k=m} [D_{ki}^c(\theta_c) + D_{ki}^n(\theta_n)]}. \quad (8)$$

$$r_{\zeta\eta}(\tau, \theta_c, \theta_n, \pi/2) = \frac{\sum_i \sum_{k=-m}^{k=m} [D_{ki}^c(\theta_c) + D_{ki}^n(\theta_n)] \sin[\omega_{ki}\tau - \Delta\varphi_{ki}(\theta)]}{\sum_i \sum_{k=-m}^{k=m} [D_{ki}^c(\theta_c) + D_{ki}^n(\theta_n)]}. \quad (9)$$

Тогда ДХ (3) равна

$$D(\tau) = \frac{\sum_i \sum_{k=-m}^{k=m} [D_{ki}^c(\theta_c) + D_{ki}^n(\theta_n)] \sin[\omega_{ki}\tau - \Delta\varphi_{ki}(\theta)]}{\sum_i \sum_{k=-m}^{k=m} [D_{ki}^c(\theta_c) + D_{ki}^n(\theta_n)] \cos[\omega_{ki}\tau - \Delta\varphi_{ki}(\theta)]}. \quad (10)$$

На Рисунке 6 приведены зависимости нормированной ВКФ (8) синфазных сигналов в каналах пеленгатора (а), нормированной ВКФ (9) квадратурных сигналов в каналах пеленгатора (б), при отношении сигнал/помеха $a^2 = 1$, значении относительной ширине полосы спектров сигналов $\alpha = 1$, при различных отношениях d/λ_0 : $d/\lambda_0 = 1$ (1); $d/\lambda_0 = 2$ (2); $d/\lambda_0 = 5$ (3).

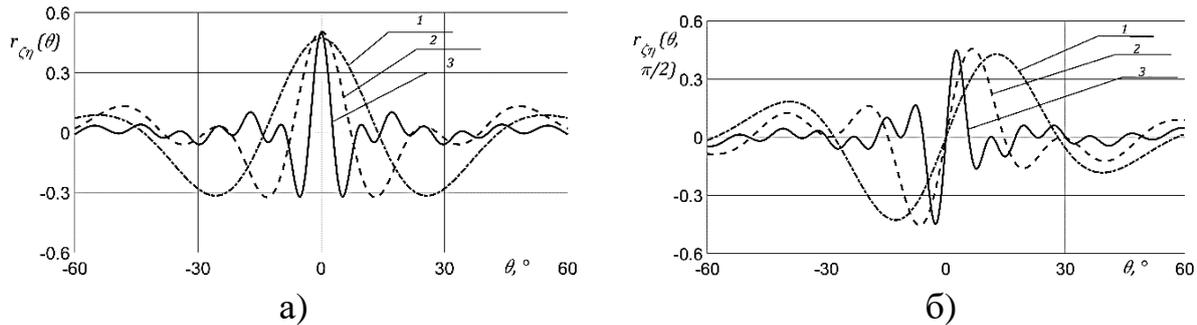


Рисунок 6. Нормированные ВКФ синфазных (а) и квадратурных (б) составляющих сигналов в каналах пеленгатора

На Рисунке 7 приведены ДХ пеленгатора, построенные по выражению (10), при различных отношениях $d/\lambda_0 = 1$ (а) и $d/\lambda_0 = 5$ (б), при относительной ширине полосы спектров сигналов $\alpha = 1$ и отношении сигнал/помеха $a^2 = 1$.

Опорная точка дискриминатора определяется сравнением синфазной ВКФ с порогом. Слежение за экстремумом синфазной ВКФ осуществляется на основе временного метода управлением задержкой сигналов в каналах. При увеличении базы пеленгатора увеличивается крутизна ДХ и точность определения опорной точки для следящей системы, но появляется неоднозначность в ДХ.

