

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ОДЕССКАЯ НАЦИОНАЛЬНАЯ МОРСКАЯ АКАДЕМИЯ

На правах рукописи

Князь Александр Игоревич

УДК 656.61.052

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ
ДИСТАНЦИОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ НАВИГАЦИОННЫХ
ОБЪЕКТОВ НА ПУТИ СУДНА

05.22.13 - навигация и управление движением

Диссертация на соискание научной степени кандидата
технических наук

Научный руководитель
к. т. н., доцент
Зайченко С. И.

Одесса – 2015

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ	5
ВВЕДЕНИЕ.....	6
РАЗДЕЛ 1 ПАРАМЕТРЫ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА РАДИОЛОКАЦИОННОЕ НАБЛЮДЕНИЕ ОБЪЕКТОВ СУДОВЫМИ РЛС.....	
1.1. Радиофизические параметры атмосферы.....	16
1.2. Ослабление электромагнитной энергии гидрометеорами на пути судна.....	30
1.3. Особенности радиометеорологической информации для судоходства.....	37
Выводы к разделу 1.....	41
РАЗДЕЛ 2 ВЫБОР ТЕМЫ, ЦЕЛИ, ЗАДАЧ И МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	
2.1. Изучение задач функционирования судовой РЛС в сложных ситуационных условиях среды.....	46
2.2. Особенности обеспечения эффективной радиолокационной поляризационной селекции эхо-сигналов объектов судовых РЛС.....	50
2.3. Особенности решения задач поляризационной селекции объектов на фоне отражений от гидрометеоров по параметрам поляризационных различий эллиптически поляризованных волн.....	59
2.4. Цель и задачи исследования	83
2.5. Технологическая карта научного исследования по повышению ситуационного анализа состояния среды при использовании судовых радиолокационных средств.....	84
Выводы к разделу 2.....	89

РАЗДЕЛ 3 АНАЛИЗ СВЯЗИ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТА	
С РАДИОЛОКАЦИОННЫМИ СИГНАЛАМИ	91
3.1. Поляризационная структура электромагнитных полей.....	91
3.2. Матричное представление поляризационной структуры радиолокационных сигналов, рассеянных объектами.....	96
3.3. Использование некоординатной радиолокационной информации при распознавании объектов на фоне естественных помех судовыми РЛС.....	101
Выводы к разделу 3.....	104

РАЗДЕЛ 4 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ ОБЪЕКТОВ СУДОВЫМИ РЛС В СЛОЖНЫХ СИТУАЦИОННЫХ УСЛОВИЯХ СРЕДЫ.....		106
4.1. Ситуационный анализ состояния наземной среды при использовании средств поляризационного распознавания объектов.....	106	
4.2. Поляризационная селекция эхо-сигналов морских объектов на фоне гидрометеорологических помех.....	115	
4.3. Влияние выпадающих осадков на радиолокационное обнаружение морских объектов судовыми некогерентными двухканальными РЛС.....	130	
Выводы к разделу 4	140	

РАЗДЕЛ 5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗИ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ С ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ОБЪЕКТОВ.....		142
5.1. Принцип построения судового радиолокационного поляриметра, методы поляризационной селекции сигналов объекта и гидрометеорологического фона.....	143	
5.2. Экспериментальное радиолокационное обнаружение опасных метеорологических объектов на пути судна.	151	

5.3. Обнаружение и распознавание объектов на фоне гидрометеорологических помех с использованием коэффициента анизотропии.....	168
Выводы к разделу 5.....	172
ВЫВОДЫ.....	175
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	177
Приложение А. Акты внедрения результатов диссертационного исследования	189

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

ВС	- военизированная служба
ГП	- государственное предприятие
ИМО	- международная морская организация
КМУ	- Кабинет Министров Украины
МРЛ	- метеорологический радиолокатор
НИР	- научно-исследовательская работа
РЛС	- радиолокационная станция
СВЧ	- сверхвысокая частота
УПЧ	- усилитель промежуточной частоты
ЭПР	- эффективная площадь рассеяния
MSC	- комитет ИМО по безопасности мореплавания
SOLAS	- конвенция

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Судовые радиолокационные системы являются главным дистанционным средством, обеспечивающим безопасность судовождения при любых адекватных погодных условиях путем обнаружения и распознавания объектов с последующим измерением их координат. Несмотря на постоянное совершенствование судовых РЛС и радиолокационных методов получения различной информации о природной и техногенной среде, в которой находится судно, объект радиолокационного наблюдения может оставаться не замеченным. Международные конвенции и резолюции ИМО к радиолокационному оборудованию (конвенция SOLAS-правило 19, Резолюция MSC.64(67), 1995; Резолюция A.823(19), 1995; Резолюция A.820(19), 1995; Резолюция MSC.191(79) и MSC.192(79), свидетельствуют об отсутствии унифицированных судовых радиолокационных методов и комплексов, позволяющих с высокой достоверностью реализовать функцию наблюдения.

Это обстоятельство вызывает у судоводителей недоверие к представляемой радиолокационной информации. Поэтому судовой радиолокатор должен совершенствоваться в функциональном, структурном и управленческом направлениях для повышения его целенаправленности, надежности, простоты и энергетической сбалансированности, точности, быстродействия и инвариантности управления с использованием методов поляризационной селекции и накопления тезауруса. В первую очередь это касается совершенствования радиолокационных методов и систем обнаружения и распознавания объектов на пути судна, что стало актуальной задачей.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Тема диссертационной работы связана с «Концепцией устойчивой национальной транспортной политики развития всех видов транспорта на 2007-2014 годы» (приказ Мінтрансзв'язку від 05.05.2007 р. № 360), распоряжением КМ Украины

от 20 октября 2010 г. № 2174-р, «Транспортная стратегия Украины на период до 2020 года». Научные исследования выполнялись в рамках госбюджетной НИР «Теоретические основы гарантированной безопасности судоходства в территориальном море, внутренних водах и портах Украины» (2010-2012г.г.) № ДР 0110U00280, а также 7-ой рамочной транспортной программой Европейского союза проект MOWE – IT «Управление погодными явлениями в транспортной сфере» № ДР 0114U000343 (2012-2014 г.г.), грант №314506, где автор был исполнителем отдельных разделов.

Цель и задачи исследования. Целью работы является повышение безопасности плавания судна в условиях сложного ситуационного состояния атмосферы средствами дистанционного наблюдения.

Рабочей гипотезой исследования является тезис о существовании методов и средств наблюдения радиолокационных объектов в сложных ситуациях атмосферной среды, за счет использования судовой РЛС.

Главная задача заключалась в разработке метода и средств повышения информационной эффективности судовых РЛС с использованием поляризационной селекции.

Для решения главной задачи исследования были сформулированы следующие вспомогательные задачи:

- анализ параметров среды, влияющих на радиолокационное наблюдение объектов;
- оценка влияния естественных помех на работу судовой РЛС;
- радиолокационное исследование ситуационного состояния среды поляризационными методами;
- совершенствование радиолокационного наблюдения объектов в сложных ситуационных условиях среды.

Объект исследования. Атмосферные явления на пути движения судна.

Предмет исследования – методы, радиолокационного навигационного наблюдения объектов на фоне естественных помех.

Решение научных задач осуществлено следующими методами:

- дедукции - при информационном поиске;
- системного - подхода при выборе темы, цели, задач и методики исследования;
- графоаналитические, численные и постановки эксперимента - при определении связей параметров атмосферной среды, объекта и электромагнитной волны;
- математической статистики и численного анализа - при обработке статистических параметров поляризации;
- теории вероятности - при разработке методов распознавания объектов на фоне естественных помех;
- эквивалентности и подобия - при разработке антенно-волноводного тракта радиолокационного поляриметра;
- физико-математического моделирования - при исследовании процессов распространения электромагнитной волны.

Научная новизна исследования заключается в системном представлении процесса совершенствования методов и технических средств дистанционного наблюдения навигационных объектов в сложных погодных и ситуационных условиях среды на пути судна, отличающегося особенностями использования поляризационных характеристик сигналов, показателем работы которого является безопасность. Для этого проанализированы пространственно-временные и поляризационные структуры радиолокационных сигналов судовой РЛС и синтезированы методы поляризационной селекции при дистанционном наблюдении, обнаружении, распознавании и сопровождении объектов посредством специального радиолокационного поляриметра. В

диссертационной работе впервые были получены следующие научные результаты:

- безопасность судовождения в сложных атмосферных условиях среды обеспечивается дистанционным обнаружением и распознаванием наземных объектов на пути судна по параметрам поляризационных различий сигналов, одновременно отраженных от двух объектов, облучаемых электромагнитной волной круговой поляризации судовой РЛС;
- различия поляризационных параметров электромагнитной волны, рассеянной навигационным объектом и гидрометеорологическим фоном, устанавливаются по синтезированной процедуре, использующей вероятностно-статистический метод обработки радиолокационной информации в сформулированном радиолокационном канале, структура которого характеризует семантику сигналов, соответствующей соотношению априорной информации о среде, навигационных объектах и помехе с параметрами их эхосигналов, что позволяет обнаруживать и распознавать навигационные объекты в сложных атмосферных условиях;
- синтезированы методы поляризационной селекции сигналов, обеспечивающие выявление структуры и свойств наблюдаемых объектов, что позволяет получить необходимую радиолокационную информацию о наблюдаемой ситуации.

Дальнейшее развитие получили дистанционные методы радиолокационного распознавания и селекции за счет измерения некинематических характеристик наблюдаемых объектов с учетом накопленного тезауруса, оценка которых не зависит от дальности до наблюдаемого объекта, ослабления сигнала по трассе, угла поворота объекта вокруг направления радиолокационного наблюдения, строгой стабилизации антенны судового поляриметра, что позволяет получить информацию о типе объекта, его принадлежности к определенному классу, размерах и т.п.

Личный вклад соискателя в получении новых результатов.

Диссертация является самостоятельно выполненным исследованием, в котором соискателем осуществлен информационный поиск, методологическое обоснование, усовершенствованы методы и технические средства дистанционного наблюдения, обнаружения и распознавания объектов на пути судна. Новые результаты, приведенные в диссертации, получены автором самостоятельно и внедрены в производство. В публикациях, выполненных в соавторстве, личный вклад автора заключается в следующем: [19] – анализе радиофизических характеристик атмосферы над морской поверхностью; [20] – анализе корреляционной связи коэффициента преломления атмосферы с температурой воды, воздуха и упругостью водяных паров.

Практическая значимость полученных результатов заключается в целесообразности их использования при разработке новых судовых радиолокационных станций, которые позволят обнаруживать и распознавать на расстоянии до 93 морских миль не только навигационные объекты, но и опасные метеорологические образования, влияющие на безопасность судоходства на пути судна.

Практическое использование полученных результатов позволит повысить безопасность судовождения и сохранность перевозимых грузов.

Результаты диссертационной работы внедрены и используются (Приложение А):

- в технической службе Одесского морского порта при разработке перспективных планов развития его инфраструктуры. Акт внедрения от 12.05.2015г..

- в ИПРИ НАН Украины при построении моделирующего комплекса для управления функционированием корабельного соединения. Акт от 20.01.2015г..

- в Гидрометцентре Чорного и Азовского морей при гидрометеорологическом обеспечении Одесского и Илличевского торговых портов. Акт от 07.05.2015г..

- в филиале «Дельта-лоцман» ГП «АМПУ» при контроле за безопасностью судоходства в портовых водах. Акт от 29.09.2015г..

- в Одесской национальной морской академии в учебный процесс кафедры «Электронных комплексов судовождения». Акт от 05.11.2015г..

- в научно-исследовательскую работу № ДР 0115U001964) Одесской национальной морской академии «Управление погодными явлениями в транспортной системе» . Акт от 10.06.2015г..

Апробация результатов диссертации. Основные результаты работы были обсуждены и одобрены на следующих конференциях:

- на науково-технічній конференції «Суднові енергетичні установки: експлуатація та ремонт» 20 – 22.03.2013 р. (Одеса, 2013);
- на науково-технічній конференції « Енергетика судна: Експлуатація та ремонт» 26 – 28.03.2014р. (Одеса, 2014);
- на науково-технічній конференції «Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM, 17-19 листопада 2014 р.(Київ, 2014);
- на науково-методичній конференції «Морські перевезення та інформаційні технології в судноплавстві», 18-19 листопада 2014р. (Одеса, 2014).

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в четырех статьях научных изданий, которые входят в перечень научных специализированных изданий Украины и рекомендованы Министерством образования и науки Украины для публикаций

диссертационных работ на соискание научных степеней доктора и кандидата наук, одной статьи в зарубежном издании и в материалах 4-х конференций.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, выводов, списка использованных источников и одного приложения. Полный объем диссертации - 195 страниц компьютерного текста, в том числе основное содержание на 165 страницах, включая 21 рисунок, 17 таблиц. Список использованных источников содержит 127 наименований.

РАЗДЕЛ 1

ПАРАМЕТРЫ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА РАДИОЛОКАЦИОННОЕ НАБЛЮДЕНИЕ ОБЪЕКТОВ СУДОВЫМИ РЛС

Судовые радиолокационные системы наряду с системами спутниковой навигации типа GPS или GloNaSS (Global Navigation Satellite Systems) являются главным средством обеспечения безопасности судовождения в сложных гидрометеорологических условиях. Обнаружение объектов судовыми РЛС производится с помощью радиоволн, распространяющихся в атмосфере, которая характеризуется своими особенностями. Ухудшение информации об объекте обусловлено ее влиянием на процесс распространения электромагнитной волны, которая является носителем информации об объекте. С другой стороны в радиолокационном сигнале имеется информация не только об объекте радиолокационного наблюдения, но и о среде, в которой распространяется электромагнитная энергия. Образование отраженного сигнала происходит в результате взаимодействия электромагнитных волн, излучаемых судовой РЛС, как с объектом радиолокационного наблюдения, так и с атмосферными образованиями, являющимися метеоцелями. Судовая РЛС должна решать две основные задачи: - это обнаружение объектов и опасных метеорологических образований, создающих сложные условия судовождения. На процесс взаимодействия электромагнитных волн со средой существенное влияние оказывают ее радиофизические характеристики, к которым относятся диэлектрическая проницаемость или коэффициент преломления атмосферы, магнитная проницаемость и удельная электрическая проводимость. Физический объект, в данном случае судно, представляет собой разрыв непрерывности диэлектрической проницаемости атмосферы, в которой распространяются радиоволны, излучаемые антенной судовой РЛС. Судно действует как поверхность, рассеивающая падающую на нее электромагнитную энергию.

Эффективность рассеяния характеризуется: эффективной поверхностью наблюдаемого объекта, которая имеет различную форму, нелинейности, несингулярность (штыри, плоскости, поляризационные решетки); длиной волны и материалом. Метеорологические образования также являются радиолокационными объектами, которые обнаруживаются судовой РЛС совместно с надводными или наземными. При отсутствии облаков и осадков эхо-сигнал формируется только объектом, при выпадающих осадках объект наблюдается на их фоне и может стать невидимым для судовой РЛС, т.к. возникает трудность отделения эхо-сигнала объекта от эхо-сигнала осадков. Даже применение узкой диаграммы направленности антенны и излучаемого импульса малой длительности при наблюдении объекта на большом расстоянии не позволяет избежать эхо-сигнала гидрометеорологического фона. Влияние гидрометеорологического фона на обнаружение объектов рассмотрено многими авторами в работах [1-10], в которых представлены результаты исследования радиофизических характеристик атмосферы как среды, в которой производится радиолокационное наблюдение объектов.

При радиолокационном наблюдении объектов интенсивность эхо-сигнала зависит не только от параметров судовой РЛС, радиолокационных характеристик наблюдаемого объекта, но и от радиолокационных характеристик атмосферных образований на пути судна. Поэтому радиолокационные методы, реализуемые в судовых РЛС, направлены на выделение эхо-сигнала наблюдаемого объекта от эхо-сигнала гидрометеорообразований.

Для решения указанной задачи возникает необходимость анализа радиолокационных характеристик гидрометеорообразований, которые прямо или косвенно связаны с радиолокацией облаков и осадков. Радиолокационные характеристики гидрометеорологического фона определяются эффективными площадями поглощения и рассеяния электромагнитной энергии, излучаемой антенной судовой РЛС и входят в уравнение радиолокации гидрометеорообразований, которое представлено в виде [11]:

$$P_{\text{пр}} = \frac{\pi^3 P_{\text{и}} G^2 h}{512 R^2 \lambda^2} \cdot \sigma_{\Sigma i}, \quad (1.1)$$

где $P_{\text{пр}}$ - мощность от всех частиц, заключенных в импульсном объеме метеообъекта, *Вт*;

$P_{\text{и}}$ - мощность, излучаемая антенной РЛС, *Вт*;

G - коэффициент направленного действия антенны;

h - пространственная протяженность импульса, излучаемого антенной РЛС, *м*;

R - расстояние до метеообъекта, *км*;

λ - длина волны РЛС, *см*;

$\sigma_{\Sigma i}$ - суммарная эффективная площадь ослабления, *см²*.

Суммарная эффективная площадь ослабления вычисляется по формуле:

$$\sigma_{\Sigma i} = \sigma_{\text{п}i} + \sigma_{\text{р}i} \quad (1.2)$$

В (1.2) эффективная площадь поглощения электромагнитной энергии гидрометеорами $\sigma_{\text{п}i}$ и эффективная площадь рассеяния электромагнитной энергии частицами гидрометеоров $\sigma_{\text{р}i}$ рассчитываются по следующим формулам:

$$\sigma_{\text{п}i} = \frac{\pi^2 d_i^3}{\lambda} \left(\frac{\epsilon_{\Sigma} - 1}{\epsilon_{\Sigma} + 2} \right); \quad (1.3)$$

$$\sigma_{\text{р}i} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\pi^5 d_i^6}{\lambda^4} \left| \frac{\epsilon_{\Sigma} - 1}{\epsilon_{\Sigma} + 2} \right|^2, \quad (1.4)$$

здесь d - диаметр частиц гидрометеоров, *см*;

ϵ_{Σ} - суммарная диэлектрическая проницаемость частиц гидрометеоров;

λ - длина волны РЛС, *см*.

Уравнение (1.1) представляется в более компактной форме, т.е.

$$\bar{P}_{\text{пр}} = \Pi R^{-2} \cdot \sigma_{\Sigma i}, \quad (1.5)$$

где $\Pi = \frac{\pi^3 P_n G^2 h}{512 \lambda^2}$ - энергетический потенциал МРЛ.

1.1. Радиофизические параметры атмосферы

Работа судовых РЛС происходит в среде, которая характеризуется своими радиофизическими параметрами, такими как удельной электрической проводимостью γ_a , абсолютной диэлектрической ϵ_a и абсолютной магнитной μ_a проницаемостями. Для свободного пространства электрическая проводимость равна $\gamma_a = 0$, абсолютная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_a = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, а абсолютная магнитная проницаемость $\mu_a = 1,257 \cdot 10^{-6}$ Гн/м. Путь распространения электромагнитной волны, излучаемой антенной судового радиолокатора, принципиально зависит от относительной диэлектрической проницаемости атмосферы $\epsilon = \frac{\epsilon_a}{\epsilon_0}$, где

$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} \cdot 10^{-9}$ Ф/м - является диэлектрической проницаемостью свободного

пространства, а относительная магнитная проницаемость принимается равной единице. Относительная диэлектрическая проницаемость атмосферы связана с такими ее метеопараметрами как температура T , давление P , массовая доля водяного пара s , водность w , плотность аэрозоля ρ и записывается в виде [11]:

$$\epsilon = 1 + \left[\frac{157 P}{T} \left(1 + 7,717 \frac{q}{T} \right) \right] \cdot 10^{-6} + \frac{3w}{\rho} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|, \quad (1.6)$$

где m - комплексный показатель преломления электромагнитных волн веществом атмосферного аэрозоля.

При работе судовой РЛС в радиоканал включаются антенна (одна на излучение и прием), среда распространения с диэлектрической проницаемостью ε , отражающие объекты (цель и гидрометеоры) с их радиолокационными параметрами. Абсолютная диэлектрическая проницаемость атмосферы при наличии в ней метеообразований является комплексной величиной, состоящей из вещественной и мнимой частей, т.е.

$$\varepsilon_a = \varepsilon' - j \varepsilon'' . \quad (1.7)$$

Действительная часть ε' характеризует емкость среды, а мнимая ε'' - ее проводимость.

При наличии в атмосфере водяных облаков и осадков молекулы воды обладают дипольным моментом, т.е. являются полярными. На низких частотах комплексная диэлектрическая проницаемость является действительной величиной, называется статической относительной диэлектрической проницаемостью, обозначается ε_s и определяется по формуле [8]:

$$\frac{\varepsilon_s - 1}{\varepsilon_s + 2} = \frac{N}{3 \cdot 8,854 \cdot 10^{-12}} \left(\alpha + \frac{1}{3} \cdot \frac{P^2}{KT} \right), \quad (1.8)$$

де N - число молекул в 1 м^3 атмосферного воздуха;

α - поляризуемость молекулы;

P - дипольный момент молекулы;

K - постоянная Больцмана, $K = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж / К ;

T - абсолютная температура в градусах К .

На высоких частотах комплексная диэлектрическая проницаемость атмосферы является также вещественной и называется оптической относительной диэлектрической проницаемостью ε_o и определяется соотношением:

$$\frac{\varepsilon_0 - 1}{\varepsilon_0 + 2} = \frac{N}{3 \cdot 8,854 \cdot 10^{-12}} \alpha. \quad (1.9)$$

Тогда с учетом (1.8) и (1.9) выражения для ε' и ε'' запишутся в виде:

$$\varepsilon' = \varepsilon_0 + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_0}{1 + (\omega\tau)^2}, \quad (1.10)$$

$$\varepsilon'' = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_0) \omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2}, \quad (1.11)$$

где ω - круговая частота;

τ - время релаксации диэлектрической проницаемости определяемое по формуле:

$$\tau = \frac{\varepsilon_s + 2}{\varepsilon_0 + 2} \cdot \tau_0. \quad (1.12)$$

Здесь τ_0 - время релаксации молекулы.

Вместо величин ω и τ при практических расчетах пользуются длинами волн λ и λ_s , которые определяются соответственно:

$$\lambda = \frac{2\pi c}{\omega}, \quad (1.13)$$

$$\lambda_s = 2\pi c\tau, \quad (1.14)$$

где c - скорость света в вакууме, м/с.

С учетом (1.13) и (1.14) расчетные формулы для вещественной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости атмосферы принимают вид:

$$\varepsilon' = \varepsilon_0 + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_0}{1 + \left(\frac{\lambda_s}{\lambda}\right)^2}, \quad (1.15)$$

$$\varepsilon'' = \frac{\left(\varepsilon_s - \varepsilon_0\right) \frac{\lambda_s}{\lambda}}{1 + \left(\frac{\lambda_s}{\lambda}\right)^2}, \quad (1.16)$$

в котором ε_s и λ_s зависят от температуры t в диапазоне от -40°C до $+75^\circ\text{C}$ и рассчитываются по следующим аналитическим зависимостям [3]:

$$\varepsilon_s = 0,00081t^2 - 0,40885t + 88,2, \quad (1.17)$$

$$\lambda_s = 1,4662^{-0,0634t} + 0,000136t^2 - 0,027296t + 1,8735116. \quad (1.18)$$

При отсутствии облаков и осадков электромагнитная волна распространяется в сухой атмосфере, состоящей из различных газов, относительная диэлектрическая проницаемость которой близка к единице ($\varepsilon \approx 1,00300$). При наличии облаков и осадков ε' и ε'' зависят как от длины волны, так и от температуры о чем свидетельствуют формулы (1.15) - (1.18).

Модуль диэлектрической проницаемости и тангенс угла потерь определяются соотношениями:

$$|\varepsilon| = \sqrt{(\varepsilon')^2 + (\varepsilon'')^2}, \quad (1.19)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}. \quad (1.20)$$

В работе [8] представлены расчетные значения диэлектрической проницаемости, показателя преломления и показателя поглощения воды в диапазоне длин волн от $0,08 \text{ см}$ до 20 см и температур от минус 40°C до

плюс $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. При расчетах диэлектрической проницаемости морская вода рассматривалась как однородная смесь воды и веществ растворенных в ней. Результаты проведенного анализа показали, что точность формул (1.17) и (1.18) недостаточна.

В работе [12] Д. Сакстона и Д. Лэйна опубликованы результаты измерения комплексного коэффициента преломления воды на длинах волн $1,24\text{ см}$ и $1,58\text{ см}$ в зависимости от температуры.

В работе [13] Д. Сакстоном обоснованы экспериментальные и теоретические результаты исследования показателя поглощения воды в верхней части миллиметрового диапазона длин волн с использованием модели Дебая.

В работе [14] опубликованы подробные исследования по результатам измерения показателя преломления воды в диапазоне длин волн от $0,014\text{ см}$ до $10,4\text{ см}$.

В работе [15] К.С. Шифриным представлены результаты исследования показателей преломления и поглощения воды в нижней части субмиллиметрового диапазона длин волн.

Зинченко Н.С. в работе [16] опубликовал результаты измерения диэлектрической проницаемости при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ в диапазоне длин волн $\lambda = 0,43\text{ см} - 1,36\text{ см}$ и провел их сравнение с теоретическими расчетами. Отличие экспериментальных результатов от теоретических находится в пределах $5\% - 10\%$.

Первое исследование радиолокационных сигналов от тающих градин были выполнены Д. Райдом в работе [17]. Результаты проведенных исследований показали, что коэффициент преломления однородной смеси воды и льда не зависит от длины волны.

В работе [18] показано, что наилучшим значением по данным теоретических и экспериментальных исследований диэлектрической проницаемости является её значение $\epsilon_0 = 5,5$.

Показатель преломления атмосферы существенным образом зависит от таких метеопараметров, как температура, давление, удельная влажность,

водность облаков и интенсивность осадков. Указанные метеопараметры изменяются случайным образом, а показатель N является функцией температуры T , влажности q и давления воздуха P , то практический интерес представляют статистические характеристики связи показателя преломления с определяющими его метеопараметрами.

Коэффициент преломления атмосферы определяется следующим образом:

$$n = \sqrt{\epsilon'} = 1 + \left[\frac{78,5P}{T} \left(1 + 7,717 \frac{q}{T} \right) \right] \cdot 10^{-6} + \frac{3}{2} \cdot \frac{\omega}{\rho} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|. \quad (1.21)$$

Показатель преломления атмосферы измеряется в N - единицах и связан с коэффициентом преломления следующей зависимостью

$$N = (n - 1) \cdot 10^6. \quad (1.22)$$

В связи с тем, что показатель преломления реальной атмосферы определяется метеопараметрами, то для практических целей требуется установление статистических связей между N и T , q , P . Однако сведения о пространственно-временных корреляционных функциях показателя преломления атмосферы недостаточны поэтому возникает необходимость в разработке метода расчета показателя преломления пограничной атмосферы, в зависимости от метеопараметров с использованием корреляционного анализа [19,20].

Статистическими характеристиками взаимосвязи показателя преломления атмосферы с определяющими его метеопараметрами являются коэффициенты корреляции r_{NT} , r_{Nq} , r_{NP} , пространственно-временные взаимно-корреляционные функции $r_{N_A T_B}(R, \tau)$, $r_{N_A q_B}(R, \tau)$, $r_{N_A P_B}(R, \tau)$, пространственно взаимно-корреляционные функции при $\tau = 0$ $r_{N_A T_B}(R)$,

$r_{N_{AqB}}(R)$, $r_{N_{APB}}(R)$ и временные взаимно-корреляционные функции (при $R = 0$) $r_{N_T}(\tau)$, $r_{N_q}(\tau)$, $r_{N_P}(\tau)$.

Пространственно-временные взаимно-корреляционные функции характеризуют связь показателя преломления N в одной точке A атмосферы с метеопараметрами в другой точке атмосферы B , расстояние между которыми в интервале времени τ равняется R .

При надежной связи между показателем преломления атмосферы N и любым из метеопараметров T , q , P , расчет наивероятнейших значений N или его пространственно-временной экстраполяции упрощается, не используя характеристики множественной корреляции. При этом определенное значение имеют характеристики пространственно-временных связей между значениями самого показателя преломления атмосферы, т.е. взаимно-корреляционными функциями $r_{N_{AN_B}}(R, \tau)$ или $r_N(R, \tau)$, которые при $R = 0$ и $\tau = 0$ имеют вид $r_N(R, \tau) = r_N(\tau)$ и $r_N(R, \tau) = r_N(R)$.

Приведенные корреляционные функции $r_N(\tau)$, $r_N(R)$ и $r_N(R, \tau)$ с учетом закона распределения показателя преломления атмосферы позволяют построить временной прогноз N (экстраполяцию) по $r_N(\tau)$, пространственный прогноз N по $r_N(R)$ или пространственно-временной по $r_N(R, \tau)$. Однако для расчета коэффициентов пространственно-временной корреляции $r_N(R, \tau)$ осуществляется проведение учащенных по времени и сгущенных по пространству ряда измерений метеопараметров. Если имеются стандартные сетевые или экспедиционные метеоизмерения, то по ним рассчитываются значения временной корреляционной функции $r_N(\tau)$. С учетом положения теории «замороженной» турбулентности, в дальнейшем определяются значения пространственной корреляционной функции $r_N(R)$, а затем косвенным образом оценивается значение пространственно-временной функции $r_N(R, \tau)$.

Для получения соотношений, которые позволяют по имеющимся значениям коэффициентов корреляции $r_T(\tau)$, $r_T(R)$, $r_q(\tau)$, $r_q(R)$ рассчитывать значения $r_N(\tau)$, $r_N(R)$, $r_N(R, \tau)$.

Коэффициент корреляции $r_N(\tau)$ определяется из соотношения:

$$r_N(\tau) = \frac{K_N(\tau)}{D_N}, \quad (1.23)$$

где $K_N(\tau)$ и D_N - корреляционная функция и дисперсия показателя преломления.

Установление связей между величинами, входящими в уравнение (1.23), осуществляется разложением выражения для показателя преломления воздуха в ряд Тейлора в окрестностях средних значений \bar{T} и \bar{q} , при этом ограничиваются членами первого порядка малости:

$$N = \varphi\left(\bar{P}, \bar{T}, \bar{q}\right) + \frac{\partial N}{\partial T}\left(T - \bar{T}\right) + \frac{\partial N}{\partial q}\left(q - \bar{q}\right) + \frac{\partial N}{\partial P}\left(P - \bar{P}\right). \quad (1.24)$$

Используя правило определения дисперсии суммы случайных величин из уравнения (1.24), получают:

$$D_N = \left(\frac{\partial N}{\partial T}\right)^2 D_T + \left(\frac{\partial N}{\partial q}\right)^2 D_q + 2\left(\frac{\partial N}{\partial T}\right) \cdot \left(\frac{\partial N}{\partial q}\right) K_{Tq}. \quad (1.25)$$

Но

$$\frac{\partial N}{\partial T} = -\frac{\bar{P}}{\bar{T}} \left(78 + 2 \cdot 6 \cdot 10^2 \frac{\bar{q}}{\bar{T}} \right)$$

$$\frac{\partial N}{\partial q} = 6 \cdot 10^2 \frac{\bar{P}}{\bar{T}^2}. \quad (1.26)$$

После подстановки (1.25) в (1.24) дисперсия суммы случайных величин имеет вид:

$$D_N = \frac{\bar{P}^2}{\bar{T}^4} \left[\left(78 + 2 \cdot 6 \cdot 10^2 \frac{\bar{q}}{\bar{T}} \right)^2 D_T + (6 \cdot 10^2)^2 D_q - 2 \cdot 6 \cdot 10^2 \left(78 + 2 \cdot 6 \cdot 10^2 \frac{\bar{q}}{\bar{T}} \right) K_{Tq} \right]. \quad (1.27)$$

С другой стороны

$$D_N = \left(N - \bar{N} \right)^2 = \Delta N^2. \quad (1.28)$$

Путем дифференцирования (1.23) по T и q , приращение показателя преломления запишется следующим образом:

$$\Delta N = -78 \frac{\bar{P}}{\bar{T}^2} \Delta T - 2 \cdot 6 \cdot 10^2 \frac{\bar{P} \cdot \bar{q}}{\bar{T}^3} \Delta T + 6 \cdot 10^2 \frac{\bar{P}}{\bar{T}^2} \Delta q. \quad (1.29)$$

Возведя ΔN в квадрат и проведя осреднение, выражение (1.29) запишется в виде

$$\Delta \bar{N}^2 = \frac{\bar{P}^2}{\bar{T}^4} \left[\left(78 + 2 \cdot 6 \cdot 10^2 \frac{\bar{q}}{\bar{T}} \right)^2 \Delta \bar{T}^2 + (6 \cdot 10^2)^2 \Delta \bar{q}^2 - 2 \left(78 + 2 \cdot 78 \frac{\bar{q}}{\bar{T}} \right) 6 \cdot 10^2 \overline{\Delta T \Delta q} \right], \quad (1.30)$$

а с учетом (1.27) промежуточное значение D_N представляется в виде:

$$D_N = \frac{\bar{P}^2}{\bar{T}^4} \left[\left(78 + 2 \cdot 6 \cdot 10^2 \frac{\bar{q}}{\bar{T}} \right)^2 D_T + \left(6 \cdot 10^2 \right)^2 D_q - \right. \\ \left. - 2 \cdot 6 \cdot 10^2 \left(78 + 2 \cdot 6 \cdot 10^2 \frac{\bar{q}}{\bar{T}} \right) K_{Tq} \right]. \quad (1.31)$$

В выражении (1.31) $K_{Tq} = \sigma_T - r_{Tq}$. Так как над морской поверхностью $r_{Tq} \approx 1$, то выражение для D_N принимает окончательный вид:

$$D_N = \frac{\bar{P}^2}{\bar{T}^4} \left[\left(78 + 2 \cdot 6 \cdot 10^2 \frac{\bar{q}}{\bar{T}} \right) \sigma_T - 6 \cdot 10^2 \sigma_q \right]^2. \quad (1.32)$$

Для определения $K_N(\tau)$, используется следующая формула:

$$K_N(t_1, t_2) = \overline{\left[N(t_1) - \bar{N}(t_1) \right] \cdot \left[N(t_2) - \bar{N}(t_2) \right]} = \overline{\Delta N(t_1) \Delta N(t_2)}. \quad (1.33)$$

Тогда, путем дифференцирования по T и q , приращение показателя преломления определяется по следующей формуле:

$$\Delta N = -\frac{\bar{P}}{\bar{T}^2} \left[\left(78 + 2 \cdot 6 \cdot 10^2 \frac{\bar{q}}{\bar{T}} \right) \Delta T - 6 \cdot 10^2 \Delta q \right]. \quad (1.34)$$

Произведение отклонений ΔT для моментов времени t_1 и t_2 , с учетом осреднения, запишется в виде:

$$\overline{\Delta N(t_1) \Delta N(t_2)} = \frac{\bar{P}^2}{\bar{T}^4} \left[\left(78 + 2 \cdot 6 \cdot 10^2 \frac{\bar{q}}{\bar{T}} \right)^2 \cdot \overline{\Delta T(t_1) \Delta T(t_2)} - \right. \\ \left. - 6 \cdot 10^2 \left(78 + 2 \cdot 6 \cdot 10^2 \frac{\bar{q}}{\bar{T}} \right) \cdot \overline{\Delta T(t_1) \Delta q(t_2)} - \right.$$

$$\left. - 6 \cdot 10^2 \left(78 + 2 \cdot 6 \cdot 10^2 \frac{\bar{q}}{T} \right) \cdot \overline{\Delta q(t_1) \Delta T(t_2)} + 6 \cdot 10^2 \overline{\Delta q(t_1) \Delta q(t_2)} \right]. \quad (1.35)$$

С учетом ΔN временная корреляционная функция может быть представлена следующим образом:

$$\begin{aligned} K_N(t_1, t_2) = & \frac{\bar{P}^2}{\bar{T}^4} \left[\left(78 + 2 \cdot 6 \cdot 10^2 \frac{\bar{q}}{T} \right)^2 K_T(t_1, t_2) - \right. \\ & \left. - 6 \cdot 10^2 \left(78 + 2 \cdot 6 \cdot 10^2 \frac{\bar{q}}{T} \right) K_{Tq}(t_1, t_2) - \right. \\ & \left. - 6 \cdot 10^2 \left(78 + 2 \cdot 6 \cdot 10^2 \frac{\bar{q}}{T} \right) \cdot K_q(t_1, t_2) + \left(6 \cdot 10^2 \right)^2 K_q(t_1, t_2) \right]. \quad (1.36) \end{aligned}$$

Из анализа формулы (1.36) следует, что для определения временной корреляционной функции $K_N(t_1, t_2)$, кроме средних значений P , T , q , требуется определить одноименные временные корреляционные функции температуры и влажности, т.е. $K_T(t_1, t_2)$, $K_q(t_1, t_2)$ и их взаимные временные корреляционные функции $K[T(t_1), q(t_2)]$, $K[q(t_1), T(t_2)]$.

Взаимная временная корреляционная функция $K[T(t_1), q(t_2)]$ определяется из условия:

$$K[T(t_1), q(t_2)] = \left[\overline{T(t_1) q(t_2)} \right] - \overline{T(t_1)} \cdot \overline{q(t_2)}. \quad (1.37)$$

Исключение $q(t_2)$, из (1.37) производится заменой через наимвероятнейшее значение, определяемое с помощью уравнения регрессии, полагая процесс изменения T и q над однородной поверхностью стационарным, т.е.

$$q(t_2) = \tilde{q}(t_2) = r_q(\tau) q(t_1) + [1 - r_q(\tau)] \bar{q}. \quad (1.38)$$

В итоге выражение (1.37) запишется в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 K [T(t_1) \cdot q(t_2)] &= \overline{T(t_1)q(t_2)} - \bar{T}_q = \\
 T(t_1) \cdot \left[\overline{r_q(\tau)q(t_1) + (1-r_q(\tau)\bar{q})} \right] - \bar{T}_q &= r_q(\tau) \cdot \overline{T(t_1)q(t_1)} \\
 + T(t_1)\bar{q} - r_q(\tau)\overline{T(t_1)\bar{q}} - \bar{T}_q &= r_q(\tau) \left[\overline{T(t_1)q(t_1)} - \bar{T}_q \right] = \\
 &= r_q(\tau) K_{T_q} = \sigma_T \sigma_q r_q(\tau) r_{T_q}. \quad (1.39)
 \end{aligned}$$

И аналогично

$$K [q(t_1), T(t_2)] = r_T(\tau) K_{T_q} = \sigma_T \sigma_q r_T(\tau) r_{T_q}. \quad (1.40)$$

После подстановки (1.39) и (1.40) в (1.36) корреляционная функция приводится к виду:

$$\begin{aligned}
 K_N(\tau) &= \frac{\bar{P}^2}{\bar{T}^4} \left[\left(A + 2B \frac{\bar{q}}{\bar{T}} \right) \sigma_T^2 r_T(\tau) - B \left(A + 2B \frac{\bar{q}}{\bar{T}} \right) \cdot \sigma_T \sigma_q r_{T_q} \cdot \right. \\
 &\quad \left. [r_q(\tau) + r_T(\tau)] + B^2 \sigma_q^2 r_q(\tau) \right]. \quad (1.41)
 \end{aligned}$$

Так как над поверхностью моря в соответствии с [24] $r_{T_q} \approx 1$, по данным [25] $r_T(\tau) \approx r_q(\tau)$, а суточный ход удельной влажности аналогичен суточному ходу температуры, то для приводного слоя атмосферы временная корреляционная функция определяется из условия:

$$K_N(\tau) = \frac{\bar{P}^2}{\bar{T}^4} \left[\left(A + 2B \frac{\bar{q}}{\bar{T}} \right) \sigma_T - B \sigma_q \right]^2 r_T(\tau) \quad (1.42)$$

или с учетом того, что $r_T(\tau) \approx r_q(\tau)$,

$$K_N(\tau) = \frac{\bar{P}^2}{\bar{T}^4} \left[\left(A + 2B \frac{\bar{q}}{\bar{T}} \right) \sigma_T - B \sigma_q \right]^2 r_q(\tau), \quad (1.43)$$

здесь A и B – постоянные коэффициенты.

Нормированная корреляционная функция показателя преломления определяется из следующей зависимости:

$$r_N(\tau) = \frac{K_N(\tau)}{D_N} = \frac{\frac{\bar{P}^2}{\bar{T}^4} \left[\left(A + 2B \frac{\bar{q}}{\bar{T}} \right) \sigma_T - B \sigma_q \right]^2 r_T(\tau)}{\frac{\bar{P}^2}{\bar{T}^4} \left[\left(A + 2B \frac{\bar{q}}{\bar{T}} \right) \sigma_T - B \sigma_q \right]^2} = r_T(\tau), \quad (1.44)$$

а с учетом данных [25]

$$r_N(\tau) \approx r_T(\tau) \approx r_q(\tau), \quad (1.45)$$

что соответствует результатам работы [27].

При наличии экспериментальных данных наблюдений рассчитываются $r_N(\tau)$, $r_T(\tau)$ и $r_q(\tau)$ и поправочные коэффициенты K_1 и K_2 , т.е.

$$r_N(\tau) = K_1, \quad r_T(\tau) \approx K_2 r_q(\tau), \quad (1.46)$$

а также

$$r_N(1) \approx r_T(1) \approx r_q(1). \quad (1.47)$$

Данные о временной корреляционной функции температуры $r_T(\tau)$ над поверхностью океана изложены в [24], в то же время значения пространственной корреляционной функции температуры $r_T(1)$ над океаном до настоящего времени отсутствуют, а соотношение между ними можно

определить только исходя из теории «замороженной» турбулентности Тейлора [28, 37].

Исходя из [28], аналитическое выражение пространственной и временной структурных функций температуры записываются в виде:

$$\left. \begin{aligned} D_T(l) &= 2,5 \cdot 10^{-5} l, & \text{м}^2 / \text{с}^2 \\ D_T(\tau) &= 2,1 \cdot 10^{-4} \tau, & \text{град}^2 / \text{с}^2 \end{aligned} \right\} \quad (1.48)$$

При одинаковой изменчивости корреляционных и структурных функций $D_T(l) = D_T(\tau)$ будут равны и их коэффициенты корреляции $r_T(l) = r_T(\tau)$. Приравнивая правые части в (1.48), получается:

$$2,5 \cdot 10^{-5} l = 2,1 \cdot 10^{-4} \tau$$

или

$$\frac{l}{\tau} = \frac{2,1 \cdot 10^{-4}}{2,5 \cdot 10^{-5}} = 8,4 \text{ м/с.}$$

Из приведенного следует, что одинаковое изменение температуры над водной поверхностью будет наблюдаться через 8,4 м и по времени через 1 с, а изменчивость за один час соответствует изменчивости по расстоянию 30 км.

Исходя из этого можно принять, что $r_T(\tau = 1 \text{ ч}) = r_T(l = 30 \text{ км})$.

Полученные соотношения дают возможность по известным значениям временной корреляционной функции $r_T(\tau)$ метеопараметра над водной поверхностью, в частности температуры, рассчитать значения пространственной корреляционной функции $r_T(l)$.

