

УДК 004.93:004.82:681.88

*О. А. Андреев, А. Т. Трофимов*

## **Синтез нейросетевых алгоритмов классификации морских объектов для низкочастотных стационарных гидроакустических систем**

*Рассматривается проблема обеспечения требуемой вероятности правильной классификации морских объектов (МО) в низкочастотных стационарных гидроакустических системах. Решение указанной проблемы ищется на основе применения методов синтеза нейросетевых алгоритмов классификации с использованием полигауссовских вероятностных моделей (ПВМ). Показано, что использование ПВМ позволяет решать ряд проблем, специфичных для задач классификации МО; алгоритмы классификации, синтезируемые на основе применения названных методов, могут быть реализованы в виде искусственных нейронных сетей, описываемых на языках C++/VHDL для создания конечных вычислительных устройств и программных комплексов. Приводятся результаты моделирования синтезированных алгоритмов классификации с использованием натуральных данных. Предлагаемые алгоритмы позволяют повысить вероятность правильной классификации МО и удовлетворить типичные требования, предъявляемые к системам классификации МО.*

*Ключевые слова:* полигауссовские вероятностные модели, гауссовские смеси, классификация

### **Об авторах**

**Андреев Олег Александрович** – старший научный сотрудник АО «НИИ «Атолл». E-mail: wert\_of\_mor@mail.ru. 141981, Московская область, г. Дубна, ул. Приборостроителей, д. 5.

**Трофимов Александр Терентьевич** – доктор технических наук, профессор, заместитель заведующего кафедрой проектирования электроники для установок «мегасайенс» государственного университета «Дубна».

Море является крупным источником большого количества разнообразных ресурсов, например пищевых, промысловых, транспортных, энергетических. Охрана и защита таких источников ресурсов является стратегической задачей, осложняемой большой площадью акваторий [1]. Одним из средств охраны морских территорий являются низкочастотные стационарные гидроакустические системы (НЧ-СГАС).

В общем случае НЧ-СГАС состоят из выносной части, представленной совокупностью отдельных низкочастотных фазированных антенных решеток (ФАР), и информационно-вычислительного комплекса, обеспечивающего обработку принятых низкочастотных гидроакустических сигналов. Важным этапом этой обработки является получение низкочастотных сигналов шумопеленгации, под которыми нами понимаются принятые ФАР с направлений на обнаруживаемые морские объекты (МО) смеси полезных и помеховых гидроакустических сигналов, прошедших через океанический волновод. Результатом обработки низкочастотных сигналов шумопе-

лэнгации является информация о текущих координатах, скоростях, траекториях и классах обнаруженных МО. Основными критериями эффективности НЧ-СГАС являются вероятность правильного обнаружения МО, дисперсия оценок их координат и вероятность их правильной классификации.

Опыт эксплуатации существующих систем шумопеленгации показывает, что алгоритмы классификации, использующие статистические методы и гауссовские вероятностные модели, не всегда позволяют обеспечить требуемую вероятность правильной классификации МО.

Целью исследований, отраженных в настоящей статье, является повышение вероятности правильной классификации МО по низкочастотным сигналам их шумопеленгации путём разработки методов синтеза нейросетевых алгоритмов классификации МО на основе использования полигауссовских вероятностных моделей (ПВМ).

### **Особенности обработки низкочастотных гидроакустических сигналов**

На рис. 1 в упрощенном виде представлена схема обработки гидроакустических сигналов в НЧ-СГАС.

