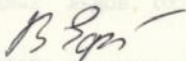


Национальная академия наук Украины
Институт радиотехники и электроники

На правах рукописи

Ефимов Валентин Борисович



ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЛЕДЯНЫХ
ПОКРОВОВ ЗЕМЛИ РАДИОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ
С АЭРОКОСМИЧЕСКИХ НОСИТЕЛЕЙ

(01.04.03 - радиотехника)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Харьков - 1994



00778872 (\$)

Диссертация является рукописью

Работа выполнена в Ордена Трудового Красного Знамени

Институте радиофизики и электроники НАН Украины

Научный руководитель доктор физико-математических наук,
профессор КАЛМЫКОВ Анатолий Иванович

Официальные оппоненты: - доктор физико-математических наук,
профессор ФУКС Иосиф Моисеевич

- доктор технических наук,
профессор КУЛЕМИН Геннадий Петрович

Ведущая организация - Центр аэрокосмических исследований
Земли ИГН НАН Украины (г. Киев)

Защита состоится "15 ноября" 1994 г. в 15⁰⁰ часов
на заседании Специализированного совета Д 016.64.01 при
Институте радиофизики и электроники НАН Украины (310085,
Харьков 85, ул. Академика Проскуры, д.12, конференц-зал)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИРЭ НАН Украины.

Автореферат разослан "15 ноября" 1994 г.

ЛННБ ім. В. Стефаніка
АН України

Ученый секретарь .

Специализированного совета

доктор физ.- мат. наук

К.А.Лукин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность темы определяется возрастающим значением дистанционных методов измерения характеристик ледяных покровов Земли при решении широкого круга научных и прикладных задач, связанных с изучением процессов взаимодействия атмосферы и океана и гидрометеорологическим обеспечением мореплавания в полярных районах. Для этих целей необходима текущая и прогностическая информация о параметрах природных льдов, охватывающая обширные труднодоступные территории.

Одним из перспективных методов дистанционного зондирования является активный радиолокационный, базирующийся на измерении параметров радиосигналов СВЧ диапазона, рассеянных исследуемой поверхностью. Его преимущества по сравнению с традиционными наблюдениями в оптическом и инфракрасном диапазонах обусловлены возможностью проведения исследований при минимальном влиянии погодных условий независимо от времени суток и года.

Исследования ледяных покровов радиолокационными средствами, установленными на аэрокосмических носителях, находят широкое применение в практике дистанционного зондирования. Известен многолетний опыт использования самолетных радиолокаторов бокового обзора с реальной апертурой (РБО) "Торос", "Нить" для исследований морских льдов и ледовой разведки в Арктическом бассейне. Проведены испытания космических радиолокационных систем с синтезированием апертуры (РСА) - "Seasat", "ERS-1", "Космос-1870", свидетельствующие о возможности получения информации о характеристиках ледяного покрова по данным радиолокационной съемки из космоса.

Как самолетные радиолокационные системы, так и космические РСА до настоящего времени обеспечивают наблюдения поверхности Земли в сопоставимых масштабах и наиболее эффективно могут использоваться для детальных региональных исследований. Наряду с детальной информацией о ледяном покрове, получаемой на региональном уровне, фундаментальное значение имеют исследования Мирового океана и природных льдов в синоптическом масштабе. Такие исследования требуют создания средств, обеспечивающих глобальный охват наблюдениями всей акватории Мирового океана

(включая площади, покрытые морскими льдами и ледниковые покровы Арктики и Антарктики) с периодичностью обновления и в масштабах, позволяющих адекватно описывать изучаемые процессы.

Развитие радиофизических методов дистанционного зондирования тесно связано с проблемой интерпретации получаемой информации и, соответственно, с изучением закономерностей рассеяния электромагнитных волн объектами природной среды.

Природные льды представляют собой чрезвычайно сложную систему. В общем случае это случайно-неоднородный поглощающий и рассеивающий слой, границы которого характеризуются широким спектром шероховатостей. Диэлектрические свойства льда определяются условиями образования, температурой, соленостью, возрастом (толщиной) и заметно изменяются во времени. Многообразие физических свойств и трудности, возникающие при решении задач рассеяния радиоволн ледяными покровами, не позволяют создать единую модель, адекватно описывающую процессы рассеяния; поэтому основу методов интерпретации результатов зондирования льдов составляют обобщенные экспериментальные данные.