Интерес **представляет** и расчет $r_T(l)$ по значениям временной корреляционной функции $r_T(\tau)$ на уровне 1000 мб поверхности, сделанной в [37] для тропической зоны Атлантического океана (табл. 1.1).

Значения коэффициентов пространственной и временной корреляции для определения показателя преломления воздуха над морской поверхностью

l , км	$r_T(l)$	τ , час	$r_T(\tau)$
0	1,00	0	1,00
30	0,96	1	0,96
60	0,92	2	0,92
90	0,87	3	0,87
180	0,75	6	0,75
360	0,64	12	0,64
540	0,60	18	0,60
720	0,58	24	0,58

Из данных табл.1.1 следует, что существует временная и пространственная корреляция температуры воздуха над морской поверхностью, которую необходимо учитывать при определении радиофизических характеристик атмосферы на пути следования судна.

1.2. Ослабление электромагнитной энергии гидрометеорами на пути судна

Рассеяние электромагнитной энергии, излучаемое антенной судовой РЛС, на пути от РЛС до наблюдаемого объекта, происходит в различных гидрометеообразованиях, особенно в осадках в виде дождя и снегопада различной интенсивности. Энергия, рассеянная гидрометеорами в сторону РЛС, создает наряду с эхо-сигналами от морских объектов засветки на индикаторах, которые воспринимаются как эхо-сигналы от объемно-распределенных целей. Для решения задачи селекции эхо-сигналов от наблюдаемых сосредоточенных морских объектов, проводится анализ рассеивающих свойств гидрометеоров, маскирующих наблюдаемый объект судовой РЛС.

Электромагнитная волна, излучаемая антенной судовой РЛС, проходя через облака и осадки, возбуждает в каждой частице вторичное излучение, которое рассеивается во все стороны, в том числе и в направлении на РЛС. Интенсивность излучения электромагнитной энергии в направлении на РЛС каждой частицей можно оценить через эффективную площадь рассеяния σ_p . Метеорологическое образование представляет собой объемно распределенный объект, состоящий из большого числа элементарных отражателей. Мощность электромагнитной волны, рассеянной метеобъектом в направлении РЛС при условии некогерентного рассеяния, равна сумме мощностей сигналов, отраженных отдельными частицами распределенного объекта. ЭПР метеобъекта, состоящего из одинаковых частиц сферической формы, определяется с помощью следующего соотношения:

$$\sigma_p = \frac{\pi^6 R^2 \theta^2 h}{8\lambda^4} N d^6 \left| \frac{\epsilon_\Sigma - 1}{\epsilon_\Sigma + 2} \right|^2, \quad (1.49)$$

а в случае неодинаковых сферических частиц:

$$\sigma_p = \frac{\pi^6 R^2 \theta^2 h}{8\lambda^4} \sum_d N(d) d^6 \left| \frac{\epsilon_\Sigma - 1}{\epsilon_\Sigma + 2} \right|^2, \quad (1.50)$$

где R - расстояние до метеобъекта, км;

θ - ширина диаграммы направленности антенны судовой РЛС, рад;

h - пространственная протяженность излучаемого импульса, м;

λ - длина волны судовой РЛС, м;

N - число частиц в радиолокационном объеме метеобъекта;

d - диаметр частиц, см;

ϵ_Σ - суммарная диэлектрическая проницаемость вещества частицы.

На радиолокационное обнаружение объектов судовыми РЛС, работающими на длинах волн $\lambda_1 = 3\text{см}$ и $\lambda_2 = 10\text{см}$, маскирующее влияние оказывают в основном обложные и ливневые осадки, состоящие из частиц различной формы, размеров и фазового состояния (вода, лед). Количество капель в 1м^3 связано с интенсивностью выпадающего дождя следующей зависимостью:

$$\bar{N} = 100 + I, \quad (1.51)$$

где I - интенсивность дождя в мм/ч .

Анализ распределения капель дождя по Атласу Д. [39], Парсону Д.[40], Маршаллу и Пальмеру [41], Бесту А. [42], Литвинову И.В. [43], Келкару В. [44], Поляковой Е.А. [45], Мейсону Б. [46], Абшаеву М.Т. [47], Розенбергу В.И.[8] показал, что каждая интенсивность дождя характеризуется средним диаметром капель и их числом в единице объема.

Эффективная площадь поглощения определяется из условия:

$$\sigma_{\text{п}i} = \frac{\pi^2 d^3}{\lambda} I_m \left(-\frac{\epsilon_\Sigma - 1}{\epsilon_\Sigma + 2} \right). \quad (1.52)$$

Тогда суммарная эффективная площадь ослабления электромагнитной энергии в дожде запишется в виде:

$$\sigma_{\Sigma i} = \sigma_{\text{п}i} + \sigma_{\text{р}i}. \quad (1.53)$$

Зависимости от температуры действительных и мнимых параметров, входящих в $\sigma_{\text{р}i}$ и $\sigma_{\text{п}i}$ представлены в табл.1.2 для жидких капель и в табл. 1.3 для капель ледяного дождя.

Таблица 1.2

Значения действительной и мнимой части σ_{pi} и σ_{ri} для жидких капель

Параметр	$t^{\circ}C$	Длина волны λ , см	
		3,2	10
$\left \frac{\epsilon_{\Sigma} - 1}{\epsilon_{\Sigma} + 2} \right ^2$	40	0,917	0,921
	30	0,917	0,924
	20	0,917	0,927
	10	0,914	0,929
	2	0,906	0,931

Таблица 1.3

**Значения действительной и мнимой части σ_{pi} и σ_{ri}
для капель ледяного дождя**

Параметр	$t^{\circ}C$	Значение параметра	
		$\lambda = 3,2$ см	$\lambda = 10$ см
$\left \frac{\epsilon_{\Sigma} - 1}{\epsilon_{\Sigma} + 2} \right ^2$	0	0,892	0,931
	- 10	0,884	0,930
	- 20	0,846	0,925
	- 30	0,782	0,909
	- 40	0,725	0,875
$I_m \left(- \frac{\epsilon_{\Sigma} - 1}{\epsilon_{\Sigma} + 2} \right)$	0	- 0,945	- 0,965
	- 10	- 0,940	- 0,964
	- 20	- 0,920	- 0,962
	- 30	- 0,884	- 0,954
	- 40	- 0,851	- 0,936

Значение суммарной эффективной площади ослабления водяных и ледяных частиц выпадающих осадков на длине волны 3.2 см и 10 см в зависимости от температуры воздуха представлены в таблицах 1.4-1.7.

Таблица 1.4

Значение суммарной эффективной площади ослабления водяными частицами выпадающих осадков в зависимости от температуры воздуха ($\lambda_1 = 3,2$ см)

I , мм/ч	\bar{N}_i	\bar{d} , мм	$t^\circ\text{C}$				
			2	10	20	30	40
0,25	242	1,00	4,69	4,72	4,73	4,73	4,73
1,25	305	1,40	21,32	21,45	21,48	21,48	21,48
2,5	460	1,32	16,01	16,18	18,24	18,24	18,24
5,0	383	1,51	31,01	31,20	31,24	31,24	31,24
10,0	511	1,99	133,02	133,70	133,79	133,79	133,79
12,5	516	1,80	77,27	77,68	77,73	77,73	77,73
25,0	546	1,90	103,35	103,89	103,97	103,97	103,97
50,0	2250	3,00	1369,44	1377,00	1377,27	1377,27	1377,27
100,0	890	3,50	3379,33	3398,14	3398,57	3398,57	3398,57
150,0	1150	3,70	4689,74	4715,90	4716,41	4716,41	4716,41

Анализ табл. 1.4-1.7 показал, что влияние атмосферных осадков на радиолокационное обнаружение и наблюдение объектов обусловлено с одной стороны числом частиц и их размерами в радиолокационном объеме, что приводит к уменьшению дальности их обнаружения по сравнению с дальностью обнаружения при отсутствии осадков, а с другой стороны это влияние приводит к увеличению мощности эхо-сигналов от частиц осадков, поступающей на вход приемника судовой РЛС одновременно с эхо-сигналом от объекта. Такое увеличение мощности эхо-сигнала увеличивает засветку индикатора, маскирующей эхо-сигнал наблюдаемого объекта. Выпадающие осадки вносят ослабление электромагнитной энергии, которое пропорционально их интенсивности (плотности дождевых капель).

Таблица 1.5

Значение суммарной эффективной площади ослабления водяными частицами выпадающих осадков в зависимости от температуры воздуха ($\lambda_1 = 10$ см)

I , мм/ч	\bar{N}_i	\bar{d} , мм	$t^\circ C$				
			2	10	20	30	40
0,25	242	1,00	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
1,25	305	1,40	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
2,5	460	1,32	2,28	2,28	2,28	2,28	2,28
5,0	383	1,51	3,49	3,49	3,49	3,49	3,49
10,0	511	1,99	8,66	8,66	8,66	8,66	8,66
12,5	516	1,80	6,18	6,18	6,18	6,18	6,18
25,0	546	1,90	7,41	7,41	7,41	7,41	7,41
50,0	2250	3,00	39,50	39,50	39,50	39,50	39,50
100,0	890	3,50	75,65	75,65	75,65	75,65	75,65
150,0	1150	3,70	96,87	96,87	96,87	96,87	96,87

Таблица 1.6

Значение суммарной эффективной площади ослабления ледяными частицами выпадающих осадков в зависимости от температуры воздуха ($\lambda_1 = 3,2$ см)

I , мм/ч	\bar{N}_i	\bar{d} , мм	$t^\circ C$				
			0	-10	-20	-30	-40
0,25	242	1,00	4,65	4,61	4,48	4,24	4,03
1,25	305	1,40	21,07	20,87	20,17	18,89	17,80
2,5	460	1,32	15,86	15,72	15,21	14,27	13,45
5,0	383	1,51	30,63	30,32	29,28	27,36	25,72
10,0	511	1,99	130,98	129,58	124,76	115,82	108,20
12,5	516	1,80	76,14	75,35	72,62	67,55	63,22
25,0	546	1,90	101,81	100,73	97,03	90,16	84,29
50,0	2250	3,00	1347,03	1331,91	1279,26	1181,52	1098,63
100,0	890	3,50	3323,32	3285,70	3154,45	2910,76	2704,27
150,0	1150	3,70	4611,76	4559,44	4376,79	4037,68	3750,38

Таблица 1.7

Значение суммарной эффективной площади ослабления ледяными частицами выпадающих осадков в зависимости от температуры воздуха ($\lambda_1 = 10$ см)

I , мм/ч	\bar{N}_i	\bar{d} , мм	$t^\circ\text{C}$				
			0	-10	-20	-30	-40
0,25	242	1,00	2,988	2,988	2,9785	2,9483	2,8975
1,25	305	1,40	8,2786	8,2786	8,2497	8,1660	8,0229
2,5	460	1,32	6,9002	6,9002	6,8763	6,8065	6,6878
5,0	383	1,51	10,4384	10,4384	10,4016	10,2960	10,1146
10,0	511	1,99	24,5648	24,5648	24,4736	24,2248	23,7811
12,5	516	1,80	17,9511	17,9511	17,8860	17,7043	17,3856
25,0	546	1,90	21,2538	21,2538	21,1758	20,9606	20,5800
50,0	2250	3,00	93,8223	93,8223	93,4100	92,4507	90,5175
100,0	890	3,50	161,6994	161,6994	160,9030	159,2492	155,6351
150,0	1150	3,70	198,4096	198,4096	197,3900	195,3573	190,7723

К настоящему времени многими авторами получены различные значения ослабления электромагнитной энергии в дожде, однако вследствие экспериментальных трудностей и имеющихся различий в законах распределения капель дождя, величины ослабления электромагнитной энергии изменяются в широких пределах даже для одних и тех же длин волн [47-50]. Исходя из этого, наиболее приемлемо использование данных табл. 1.2-1.7 при разработке методов, улучшающих радиолокационное наблюдение объектов судовой РЛС в сложных гидрометеорологических условиях, когда наблюдаемый объект находится за зоной осадков или в самой зоне. Если объект находится за зоной выпадающих осадков, то за счет уменьшения дальности его обнаружения зонами осадков, он может быть не обнаружен судовой РЛС. Если объект находится в зоне выпадающих осадков, то отражения от них на индикаторах судовой РЛС маскируют эхо-сигналы от наблюдаемого объекта на пути судна.

1.3. Особенности радиометеорологической информации для судоходства

Среда, в которой функционируют судовые РЛС, характеризуется сложной метеорологической обстановкой, с учетом которой осуществляется судовождение. Структура гидрометеообразований и вероятность их появления достаточно полно исследованы в работах [1,4,6,8,9,46-50], однако исследования применительно к обнаружению и распознаванию опасных метеорологических объектов судовыми РЛС для обеспечения безопасности судовождения проведены недостаточно. Гидрометеорологические явления в атмосфере приводят не только к уменьшению дальности обнаружения объектов, наличию естественных помех на индикаторах судовых РЛС, но и к опасному воздействию на безопасность судов, груза и команды. Циклоны, ураганы, смерчи создают сложную и опасную ситуацию не только в северо-восточной части территориального моря Украины, но и проблемы навигации во всем Мировом океане

При плавании в сложных метеорологических условиях, радиометеорологическая информация, получаемая с помощью судовых РЛС, является составной и неотъемлемой частью информации о состоянии среды, в которой находится судно и необходимой для обеспечения его безопасности. Из этого следует, что судовая РЛС должна не только обнаруживать объекты в сложных погодных условиях, но и получать информацию о состоянии погоды на пути судна с использованием отражающей способности метеообразований, определяемой их микрофизической структурой – радиолокационной отражаемостью. Радиолокационная отражаемость является основной характеристикой метеорологического объекта и может быть рассчитана по следующей формуле:

$$Z = \sum_{d_i} N(d_i) d_i^6 \left| \frac{\epsilon_{\Sigma} - 1}{\epsilon_{\Sigma} + 2} \right|^2, \quad (1.54)$$

где N - число частиц гидрометеообразования в радиолокационном объеме;

d - диаметр частиц, мм;

ϵ_{Σ} - суммарная диэлектрическая проницаемость частиц гидрометеоров.

Зависимость мощности эхо-сигналов метеообъекта от технических параметров судовой РЛС, дальности до метеообъекта, его микрофизической структуры и условий распространения электромагнитной волны в гидрометеорной среде, связана уравнением радиолокации метеообразований:

$$\frac{P_{\text{np}}}{P_{\text{ш}}} = \frac{0,1\pi^6 P_{\text{и}} A_p h k}{P_{\text{ш}} \lambda^4} \cdot \frac{Z}{R^2}, \quad (1.55)$$

где P_{np} - мощность эхо-сигнала, принимаемая антенной судовой РЛС, Вт;

$P_{\text{и}}$ - излучаемая мощность, Вт;

A_p - площадь раскрытия антенны, м²;

$h = c\tau$ - пространственная протяженность зондирующего импульса, м;

K - коэффициент полезного действия антенно-волноводного тракта;

R - расстояние до метеообъекта, км;

λ - длина волны, см;

τ - длительность излучаемого импульса, мкс;

c - скорость света, м/с;

$P_{\text{ш}}$ - мощность шума приемника РЛС, Вт.

Радиолокационная отражаемость связана с интенсивностью выпадающих дождей и снегопадов следующей зависимостью [9, 51]:

$$Z_{\text{д}} = 3,12 I^{1,6}, \quad (1.56)$$

$$Z_{\text{с}} = 15,6 I^{1,6}. \quad (1.57)$$

Для длины волны, равной 3,2 см значения радиолокационной отражаемости метеорообъектов в зависимости от расстояния до них и величины отраженной мощности представлены в табл. 1.8 [48].

Таблица 1.8

Значения радиолокационной отражаемости метеорообъектов в зависимости от расстояния до них и величины отраженной мощности

$\frac{P_{\text{пр}}}{P_{\text{ш}}}$	$\lambda = 3,2 \text{ см}$												
	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40	45	75	105
0	-3,4	-3,0	-2,4	-2,2	-2,0	-1,8	-1,7	-1,6	-1,5	-1,4	-1,4	-1,1	-0,6
6	-2,8	-2,4	-2,0	-1,6	-1,5	-1,4	-1,2	-1,1	-0,9	-0,8	-0,7	-0,3	-0,1
12	-2,4	-1,6	-1,4	-1,1	-0,9	-0,7	-0,6	-0,5	-0,3	-0,2	-0,1	0,1	0,5
18	-1,8	-1,1	-0,6	-0,4	-0,3	-0,2	0,0	0,1	0,3	0,4	0,4	0,7	1,0
24	-1,2	-0,4	-0,2	0,1	0,2	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0	1,3	1,6
30	-0,6	0,2	0,6	0,7	0,8	1,0	1,1	1,2	1,3	1,5	1,6	2,1	2,2
36	0,1	0,8	1,2	1,4	1,4	1,6	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,5	2,8
42	0,8	1,4	1,7	1,9	2,1	2,2	2,3	2,5	2,6	2,7	2,8	3,1	3,4
48	1,4	2,0	2,4	2,6	2,8	2,9	3,0	3,2	3,3	3,4	3,4	3,7	4,1
54	2,0	2,6	2,8	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,8	3,9	3,9	4,4	4,8
60	2,6	3,2	3,6	3,8	3,9	4,0	4,1	4,2	4,3	4,5	4,6	4,9	5,2
66	3,2	3,7	4,1	4,4	5,4	4,7	4,8	4,9	5,0	5,2	5,1	5,6	5,9
72	3,8	4,4	4,6	4,8	4,0	5,1	5,3	5,4	5,6	5,7	5,8	6,1	6,4

Пространственные размеры метеорообъектов на индикаторе судовой РЛС и значение радиолокационной отражаемости позволяют по виду засветки определить не только тип выпадающих осадков, но и опасные явления, сопровождающие их. Значения Z , выраженные в логарифмических единицах $\lg Z$ и измеренные через определенные интервалы времени, дают представление о тенденции развития облаков, интенсивности выпадающих осадков и

связанных с ними опасных явлений погоды. Оценка мгновенной максимальной интенсивности жидких осадков по значению радиолокационной отражаемости представлена в табл. 1.9, а для мгновенной максимальной интенсивности снегопада в табл.1.10.

Таблица 1.9

Мгновенная максимальная интенсивность жидких осадков

Значения $\lg Z$	Количественная оценка интенсивности радиоэхо	Теоретическая мгновенная максимальная интенсивность осадков, <i>мм/ч</i>
0,0 - 1,1	слабая	0,5 – 2,9
1,2 – 2,7	умеренная	3,0 – 25,0
2,8 – 3,9	сильная	25,1 – 140
> 3,9	очень сильная	> 140

Таблица 1.10

Мгновенная максимальная интенсивность снегопада

Значения $\lg Z$	Количественная оценка интенсивности радиоэхо	Теоретическая мгновенная максимальная интенсивность осадков, <i>мм/ч</i>
- 1,5 - (-0,4)	слабая	0,02 – 0,1
- 0,3 – 1,2	умеренная	0,11 – 1,0
$\geq 1,3$	сильная	> 1,0

Интенсивное развитие судостроения предусматривает повышение безопасности судов, груза и команды и в техническом плане сопровождается разработкой и внедрением новых радиолокационных методов и судовых радиолокаторов, которые повышают наблюдаемость объектов в сложных погодных условиях. При этом судовая РЛС, обладающая свойством

многоканальности, осуществляет процедуру пространственно-временной фильтрации естественных помех, производит обнаружение и распознавание объектов, измеряет их кинематические характеристики с высокой динамикой изменения их показателей. Информационные связи и взаимодействие всех систем судовой РЛС обеспечивают устойчивое выполнение навигационных задач, а обработка и представление радиолокационной информации осуществляется вычислительной техникой, что повышает оперативность принятия решений.

Синтаксический подход к получению радиолокационной информации об объектах наблюдения направлен на использование некоординатной информации, включающей характеристики пространственно-временной и поляризационной структуры радиолокационных сигналов.

Семантический подход позволяет учитывать смысловое содержание радиолокационной информации об объекте наблюдения, а прагматический – оценку ее полезности. Поляризация судовой РЛС рассматривается как важнейший источник информации об объекте, поэтому учет поляризационных свойств эхо-сигналов объектов существенно повышает информативность судовой РЛС как транспортного радиолокационного комплекса.

Выводы к разделу 1

Совершенствование судовых РЛС неразрывно связано с определением их оптимальных характеристик при работе в сложных ситуационных условиях атмосферной среды, правильного выбора различных схемных решений, уменьшающих влияние естественных помех, целиком обуславливается радиофизическими и радиолокационными свойствами атмосферы, как среды, в которой функционирует РЛС.

Процесс взаимодействия электромагнитной волны, излучаемой антенной РЛС, со средой определяется значением ее относительной диэлектрической проницаемости, зависящей от метеопараметров.

Распространение электромагнитных волн в атмосфере, параметры которой отличаются от свободного пространства, сопровождается ослаблением энергии волны и изменением ее скорости.

До настоящего времени в судовых РЛС окончательно не решена проблема уменьшения воздействия гидрометеорологических помех на радиолокационное наблюдение объектов на пути судна. На дальность действия судовых РЛС оказывают влияние радиофизические и радиолокационные характеристики атмосферы, атмосферные образования и их пространственно-временные изменения. Опасность для судовождения представляют и опасные явления погоды, возникающие на пути судна, радиолокационная оценка которых определяется по их радиолокационным параметрам.

Оценка радиолокационной видимости объектов при различных радиофизических и радиолокационных характеристиках атмосферы предусматривает в судовой РЛС использование таких параметров радиолокационного сигнала, которые бы не зависели от дальности до объекта, его маскировки естественными помехами и воздействия волнения моря на работу РЛС.

Результаты информационного поиска по оценке радиофизических и радиолокационных параметров атмосферы позволяют использовать радиолокационную отражаемость и диэлектрическую проницаемость атмосферы для радиолокационного обнаружения опасных явлений погоды на пути судна, связанных с кучево-дождевыми облаками, измерения их характеристик и координат судовой РЛС.

При наличии опасных гидрометеорологических явлений на безопасность судовождения влияют рельеф береговой зоны, острова, загрязнение атмосферы на пути судна продуктами извержений вулканов и пыльных бурь. Использование параметров поляризационных различий эллиптически поляризованных волн, одновременно отраженных от двух природных сред, имеющих различие в радиофизических характеристиках, позволяет осуществить их радиолокационное обнаружение и распознавание в сложных

погодных условиях. В соответствии с этим необходимым условием является совершенствование радиолокационных методов и средств радиолокационного наблюдения, что представляет не только транспортный, но и научный интерес, при этом проведенный анализ влияния параметров воздушной среды на радиолокационное наблюдение объектов судовыми РЛС определяет следующие проблемные вопросы:

1. Установление параметров среды, влияющих на радиолокационное наблюдение объектов.
2. Установление влияния естественного фона на работу РЛС.
3. Оценка ситуационного состояния среды методами и техническими средствами.
4. Разработка радиолокационного метода обнаружения и распознавания объектов в условиях естественных помех.

Содержание материала раздела представлено в публикациях автора [19,20].

РАЗДЕЛ 2

ВЫБОР ТЕМЫ, ЦЕЛИ, ЗАДАЧ И МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Состояние среды, в которой находится судно по пути своего следования, не зависит от оснащения его современными и техническими средствами. Развитие физических процессов в среде происходит по законам, которые не влияют на развитие науки судоходства, уровня подготовки морских кадров и совершенствования навигационных систем. Ситуационное состояние среды влияет на безопасность судоходства, особенно при быстрых временных изменениях условий погоды. Повышение безопасности судоходства неразрывно связано с методами и техническими судовыми средствами получения информации о состоянии среды на пути судна в реальном времени. При информационном поиске эффективных методов и их реализации в целях безопасности судоходства возникает определенное количество неочевидных факторов действительности, требующих своего последовательного подхода в научном или практическом решении, а научный процесс ранжировки такой последовательности называют выбором.

При выборе темы диссертационного исследования используется метод экспертных оценок, который предусматривает проверку каждого неочевидного факта действительности, выявленного в процессе информационного поиска по таким характерным признакам, как актуальность, предполагаемая научная новизна, важность, соответствие исследования научному направлению специальности 05.22.13, а также реализуемости теоретических положений и практических результатов работы по направлениям исследований.

Судовая РЛС является эффективным средством обеспечения безопасности судоходства. Безопасность судоходства должна обеспечиваться радиолокационным обнаружением объектов и измерением их текущих координат при любом состоянии окружающей среды. Окружающая среда воздействует на работу судовой РЛС, изменяя параметры отраженного от

объекта сигнала, что в конечном итоге снижает эффективность ее функционирования как навигационной системы.

Исследования ситуационного состояния среды позволяет разработать радиофизические методы, повышающие надежность радиолокационной информации об объекте. Среда, в которой распространяется электромагнитная энергия, излучаемая антенной судовой РЛС и отраженная от объектов, характеризуется своими электрофизическими параметрами, влияющими на взаимодействие электромагнитной волны с объектом. Все эти аспекты взаимодействия судовой РЛС и объекта наблюдения через среду требуют системного подхода и использования метода дедукции (от «общего» к «личному» через «частное»). При осуществлении информационного поиска по результатам исследования и решения этой важной научной задачи обеспечения безопасности судоходства в сложных погодных условиях существующие теоретические и экспериментальные исследования по данной проблеме позволяют быстро и эффективно достичь поставленной цели, решая главную и четыре вспомогательных задачи научного и прикладного характера.

Совершенствование условий радиолокационного наблюдения объектов связано с проблемой судоходства в сложных метеорологических условиях, при которых существенное влияние на работу судовой РЛС оказывают выпадающие осадки в виде дождя и снега. Это влияние приводит к ухудшению радиолокационного обнаружения объектов.

Актуальной проблемой остается повышение эффективности работы судовой РЛС за счет уменьшения влияния гидрометеоров на радиолокационное наблюдение объектов, несмотря на то, что к настоящему времени судовая радиолокация уже накопила ценный опыт в разработке методов, улучшающих радиолокационное наблюдение объектов на фоне отражений от гидрометеоров [1, 2, 6] и др.

2.1. Изучение задач функционирования судовой РЛС в сложных ситуационных условиях среды

Основная задача судовой РЛС сводится к обнаружению объектов и их наблюдению при любых условиях окружающей среды на оптимальных дальностях, обеспечивающих безопасность судна. Дальность обнаружения объектов судовой РЛС в конкретных условиях среды связана с требуемой различимостью эхо-сигналов объекта на фоне внутренних и естественных помех. Осуществлять функционирование РЛС при наличии помех и шумов возможно только при использовании сведений о связи параметров объекта с радиолокационными сигналами. Мешающее воздействие естественных помех проявляется в подавлении эхо-сигналов объекта радиолокационного наблюдения и его маскировке. В случае большой интенсивности выпадающих осадков, их эхо-сигналы могут значительно превышать уровень собственных шумов приемника РЛС, и обнаружить эхо-сигнал объекта на индикаторах становится затруднительным, а иногда и невозможным. Причем помеха от гидрометеоров обладает той особенностью, что она создается за счет энергии зондирующего сигнала и для точечного объекта сохраняет его форму. Поэтому повышение энергетического потенциала судовой РЛС не является главным методом борьбы с помехами от гидрометеоров.

В судовых РЛС при ее защите от естественных пассивных помех используются методы, которые можно условно разделить на три группы: прямые методы, при которых параметры РЛС выбираются из условия улучшения соотношения между полезным и мешающим сигналом; специальные регулировки в приемном тракте, позволяющие повысить его динамический диапазон и уменьшить вероятность перегрузок; методы селекции, основанные на использовании дополнительной априорной информации об объектах и источниках помех в процессе первичной обработки эхо-сигналов [1,6].

Прямые методы заключаются в улучшении пространственной избирательности РЛС и повышении эффективности накопления сигналов. Наиболее кардинальный путь повышения наблюдаемости объекта заключается в снижении средней мощности помехи за счет уменьшения разрешающего элемента, т.е. за счет повышения направленности антенны и увеличении ширины спектра сигнала. Вторая группа методов борьбы с пассивными помехами основана на устранении перегрузок в приемном тракте РЛС путем создания быстродействующей автоматической регулировки усиления в последних каскадах УПЧ, а также применением логарифмических усилителей. Комбинации схем регулировки усиления приемника могут рассматриваться лишь как вспомогательные средства борьбы с пассивными помехами. В тоже время прямые методы универсальны, но трудно реализуемы по тактическим и конструктивным соображениям. Поэтому наиболее эффективными для борьбы с помехами от гидрометеорного фона практически оказываются методы селекции. Наибольшее применение получили два вида селекции эхо-сигналов объектов на фоне помех: селекцию движущихся целей и поляризационную селекцию. В основе селекции движущихся объектов на фоне помех использовано различие скоростей движения объекта и гидрометеоров. Вследствие этого доплеровское смещение частоты эхо-сигнала объекта существенно больше доплеровского смещения средней частоты спектра флуктуаций помехи. При этом спектры эхо-сигнала объекта и помехи оказываются смещенными друг относительно друга, что позволяет выделить эхо-сигналы малоразмерных объектов на фоне мощных отражений. Чем больше разность средних частот спектров сигнала и помехи, и уже спектр флуктуаций последней, тем более эффективна система селекции движущихся объектов. Наиболее просто эта система реализуется в РЛС непрерывного излучения, однако здесь существует проблема измерения расстояния до объекта.

В импульсных когерентных РЛС для выделения эхо-сигналов движущихся объектов используется метод биений, позволяющий фиксировать изменение фазы высокочастотного заполнения импульсов от периода к периоду

повторения. При этом эхо-сигналы от движущегося объекта сравниваются с опорным напряжением. Однако, вследствие наличия слепых скоростей объекта нарушается линейная зависимость из-за стробоскопического эффекта между частотой Доплера и частотой биений, выделяемой в процессе сравнения эхо-сигнала и опорных колебаний. При движении объекта со слепой скоростью, доплеровский набег фазы сигнала за период повторения кратен 360° , амплитудная модуляция с частотой Доплера последовательности видеоимпульсов на выходе детектора отсутствует, и движущийся объект наблюдается РЛС на фоне пассивной помехи как неподвижный и вероятность его обнаружения мала. Поэтому импульсные радиолокационные системы, использующие для наблюдения объектов на фоне эхо-сигналов от гидрометеоров метод селекции движущихся объектов, обладают существенным недостатком. Для улучшения наблюдаемости объектов на фоне естественных помех необходимо или изменять рабочую длину волны, или период повторения импульсов.

Поляризационная селекция эхо-сигналов объектов на фоне эхо-сигналов гидрометеоров основана на поляризационных свойствах объектов и гидрометеорного фона. Имеющиеся методы поляризационной селекции в качестве признаков селектирования объектов используют их собственную и нулевую поляризации. Если поляризационные характеристики объекта известны, то поляризация облучающей волны выбирается из условия получения максимального эхо-сигнала объекта. Селекция эхо-сигналов объектов на фоне отражений от гидрометеоров осуществляется с помощью антенны круговой поляризации.

Нулевой поляризацией сферической капли (осадки слабой интенсивности) является круговая поляризация. Если сосредоточенный объект уподобить вибратору, а распределенный (осадки) – плоской пластине, то поляризация антенны РЛС для селекции полезного сигнала и подавления фона должна быть круговой. Эффект подавления гидрометеорного фона с использованием круговой поляризации вызван не фактом применения волн с

круговой поляризацией, а зависит от взаимных свойств антенны круговой поляризации и поляризационных свойств гидрометеоров. Однако для гидрометеоров вместо поляризации нулевого сигнала будет наблюдаться поляризация минимального сигнала вследствие хаотического движения частиц гидрометеоров и отличия формы от сферы. Ослабление будет наблюдаться только для антенны с взаимными поляризационными свойствами. Могут для поляризационной селекции эхо-сигналов объектов на фоне эхо-сигналов гидрометеоров применяться антенны не только круговой поляризации, но и линейной с взаимными поляризационными свойствами. При этом эффективность выделения эхо-сигналов объектов радиолокационного наблюдения судовыми РЛС на фоне отражений от гидрометеоров будет определяться тем, насколько отличаются между собой коэффициенты деполяризации гидрометеоров и наблюдаемых объектов [52-56]. В общем случае могут применяться антенны эллиптической поляризации с регулируемыми поляризационными характеристиками [57-60].

Величина ослабления эхо-сигналов от гидрометеоров в зависимости от поляризационных параметров отраженной волны от наблюдаемого объекта выражается формулой [54]:

$$n = \frac{1}{\sqrt{\frac{1+r}{1-r} \sin 2\beta}}, \quad (2.1)$$

где r и β - коэффициент эллиптичности и угол наклона эллипса поляризации волны соответственно;

n - степень подавления эхо-сигналов гидрометеоров.

Полученные в [54] коэффициенты подавления при использовании антенны с взаимной круговой поляризации и невзаимной линейной поляризации для различных типов гидрометеоров приведены в табл.2.1.

Таблица 2.1

Эффективность подавления эхо-сигналов для различных атмосферных образований

Тип антенны	Коэффициент подавления, дБ			
	снег	Кристаллические облака	Ливневой дождь	Обложной дождь
Взаимная круговая поляризация	4,0	1,8	16,5	19,5
Невзаимная линейная поляризация	-	1,0	14,0	19,0

Однако эффективность выделения эхо-сигналов объектов на фоне отражений от гидрометеоров будет определяться тем, насколько отличаются между собой коэффициенты деполяризации гидрометеоров и объектов.

Основываясь на анализе существующих методов селекции эхо-сигналов объектов на фоне мешающих эхо-сигналов метеообразований можно указать на то, что ни один из рассмотренных методов не позволяет с высокой эффективностью выделить эхо-сигнал объекта от эхо-сигнала метеообразований.

2.2. Особенности обеспечения эффективной радиолокационной поляризационной селекции эхо-сигналов объектов судовых РЛС

Известно, что основой процессов радиолокационного наблюдения объектов является рассеяние электромагнитной волны объектом, в процессе которого происходит взаимодействие электромагнитного поля с системой зарядов и возбуждаемых этим полем токов. Применительно к задачам радиолокационного наблюдения можно выделить две части электромагнитного поля - падающее $E_{\text{п}}(r, t)$, $B_{\text{п}}(r, t)$ и рассеянное $E_{\text{р}}(r, t)$, $B_{\text{р}}(r, t)$, где E - вектор напряженности электрического поля, B - вектор магнитной индукции,

t - время, r - радиус-вектор точки наблюдения поля. Источником рассеянного поля являются токи, возбуждаемые падающим электромагнитным полем в некотором конечном объеме пространства, где расположен объект радиолокационного наблюдения. В итоге можно записать полное поле

$$\begin{aligned} E(r, t) &= E_{\text{п}}(r, t) + E_{\text{р}}(r, t), \\ B(r, t) &= B_{\text{п}}(r, t) + B_{\text{р}}(r, t). \end{aligned} \quad (2.2)$$

Поляризаационное состояние анализируемой волны определяется совокупностью комплексных амплитуд $E_{\theta}(t)$ и $E_{\varphi}(t)$ линейно поляризованных компонент [55].

Падающее поле представляет собой часть полного поля, которое регистрировалось бы в пространстве при отсутствии объекта. Поэтому в процессе радиолокационного наблюдения возникает необходимость в выделении из наблюдаемого поля той его части, которая соответствует рассеянному полю, а для этого из наблюдаемого поля вычитается падающее поле, возбуждаемое в пространстве при отсутствии объекта. Рассеянное поле является реакцией на появление объекта в поле падающей волны и имеет своим источником токи и заряды поляризации в объеме объекта, наведенные полем падающей волны. Диаграмма рассеяния является характеристикой всего рассеянного поля и единственным образом представляет объект. Поляризаационное состояние анализируемой волны определяется совокупностью комплексных амплитуд линейно поляризованных компонент и в общем виде представляется параметрической формой уравнения эллипса с центром в начале координат:

$$\frac{E_1^2}{|E_{\theta}|^2 \sin^2 \varphi_3} - \frac{2 E_1 E_2 \cos \varphi_3}{|E_{\theta}| |E_{\varphi}| \sin^2 \varphi_3} + \frac{E_2^2}{|E_{\varphi}|^2 \sin^2 \varphi_3} = 1, \quad (2.3)$$

где E_1 и E_2 - координаты точек эллипса;

$|E_\theta|$ и $|E_\varphi|$ - максимальные проекции эллипса на орты θ° и φ° ;

φ_3 - разность фаз между комплексными амплитудами E_θ и E_φ .

Эллипс поляризации характеризуется тремя геометрическими параметрами: размером D_3 , ориентацией β_3 и эллиптичностью α_3 . Эллиптичность зависит от длин большой и малой осей и выражается следующей зависимостью:

$$\alpha_3 = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{b_3}{a_3} \right), \quad (2.4)$$

где a_3 - длина большой, а b_3 - малой полуоси эллипса.

Размер эллипса определяется из условия:

$$D_3 = \sqrt{a_3^2 + b_3^2}, \quad (2.5)$$

а угол φ_3 определяется через α_3 и β_3 следующим образом:

$$\operatorname{tg} \varphi_3 = \frac{\operatorname{tg} 2 \alpha_3}{\sin 2 \beta_3}. \quad (2.6)$$

Для отключения проекций электрического вектора на орты θ° и φ° вводится угол γ_3 , равный

$$\gamma_3 = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{|E_\varphi|}{|E_\theta|} \right). \quad (2.7)$$

Рассмотренные соотношения, связывающие параметры эллипса поляризации представляются в виде:

$$\cos 2 \gamma_3 = \cos 2 \alpha_3 \cos 2 \beta_3, \quad (2.8)$$

$$\operatorname{tg} 2 \beta_3 = \operatorname{tg} 2 \gamma_3 \cos \varphi_3, \quad (2.9)$$

$$\sin 2 \alpha_3 = \sin 2 \gamma_3 \sin \varphi_3, \quad (2.10)$$

$$\sin 2 \alpha_3 = 2 \frac{|E_\varphi| |E_\theta|}{D_3^2} \sin \frac{\varphi_3}{2}, \quad (2.11)$$

$$\operatorname{tg} 2 \beta_3 = \frac{2 |E_\varphi| |E_\theta| \cos \varphi_3}{|E_\theta|^2 - |E_\varphi|^2}, \quad (2.12)$$

$$a_3^2 + b_3^2 = |E_\varphi|^2 + |E_\theta|^2, \quad a_3 b_3 = |E_\varphi| |E_\theta| \sin \varphi_3. \quad (2.13)$$

При $\alpha_3 = \pm \frac{\pi}{4}$ эллипс вырождается в окружность, а при $\alpha_3 = 0$ - в прямую линию. Для линейной поляризации используется понятие вертикальной $\left(\beta = \frac{\pi}{2}\right)$, горизонтальной $(\beta = 0)$ и наклонной $(\alpha = 0, \beta \neq 0, \pi/2)$.

Горизонтальная поляризация определена ортом θ° , а вертикальная - φ° .

Для круговой поляризации положительные значения α_3 соответствуют вращению вектора электрического поля по часовой стрелке при наблюдении по направлению распространения волны (правая поляризация, отрицательные значения α_3 - левой поляризации). Информация о поляризационной структуре электромагнитной волны сосредоточена в векторе Джонса [54,55]:

$$E(K, t) = [E_\theta(K, t), E_\varphi(K, t)]^T \quad (2.14)$$

или в векторе Стокса

$$S_3(t) = [S_1(t), S_2(t), S_3(t), S_4(t)]^T, \quad (2.15)$$

где $S_1(t), S_2(t), S_3(t), S_4(t)$ - вещественные параметры Стокса.

Первый параметр Стокса $S_1(t)$ равен полной плотности энергии волны, второй параметр $S_2(t)$ равен разности энергий в горизонтально-вертикально поляризованных компонент, третий параметр Стокса $S_3(t)$ равен разности энергий линейно поляризованных компонент под углами $\beta_1 = 45^\circ$ и $\beta_2 = 135^\circ$, а $S_4(t)$ есть разность поляризованных по кругу (левому и правому) $\alpha = \pm 45^\circ$ компонент электромагнитной волны.

Практически все поляризационные методы отстройки от гидрометеорного фона при наблюдении объектов судовыми некогерентными РЛС основаны на различии поляризационных параметров объекта и гидрометеорного фона.

Для анализа рассеивающих свойств гидрометеорного фона и объектов могут применяться матрицы Джонса или матрицы Мюллера. Матрицу

Мюллера целесообразно применять при измерении характеристик гидрометеоров и объектов в следующих случаях:

- при радиолокационном наблюдении флуктуирующих метеообразований и при использовании в качестве зондирующих колебаний полностью поляризованных волн (ППВ);

- при радиолокационном наблюдении стабильных объектов и при излучении полностью поляризованных волн, облучающих объект.

С помощью указанных матриц можно проанализировать проблему поляризационной селекции путем выбора характеристик передающей и приемной антенны судового поляриметра с целью оптимизации отношения мощностей эхо-сигналов от различных объектов.

Напряжение на выходе приемной антенны радиолокационного судового поляриметра при падении на нее произвольного эхо-сигнала определяется из условия:

$$u_{\text{пр}} = e_{\text{пер}} S(t, r) E_{\text{пер}}(r). \quad (2.16)$$

Анализ эхо-сигнала от объекта и гидрометеорологического фона проводится по трем направлениям:

- поляризационное состояние передающей и приемной антенны совпадают, т.е.

$$h_{\text{пер}} = h_{\text{пр}} \quad \text{или} \quad l_{\text{пер}} = l_{\text{пр}},$$

где h - эффективная действующая высота антенны, или l - вектор Джонса орта, оценивающего поляризационное состояние антенны. Мощность принятого сигнала:

$$P_{\text{пр}} = S_{\text{пер}}^T M_c(t) S_{\text{пер}}^T, \quad (2.17)$$

где $M_c(t)$ - матрица Мюллера согласованного канала;

- поляризационное состояние передающей и приемной антенны не совпадают, тогда в ортогональном по поляризационным характеристикам

канале поляриметра состояние эффективной действующей высоты приемной антенны должно быть ортогонально поляризационному состоянию передающей антенны, т.е.

$$h_{\text{пр}} = h_{\perp \text{ пр}} \quad \text{или} \quad l_{\text{пр}} = l_{\perp \text{ пр}} .$$

Соотношение для мощности в ортогональном канале имеет вид

$$P_{\text{пр} \perp} = S_{\text{пер}}^T M_{\perp}(t) S_{\text{пер}} . \quad (2.18)$$

- согласование характеристик приемной антенны поляриметра непосредственно под эхо-сигнал, т.е.

$$l_{\text{пр}} = l_{\text{пер}} .$$

Соотношение для мощности в приемном канале записывается следующим образом:

$$P_{\text{пр}} = S_{\text{пер}}^T M_{\text{пр}}(t) S_{\text{пер}} , \quad (2.19)$$

где $M_{\text{пр}}(t)$ - матрица Мюллера полного поляризованного приема, для которой можно записать следующее соотношение:

$$M_{\text{пр}}(t) = M_{\parallel}(t) + M_{\perp}(t) . \quad (2.20)$$

Для реализации (2.20) радиолокационный поляриметр должен иметь две ортогональные антенны.