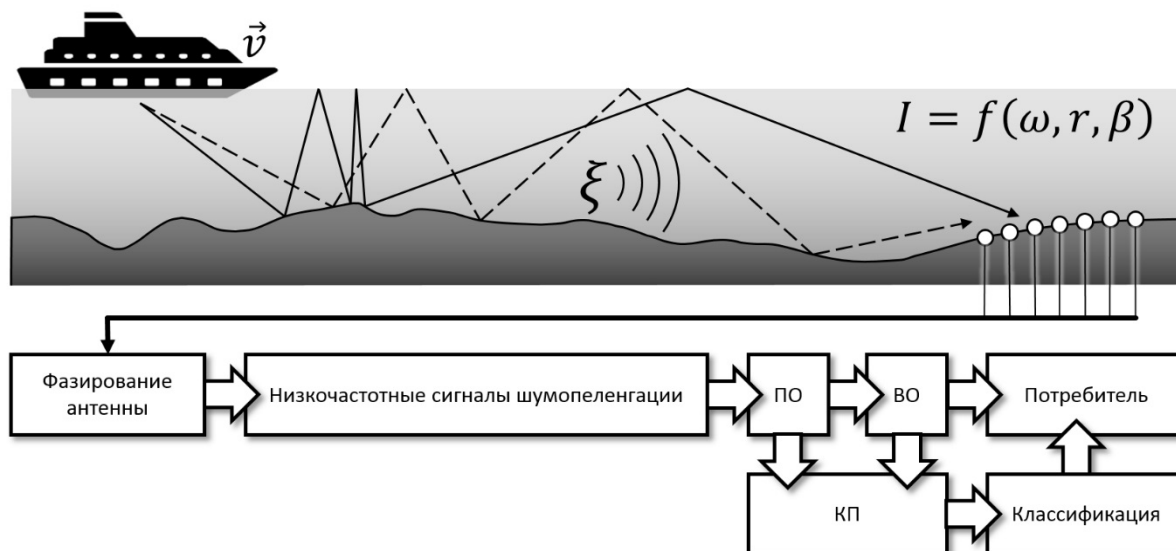


Рис. 1. Упрощенная схема обработки гидроакустических сигналов в НЧ-СГАС.

Темно-серым цветом показано дно акватории, светло-серым – водная среда; стрелками условно показаны пути распространения гидроакустического сигнала; расположенная на дне акватории ФАР обозначена последовательностью белых окружностей

МО, движущийся с некоторой скоростью  $v$ , излучает широкополосный низкочастотный гидроакустический сигнал. Интенсивность  $I$  такого сигнала на отдельном приемнике ФАР является функцией частоты  $\omega$  гидроакустического сигнала, расстояния  $r$  от источника до приемника сигнала и коэффициента затухания  $\beta$ , являющегося в общем случае функцией многих переменных. Указанная зависимость справедлива и для помеховых гидроакустических сигналов  $\xi$  естественного или искусственного происхождения. По результатам совместной обработки сигналов с отдельных приемников ФАР вычисляются сигналы шумопеленгации, представляющие собой смеси полезных и помеховых гидроакустических сигналов с направлений на обнаруживаемые МО. Последующая обработка сигналов шумопеленгации проходит в две стадии – стадию первичной обработки (ПО), на которой производится обнаружение МО, и стадию вторичной обработки (ВО), на которой обнаруженные МО сопровождаются. Для обнаруженных и сопровождаемых МО вычисляются классификационные признаки (КП) – характеристики сигналов шумопеленгации, несущие информацию о классе МО, излучившего полезный гидроакустический сигнал. Конечной стадией обработки гидроакустических сигналов является классификация – определе-

ние принадлежности обнаруженных и сопровождаемых МО к одному из заранее определенных классов по совокупности вычисленных для них КП.

Решение задачи классификации осложняется тем, что КП имеют различную физическую природу, невысокую информативность и часто являются коррелированными; сигналы шумопеленгации, по которым формируются КП, могут значительно искажаться на стадиях ПО и ВО; гидроакустические сигналы, по которым вычисляются сигналы шумопеленгации, претерпевают существенные трансформации в процессе распространения от источника к приемникам [2–5].

Указанные особенности определяют направления развития систем классификации МО. Сюда следует отнести: комплексную обработку информации из разных каналов наблюдения, комплексирование результатов обработки информации из разнородных каналов наблюдения, поиск информативных и хорошо формализуемых КП, повышение точности оценки КП, использование методов искусственного интеллекта для решения задач классификации [4–8].

#### Применение полигауссовских вероятностных моделей

В работах [9; 10] было показано, что вероятностные распределения сигналов шумо-

пеленгации и, следовательно, вычисляемых по ним КП имеют негауссовский характер. Для описания таких распределений использовались полигауссовские вероятностные модели (ПВМ), позволяющие аппроксимировать произвольные вероятностные распределения с любой наперед заданной точностью [11] (рис. 2).

ПВМ позволяют обеспечить высокую точность аппроксимации произвольных ПРВ как в одномерном, так и в многомерном случае, что позволило улучшить характеристики классификаторов МО при совместной обработке отдельных считаемых малоинформативными скалярных КП сходной физической природы (рис. 3).