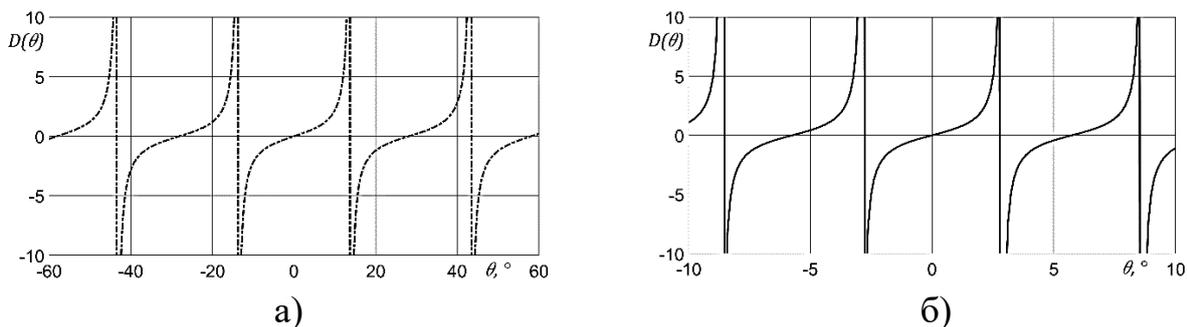


Рисунок 7. ДХ двухканального пеленгатора

Исследован временной корреляционный метод формирования ДХ пеленгатора, который позволяет осуществлять сканирование главным максимумом ДН и слежение за объектом путем введения временных задержек сигналов в каналах без применения преобразования Фурье к входным реализациям на входе в отличие от частотного метода.

При реализации трактов обработки сигналов на стандартной логике ис-

пользуется одностороннее функциональное знаковое преобразование входных сигналов, что дает возможность использовать функции «исключающее или» и «исключающее или-не». Знаковые функции, отражающие вычисление доверительного интервала и модуля ошибки регрессионного предсказания, соответственно, равны

$$F_z(t) = \frac{1}{2}[1 + \text{sign}\xi(t)\text{sign}\eta(t)], \quad F_v[t] = \frac{1}{2}[1 - \text{sign}\xi(t)\text{sign}\eta(t)]. \quad (11)$$

Тогда регрессионный алгоритм обработки сигналов двухканального пеленгатора можно записать в виде

$$\frac{1}{T} \int_{t_0-T}^{t_0} E(t)[(1-K) + (1+K)\text{sign}\xi(t)\text{sign}\eta(t)]dt \geq 0. \quad (12)$$

Если положить, что на интервале принятия решения $E(t) = E = \text{const}$, то (12) приводится к виду

$$\frac{1}{T} \int_{t_0-T}^{t_0} \text{sign}\xi(t)\text{sign}\eta(t)dt \geq \frac{K-1}{K+1}. \quad (13)$$

Как видно из выражения (13), регрессионный алгоритм тракта обработки сигналов двухканального пеленгатора свелся к идеальному знаковому коррелятору, однако по сравнению с последним в алгоритме (13) достигнута инвариантность по отношению к питающему напряжению.

Для исследования рабочих характеристик алгоритма необходимо получить статистические характеристики двухканального регрессионного дискретно-аналогового тракта пеленгатора

$$z(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t [(1-K) + (1+K)\text{sign}\xi(\tau)\text{sign}\eta(\tau)]d\tau. \quad (14)$$

Математическое ожидание μ_z процесса $\{z(t)\}$, дисперсия D_z и среднеквадратическое отклонение σ_z при угле визирования локализованного источника излучения θ в зависимости от параметра K будут равны, соответственно

$$\mu_z(\theta, K) = 1 - K + (1+K) \frac{2}{\pi} \arcsin r_{\eta\xi}(\theta); \quad D_z = (1+K)^2 D[\hat{r}_3(\tau)]; \quad \sigma_z = \sqrt{D_z}. \quad (15)$$

На Рисунке 8 (а) представлены зависимости $\mu_z(\theta, K)$ от угла пеленга локализованного источника при относительной базе системы $d/\lambda_0 = 5$ и относительной полосе энергетического спектра входных сигналов $\alpha = 1,5$, отношении сигнал/помеха $a^2 = 10$ и различных значениях параметра регрессионного алгоритма K . На Рисунке 8 (б) представлены зависимости среднеквадратических отклонений оценки знаковой корреляционной функции σ_z от числа усредняемых периодов средней частоты $n = \frac{T\omega_0}{2\pi}$ (где T – интервал принятия решения) при работе по равномерно распределенной в пространстве помехе и различных весовых коэффициентах K регрессионного алгоритма. При $K \geq 1$ в функции направленности системы отсутствуют боковые лепестки.