Чтобы гарантировать полный поляризационный прием, необходимо приемную антенну выбирать с действующей высотой, которая соответствует условию [61-63]:

$$h_{\text{пр}} = \frac{E_{\text{пр}}^*(\lambda)}{(E_{\text{пр}}(\lambda), E_{\text{пр}}(\lambda))^{1/2}} , \quad (2.21)$$

где λ - собственное значение матрицы рассеяния объекта, которое в собственном поляризационном базисе обозначается:

$$\lambda_1 = S_{11}(b_c), \quad \lambda_2 = S_{22}(b_c), \quad (2.22)$$

где b_c - собственный поляризационный базис, определяющий две ортогональные поляризации, соответствующие поляризационным параметрам приемо-передающей антенны судового радиолокационного поляриметра с отсутствием ортогональной компоненты принятого эхо-сигнала. В собственном базисе матрица рассеяния $S(b_c)$ является диагональной и действительной с элементами $\lambda_1(b_c)$ и $\lambda_2(b_c)$. Поэтому рассеивающие свойства объекта характеризуются тремя параметрами $|\lambda_1|$, $|\lambda_2|$ и $\varphi = \arcsin \lambda_2 - \arcsin \lambda_1$, которые вместе с базисом являются инвариантными характеристиками цели. Инвариантом также является и коэффициент анизотропии рассеивателя μ , который связан с собственными значениями соотношением [55]:

$$\mu = \frac{|\lambda_1| - |\lambda_2|}{|\lambda_1| + |\lambda_2|}. \quad (2.23)$$

Кроме указанных инвариантов, имеются еще два инварианта: полная ЭПР и модуль определителя $|\det S|$

$$\sigma_{\Sigma} = |S_{11}| + |S_{22}| + 2|S_{12}|^2 = |\lambda_1|^2 + |\lambda_2|^2, \quad (2.24)$$

$$|\det S| = |S_{11} S_{22} - S_{12}|^2 = |\lambda_1 \lambda_2|, \quad (2.25)$$

где $\lambda_1(b_c) \geq \lambda_2(b_c)$.

Приведенные формулы позволяют сделать вывод о том, что по измеренным модулям элементов матрицы рассеяния с помощью судового некогерентного поляриметра можно определить ее собственные значения.

Кроме собственных поляризаций инвариантами матрицы рассеяния являются и нулевые поляризации, соответствующие отсутствию сигнала на выходе поляриметра.

Отметим, что для произвольного рассеивателя поляризации нулевого сигнала не являются ортогональными, кроме поляризационно-изотропных отражателей, у которых $|\lambda_1| = |\lambda_2|$ и $\mu = 0$.

Шупяцкий А.Б. [51] предложил формулу для определения матрицы рассеяния метеообразований, для которых собственный базис является также и линейным:

$$S(bc) = \lambda_2 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + (\lambda_1 - \lambda_2) \begin{bmatrix} \cos^2 \beta & \cos \beta \cos \beta \\ \sin \beta \cos \beta & \sin^2 \beta \end{bmatrix}. \quad (2.26)$$

Из (2.26) следует, что метеообъекты, являющиеся рассеивателями с собственным линейным базисом, могут быть представлены совокупностью поляризационно-изотропного с $\mu = 0$ (сферические капли) и поляризационно-вырожденного с $\mu = 1$ (частицы облаков, и осадков).

Матрица рассеяния (2.26) может быть использована при радиолокационном обнаружении метеообъектов на пути судна одноканальным или двухканальным поляриметром.

Анализ радиолокационных методов позволяет использовать способ изучения радиолокационной системы «от части к целому», от исследования устройств, реализующих эти методы, к функциям самой радиолокационной системы. Использование сведений о связи параметров объекта с радиолокационными сигналами позволяет осуществлять функционирование РЛС в условиях помех.

Задача обнаружения и наблюдения объектов судовыми РЛС на фоне метеообразований должна рассматриваться одновременно с получением необходимой информации о самих метеообъектах, влияющих на безопасность

судовождения. Поэтому накопленный тезаурус позволяет эффективно использовать накопленную информацию как при учете факторов окружающей среды, влияющих на радиолокационное обнаружение объектов, так и для радиолокационного исследования самой среды, в которой получают информацию об объекте судовые РЛС [64,65].

Если судно находится внутри зоны выпадающих осадков, то радиолокационное наблюдение за ним будет затруднено, вплоть до потери эхосигнала от судна. Таким образом, осадки являются объемно-распределенной целью, являющейся с одной стороны помехой, маскирующей эхосигнал от наблюдаемого судовой РЛС объекта, а с другой стороны осадки характеризуют среду, опасную для судовождения. Для судового двухканального поляриметра условия радиолокационного наблюдения эхосигнала от объекта можно характеризовать отношением суммарной мощности от объекта в ортогональных приемных каналах поляриметра и суммарной мощности от выпадающего дождя (для эллиптической и сферической формы капель соответственно):

$$\frac{P_{\text{пр}\parallel\text{об}} + P_{\text{пр}\perp\text{об}}}{P_{\text{пр}\parallel\text{д}} + P_{\text{пр}\perp\text{д}}} = \frac{P_{\Sigma\text{об}}}{P_{\Sigma\text{д}}} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\left(\frac{\sigma_{\text{об}}}{\sigma_{\text{д}}}\right) D}{n_0 R^2 \frac{c \tau_{\text{и}}}{2}}. \quad (2.27)$$

где $\sigma_{\text{об}}$ - ЭПР объекта;

$\sigma_{\text{д}}$ - ЭПР дождя;

n_0 - плотность частиц дождя в радиолокационном объеме;

D - коэффициент направленного действия антенны поляриметра;

R - расстояние до объекта;

$\tau_{\text{и}}$ - длительность излучаемого импульса;

c - скорость света.

Из (2.27) видно, что эффективность наблюдения объекта на фоне выпадающего дождя повышается с уменьшением длительности импульса и сужения диаграммы направленности антенны.

Оценивая эффективность рассмотренных методов поляризационной селекции радиолокационных сигналов наблюдаемых объектов на фоне естественных помех, можно указать на то, что они не являются оптимальными для решения задачи радиолокационной наблюдаемости объектов на фоне отражений от гидрометеоров. Однако, используя научный метод дедукции, рассмотренные методы можно принять в качестве базовых.

2.3. Особенности решения задач поляризационной селекции объектов на фоне отражений от гидрометеоров по параметрам поляризационных различий эллиптически поляризованных волн

Известно, что одной из важнейших характеристик электромагнитной волны является ее поляризация. В настоящее время имеется достаточное количество научных публикаций, посвященных использованию поляризации, как информативного параметра электромагнитной волны в задачах радиолокационного обнаружения, различения и классификации эхо-сигналов на фоне помех [52-65].

При решении задачи обнаружения объектов на фоне гидрометеорного фона, поляризация принимаемой волны зависит от отражающих свойств объекта и фона, и может не совпадать с поляризацией приемной антенны судового поляриметра. Поляризация гидрометеорного фона тоже не совпадает с поляризацией эхо-сигнала от объекта. Для двухканального поляриметра эхо-сигнал от объекта в произвольном фиксированном поляризационном базисе характеризуется по аналогии с матрицей [55]:

$$\begin{bmatrix} S_{11o}(t) & S_{12o}(t) \\ S_{21o}(t) & S_{22o}(t) \end{bmatrix}, \quad (2.28)$$

элементы которой \dot{S}_{ij} ($i, j = 1, 2$) являются детерминированными функциями времени. В тоже время поляризационная матрица помехи записывается в виде:

$$\begin{bmatrix} \dot{S}_{11\text{п}}(t) & \dot{S}_{12\text{п}}(t) \\ \dot{S}_{21\text{п}}(t) & \dot{S}_{22\text{п}}(t) \end{bmatrix}. \quad (2.29)$$

Суммарный эхо-сигнал на входе антенны судового поляриметра также характеризуется матрицей

$$\begin{bmatrix} \dot{u}_{\Sigma 11}(t) & \dot{u}_{\Sigma 12}(t) \\ \dot{u}_{\Sigma 21}(t) & \dot{u}_{\Sigma 22}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{S}_{11\text{о}}(t) + \dot{S}_{11\text{п}}(t) & \dot{S}_{12\text{о}}(t) + \dot{S}_{12\text{п}}(t) \\ \dot{S}_{21\text{о}}(t) + \dot{S}_{21\text{п}}(t) & \dot{S}_{22\text{о}}(t) + \dot{S}_{22\text{п}}(t) \end{bmatrix}. \quad (2.30)$$

Однако для реализации поляризационной селекции эхо-сигнала на фоне эхо-сигнала от гидрометеообразований судовой поляриметр должен иметь две ортогональные передающие и две ортогональные приемные антенны, на входы которых в дискретные моменты времени в соответствии с (2.30) поступают два частично поляризованных сигнала:

$$\left. \begin{array}{l} \dot{u}_1 = \dot{u}_1(t_\kappa) \\ \dot{u}_2 = \dot{u}_2(t_\kappa) \end{array} \right\}, \quad (2.31)$$

каждый из которых поляризационным разделителем разделяется на две ортогональные поляризованные компоненты:

$$\left. \begin{array}{l} \dot{u}_1 = \dot{u}_{11} + \dot{u}_{12} \\ \dot{u}_2 = \dot{u}_{21} + \dot{u}_{22} \end{array} \right\}. \quad (2.32)$$

Действительные части которых соответственно равны:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Re} [\dot{u}_{11}] = u_{11} = S_{11\text{о}} + S_{11\text{п}} \\ \text{Re} [\dot{u}_{12}] = u_{12} = S_{12\text{о}} + S_{12\text{п}} \\ \text{Re} [\dot{u}_{21}] = u_{21} = S_{21\text{о}} + S_{21\text{п}} \\ \text{Re} [\dot{u}_{22}] = u_{22} = S_{22\text{о}} + S_{22\text{п}} \end{array} \right\}. \quad (2.33)$$

Сложность решения задачи заключается в том, что необходимо рассматривать не одну случайную функцию, а одновременно четыре, для которых необходимы четыре оптимальных приемных каналов с 16 суммирующими устройствами. Оптимальной процедурой обработки такого сложного частично поляризованного сигнала является алгоритм, формирующий отношение правдоподобия. Практическая реализация рассмотренного алгоритма поляризационной селекции обладает существенными трудностями.

Рассмотрим поляризационные параметры различий эллиптически поляризованных волн, одновременно отраженных от наблюдаемого объекта и гидрометеорной среды.

Решение этой задачи имеет исключительно важное значение для обнаружения объекта на фоне выпадающих дождей судовыми радиолокационными поляриметрами по наибольшему поляризационному различию эхо-сигналов объекта и гидрометеорного фона. В качестве количественной характеристики поляризационной селекции эхо-сигналов будем использовать характеристики сравнения следующих параметров [52]:

- коэффициент поляризационных различий эхо-сигналов от объекта и дождя ($\Delta K_{п.р}$);
- коэффициент деформации эллипса поляризации ($\Delta K_{д.э}$);
- разность углов ориентации эллипсов поляризации ($\Delta \beta$).

Коэффициент поляризационных различий эхо-сигналов от объекта и дождя представим в виде:

$$\Delta K_{п.р} = 10 \lg \frac{K_{д.о}}{K_{д.д}}, \quad (2.34)$$

где $K_{д.о}$ и $K_{д.д}$ - коэффициенты деполаризации вещественных сред объекта и дождя, эхо-сигналы, от которых необходимо разделить.

Оценку различий в коэффициентах эллиптичности эхо-сигналов от объекта и дождя проведем с помощью коэффициента деформации эллипса поляризации $\Delta K_{\text{деф}}$

$$\Delta K_{\text{деф}} = 10 \lg \frac{K_{\text{э.о}}}{K_{\text{э.д}}}, \quad (2.35)$$

где $K_{\text{э.о}}$ и $K_{\text{э.д}}$ - коэффициенты эллиптичности эхо-сигналов от объекта и дождя соответственно.

Рассогласование в пространственной ориентации эллипсов поляризации эхо-сигналов объекта и выпадающего дождя представим в виде разности углов их пространственной ориентации, т.е.

$$\Delta \beta = \beta_{\text{о}} - \beta_{\text{д}}. \quad (2.36)$$

Явление изменения поляризации поля волны при ее распространении или отражении называется деполаризацией, а среда, вызывающую эти изменения, - деполаризующей. Характер и степень деполаризации зависит от электрических параметров среды ε_{Σ} , угла облучения θ и длины волны λ . Будем считать ε_{Σ} независимой от времени, а облучение и прием производится на одну антенну.

Коэффициенты деполаризации отраженной волны можно определить из условия:

$$K_{\text{д}} = 0,5 \left[1 \pm \frac{4 K_{\text{э.п}} K_{\text{э.о}}}{(1 + K_{\text{э.п}}^2)(1 + K_{\text{э.о}}^2)} + \frac{(1 - K_{\text{э.п}}^2)(1 - K_{\text{э.о}}^2)}{(1 + K_{\text{э.п}}^2)(1 + K_{\text{э.о}}^2)} \cos 2 \Phi \right], \quad (2.37)$$

где $K_{\text{э.п}}$ - коэффициент эллиптичности падающей электромагнитной волны;

$K_{\text{э.п}}$ - коэффициент эллиптичности отраженной волны;

Φ - угол между осями эллипсов поляризации падающей и отраженной волн.

Коэффициент эллиптичности отраженной волны определяется по формуле:

$$K_{\text{э.о}} = \sqrt{\frac{\text{tg}^2 \vartheta_{\text{о}} - 2 P \text{tg} \vartheta_{\text{о}} + P^2}{P^2 \text{tg}^2 \vartheta_{\text{о}} + 2 P \text{tg} \vartheta_{\text{о}} \cos \delta_n + 1}}, \quad (2.38)$$

где ϑ_0 - угол ориентации эллипса поляризации отраженной волны, определяемый по формуле:

$$\vartheta_0 = 0,5 \operatorname{arctg} \frac{2P \cos \delta_{\Pi}}{1 - P^2}, \quad (2.39)$$

где δ_{Π} - сдвиг фаз между ортогональными компонентами падающего поля, а

$$P = \frac{F_{\perp}}{F_{\parallel}}.$$

Здесь F_{\perp} и F_{\parallel} - коэффициенты отражения, определяемые по формулам:

$$\left. \begin{aligned} F_{\perp} &= \frac{\varepsilon_{\Sigma} \sin \theta - \sqrt{\varepsilon_{\Sigma} - \cos^2 \theta}}{\varepsilon_{\Sigma} \sin \theta + \sqrt{\varepsilon_{\Sigma} - \cos^2 \theta}} \\ F_{\parallel} &= \frac{\sin \theta - \sqrt{\varepsilon_{\Sigma} - \cos^2 \theta}}{\sin \theta + \sqrt{\varepsilon_{\Sigma} - \cos^2 \theta}} \end{aligned} \right\}, \quad (2.40)$$

где θ - угол облучения.

Коэффициент эллиптичности падающего поля определяется по формуле:

$$K_{эн} = \sqrt{\frac{1 - \cos \delta_{\Pi}}{1 + \cos \delta_{\Pi}}}. \quad (2.41)$$

Угол рассогласования осей эллипсов поляризации определяется по формуле:

$$\Phi = \vartheta_{\Pi} - \vartheta_0, \quad (2.42)$$

где ϑ_{Π} - угол ориентации эллипса поляризации падающей волны.

Для расчета коэффициента деполаризации отраженной волны будем использовать параметры Стокса, которые связаны с ортогональными

составляющими отраженной волны и разностью фаз между ними в круговом базисе следующей зависимостью:

$$\left. \begin{aligned} I &= E_{\text{л}}^2 + E_{\text{пр}}^2 \\ Q &= 2 E_{\text{л}} E_{\text{пр}} \sin \Phi \\ U &= 2 E_{\text{л}} E_{\text{пр}} \cos \Phi \\ V &= E_{\text{л}}^2 - E_{\text{пр}}^2 \end{aligned} \right\}. \quad (2.43)$$

Тогда коэффициент эллиптичности $K_{\text{э.о}}$ отраженной волны определим из условия:

$$K_{\text{э.о}} = 0,5 \operatorname{arc} \sin \frac{V}{I} = 0,5 \operatorname{arc} \sin \frac{E_{\text{л}}^2 - E_{\text{пр}}^2}{E_{\text{л}}^2 + E_{\text{пр}}^2}, \quad (2.44)$$

а значение амплитуд ортогонально поляризованных компонент найдем по формуле:

$$\begin{aligned} E_{\text{л}} &= \sqrt{\frac{I+Q}{2}}, \\ E_{\text{пр}} &= \sqrt{\frac{I-Q}{2}}. \end{aligned} \quad (2.45)$$

Угол ориентации эллипса поляризации отраженной волны также определим через параметры Стокса:

$$\vartheta_0 = 0,5 \operatorname{arctg} \frac{U}{Q}. \quad (2.46)$$

Преимущество использования параметров Стокса для количественной характеристики поляризационной селекции сигналов заключается в простоте их измерения радиолокационным поляриметром без измерения абсолютных фаз ортогональных составляющих, а измерения разности фаз между ними:

$$\Phi = \operatorname{arctg} \frac{V}{U}. \quad (2.47)$$

На основании полученных зависимостей (2.43 - 2.47) в диссертации получены значения поляризационных различий эллиптически поляризованных волн, одновременно отраженных от объекта и выпадающего дождя, имеющих определенные величины диэлектрических проницаемостей, которые позволяют провести радиолокационное обнаружение объекта на фоне выпадающих осадков жидкой и твердой фазы.

Рассмотрим поляризационно-компенсационный метод подавления гидрометеорного фона. Для успешного выделения полезного сигнала объекта на фоне мешающего эхо-сигнала от гидрометеоров, необходимо, чтобы на выходе антенны отношение сигнал/фон было выше заданного порога. Эхо-сигнал от гидрометеоров по мощности часто существенно превышает эхо-сигнал от объекта. Поляризационно-компенсационный метод подавления гидрометеорного фона (помехи) основан на поляризационных различиях между эхо-сигналами от объекта и помехи. Считаем, что поляризация антенны радиолокационного поляриметра совпадает с поляризацией эхо-сигнала объекта. Пусть на вход антенны поступает частично поляризованная помеха. В приемном канале поляриметра будет регистрироваться мощность P , определяемая равенством [63]:

$$P' = P_c + P_{ш} + P_{п} \cos^2 \gamma, \quad (2.48)$$

где P_c - мощность эхо-сигнала объекта;

$P_{ш}$ - мощность собственных шумов приемника;

$P_{п}$ - мощность эхо-сигнала помехи;

γ - угол поляризационного отношения

$$\gamma = \operatorname{arctg} \frac{E_y}{E_x}. \quad (2.49)$$

На выходе антенны напряжение E_c , $E_{ш}$ и $E_{п}$ статистически независимы. В отсутствии помехи, выделение полезного сигнала от объекта происходит только на фоне собственных шумов приемника, а решение о его

наличии принимается при превышении отношения сигнал/шум некоторого порога R_0 , т.е.

$$\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} = R_1 \geq R_0. \quad (2.50)$$

При присутствии помехи решение о наличии полезного сигнала принимается при выполнении неравенства:

$$\frac{P_c}{P_{\text{ш}} + P_{\text{п}} \cos^2 \gamma} = \frac{R}{1 + M \cos^2 \gamma} = R_2 \geq R_0, \quad (2.51)$$

где $R = \frac{P_c}{P_{\text{ш}}}$; $M = \frac{P_{\text{п}}}{P_{\text{ш}}}$.

При превышении мощности помехи над мощностью сигнала, неравенство (2.51) не выполняется, т.е. $R_2 < R_0$.

Увеличить R_2 при $P_{\text{ш}} = \text{const}$ можно только уменьшением знаменателя в (2.51), т.е. $1 + M \cos^2 \gamma$. Полная мощность всех сигналов на выходе ортогональной антенны не согласованной с поляризацией полезного сигнала будет

$$P_{\text{орт}} = P_{\text{п}} \sin^2 \gamma + P_{\text{ш}}. \quad (2.52)$$

Тогда идея поляризационной компенсации состоит в подаче в противофазе эхо-сигнала из ортогонального канала в согласованный и изменяя его коэффициент усиления K равный $K = \text{ctg } \alpha \left(0 < \alpha < \frac{\pi}{2} \right)$, добиться уменьшения мощности помехи в основном канале. Процесс противофазного сложения в первом канале запишем в виде:

$$\Delta P = P - P_{\text{орт}} = P_c + \frac{P_{\text{п}} \sin^2(\alpha - \gamma) + P_{\text{ш}}}{\sin^2 \alpha} = P_c + B, \quad (2.53)$$

где $B = \frac{P_{\text{п}} \sin^2(\alpha - \gamma) + P_{\text{ш}}}{\sin^2 \alpha}$.

Поляризационная компенсация с одной стороны уменьшает влияние помехи, а с другой - увеличивает мощность шума в основном канале в зависимости от оптимального угла $\alpha_{\text{опт}}$, при котором B имеет минимальное значение

$$\alpha_{\text{опт}} = \text{arctg} \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{M \sin^2 \gamma}{1 + M \sin^2 \gamma} \right). \quad (2.54)$$

Полученная зависимость коэффициента подавления помехи K при компенсации от угла γ при различных значениях M приведена на рис.2.1, а зависимость параметра $\alpha_{\text{опт}}$ от угла γ при различных значениях M приведена на рис.2.2.

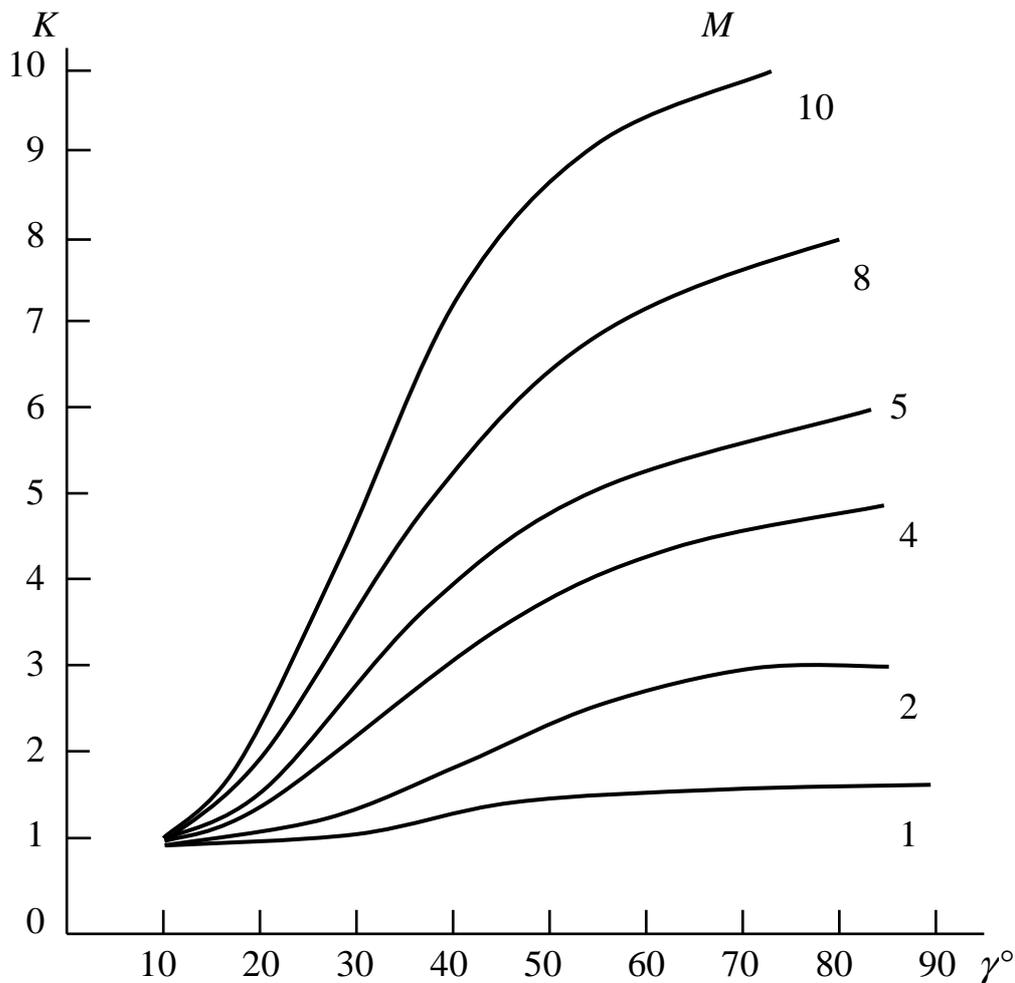


Рис.2.1. Зависимость коэффициента помехи K при компенсации от угла γ при различных значениях M

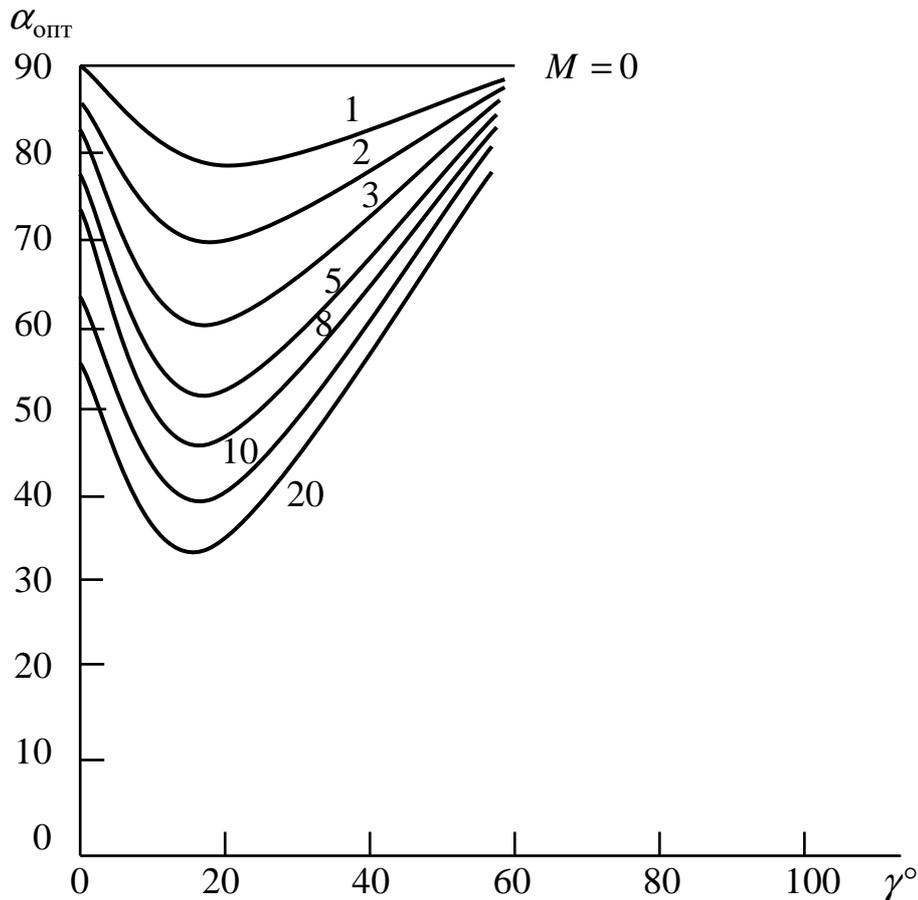


Рис.2.2. Зависимость параметра $\alpha_{\text{опт}}$ от угла γ при различных значениях M

Из рис. 2.2 видно, что чем больше помеха, тем ближе γ к $\alpha_{\text{опт}}$, т.е. в первую очередь компенсируется помеха. При больших углах γ также происходит компенсация помехи, т.к. поляризация помехи находится недалеко от ортогональной поляризации.

После подстановки (2.54) в (2.53):

$$\Delta P = P_c + P_{\text{ш}} + \frac{P_{\text{п}} \cos^2 \gamma}{1 + \frac{P_{\text{п}}}{P_{\text{ш}}} \sin^2 \gamma}. \quad (2.55)$$

Сравнение выражений (2.55) с (2.48) показало, что проведенная компенсация уменьшила помехи в K раз, т.е.

$$K = 1 + \frac{P_{\text{II}}}{P_{\text{III}}} \sin^2 \gamma = 1 + M \sin^2 \gamma.$$

До проведения компенсации отношение полезного сигнала к сигналу помехи выражалось через R_2 (2.51), а после компенсации оно стало равно R_3

$$R_3 = \frac{R}{1 + \frac{M \cos^2 \gamma}{1 + M \sin^2 \gamma}}. \quad (2.56)$$

Улучшение в отношении сигнал / (фон+шум) составит

$$\frac{R_2}{R_3} = 1 + \frac{M^2}{4(1+M)} \sin^2 2\gamma. \quad (2.57)$$

При одном и том же угле γ этот выигрыш тем больше, чем больше M , т.е. чем больше мощность поляризованной помехи R_{II} . Наиболее эффективная компенсация для помех, поляризация которых близка к поляризации сигнала объекта ($\gamma \rightarrow 45^\circ$). При наличии помехи необходимо выполнение неравенства $R_2 \geq R_0$, а при выполнении компенсации $R_3 \geq R_0$, т.е.

$$R \geq R_0 \left(1 + \frac{M \cos^2 \gamma}{1 + M \sin^2 \gamma} \right). \quad (2.58)$$

Таким образом, приведенные методы радиолокационного обнаружения объектов на фоне мешающих отражений от гидрометеоров объединяют различные идеи, которые до настоящего времени не реализованы ни в принципе построения судовых РЛС, ни в методах обработки радиолокационной информации.

Дальнейшее изучение и решение проблемы выбора оптимальных методов радиолокационного обнаружения объектов и функционального разделения эхосигналов объектов, и гидрометеорного фона является актуальным для судовых РЛС. Кроме этого, необходимо решить задачу радиолокационного получения информации о среде, в которой зарождаются и развиваются

гидрометеорологические образования, с которыми связаны опасные явления погоды, существенным образом влияющие на безопасность судоходства.

Поэтому решение задачи выбора и совершенствование оптимальных методов защиты судовых РЛС от естественных помех и радиолокационных методов распознавания опасных явлений на основе имеющегося тезауруса является актуальным исследованием, имеющим перспективную научную новизну. При решении такой задачи должен быть использован арсенал математических структур, характеризуемый статистически по селекции объектов и распознаванию опасных явлений погоды (ОЯП). С помощью метода анализа радиолокационных данных, основанного на факторных процедурах, полученное множество информации может быть параметризовано. Существующие методы определения отражающих параметров эхо-сигналов в существующих судовых РЛС не являются оптимальными и поэтому обладают недостаточной информативностью.

Особую роль играет процесс получения радиолокационной информации, как об объекте радиолокационного наблюдения, так и о гидрометеорологическом фоне. Сведения о радиолокационной структуре, состоянии, характеристиках среды, в которой осуществляется радиолокационное наблюдение объектов судовыми РЛС, к настоящему времени получены различными авторами [1-4,6-11,48,49,66,68,69]. Все эти исследования основаны на анализе информации, заключенной в амплитуде (мощности) электромагнитной волны, а также в фазе и частоте сигналов. Обработка эхо-сигналов с учетом априорного закона изменения их фазы при перемещении объекта по определенной траектории позволило повысить разрешаемую способность радиолокационного наблюдения. В то же время наиболее перспективными являются поляриметрические методы получения радиолокационной информации об объектах и гидрометеорологической среде на основе синтеза соответствующей объекту временной и поляризационных структур сигналов и анализа рассеянного излучения. Поляризация является важнейшим потенциальным источником информации об объекте радиолокационного

наблюдения и среде. Для узкополосных сигналов мгновенная частота и фаза не зависят от энергетических параметров у компонент сигнала и обусловлены вращательностью электрического вектора волны. Пусть пара компонент $E_k(t)$ и $E_m(t)$ ($k, m = 1, \dots, n$) у вектора $E(t)$ имеют одинаковую временную структуру $E_{км}(t)$. Тогда, в соответствии с [55], мгновенная фаза $\varphi_{км}(t)$ комплексного вектора $E_{км}(t)$ определяется из условия:

$$\varphi_{км}(t) = \operatorname{tg}^{-1} \frac{\operatorname{tg} \beta_{км} + \operatorname{tg} \alpha_{км} \operatorname{tg} \varphi_{np}(t)}{1 - \operatorname{tg} \alpha_{км} \operatorname{tg} \beta_{км} \operatorname{tg} \varphi_{np}(t)}, \quad (2.59)$$

а мгновенная частота $\omega_{км}(t)$ определяется по формуле:

$$\omega_{км}(t) = \omega_{np}(t) \frac{\operatorname{tg} \alpha_{км} (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{np}(t))}{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_{км} \cdot \operatorname{tg}^2 \varphi_{np}(t)}, \quad (2.60)$$

где $\omega_{np}(t) = \frac{d}{dt} \varphi_{np}(t)$, а $\varphi_{np}(t) = \operatorname{tg}^{-1} \left[\frac{\Gamma \cdot E_k(t)}{E_k(t)} \right]$;

Γ - интегральная операция Гильберта для перехода к аналитическим сигналам.

Здесь α и β - вещественные углы, соответствующие углу эллиптичности и углу ориентации эллипса поляризации для вектора $E_{км}(t)$.

$$E_{np}(t) = E_k(t) e^{I\omega_0 t} - \quad (2.61)$$

экспоненциальное временное представление волны круговой поляризации.

К настоящему времени используется целый ряд устройств, примененных в радиотехнических цепях радиолокационных систем [66, 68-78], таких как однополосный модулятор, преобразователи частоты с инверсией и без,

умножители и делители частоты, амплитудный, частотный, фазовый и синхронный детекторы, полосовые фильтры, квадратичные модуляторы и др.. При поляризационном анализе электромагнитной волны считаются источниками поля изменения электродинамических параметров среды распространения. Эти источники есть реальные электрические и магнитные поля, связанные с поляризацией магнитоэлектрической среды под действием электромагнитного поля. Теория изотропных и анизотропных сред с учетом поляризационных явлений при распространении в них электромагнитной волны достаточно полно изложена Саприкиным В.А. и Тынянкиным С.И. в [79]. С учетом того, что сами объекты и гидрометеорный фон являются источниками вторичного излучения, будем считать, что у них определены все компоненты вектора плотности как электрического, так и магнитного токов, т.е. существует оператор распространения. Областью определения оператора является пространственно-временные функции источников поля.

Будем исходить из того, что поляризационные компоненты принятого сигнала несут информацию не только об объекте радиолокационного наблюдения, но и о гидрометеорном фоне. Задача радиолокационного мониторинга состоит в уменьшении влияния на качество решения характеристик рассеяния наблюдаемых объектов и гидрометеорологического фона. Это даст возможность получить из радиолокационного сигнала типологические данные об объектах радиолокационного наблюдения и исключить или уменьшить на радиолокационном изображении информацию о гидрометеорологическом фоне. Если элементы приемной антенны судового поляриметра позволяют разделить эхо-сигнал от объекта и фона, измерить основную и перекрестную компоненты, то появление перекрестной компоненты в отраженном сигнале от объекта относительно линейной компоненты облучающей объект волны обусловлено наличием сингулярностей на поверхности объекта, что соответствует эхо-сигналу обнаруженного судовым поляриметром судна на фоне гидрометеорного фона. Для обнаружения встречных судов судовым поляриметром при наличии

гидрометеорологического фона необходимо использовать коэффициент анизотропии $\mu(i\omega)$, значение которого определяется в круговом поляризационном базисе [55]. В этом случае эхо-сигнал в согласованном по поляризации канале делится на сигнал в перекрестном канале, т.е.

$$\mu(i\omega) = \frac{S_{11}[b_{\kappa}(i\omega)]}{S_{21}[b_{\kappa}(i\omega)]}, \quad (2.62)$$

$$\text{где } S_{11}[b_{\kappa}(i\omega)] = \frac{E_{np}^{omp}(i\omega)}{E_{np}^{uzl}(i\omega)}; \quad S_{21}[b_{\kappa}(i\omega)] = \frac{E_{л}^{omp}(i\omega)}{E_{np}^{uzl}(i\omega)}.$$

При использовании, в качестве информативных параметров Стокса, коэффициент анизотропии выражается через второй параметр Стокса следующим образом: $lq\mu = lqS_{11} - lqS_{12} = Q$.

Коэффициент анизотропии не зависит от ослабления электромагнитной энергии по трассе, дальности до объекта, метеоусловий, угла поворота объекта, поэтому не требуется достаточно строгой стабилизации антенны судового поляриметра.

Использование поляризационных параметров позволяет решить задачу распознавания эхо-сигналов отдельно от объекта и гидрометеорологического фона и тем самым обеспечить радиолокационное обнаружение объекта при наличии гидрометеорологического фона.

На основе приведенных поляризационных параметров достаточно легко можно классифицировать объекты радиолокационного наблюдения судовым поляриметром.

При использовании кругового базиса гидрометеорный фон является анизотропным объектом.

Приведенный анализ поляризационных параметров электромагнитной волны показал, что они представляют научный интерес при исследовании процесса совершенствования условий радиолокационного наблюдения

объектов судовыми РЛС с поляризационной селекцией радиолокационных сигналов без увеличения энергетического потенциала РЛС.

Судовождение осуществляется при любом состоянии природной среды, как в ясную, так и в штормовую погоду. В сложных метеоусловиях единственным средством, обеспечивающим безопасность движения судна, является судовая радиолокатор. От информативности его радиолокационных параметров во многих случаях зависит жизнь экипажа и сохранность перевозимого груза. Транспортный процесс происходит во внешней среде, в которой находится не только надводные объекты, но и опасные явления погоды. Увеличение качества и возможности функционирования судовых радиолокационных систем может идти двумя путями: первый путь состоит в повышении функциональной структуры и количества информации на выходе, что усложняет оперативность потребления избыточной информации даже при автоматизации процесса обработки всего массива данных, а второй путь состоит в выборе таких информативных параметров электромагнитной волны, которые позволяют извлечь максимальное количество информации об объекте и среде, в которой находится объект без расширения номенклатуры реализуемых функций. Таким образом, второй путь определяется критерием функционирования радиолокационной системы с точки зрения ее эффективности, а процесс ее совершенствования состоит в изменении функций отдельных элементов, например, элементов антенной системы. Тем самым, концепция неразрывной связи и единства принципов системности и развития, и определяет эффективность их взаимодействия. Переход от энергетических параметров электромагнитной волны к их поляризационным параметрам определяет новый уровень развития радиолокационной системы. Поступательное развитие радиолокационной судовой системы обеспечивается тезаурусом, включающим накопленным сведениями о внешней среде. Использование сведений о связи параметров объекта с радиолокационными сигналами позволяет осуществлять успешное функционирование судовой РЛС. Судовая РЛС наряду с обнаружением объектов и измерением их координат

должна осуществлять обнаружение и анализ метеорологических объектов, определять их кинематические характеристики. Наиболее перспективными судовыми РЛС являются те, которые измеряют модули элементов поляризационной матрицы рассеяния в круговом базисе.

Диссертационные научные исследования могут вестись по каждому из рассмотренных направлений. Методом экспертных оценок процедуру выбора темы научного исследования представим в табличной форме (табл.2.2).

Таблица 2.2

Экспертная оценка совершенствования радиолокационного наблюдения объектов судовыми РЛС

Научные направления	Актуальность	Научная новизна	Эффективность	Профиль специальности	Реализуемость	Оценка
1 Повышение энергетического потенциала РЛС для улучшения радиолокационного наблюдения объектов	-	-	-	+	+	2
2 Низкая эффективность радиолокационного обнаружения объектов судовыми РЛС в сложных метеоусловиях	+	+	-	+	-	3
3 Совершенствование радиолокационного наблюдения объектов в сложных ситуационных условиях среды	+	+	+	+	+	5

Используя метод экспертных оценок, выберем тему научного исследования с осуществлением проверки каждого неочевидного факта действительности, выявленного в процессе информационного поиска по следующим характерным признакам: актуальности, научной новизне, экономичности, соответствие профилю специальности, реализуемости теоретических и практических результатов работы.

По критериям наличия оценивающих факторов составлена экспертная оценка по наблюдаемым направлениям исследований:

1. В собственно радиолокационных системах, какими являются судовые РЛС, используется явление радиоэхо, в результате которого образуется эхо-сигнал от объекта, облучаемого зондирующими колебаниями. Объект будет обнаружен, если его отражающие свойства отличаются от отражающих свойств окружающей среды. Однако применение собственно радиолокационных систем связано с большими энергетическими затратами, поскольку эхо-сигнал составляет незначительную долю излучаемого.

В соответствии с уравнением дальности радиолокационного наблюдения объекта в свободном пространстве, максимальная дальность его обнаружения R_{\max} определяется величиной излучаемой мощности $P_{\text{изл}}$, эффективной площадью антенны A , чувствительностью приемника РЛС $P_{c \text{ min}}$, длиной волны λ . Эти величины составляют энергетический потенциал РЛС, т.е.

$$R_{\max} = 4 \sqrt{\frac{P_{\text{изл}} A^2}{P_{c \text{ min}} 4 \pi \lambda^2}} \cdot \sigma . \quad (2.63)$$

Для увеличения R_{\max} , необходимо повышать энергетический потенциал РЛС, что связано с увеличением экономических затрат. Повышение энергетического потенциала РЛС влияет только на дальность обнаружения объекта и не несет дополнительной информации об объекте радиолокационного наблюдения. При наличии гидрометеоров и собственных шумов антенны и приемного устройства максимальная дальность даже при увеличении энергетического потенциала судовой РЛС будет уменьшаться [6]:

$$m_1 P_{\text{ш}} + m_2 P_R = \frac{P_{\text{изл}} f^4(\theta_1 \theta_2) G^2 \lambda^2}{(4 \pi)^3 R^4} G_{\text{об}} F_a F_d , \quad (2.64)$$

где m_1 - коэффициент различимости сигнала на фоне собственных шумов, при котором обеспечивается заданная вероятность обнаружения объекта;

$P_{\text{ш}}$ - мощность шумов приемного устройства, отнесенная ко входу;

m_2 - коэффициент различимости сигнала цели на фоне помех от гидрометеообразований;

P_R - средняя мощность отраженных сигналов при наличии гидрометеоров;

$f(\theta_1 \theta_2)$ - функция диаграммы направленности антенны по напряженности поля;

G - коэффициент направленного действия антенны;

$G_{\text{об}}$ - эффективная площадь рассеяния объекта;

$F_a = 10^{-0,2} \int_0^R \gamma_{\Sigma a}(R, \lambda) dR$ - множитель ослабления в «чистой» атмосфере на расстоянии R от РЛС до объекта;

$\gamma_{\Sigma a} = \gamma_{\text{к}} + \gamma_{\text{вп}}$ - суммарный удельный коэффициент ослабления в кислороде и водяном паре;

$F_d = 10^{-0,2} \int_0^R \gamma_{\Sigma}(R, \lambda) dR$ - множитель ослабления в гидрометеорах;

$\gamma_{\Sigma} = \gamma_d + \gamma_{\text{об}}$ - суммарный удельный коэффициент ослабления в дожде и облаках соответственно.