В многочисленных экспериментах установлены связи характеристик рассеянных радиосигналов с интегральными параметрами морских льдов. Однако эти исследования не охватывают всех возможных ситуаций наблюдения, возникающих при зондировании в натуральных условиях, а многолетний опыт ледовой разведки в Арктике самолетными РБО ограничивается, в основном, качественным анализом радиолокационных изображений, получаемых в коротковолновой части сантиметрового диапазона радиоволн.

Все это вызывает необходимость дальнейшего изучения свойств рассеяния радиоволн морскими льдами и совершенствования радиолокационных методов и средств дистанционного зондирования поверхности океана и ледяных покровов Земли.

Результаты исследований, представленные в настоящей работе, получены в рамках НИР "Карта" - "Теоретические и экспериментальные исследования явлений радиолокационных отражений и радиотепловых излучений поверхностью океана и ледовыми покровами с аэрокосмических носителей" (N гос. регистр. 01.816.014.429), выполненной в ИРЭ НАН Украины в соответствии с постановлением Президиума НАН Украины №604 от 25.12.80г.

Целью диссертационной работы является изучение физических

закономерностей, обуславливающих взаимосвязь энергетических характеристик рассеяния радиоволн СВЧ-диапазона с параметрами ледяного покрова, и дальнейшая разработка на основании установленных закономерностей радиолокационных средств дистанционного зондирования и методов интерпретации получаемой информации.

Научная новизна диссертационной работы заключается в том, что на основании результатов самолетных экспериментов в натуральных условиях получены обобщенные данные о пространственных вариациях удельной ЭПР морских льдов в различных районах Арктического бассейна. Анализ результатов самолетных исследований, проведенный в рамках известных моделей рассеяния, позволил установить связи угловых зависимостей удельной ЭПР соленых морских льдов, образовавшихся в осенне-зимний период года, с их диэлектрической проницаемостью и спектральной плотностью эффективных неровностей.

Обоснованы и определены основные требования к условиям наблюдения и параметрам океанографических радиофизических систем дистанционного зондирования поверхности океана и ледяных покровов Земли из космоса, реализованные при разработке космических РБО ИСЗ "Космос-1500", "Космос-1602".

Определены и экспериментально подтверждены возможности космических радиолокационных систем бокового обзора типа РБО ИСЗ "Космос-1500" (впоследствии эксплуатационная система "Океан") при исследованиях ледяных покровов в труднодоступных районах Арктики и Антарктики в синоптических масштабах, а также при решении региональных задач.

Экспериментально показана эффективность методов многочастотного зондирования. При синхронных наблюдениях в см и дм диапазонах радиоволн устраняется неоднозначность интерпретации данных зондирования молодых и однолетних льдов, существенно упрощается интерпретация и появляется возможность получения дополнительной информации об однолетних и многолетних льдах.

Практическая значимость. Результаты диссертационной работы реализованы при разработке и создании радиолокационных систем исследования океана и ледяных покровов Земли типа РБО ИСЗ "Космос-1500" ("Океан"). Высокая оперативность получения информации потребителями позволяет использовать результаты радиолокационной съемки из космоса для решения задач непосред-

ственного гидрометеорологического обеспечения мореплавания.

Полученные в процессе космических экспериментов по дистанционному зондированию результаты использованы при разработке "Методических указаний по вопросам приема, обработки и использования спутниковой ледовой информации", выпущенных Арктическим и Антарктическим научно-исследовательским институтом. Выводы, рекомендации и технические решения, полученные в диссертации, использованы при создании самолетного многоцелевого радиолокационного комплекса, внедренного в практику ледовой разведки в Арктическом бассейне.

Результаты, полученные в диссертации, могут найти применение в научно-исследовательских учреждениях и организациях, работающих в области радиофизики, океанографии и исследований природной среды Земли.

Основные результаты работы, положения, выводы и рекомендации, выносимые на защиту:

1. Исследованы угловые зависимости удельной ЭПР соленых морских льдов, образовавшихся в осенне-зимний период года в см диапазоне радиоволн. Показано, что характер изменения удельной ЭПР для углов падения, отличных от вертикальных, может быть описан на основе использования эффективных шероховатостей, учитывающих как неровности верхней границы, так и неоднородности диэлектрической проницаемости верхних слоев льда. Вид угловой зависимости ЭПР определяется спектральными характеристиками эффективных шероховатостей, а динамические изменения удельной ЭПР, наблюдающиеся в процессе роста льда, связаны с изменением средней величины диэлектрической проницаемости в верхних слоях льда.

2. Разработаны основные требования к условиям наблюдения и параметрам океанографических радиолокационных систем бокового обзора, предназначенных для зондирования океана и природных льдов, которые реализованы при создании РБО ИСЗ "Космос-1500" (Океан).