На Рисунке 9 приведены зависимости отношения μ_z/σ_z от весового коэффициента K регрессионного алгоритма при различном числе усредняемых периодов средней частоты n и работе по равномерно распределенной в пространстве помехе (а), по локализованному источнику (б) и зависимости μ_z/σ_z

при различных отношениях сигнал/помеха a^2 при $n = 200$ (в) при $\alpha = 1,5$, $d/\lambda_0 = 5$.

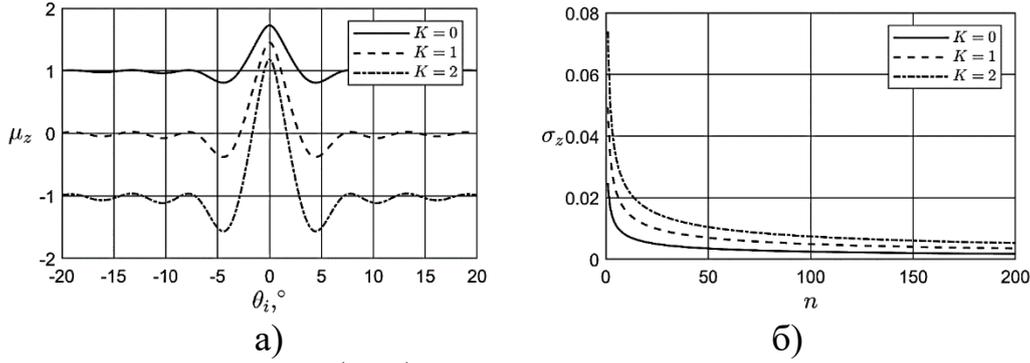


Рисунок 8. Зависимости $\mu_z(\theta, K)$ (а) и σ_z (б) оценки знаковой корреляционной функции сигнала на входе порогового устройства

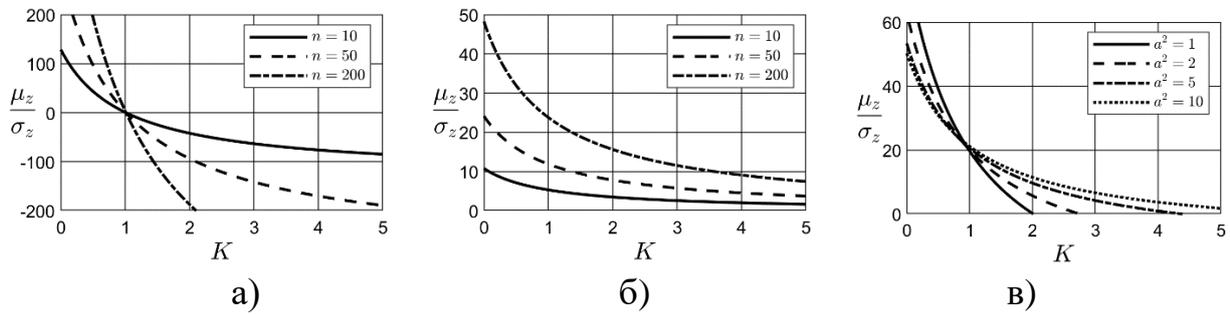


Рисунок 9. Зависимости отношения μ_z/σ_z

Анализ результатов показывает, что при обработке 200 периодов средней частоты, параметрах регрессионного алгоритма K , лежащего в пределах от 1 до 2, предложенный алгоритм обработки сигналов в двухканальном пеленгаторе обеспечивает приемлемые отношения μ_z/σ_z в пределах от 10 до 20 при отношениях сигнал/помеха по мощности на входе от 1 до 10.

В активных гидроакустических и РЛ системах пеленгации часто используются многоканальные ФАР. Для улучшения их рабочих характеристик также может использоваться регрессионная обработка сигналов с выходов ФАР.

Если принять величины множественных коэффициентов регрессии i -го на k -й выходы ФАР $\beta_{ik} = \frac{1}{N-1}$, а параметры регрессионного алгоритма $K_i = K$ при $i = 1, 2, \dots, N$, тогда регрессионный алгоритм можно представить в виде

$$\frac{1}{T} \int_{t_0-T}^{t_0} \left\{ \left| \sum_{i=1}^N U_i(t) \right| - \frac{KN}{N-1} \sum_{i=1}^N \left| U_i(t) - \frac{\sum_{k=1}^N U_k(t)}{N} \right| \right\} dt \geq U_{\text{пор}}. \quad (16)$$

Анализ результатов моделирования по (16) показал, что система с регрессионной обработкой сигналов обладает лучшими функциями направленности по сравнению с системой с линейной обработкой, в частности главный максимум ДН более узкий, а боковые лепестки при определенных значениях K подавляются полностью. При этом система с регрессионной обработкой незначительно сложнее системы с линейной обработкой.