С учетом коэффициента заполнения K_3 гидрометеорами импульсного объема, уравнение радиолокации запишется в виде:

$$P_R = \frac{P_{\text{и}} G^2 \lambda^2 h \theta_{\Gamma} \theta_{\text{в}}}{512 \pi^2 R^2 P_{\text{ш}}} K_3 F_a F_d \sigma_{\text{об}}, \quad (2.65)$$

где $\frac{P_{\text{и}} G^2 \lambda^2 h \theta_{\Gamma} \theta_{\text{в}}}{512 \pi^2 P_{\text{ш}}} = \Pi$ - энергетический потенциал судовой РЛС;

h - пространственная протяженность излучаемого импульса.

С увеличения расстояния до объекта, действующие размеры объекта уменьшаются, а, следовательно, уменьшается и $\sigma_{об}$. На длине волны $\lambda = 3,2$ см для судовых РЛС энергетический потенциал $\Pi = 1 \cdot 10^{17} - 7 \cdot 10^{17} \text{ м}^3$. При интенсивности выпадающих осадков $I = 6$ мм/час, R_{max} уменьшается до 50 км при $R_{max} = 100$ км без осадков.

Таким образом, повышение энергетического потенциала судовой РЛС не эффективно при работе в среде с гидрометеорами. Необходимо отметить, что в направлении исследования научная новизна отсутствует.

2. Радиолокационная система наряду с такими свойствами обеспечения безопасности как мореходность судна, надежность технических агрегатов, высокий профессионализм команды должна с высокой эффективностью обеспечить наблюдение морских объектов на фоне естественных помех, которые проявляются в виде ослабления радиолокационных сигналов и рассеяния частицами облаков и осадков. Влияние гидрометеобразований на эффективность работы судовой РЛС выражается в маскировке эхо-сигналов объектов эхо-сигналами облаков и осадков, а в некоторых случаях они могут быть приняты за эхо-сигналы объектов. Волнение моря и гидрометеобразования уменьшают вероятность и эффективность радиолокационного обнаружения объектов судовыми РЛС и повышают вероятность ложной тревоги.

Практические возможности радиолокационного обнаружения судовыми РЛС гидрометеобразований характеризуются максимальными дальностями и вероятностью их обнаружения. Максимальная дальность обнаружения определяется техническими параметрами РЛС, отражаемостью облаков и осадков, и их геометрическими размерами. Вероятность же их обнаружения определяется не только техническими параметрами РЛС, но и повторяемостью атмосферных образований в данном географическом регионе на пути судна и является радиоклиматической характеристикой эффективности радиолокационного обнаружения.

Для судовых РЛС эффективность обнаружения облаков, осадков и связанных с ними опасных явлений погоды легко определяется путем решения уравнения радиолокации относительно максимальной дальности обнаружения осадков различной интенсивности и облаков определенных форм.

В соответствии с [9, 80], максимальная дальность обнаружения облаков и осадков, как множественной цели, определяется из уравнения

$$R_{\max}^2 = C \frac{10^{-16} P_{\text{изл}} h Z}{220 P_{\min} \lambda^2 \theta_{\text{в}} \theta_{\text{г}}} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right| K K_3, \quad (2.66)$$

где C - коэффициент, учитывающий влияние флуктуации эхо-сигналов;

$P_{\text{изл}}$ - излучаемая мощность, Вт;

h - пространственная протяженность зондирующего импульса, м;

Z - радиолокационная отражаемость облаков и осадков, мм⁶/м³;

P_{\min} - чувствительность приемника РЛС, Вт;

λ - длина волны, см;

$\theta_{\text{в}}$ и $\theta_{\text{г}}$ - ширина диаграммы направленности антенны в горизонтальной и вертикальной плоскостях, рад;

m - комплексный коэффициент преломления вещества частиц облаков и осадков;

K - коэффициент ослабления электромагнитной энергии, дБ/км;

K_3 - коэффициент заполнения отражающего радиолокационного объема частицами облаков и осадков.

При вероятности обнаружения 0,95 значение $C = 4 \cdot 10^{-2}$. При использовании уравнения (2.66), радиолокационная отражаемость для выпадающих осадков выражает через их интенсивность I мм/ч, а для облаков через их водность W г/м³.

Используя зависимость R_{\max} от I , и R_{\max} от W , определяется радиоклиматическая вероятность их обнаружения.

К настоящему времени подробно исследована эффективность радиолокационного обнаружения зон облаков и выпадающих осадков для

используемых РЛС, поэтому данное направление не содержит признаков научной новизны и не соответствует паспорту специальности.

3. Безопасность управления судном на пути его движения определяется не только техническим состоянием всех судовых систем, но в большой степени зависит от радиолокационного обнаружения и распознавания как опасных метеорологических явлений, так и объектов в сложных метеорологических условиях. Аварии судов нередко происходят из-за несовершенства радиолокационного наблюдения объектов в сложных метеоусловиях, так как используемые в судовых РЛС параметры электромагнитных волн исчерпали свои возможности с точки зрения их информативности при радиолокационном наблюдении объектов на фоне естественных помех. Применительно к корабельной радиолокации в настоящее время назрела необходимость поиска и исследования иных, более информативных параметров электромагнитной волны с одной стороны и решения ряда важных задач радиометеорологии, позволяющих учесть и исключить воздействие метеорологических факторов на радиолокационное обнаружение и распознавание объектов на пути судна, т.е. на радиолокационное наблюдение объектов при любых метеорологических условиях, что позволит повысить точность определения координат наблюдаемых объектов, а в целом обеспечить безопасность судоходства.

Из табл. 2.2 следует, что наиболее перспективным оказалось третье научное направление, актуальность которого связана с обеспечением безопасности судоходства. Наличие теоретической и экспериментальной базы по данному направлению научного исследования позволяют достичь поставленной цели, решая главную и ряд вспомогательных задач научного и прикладного характера. Предварительная оценка проблемы совершенствования радиолокационного наблюдения объектов судовыми РЛС в сложных метеорологических условиях отвечает всем признакам выбора, таким как актуальности, научной новизне, эффективности, реализуемости и соответствия паспорту специальности.

Выбор темы научного исследования следует формировать на основе анализа противоречий в выбранном направлении, т.е. между управлением судном в сложных метеорологических условиях и эффективным использованием радиолокационной информации при обеспечении его безопасности путем улучшения основных функций судового радиолокатора.

Поэтому исследуемая проблема выполнена на тему «Повышение ситуационного анализа состояния среды при использовании радиолокационных средств». Актуальность темы связана с обеспечением безопасности судовождения, которое определяется ситуационным анализом состояния среды радиолокационными судовыми средствами.

Особая роль отводится связи параметров объекта с радиолокационными сигналами при наличии гидрометеорологических помех. Использование этих сведений позволяет осуществлять функционирование судовой РЛС в условиях гидрометеорных помех и при наличии шумов. Действуя в гидрометеорной среде судовая РЛС должна решать ряд задач согласования внешних противоречий - получение более полной информации об объекте наблюдения и помехоустойчивости. Если бы РЛС при решении радиолокационных задач не нуждалась бы из-за существующей неопределенности в априорной информации о рассеивающих свойствах объекта наблюдения и статистических характеристиках, то не было никакой необходимости формирования «радиуса»-РЛС, объект, трасса. Успешное функционирование судовой РЛС определяется требованиями эффективности принимаемых решений на основе полученной радиолокационной информации.

Задачи распознавания и селекции объектов на фоне гидрометеорологических помех заставляют использовать некоординатную информацию об объекте, которая связана со сведениями о его геометрии, размерах и электрофизических параметрах.

Рассмотренное направление исследования нашло свое отражение в Транспортной стратегии Украины на период до 2020 года и связано с повышением безопасности морских перевозок и ее обеспечение

радиолокационными судовыми системами, тема диссертации связана с выполнением ОНМА фундаментальной бюджетной научно-исследовательской работы (НИР) «Теоретические основы гарантированной безопасности судоходства в территориальном море, внутренних водах и портах Украины» (2010-2012г.г.) № ДР 0110U00280, а также 7-ой рамочной транспортной программой Европейского союза проект MOWE – IT « Управление погодными явлениями в транспортной сфере» № ДР 0114U000343 (2012-2014 г.г.), грант №314506, в которых изложены основные результаты диссертационного исследования.

Предполагаемая научная новизна работы содержит гипотезу о существовании метода и средств наблюдаемости объектов в сложных ситуационных условиях среды за счет использования судовой РЛС.

Экономическая эффективность разработки очевидна, так как обнаружение объектов в сложных метеорологических условиях сохраняет жизнь пассажиров и команды и оберегает перевозимый груз.

Научное направление диссертации соответствует научным направлениям специальности 05.22.13 – навигация и управление движением, а также профилю научной школы кафедры управления судном ОНМА.

Объектом исследования выбраны атмосферные явления на пути судна, а предметом исследования - методы радиолокационного навигационного наблюдения объектов на фоне естественных помех.

2.4. Цель и задачи исследования

При наличии гидрометеорологических образований и сильного волнения, т.е. при условии ограниченной видимости судовой РЛС, эффективность в обеспечении безопасности мореплавания существенно снижается вследствие недостаточной радиолокационной различимости объекта на фоне отражений от гидрометеорологического фона. До настоящего времени присутствует

зависимость функционирования морского транспорта от метеоусловий, снижается эффективность морских перевозок. Поэтому судовая РЛС нуждается в улучшении функциональных возможностей радиолокационного наблюдения объектов в сложных метеорологических условиях и должна решать все возложенные на нее задачи – обнаруживать и распознавать объекты, определять их кинематические параметры, отстраиваться от помех, формировать требуемое радиолокационное изображение наблюдаемой обстановки на пути судна, используя поляризационные и вероятностно-статистические методы.

Целью настоящего исследования является повышение безопасности плавания судна в условиях сложного ситуационного состояния атмосферы средствами дистанционного наблюдения. Для осуществления поставленной цели используется методология, включающая теоретическую базу, методы и способы исследований, средства и приемы реализации рациональных методов.

Поэтому рабочей гипотезой исследования стал тезис о существовании методов и средств наблюдения радиолокационных объектов в сложных ситуационных условиях атмосферной среды за счет использования судовой РЛС.

В связи с этим возникает главная научная задача – разработка метода и средств повышения информационной эффективности судовых РЛС с использованием поляризационной селекции.

Для решения главной задачи исследования требуется развитие теоретической базы исследования, связанной с формированием входных параметров, функциональных свойств элементов системы, а также связей между ними, что предопределяет формирование вспомогательных задач.

Среда, в которой функционирует судовая РЛС, характеризуется радиофизическими параметрами, являющимися функциями пространственных координат и времени. Поэтому первой вспомогательной задачей исследования является анализ параметров среды, влияющих на радиолокационное наблюдение объектов.

При наблюдении объектов в сложных ситуационных условиях атмосферной среды, возникают естественные помехи, влияющие на эффективную работу судовой РЛС. Поэтому второй вспомогательной задачей является анализ влияния естественных помех на работу судовой РЛС.

Третьей вспомогательной задачей является радиолокационное исследование ситуационного состояния среды поляризационными методами.

Четвертой вспомогательной задачей исследования является совершенствование радиолокационного наблюдения объектов в сложных ситуационных условиях среды.

Для решения поставленных задач и формирования научного положения для достижения поставленной цели необходимо разработать технологическую карту научного исследования.

2.5. Технологическая карта научного исследования по повышению ситуационного анализа состояния среды при использовании судовых радиолокационных средств

Технологические аспекты научного исследования предусматривают усиление его направленности и отображают материалистическую основу эволюционного познания окружающего мира путем изучения природных явлений и процессов, возникающей проблемы, выявления новых, неочевидных фактов реальности, постановки новых задач исследования, доказательств и подтверждения полученных научных результатов определенными способами и приемами, утверждение новых теоретических положений для достижения поставленной цели исследования. Исходя из системного подхода, технологическая карта научного исследования может иметь вид представленный на рис. 2.3, в соответствии с которой тема диссертации выбрана на основе запросов практики и существующей проблемы радиолокационного обеспечения безопасности судоходства в условиях естественных помех.

Технологическая карта устанавливает последовательность проведения научных исследований в решении главной и вспомогательных задач с учетом системного подхода в технологии раскрытия темы исследования.

На современном этапе развития морского флота одним из лидирующих устройств, обеспечивающих безопасность судовождения при различных ситуациях внешней среды, является судовая радиолокатор, обеспечивающий проводку судов [82-92]. Несмотря на существенное обновление радиолокационных средств [Резолюция ИМО MSC 64(67), А.820(19), А.823(19)] и внедрения средств радиолокационного автоматического сопровождения радиолокационных объектов, наблюдение и распознавание объектов в сложных метеорологических условиях до настоящего времени еще остается проблематичным.

Это связано с тем, что используемые радиолокационные методы и технические средства не обеспечивают с необходимой эффективностью выделения эхо-сигналов объектов от эхо-сигналов гидromетеообразований. Поэтому возникает необходимость проведения исследования как в направлении поиска более совершенных методов улучшения радиолокационной наблюдаемости объектов на фоне мешающих эхо-сигналов от метеорологических образований (ливневые и обложные осадки, туманы, снег), а также исследование самих метеообразований и анализ ситуационного состояния внешней среды.

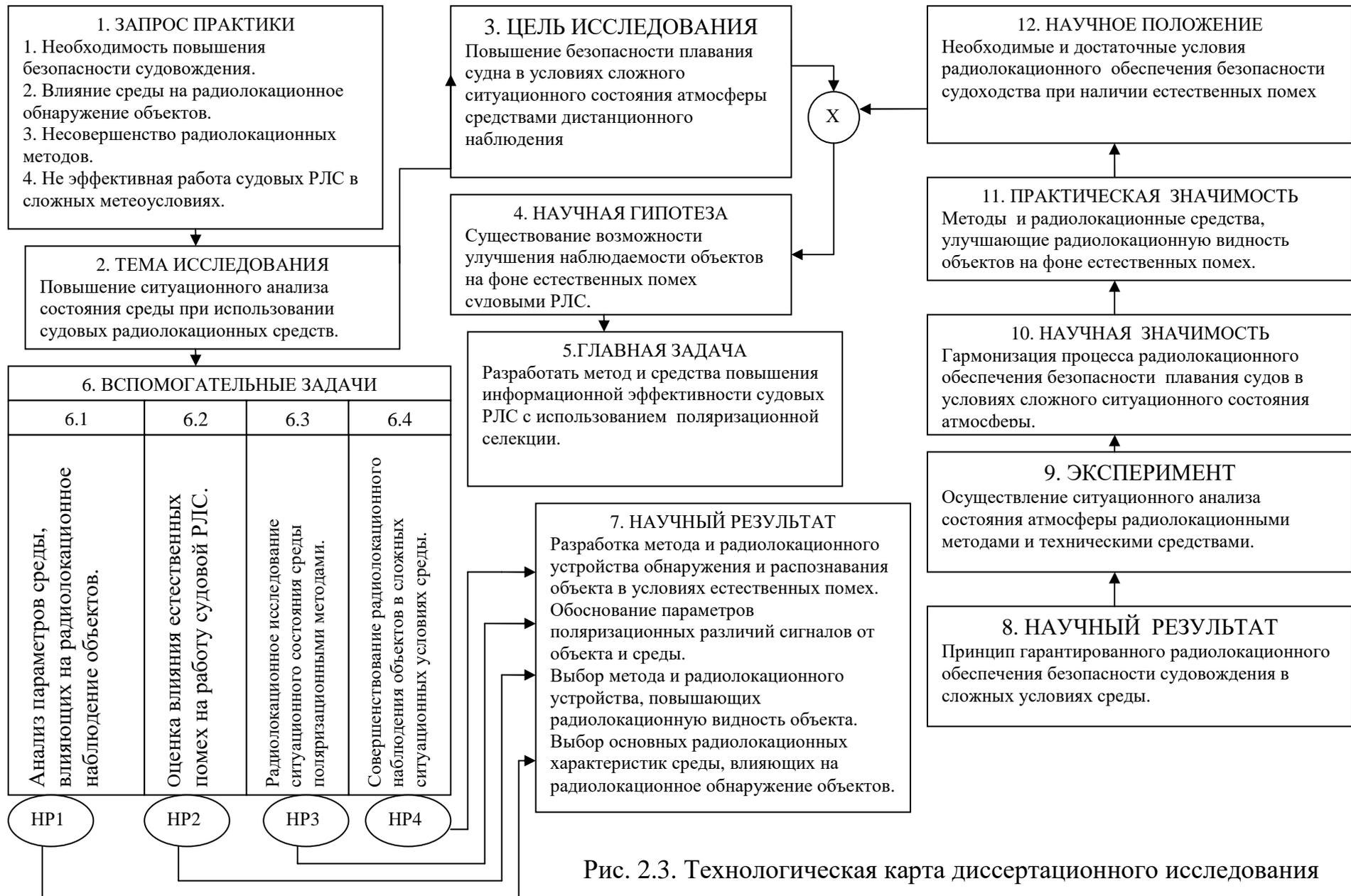


Рис. 2.3. Технологическая карта диссертационного исследования

Для повышения радиолокационной наблюдаемости объектов на фоне естественных помех характерным является выбор наиболее информативных параметров электромагнитной волны и применительно к тем радиолокационным методам, которые обеспечат эффективность работы судовой РЛС и анализа радиолокационных характеристик эхо-сигналов гидрометеоров, мешающих эффективной работе судовой РЛС.

Поэтому первой вспомогательной задачей исследования стало установление параметров среды, влияющих на радиолокационную наблюдаемость объектов судовыми РЛС.

Решение этой задачи предполагается осуществить вероятностно-статистическими и аналитическими методами.

Научным результатом решения первой вспомогательной задачи станет радиолокационный метод оценки радиофизических параметров атмосферы над морской поверхностью.

Вторая вспомогательная задача решает вопросы установления влияния естественного фона на работу судовой РЛС. В процессе решения данной задачи планируется выбор метода и радиолокационного устройства, повышающих радиолокационную видность объектов на фоне естественных помех.

Научным результатом решения второй вспомогательной задачи станет метод поляризационной селекции эхо-сигналов и радиолокационное устройство, реализующее данный метод

Третья вспомогательная задача предназначена для оценки ситуационного состояния среды методами поляризационных различий эхо-сигналов от двух различных вещественных сред.

Научным результатом решения третьей вспомогательной задачи станет метод поляризационного различия эхо-сигналов двух вещественных сред отличающихся радиофизическими параметрами.

Решение этой вспомогательной задачи планируется осуществить методом поляризационного анализа и сравнительной оценки поляризационных

параметров эхо-сигналов двух сред таких, как коэффициенты поляризационных различий эхо-сигналов, коэффициенты деформации эллипсов поляризации и разности углов ориентации эллипсов поляризации эхо-сигналов [88].

Четвертая вспомогательная задача связана с разработкой вероятностно-статистического метода поляризационного обнаружения и распознавания объектов в условиях гидрометеорологических помех.

Научным результатом решения четвертой вспомогательной задачи является радиолокационный метод поляризационного обнаружения и распознавания объектов в условиях гидрометеорологических помех и поляризационное устройство, реализующее этот метод.

Решением главной задачи исследования – разработка метода и средств повышения информационной эффективности судовых РЛС, является синтез радиолокационных методов и технических средств, повышающих их информационную эффективность при обнаружении и распознавании объектов в условиях естественных помех с использованием поляризационной селекции.

Решение главной задачи планируется осуществить путем формирования классификационных признаков разрабатываемого судового поляриметра с использованием принципов его структурирования.

Научным результатом решения главной задачи исследования должен стать принцип гарантированного радиолокационного обеспечения безопасности судна в сложных метеорологических условиях.

Практическая значимость полученных результатов исследования заключается в совершенствовании радиолокационной аппаратуры поляризационной селекции эхо-сигналов объектов.

Научное положение работы определяет принцип достижимости цели и отражает научный результат решения главной задачи исследования в виде тезиса: безопасность движения судна определяется максимумом эффективности функционирования судовой РЛС в виде обеспечения видности объектов на фоне естественных помех с помощью параметров, определяющих состояние объекта и среды.

Выводы к разделу 2

Современное судовождение характеризуется более высоким техническим состоянием конструктивных особенностей каждого судна, внедрением автоматизированных навигационных систем управления, спутниковых и радиолокационных систем навигации. На данном этапе развития морского флота одним из лидирующих технических устройств на судне, обеспечивающих безопасность судовождения в сложных ситуациях внешней среды, является судовой радиолокатор. Несмотря на существенное обновление радиолокационных судовых систем, дистанционное наблюдение объектов в сложных метеорологических условиях до настоящего времени является серьезной проблемой. В связи с этим, наиболее актуальным направлением в обеспечении безопасности судовождения является разработка методов улучшающих радиолокационную наблюдаемость объектов в сложных ситуационных условиях внешней среды и радиолокационных устройств, позволяющих одновременно получать дистанционную радиолокационную информацию об объекте и среде.

Решение данной проблемы осуществляется путем системного подхода постановки задачи исследования по нахождению новых закономерностей, повышающих эффективность функционирования судовой РЛС.

При изучении проблемы повышения эффективности работы судовой РЛС в условиях естественных помех важным условием является выбор наиболее информативных радиолокационных параметров электромагнитной волны и разработка радиолокационной аппаратуры, реализующей методы поляризационной селекции эхо-сигналов. Радиолокационный судовой поляриметр, реализующий поляризационные методы обнаружения и распознавания объектов при наличии естественных помех, необходимо рассматривать как устройство, входящее в радиолокационный канал: судовой поляриметр — среда распространения электромагнитной энергии от антенны до объекта — рассеивающие свойства объекта радиолокационного наблюдения

— среда распространения электромагнитной энергии от объекта до антенны судового поляриметра. Функционирование такого канала возможно только при условии получения наиболее полной информации о составляющих радиолокационного канала, на основании которой судовой поляриметр обеспечит эффективность и безопасность судовождения в сложных ситуационных условиях среды.

Отмеченные проблемы были подвергнуты экспертной оценке по факторам: актуальности, предполагаемой научной новизны, соответствии научным направлениям специальности 05.22.13 и реализуемости. Наибольшее количество баллов получила третья проблема, связанная с научным направлением по совершенствованию радиолокационного наблюдения объектов в сложных ситуационных условиях среды. Ее актуальность базируется на низкой эффективности обнаружения и распознавания навигационных объектов в сложных погодных условиях.

Тема диссертационного исследования направлена на создание методологии научного исследования по обеспечению гарантированной безопасности судовождения в экстремальных условиях окружающей среды.

Технология научного исследования реализует системный подход в решении поставленных задач, использует сведения о связи параметров объекта с радиолокационными сигналами и позволяет осуществить функционирование судовой РЛС в условиях естественных помех.

Основные результаты раздела представлены в работах автора [64,65].

РАЗДЕЛ 3

АНАЛИЗ СВЯЗИ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТА С РАДИОЛОКАЦИОННЫМИ СИГНАЛАМИ

Использование сведений о связи параметров объекта с радиолокационными сигналами позволяет осуществлять функционирование судовой РЛС в условиях помех и при наличии шумов. Основная задача судовой РЛС соответствует совершенствованию функций получения радиолокационной информации об объекте путем его обнаружения, распознавания и получения координат. Если бы судовая РЛС при решении радиолокационных задач не нуждалась в априорной информации о рассеивающих свойствах объекта, то среда распространения электромагнитной волны и объект составляли бы внешнюю среду. Решение задачи радиолокационного распознавания и селекции может быть основано на использовании некоординатной информации об объектах, которая связана со сведениями о типе радиолокационного объекта, принадлежности его к определенному классу, геометрией, размерами, электрофизическими параметрами поверхности и др. Некоординатная информация объекта непосредственно связана с изменением поляризационного состояния эхо-сигнала и является мощным фактором, который может определять структуру современной судовой РЛС и алгоритм обработки радиолокационной поляризационной информации об объекте.

3.1. Поляризационная структура электромагнитных полей

Поляризация радиоволн представляет свойство электромагнитного поля, соответствующего радиоволнам, определяемое пространственно-временной структурой векторов составляющих поля, инвариантной к динамике распространения поля и к временной зависимости его источников. Проанализируем поляризационную структуру радиолокационных сигналов

круговой поляризации, которые будем использовать при решении задачи обнаружения и распознавания объектов судовыми РЛС в условиях естественных помех.

Плоская электромагнитная волна, распространяющаяся в однородной среде записывается в виде [55]:

$$E(r, t) = x E_x(z - ct) + y E_y(z - ct), \quad (3.1)$$

где E_x и E_y - составляющие волны по координатным осям;

$x, y, z = r$ - орты декартовой системы координат.

Компоненты $E_x(z - ct)$ и $E_y(z - ct)$ могут быть полностью независимыми и произвольными. Постулирование между компонентами функциональной связи, накладывает определенные ограничения на характер одновременно рассматриваемых поляризационных компонент, т.е.

$$E_y(z - ct) = P E_x(z - ct). \quad (3.2)$$

Причем функциональная связь не зависит от временной структуры $E_x(z - ct)$. Условие (3.2) определяет класс поляризованных волн. Функциональный оператор P удовлетворяет следующим условиям:

1. Класс функций, который описывает поляризационные компоненты, должен обеспечить непрерывность, обратимость и замкнутость функционального оператора P , иначе компоненты $E_x(z - ct)$ и $E_y(z - ct)$ будут неравноправны.

2. Оператор P должен быть линейным, ограниченным и регулярным, т.е.

$$P(\sum C_n(z - ct)) = \sum C_n P(E_{xn}(z - cn)) = \sum C_{п} E_{yn}(z - ct), \quad (3.3)$$

где $E_{xп}(z-cn)$ и $E_{yп}(z-ct)$ - поляризаационные компоненты n -ой составляющей сигнала;

C - поля комплексных чисел, $\forall c_1 \dots c_n \in C$.

3. Оператор P , определенный на функциях, зависящих от аргумента $(z-ct)$, совпадает с оператором $P_t(z-ct)$, заданным для временных функций в некоторой точке наблюдения и с оператором $P_z(z-ct)$, заданным вдоль направления распространения в фиксированный момент времени:

$$P(z-ct) = P_t(z-ct) = P_z(z-ct). \quad (3.4)$$

4. Преобразование $P(z-ct)$ не должно изменять монохроматического колебания $E_x(t) = E_x \cos(\omega t + \varphi)$, допускается изменение амплитуды и появление дополнительного фазового сдвига Φ

$$E_y(t) = P(E_x \cos(\omega t + \varphi)) = E_y \cos(\omega t + \varphi + \Phi). \quad (3.5)$$

Данное условие обеспечивает включение эллиптически поляризованных монохроматических волн в класс определенных (3.2) поляризованных волн.

5. Если $E_x(t)$ заменить на $E_x(t-\tau)$, то и $E_y(t)$ претерпевает задержку $E_y(t-\tau)$. Это условие эквивалентно коммутативности оператора $P(z-ct)$ с оператором дифференцирования $\frac{d}{dt}$, т.е.

$$\frac{d}{dt} P(z-ct) = P\left(\frac{d(z-ct)}{dt}\right). \quad (3.6)$$

При рассмотрении класса поляризованных по кругу волн, необходимо обеспечить неизменность оператора $P(z-ct)$ при повороте используемой системы координат вокруг направления распространения $z=r$, при этом

обозначение функционального оператора изменится на $K(z-ct)$, т.е. $K(z-ct) \in P(z-ct)$.

6. Для поляризованной по кругу волны обратный изоморфный функциональный оператор $K^{-1}(z-ct)$ определяется по правилу:

$$E_x(z-ct) = K^{-1}(E_y(z-ct)) = -K(E_y(z-ct)). \quad (3.7)$$

Равенство (3.7) основано с учетом преобразования поляризационных компонент при повороте системы координат вокруг z на угол β :

$$\left. \begin{aligned} E_x^H(z-ct) &= \cos \beta E_x^c(z-ct) + \sin \beta E_y^c(z-ct) \\ E_y^H(z-ct) &= -\sin \beta E_x^c(z-ct) + \cos \beta E_y^c(z-ct) \end{aligned} \right\}, \quad (3.8)$$

где E_x^H и E_y^H - компоненты векторов поля в новой (повернутой на угол β) системе координат,

E_x^c , E_y^c - компоненты в старой системе координат.

Тогда:

$$E_y^H(z-ct) = K(E_x^H(z-ct)) = K[\cos \beta E_x^c(z-ct) + \sin \beta E_y^c(z-ct)], \quad (3.9)$$

что в соответствии с принципом суперпозиции (условие 2), трансформируется у виду:

$$\begin{aligned} E_y^H(z-ct) &= \cos \beta K[E_x^H(z-ct)] + \sin \beta K[E_y^c(z-ct)] = \\ &= \cos \beta E_y^c(z-ct) + \sin \beta E_y^c(z-ct). \end{aligned} \quad (3.10)$$

Инвариантность от β здесь обеспечивается только при соблюдении условия (3.6). Всем перечисленным условиям для поляризованных по кругу волн удовлетворяет только преобразование Гильберта:

$$E_y(\xi) = K[E_x(\xi)] = \Gamma[E_x(\xi)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{E_x(\eta)}{\eta - \xi} d\eta, \quad (3.11)$$

где $\xi = z - ct$.

Равенство $K(z - ct) = \Gamma(z - ct)$ приводит к тому, что в (3.4) фазовый угол Φ для поляризованной по кругу монохроматической волны оказывается равным $-\frac{\pi}{2}$, а компонента $E_y(t)$ запишется в виде:

$$E_y(t) = E_x \sin(\omega t + \varphi). \quad (3.12)$$

7. Если поляризованная компонента $E_x(t)$ может быть факторизована как $E_x(t) = E_x^s(t) E_x^f(t)$, где спектр медленного множителя $E_x^s(t)$ не пересекается со спектром быстрого множителя $E_x^f(t)$, то справедливо существование модулированных по кругу волн:

$$E_y(z - ct) = \Gamma[E_x^s(z - ct) E_x^f(z - ct)] = E_x^s(z - ct) E_y^f(z - ct). \quad (3.13)$$

Спектр сигнала $E(r, \omega)$ можно разбить на положительные и отрицательные по частоте гармоники, и представить его суммой поляризованных по правому и левому кругу колебаний:

$$E(z, t) = E_{\text{ПК}}(r, t) + E_{\text{ЛК}}(r, t), \quad (3.14)$$

поляризационная структура, которых является ортогональной, т.е.

$$[E_{\text{пк}}(r, t), E_{\text{лк}}(r, t)] = 0. \quad (3.15)$$

Проведенный анализ поляризационной структуры электромагнитной волны выявил особую роль сигналов круговой поляризации левого и правого направления вращения электрического вектора, которые будут использованы при радиолокационном обнаружении и распознавании объектов на фоне естественных помех.

3.2. Матричное представление поляризационной структуры радиолокационных сигналов, рассеянных объектами

Радиолокационная информация об объекте появляется при взаимодействии электромагнитной волны, излучаемой антенной судового радиолокатора с объектом, в результате которого появляется рассеянный (отраженный) сигнал, несущий информацию об объекте. Как правило, объекты радиолокационного наблюдения (рассеиватели) содержат в своем составе сингулярности типа штырей, плоскостей, угловых отражателей, т.е. элементы, имеющие нулевой объем, то используются две диаграммы рассеяния, полученные для двух ортогональных поляризаций облучения рассеивателя (стационарная задача). В случае нестационарного рассеяния при временной структуре падающей и рассеянной волнами, связи между $E_{\text{пад}}(r, t)$ и $E_{\text{рас}}(r, t)$ обеспечивает оператор рассеяния или матрица рассеяния.

Матрица рассеяния $S(K_{\text{пад}}, r, \omega, t)$ является полной характеристикой рассеивающих свойств объекта при фиксированных условиях наблюдения, соответствующих направлению облучения $K_{\text{пад}}$, направлению наблюдения рассеянного поля r и частоты ω . Она есть атрибут рассеивателя и результаты ее измерения не зависят от дальности.

Для однопозиционного наблюдения направление облучения и рассеяния совпадают $K_{\text{пад}} \parallel r$. Формирование математической модели объекта заключается в определении зависимости обратного рассеяния объекта от поляризации падающей волны. Если объект сфера, то падающие две волны с взаимно ортогональными поляризациями отражаются одновременно, если объект диполь, то одна из двух ортогональных составляющих может оказаться подавленной, если цель – два взаимно перпендикулярные диполи, смещенными друг относительно друга, то возникает запаздывание времени приема одной из двух отраженных ортогональных составляющих, которые излучаются одновременно. Для связи между отраженными и излученными составляющими электромагнитной волны вводятся коэффициенты отражения a_{mn} . При излучении волны с произвольной поляризацией, ее можно разложить на ортогональные составляющие и тогда процесс отражения запишется в виде:

$$\begin{bmatrix} E_{\text{гор}}^{\text{отр}} \\ E_{\text{верт}}^{\text{отр}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{\text{гор}}^{\text{изл}} \\ E_{\text{верт}}^{\text{изл}} \end{bmatrix}. \quad (3.16)$$

Коэффициенты a_{11} и a_{22} характеризуют прямые, а a_{12} и a_{21} - перекрестные преобразования компонентов падающей волны (излучаемой) в соответствующие компоненты отраженной волны. Модули этих компонент определяют изменение амплитуд, а аргументы – изменение фаз компонент.

Матрица коэффициентов отражения a_{11} , a_{12} , a_{21} , a_{22} является поляризационной матрицей рассеяния объекта (матрицей Джонса), характеризующая его отражающие свойства и позволяющая определить параметры рассеянной в направлении на РЛС электромагнитной волны. Коэффициенты матрицы рассеяния определяют физические свойства объекта. Наблюдаемые судовой РЛС объекты в одном случае имеют сложную конфигурацию, состоящие из целого ряда жестко связанных между собой простейших отражающих элементов, в другом случае – объекты объемно-

распределенные (метеообразования) и поверхностно-распределенные (берега, скалы, поверхность суши и др.). Для каждого объекта существует поляризационный базис, в котором матрица рассеяния диагональна при условии прохождения трассы РЛС-объект-РЛС через изотропную среду, т.е. $a_{12} = a_{21} = 0$, а

$$\begin{bmatrix} E_{\text{гор}}^{\text{отр}} \\ E_{\text{верт}}^{\text{отр}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 \\ 0 & a_{22} \end{bmatrix}. \quad (3.17)$$

Если среда неизотропна, то перекрестные компоненты a_{12} и a_{21} матрицы рассеяния (3.17) не равны нулю.

По измеренным коэффициентам матрицы рассеяния легко определяются параметры отраженной волны, поступающей на вход антенны судовой РЛС.

Рассмотрим изменение поляризации отраженной волны от малоразмерных объектов, из которых состоят объекты сложной конфигурации (суда различного тоннажа). К таким объектам отнесем линейный полуволновой вибратор, плоскую металлическую пластину или диск, металлический и диэлектрический шары, двухгранный уголкового отражатель.

К полуволновому вибратору по отражающим свойствам близки элементы конструкции судна, а также дипольные отражатели объемно-распределенных объектов. Независимо от поляризации падающей волны отраженная волна будет линейно поляризована, параллельно продольной оси вибратора. Однако при произвольной ориентации вибратора отраженная волна будет деполаризована.

Металлическая пластина по отношению к падающей волне линейной поляризации является изотропным объектом, не меняющим поляризацию отраженной волны. При падении на металлическую пластину правой круговой поляризации, отраженная волна также имеет круговую поляризацию, но левое направление вращения вектора электрического поля, т.е. ортогональную падающей волне.

Шарообразный объект в поляризационном отношении является изотропным. При его облучении электромагнитной волной линейной поляризации, при отражении поляризация не изменяется. При облучении волной круговой поляризации, отраженная волна имеет круговую поляризацию, но ортогональную излученной.

Двухгранный уголкового отражатель по поляризационным свойствам эквивалентен плоской металлической пластине, что обусловлено тоекратным отражением падающей волны от его плоских граней. У судна на двух различных выпуклых или вогнутых частях корпуса, попадающих в разрешаемый радиолокационный элемент, могут выделяться пары плоских участков, перпендикулярных друг другу, образующих двухгранный уголкового отражатель, который создает эхо-сигнал круговой поляризации. При облучении судна электромагнитной волной круговой поляризации отраженная волна будет иметь ту же круговую поляризацию с тем же направлением вращения вектора электрического поля, т.к. направление вращения при двукратном отражении меняется дважды.

Для металлических частей судна без сингулярностей в направлении, удаленных от источников краевых волн (ребер, краев и т.п.), наблюдается свойство линейных поляризаций, т.е. крайне низкое значение эллиптичности. При этом недиагональные элементы матрицы рассеяния равны при любом совпадающем на передачу и прием входном и выходном поляризационном базисе, т.е. $S_{12}(v^\circ) = S_{21}(v^\circ)$ или $S_{12}(t) = S_{21}(t)$. Измерения характеристик рассеяния для определения элементов матрицы рассеяния не представляет трудностей, если судовая РЛС является радиолокационным поляриметром.

В отличие от матрицы Джонса отражающие свойства морских объектов можно полностью характеризовать с помощью матрицы Мюллера, состоящей из 16-ти действительных вещественных коэффициентов:

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{bmatrix}, \quad (3.18)$$

а процесс отражения электромагнитной волны от объекта можно записать в виде:

$$\begin{bmatrix} I_{\text{отр}} \\ Q_{\text{отр}} \\ U_{\text{отр}} \\ V_{\text{отр}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_{\text{изл}} \\ Q_{\text{изл}} \\ U_{\text{изл}} \\ V_{\text{изл}} \end{bmatrix}, \quad (3.19)$$

где I, Q, U, V – параметры Стокса излученной и отраженной волны;

$M_{11} - M_{44}$ – коэффициенты матрицы рассеяния, характеризующие рассеивающие свойства объекта и метеорологического фона.

Каждый из коэффициентов матрицы рассеяния представляет собой эффективную площадь рассеяния σ при облучении объекта электромагнитной волной определенной поляризации. Тогда уравнение связи между параметрами излученной, параметрами отраженной волны и параметрами объекта запишется в виде [67]:

$$\begin{bmatrix} I_{\text{отр}} \\ Q_{\text{отр}} \\ U_{\text{отр}} \\ V_{\text{отр}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} & \sigma_{14} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} & \sigma_{24} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} & \sigma_{34} \\ \sigma_{41} & \sigma_{42} & \sigma_{43} & \sigma_{44} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_{\text{изл}} \\ Q_{\text{изл}} \\ U_{\text{изл}} \\ V_{\text{изл}} \end{bmatrix}. \quad (3.20)$$

Уравнение (3.20) является физико-математической моделью процесса взаимодействия электромагнитной волны с объектом.

3.3. Использование некоординатной радиолокационной информации при распознавании объектов на фоне естественных помех судовыми РЛС

Современное развитие судовых РЛС будет связано с использованием поляризационной структуры радиолокационных сигналов и получением некоординатной информации об объектах радиолокационного наблюдения, которая позволяет установить тип объекта, его геометрию, размеры, форму поверхности и радиофизические параметры.

Для судовой РЛС некоординатная информация может успешно использоваться при решении задачи распознавания объектов на фоне гидрометеорологических помех. И хотя уже опубликовано несколько тематических выпусков ТИИЭР по некоординатной информации, на конференции RADAR-87 более трети всех докладов содержали сведения о некоординатной информации [55]. Для получения некоординатной информации об объектах наблюдения судовыми РЛС особое значение имеют поляриметрические судовые РЛС, поскольку оцениваемое ими изменение поляризационного состояния эхо-сигнала при рассеянии непосредственно связывается с некоординатными характеристиками объекта. Реализация методов получения некоординатной информации об объекте связана с имеющейся о нем априорной информацией. Так при отсутствии на объекте нелинейностей и несингулярностей (штырей, плоскостей, поляризационных решеток и т.п.) в рассеянном сигнале от объекта будет присутствовать электромагнитная волна линейной поляризации при облучении объекта волной линейной поляризации, так как на поверхности такого объекта наводимые падающим полем токи воспроизводят векторную структуру вектора электромагнитного поля облучающей волны. Появление перекрестной составляющей в эхо-сигнале относительно линейной компоненты падающего поля обусловлено наличием сингулярностей на поверхности объекта. Под юрисдикцию псевдособственной линейной поляризации относятся некоторые

метеообъекты, состоящие из частиц сферической формы и морские объекты .
Для таких объектов в линейном базисе b_0 , матрица Джонса запишется в виде:

$$S(b_0) = \begin{bmatrix} \lambda_1 & S_{12} \\ S_{21} & \lambda_2 \end{bmatrix}, \quad (3.21)$$

где λ_1 и λ_2 - собственные значения матрицы рассеяния или модули собственных коэффициентов отражения, соответствующие собственным поляризациям объекта и являются вещественными, а перекрестные элементы матрицы равны нулю

$$S(b_0) = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix}. \quad (3.22)$$

Для собственного линейного базиса в качестве характеристики рассеяния объекта можно использовать коэффициент анизотропии μ :

$$\mu = \frac{|\lambda_1| - |\lambda_2|}{|\lambda_1| + |\lambda_2|}. \quad (3.23)$$

У вибраторов $\lambda_2 \sim 0$, а $\mu \sim 1$.

У объемных (больших и гладких) $\lambda_1 \sim \lambda_2$, а $\mu \sim 0$.

Матрица рассеяния (3.22) в круговом базисе имеет вид:

$$S(bk) = 0,5 \begin{bmatrix} \lambda_1 - \lambda_2 & i(\lambda_1 + \lambda_2) \\ i(\lambda_1 + \lambda_2) & \lambda_2 - \lambda_1 \end{bmatrix}. \quad (3.24)$$

Сумма квадратов модулей всех элементов матрицы $S(bk)$ есть величина постоянная, не зависящая от базиса и соответствующей интегральной эффективной площади рассеяния объекта, т.е.

$$\sigma_{\Sigma\text{об}} = |\lambda_1|^2 + |\lambda_2|^2. \quad (3.25)$$

При использовании матрицы Джонса для определения коэффициента анизотропии μ в круговом базисе необходимо эхо-сигнал в согласованном по поляризации канале разделить на эхо-сигнал в перекрестном канале, не проводя нормировки на излученный сигнал круговой поляризации. Тогда коэффициент анизотропии при облучении объекта электромагнитной волной правой круговой поляризации и приеме эхо-сигнала правой и левой поляризациями определяется из условия [55]:

$$\mu_{\text{прав}} = \frac{E_{\text{отр}}^{\text{прав}}}{E_{\text{изл}}^{\text{прав}}} / \frac{E_{\text{отр}}^{\text{лев}}}{E_{\text{изл}}^{\text{прав}}} = \frac{E_{\text{отр}}^{\text{прав}} \cdot E_{\text{изл}}^{\text{прав}}}{E_{\text{изл}}^{\text{прав}} \cdot E_{\text{отр}}^{\text{лев}}} = \frac{E_{\text{отр}}^{\text{прав}}}{E_{\text{отр}}^{\text{лев}}} = \frac{S_{11}(bk)}{S_{21}(bk)}, \quad (3.26)$$

а при облучении объекта левой круговой поляризации

$$\mu_{\text{лев}} = \frac{E_{\text{отр}}^{\text{лев}}}{E_{\text{отр}}^{\text{прав}}} = \frac{S_{22}(bk)}{S_{12}(bk)}. \quad (3.27)$$

Преимущество использования коэффициента анизотропии для распознавания объектов на фоне естественных помех определяется тем, что:

1. Коэффициент анизотропии не зависит от дальности до объекта, от метеоусловий на трассе распространения электромагнитной волны и не требуется никакой нормировки на компенсацию затухания энергии волны на трассе до объекта и от объекта до судовой РЛС.