3. Исследованы возможности использования космической радиолокационной информации для дистанционной диагностики ледяных покровов. Показано, что системы типа РБО ИСЗ "Космос-1500" обеспечивают решение широкого круга научных и практических задач в труднодоступных районах Арктики и Антарктики таких, как определение границ распространения морских льдов, исследования

динамики морских льдов (в том числе изменчивости границы многолетних льдов), определение скорости и направления дрейфа ледяных массивов, обнаружение крупных трещин и разводий, обнаружение крупных айсбергов, ледяных островов и многолетних льдин. Информация, получаемая РБО, также оперативно используется для гидрометеорологического обеспечения мореплавания в полярных районах.

4. Предложены пути совершенствования радиофизических методов дистанционной диагностики морских льдов. Экспериментально исследованы методы многочастотного зондирования. Показано, что при синхронных наблюдениях в см и дм диапазонах радиоволн существенно повышается достоверность интерпретации и появляется возможность получения дополнительной информации о параметрах морских льдов. Целесообразным представляется создание космических систем, в состав которых входят обзорные РБО см и РСА дм диапазонов для детальных исследований.

Обоснованность и достоверность. Полученные при исследованиях рассеяния радиоволн морскими льдами экспериментальные результаты интерпретируются в рамках общих представлений о рассеянии радиоволн случайно-неоднородными средами. В исследованиях применялись описания статистических характеристик эффективных неоднородностей морских льдов, полученные эмпирическим путем. Обработка информации основана на известных методах статистической радиофизики. Достоверность экспериментальных данных подтверждается повторяемостью результатов, полученных в различных регионах, и устойчивостью статистических характеристик. Результаты интерпретации радиолокационных изображений морских льдов согласуются как с общими представлениями о характеристиках ледяных покровов морей и океанов, так и с данными оптических и контактных измерений.

Апробация работы. Основные результаты диссертации были представлены на Всесоюзных конференциях по распространению радиоволн (Томск, 1978; Ленинград, 1984; Алма-Ата, 1987), 5 Всесоюзной школе "Автоматизация научных исследований морей и океанов" (Севастополь, 1980), 5 Всесоюзном семинаре "Неконтактные методы измерений океанографических параметров" (Москва, 1983), 35 конгрессе Международной астронавтической федерации (Лозанна, 1984), 23 Генеральной ассамблее международного радиосоюза

(URSI) (Прага, 1990), Международном научном семинаре по аэрокосмическому мониторингу земных покровов и атмосферы (Киев, 1993), а также обсуждались на научных семинарах ИРЭ НАН Украины.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 27 печатных работах, основные из которых перечислены в автореферате. В этих работах автором определены требования к условиям наблюдения и основным параметрам океанографических систем дистанционного зондирования космического базирования /1,2,4,7,8,12/. Получены обобщенные данные о пространственных вариациях удельной ЭПР морских льдов в различных районах Арктического бассейна, проведен анализ данных самолетных экспериментов, позволивший установить связи удельной ЭПР соленых морских льдов, образовавшихся в осенне-зимний период года, с их диэлектрической проницаемостью и спектром эффективных неровностей /3,5,6,11/. Обоснованы и экспериментально подтверждены возможности космических РБО типа ИСЗ "Космос-1500" при исследованиях ледяных покровов в труднодоступных районах Арктики и Антарктики в синоптических масштабах /3,6,9-16/. Экспериментально показана эффективность методов многочастотного зондирования морских льдов /17/.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и содержит 109 страниц основного текста, 39 рисунков на 38 страницах, список литературы из 136 наименований на 15 страницах. Общий объем работы 162 страницы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика диссертации, обоснована актуальность исследований, сформулированы цель работы, практическая значимость, новизна и достоверность полученных результатов. Приведены основные результаты, положения, выводы и рекомендации, выносимые на защиту. Схематично изложено содержание диссертации.

В первой главе "Основные свойства рассеяния радиоволн СВЧ морскими льдами и поверхностью океана" изучаются особенности рассеяния радиоволн СВЧ диапазона морскими льдами и взволнованной морской поверхностью.