В четвертой главе проведено имитационное и полунатурное моделирование систем пеленгации с широкополосными сигналами и модифицированным дискриминатором. Проведено полунатурное моделирование регрессионной обработки сигналов в пеленгаторе с ФАР.

Для обоснования потенциальных характеристик пеленгаторов локализованных источников широкополосных излучений на фоне распределенных в пространстве помех исследованы взаимные статистические характеристики сигналов на выходах широкополосных антенн A_1 и A_2 .

На Рисунке 10 приведены ДХ модифицированного дискриминатора при $\frac{d}{\lambda_0} = 2$, $\alpha = 0,6$ в условиях отсутствия помех $\theta_\xi = \theta_\eta = 0$ (а) и при наличии помех $a^2 = 1$, $\theta_\xi = \theta_\eta = 15^\circ$ (б). Вертикальной пунктирной линией обозначено угловое положение объекта локации.

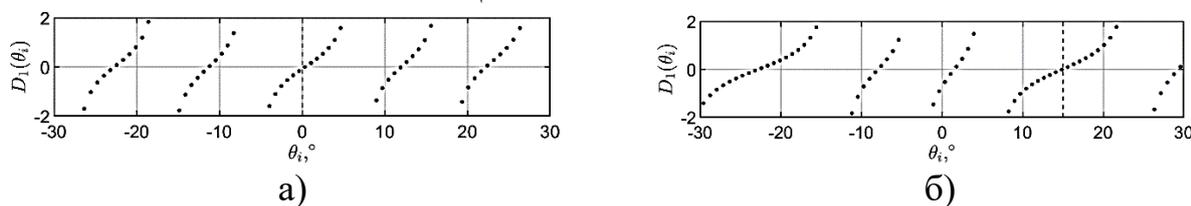


Рисунок 10. ДХ модифицированного дискриминатора

Структурная схема тракта, реализующая акустический пеленгатор, состоящий из двух приёмных широкополосных модулей, двух разнесённых в пространстве приёмных антенн, взаимно корреляционного тракта обработки сигнала, приведена на Рисунке 11, где обозначено: A_1 , A_2 – приёмные антенны; 1, 2 – входные (приёмные) устройства; 3 – преобразователь Гильберта; 4 – вычислитель ВКФ квадратурных сигналов; 5 – вычислитель ВКФ синфазных сигналов; 6 – вычислитель ДХ и опорной точки; 7 – вычислитель задержек сигнала и угла пеленга.

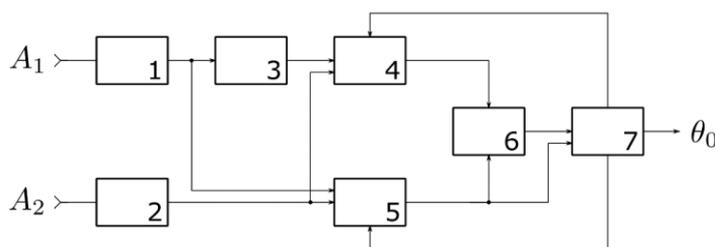


Рисунок 11. Структурная схема тракта слежения системы пеленгации

Блок-схема алгоритма работы модели системы сопровождения локализованного объекта на фоне распределённых в пространстве помех приведена на Рисунке 12.

Результаты имитационного моделирования выходного сигнала системы поиска и слежения с оптимальным, квазиоптимальным и модифицированным алгоритмами за движущимся объектом при различных условиях фоно-целевой обстановки и равномерном движении по углу азимута показали следующее.

На начальном этапе функционирования алгоритма осуществляется про-

цесс поиска объекта и его захват сформированной ДХ (в пределах полосы захвата, определяемой шириной ДН). Затем осуществляется слежение за угловым положением объекта. Вследствие дискретизации сигналов работа дискриминаторов имеет нестационарный колебательный характер.