2. Коэффициент анизотропии позволяет осуществить пороговую процедуру выделения объемных объектов на фоне вибраторов, т.к. реальные гидрометеорологические объекты с точки зрения μ близки к сигналам от вибраторов, что улучшает наблюдаемость объектов на фоне местности или моря.

3. Оценка μ не зависит от угла поворота объекта вокруг направления его радиолокационного наблюдения, что чрезвычайно важно для судовых РЛС при условии качки судна, т.к. не требуется строгой стабилизации антенны судовой РЛС. При обнаружении и распознавании метеообъектов, в связи с большим динамическим диапазоном эхо-сигналов метеообъектов, измерение коэффициента анизотропии необходимо проводить с помощью логарифмических приемников, позволяющих «сжать» их динамический диапазон. Тогда коэффициент анизотропии на выходе логарифмического приемника судовой РЛС определяется из условия:

$$\lg \mu = \lg S_{11}(bk) - \lg S_{21}(bk). \quad (3.28)$$

При этом порог приемных каналов также выбирается логарифмически.

Выводы к разделу 3

1 Проведен анализ поляризационной структуры радиолокационных сигналов круговой поляризации, который выявил особую роль левого и правого направления вращения электрического вектора при решении задачи радиолокационного распознавания как навигационных объектов на фоне естественных помех, так и гидрометеорологических объектов.

2 Сформулирована физико-математическая модель процесса отражения от различных объектов электромагнитной волны, излучаемой антенной судовой РЛС, характеризующего изменение поляризации излучаемой волны при ее взаимодействии с объектами, отличающимися своими физическими свойствами.

3 Определена необходимость использования некоординатной информации при решении задачи радиолокационного наблюдения объектов на фоне естественных помех.

4 В качестве основной характеристики рассеивающих свойств объекта радиолокационного наблюдения судовой РЛС, определен коэффициент анизотропии и отмечены его положительные аспекты.

5 При использовании в судовой РЛС, в качестве характеристики рассеивающей способности метеообъектов, коэффициента анизотропии возникает необходимость в логарифмическом приемнике для сжатия динамического диапазона эхо-сигналов.

Основные научные результаты раздела опубликованы в работах автора [67].

РАЗДЕЛ 4

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ ОБЪЕКТОВ СУДОВЫМИ РЛС В СЛОЖНЫХ СИТУАЦИОННЫХ УСЛОВИЯХ СРЕДЫ

4.1. Ситуационный анализ состояния наземной среды при использовании средств поляризационного распознавания объектов

Физические свойства наземной среды будем характеризовать модулем относительной диэлектрической проницаемости ϵ' . При радиолокационном обеспечении навигации возникает необходимость в радиолокационном различии сигналов, одновременно отраженных от двух объектов наземной среды. К таким объектам можно отнести береговую линию, острова, водную поверхность, которые и являются вещественными средами с различными значениями относительной диэлектрической проницаемости [52, 61].

Воспользуемся различием диэлектрической проницаемости вещественных сред для решения задачи их радиолокационного распознавания по пути судна. В качестве источника информации о среде будем анализировать поляризованную структуру эллиптически поляризованной волны, которая и открывает определенные возможности селекции эхо-сигналов от различных природных сред. Антенна судовой РЛС принимает отраженную электромагнитную волну эллиптической поляризации и увеличение объема информации о вещественных средах можно получить за счет трех параметров поляризационной структуры – коэффициента эллиптичности, угла пространственной ориентации поляризационного эллипса и направления вращения электрического вектора напряженности поля. Судовая поляризационная РЛС позволяет осуществить возвратно-наклонное зондирование подстилающей поверхности с измерением 4-х параметров Стокса отраженной волны, по которым с использованием определенных зависимостей

можно получить поляризационное различие эллиптически поляризованных волн, одновременно отраженных от двух вещественных сред, водной поверхности и поверхности вещественной среды, различающихся относительной диэлектрической проницаемостью.

Для рассматриваемых сред, размеры и главные радиусы кривизны поверхности значительно больше длины волны $\lambda = 3$ см, на которой работают судовые РЛС. С учетом этого деполяризация облучаемой волны зависит от диэлектрической проницаемости среды и угла ее облучения.

Подстилающая поверхность по своим электрическим и геометрическим характеристикам является разнообразной. При анализе эхо-сигналов ее можно разделить на три класса: гладкие, шероховатые и идеально диффузные. К гладким относятся спокойная водная поверхность и другие поверхности, если высота неровности h удовлетворяет критерию Релея

$$h = \frac{\lambda}{16 \cos \theta}, \quad (4.1)$$

где λ – длина волны, см;

θ - угол ориентации вектора излучаемой волны, град.

Отражение от идеально диффузной поверхности подчиняется закону Ламберта, согласно которому диаграмма направленности вторичного излучения имеет вид сферы, касательной к отражающей поверхности. Такие поверхности являются поляризационно-изотропными.

Отражение от шероховатых поверхностей определяется коэффициентом шероховатости $K_{ш}$, т.е.

$$K_{ш} = \frac{\theta \delta_n}{\lambda}, \quad (4.2)$$

где δ_n - средняя квадратическая высота неровностей.

Проведенный анализ отражающих свойств рассматриваемых поверхностей показал, что поляризация отраженной от них волны является эллиптической и определяется в основном диэлектрической проницаемостью отражающей поверхности.

Распознавание двух вещественных сред производится по наибольшему поляризационному различию эхо-сигналов при их радиолокационном зондировании. Поляризационное различие позволяет дистанционно обнаружить по пути судна острова, скальные выступы и береговую линию, что повышает безопасность мореплавания в условиях ограниченной видимости. По поляризационным параметрам эхо-сигналов на выходе приемников судового поляриметра, определяются поляризационные различия для двух сред, что дает возможность их радиолокационного распознавания.

Поляризационную селекцию эхо-сигналов от двух вещественных сред можно осуществить по следующим поляризационным параметрам [52]:

- коэффициенту поляризационных различий эхо-сигналов K_{Π} ;
- коэффициенту деформации $K_{\text{д}}$ эллипса поляризации, характеризующего различие коэффициентов эллиптичности эхо-сигналов двух вещественных сред;
- коэффициенту рассогласования $K_{\text{р}}$ в пространственной ориентации эллипсов поляризации эхо-сигналов двух вещественных сред.

Для поляризационного различия эхо-сигналов будем использовать следующие соотношения:

1. Коэффициент деформации эллипса поляризации

$$K_{\text{д}} = 10 \lg \frac{K_{\text{э}1}}{K_{\text{э}2}}, \text{ дБ} \quad (4.3)$$

где $K_{\text{э}1}$ и $K_{\text{э}2}$ - коэффициенты эллиптичности эллиптически поляризованных волн, одновременно отраженных от двух вещественных сред, которые определим через параметры Стокса следующим образом [95]:

$$K_{\varepsilon 1} = \frac{1 - \frac{\sqrt{I(t)_1 + V(t)_1}}{2}}{1 + \frac{\sqrt{I(t)_1 + V(t)_1}}{2}}, \quad (4.4)$$

$$K_{\varepsilon 2} = \frac{1 - \frac{\sqrt{I(t)_2 + V(t)_2}}{2}}{1 + \frac{\sqrt{I(t)_2 + V(t)_2}}{2}}, \quad (4.5)$$

где $I(t)$ и $V(t)$ - параметры Стокса отраженных волн.

Вместо коэффициентов эллиптичности $K_{\varepsilon 1}$ и $K_{\varepsilon 2}$ можно пользоваться углами эллиптичности α_1 и α_2

$$\alpha_1 = 0,5 \operatorname{arc} \sin \frac{V_1}{I_1}, \quad (4.6)$$

$$\alpha_2 = 0,5 \operatorname{arc} \sin \frac{V_2}{I_2}. \quad (4.7)$$

Тогда с учетом (4.6) и (4.7), коэффициент деформации эллипса поляризации будет

$$K_{\text{д}} = 10 \lg \frac{\alpha_1}{\alpha_2} = 10 \lg \frac{0,5 \operatorname{arc} \sin \frac{V_1}{I_1}}{0,5 \operatorname{arc} \sin \frac{V_2}{I_2}}, \quad (4.8)$$

2. Коэффициент поляризационных различий $K_{\text{п}}$

$$K_{\text{п}} = 10 \lg \frac{D_1}{D_2}, \text{ дБ} \quad (4.9)$$

где D_1 и D_2 - коэффициенты деполаризации, характеризующие преобразование поляризации зондирующего сигнала при его отражении от вещественных сред и определяются следующим образом:

$$D_1 = 0,5 \left[1 \pm \frac{4 K_{\varepsilon 1}}{2(1 + K_{\varepsilon 1}^2)} \right], \quad (4.10)$$

$$D_1 = 0,5 \left[1 \pm \frac{4 K_{\varepsilon 2}}{2(1 + K_{\varepsilon 2}^2)} \right]. \quad (4.11)$$

3. Коэффициент рассогласования K_p пространственной ориентации эллипсов поляризации эхо-сигналов

$$K_p = \theta_1 - \theta_2, \quad (4.12)$$

где θ_1 и θ_2 - углы пространственной ориентации эллипсов поляризации электромагнитных волн, отраженных от двух вещественных сред и определяются из условия:

$$\theta_1 = 0,5 \operatorname{arctg} \frac{U_1}{Q_1}, \quad (4.13)$$

$$\theta_2 = 0,5 \operatorname{arctg} \frac{U_2}{Q_2}, \quad (4.14)$$

где U и Q - параметры Стокса отраженных электромагнитных волн.

Приведенные формулы справедливы для гладких и шероховатых поверхностей. Наибольшее поляризационное различие эхо-сигналов от двух вещественных сред происходит при излучении электромагнитной волны круговой поляризации и приеме отраженной волны эллиптической поляризации антенной судового радиолокационного поляриметра.

Физической основой рассматриваемой поляризационной селекции радиолокационных сигналов, отраженных от различных сред, имеющих различные электрофизические параметры, является их свойство по-разному изменять поляризацию облучающей волны. При отражении три вида природной среды, таких как земная и водная поверхность, а также чистая

атмосфера, и при наличии в ней гидрометеоров, существенно различаются физическими процессами формирования эхо-сигналов. Вещественная среда при отражении электромагнитной волны вызывает ее деполяризацию. В общем случае под деполяризацией необходимо понимать любое преобразование поляризации облучающего сигнала при отражении от среды.

Рассмотрим параметры поляризационных различий эллиптически поляризованных радиоволн, одновременно отраженных от двух вещественных сред, которые могут встречаться на пути судна. К таким средам можно отнести морскую воду и строения (скалы), морскую воду и сухой песок, морскую воду и сухую почву, морскую воду и сырую холмистую местность. Относительная диэлектрическая проницаемость приведенных вещественных сред имеет следующие величины:

- морская вода - строения, скалы - $\epsilon' = 80$ и $\epsilon'' = 4$;
- морская вода – сухой песок - $\epsilon' = 80$ и $\epsilon'' = 2$;
- морская вода – сухая почва - $\epsilon' = 80$ и $\epsilon'' = 10$;
- морская вода – сырая холмистая местность - $\epsilon' = 80$ и $\epsilon'' = 20$.

Экспериментальное определение параметров поляризационных различий эллиптически поляризованных радиоволн, одновременно отраженных от двух вещественных сред, имеющих приведенные диэлектрические проницаемости, производилось с помощью экспериментальной радиолокационной измерительной установки, представленной на рис.4.1.

В качестве источника 3-х сантиметровых СВЧ колебаний был использован магнетронный генератор, работающий в импульсном режиме с частотой зондирующих импульсов 400 Гц. Поляризатор состоит из волноводного разделителя поляризации, разделяющего электромагнитную энергию на два канала с регулируемыми амплитудными и фазовыми характеристиками посредством аттенуаторов и фазовращателей. Поляризационный селектор в режиме излучения является сумматором двух ортогональных составляющих с заданными амплитудами и разностью фаз

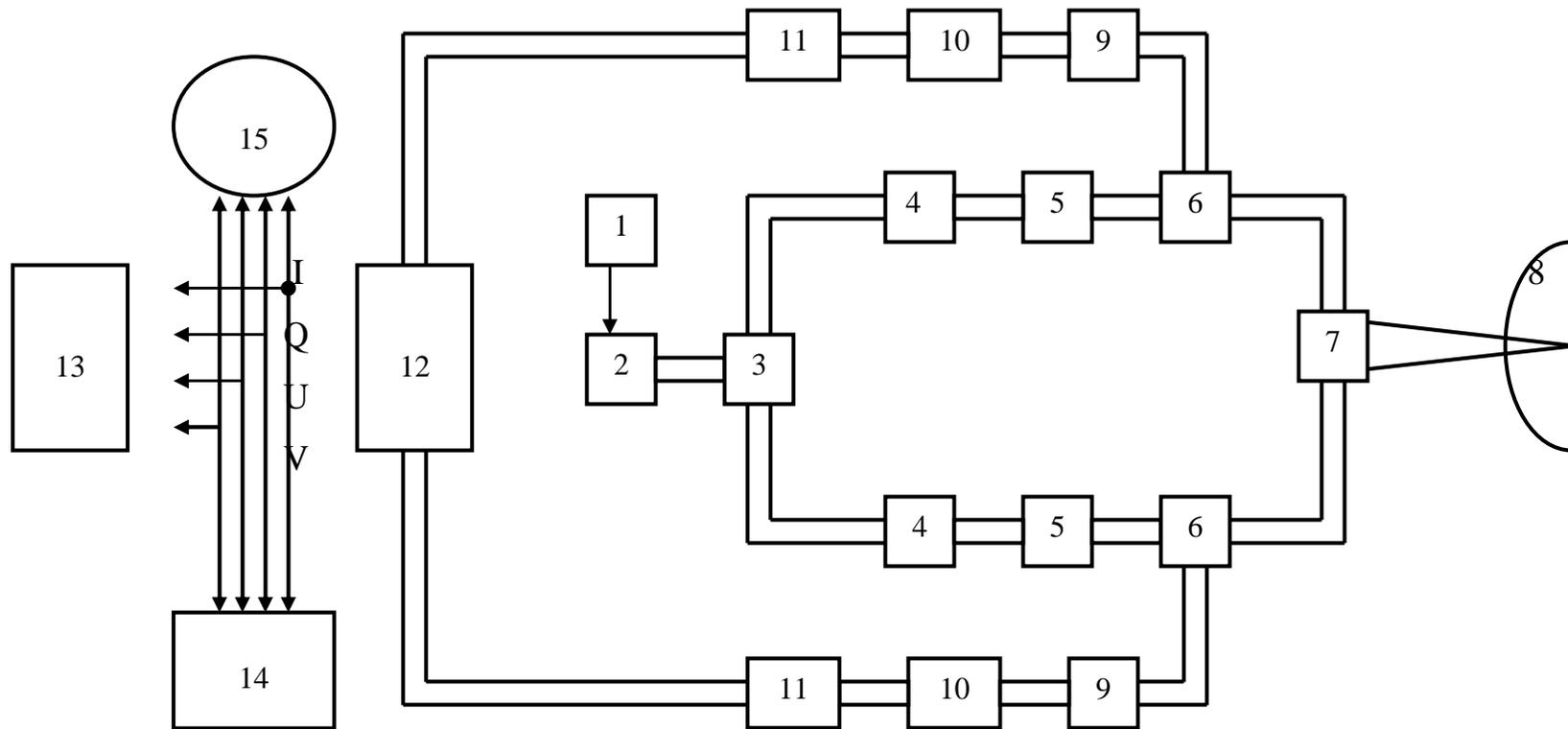


Рис.4.1. Функциональная схема измерительной установки

1 – модулятор; 2 – магнетронный генератор; 3 – разделитель поляризации; 4 – аттенюаторы; 5 – фазовращатели; 6 – антенные переключатели; 7 – поляризационный селектор; 8 – рупорный излучатель; 9 – щелевые волноводные мосты; 10 – приемники 2-х каналов; 11 – линейные усилители; 12 – устройство получения параметров Стокса; 13 – устройство параметров поляризационных различий; 14 – дисплей компьютера; 15 – индикатор.

между ними, что позволяет излучать электромагнитную волну любой поляризации, в том числе круговую.

В режиме приема поляризационный селектор разделяет отраженную волну в общем случае эллиптической поляризации на две ортогональные составляющие, поступающие на соответствующие линейные приемники. После усиления и преобразования ортогональные составляющие отраженной электромагнитной волны поступают на устройства получения параметров Стокса и параметров поляризационных различий.

Экспериментальные исследования проведены для каждой вещественной среды отдельно с вычислением поляризационных параметров по полученным параметрам Стокса. Затем вычислялись для двух сред параметры их поляризационных различий, т.е. K_d , K_{Π} и K_p , которые приведены в табл.4.1.

Таблица 4.1

Параметры поляризационных различий двух вещественных сред

Среда	ϵ'	Поляризационные параметры		
		K_d	K_{Π}	K_p
Морская вода – строения (скалы)	80 4	0.67	0.25	8.00
Морская вода – сухой песок	80 2	0.42	0.46	10.00
Морская вода – сухая почва	80 10	0.72	0.34	4.00
Морская вода – сырая холмистая поверхность	80 20	0.91	0.06	3.00

Для практического радиолокационного обнаружения второй среды на фоне эхо-сигнала от морской воды необходимо на пути судна:

- 1) излучить электромагнитную волну круговой поляризации;
- 2) измерить параметры Стокса отраженной электромагнитной волны от двух вещественных сред (в общем случае эллиптической поляризации);

3) измерить параметры поляризационных различий эллиптически поляризованных электромагнитных волн, одновременно отраженных в общем случае от двух вещественных сред, имеющих диэлектрические проницаемости: $\Sigma[\epsilon'_2 \epsilon'_{80}]$; $\Sigma[\epsilon'_4 \epsilon'_{80}]$; $\Sigma[\epsilon'_{10} \epsilon'_{80}]$; $\Sigma[\epsilon'_{20} \epsilon'_{80}]$;

4) произвести сравнение измеренных значений поляризационных параметров с поляризационными параметрами, полученными для каждой среды (табл.4.2);

Таблица 4.2

**Поляризационные параметры вещественных сред,
встречающихся на пути судна**

Среда	ϵ'	Коэффициент эллиптичности отраженной волны, K_{Σ}	Коэффициент деполаризации отраженной волны, D	Угол поворота эллипса поляризации отраженной волны, θ
Сухой песок (береговая линия)	2	0,11	0,20	5°
Строения (скалы)	4	0,40	0,10	12°
Сухая почва (береговая линия)	10	0,60	0,05	10°
Сырая холмистая местность	20	0,70	0,02	22°
Морская или пресная водная поверхность	80	0,85	0,01	32°

5) принять решение о наличии в зоне действия судового радиолокатора только морской среды с $\epsilon' = 80$ или любой из сред, в соответствии с табл.4.2;

б) в случае отличия поляризационных параметров отраженной от среды (или одновременно от двух сред) необходимо определить значение относительной диэлектрической проницаемости среды, от которой получены эхо-сигналы на выходе приемника судового поляриметра по следующей формуле:

$$\varepsilon' = \sin^2 \theta \left[1 + \left(\frac{\sqrt{\frac{I+V}{2}}}{\sqrt{\frac{I-V}{2}}} \right)^2 \right] \operatorname{tg}^2 \theta. \quad (4.15)$$

4.2. Поляризационная селекция эхо-сигналов морских объектов на фоне гидрометеорологических помех

Гидрометеорологические помехи в виде выпадающих осадков различной интенсивности оказывают с одной стороны маскирующее действие радиолокационному обнаружению объектов, находящихся в зонах осадков вследствие интенсивных отражений радиолокационного сигнала, а с другой стороны приводят к сокращению максимальной дальности обнаружения объектов. В иных случаях эхо-сигналы осадков могут быть приняты за ложные объекты радиолокационного наблюдения. Вопросам ослабления радиолокационных сигналов в гидрометеорообразованиях и оценке их влияния на работу РЛС посвящено достаточное количество работ как у нас стране, так и за рубежом [1-3, 6, 53, 54, 59, 78, 93, 94]. Однако до настоящего времени еще не разработаны методы, позволяющие полностью исключить влияние мешающего действия гидрометеоров на работу судовых РЛС. Одним из эффективных методов борьбы с отражениями от выпадающих осадков на пути судна является метод поляризационной селекции с использованием электромагнитных волн круговой поляризации на излучение и прием. При этом в эхо-сигнале присутствуют обе ортогональные составляющие, которые затем поступают на систему обработки с выделением определенных поляризационных параметров. К таким параметрам будем относить параметры Стокса, которые характеризуются высокой информативностью.

В разработанных к настоящему времени поляризационных методах ослабления мешающего действия выпадающих осадков на работу

радиолокационных станций используются взаимные антенны круговой поляризации и невзаимные антенны линейной поляризации .

Расчитанный коэффициент подавления при использовании антенны круговой поляризации и невзаимной линейной поляризации составляет собственно для ливневого и обложного дождя 16,5 и 19,5, 14,0 и 19,0. Эффективность использования указанных антенн зависит от отличия коэффициентов деполяризации эхо-сигналов осадков и объекта.

Мы будем использовать взаимную антенну эллиптической поляризации, излучающей электромагнитную волну круговой поляризации, которая позволяет обеспечить поляризационную селекцию эхо-сигналов на фоне осадков, выпадающих на пути судна. Эффект ослабления эхо-сигналов от выпадающего дождя при использовании электромагнитной волной круговой поляризации зависит от взаимной антенны круговой поляризации и поляризационных свойств осадков [96].

При отражении электромагнитной волны круговой поляризации происходит изменение направления вращения вектора электрического поля по отношению к направлению вращения вектора электрического поля облучающей волны. Если вектор поля вращается по часовой стрелке по отношению к наблюдателю, смотрящему на источник излучения, поляризация волны будет правой и наоборот. Вектор поля вращается в сторону составляющей электрического поля, отстающей по фазе на 90° . При отражении от изотропных капель дождя электромагнитная волна будет иметь круговую поляризацию с левым направлением вращения при их облучении электромагнитной волной круговой поляризации с правым направлением вращения. При отражении от объекта, имеющего ассиметричную форму, электромагнитная волна будет иметь эллиптическую поляризацию и левое направление вращения электрического вектора поля. Схематически отражение электромагнитной волны от дождя и объекта можно представить в следующем виде (рис.4.2).

Из рис.4.2 видно, что отраженную волну эллиптической поляризации можно представить в виде суммы двух векторов с круговой поляризацией, разных по модулю и направлению вращения (ν , ζ , δ). Рассмотрим прохождение отраженной электромагнитной волны от выпадающего обложного дождя и объекта через поляризационное устройство судовой РЛС.

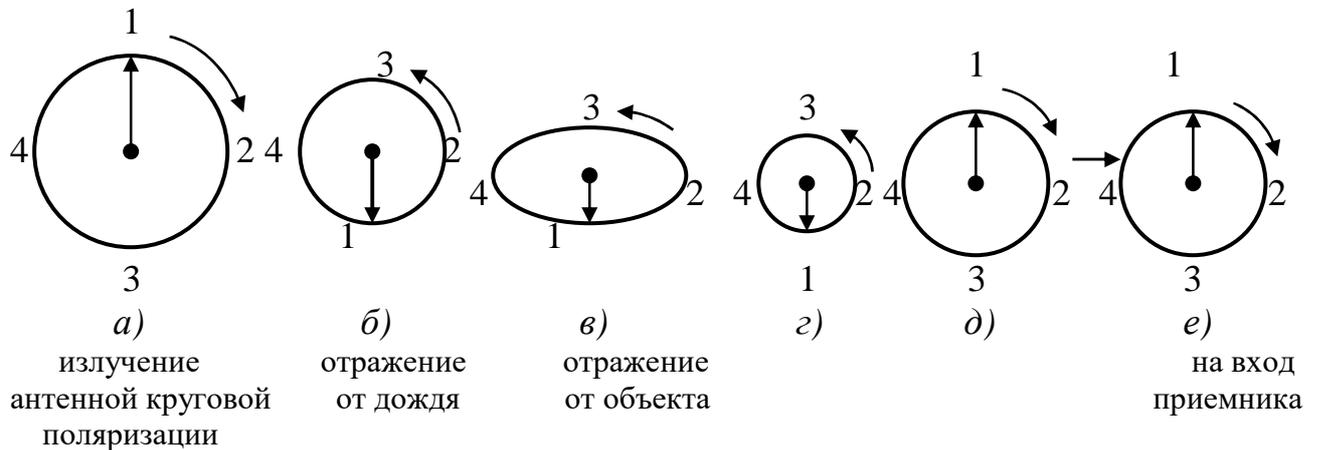


Рис.4.2. Векторное представление электромагнитной волны круговой и эллиптической поляризации, отраженной от дождя (б) и объекта (в)

При одновременном отражении от обложного дождя и объекта электромагнитная волна с выхода антенны поступает на устройство поляризации, состоящее из 2-х прямоугольных волноводов, в которых помещены два фазовращателя Φ на 90° , два щелевых моста (ЩМ) и поглощающая нагрузка (ПН). Энергия волны, отраженной от дождя, поступает на поглощающую нагрузку и полностью поглощается (рис.4.3).

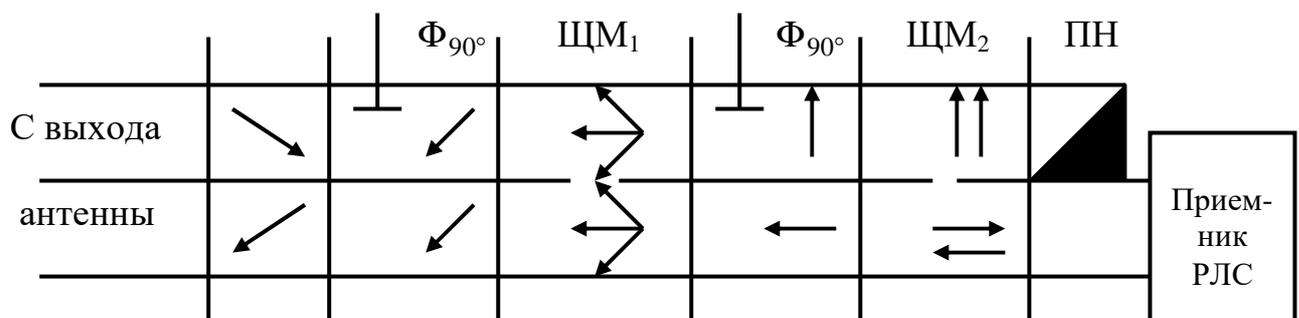


Рис.4.3. Прохождение электромагнитной волны, отраженной от дождя, через устройство поляризации

Отраженная электромагнитная волна от объекта (судна), имеющая компоненту круговой поляризации (Рис.4.2), которая совпадает по направлению вращения с направлением вращения излученной волны, полностью проходит на вход приемника РЛС, а затем на индикатор, где и создает отметку от объекта (Рис.4.4).

При отличии частиц осадков от сферы, часть отраженной энергии проходит на вход приемника вместе с эхо-сигналом от объекта, т.е. происходит неполная компенсация эхо-сигнала от осадков. В этом случае необходимо производить обнаружение объектов на фоне отражений от осадков. В реальных условиях поляризация эхо-сигнала, состоящего из сигнала объекта и помехи, может не совпадать с поляризацией приемной антенны. Поляризация эхо-сигнала объекта и помехи тоже может не совпадать. Поэтому в общем случае возникает необходимость использования оптимального статистического синтеза алгоритмов распознавания поляризованных эхо-сигналов объектов при наличии эхо-сигналов частично поляризованных помех.

Поляризационное состояние произвольной электромагнитной волны в каждый момент времени можно представить четырьмя статистически зависимыми случайными величинами, составляющими четырехмерный случайный вектор [54]. Свойства такого вектора могут быть охарактеризованы поляризационными параметрами Стокса, которые неразрывно связаны с физической природой источников излучения (рассеяния, отражения) радиоволн.

Статистические характеристики параметров Стокса частично-поляризованных радиоволн, огибающие ортогонально поляризованных компонент, которых подчиняются логарифмически-нормальному распределению, также подчиняются логарифмически-нормальному распределению [95-108].

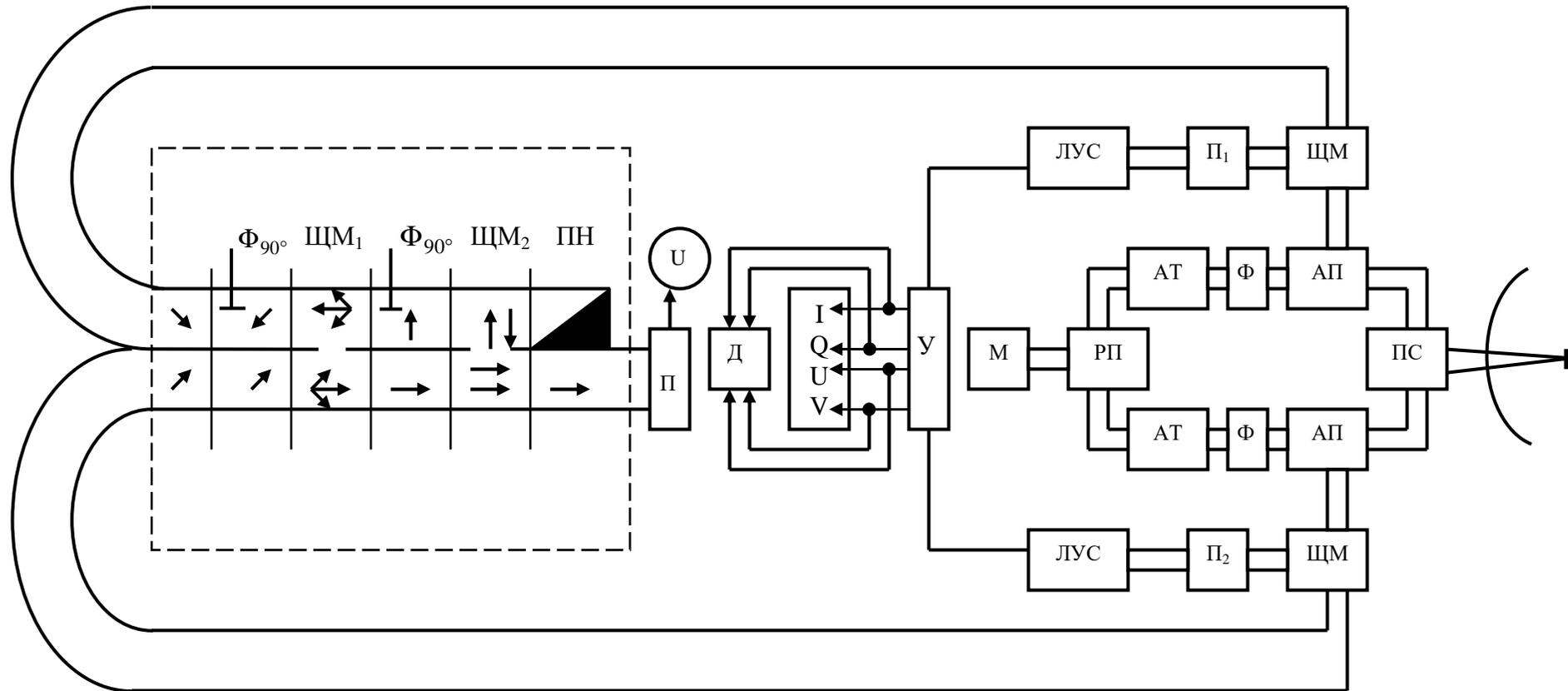


Рис. 4.4 . Функциональная схема судового поляриметра :

П – приемник; Д – дисплей компьютера; М – магнетрон; РП – разделитель поляризации; АТ – аттенюатор; Ф – фазовращатель; АП – антенный переключатель; ПС – поляризационный селектор; ЛУС – логарифмический усилитель; У – устройство получения параметров Стокса

Логарифмически-нормальное распределение используется при описании огибающих радиоволн различного происхождения, в том числе и при рассеянии радиоволн атмосферными образованиями, а также при отражении от кораблей, где радиолокационный сигнал при равно-вероятностном ракурсе судна рассматривается как сигнал, отраженный от одной плоскости, выбранной из некоторой совокупности и имеющий неровности, глубина которых распределена по нормальному закону. Экспериментальное подтверждение этому представлено в работе [106].

С учетом аналитических выражений совместной плотности вероятности фаз, приведенных в [41,62] интегральные функции распределения и начальные моменты параметров Стокса находятся из соотношений (4.16) и (4.17):

$$F(I, Q, U, V) = \int_{I, Q, U, V} W(I, Q, U, V) d(I, Q, U, V), \quad (4.16)$$

$$m_{I, Q, U, V} = \int_0^{\infty} I, Q, U, V W(I, Q, U, V) d(I, Q, U, V). \quad (4.17)$$

Здесь нижние пределы интегрирования зависят от конкретного вида параметра Стокса.

Будем считать, что электромагнитная волна, отраженная как от гидрометеоров, так и от судна, представляет стационарный эргодический случайный процесс в пространстве и времени, хотя, однако, свойство эргодичности не является следствием стационарности, а случайный процесс является эргодическим, если любая его статистическая характеристика, полученная по множеству возможных реализаций с вероятностью сколь угодно близкой к единице, может быть получена усреднением за достаточно большой промежуток времени из одной единственной реализации случайного процесса. Случайный процесс является стационарным, когда выражение для функции распределения вероятностей любого порядка не зависит от положения начала отсчета времени.

Для решения задачи распознавания статистическим методом будем использовать априорную информацию, которая характеризует объект распознавания и гидрометеорологическую помеху. Совокупностью признаков, характеризующих объект распознавания и помеху, могут являться параметры Стокса, которые образуют вектор признаков распознавания или предиктор, составляющими которого являются сами признаки, т.е. $\bar{X}(I, Q, U, V)$. Вероятностными характеристиками вектора признаков являются условные плотности вероятности вектора признаков, которые записываются для объекта ρ_o и помехи ρ_{Π} в виде:

$$\rho_o(I), \rho_o(Q), \rho_o(U), \rho_o(V), \rho_{\Pi}(I), \rho_{\Pi}(Q), \rho_{\Pi}(U), \rho_{\Pi}(V).$$

Условная плотность совместного распределения признаков распознавания объекта и помехи описывается законом их распределения W , т.е.

$$W_o(I, Q, U, V) \quad \text{и} \quad W_{\Pi}(I, Q, U, V),$$

или

$$\frac{W_o(I, Q, U, V) / O}{W_{\Pi}(I, Q, U, V) / \Pi}. \quad (4.18)$$

Закон распределения W предиктора \bar{X} показывает вероятность образования предиктора \bar{X} с данными значениями составляющих, т.е. параметров Стокса, при условии, что отраженный сигнал создан объектом или помехой. Эти законы либо взаимно пересекаются, либо нет (рис.4.5, а и б).

На рис.4.5,а законы не пересекаются и значения \bar{X} , принадлежащие объекту, заключены в интервале $[\bar{X}_1, \bar{X}_2]$, а помехи в интервале $[\bar{X}_3, \bar{X}_4]$.

Для случая (а) задача распознавания решается тривиально и безошибочно. В случае (б) интервал значений предиктора $[\bar{X}_3, \bar{X}_2]$ принадлежит и объекту,

и помехе. Поэтому для этого случая необходимо применение специальных статистических методов теории статистических решений.

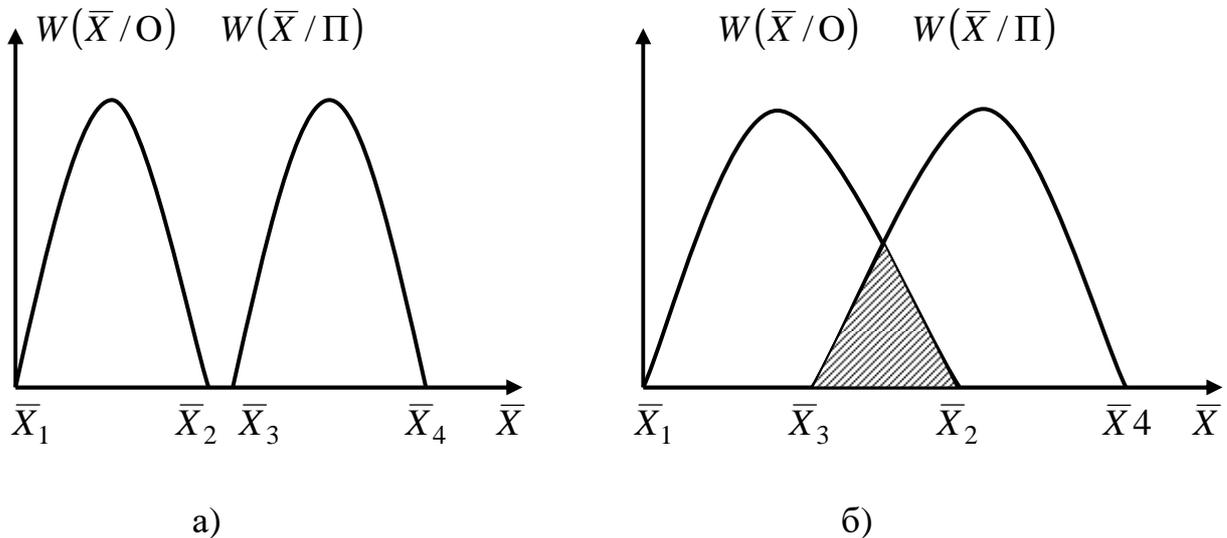


Рис. 4.5. Законы распределения вектора признаков распознавания для объекта и помехи

Распознавание объекта судовой РЛС при наличии гидрометеоров по измеренным четырем параметрам Стокса является задачей распознавания образов. Эту задачу можно решить на базе теоремы Байеса, или с использованием правила максимума правдоподобия. Будем использовать теорему вероятностей гипотез Байеса, которая позволяет провести переоценку вероятностей гипотез, составляющую полную группу несовместимых гипотез в связи с тем, что произошло некоторое событие A_i . Применим теорему Байеса для двух гипотез «объект» и «помеха», составляющих полную группу несовместимых гипотез, т.е.

$$P(O/A_i) = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{P(O)} - 1 \right) \frac{P(A_i/\Pi)}{P(A_i/O)}}, \quad (4.19)$$

где O и Π – гипотезы объекта и помехи;

$P(O)$ и $P(\Pi)$ - априорная вероятность объекта и помехи, для которых

$$P(O) + P(\Pi) = 1;$$

$P(A_i / \Pi)$ и $P(A_i / O)$ - условные вероятности события A_i .

За A_i принимается тот факт, что значение некоторого параметра Стокса X_1 заключено в пределах

$$\xi_k - \Delta \xi < X_c < \xi_k + \Delta \xi,$$

поэтому

$$\frac{P(A_i / \Pi)}{P(A_i / O)} \approx \frac{\rho_{\Pi}(\xi_k)}{\rho_o(\xi_k)}, \quad (4.20)$$

где $\rho_{\Pi}(\xi_k)$ и $\rho_o(\xi_k)$ - условные плотности распределения параметра X_c в случае помехи и объекта соответственно.

Рассматривая ряд событий A_1, A_2, \dots, A_i и учитывая то, что событие A_1 вследствие независимости событий A_1 и A_2 не изменяет вероятностей $P(A_2 / \Pi)$, $P(A_2 / O)$, можно найти вероятность гипотезы O при условии, что произошло и событие A_2 , принимая в формуле (4) за априорную вероятность $P(O)$ вероятность $P(O/A_1)$. В случае измерения четырех параметров Стокса $(X_{c1}, X_{c2}, X_{c3}, X_{c4})$ получим:

$$P(O / A_1 A_2 A_3 A_4) = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{P(O)} - 1 \right) \frac{1}{H} \frac{P(A_i / \Pi)}{P(A_i / O)}}. \quad (4.21)$$

Обозначим условную вероятность $P(O / A_1, A_2, A_3, A_4)$ через P_o с учетом (5) получим:

$$P_o = \frac{1}{1 + \frac{P(\Pi)}{P(O)} \frac{1}{H} \frac{\rho_{\Pi}(\xi_i)}{\rho_o(\xi_i)}}. \quad (4.22)$$

Значение $P(\Pi)/P(O)$ не оказывает влияние на качество разделения эхо-сигнала от объекта и помехи, а изменяет лишь пороговое значение P_o , при котором производится разделение. Полагая, что $P(\Pi)/P(O)=1$ вероятность обнаружения объекта можно рассчитать из условия:

$$P_o = \frac{1}{1 + \prod_{i=1}^4 \frac{\rho_{\Pi}(\xi_i)}{\rho_o(\xi_i)}}. \quad (4.23)$$

Производя радиолокационное измерение четырех параметров Стокса, можно по их измеренным значениям рассчитать вероятность распознавания объекта

$$P_o = \frac{1}{1 + \frac{\rho_{\Pi}(I) \cdot \rho_{\Pi}(Q) \cdot \rho_{\Pi}(U) \cdot \rho_{\Pi}(V)}{\rho_o(I) \cdot \rho_o(Q) \cdot \rho_o(U) \cdot \rho_o(V)}}. \quad (4.24)$$

Зависимость отношений правдоподобия $\rho_{\Pi}(X_c)/\rho_o(X_c)$ от значений X_c может быть построена по данным радиолокационных измерений параметров Стокса эхо-сигналов объекта и гидрометеорологической помехи.

Значения $\prod_{i=1}^4 \frac{\rho_{\Pi}(\xi_i)}{\rho_o(\xi_i)}$ можно рассчитать по следующей формуле:

$$\lg \prod_{i=1}^4 \frac{\rho_{\Pi}(\xi_i)}{\rho_o(\xi_i)} = \lg I + \lg Q + \lg U + \lg V \quad (4.25)$$

или

$$\prod_{i=1}^4 \frac{\rho_{\Pi}(\xi_i)}{\rho_o(\xi_i)} = I \cdot Q \cdot U \cdot V. \quad (4.26)$$

Так как вероятностными характеристиками совокупности признаков являются условные плотности вероятности вектора признаков, то плотность распределения предиктора \bar{X} описывается законом $W(\bar{X}/O)$ для объекта и законом $W(\bar{X}/\Pi)$ для помехи, которые являются функциями правдоподобия

вектора признаков \bar{X} . Закон $W(X/O)$ показывает вероятность образования предиктора \bar{X} с составляющими, имеющими измеренного значения параметров Стокса, если эхо-сигнал создан объектом, а закон $W(X/\Pi)$ - тоже, но эхо-сигнал создан выпадающими осадками. Поэтому отношения правдоподобия являются законами распределения предиктора \bar{X} , т.е.

$$\frac{\rho_{\Pi}(I) \cdot \rho_{\Pi}(Q) \cdot \rho_{\Pi}(U) \cdot \rho_{\Pi}(V)}{\rho_o(I) \cdot \rho_o(Q) \cdot \rho_o(U) \cdot \rho_o(V)} = \frac{W(I/\Pi) \cdot W(Q/\Pi) \cdot W(U/\Pi) \cdot W(V/\Pi)}{W(I/O) \cdot W(Q/O) \cdot W(U/O) \cdot W(V/O)}. \quad (4.27)$$

Тогда вероятность распознавания объекта запишется в виде:

$$P_o = \frac{1}{1 + \frac{W(I/\Pi) \cdot W(Q/\Pi) \cdot W(U/\Pi) \cdot W(V/\Pi)}{W(I/O) \cdot W(Q/O) \cdot W(U/O) \cdot W(V/O)}}. \quad (4.28)$$

Для нахождения вероятности распознавания объекта на фоне помех от выпадающих осадков, необходимо знать законы распределения параметров Стокса для помехи и объекта $W(\bar{X}/\Pi)$ и $W(\bar{X}/O)$.