Проведен анализ основных электрофизических и физико-хими-

ческих свойств морских льдов. Отмечается, что электрофизические свойства морского льда в СВЧ диапазоне в большой степени определяются наличием жидкой фазы (ячеек с рассолом) в толще льда и его структурно-физическими характеристиками. В свою очередь, количество жидкой фазы и структурно-физические характеристики морского льда тесно связаны с термическими и динамическими процессами взаимодействия атмосферы и океана и изменяются с ростом ледяного покрова. Таким образом, электрофизические параметры, а соответственно, и характеристики радиосигналов, рассеянных морским льдом в СВЧ диапазоне, зависят от возраста (толщины) ледяного покрова, что используется для решения задач дистанционного зондирования.

Задачи, возникающие при изучении взаимодействия атмосферы и океана, и роль природных льдов в этих процессах обуславливают тесную взаимосвязь исследований ледяных покровов морей и океанов с наблюдениями различных структур на океанской поверхности и поля приводного ветра.

Основу методов зондирования морской поверхности составляют связи свойств рассеянных радиосигналов с параметрами волнения и структурой поверхности, описываемые двухмасштабной моделью рассеяния. В соответствии с этой моделью рассеяние является избирательным, т.е. определяется мелкомасштабными составляющими волнения (рябью), а крупные волны вызывают амплитудно-частотную модуляцию рассеянных рябью сигналов / F.G.Bass, I.M.Fuks, A.I.Kalmykov, I.E.Ostrovsky, A.D.Rosenberg, IEEE Trans., 1968/ Удельная эффективная площадь рассеяния (УЭПР), в случае отсутствия крупных волн, определяется зависимостью

$$\sigma^0 = 16\pi k^4 F(\vec{p}_0, \vec{p}, \vec{n}, \vec{\alpha}, \vec{\beta}, \vec{\epsilon}) S(\vec{x}, \vec{w}) \quad (1)$$

где $k=2\pi/\lambda$ - волновое число падающей электромагнитной волны; F - функция, зависящая от \vec{p}_0 , \vec{p} - поляризации падающего и рассеянного полей, $\vec{\alpha}$, $\vec{\beta}$ - направлений падения и рассеяния, \vec{n} - локальной нормали в точке рассеяния, $\vec{\epsilon}$ - диэлектрической проницаемости рассеивающей поверхности; $S(\vec{x})$ - спектральная плотность поверхностного волнения, связанная с вектором скорости приводного ветра \vec{w} . Величина \vec{x} определяется как:

$$\vec{x} = k(\vec{\beta}_1 - \vec{\alpha}_1) \quad (2)$$

где $\vec{\alpha}_1$ и $\vec{\beta}_1$ - проекции на плоскость единичных векторов падаю-

шего и рассеянного полей. Следует отметить, что выражение (1) используется для описания рассеивающих свойств широким классом статистически неровных поверхностей, которые удовлетворяют условиям применимости метода малых возмущений.

На углах падения θ , близких к вертикальным, интенсивность рассеянных радиосигналов определяется отражениями от квазиплоских элементов крупных волн и связана с эффективными углами наклона $\gamma_{\theta\phi}$ определяемыми как

$$\overline{\gamma_{\theta\phi}^2} = \iint_0^{\alpha_{\max}} \alpha^2 S(\alpha) d\alpha, \quad (3)$$

где α_{\max} - волновое число морских волн, которые удовлетворяют условиям малости кривизны $(k \cdot R)^{-1/3} \ll 1$, где R - радиус кривизны крупномасштабной поверхности. Удельная ЭПР связана со скоростью ветра, так как воздействие ветра на поверхность океана приводит к росту спектральной плотности высокочастотных составляющих и дисперсии наклонов крупных волн.

Детальные исследования флуктуационных характеристик радиолокационных отражений при малых углах θ , проведенные синхронно с контактными измерениями параметров волнения, позволили уточнить область перехода от квазизеркальных отражений к рассеянию на ряби, которая по данным этих измерений находится на углах $\theta \leq 10^\circ \pm 15^\circ$. Последнее обстоятельство позволяет выбирать начальный угол сектора наблюдения космических РБО в области $\theta \geq 15^\circ$.

Этот вывод справедлив и при наблюдениях неоднородностей морской поверхности, что подтверждается результатами натуральных измерений контрастов радиолокационных отражений от сликов естественного происхождения, а также сликов, связанных с наличием разливов нефтепродуктов на поверхности моря.

Далее в первой главе проводится анализ известных результатов измерений характеристик обратного рассеяния радиоволн СВЧ диапазона морскими льдами и особенности модельных описаний процессов рассеяния.