Характер изменения выходного сигнала позволяет оценить потенциальные возможности и ошибки системы слежения. Ошибка сопровождения по углу азимута составляет величину не более 2° и определяется крутизной ДХ и временем дискретизации сигнала. Для уменьшения ошибки угла пеленга и более равномерного сопровождения траектории движения необходимо использовать сглаживающие или экстраполирующие фильтры.

Экспериментальная оценка работоспособности алгоритма обработки информации в акустической двухканальной системе с широкополосными сигналами (с базой $d = 1,4$ м) проводилась в полевых условиях (на фоне подлеска) для объектов классов воздушная (вертолет) и наземная (гусеничная и колесная) техника. Скорости движения наземной техники по трассам на дальностях $D = 25$ м и $D = 50$ м – от 10 до 40 км/ч, воздушной техники – от 30 до 150 км/ч. Абсолютная ошибка определения угла пеленга подвижных объектов не превысила двух интервалов между дискретными отсчетами сигнала, относительная – 3,1%.

В заключении представлены основные результаты и общие выводы по диссертационной работе.

В Приложении приведены результаты расчетов ДХ системы пеленгации, блок-схемы моделей трактов системы слежения, структура приемопередающего модуля СКИ сигнала и условия проведения экспериментов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Исследован регрессионный алгоритм обнаружения широкополосных случайных процессов по относительной ширине полосы энергетического спектра. Предложенный алгоритм инвариантен к средней частоте и дисперсии процессов. Это обеспечивает независимость качества рабочих характеристик от параметров движения и режима работы объектов.

2. Проанализированы алгоритмы оптимального, квазиоптимального и мо-

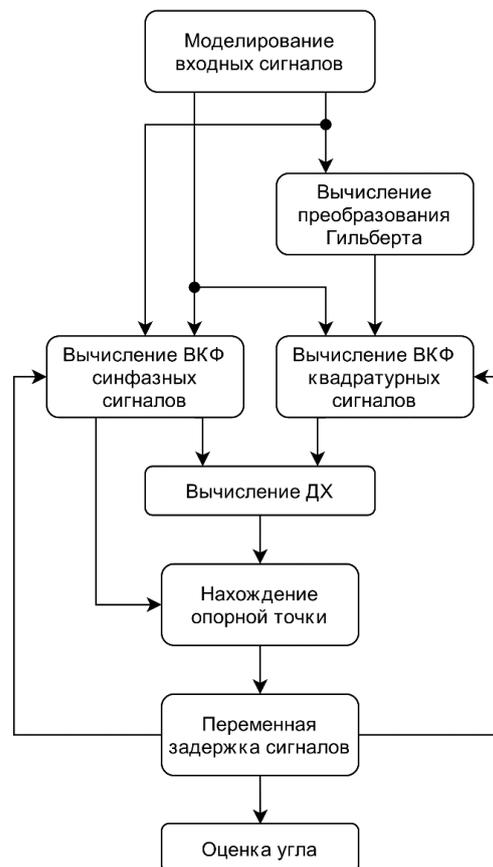


Рисунок 12. Блок-схема алгоритма работы модели системы слежения

дифицированного дискриминаторов. Применительно к акустическим и РЛ системам с широкополосными сигналами предложено использовать алгоритм модифицированного дискриминатора на основе дискретного преобразователя Гильберта.

Исследованы и обоснованы алгоритмы формирования ДН и ДХ в синтезированной ФАР в двухканальном пеленгаторе сосредоточенных источников широкополосных излучений на основе спектральной и временной обработки сигналов в каналах пеленгатора.

Показано, что в синтезированной ФАР мультипликативного типа со спектральной обработкой сигналов имеется возможность формирования ДН с полностью подавленными боковыми лепестками, работоспособность алгоритма сохраняется до отношений сигнал / помеха по мощности, близких к 1.

Исследованы ДХ двухканальных акустических пеленгаторов корреляционного типа при различных параметрах пеленгатора и широкополосных сигналов. Полученные результаты могут быть использованы при построении следящих пеленгаторов для сопровождения объектов и оценки углов визирования локализованных объектов в пассивных акустических и гидроакустических системах.