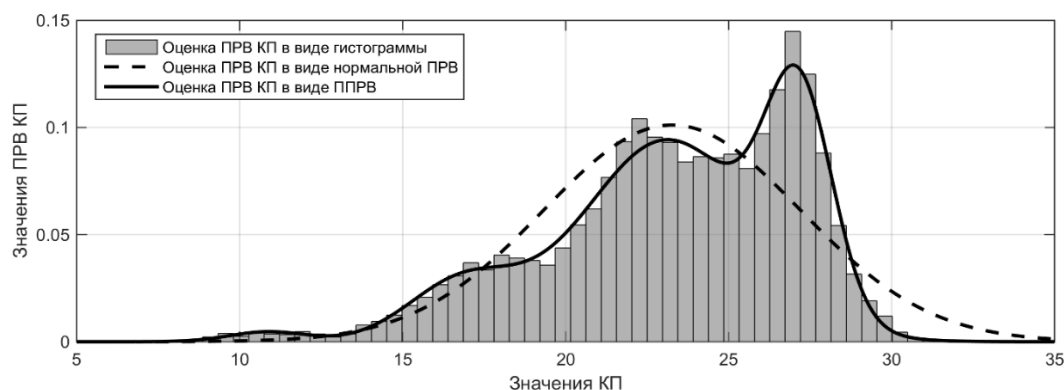


Рис. 2. Оценки вероятностного распределения скалярного КП для одного из различаемых классов МО в виде гистограммы, нормальной плотности распределения вероятности (ПРВ) и полигауссовской плотности распределения вероятности (ППРВ)

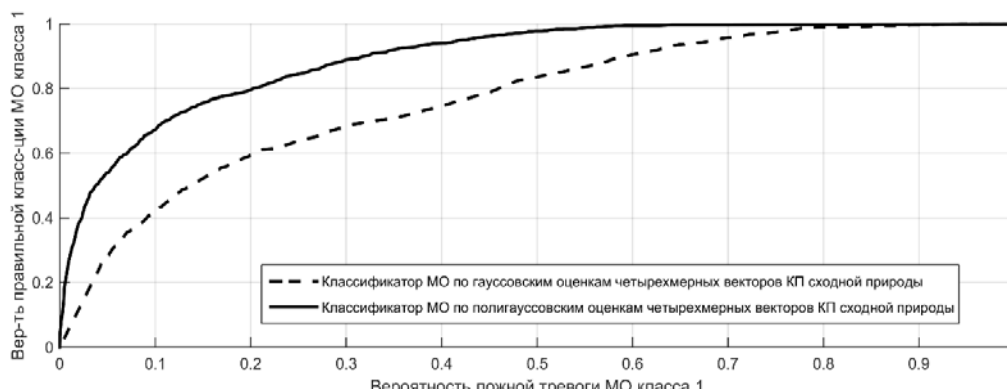


Рис. 3. Рабочие характеристики классификаторов, использующих гауссовские и полигауссовские оценки четырехмерных векторов КП сходной физической природы для различения МО двух различных классов

Решение задачи классификации МО можно искать не только на основе использования КП, но и на основе использования исходных низкочастотных сигналов шумопеленгации, представленных их энергетическими спектрами. Такой подход актуален в том случае, когда, например, вычисление всех КП по тем или иным причинам невозможно.

Высокая размерность и значительная энергетика указанных данных не позволяют напрямую получать гауссовские и полигаус-

совские оценки их ПРВ в силу ряда проблем вычислительного характера, например невозможности вычисления определителей ковариационных матриц. Обойти подобные вычислительные проблемы позволило использование иерархической ПВМ (ИПВМ) [9].

В основе ИПВМ лежит разбиение (группировка) исходного координатного пространства данных на однородные сегменты, далее связываемые путем совместной обработки вычисленных по ним достаточных ста-

тистик. Такая вероятностная модель позволяет рассматривать и обрабатывать каждую реализацию входных данных как совокупность наблюдений за состоянием сложного процесса, полученных по результатам измерений множества негауссовских многомерных параметров различной природы.

Для упрощения анализа больших объемов экспериментальных данных и выбора параметров алгоритмов оценивания ПМВ был разработан метод анализа многомерных коррелированных данных [12]. Использование этого метода позволяет получать визуальные представления многомерных ПРВ анализируемых данных, оценивать характеристики их негауссовости, формировать кластеры данных согласно выбранному критерию однородности, определять состав анализируемых выборок и наличие в них аномальных реализаций данных.