Для нахождения законов распределения эхо-сигналов параметров Стокса объекта и помехи, которые являются нормальными, воспользуемся правилом максимума правдоподобия

$$\frac{W(\bar{X}/\Pi)}{W(\bar{X}/O)} \geq 1 \quad (4.29)$$

или с преобразованием левой части, получим

$$\frac{W(I/O)}{W(I/\Pi)} = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_o}} e^{-\frac{(I-m_o)^2}{2\sigma_o^2}}}{\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_\Pi}} e^{-\frac{(I-m_\Pi)^2}{2\sigma_\Pi^2}}}, \quad (4.30)$$

$$\frac{W(Q/O)}{W(Q/\Pi)} = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_o}} e^{-\frac{(Q-m_o)^2}{2\sigma_o^2}}}{\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_\Pi}} e^{-\frac{(Q-m_\Pi)^2}{2\sigma_\Pi^2}}}, \quad (4.31)$$

$$\frac{W(U/O)}{W(U/\Pi)} = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_o}} e^{-\frac{(U-m_o)^2}{2\sigma_o^2}}}{\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_\Pi}} e^{-\frac{(U-m_\Pi)^2}{2\sigma_\Pi^2}}}, \quad (4.32)$$

$$\frac{W(V/O)}{W(V/\Pi)} = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_o}} e^{-\frac{(V-m_o)^2}{2\sigma_o^2}}}{\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_\Pi}} e^{-\frac{(V-m_\Pi)^2}{2\sigma_\Pi^2}}}, \quad (4.33)$$

где I, Q, U, V - измеренные на судовом поляриметре поляризационные параметры Стокса;

m_o, m_Π - математические ожидания параметров Стокса объекта и помехи (определяются по массиву экспериментальных измерений);

σ_o^2, σ_Π^2 - дисперсии параметров Стокса объекта и помехи.

Проведя преобразование (4.29) и (4.30 – 4.33) получим следующие неравенства:

$$\frac{\sigma_{\Pi}}{\sigma_o} e^{a(I)^2 + bI + c} \geq 1, \quad (4.34)$$

$$\frac{\sigma_{\Pi}}{\sigma_o} e^{a(Q)^2 + bQ + c} \geq 1, \quad (4.35)$$

$$\frac{\sigma_{\Pi}}{\sigma_o} e^{a(U)^2 + bU + c} \geq 1, \quad (4.36)$$

$$\frac{\sigma_{\Pi}}{\sigma_o} e^{a(V)^2 + bV + c} \geq 1, \quad (4.37)$$

где
$$a = \frac{\sigma_o^2 - \sigma_{\Pi}^2}{2\sigma_o^2\sigma_{\Pi}^2}; \quad b = \frac{m_o\sigma_{\Pi}^2 - m_{\Pi}\sigma_o^2}{\sigma_o^2\sigma_{\Pi}^2}; \quad c = \frac{m_{\Pi}^2\sigma_o^2 - m_o^2\sigma_{\Pi}^2}{2\sigma_o^2\sigma_{\Pi}^2}. \quad (4.38)$$

Если измеренные значения I , Q , U , V такие, что условия (4.34 – 4.37) становятся справедливыми, то принимается решение, что в зоне действия судового поляриметра находится объект, и наоборот, судовой поляриметр видит выпадающие осадки.

Для практического использования соотношений (4.34 – 4.38) проведем их логарифмирование по основанию «е» и получим:

$$a (\lg I)^2 + b \lg I + c \geq \ln \frac{\sigma_o}{\sigma_{\Pi}}, \quad (4.39)$$

$$a (\lg Q)^2 + b \lg Q + c \geq \ln \frac{\sigma_o}{\sigma_{\Pi}}, \quad (4.40)$$

$$a (\lg U)^2 + b \lg U + c \geq \ln \frac{\sigma_o}{\sigma_{\Pi}}, \quad (4.41)$$

$$a (\lg V)^2 + b \lg V + c \geq \ln \frac{\sigma_o}{\sigma_{\Pi}}. \quad (4.42)$$

Решая эти неравенства относительно I , Q , U , V получим их критериальные значения. Тогда при всех значениях $\lg I \geq \lg I_{\text{кр}}$, $\lg Q \geq \lg Q_{\text{кр}}$, $\lg U \geq \lg U_{\text{кр}}$, $\lg V \geq \lg V_{\text{кр}}$ неравенства (4.39 – 4.42) будут справедливыми. Тогда измеренные значения параметров I , Q , U , V сравниваются с их критериальными значениями $I_{\text{кр}}$, $Q_{\text{кр}}$, $U_{\text{кр}}$, $V_{\text{кр}}$.

Если $I, Q, U, V > I_{\text{кр}}, Q_{\text{кр}}, U_{\text{кр}}, V_{\text{кр}}$, то принимается решение что судовой поляриметр сопровождает объект, и наоборот, если $I, Q, U, V < I_{\text{кр}}, Q_{\text{кр}}, U_{\text{кр}}, V_{\text{кр}}$, что на экране судового поляриметра имеются отметки от выпадающих осадков, т.е. объект отсутствует. В комплексном виде алгоритм решения задачи распознавания объекта при наличии помехи в виде выпадающих осадков можно представить в следующей последовательности:

1. Излучаемую волну представим в виде матрицы параметров Стокса в круговом базисе

$$\begin{bmatrix} I_{\text{изл}} \\ 0 \\ 0 \\ V_{\text{изл}} \end{bmatrix}. \quad (4.43)$$

2. При наличии объекта и помехи в виде выпадающих осадков отраженный сигнал также представим в виде матрицы

$$\begin{bmatrix} I_{\text{отр}}(t)_{\text{o+п}} \\ Q_{\text{отр}}(t)_{\text{o+п}} \\ U_{\text{отр}}(t)_{\text{o+п}} \\ V_{\text{отр}}(t)_{\text{o+п}} \end{bmatrix}. \quad (4.44)$$

3. Если помеха отсутствует, то отраженный сигнал от объекта запишется матрицей в следующем виде:

$$\begin{bmatrix} I_{\text{отр}}(t)_{\text{o}} \\ Q_{\text{отр}}(t)_{\text{o}} \\ U_{\text{отр}}(t)_{\text{o}} \\ V_{\text{отр}}(t)_{\text{o}} \end{bmatrix}. \quad (4.45)$$

Считаем, что элементы поляризационной матрицы гидрометеорологической помехи являются нормальными случайными функциями и их средние значения равны нулю.

4. Для решения задачи распознавания объекта на фоне гидрометеорологических помех, т.е. для обнаружения эхо-сигнала объекта образуем отношение правдоподобия в виде:

$$\begin{aligned} D(I_{\text{отр}}, Q_{\text{отр}}, U_{\text{отр}}, V_{\text{отр}}) &= \frac{W_{\text{o+п}}(I_{\text{отр.o+п}}, Q_{\text{отр.o+п}}, U_{\text{отр.o+п}}, V_{\text{отр.o+п}})}{W_{\text{п}}(I_{\text{отр.п}}, Q_{\text{отр.п}}, U_{\text{отр.п}}, V_{\text{отр.п}})} = \\ &= \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^4 (\sigma_{I_{\text{o+п}}} \sigma_{Q_{\text{o+п}}} \sigma_{U_{\text{o+п}}} \sigma_{V_{\text{o+п}}})} \cdot \\ &= \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^4 (\sigma_{I_{\text{п}}} \sigma_{Q_{\text{п}}} \sigma_{U_{\text{п}}} \sigma_{V_{\text{п}}})} \end{aligned}$$

$$\frac{\exp - \left[\frac{(I_{o+\Pi} - m_{I_{o+\Pi}})^2}{2 \sigma_{I_{o+\Pi}}^2} \cdot \frac{(Q_{o+\Pi} - m_{Q_{o+\Pi}})^2}{2 \sigma_{Q_{o+\Pi}}^2} \cdot \frac{(U_{o+\Pi} - m_{U_{o+\Pi}})^2}{2 \sigma_{U_{o+\Pi}}^2} \cdot \frac{(V_{o+\Pi} - m_{V_{o+\Pi}})^2}{2 \sigma_{V_{o+\Pi}}^2} \right]}{\exp - \left[\frac{(I_{\Pi} - m_{I_{\Pi}})^2}{2 \sigma_{I_{\Pi}}^2} \cdot \frac{(Q_{\Pi} - m_{Q_{\Pi}})^2}{2 \sigma_{Q_{\Pi}}^2} \cdot \frac{(U_{\Pi} - m_{U_{\Pi}})^2}{2 \sigma_{U_{\Pi}}^2} \cdot \frac{(V_{\Pi} - m_{V_{\Pi}})^2}{2 \sigma_{V_{\Pi}}^2} \right]} \quad (4.46)$$

5. Если $D \geq D_0$, то отраженный сигнал создан объектом, если $D < D_0$ - отраженный сигнал создан помехой. Здесь D_0 - порог, определяемый критерием выбора решения.

4.3. Влияние выпадающих осадков на радиолокационное обнаружение морских объектов судовыми некогерентными двухканальными РЛС

Выпадающие осадки различной интенсивности на пути судна оказывают существенное влияние на дальность обнаружения объектов судовыми некогерентными РЛС. Это влияние выражается в ослаблении радиоволн осадками по трассе распространения, а также в отражении излучаемых антенной РЛС электромагнитных волн от частиц выпадающих осадков в районе нахождения объекта. Радиолокационный контраст объекта на фоне выпадающих осадков определенной интенсивности может резко понизиться и сократится максимальная дальность его обнаружения, т.е. ухудшаются условия радиолокационного наблюдения объекта.

Радиолокационный контраст отметки от объекта, находящегося в зоне выпадающих осадков, определим из известного условия:

$$K_o = 1 - \frac{1}{1 + \frac{P_o}{P_{\phi}}}, \quad (4.47)$$

где P_o и P_ϕ - мощность эхо-сигналов объекта и фона соответственно.

Мощность эхо-сигнала объекта находится с помощью следующей формулы [109]:

$$P_o = \frac{P_{\text{и}} G^2 \lambda^2 \sigma_o}{(4\pi)^3 R^4} K_{\text{ос}} C_1 = \Pi_9 \frac{\sigma_o}{R^4} K_{\text{ос}} C_1, \quad (4.48)$$

а мощность эхо-сигнала выпадающих осадков (гидрометеорологического фона) запишется в виде:

$$P_\phi = \frac{\pi^3 P_{\text{и}} G^2 \theta^2 h}{512 R^2 \lambda^2} \sum_{d_i} N(d_i) d_i^6 \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 K_{\text{ос}} K_3 C_1 C_2 = \Pi_9 \frac{Z_\phi}{R^2} K_{\text{ос}} K_3 C_1 C_2. \quad (4.49)$$

В уравнениях (4.48) и (4.49) :

$P_{\text{и}}$ - излучаемая мощность, *Вт*;

G - коэффициент усиления антенны;

λ - длина волны, *см*;

θ - ширина диаграммы направленности антенны, *град*;

h - пространственная протяженность импульса, *м*;

R - расстояние до объекта и фона, *км*;

$K_{\text{ос}}$ - коэффициент ослабления газами атмосферы и осадками;

K_3 - коэффициент заполнения радиолокационного объема частицами осадков;

C_1 и C_2 - размерные коэффициенты;

m - комплексный показатель преломления вещества частиц осадков (вода, лед, снег);

σ_o - эффективная площадь рассеяния объекта;

Π_9 - энергетический потенциал РЛС.

Величина

$$\sum_{d_i} N(d_i) d_i^6 \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 = Z_\Phi \quad (4.50)$$

является радиолокационной отражаемостью гидрометеорологического фона, которая связана с интенсивностью I выпадающих осадков следующей зависимостью [9]:

$$Z = AI^b, \quad (4.51)$$

где A и b - коэффициенты, значения которых для дождей находятся в пределах $9 \leq A \leq 2000$ и $b = 1,82$.

Тогда с учетом (4.50) и (4.51), уравнение (4.49) запишется в виде:

$$P_\Phi = \Pi_\varepsilon \frac{I^{1,6}}{R^2} K_{oc} K_3 C_1 C_2. \quad (4.52)$$

Считая Π_ε , K_{oc} , K_3 , C_1 , C_2 - известными, подставим (4.48) и (4.52) в (4.47), тогда выражение для контраста объекта получим в следующем виде:

$$K_o = 1 - \frac{1}{1 + \frac{\sigma_o}{R^2 I^{1,6}}}. \quad (4.53)$$

Анализ выражения (4.53) показывает, что с увеличением интенсивности выпадающих осадков, на фоне которых наблюдается объект с эффективной поверхностью рассеяния σ и уменьшением его отражающих свойств, контраст его изображения на индикаторе РЛС уменьшается. Для разных объектов, у

которых различные σ , при одной и той же интенсивности выпадающих осадков на входе приемника судовой РЛС будут различные отношения $\frac{P_o}{P_\phi}$.

При известном энергетическом потенциале судовой РЛС, ЭПР объекта, интенсивности выпадающих осадков на измеренном расстоянии R , на котором находится объект радиолокационного наблюдения, минимальное отношение $\frac{P_o}{P_\phi}$, при котором еще возможно получить контраст изображения объекта на индикаторе судовой РЛС, легко вычисляется по следующему соотношению:

$$\left(\frac{P_o}{P_\phi}\right)_{\min} = \frac{\sigma_o}{R^2 I^{1,6}}. \quad (4.54)$$

Из (4.54) видно, что для данного объекта и измеренной интенсивности выпадающих осадков отношение $\left(\frac{P_o}{P_\phi}\right)_{\min}$ обратно пропорционально R^2 , т.е. отношению $\left(\frac{P_o}{P_\phi}\right)_{\min}$ соответствует такое $R_{\text{пред}}$, при котором объект еще различим на фоне эхо-сигнала выпадающих осадков. При превышении объектом $R_{\text{пред}}$, он уже не будет обнаруживаться судовой РЛС, т.е.

$$\frac{P_o}{P_\phi} = \frac{\sigma_o}{R_{\text{пред}}^2 I^{1,6}}. \quad (4.55)$$

$R_{\text{пред}}$ назовем дальностью маскировки объекта радиолокационного наблюдения выпадающими осадками, которая находится из уравнения (4.55)

$$R_{\text{пред}} = \sqrt{\frac{\sigma_o}{\frac{P_o}{P_{\phi}} I^{1,6}}} \quad (4.56)$$

или с учетом энергетического потенциала РЛС, куда входит отношение $\frac{P_o}{P_{\phi}}$,

$R_{\text{пред}}$ запишется в виде:

$$R_{\text{пред}} = \sqrt{\frac{\sigma_o}{I^{1,6}}} \cdot \Pi'_3, \quad (4.57)$$

где $\Pi'_3 = \Pi_3 \frac{P_o}{P_{\phi}}$, а $\Pi_3 = \frac{\pi^3 P_{\text{и}} G^2 \theta^2 h}{512 \lambda^2}$.

Формула (4.57) показывает, что для определения максимальной дальности радиолокационного обнаружения объекта достаточно вычислить лишь отношение $\frac{\sigma_o}{I^{1,6}}$, т.к. все остальные величины известны.

Определим дальность маскировки объектов морского транспорта выпадающими осадками. Расчет проведем для транспорта малого тоннажа $\sigma_o = 150\text{м}^2$, транспорта среднего тоннажа $\sigma_o = 7500\text{м}^2$, транспорта большого тоннажа $\sigma_o = 15000\text{м}^2$ и катера $\sigma_o = 100\text{м}^2$, т.е. получим зависимость $R_{\text{пред}} = f(I)$. Результаты расчета представлены в табл.4.3.

Полученные результаты позволяют определять дальность маскировки объекта радиолокационного наблюдения осадками определенной интенсивности для судовой РЛС, работающей в сантиметровом диапазоне длин волн.

Таблица 4.3

**Результаты расчетов $R_{\text{пред}}$ в зависимости от интенсивности выпадающего
дождя и тоннажа транспорта**

I , мм/ч	$\sigma_o = 100\text{м}^2$	$\sigma_o = 150\text{м}^2$	$\sigma_o = 7500\text{м}^2$	$\sigma_o = 15000\text{м}^2$
0,25	7 625	9 328	65 957	93 278
1,25	2 103	2 576	18 217	25 763
2,5	1 207	1 478	10 451	14 780
12,5	333	408	2 884	4 079
25,0	191	234	1 657	2 344
50,0	110	134	951	1 345
100,0	63	77	546	773
150,0	45	56	395	559
200,0	36	44	314	444
250,0	30	37	262	371
300,0	26	32	227	320

Представленная методика заключается в нахождении для наблюдаемого объекта и данных метеоусловий значения $R_{\text{пред}}$, с использованием формулы (4.57) с известным энергетическим потенциалом судового радиолокатора, а затем прогнозирования радиолокационной наблюдаемости объекта по его отражающим свойствам на фоне выпадающих осадков определенной интенсивности путем сравнения $R_{\text{пред}}$ с R объекта в метеообразовании, которая измеряется судовым радиолокатором. Техническую реализацию задачи обнаружения объекта в выпадающих осадках на $R_{\text{пред}}$ по пути судна судовым радиолокатором будем осуществлять с помощью щелевой антенны круговой поляризации.

Задача обнаружения объекта на фоне выпадающих осадков состоит в использовании поляризационной селекции, позволяющей по данным о поляризации излученной волны и эхо-сигнала выделить объект из гидрометеорологического фона. Будем исходить из того, что поляризационные характеристики объекта и помехи нам известны. Поэтому поляризацию

облучающей волны выбираем из условия получения максимального эхосигнала объекта с учетом поляризации антенны судовой РЛС. Будем использовать в антенне судового поляриметра излучатель в виде крестообразной щели в широкой стенке прямоугольного волновода с основным типом волны TE_{01} , с продольной H_z и поперечной H_x компонентами магнитного поля.

Эти компоненты отличаются по фазе друг от друга на 90° и записываются в известном виде :

$$H_x = H_0 \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2 \sin^2 \frac{\pi x}{a}}, \quad (4.58)$$

$$H_y = -j H_0 \left(\frac{\lambda}{2a}\right) \cos \frac{\pi x}{a}, \quad (4.59)$$

где H_0 - постоянная величина;

λ - длина волны в свободном пространстве;

a - ширина волновода;

x - поперечная координата.

В широкой стенке прямоугольного волновода прорезаны две перпендикулярные щели резонансной длины с коническим профилем. Щели вырезаются в точке прямоугольного волновода, в которой $|H_z| = |H_x|$, а их координаты определяются соотношением

$$x = \frac{a}{\pi} \arctg \left[\pm \sqrt{\left(\frac{2a}{\lambda}\right)^2 - 1} \right]. \quad (4.60)$$

Такие щели излучают электромагнитную волну круговой поляризации.

В режиме приема анализируемая в общем случае эллиптически поляризованная волна, представляемая как две волны круговой поляризации с противоположным направлением вращения векторов поля возбуждает две

волны, которые распространяются в прямоугольном волноводе в разные стороны. Направления распространения волн определяются направлениями вращения, а их амплитуды и фазы – амплитудами и фазами круговых компонент анализируемой волны (рис.4.6).

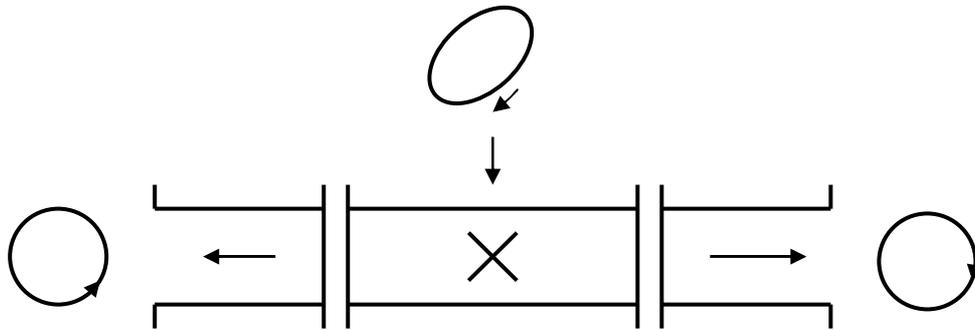


Рис.4.6. Волноводный излучатель в режиме приема

Указанное свойство щели в режиме приема является следствием того, что в режиме излучения направление вращения вектора поля излучаемой волны зависит от направления распространения волны в волноводе или от места расположения крестообразной щели относительно осевой линии при выбранном направлении распространения волны.

Если частицы осадков имеют сферическую форму, то нулевой поляризацией для них является круговая поляризация, т.к. при отражении она изменяет направление вращения, т.е. становится ортогональной. Поэтому отраженная волна круговой поляризации от осадков со сферической формой частиц через щель проходит только в левый волновод, в правый волновод энергия не проходит (свойство щели).

Если форма выпадающих осадков отличается от сферы, то отраженная волна будет иметь эллиптическую поляризацию и ее можно представить в виде двух волн круговой поляризации с противоположным направлением вращения векторов поля с определенными амплитудами и разностью фаз в 90° между ними.

Причем основная часть отраженной энергии в виде волны круговой поляризации с левым направлением вращения поступит на приемник I, а незначительная часть энергии волны образует волну круговой поляризации с правым направлением вращения и поступит на вход приемника II (рис.4.7). Излучаемая волна имеет правое направление вращения вектора поля.

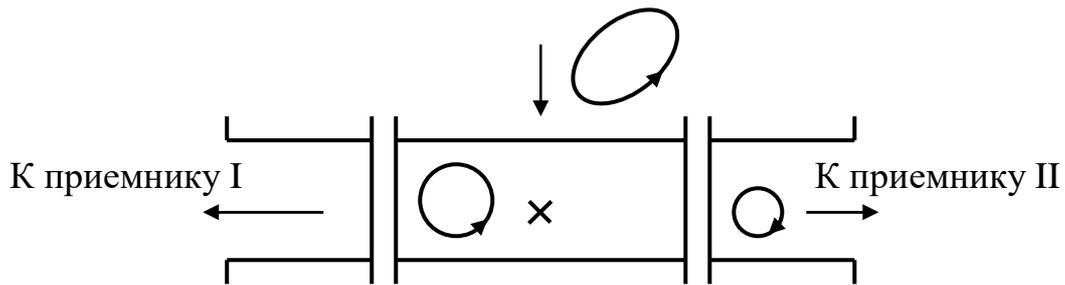


Рис. 4.7. Прием эхо-сигнала от несферических частиц выпадающих осадков

Эхо-сигналы объектов в общем виде эллиптически поляризованы, однако в них можно выделить пары плоских участков, перпендикулярных друг другу и образующих двугранный уголкового отражатель, создающий эхо-сигнал круговой поляризации, с которым антенна согласована, т.к. направление вращения при двукратном отражении меняется дважды. Энергия эхо-сигнала круговой поляризации от объекта проходит по волноводу к приемнику II (рис.4.8).

Эхо-сигналы круговой поляризации от выпадающих осадков после их преобразования и усиления приемником I используется для измерения их интенсивности и координат.

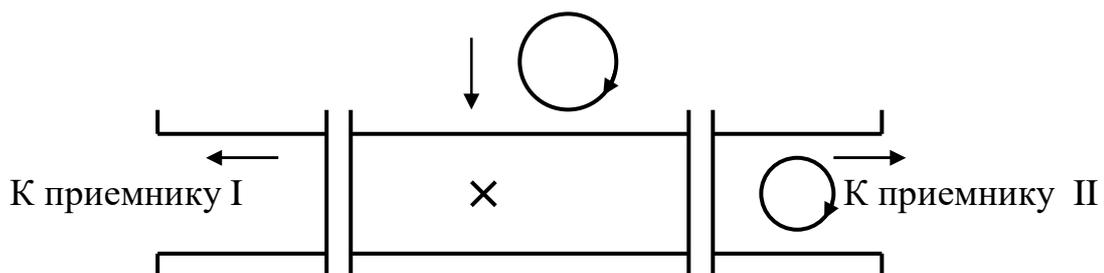


Рис.4.8. Прием эхо-сигнала объекта

Функциональная схема экспериментального макета локатора с излучателем в виде крестообразной щели в широкой стенке прямоугольного волновода представлена на рис.4.9 [97].

Циркулятор 3 представляет собой соединение прямоугольных волноводов под углом 120° с ферритовым намагниченным стержнем в центре соединения. Электромагнитная энергия от передатчика 1 в режиме передачи полностью проходит в левое плечо циркулятора и далее к щелевой антенне 6, излучаясь в виде волны круговой поляризации. В правое плечо циркулятора энергия от передатчика поступать не будет, т.к. при равенстве амплитуд в левом и правом плече циркулятора первичное и переизлученное поля в левом плече синфазны,

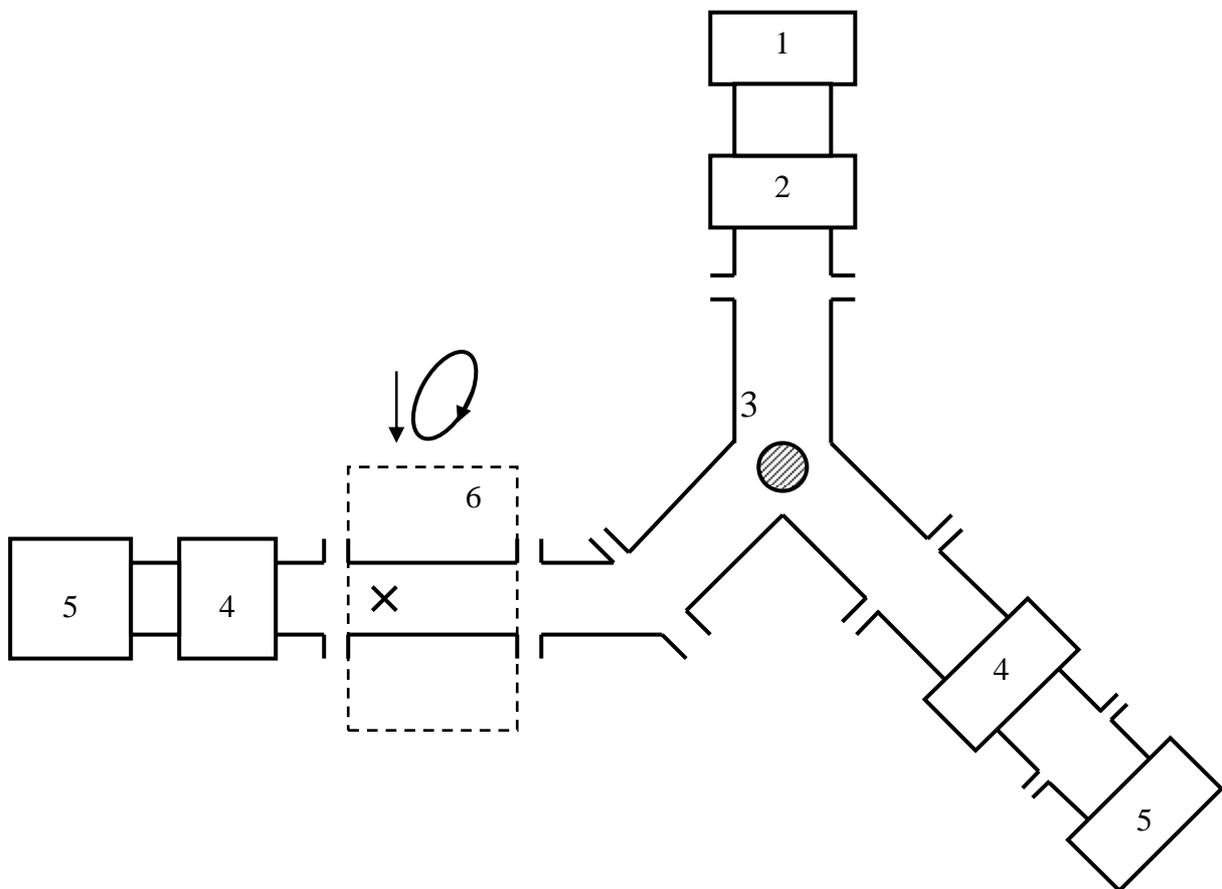


Рис.4.9. Функциональная схема экспериментального макета судового радиолокатора: 1 – передатчик; 2 – разрядник блокировки передатчика; 3 – У-циркулятор; 4 – разрядники защиты приемников; 5 – приемники I и II каналов; 6 - излучатель

а в правом противофазны. В силу симметрии плеч циркулятора, в режиме приема, эхо-сигналы с выхода антенны поступают только на приемники 5, т.к. энергия с левого плеча циркулятора поступает только в правое и не проходит в сторону передатчика 1.

Выводы к разделу 4

Методы поляризационной селекции эхо-сигналов от двух вещественных сред и от морских объектов на фоне гидрометеорологических помех базируются на методологическом подходе, характеризующем процесс изменения поляризационных параметров электромагнитной волны при ее взаимодействии с наблюдаемым объектом и средой.

Наиболее информативными параметрами поляризационного различия оказались коэффициент деформации поляризационного эллипса, коэффициент поляризационных различий и коэффициент рассогласования пространственной ориентации эллипсов поляризации эхо-сигналов.

Используя оптимальный статистический синтез алгоритмов распознавания поляризационных эхо-сигналов объектов радиолокационного наблюдения при наличии эхо-сигналов частично поляризованной помехи с представлением электромагнитной волны в каждый момент времени четырьмя статистическими параметрами Стокса, решена задача распознавания объектов при наличии выпадающих осадков.

Разработаны функциональные схемы радиолокационных поляризационных устройств, реализующих методы поляризационной селекции эхо-сигналов от двух вещественных сред и от морских объектов при наличии выпадающих осадков.

Осуществлена техническая реализация задач обнаружения и распознавания объектов при наличии выпадающих осадков судовыми некогерентными РЛС.

Разработаны методы обнаружения и распознавания объектов в сложных ситуационных состояниях среды и их техническая реализация в виде функциональных схем построения судовых РЛС, которые позволяют повысить эффективность и безопасность судовождения.

Содержание данного раздела отражено в работах автора [95-97].

РАЗДЕЛ 5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗИ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ С ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ОБЪЕКТОВ

Решение вспомогательных задач исследования требует экспериментального подтверждения для их правомерного использования при радиолокационном наблюдении объектов в сложных ситуационных состояниях среды. Возникает необходимость по результатам экспериментальных исследований провести анализ влияния гидрометеообразований на работу судовой РЛС, а также по радиолокационному сигналу установить не только характеристики наблюдаемого объекта, но и характеристики атмосферных образований, на фоне которых судовая РЛС производит наблюдение за объектом.

Радиолокационная информация об объекте и гидрометеорологической среде позволит проводить дистанционное обнаружение и распознавание объектов на пути судна в сложных гидрометеорологических условиях с использованием различных методов, в том числе и методов поляризационной селекции. Методы поляризационной селекции могут быть реализованы в радиолокационных судовых поляриметрах с обязательным приемом и обработкой ортогональных эхо-сигналов. Поэтому принцип построения радиолокационных судовых поляриметров включает определенные системы, позволяющие измерять различные характеристики электромагнитных волн, по которым и производится поляризационная селекция радиолокационных сигналов объекта и фона.

Экспериментальное исследование по радиолокационному обнаружению и распознаванию судов, находящихся в зоне выпадающего дождя Одесского залива были проведены 30 и 31 мая 2013 года с помощью экспериментального макета судового радиолокационного поляриметра.

5.1. Принцип построения судового радиолокационного поляриметра, методы поляризационной селекции сигналов объекта и гидрометеорологического фона

Оптимальная схема построения судового поляриметра, позволяет излучать электромагнитную волну любой поляризации, в том числе и неполяризованную, осуществлять прием двух ортогональных компонент (если не используется аффинный базис) отраженной волны и производить поляризационный анализ поступившей информации. Разработанная функциональная схема судового поляриметра представлена на рис. 5.1. Радиолокационная система позволяет по данным о поляризации зондирующего и эхо-сигналов выделить эхо-сигнал от объекта на фоне отражений от естественного фона, а также одновременно производить прием и анализ эхо-сигналов от естественного фона [113].

Принцип работы измерительного поляризационного радиолокационного комплекса состоит в следующем. Передатчик (магнетрон) с частотой импульсов синхронизации 300 Гц генерирует электромагнитные импульсы длительностью 2 мкс , мощность которых делится на две равные части делителем мощности 12. С помощью устройства переключения поляризации с частотой зондирующих импульсов, состоящее из модулятора 10 и циркуляторов 11, а также аттенюаторов 9 и фазовращателей 8 задается поляризация излучающей волны. Ортогональные составляющие с заданными амплитудами и фазами через газовые разрядники 3 поступают на поляризационный селектор 7 и излучаются в пространство высокополяризованной антенной 1.

В режиме приема эхо-сигналы от объекта и фона поступают на вход антенны 1, разделяются волноводным делителем 2 на две ортогональные составляющие, каждая из которых по своему волноводному каналу проходит через газовые разрядники 3 и циркуляторы 4 на линейные приемники 5, где усиливаются и преобразовываются в постоянное напряжение для получения

параметров Стокса в устройстве 6. Параметры Стокса формируют на индикаторах судовой РЛС и дисплее компьютера эхо-сигналы объекта и гидрометеорологического фона. Одновременно эхо-сигналы с выходов циркуляторов 4 поступают на двойной волноводный тройник 16, причем одна из ортогональных составляющих получает фазовый сдвиг на 90° ферритовым фазовращателем 8. С выходов волноводного Т-моста обе составляющие круговой поляризации правого и левого вращения поступают на логарифмические приемники 17 и на измерительную схему для измерения коэффициента анизотропии и других характеристик, рассмотренных в четвертом разделе.

Для оценки точности измерения координат и вероятности обнаружения объекта проведем расчет величины отношения мощности эхо-сигнала к мощности шума на выходе усилителя промежуточной частоты приемника с учетом следующих технических параметров:

- $P_{\text{и}} = 10^5 \text{ Вт};$
- $G = 44 \text{ дБ};$
- $\lambda = 3,2 \text{ см};$
- $\sigma = 100 \text{ м}^2;$
- $R = 200 \text{ км};$
- $\Delta f = 1,6 \text{ МГц} = 1,6 \cdot 10^6 \text{ Гц};$
- $f_{\text{повт}} = 300 \text{ Гц};$
- $\omega = 10 \text{ об/мин};$
- пределы сканирования:
 - по азимуту - 360°
 - по углу места - $1^\circ - 90^\circ;$
- $\bar{NF} = 10 \text{ дБ};$
- L - коэффициент потерь, $L = 4 \text{ дБ} = 2,5;$
- $\tau = 2 \text{ мс}.$

Определим отношение сигнал/шум судового радиолокационного поляриметра путем подстановки его технических параметров в соотношение (5.1). С учетом переводных коэффициентов мер длины и площади получим [112]:

$$\frac{\bar{P}_{\text{пр}}}{P_{\text{ш}}} = 12,6 \frac{P_u G^2 \lambda^2 \sigma}{R^4 \Delta f \overline{NF}_0 L}, \quad (5.1)$$

где \overline{NF}_0 - рабочий коэффициент шума, равный отношению эффективной

температуры антенны T_i к общей температуре входа системы $\overline{NF}_0 = \frac{T_i}{T_0}$.

Тогда $N = K T_0 \Delta f \overline{NF}_0$, где K - постоянная Больцмана, равная $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Вт/Гц/К}$.

После подстановки технических параметров РЛС в соотношение (5.1) и проведя расчет в логарифмических единицах - децибелах, получим:

$$\begin{aligned} \frac{\bar{P}_{\text{пр}}}{P_{\text{ш}}} \text{ дБ} = & 11 + (P_u) \text{ дБ Вт} + 2 (G) \text{ дБ} + 2 (\lambda) \text{ дБ см} + (G) \text{ дБ м}^2 - 4 (R) \text{ дБ км} - \\ & - (\Delta f) \text{ дБ Гц} - 2 - \left(\overline{NF}_0 \right) \text{ дБ} - (L) \text{ дБ}. \end{aligned} \quad (5.2)$$

Проведем алгебраическое сложение значений соответствующих параметров в децибелах:

$$12,6 = 11 \text{ дБ} = 11,0$$

$$(P_u) = 60 \text{ дБ Вт} = 60,0$$

$$(G) = 44 \text{ дБ}$$

$$2(G) = 88 \text{ дБ} = 88,0$$

$$(\lambda) = 5,05$$

$$2(\lambda) = 10,0 = 10,0$$

$$\sigma = 20 \text{ дБ м}^2 = 20,0$$

$$(R) = 20 \text{ дБ км}$$

$$-4(R) = -92$$

$$(\Delta f) = 62 \text{ дБ Гц} = (-62,0)$$

$$\left(\overline{NF_0} \right) = 10 \text{ дБ} = (-10,0)$$

$$(L) = 4 \text{ дБ} = (-4 \text{ дБ})$$

$$\frac{\overline{P}_{\text{пр}}}{P_{\text{ш}}} = +189 - 168 = +21 \text{ дБ}.$$

Определим дальность R_0 , на которой отношение мощности импульсного сигнала к мощности шума на промежуточной частоте равно единице (0 дБ).

Мощность эхо-сигнала объекта, находящегося на расстоянии R от судовой РЛС, находится из соотношения [112]:

$$\overline{P}_{\text{пр}} = \left(\frac{P_{\text{и}} G}{4 \pi R^2} \right) \left(\frac{\overline{\sigma}}{4 \pi R^2} \right) A_e K_{\text{осл}}, \quad (5.3)$$

где A_e - площадь приемной антенны, $A_e = \frac{G \lambda^2}{4 \pi}$.

Тогда

$$\overline{P}_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{и}} G^2 \overline{\sigma} \lambda^2 K_{\text{осл}}}{(4 \pi)^3 R^4}. \quad (5.4)$$

Мощность шума при приеме эхо-сигнала объекта, равна:

$$P_{\text{ш}} = K T_0 \Delta f \overline{NF}. \quad (5.5)$$

Здесь T_0 - стандартная температура приемника, равная 291 К, K - постоянная Больцмана, равная $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К.

Тогда отношение средней мощности эхо-сигнала объекта к мощности шума определится из условия:

$$\frac{\bar{P}_{\text{пр}}}{P_{\text{ш}}} = \frac{P_{\text{и}} G^2 \bar{\sigma} \lambda^2 K_{\text{осл}}}{(4\pi)^3 K T \Delta f \overline{NF} R^4} . \quad (5.6)$$

Тогда

$$R_0^4 = \frac{P_{\text{и}} G^2 \bar{\sigma} \lambda^2 K_{\text{осл}}}{(4\pi)^3 K T \Delta f \overline{NF}} . \quad (5.7)$$

Выразим Δf через длительность импульса $\tau_{\text{и}}$. Для прямоугольной формы импульса

$$\Delta f \tau_{\text{и}} \approx 1,00 . \quad (5.8)$$

С учетом (5.8) R_0^4 запишется в виде:

$$R_0^4 = \frac{P_{\text{и}} \tau_{\text{и}} G^2 \bar{\sigma} \lambda^2 K_{\text{осл}}}{\overline{NF}} . \quad (5.9)$$

В уравнении (5.9) будем использовать следующие единицы:

R_0 - в морских милях,

$P_{\text{и}}$ - в мегаваттах,

$\tau_{\text{и}}$ - в микросекундах,

λ - в сантиметрах,

$\bar{\sigma}$ - в квадратных метрах,

G , $K_{\text{осл}}$, \overline{NF} - безразмерные.

Преобразовав R_0^4 в логарифмическую форму, получим:

$$P_{\text{и}} = +60 \text{ дБ},$$

$$\tau_{\text{и}} = 3 \text{ дБ},$$

$$G^2 = +88 \text{ дБ},$$

$$\lambda^2 = +10 \text{ дБ},$$

$$K_{\text{осл}} = -12,2 \text{ дБ},$$

$$\bar{\sigma} = +20 \text{ дБ},$$

$$\overline{NF} = -10 \text{ дБ},$$

$R_0^4 = 158,8 \text{ дБ}$ относительно единицы (морская миля).

Поэтому $R_0 = 158,8/4 = 39,4 \text{ дБ}$ относительно морской мили, т.е. 93,5 морских миль или 182,4 км.

В радиолокационном поляриметре электромагнитная волна на излучение и прием задается параметрами Стокса.

Так как отражательные характеристики морских объектов разнообразны, поэтому эхо-сигнал в общем случае частично поляризован и имеет место следующее соотношение параметров Стокса отраженной от объекта электромагнитной волны:

$$I^2 > Q^2 + U^2 + V^2 . \quad (5.10)$$

Частично поляризованная волна состоит из полностью поляризованной компоненты и полностью неполяризованной с параметрами Стокса:

$$\left\{ \sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}, Q, U, V \right\},$$

$$\left\{ I - \sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}, 0, 0, 0 \right\}. \quad (5.11)$$

Для излучения и приема в радиолокационном поляриметре используется всеполяризованная антенна, разделяющая эхо-сигнал по двум ортогональным приемным каналам с отдельным анализом принятых эхо-сигналов, что существенно увеличивает вероятность приема. Эхо-сигнал объекта на фоне помехи и собственных шумов может быть выделен, если точка на сфере Пуанкаре [54], соответствующая поляризации принимаемой волны, лежит внутри шарового сегмента с телесным углом $\frac{2\nu_{\max}}{\pi}$. Превышение полезного сигнала принятой мощности порогового уровня определяется из известного условия:

$$\cos \nu_{\max} = \sqrt{\frac{P_{\text{нр}}}{P_{\text{ш}}}} .$$

Вероятность P_1 превышения эхо-сигнала в основном канале над порогом найдем из условия:

$$P_1 = \frac{2v_{\max}}{\pi} = \frac{2}{\pi} \arccos \sqrt{\frac{P_{\text{пр}}}{P_{\text{ш}}}}. \quad (5.12)$$

При $2v_{\max} \geq \frac{\pi}{2}$ прием возможен всегда, при $2v_{\max} < \frac{\pi}{2}$, вероятность P_2 приема в ортогональном канале равна:

$$P_2 = 1 - (1 - P_1)^2. \quad (5.13)$$

Проведенный расчет вероятности P_1 и P_2 обнаружения морских объектов на фоне естественных помех по формулам (5.12) и (5.13) представлен в табл.5.1.