Проанализированы вопросы формирования ФН и ДХ двухканальных РЛ пеленгаторов с СКИ сигналами, предназначенных для пеленгации и сопровождения локализованных объектов на фоне распределенных в пространстве помех в ближней локации. Получены математические выражения для нормированных ВКФ синфазных и квадратурных сигналов с выходов приемных модулей.

Обоснованы основные рабочие характеристики двухканального пеленгатора локализованных объектов широкополосных излучений на фоне распределенных в пространстве помех. Обоснован алгоритм обработки, использующий знаковые функциональные преобразования широкополосных сигналов, инвариантный к мощности сигналов и к питающим напряжениям.

Обоснован алгоритм формирования ДН ФАР в пеленгаторе сосредоточенных объектов на фоне распределенных в пространстве помех на основе временного метода регрессионной обработки сигналов с выходов ФАР, позволяющего подавлять боковые лепестки в ДН пеленгатора.

3. Исследован параметрический алгоритм сопровождения локализованного источника широкополосного сигнала с модифицированным дискриминатором и управляемыми линиями задержки. Получены ДХ и ошибки сопровождения двухканального пеленгатора с разнесенными в пространстве антеннами.

Сравнение результатов имитационного и полунатурного моделирования следящих пеленгаторов подвижных объектов показало удовлетворительное совпадение результатов.

4. Исследован регрессионный алгоритм распознавания вертолета и самолета на основе выделения информативных признаков акустических сигналов. В качестве информативных признаков предложены отсчеты экстремумов энергетических спектров входных сигналов. Использование блока адаптации в блоке выделения информативных параметров обеспечивает инвариантность информативных признаков к скорости вертолета.

Результаты имитационного моделирования регрессионного алгоритма

распознавания вертолета от самолета и наземной техники в среде Matlab на множестве из 100 реализаций акустических сигналов каждого класса длительностью 0,5 с показали хорошую разделимость информативных признаков и оценку вероятности правильного распознавания не менее 0,98.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Likhoedenko A.K., Khokhlov V.K. Algoritm of The Parametric Tracking System With Broadband Signals And A Modified Discrinator // AIP Conference Proceedings: Modeling in Engineering 2020. 2022. P. 060001-1 – 060001-9. (0,6 п.л./ 0,3 п.л.)

2. Хохлов В.К., Лихоеденко А.К. Рабочие характеристики акустических пеленгаторов локализованных источников широкополосных сигналов // Успехи современной радиоэлектроники. 2021. Т.75. № 7. С. 27 – 37. (0,7 п.л./ 0,35 п.л.)

3. Хохлов В.К., Сумин С.Л., Лихоеденко А.К. Рабочие характеристики регрессионных алгоритмов трактов обнаружения и распознавания сигналов по относительной ширине полосы энергетического спектра, обрабатывающих интервалы между нулями входных реализаций // Успехи современной радиоэлектроники. 2019. № 7. С. 45 – 55. (0,7 п.л./ 0,25 п.л.)

4. Хохлов В.К., Лихоеденко А.К., Молчанов С.А. Регрессионные алгоритмы обнаружения и распознавания нецентрированных нестационарных случайных процессов в автономных информационных системах ближней локации // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2017. № 3. С. 150 – 169. (1,2 п.л./ 0,4 п.л.)

5. Хохлов В.К., Лихоеденко А.К. Диаграммы направленности и дискриминационные характеристики пеленгаторов локализованных объектов со спектральным способом обработки широкополосных сигналов // Успехи современной радиоэлектроники. 2016. № 6. С. 63 – 72. (0,7 п.л./ 0,35 п.л.)

6. Хохлов В.К., Лихоеденко А.К. Функции направленности и дискриминационные характеристики пеленгаторов локализованных объектов на основе радиолокатора со сверхкороткими импульсами // Научные технологии. 2015. Т. 16. № 7. С. 36 – 42. (0,45 п.л./ 0,25 п.л.)

7. Хохлов В.К., Глазков В.В., Лихоеденко А.К. Обоснование выбора и сокращения размерности нецентрированных информативных признаков сигналов в информационных системах ближней локации // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2021. № 1. С. 73 – 84. (0,75 п.л./ 0,25 п.л.)

8. Хохлов В.К., Лихоеденко А.К. Формирование диаграмм направленности фазированной антенной решетки в двухканальном пеленгаторе локализованных источников широкополосных излучений // Научные технологии. 2018. Т. 19. № 4. С. 31 – 39. (0,75 п.л./ 0,25 п.л.)