Оценки вероятностных распределений, полученные по результатам анализа больших объемов экспериментальных данных и приме-

нения ИПМВ, используются для классификации МО по критерию максимума правдоподобия или максимума апостериорной вероятности, формируя полигауссовский алгоритм классификации.

Основные вычислительные блоки полигауссовских алгоритмов классификации обладают сходством с вычислительными блоками искусственных нейронных сетей (ИНС), что позволило разработать метод реализации полигауссовских алгоритмов классификации с использованием архитектуры и операторов ИНС [13]. Этот метод позволяет представить полигауссовский алгоритм классификации в виде ИНС (рис. 4), а при использовании связки *MATLAB* и *Simulink* – автоматически реализовать полученную ИНС в виде программного модуля на языке C++ или файлов описания архитектуры ПЛИС на языке *VHDL*.

Верхние индексы обозначают логические номера слоёв, нижние – номера вычисляемых компонент ППРВ.

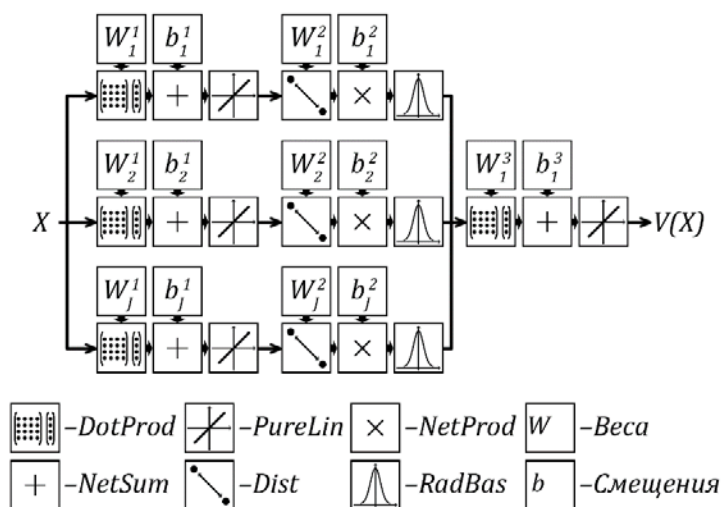


Рис. 4. Пример архитектуры ИНС, вычисляющей функцию правдоподобия в виде компонентной ППРВ  $V(X)$  и построенной в пакете прикладных программ *Neural Network Toolbox* системы инженерных и научных расчетов *MATLAB*

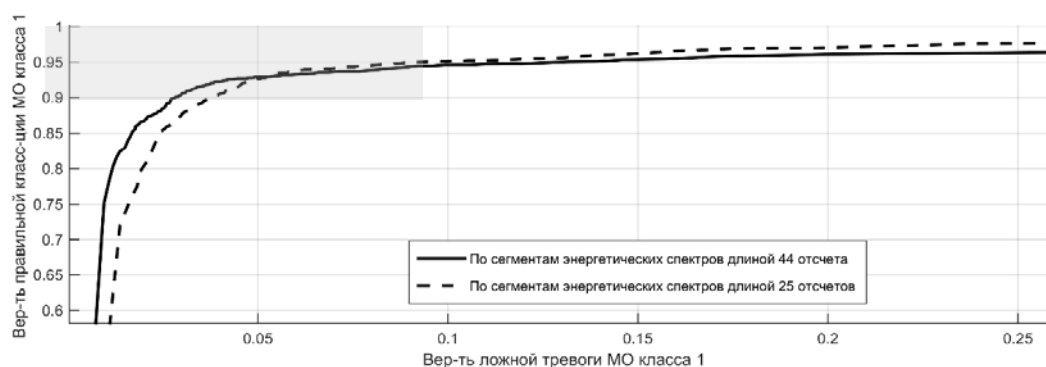


Рис. 5. Рабочие характеристики классификаторов, использующих ИПВМ для классификации МО двух различных классов по энергетическим спектрам их сигналов шумопеленгации при различной сегментации последних. Область, в которой выполняется желаемый уровень вероятности правильной классификации МО, выделена светло-серым цветом

### Апробация

Применение разработанных методов при обработке экспериментально полученных выборок данных большого объема показало, что синтезированные полигауссовские алгоритмы классификации позволяют повысить вероятность правильной классификации МО и удовлетворить характерные требования, предъявляемые к системам классификации МО в НЧ-СГАС (рис. 5).