Таблица 5.1

**Значение вероятностей P_1 и P_2 обнаружения морских объектов
при различных пороговых уровнях**

$\frac{P_{\text{пр}}}{P_{\text{ш}}}$	1,0	1,10	1,25	1,41	1,57	2,1	2,5	3,2	5,0	10,0
P_1	0	0,2	0,3	0,36	0,44	0,5	0,57	0,62	0,7	0,79
P_2	0	0,36	0,57	0,6	0,7	0,76	0,81	0,85	0,91	0,96
$\frac{P_2}{P_1}$	0	1,8	1,9	1,7	1,6	1,5	1,4	1,4	1,3	1,2

5.2. Экспериментальное радиолокационное обнаружение опасных метеорологических объектов на пути судна

К опасным метеорологическим объектам, влияющим на безопасность судоходства, относятся кучево-дождевые облака, которые сопровождаются шквалистым усилением ветра до 100 м/с с образованием спирального вихря с диаметром сечения от нескольких сотен метров до 300 км и осадков с интенсивностью до 300 мм/ч [127]. Существующие пороговые и статистические критерии опасных явлений погоды не эффективны для их использования в оперативной практике на морских судах в связи с тем, что для их получения необходимы радиолокационные измерения до шести и более параметров, по которым определяется вероятность образования того или иного опасного явления погоды в суперячейковых кучево-дождевых облаках. Поэтому необходимо использовать оперативные высокоинформативные радиолокационные параметры, позволяющие с высокой вероятностью обнаружить и распознать опасные явления погоды, тенденцию их развития и координаты перемещения по пути судна. К таким параметрам можно отнести поляризационные параметры Стокса, включающие все основные характеристики электромагнитной волны.

Экспериментальные исследования кучево-дождевых облаков были проведены 30 и 31 мая 2013 года с помощью экспериментального макета радиолокационного поляриметра, изготовленного на базе самолетной радиолокационной станции «Гроза» и собранного по функциональной схеме, представленной на рис. 5.1. Макет был установлен на территории Гидрометцентра Черного и Азовского морей, с которой хорошо просматривается акватория Одесского торгового порта. В соответствии с [3, 4, 48, 66, 80, 116, 121] укажем, что стадия роста кучево-дождевого облака протекает с момента радиолокационного обнаружения на индикаторах РЛС радиоэха до достижения максимальных значений радиолокационной отражаемости в переохлажденной части облака, а стадия зрелости – с момента достижения максимальной радиолокационной отражаемости в переохлажденной части облака до момента достижения ее максимального

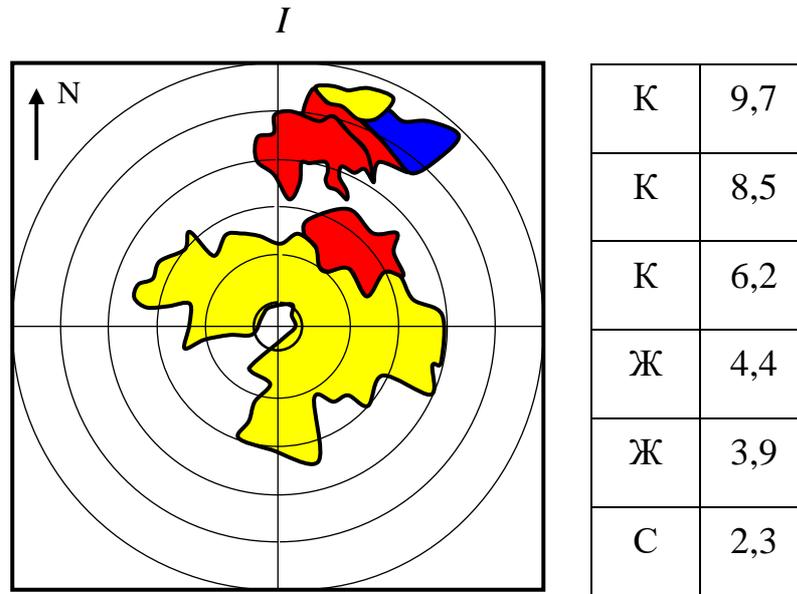
значения в теплой части, после которого значение отражаемости уменьшается, что соответствует стадии распада.

Алгоритм проведения экспериментальных исследований кучево-дождевых облаков состоял в следующем:

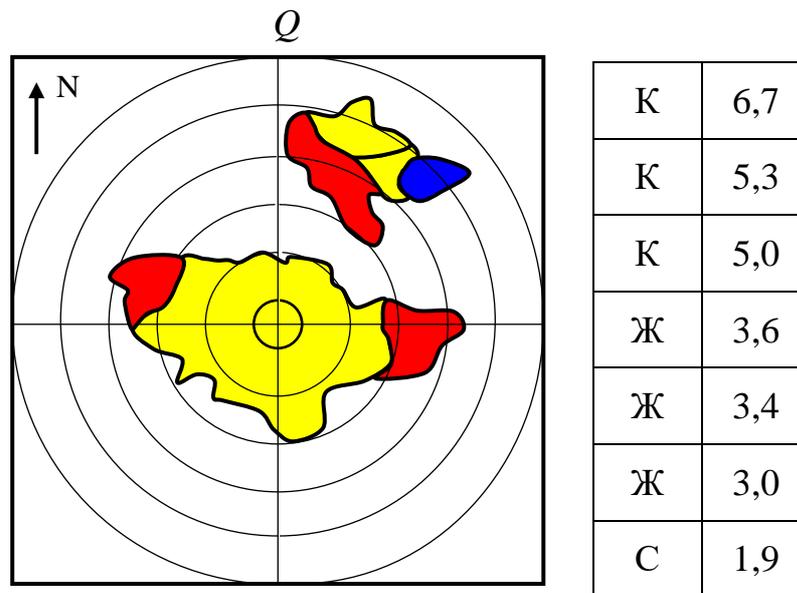
1. Включался режим кругового обзора под углами антенны от 0° до 360°
2. Устанавливалась на излучение электромагнитная волна круговой поляризации правого вращения.
3. Прием отраженной волны осуществлялся в двух ортогональных плоскостях.
4. Представлялись в трехцветном изображении на дисплее компьютера координаты кучево-дождевого облака (Рис.5.2, Рис. 5.3).
5. Устанавливался режим вертикального сканирования в пределах от 0° до 90° под определенным азимутом.
6. Измерялись параметры Стокса при горизонтальных и вертикальных разрезах облака, значения которых представлялись на цветном дисплее компьютера (рис.5.2, а, б) и рис.5.3 (а, б, в, г, д).
7. Одновременно измерялись составляющие правого и левого вращения электрического вектора отраженной электромагнитной волны на выходе логарифмических приемников.

Измеренные поляризационные параметры электромагнитной волны, отраженной от кучево-дождевого облака, позволили:

1. Провести радиолокационное распознавание образования циклонического вихря в кучево-дождевом облаке.
2. Определить скорость вращения облачных частиц вокруг вертикальной оси.
3. Измерить интенсивность выпадающих осадков.



a)



б)

Рис.5.2. Горизонтальное распределение первого (*a*) и второго (*б*) параметров Стокса в кучево-дождевом циклоническом облаке

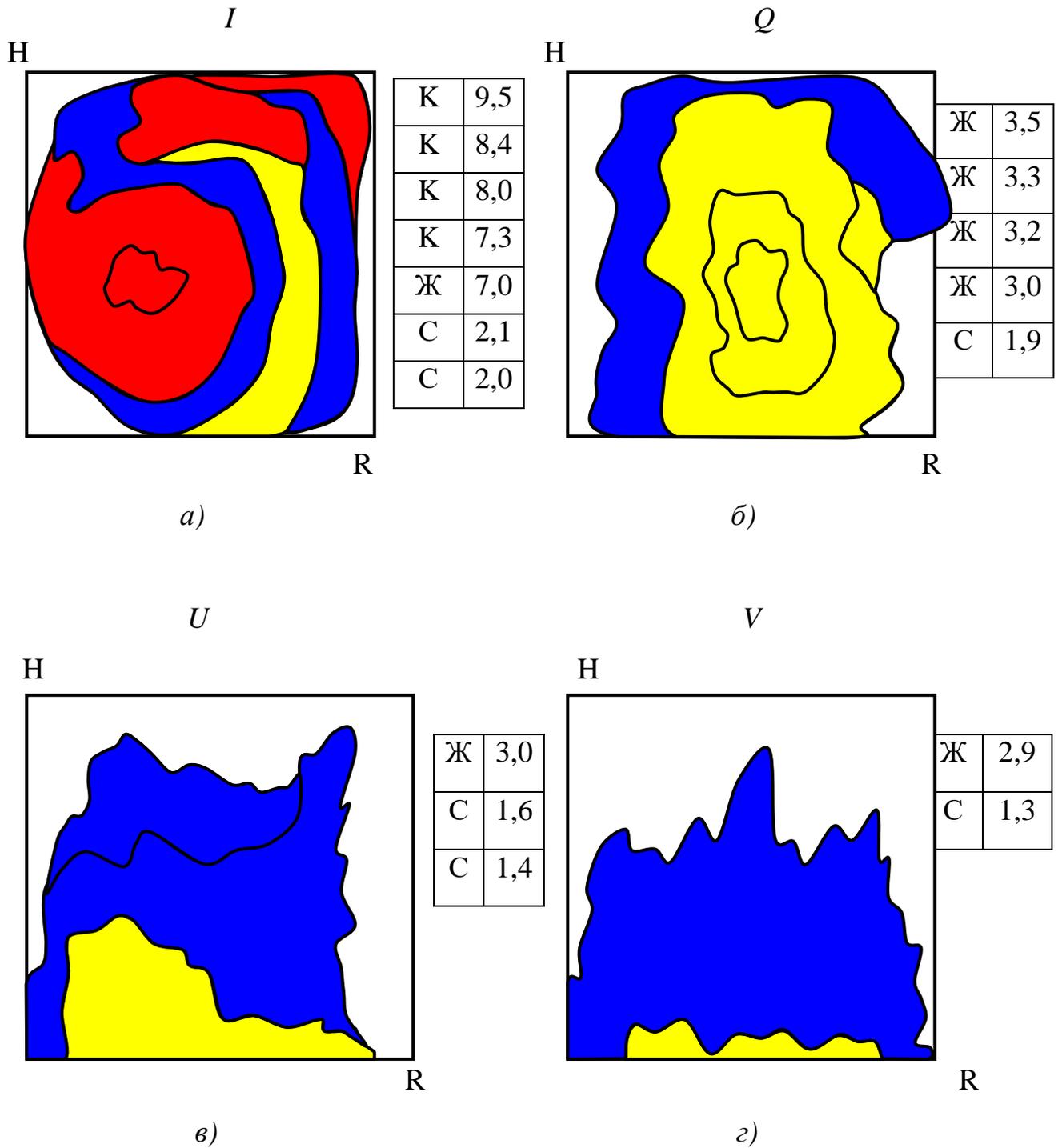


Рис.5.3. Вертикальное распределение параметров Стокса $I(a)$, $Q(б)$, $U(в)$ и $V(г)$ в кучево-дождевом циклоническом облаке

Радиолокационное распознавание циклонического вихря в кучево-дождевом облаке, в котором зародился смерч, произведено с использованием правила максимума правдоподобия по первому параметру Стокса, т.е.

$$\frac{W(I/Cb_{\text{ц}})}{W(I/Cb_{\text{л}})} \geq 1, \quad (5.14)$$

где $W(I/Cb_{\text{ц}})$ - закон распределения первого параметра Стокса, измеренного при отражении от кучево-дождевого облака с циклоническим вихрем;

$W(I/Cb_{\text{л}})$ - закон распределения первого параметра Стокса, измеренного при отражении от кучево-дождевого облака, из которого выпадали ливневые осадки.

Или с учетом того, что законы распределения $\lg I$ являются нормальными [11], можно (5.14) представить в виде:

$$\frac{W(I/Cb_{\text{ц}})}{W(I/Cb_{\text{л}})} = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\text{ц}}} \cdot e^{-\frac{(I-m_{\text{ц}})^2}{2\sigma_{\text{ц}}^2}}}{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\text{л}}} \cdot e^{-\frac{(I-m_{\text{л}})^2}{2\sigma_{\text{л}}^2}}}, \quad (5.15)$$

где $m_{\text{ц}}$, $m_{\text{л}}$ - математические ожидания первого параметра Стокса, найденные по результатам радиолокационного наблюдения;

$\sigma_{\text{ц}}^2$, $\sigma_{\text{л}}^2$ - дисперсии первого параметра Стокса кучево-дождевого облака с циклоническим вихрем и кучево-дождевого облака с ливневыми осадками без циклона, полученные по радиолокационным данным.

После преобразования выражения (5.15), получим:

$$\frac{\sigma_{\text{л}}}{\sigma_{\text{ц}}} \cdot e^{a(I)^2 + b(I) + c} \geq 1. \quad (5.16)$$

Логарифмируя (5.16) по основанию e условие (5.16) запишется в виде:

$$a(I)^2 + b(I) + c \geq \ln \frac{\sigma_{\text{ц}}}{\sigma_{\text{л}}}, \quad (5.17)$$

где a , b , c - рассчитаны по формулам:

$$a = \frac{\sigma_{\text{ц}}^2 - \sigma_{\text{л}}^2}{2\sigma_{\text{ц}}^2 \sigma_{\text{л}}^2}; \quad b = \frac{m_{\text{ц}} \sigma_{\text{л}}^2 - m_{\text{л}} \sigma_{\text{ц}}^2}{\sigma_{\text{ц}}^2 \sigma_{\text{л}}^2}; \quad c = \frac{m_{\text{л}}^2 \sigma_{\text{ц}}^2 - m_{\text{ц}}^2 \sigma_{\text{л}}^2}{2\sigma_{\text{ц}}^2 \sigma_{\text{л}}^2}. \quad (5.18)$$

Решая неравенство (5.17) относительно I , находим $I_{\text{кр}}$. При всех значениях $I > I_{\text{кр}}$ - неравенство будет справедливым. Если измеренное значение $I > I_{\text{кр}}$, принимается решение о наличии циклонического вихря. При $I < I_{\text{кр}}$ принимается решение об отсутствии циклонического вихря в кучево-дождевом облаке и из него будут выпадать только ливневые осадки без грозы.

По результатам экспериментальных наблюдений были рассчитаны статистические характеристики первого параметра Стокса для кучево-дождевых облаков с циклоническим вихрем и кучево-дождевых ливневых облаков. Вертикальное распределение параметров Стокса ливневых кучево-дождевых облаков представлено на рис.5.4 (a , b , v , z).

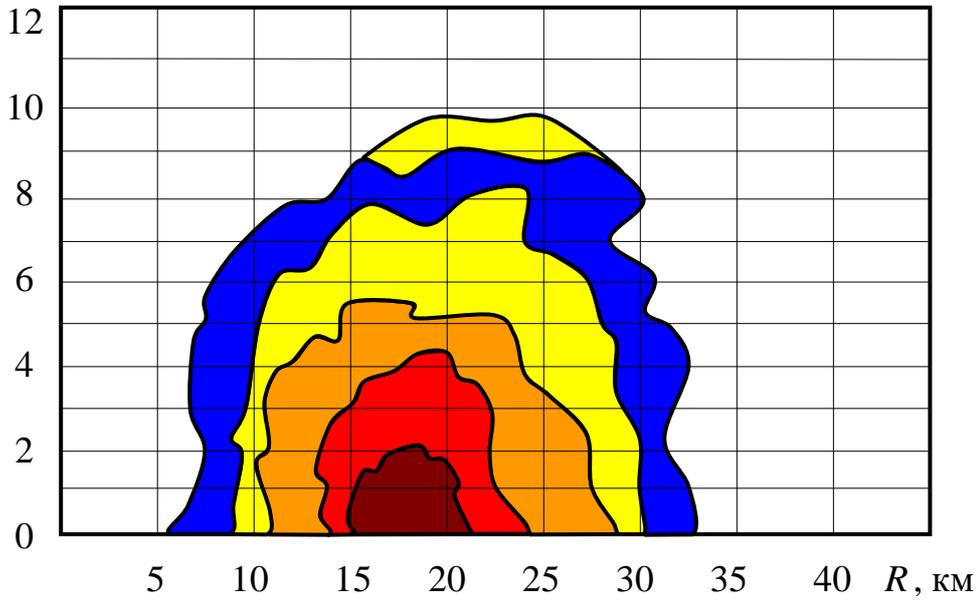
Рассчитанные статистические характеристики первого параметра Стокса для кучево-дождевых облаков с циклоническим вихрем и кучево-дождевых облаков с ливнем имеют следующие величины:

$$- m_{\text{л}} = 0,825; \quad \sigma_{\text{л}}^2 = 0,394; \quad \sigma_{\text{л}} = 0,63; \quad a = 1,02; \quad b = 1,53;$$

$$- m_{\text{ц}} = 5,7; \quad \sigma_{\text{ц}}^2 = 2,25; \quad \sigma_{\text{ц}} = 1,5; \quad c = -1,08.$$

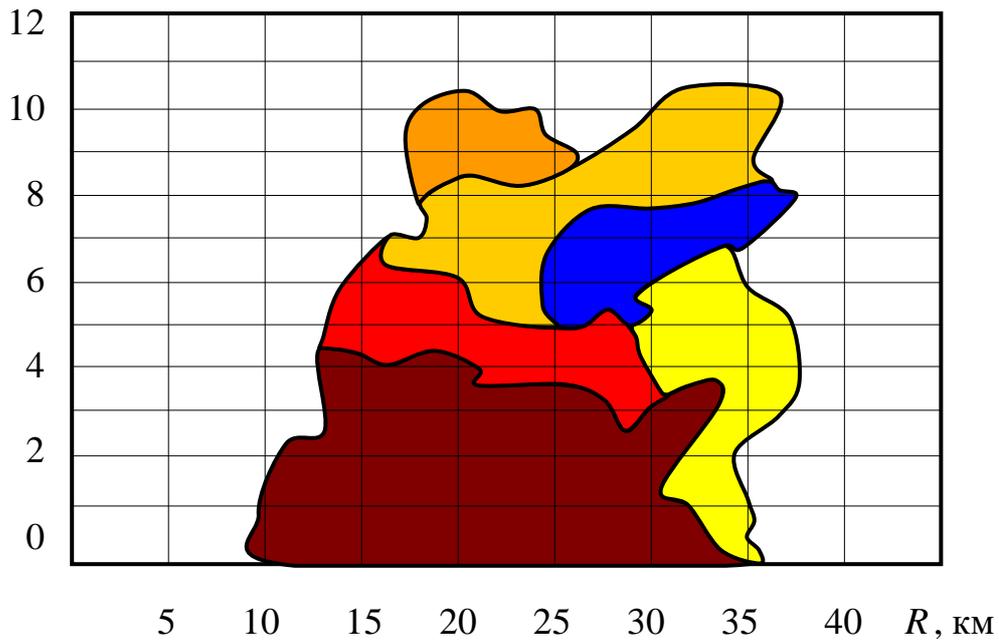
По рассчитанным значениям математического ожидания и дисперсии ливневых облаков и облаков с циклоническим вихрем определены коэффициенты a , b , c и правая часть неравенства (5.17).

Н, км



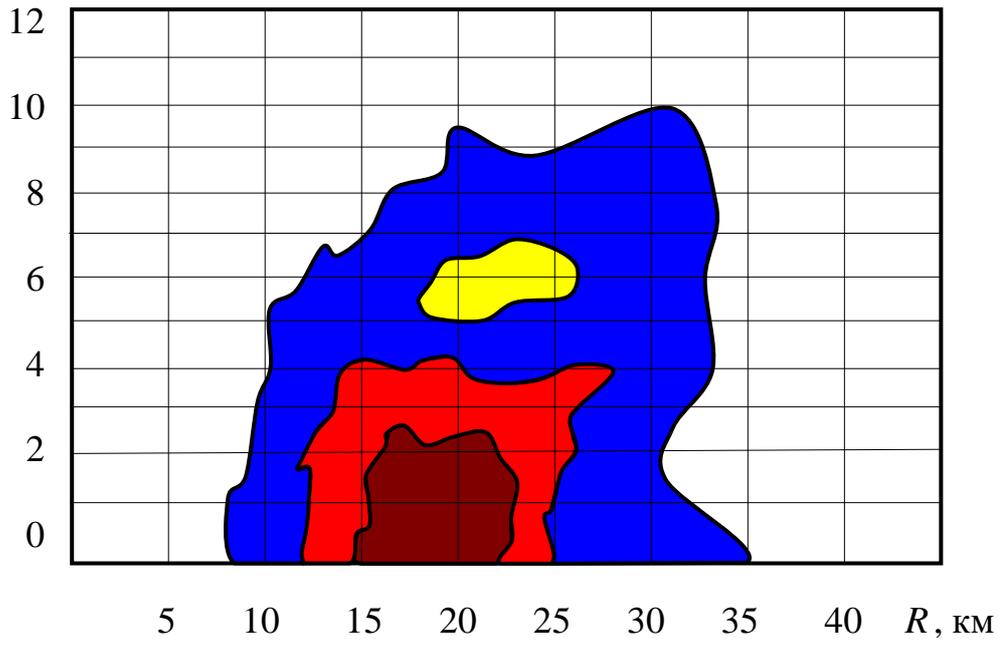
а)

Н, км



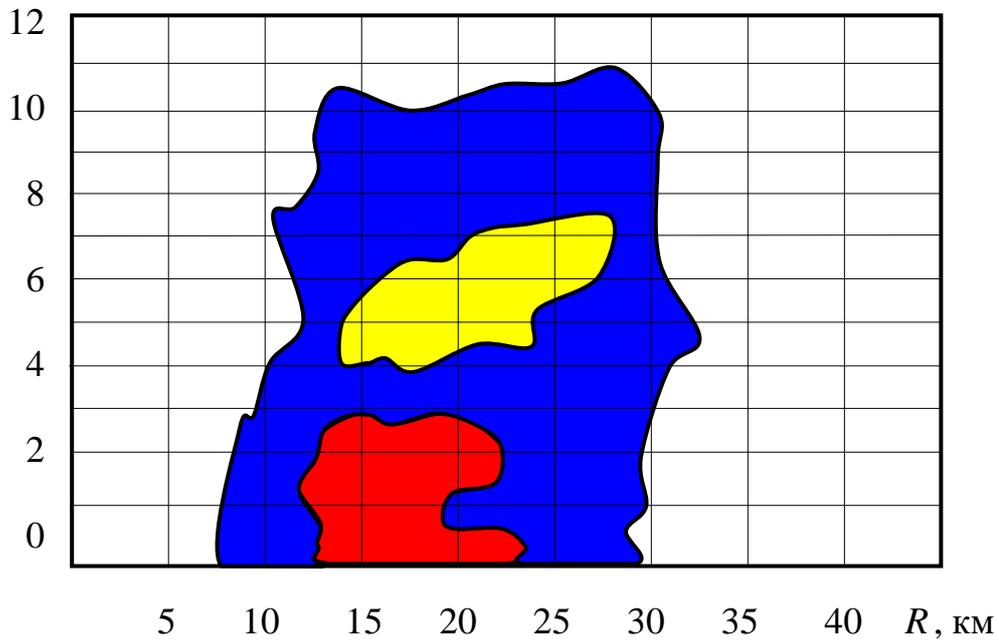
б)

H, км



в)

H, км



г)

Рис.5.4 Вертикальное распределение параметров Стокса в ливневом кучево-дождевом облаке: *а* – первого параметра I ; *б* – второго параметра Q ; *в* – третьего параметра U ; *г* – четвертого параметра V

Подставляя найденные значения коэффициентов a , b , c в неравенство (5.17) и решая его относительно I , находим критериальные значения первого параметра Стокса $I_{кр}$:

$$\ln \frac{\sigma_{ц}}{\sigma_{л}} = 2,5; \quad 1,02(I)^2 + 1,53(I) - 1,08 > 0;$$

$$I_{кр} > 0,5; \quad I_{кр} < -2,36.$$

Значение $I_{кр} < -2,36$ отбрасываем по физическому смыслу. Поэтому $I_{кр} = 0,5$. По измеренному критериальному значению первого параметра Стокса $I_{кр} > 0,5$ в кучево-дождевом облаке с вероятностью до 98 % был сделан радиолокационный прогноз образования циклонического вихря.

До настоящего времени прогноз возникновения, эволюции и перемещения смерча остается проблемой, которая далека от окончательного решения. В связи с изменяющимися климатическими условиями возникновение смерча начало происходить и в тех регионах, в которых они не наблюдались [114, 127]. Это относится и к Одесскому региону Украины. Особую роль при исследовании структуры кучево-дождевых облаков, с которыми связано возникновение смерча, играют радиолокационные поляриметры. Мощные конвективные облачные системы связаны с циклоническими вихрями, имеющими локализованную зону вращения с вертикальным размером, равным или большим их диаметра.

Образование смерча в большой степени обусловлено нестойкостью стратификации атмосферы. Смерчи связаны с двумя типами мезомасштабной циркуляции: с облаками, которые имеют горизонтальную ось вращения (облачный вал) впереди холодных фронтов и с облаками, которые вращаются вокруг вертикальной оси. В передней части материнского облака до возникновения смерча существует облачный вал, который вращается по ходу движения. Чаще всего смерчи возникают с правой стороны облака по направлению его движения. Смерчи связаны с мезомасштабной циркуляцией в

слоях выше смерча, диаметр которой от нескольких километров до 50 км, а по высоте до 10-12 км. Теория образования смерча до настоящего времени еще полностью не разработана.

В соответствии с гипотезой Ромова А.И. сделаем анализ уравнения вихря скорости:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Omega}{\partial t} = & - \left(u \frac{\partial \Omega}{\partial x} + v \frac{\partial \Omega}{\partial y} + w \frac{\partial \Omega}{\partial z} \right) - l \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \\ & - \left(u \frac{\partial l}{\partial x} + v \frac{\partial l}{\partial y} - \Omega \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right) + \left(\frac{\partial u}{\partial z} \cdot \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial z} \cdot \frac{\partial w}{\partial x} \right), \quad (5.19) \end{aligned}$$

где $\Omega = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$ - вертикальная проекция относительного вихря.

Второй и третий члены правой части уравнения (5.19) при рассмотрении процессов с небольшими масштабами (100-10000 м) характерными для смерчей, малы по сравнению с четвертым и пятым членами. При характерных для сформировавшихся смерчей величинах вихря четвертый член

$\Omega = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}$ играет существенную роль в изменении вихря Ω .

Пятый член правой части уравнения (5.19) записывается в виде:

$$\frac{\partial u}{\partial z} \cdot \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial z} \cdot \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial z} \times \overset{\rightarrow}{grad} \omega, \quad (5.20)$$

где $c = i u + j v$ - вектор скорости ветра.

Правая часть являет собой проекцию на ось z вектора изменения скорости ветра с высотой $\frac{\partial C}{\partial z}$ на вектор горизонтального градиента вертикальной скорости ($grad \omega$). Именно этот член уравнения (5.19) при наличии больших вертикальных градиентов скорости ветра в конвективных

облаках ($grad \omega$) и определяет развитие завихрения. В силу малой повторяемости и небольших размеров смерчей каждый случай радиолокационного наблюдения с помощью метеорологических радиолокаторов и радиолокационных поляриметров представляет практический интерес.

Описание вертикальной структуры векторного поля скорости в вихре производится с помощью замкнутой термодинамической системы в виде следующих уравнений:

$$\frac{\partial (u r)}{\partial r} + \frac{\partial (v r)}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{\partial u}{\partial r} = 2 \omega, \quad (5.21)$$

где u - радиальная проекция вектора скорости по r в цилиндрических координатах;

v - касательная проекции вектора скорости по угловой координате;

z - вертикальная координата.

Введение функции тока и решения уравнений Бесселя, позволяет получить функцию скорости вращения облачного вихря, связанную с частотой n угловой скоростью вращения ω :

$$\chi^2 = \frac{n^2 - 4 \omega^2}{g h}, \quad (5.22)$$

где h - глубина завихрения;

g - ускорение силы тяжести;

ω - угловая скорость;

n - частота вращения вихря.

Радиолокационная структура конвективной облачной системы в прибрежной полосе Черного моря в районе Одессы, в которой образовался смерч, принесший огромные экономические убытки городу, была получена 31 мая 2013 года по измерениям радиолокационной отражаемости на

экспериментальном макете радиолокационного поляриметра и представлена на рисунках 5.5 - 5.8.

В этот период времени через Одессу проходил холодный атмосферный фронт, в зоне которого наблюдалась активная грозовая деятельность, шквалистый ветер до 31 м/с с ливневым дождем и грозой. Скорость ветра достигала ураганной силы. По данным городского управления сломано более 1000 деревьев, обесточено 26 населенных пунктов Одесской области, остановился весь городской транспорт из-за поваленных деревьев и оборванных проводов электроснабжения.

Радиолокационная структура кучево-дождевого облака, в котором образовался смерч, позволила выявить деформацию зоны повышенной отражаемости на высоте 6,5 км.

В кучево-дождевом облаке находился мезоциклон на высоте 6-7 километров с повышенной скоростью циркуляции воздуха против часовой стрелки (рис.5.6 - 5.8).

Зона повышенной отражаемости вращалась против часовой стрелки вокруг вертикальной оси, деформируя свою форму под действием сформировавшегося урагана диаметром около 1,5 км.

Проведенные радиолокационные наблюдения подтвердили возможность радиолокационных методов и технических средств обнаружения опасных для мореплавания явлений погоды и измерения их параметров и координат.

Радиолокационные измерения интенсивности выпадающих осадков из кучево-дождевых облаков в зоне холодного атмосферного фронта производились по величине коэффициента анизотропии, который является одной из основных характеристик рассеивающих свойств частиц осадков и очень чувствителен к изменению их медианного объемного диаметра или интенсивности выпадающих осадков в круговом поляризационном базисе.

Коэффициент анизотропии определялся как отношение мощности основной компоненты P_{\parallel} эхо-сигнала осадков к мощности перекрестной P_{\perp} компоненты, т.е.

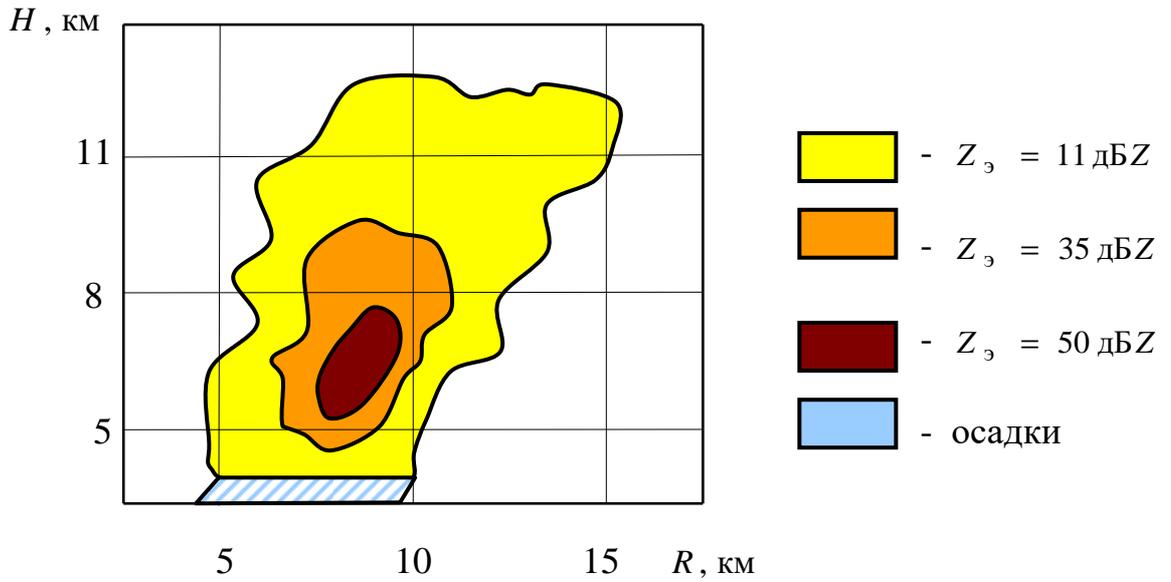


Рис.5.5. Вертикальный разрез кучево-дождевого облака 31 мая 2013 г.
в 22 час 05 мин.

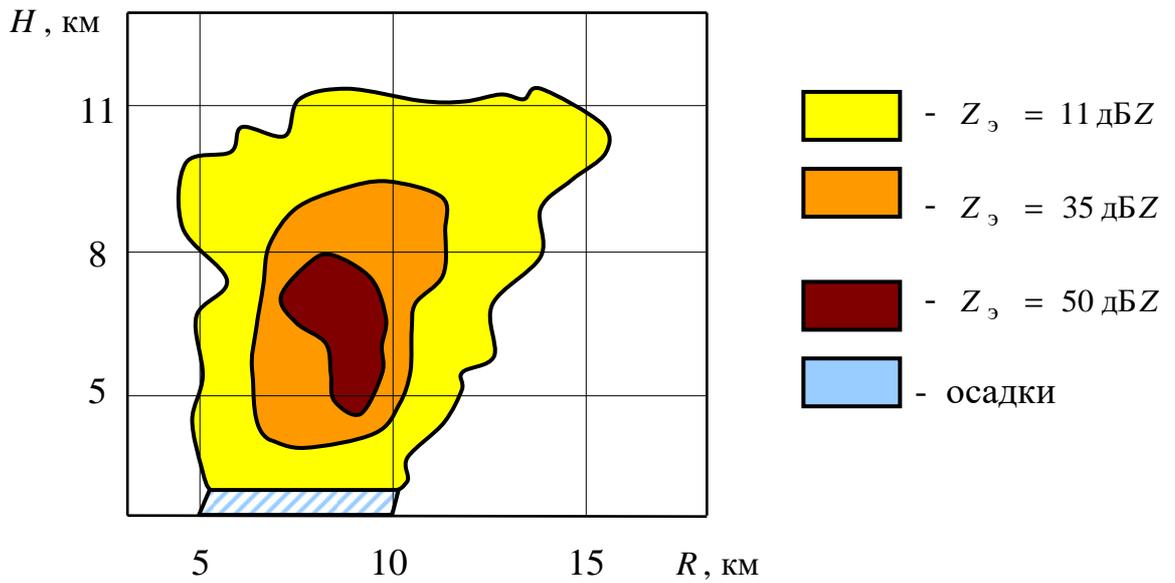


Рис. 5.6. Вертикальный разрез кучево-дождевого облака 31 мая 2013 г.
в 22 час 10 мин.

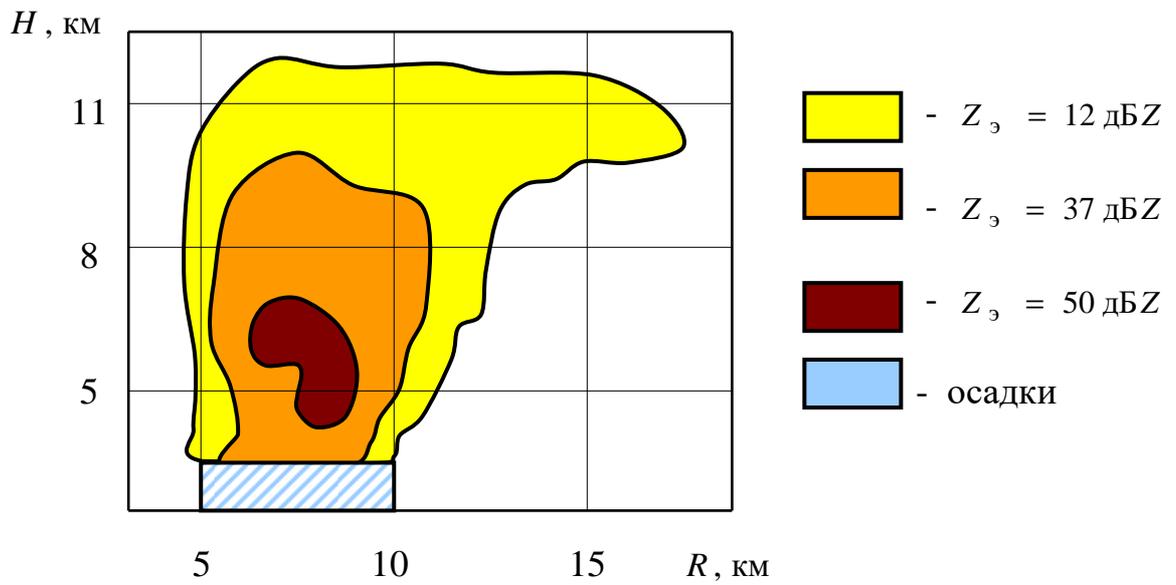


Рис.5.7. Вертикальный разрез кучево-дождевого облака 31 мая 2013 г.
в 22 час 15 мин

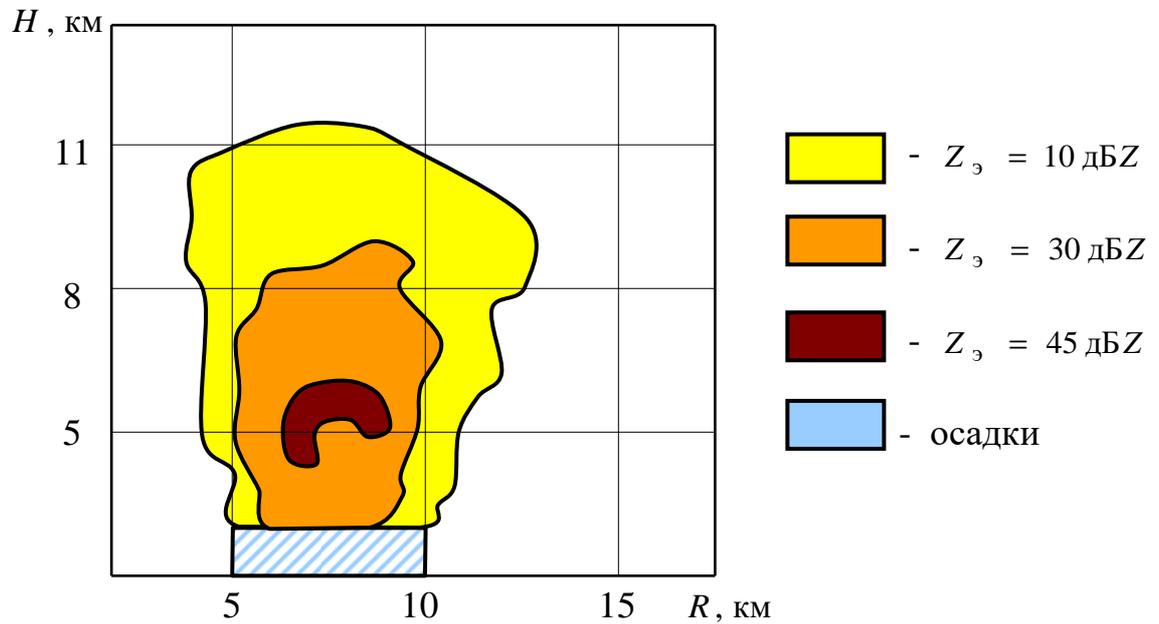


Рис.5.8. Вертикальный разрез кучево-дождевого облака 31 мая 2013 г.
в 22 час 20 мин

$$\mu = \frac{P_{\parallel}^{\text{пр}}}{P_{\perp}^{\text{пр}}} \quad (5.23)$$

При измерении интенсивности осадков излучалась электромагнитная волна правого или левого направления вращения. Интенсивность осадков связана с коэффициентом анизотропии следующим соотношением:

$$\mu = \frac{P_{\parallel}^{\text{пр}}}{P_{\perp}^{\text{пр}}} = \frac{Z_{\parallel}}{Z_{\perp}} = \frac{I_{\parallel}}{I_{\perp}} \quad (5.24)$$

где Z_{\parallel} и Z_{\perp} - радиолокационные отражаемости осадков, измеренные в параллельном и ортогональном каналах поляриметра;

I_{\parallel} и I_{\perp} - интенсивности осадков, измеренные по Z_{\parallel} и Z_{\perp} .

При использовании логарифмических приемников, выражение (5.24) запишется в виде

$$\lg \mu = \lg P_{\parallel} - \lg P_{\perp} = \lg Z_{\parallel} - \lg Z_{\perp} = \lg I_{\parallel} - \lg I_{\perp}. \quad (5.25)$$

Логарифмируя уравнение (5.24) получим:

$$10 \lg \mu = 10 \lg \frac{P_{\parallel}^{\text{пр}}}{P_{\perp}^{\text{пр}}} = 10 \lg \frac{Z_{\parallel}}{Z_{\perp}} = 10 \lg \frac{I_{\parallel}}{I_{\perp}}. \quad (5.26)$$

Так как $10 \lg P_{\parallel}^{\text{пр}} - 10 \lg P_{\perp}^{\text{пр}} = Q$, тогда $10 \lg \mu = Q = Z_{DR} = I_{DR}$,

где I - интенсивность выпадающих осадков, измеренная в мм/ч; Q - второй параметр Стокса.

По измеренному коэффициенту анизотропии определена интенсивность выпадающих осадков, которая составила 50 мм/ч. Измерение интенсивности выпадающих осадков можно также провести по второму параметру Стокса.

При радиолокационном наблюдении циклонического вихря важными характеристиками являются скорость его вращения вокруг вертикальной оси и направление перемещения. Измерение указанных характеристик судовым поляриметром по пути судна представляет собой актуальную задачу. Разработанные к настоящему времени доплеровские методы измерения скорости вращения циклонического вихря являются сложными, характеризуются большой асимметрией и являются скорее исследовательскими, нежели оперативными [5,122], а основными прогностическими параметрами прогноза развития циклонического вихря в конвективных облаках являются радиолокационная отражаемость, средняя доплеровская скорость и ширина спектра. Однако проведенная сравнительная оценка визуальной и доплеровской радиолокационной системы прогноза циклонического вихря показала, что заблаговременность прогноза доплеровской системой составляет 20 минут, а исследовательская скорость вращения вихря измеренная Национальным центром по исследованию ураганов и национальной лабораторией по изучению ураганов в США составила 20 - 300 м/с [120, 127].

Поэтому для оперативного прогноза образования циклонического вихря необходимо использовать методику согласно которой радиолокационный прогноз основывается на измерении сетевым радиолокационным поляриметром скорости вращения циклонического вихря и плоскости поляризации отраженной волны. Эта методика основана на том, что в циклоническом вихре молекулы воды взаимодействуют с магнитным полем Земли и начинают вращаться, т.е. создается циклонический вихрь [118,119]. Так как молекулы воды в циклоническом вихре вращаются под воздействием магнитного поля Земли, то при взаимодействии электромагнитной волны определенной поляризации с вращающимся циклоническим вихрем, обладающим магнитным полем, будет происходить вращение плоскости поляризации отраженной волны на определенный угол θ , определяемый величиной напряженности магнитного поля вихря, его диаметром, а также постоянными распространения

составляющих волны с правым и левым направлением вращения вектора поля, зависящими от длины пути прохождения волны в намагниченном вращающемся объеме вихря. Угол θ вращения плоскости поляризации отраженной волны определяется из условия:

$$\theta^\circ = 0,5(E_{\text{л}} - E_{\text{пр}}). \quad (5.27)$$

где $E_{\text{л}}$ и $E_{\text{пр}}$ – электрические векторы волны левого и правого направления вращения.