9. Хохлов В.К., Казарян С.М., Лихоеденко А.К. Регрессионная обработка сигналов в пеленгаторе с фазированной антенной решеткой // Научные технологии. 2018. Т. 19. № 5. С. 37 – 46. (0,75 п.л./ 0,25 п.л.)

10. Хохлов В.К., Лихоеденко А.К. Регрессионная обработка доплеровских сигналов в информационных системах ближней локации с комбинированной модуляцией несущей шумовым и детерминированным процессами // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2019. Т. 17. № 1. С. 25 – 32.

(0,5 п.л./ 0,25 п.л.)

11. Suchkov V.B., Baev M.I., Likhoedenko A.K. Development of parallel algorithms for calculation of backscattering characteristics of complex shape objects // 2015 5th International Workshop on Computer Science and Engineering: Information Processing and Control Engineering, WCSE 2015-IPCE; Bauman Moscow State Technical University Moscow; Russian Federation; 15 April 2015 through 17 April 2015; Code 112346: Conference Paper. NY: The Science and Engineering Institute, USA, 2015. P. 103 – 108. (0,4 п.л./ 0,15 п.л.)

12. Suchkov V.B., Likhoedenko A.K. Development of fast scattering model of complex shape target for seminatural tests of onboard proximity radars in real time mode // 2016 International Conference on Frontiers of Sensors Technologies, ICFST 2016; Hong Kong; 12 March 2016 through 14 March 2016; Code 125630: Conference Paper. MATEC Web of Conferences. Volume 59/ Article number 07001. 4 p. (0,4 п.л./ 0,2 п.л.)

13. Радиолокационный пеленгатор локализованных объектов: пат. 2 580 830 Рос. Федерация: МПК G01S 13/04 (2006.01) / А.Б. Борзов, А.К. Лихоеденко, Г.М. Серегин, В.Б. Сучков, В.К. Хохлов; заявитель и патентообладатель МГТУ им. Н.Э. Баумана.- № 2014153686/07; заявл. 29.12.2014; опубл. 10.04.2016, Бюл. № 10. 11 с. (0,75 п.л./ 0,15 п.л.)

14. Программа расчета диаграммы направленности фазированной антенной решетки в пеленгаторе с мультипликативной обработкой сигнала: свид. 2018665548 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / А.К. Лихоеденко; заявитель и правообладатель А.К. Лихоеденко.- № 2018662888; заявл. 15.11.2018; опубл. 06.12.2018. Реестр программ для ЭВМ. 1 с.

15. Лихоеденко А.К., Хохлов В.К. Адаптивная акустическая система распознавания вертолета // Будущее машиностроения России: Пятнадцатая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов (с международным участием) (Москва, 21–24 сентября 2022 г.): сборник докладов: в 2 т. /МГТУ им. Н.Э. Баумана, Союз машиностроителей России. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022. Т. 2. С. 386 – 392. (0,4 п.л./ 0,2 п.л.)

16. Лихоеденко А.К., Хохлов В.К. Алгоритм работы параметрической системы сопровождения с широкополосными сигналами и модифицированными дискриминаторами // В сборнике: Технологии разработки и отладки сложных технических систем. VII Всероссийская научно-практическая конференция: сборник трудов. Москва, 2020. С. 291 – 296. (0,4 п.л./ 0,2 п.л.)

17. Likhoedenko A.K., Suchkov V.B. Technique of Mathematical Simulation of Input Signals of Onboard Radars from Complex Scenes with Clutters and Targets // Journal of Engineering and Applied Sciences, 2020. Volume 15, Issue 5. P. 1060 – 1066. (0,4 п.л./ 0,2 п.л.)

18. Suchkov V.B., Likhoedenko A.K., Seregin G.M., Karakulin Y.V. Innovative Educational Technology for the Use of Modern CAD Systems for the Formation of Professional Competences of Students of Radio Engineering Specialties // International Forum “IT-Technologies for Engineering Education: New Trends and Implementing Experience” (ITEE-2019). ITM Web of Conferences, 2020. Volume 35. Article Number 04022. 9 p. (0,6 п.л./ 0,15 п.л.)