### Выводы

Задача классификации МО является сложной задачей, решаемой в условиях неопределенности по данным со сложной взаимной зависимостью и невысокой информативностью. Основным направлением решения указанной задачи является комплексная обработка информации. Иерархические ПВМ обеспечивают возможности точной аппроксимации и комплексной обработки многомерных негауссовских данных высокой размерности, что позволяет решить ряд специфических для рассматриваемой задачи проблем, повысить вероятность правильной классификации МО и удовлетворить типичные требования, предъявляемые к системам классификации МО.

Работа выполнена в рамках базовой НИР «Синтез интеллектуальных гидроакустических систем и систем физической защиты».

### Библиографический список

1. Бадюков Д.Д. Моря // Большая российская энциклопедия. Том «Россия». М.: Большая Российская Энциклопедия, 2004. С. 37–44.

2. Баранов В.А., Гулин Э.П., Кашеев С.Н., Краснов П.С. Иерархический классификатор для распознавания подводных малоразмерных объектов в системе гидроакустического мониторинга // Акустические измерения и стандартизация. Электроакустика. Ультразвук и ультразвуковые технологии. Атмосферная акустика. Акустика океана : Сборник трудов XX сессии российского акустического общества. М.: ГЕОС, 2008. Т. 2. С. 341–346.

3. Машошин А.И., Курьшев И.В. Подход к повышению эффективности классификации шумящих целей в условиях интенсивных распределенных и локальных помех // Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики: труды XII всероссийской конференции: ГА-2014. СПб.: Нестор-История, 2014. С. 396–499.

4. Гончаров А.Н., Казакевич Л.Е. Исследование надежности распознавания морских объектов при гидроакустическом мониторинге с помощью функции ложного обучения // Акустические измерения и стандартизация. Электроакустика. Ультразвук и ультразвуковые технологии. Атмосферная акустика. Акустика океана: сборник трудов XX сессии российского акустического общества. М.: ГЕОС, 2008. Т. 2. С. 346–349.

5. Гампер Л.Е., Манов К.В., Филободченко М.А. О влиянии условий распространения на статистические характеристики сигналов пассивной гидролокации // Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики: труды XI Всероссийской конференции: ГА-2012. СПб.: Наука, 2012. С. 337–340.

6. Гриненков А.В., Машошин А.И., Силина Т.А. Опыт создания системы комплексной обработки информации гидроакустического комплекса // Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики: труды X всероссийской конференции : ГА-2010. СПб.: Наука, 2010. С. 49–51.

7. Хагабанов С.М., Шейнман Е.Л. Интеграция информации и управление в интегрированной

системе подводного наблюдения корабля. Опыт разработки и направления развития // Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики: труды XII всероссийской конференции: ГА-2014. СПб.: Нестор-История, 2014. С. 83–86.

8. Йонушаускайте Р.С., Семенов Н.Н. Использование глубоких нейронных сетей и метода опорных векторов для классификации подводных объектов // Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики: труды XIII всероссийской конференции: ГА-2016. СПб.: [б. и.], 2016. С. 370–373.

9. Андреев О.А., Трофимов А.Т. Полигауссовская вероятностная модель энергетических спектров низкочастотных гидроакустических сигналов // Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики: труды XIII всероссийской конференции: ГА-2016. СПб.: [б. и.], 2016. С. 399–401.

10. Андреев О.А., Трофимов А.Т. Анализ характеристик негауссовости низкочастотных гидроакустических сигналов шумопеленгации морских объектов // Прикладные технологии гидро-

акустики и гидрофизики: труды XIV всероссийской конференции: ГА-2018. СПб.: ЛЕМА, 2018. С. 338–341.

11. Трофимов А.Т. Полигауссовские вероятностные модели и синтез информационных систем. Великий Новгород: НовГУ им. Ярослава Мудрого, 2002. 183 с.

12. Андреев О.А., Трофимов А.Т. Применение полигауссовских вероятностных моделей для статистического анализа многомерных данных в задачах классификации морских объектов по низкочастотным гидроакустическим сигналам шумопеленгации // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2018. № 9. С. 16–25.

13. Андреев О.А. Реализация полигауссовских алгоритмов классификации на основе использования архитектуры и операторов искусственных нейронных сетей // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2017. №3. С. 60–64.

---

*Поступила в редакцию  
23.12.2019*