Измерив эхо-сигнал циклонического вихря на круговой поляризации правого и левого направления вращения, можно определить угол поворота плоскости поляризации отраженной волны. При вращении циклонического вихря луч судового поляриметра перемещается со скоростью вращения вихря, а диаграмма рассеяния в дальней зоне вращается в пространстве со скоростью примерно в два раза превышающей скорость вращения циклонического вихря. Если отражающую поверхность вихря представить в виде двух точечных рассеивателей, укрепленных на концах не отражающего стержня, то первый параметр Стокса $I(t)$ эхо-сигнала можно представить следующей зависимостью:

$$I(t) = \left(\cos \frac{2\pi ct}{\lambda} + 2\pi \frac{L}{\lambda} \cos \omega_{\text{в}} t \right) + K \cos \left(\frac{2\pi ct}{\lambda} - 2\pi \frac{L}{\lambda} \cos \omega_{\text{в}} t \right), \quad (5.28)$$

где L – расстояние между двумя рассеивающими точками, м;

λ – длина волны судового поляриметра, см;

c – скорость света, км/с;

$\omega_{\text{в}}$ – скорость вращения вихря, рад/с;

K – отношение амплитуды эхо-сигнала правого вращения к амплитуде эхо-сигнала левого вращения вектора поля, $K = E_{\text{пр}}/E_{\text{л}}$.

Так как расстояние R между поляриметром и циклоническим вихрем много больше L , то $K = const$.

Решая уравнение (5.28) относительно $\cos \omega_b t$ получим скорость ω_b вращения циклонического вихря, считая остальные члены уравнения известными заранее или измеренные судовым поляриметром. Измеренная радиолокационным поляриметром скорость вращения вихря в экватории Черного моря 31 мая 2013 года составила около 30 м/с.

5.3. Обнаружение и распознавание объектов на фоне гидрометеорологических помех с использованием коэффициента анизотропии

При радиолокационном распознавании объектов исходим из его априорной информации, заключающейся в том, что объект радиолокационного наблюдения содержит на своей поверхности резкие изломы, штыри, т.е. сингулярности, которые создают на отражающей поверхности условия локальных рассеивателей типа уголковых отражателей. В круговом поляризационном базисе матрица рассеяния объекта запишется в виде [55]:

$$[S_{об}(вк)] = 0,5 \begin{bmatrix} \lambda_1 - \lambda_2 & \lambda_1 + \lambda_2 \\ \lambda_1 + \lambda_2 & \lambda_2 - \lambda_1 \end{bmatrix}, \quad (5.29)$$

где λ - собственные значения матрицы.

При радиолокационном наблюдении объекта на фоне гидрометеорологического фона исходим из того, что гидрометеорологический фон попадает под юрисдикцию псевдособственной линейной поляризации, для которого матрица рассеяния является диагональной, т.е.

$$[S_{\phi}(eo)] = 0,5 \begin{bmatrix} \lambda_{1\phi} & 0 \\ 0 & \lambda_{2\phi} \end{bmatrix}. \quad (5.30)$$

Частицы гидрометеорологического фона можно уподобить плоской пластине (диску), которая при падении на нее волны круговой поляризации, изменяет при отражении направление вращения вектора электрического поля волны. Поэтому волны круговой поляризации являются волнами нулевой поляризации для гидрометеорологического фона и в круговом базисе его матрица запишется в виде:

$$[S_{\phi}(ek)] = \begin{bmatrix} |\lambda_{1\phi}(t) - \lambda_{2\phi}(t)| & |\lambda_{1\phi}(t) + \lambda_{2\phi}(t)| \\ |\lambda_{1\phi}(t) + \lambda_{2\phi}(t)| & |\lambda_{2\phi}(t) - \lambda_{1\phi}(t)| \end{bmatrix}. \quad (5.31)$$

Радиолокационное обнаружение и распознавание объектов при наличии гидрометеорологического фона осуществлялось измерением величины коэффициента анизотропии объекта $\mu_{об}$ на выходе логарифмических приемников экспериментального радиолокационного поляриметра путем логарифмического вычитания эхо-сигналов в основном и ортогональном приемных каналах, т.е.

$$\lg \mu_{об} = \lg S_{11}(ek) - \lg S_{12}(ek) = Q, \quad (5.32)$$

где Q - второй параметр Стокса.

При этом не требуется обеспечения высокой идентичности логарифмических приемных каналов поляриметра.

Использование $\mu_{об}$ для распознавания и наблюдения объекта на фоне гидрометеорологических помех имеет следующие положительные особенности по сравнению с существующими методами подавления фона в круговом поляризационном базисе:

1. Для оценки $\mu_{об}$ необходимо эхо-сигнал в согласованном по поляризации канале разделить на сигнал в перекрестном канале или провести их вычитание без нормировки на излучаемый сигнал.

2. Оценка $\mu_{об}$, полученная из сравнения эхо-сигналов в основном и перекрестном каналах, не зависит от дальности до объекта, а также от метеоусловий и затухания на трассе, от угла поворота объекта вокруг направления радиолокационного наблюдения и не требует строгой стабилизации антенны судового поляриметра.

3. Измерение $\mu_{об}$ может производиться при излучении как правой, так и левой круговой поляризации.

Поляризационное распознавание объекта на фоне гидрометеорологических помех осуществлялось выделением эхо-сигнала объекта от эхо-сигнала фона. При этом исходили из того, что для фона дисперсия элементов матрицы определяется следующим образом:

$$\sigma_{\phi} = \langle |\lambda_{1\phi}|^2 \rangle + \langle |\lambda_{2\phi}|^2 \rangle. \quad (5.33)$$

С точки зрения своей матрицы дисперсий, фон ведет себя как анизотропный объект.

На выходе (5.32) получаем случайный процесс с нулевым математическим ожиданием и возросшей примерно в два раза дисперсией, источником которой являются флуктуации гидрометеорологического фона. Поляризационная селекция эхо-сигналов объекта от гидрометеорологического фона состоит в процедуре накопления 23...27 отраженных импульсов, которая уменьшает флуктуации математического ожидания вокруг его нулевого уровня, получающегося после логарифмического вычитания, что эквивалентно фильтрации гидрометеорологического фона. Наблюдаемость объектов при этом увеличивается до 17 дБ, что существенно повышает отношение сигнал/помеха. Уменьшение флуктуаций математического ожидания не сказывается на величине коэффициента анизотропии объекта.

Для заданного времени накопления импульсов можно установить предельную дальность обнаружения и распознавания объектов по коэффициенту анизотропии с использованием интегральной ЭПР объекта, т.е.

$$\sigma_{об} = |\lambda|^2 + |\lambda|^2. \quad (5.34)$$

Если $\sigma_{об} > \sigma_{ф}$, то обнаруживаются и распознаются все объекты, у которых μ превышают $\mu_{пор}$. Если эхо-сигнал фона превышает эхо-сигнал объекта $\sigma_{об} < \sigma_{ф}$ то судовой поляриметр обнаруживает только гидрометеорологический фон. Под $\Sigma\sigma_{ф}$ понимается интегральная ЭПР остатка фона на выходе системы обработки (накопителя).

Экспериментальные обнаружения и распознавания судов, заходящих в Одесский торговый порт, были проведены в июле 2013 года с помощью экспериментального радиолокационного поляриметра с использованием в качестве основного информативного радиолокационного параметра коэффициента анизотропии. Для обнаружения и распознавания судов в выпадающих осадках были использованы сравнительные результаты теоретических расчетов коэффициента анизотропии (табл.5.2) и данные полученные экспериментальным путем с помощью радиолокационного поляриметра.

Измеренные экспериментально значения коэффициента анизотропии $\mu_1 = 0,75$ и $\mu_2 = 0,88$ позволили не только обнаружить два судна на фоне выпадающих осадков с помощью индикатора кругового обзора поляриметра (Рис. 5.9), но и распознать судно среднего тоннажа ($\mu_1 = 0,75$) и судно большого тоннажа ($\mu_2 = 0,88$).

Экспериментально измеренная интенсивность выпадающих осадков, в которых находились обнаруженные два судна составила 22 мм/ч.

**Значение коэффициента анизотропии при наблюдении
надводных объектов**

Тип объекта	$\sigma_{об}$, м ²	μ	I , мм/час
Судно малого тоннажа	150	0,3	20
Судно среднего тоннажа	7 500	0,7	20
Судно большого тоннажа	15 000	0,9	20
Катер	100	0,2	20

Выводы к разделу 5

Выполненные экспериментальные исследования по радиолокационному обнаружению и распознаванию судов различного тоннажа в Одесском заливе при наличии выпадающего дождя с помощью экспериментального макета радиолокационного поляриметра подтвердили его функциональные возможности как радиолокационной судовой системы, соответствующей эффективному решению поставленных задач повышения безопасности судовождения в условиях естественных помех

При выполнении поставленной задачи использованы синтаксический и семантический подходы к исследованию процессов получения радиолокационной информации как об объектах, так и о гидрометеорологическом фоне.

Получение радиолокационной информации об объектах основано на анализе поляризационной структуры радиолокационных сигналов и смыслового содержания полученной информации.

Реализована поляризационная селекция навигационных объектов при наличии естественного фона путем измерения некинематических характеристик объектов.



a)



б)

Рис.5.9. Эхо-сигналы выпадающих осадков (а) и выделенные из них эхо-сигналы двух судов (б)

Подтверждена возможность радиолокационного обнаружения и распознавания не только навигационных объектов, но и опасных метеорологических, с измерением их кинематических характеристик.

Разработанные методы и технические средства дистанционного обнаружения и распознавания объектов в сложных ситуационных условиях среды могут быть использованы в решении задач по совершенствованию функциональных возможностей перспективных судовых радиолокаторов.

Содержание данного раздела отражено в работе автора [113].

ВЫВОДЫ

В диссертационной работе на основе анализа и обобщения теоретических и экспериментальных исследований решена научно-прикладная задача совершенствования методов и средств дистанционного наблюдения навигационных объектов на пути судна.

Основные результаты исследования:

- Усовершенствованы радиолокационные методы дистанционного наблюдения навигационных объектов в сложных ситуационных условиях среды.
- Разработан принцип построения радиолокационных средств дистанционного наблюдения навигационных объектов на пути судна.
- Поляризационная селекция эхо-сигналов и метеорологических объектов основана на использовании наиболее информативных параметров электромагнитной волны – параметров Стокса, что позволило одновременно получить радиолокационную информацию о навигационном и метеорологическом объектах.
- Получены параметры поляризационного различия эхо-сигналов двух вещественных сред, отличающиеся своими радиофизическими параметрами, что позволило провести их дистанционное обнаружение и распознавание на пути судна.
- Распознавание навигационных объектов в сложных ситуационных условиях среды основано на использовании вероятностно-статистического метода, в котором условными плотностями вероятности вектора признаков распознавания являются параметры Стокса.
- Обосновано радиолокационное обнаружение опасных для судоходства метеорологических объектов и проведено экспериментальное измерение их параметров радиолокационным поляриметром.

- Гарантированное повышение безопасности на пути судна может быть обеспечено судовым радиолокатором с поляризационной селекцией эхосигналов, позволяющей осуществлять дистанционное обнаружение и распознавание навигационных объектов в сложных ситуационных условиях среды.
- Практическая реализация результатов исследований, полученных в диссертационной работе, повысит эффективность и безопасность судовождения.

Результаты диссертационной работы внедрены и используются (Приложение А):

- в технической службе Одесского морского порта при разработке перспективных планов развития его инфраструктуры. Акт внедрения от 12.05.2015г..

- в ИПРИ НАН Украины при построении моделирующего комплекса для управления функционированием корабельного соединения. Акт от 20.01.2015г..

- в Гидрометцентре Чорного и Азовского морей при гидрометеорологическом обеспечении Одесского и Илличевского торговых портов. Акт от 07.05.2015г..

- в филиале «Дельта-лоцман» ГП «АМПУ» при контроле за безопасностью судоходства в портовых водах. Акт от 29.09.2015г..

- в Одесской национальной морской академии в учебный процесс кафедры «Электронных комплексов судовождения». Акт от 05.11.2015г..

- в научно-исследовательскую работу № ДР 0115U001964) Одесской национальной морской академии «Управление погодными явлениями в транспортной системе» . Акт от 10.06.2015г..

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Красюк Н.П. Влияние тропосферы и подстилающей поверхности на работу РЛС / Н.П. Красюк, В.Л. Коблов, В.Н. Красюк. – М.: «Радио и связь», 1988. – 213 с.
2. Абрамов В.В. Электродинамическая модель помехи от гидрометеоров / В.В. Абрамов // Вопросы радиоэлектроники, вып. 15, 1981. – С. 42-97.
3. Бин Б.Р. Радиометеорология / Б.Р. Бин, Е.Дж. Даттон; [пер. с англ. под ред. А.А. Семенова]. – Л.: Гидрометеиздат, 1971. – 362 с.
4. Брылев Г.Б. Радиолокационные характеристики облаков и осадков / Г.Б. Брылев. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 231с.
5. Довиак Р. Дж. Метеорологические доплеровские радиолокационные станции / Р. Дж. Довиак, Д.С. Сирмане // ТИИЭР, № 11. – Т.67, 1979. – С.63-102.
6. Красюк Н.П. Корабельная радиолокация и метеорология / Н.П. Красюк, В.И. Розенберг. – Л.: Судостроение, 1970. – 328 с.
7. Огути Т. Распространение и рассеяние электромагнитных волн в дожде и других гидрометеорах / Т. Огути // ТИИЭР, № 9. – Т.71. – 1983. – С. 6-65.
8. Розенберг В.И. Рассеяние и ослабление электромагнитного излучения атмосферными частицами / В.И.Розенберг. – Л.: Гидрометеиздат,1972. – 348 с.
9. Степаненко В.Д. Радиолокация в метеорологии / В.Д. Степаненко. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 352 с.
10. Павлов Н.Ф. Аэрология, радиометеорология и техника безопасности / Н.Ф. Павлов. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 431с.
11. Радиометеорология. – М.: Военное издательство, 1984. – 208 с.
12. Saxton I.A., Lane I.A. The anomalous dispersion of water at very high radio frequencies. Part 1: Experimental determination of the dielectric properties of water in the temperature range $0^{\circ}\tilde{N}$ to $40^{\circ}\tilde{N}$ for wavelength of 1,24 and 1,58 cm. Meteorological factors in radiowave propagation. London, Phys. Soc. and Roy. Meteorol. Soc., 1946. – P.278.

13. Saxton I.A. The anomalous dispersion of water at very high radio frequencies. Part 3: The dipole relaxation time and its relation to the viscosity. Meteorological factors in radiowave propagation. Phys. Soc. and Roy. Meteorol. Soc., London, 1946. – P.306.

14. Lindeman K.L. Uber die anovale electridre dispersion in wasser in welen Langenbereigh. 0,014 – 10,4 cm. – Acta Acad. Aboensis. Math. et Phys. v. 15, No 9, 1947. – p. 1.

15. Шифрин К.С. Рассеяние света в мутной среде / К.С. Шифрин . – Л.: ГИТТЛ, 1951. – 254 с.

16. Зинченко Н.С. Измерения коэффициента отражения и диэлектрических проницаемостей воды в миллиметровом диапазоне радиоволн / Н.С. Зинченко // Ученые записки, т.102. Тр. Радиофизического ф-та, т.3. - Харьковский гос. ун-т, 1959. – 81 с.

17. Ryde I.W. The attenuation and radar echoes produced at centimeter wavelengths by various meteorological phenomena. Meteorological factor in radio wave propagation. London Phys. Soc., 1946. – p. 169.

18. Chamberlain I.E. et. al. Submillimetre absorption and dispersion of lirain, hail, fogs and clouds. Rept. 8670, General Electric CO., Webley, England, 1945.–p. 31.

19. Заичко С.И. Радиофизические характеристики атмосферы над морской поверхностью/ С.И.Заичко, А.И. Князь // Судовождение: сб. научных трудов. – Одесса: ОНМА, 2013. – С. 123 – 134.

20. Заичко С.И. Анализ корреляционной связи коэффициента преломления атмосферы с температурой воды, воздуха и упругостью водяных паров. / С.И. Заичко, А.И. Князь // «Суднові енергетичні установки: експлуатація та ремонт» - Електроенергетичні комплекси і автоматика суден: міжнародна конференція 20-22.03.2013. - Одеса, ОНМА, 2013. – С.109 – 110.

21. Арманд Н.А. Восстановление профиля коэффициента преломления тропосферы по измерениям частоты сигналов искусственного спутника Земли / Н.А. Арманд, В.А. Андрианов, В.М. Смирнов // Радиотехника и электроника. – т. 32. X 4, 1987. - С.673-680.

22. А.с. 1327036 СССР, МКИ 01 J Гя 1/00. Способ определения пространственного спектра показателя преломления атмосферы / А.И. Горб, В.В. Печев (СССР). - № 401 1562/24 - 10; заявл. 19.11.85; опубл. 12.03.87, Бюл. № 28.

23. Дунаенко Л.П. Влияние процессов переноса градиента показателя преломления радиоволн в приводном слое атмосферы /Л.П. Дунаенко, О.А. Ильин, Н.М.Падалка // Изв. вузов Геодезия и аэрофотосъемка. - № 2,1987. - С.70-77.

24. Дунаенко А.А. Метод расчета и оценки вертикального градиента индекса преломления радиоволн над морской поверхностью / Л.П. Дунаенко, О.А. Ильин, Н.М.Падалка // 15 Всесоюзная конференция по распространению радиоволн, тезы докладов, октябрь 1987. - Алма-Ата. - 295 с.

25. Жаркова И.С. Экспериментальное исследование вертикальной структуры показателя преломления тропосферы в 25-метровом приземном слое в прибрежной зоне /И.С. Жаркова, В.Я. Тверякова // Элементы и устройства радиоэлектроники: Материалы XXI конф. по радиоэлектронике. - Томск: ТГУ, 1974. - С.64-66.

26.Заболотный Н.С. Использование математических моделей для определения показателя преломления атмосферы / Н.С.Заболотный, В.Н. Голдина // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. - 1987. - № 2. - С.30-34.

27. Иванов Г.В. О возможности восстановления вертикального профиля показателя преломления в пограничном слое атмосферы во радиотепловому излучению при малых углах места / Г.В. Иванов, А.В. Рыжков // Тр. ГГО. -1988, Вып. 526. – С. 96-103.

28. Кижнер Л. И. Пространственно - временная структура поля индекса преломления в приводном слое атмосферы северной части Тихого океана / Л. И. Кижнер. - Том. ун – т . – Томск, 1988. - 28 с. - Деп. в ВИНТИ 18.11.88, № 8207-В88.

29. Кижнер Л.И. Горизонтальная изменчивость индекса преломления атмосферы в приводном слое Охотского моря / Л.И.Кижнер, В.И. Слущетский . - Том. ун-т. -Томск, 1987. - 7 с. - Деп. в ВИНТИ 09.09.87, № 6619-В87.

30. Киселев В.Н. Практикум по аэрологии и радиометеорологии: Учебное пособие/ В.Н. Киселев. - Л. : Ленингр. политехн. ин-т, 1986. - 141 с.

31. Красюк Н.П. Влияние структуры приводного слоя атмосферы на дальность обнаружения / Н.П. Красюк, С.П.Саликов // Прикл. задачи электродинамики, 1988. — С.49-54.

32. Кабанов В.А. Пространственно - временная структура поля СВЧ - радиосигналов в приводном слое атмосферы /В.А.Кабанов, Г.Г.Майков, В.Б.Синицкий, И.С.Тургенев, С.И. Хоменко//15 Всесоюз. конф. по распространению радиоволн: Тез. докл. Алма-Ата, октябрь 1987. - М., 1987. - С.307.

33. Кабанов В.А. Рефрактометрические измерения параметров тропосферы на приводных трассах /В.А.Кабанов, Г.Г.Майков, В.Б.Синицкий, И.С.Тургенев, С.И.Хоменко // 15 Всесоюз. конф. по распространению радиоволн: Тез. докл. Алма-Ата, октябрь 1987. — М., 1987. -С.296.

34. Белоброва М.В. Статистические характеристики флуктуаций коэффициента преломления в приводном слое / М.В.Белоброва, В.К.Иванов, Ф.В.Кивва, А.Н. Кошель. – Киев, 1986. - С.3-36. – (Препринт / Ин-т радиофизики и электроники АН УССР; № 324).

35. Шабельников А.В. Инженерные методы расчета различных видов рефракции / А.В.Шабельников // 15 Всесоюз. конф. по распространению радиоволн: Тез. докл. Алма-Ата, октябрь 1987. — М., 1987. -С.293.

36. Экспериментальное исследование механизма формирования поля миллиметровых волн при их распространении над морем / Л.М.Лобкова, Ю.П.Михайлюк, Н.И.Мишарева, В.В.Стельмах // Изв. вузов. Радиофизика. — 1987. — Т 30, На 8. — С.947-950.

37. Гомбоев Н.Ц. О косвенном методе расчета статистических характеристик коэффициента преломления воздуха / Н.Ц. Гомбоев, Н.И. Ленскинов, Е.М.Матханова, Р.Л. Тырхеева. — Улан-Удэ, 1989. - 19 с. –(Препринт / БНЦ СО АН СССР).

38. Степаненко В.Д. Радиолокация в метеорологии / В.Д. Степаненко. – Л.: Гидрометеиздат, 1966. – 350 с.

39. Атлас Д. Успехи радарной метеорологии / Д. Атлас. – Л.: Гидрометеиздат, 1967. – 135 с.
40. Laws I.O., Parsons D.A. The relation of raindrops size to rain intensity. – Trans. Am Geophys. Union, 1943, v. 24, Part II, - O. 452.
41. Marshall I.S., Palmer W.M. The distribution of raindrops with size. – J. Meteorol., 1948, v.5, No.4. – P.165.
42. Best A.C. The size distribution of raindrops. – Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., v. 76, No 327, 1950. – P.16.
43. Литвинов И.В. Спектральное распределение капель в дождях, образованных таянием града / И.В. Литвинов // Изв. Ан СССР, серия Геофизика, № 7, 1958. – 903 с.
44. Kelkar V.N. Size distribution of raindrops, III. – Indian, Meteorol. Geophys., v. 12. – No. 4. – 1961. – P.553.
45. Полякова Е.А. Микроструктура и прозрачность дождевых капель / Е.А.Полякова, К.С. Шифрин // Труды ГГО им. Воейкова, вып. 42 (104), 1953. – 84 с.
46. Ioss I., Waldvogel A. Raindrop size distribution and sampling size errors. – J. Atmosph. Sci., v. 26, No 3, 1969. – p. 566.
47. Абшаев М.Т. О функции распределения града / М.Т. Абшаев, О.И. Чековецкая // Метеорология и гидрология, № 6, 1967. – С. 36 – 39.
48. Руководство по производству наблюдений и применению информации с радиолокаторов МРЛ-1 и МРЛ-2. – Л. : Гидрометеиздат, 1974. – 333 с.
49. Боровиков А.М. Радиолокационные измерения осадков /А.М. Боровиков, В.В. Костарев, И.П.Мазин, В.И.Смирнов, А.А. Черников. – Л. : Гидрометеиздат, 1967. – 139 с.
50. Егоров А.Д. Исследование ослабления лазерного излучения в облаках с помощью лидара. [Вопросы физики облаков. Облака, осадки и грозовое электричество] / А.Д. Егоров, А.А. Синкевич, В.Д.Степаненко. – С.-П.: Гидрометеиздат, 2004. – С. 148 – 154.

51. Шупяцкий А.Б. Радиолокационное измерение интенсивности и некоторых других характеристик осадков / А.Б. Шупяцкий. – М.: Гидрометеиздат, 1960. – 118с.
52. Гусев К.Г. Атлас поляризационных параметров эллиптически поляризованных волн, отраженных от сред земной поверхности / К.Г. Гусев. - Харьков, 1966. – 315 с.
53. Вайнштейн Л.А. Выделение сигналов на фоне случайных помех / Л.А. Вайнштейн, В.Д.Зубаков. - М.: Изд-во «Советское радио», 1960. – 175 с.
54. Канарейкин Д.Б. Поляризация радиолокационных сигналов / Д.Б. Канарейкин, Н.Ф. Павлов, В.А. Потехин . – М.: Изд-во «Советское радио», 1966. – 440 с.
55. Поляризация сигналов в сложных транспортных радиоэлектронных комплексах. – С.-П. : Изд-во «Хронограф», 1994. – 460 с.
56. Корбан В.Х. Поляризаційна селекція хмар і опадів / В.Х. Корбан . – Одеса, 2004. – 248 с.
57. Нарбут В.П. Поляризация излучения зеркальных антенн / В.П.Нарбут, В.Ф. Хмель. – К.: Головное издательство издательского объединения «Вища школа», 1978. – 278 с.
58. Теоретические основы радиолокации; [под ред. В.Е. Дулевича]. – М.: Изд-во «Советское радио», 1978. – 607 с.
59. Канарейкин Д.Б. Морская поляриметрия / Д.Б. Канарейкин, В.А. Потехин, И.Ф. Шишкин. - Л.: Судостроение, 1968. - 328 с.
60. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники / Б.Р. Левин. – М.: Изд-во «Советское радио». – Кн. 1, 1968. – 273 с.
61. Поздняк С.И. Измерения электрических параметров среды поляризационным методом / С.И. Поздняк // «Радиотехника и электроника», № 10. – т.V. - 1960. – С. 15-21.
62. Поздняк С.И. Введение в статистическую теорию поляризации радиоволн / С.И. Поздняк, В.А. Мелитицкий. – М.: Изд-во «Советское радио», 1974. – 480 с.

63. Богородский В.В. Поляризация рассеянного и собственного радиоизлучения земных покровов / В.В. Богородский, Д.Б. Канарейкин, А.И. Козлов. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 279 с.

64. Князь А.И. Улучшение наблюдаемости объектов наземными радиолокационными средствами / А.И. Князь // Тези доповідей науково – технічної конференції, 17 – 19 листопада 2014р., Київ. – С. 92.

65. Князь А.И. К определению поляризационного канала/ А.И. Князь // «Морські перевезення та інформаційні технології в судноплавстві»: матеріали науково – методичної конференції, 18 – 19 листопада 2014р., О.: ОНМА, 2014. - С. 197 – 198.

66. Руководство по применению радиолокаторов МРЛ-4, МРЛ-5, МРЛ-6 в системе градозащиты / М.Т. Абшаев, И.И. Бурцев, С.И. Ваксенбург, Г.Ф. Шевела. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 229 с.

67. Knyaz A.I. Modelling of electromagnetic fields of polarized structure of radar signals of shipboard radar / A.I. Knyaz // «ECONOMICS» - Monthly International reviewed and refereed scientific journal, № 3-4. – 2015. – P. 106-111.

68. Marwitz I.D. Trajectories within the weak echo regions of hailstorms. – In: Proc. 15-th Radar Conf. Urbana, Illinois, 1972. – P. 317-324.

69. Radar and related hydrometeor observations inside a multicell hailstorm / D.L.Musil, C.Knight, W.R.Sand e.a. – In: Intern. Conf. Cloud Physics, Boulger, Colo, 1976.

70. Честнов Е.П. Предупреждение аварий речных судов при радиолокационной проводке / Е.П. Честнов. – М.: Транспорт, 1986. – 184 с.

71. Судовые РЛС: атлас схем / [под ред.. А.М.Байрашевского]. – М.: Транспорт, 1977. – 144 с.

72. Соненберг Г.Д. Радиолокационные и навигационные системы / Г.Д. Соненберг: пер. с англ. – Л.: Судостроение, 1982. – 400 с.

73. Песков Ю.А. Использование РЛС в судовождении / Ю.А. Песков – М.: Транспорт, 1986. – 144 с.

74. Жерлаков А.В. Радиолокационные системы предупреждения столкновения судов / А.В. Жерлаков, Н.С. Зимин, О.В. Кононов. – Л.: Судостроение, 1984. – 200 с.

75. Демиденко П.П. Судовые радиолокационные и радионавигационные системы / П.П. Демиденко. – Одесса.: «Фенікс», 2009. – 372 с.

76. Вагущенко Л.Л. Особенности обработки данных в судовых радиолокационных системах / Л.Л. Вагущенко, А.А. Кошевой. – Одесса.: ОГМА, 1998. – 66 с.

77. Белявский Л.С. Обработка и отображение радионавигационной информации / Л.С. Белявский, В.С. Новиков, П.В. Олянюк. – М.: Радио и связь, 1990. – 232 с.

78. Байрашевский А.М. Судовые радиолокационные системы / А.М. Байрашевский, Н.Т. Ничипоренко. – М.: Транспорт, 1982. – 311 с.

79. Сапрыкин В.А. Трехпараметрическая модель сигнала/ В.А. Сапрыкин, С.И. Тыняншин // Радиотехника, № 8, 1989. – С. 18-32.

80. Нелепец В.С. Радиолокационные методы метеорологических наблюдений / В.С. Нелепец, В.Д. Степаненко. – Л.: Гидрометеиздат, 1961. – 174 с.

81. Погосов С.Г. Безопасность плавания в портовых водах / С.Г. Погосов. – М.: Транспорт, 1977. – 136 с.

82. Попов Ю.Н. Определение допустимой скорости судна при движении в канале, проложенном в сплошном льду / Ю.Н. Попов, Т.Х. Яровая // Труды АА НИИ, т. 376, 1981. – С.61-66.

83. Система ограждения МАМС. Система навигационного оборудования плавучими предостерегающими знаками международной организации маячных служб (№ 9029). – Л.: ГУНиО МО СССР, 1986. – 28 с.

84. Борисенко А.К. Навигация / А.К. Борисенко, С.Л. Ефимов. – М.: Внешторг, 2004. – 176 с.

85. Катенин В.А. Навигационное обеспечение судовождения / В.А. Катенин, В.И. Дмитриев. – М.: НКЦ «Академкнига», 2006. – 372 с.

86. Ключев В.В. Состояние государственного надзора за соответствием морских судов требованиям международных конвенций и национальных нормативных актов по безопасности мореплавания / В.В. Ключев // Информационный бюллетень, № 2, 2005. – 38 с.

87. Мальцев А.С. Маневрирование судов при расхождении/ А.С. Мальцев. – Одесса: Морской тренажерный центр, 2008. – 235 с.

88. Rotheram V.A. Radiowave propagation in the evaporation duct. – Marconi Rev. – 1974. – Vol. 37, № 192. – P.18-40.

89. Мальцев А.С. Теория и практика безопасного управления судном при маневрировании : дис. доктора. техн. наук: 05.22.16 / Мальцев Анатолий Сидорович. – Одесса, 2007. – 395 с.

90. Морозов А.В. РЛС в судовождении / А.В. Морозов. – Одесса, 2013. – 464 с.

91. Radar and the human element. Shipping and shipping Record August 2, 1956. – P.138.

92. Briggs, John N. Target Detection by Marine Radar / John N. Briggs – London, United Kingdom, Institution of Engineering and Technology, 2004. – 705 p.

93. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн / Ф.Б. Черный. – М.: «Советское радио», 1972. – 464 с.

94. Каменин А.И. Распространение радиоволн на трассах наземных и космических радиолиний / А.И. Каменин. – М.: «Связь», 1979. – 269 с.

95. Князь А.И. Повышение эффективности эксплуатации судов путем совершенствования радиолокационного наблюдения объектов РЛС /А.И. Князь // «Енергетика судна: Експлуатація та ремонт»: науково-технічна конференція 26 – 28.03.2014р., Частина 2. – О.: ОНМА, 2014. - С. 62 – 65.

96. Князь А.И. Поляризационная селекция эхо – сигналов морских объектов на фоне гидрометеорологических помех / А.И. Князь // Судовые энергетические установки: науч. – техн. сб. – О.: ОНМА, 2014. , вып. 33. - С. 167 – 183.

97. Князь А.И. Влияние выпадающих осадков на радиолокационные обнаружения морских объектов судовыми некогерентными двухканальными РЛС / А.И. Князь // Судовые энергетические установки: науч. – техн. сб. - О.: ОНМА, 2014, вып. 34. – С. 32 – 40.

98. Андерсон Т. Введение в многомерный статистический анализ / Т. Андерсон. - М.: Физматгиз, 1963. – 500 с.

99. Крамер Г. Математические методы статистики. [пер. с англ. А.С. Мониной и А. А. Петрова]; под ред. акад. А. Н. Колмогорова / Гаральд Крамер. - М. : Гос. изд-во иностр. лит., 1948. - 631 с.

100. Copeland I. R. Radar Target Classification by Polarization Properties. Prog. Of the IRE, V. 11, № 7, 1960. – P. 1290-1296.

101. Большаков И.А. Статистические проблемы выделения потока сигналов из шума / И.А. Большаков. – М.: «Советское радио», 1969. – 464 с.

102. Долуханов М.П. Флуктуационные процессы при распространении радиоволн / М.П. Долуханов. – М.: «Связь», 1971. – 184 с.

103. Тихонов В.И. Выбросы случайных процессов / В.И. Тихонов. – М.: «Наука», 1970. – 392 с.

104. Хан Г. Статистические модели в инженерных задачах; [пер. с англ. под ред. В.В. Налимова] / Г. Хан, С. Шапиро. – М.: «Мир», 1969. – 395 с.

105. ВекКманн Р. Amplitude-Probability distribution of atmospheric radio noise / ВекКманн Р // Radio Science Journal of Research National Bureau of Standarts, V 68D, № 5 – 1964. – P.174-186.

106. Morner F. An investigation of atmospheric noise at very low reguencies / Morner F., Harwood I. // Proc. IEE, 103 B, 1956. – P.743-751.

107. Crichlow W.Q. Determination of the amplitude-probability distribution of atmosrheric radio Hoise from statistical moments / Crichlow W.Q., Roubigue C.I., Spaulding A.D., Beery W.M. // I. Res № BS 64 D (Radio Prop), №1,1960. – P.49-56.

108. Heidbreder G.R. Detection probabilities for Log normally distributed Signals / Heidbreder G.R., Mitchell R. L. // IEEE Trans. AES-3, №1, 1967. – P.89-101.

109. Kennedy R.W. The spatial and spectral characteristics of the radar cross section of satellite type targets / Kennedy R.W. // Air Force Avionics Lab., Wright-Patterson AFB, Ohio, Tech, Rept, AFAL-TR-66-77, 1966, March.

110. Цветков В.В. Статистические свойства сигналов и помех в двухканальных фазовых системах / В.В. Цветков // Радиотехника, № 5, 1957.

111. Дуб Дж. Л. Вероятностные процессы / Дж.Л. Дуб. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1956. – 605 с.

112. Современная радиолокация. Анализ, расчет и проектирование систем; [пер. с англ. под ред. Ю.Б. Кобзарева]. – М.: Изд-во “Советское радио”. – 1969. - 704 с.

113. Князь А.И. Принцип построения судового радиолокационного поляриметра, реализующего методы поляризационной селекции радиолокационных сигналов / Князь А.И. // Судовые энергетические установки: науч. – техн. сб. - О.: ОНМА, 2015, вып. 35. – С. 93 – 101.

114. Boerner W.M. Wei-Ling Yan, an Oong Xi, Yoshio Yamaguchi. Basic concepts of radar polarimetry / Boerner W.M. – Direct and Inverse Methods in Radar Polarimetry, part 1.

115. Huynen I.R. Phenomenological Theory of Radar Targets Ph. D. Thesis, Technical University, Delft, Netherlands, 1970.

116. Б.Дж.Мейсон. Физика облаков / Б. Дж. Мейсон. – Л.: Гидрометеиздат, 1961. – 541 с.

117. Качанов В.И. Укroщение тропического циклона / В.И.Качанов // Наука и жизнь, № 8, 2006. – С.104-107.

118. Манташьян П. Вихри от молекулы до галактики / П. Манташьян // Наука и жизнь, № 2, 2008. – С.114-119.

119. Shapiro L.I., Willoughby H.E. The response of balanced hurricanes to local sources of heat and momentum. – *I. Atmos. Sei.* 39, 1982. – P.378-394.

120. Novlan D.I., Gray W.M. Hurricane spawned tornadoes. – *Mon. Weather Rev.* 102. – P.476-488.

121. Матвеев Л.Т. Основы общей метеорологии. Физика атмосферы / Л.Т. Матвеев. – Л. : Гидрометеиздат, 1963. – 876 с.

122. Baynton H.W. The case for Doppler radars along our hurricane affection coasts. – *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 60, 1979. – P.1014-1023.

123. Gray W.M. Hurricanes: Their formation, structure and likely roll in the tropical circulation. – *Meteorol. Trop. Oceans, R. Meteorol. Soc.*, 1978. – P.155-218.

124. Golden I.H. The prospects and promise of NEXRAD: 1990's and beyond. Seminar on Weather Radar Networking, Sept. 5th, 1989, Brussels (Belgium). – P.17 -30.

125. Browning K.A. The role of radar in Weather forecasting. – *Phys. Techn.*, v.14, 1983. – P.140-143.

126. Muench H. S. Use of digital radar data in severe Weather forecasting. – *BAMS*, v. 57, No 3, 1976. – P. 298-303.

127. Howard D.D. Radar Target Angular Scintillation in Tracking and Guidance Systems Based on Echo Signal Phase – Front Distortion, *Proc. NEC.*, v. 15, 1959. – P.840-849.

Приложение А

**АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО
ИССЛЕДОВАНИЯ**

ЗАТВЕРДЖУЮ


 Директор ІПРІ НАН України,
 академік НАН України

В. В. Петров

«20» 01 2015 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи Князя Олександра Ігоровича за темою «Вдосконалення методів і засобів дистанційного спостереження та розпізнавання об'єктів на траєкторії руху судна у складних ситуаційних умовах середовища»

Комісія у складі:

Голова комісії:
 Заступник директора ІПРІ НАН України,
 д.т.н., професор

Додонов О.Г.

Члени комісії:

Старший науковий співробітник, к.в.н.,
 доцент

Руденко М.П.

Старший науковий співробітник, к.т.н.

Сенченко В.Р.

склала цей акт про те, що на протязі 2013 -2014р.р. результати кандидатської дисертаційної роботи Князя Олександра Ігоровича «Вдосконалення методів і засобів дистанційного спостереження та розпізнавання об'єктів на траєкторії руху судна у складних ситуаційних умовах середовища» впроваджені Інститутом проблем реєстрації інформації НАН України при виконанні наступних НДР та ДКР:

Назва НД та ДКР, що впроваджується	Форма впровадження	Ефективність від впровадження
1. Побудова та супроводження Урядової інформаційно-аналітичної системи з питань надзвичайних ситуацій	Методика інформаційного забезпечення командно-штабних навчань об'єктовою аварійно-рятувальною службою морського порту для контролю за погодою та розташуванням суден в районі пошуково-	Дозволяє підвищити ефективність дій персоналу рятувальною службою морського порту за рахунок проведення командно-штабних навчань.

Назва НД та ДКР, що впроваджується	Форма впровадження	Ефективність від впровадження
	рятувальних робіт	
2. Побудова моделюючого комплексу для управління функціонуванням корабельного з'єднання	Методика інформаційного забезпечення рятувальних операцій з урахуванням розташування суден в районі пошуково-рятувальних робіт із складними погодними умовами	Дозволяє суттєво скоротити час та витрати на проведення рятувальних операцій в складних погодних умовах

Голова комісії



Додонов О.Г.

Члени комісії



Руденко М.П.



Сенченко В.Р.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
 Начальник Гідрометцентру
 Чорного і Азовського морів
 _____ В.М. Ситов
 «07» травня 2015 р.



Акт

Про впровадження результатів дисертаційного дослідження Князя Олександра Ігоровича на тему «Удосконалення методів і засобів дистанційного спостереження навігаційних об'єктів на шляху судна».

Комісією у складі:

1. Голова комісії – заступник начальника ГМЦ ЧАМ – Неверовський І.П.
2. Членів комісії: провідний метеоролог ГМЦ ЧАМ кандидат географічних наук – Матигін О.С.
 Завідуючий сектором методичного керівництва – Паламарчук Ю.О.

Склали цей акт у тому, що в оперативну і науково-дослідницьку роботу Гідрометцентру Чорного і Азовського морів впроваджено перелічені нижче результати дисертаційної роботи Князя О.І.

1. Радіолокаційний метод дистанційного виявлення об'єктів в складних ситуаційних умовах середовища.
2. Радіолокаційний метод поляризаційного відмінності двох речових середовищ, що відрізняються своїми радіофізичними параметрами.
3. Впровадження радіолокаційних методів підвищило гідрометеорологічне забезпечення Одеського та Іллічівського торгових портів.

Голова комісії

Неверовський І.П.

Члени комісії

Матигін О.С.

Паламарчук Ю.О.

ЗАТВЕРДЖУЮ



Перший проректор

д.ю.н., професор

Шемякін О.М

2015 р.

АКТ

впровадження наукових досліджень, виконаних здобувачем Князем О.І. по темі «Вдосконалення методів та засобів дистанційного спостереження навігаційних об'єктів на шляху судна»

Ми, що нижче підписалися, начальник навчального відділу Пархоменко М.М., та завідуючий кафедрою «Електронних комплексів судноводіння» Вагущенко Л.Л. склали цей акт у тому, що результати наукових досліджень, які були виконані по НДР «Управління погодними умовами в транспортній системі (MOWE-IT)» впроваджені у навчальний процес, а саме, при читанні лекційних курсів та проведенні практичних занять по дисциплінах «Радіонавігаційні прилади і системи», «Навігаційні інформаційні системи», «Сучасні інформаційні технології у судноводінні»

Начальник навчального відділу

М.М Пархоменко

Завідуючий кафедрою, д.т.н. професор

Л.Л. Вагущенко



ЗАТВЕРДЖУЮ
 Проректор Одеської національної морської
 академії по науковій роботі
 к.т.н., професор

[Signature]
 В.А. Голіков

« 10 » 06 2015 р.

А К Т

про використання результатів дисертаційної роботи Князя О.І. на тему
 «Удосконалення методів та засобів дистанційного спостереження
 навігаційних об'єктів на шляху судна» в наукових дослідженнях, що
 виконуються в академії

Ми, що нижче підписались, начальник науково-дослідної частини академії Савчук В.Д. та провідний фахівець НДЧ Фірсанова О.О. склали цей акт у тому, що розділ 4 дисертаційної роботи Князя О.І. «Удосконалення радіолокаційних спостережень об'єктів судновими РЛС в складних ситуаційних умовах середовища» ввійшов складовою частиною в звіт по науково-дослідній роботі, яка виконана в академії «Управління погодними явищами в транспортній системі» - науковий керівник к.т.н., доцент Голіков В.В., ОНМА, Одеса – 2015 р.(№ ДР 0115U001964).

Начальник науково-дослідної
 частини ОНМА,
 к.т.н., с.н.с., професор

[Signature]

В.Д. Савчук

Провідний фахівець
 НДЧ

[Signature]

О.О. Фірсанова