Результаты измерений характеристик обратного рассеяния радиоволн морскими льдами свидетельствуют о зависимости интенсивности отраженных сигналов от возраста льда, состояния его поверхности, сезона, региональных условий и т. д. Наблюдается также существенная частотная зависимость УЭПР морских льдов в

СВЧ диапазоне. Характерные максимальные контрасты радиолокационных отражений от однолетних и многолетних льдов в диапазоне $\lambda \approx 2-3$ см составляют 10-12 дБ. С ростом длины радиоволны контрасты снижаются и, начиная с $\lambda \approx 10$ см, практически отсутствуют.

Существенной поляризационной зависимости УЭП однолетних и многолетних льдов при согласованной поляризации излученного и принятого сигналов не наблюдается. УЭП указанных видов морского льда при измерениях на горизонтальной поляризации на 1-3 дБ ниже, чем на вертикальной.

В коротковолновой части см диапазона существует также зависимость интенсивности рассеянных радиосигналов от толщины молодых и ниласовых льдов.

Несмотря на качественное совпадение результатов экспериментальных исследований энергетических характеристик обратного рассеяния, количественные оценки УЭП для льдов одного и того же возраста отличаются на 4-10 дБ. Принципиально это может быть связано с достаточно грубым описанием параметров исследуемого ледяного покрова (как правило, приводится возраст льда и, в ряде случаев, его торосистость) и вызываться отличиями структурно-физических и диэлектрических параметров льда в пределах одной возрастной градации. Однако, существующих экспериментальных данных недостаточно для выделения факторов, определяющих характеристики обратного рассеяния радиоволн морскими льдами в СВЧ диапазоне.

Теоретическим исследованиям проблемы рассеяния радиоволн ледяными покровами посвящен ряд работ отечественных и зарубежных ученых.

Рассмотренные результаты решения задач рассеяния радиоволн ледяными покровами с учетом их электрофизических и структурно-физических характеристик позволяют объяснить качественные особенности некоторых экспериментов по дистанционному зондированию. Однако зависимость результата решения от целого ряда параметров ледяного покрова (шероховатостей поверхности, статистических характеристик флуктуаций диэлектрической проницаемости в слое льда и т.д.), которые, как правило, определяются феноменологически и допускают неоднозначную интерпретацию полученных результатов, существенно ограничивает возможности теоретических описаний рассеивающих свойств ледяных покровов. В связи с этим,

при интерпретации радиофизической информации наиболее распространенными являются методы, основанные на обобщенных данных экспериментальных исследований.

На основании анализа свойств обратного рассеяния радиоволн морской поверхностью и ледяными покровами, с учетом задач, решаемых при дистанционном зондировании океана и льдов, сформулированы основные требования к параметрам радиолокационных океанографических систем космического базирования:

- диапазон рабочих длин волн - 3-4см;
- поляризация излучения и приема - вертикальная;
- начальный угол наблюдения - $\theta_{нач} \geq 20^\circ$;
- разрешающая способность системы - не хуже 1-3км;
- полоса обзора - более 300км;
- обработка информации на борту в реальном масштабе времени;
- оперативная передача информации по стандартным линиям связи непосредственно потребителям.

С учетом этих требований в ИРЭ НАН Украины разработаны самолетный комплекс радиофизической аппаратуры "Аналог" и космические радиолокаторы бокового обзора, установленные на борту океанографических ИСЗ "Космос-1500", "Космос-1602" и внедренные впоследствии в эксплуатационной системе "Океан".

Во второй главе "Экспериментальные исследования характеристик обратного рассеяния радиоволн морскими льдами самолетным комплексом РФА" рассмотрены результаты экспериментальных исследований характеристик обратного рассеяния радиоволн 3см диапазона в натуральных условиях в различных районах Арктического бассейна.

Приводятся основные параметры измерительной аппаратуры, установленной на борту самолета-лаборатории ИЛ-18, и описаны методические особенности калибровки РВО и методики проведения самолетных измерений.

В результате экспериментов установлено, что в 3см диапазоне наблюдается высокая чувствительность энергетических характеристик рассеянных радиосигналов к изменению структурно-физических и электрофизических параметров морского льда. Пространственная неоднородность этих параметров приводит к значительным флуктуациям средних значений УЭПР в пределах участков, ограниченных

льдами одного возраста. Максимальные флуктуации средних значений интенсивности радиолокационных сигналов, рассеянных ниласовыми льдами, достигают 15-20дБ и более, для молодых и однолетних льдов - эти флуктуаций не превышают 10-12дБ, для многолетних льдов - величина флуктуаций менее 4-6дБ. Наблюдающиеся вариации УЭПР затрудняют обработку и однозначную интерпретацию результатов зондирования. Однако эти трудности могут быть преодолены при наличии представительных массивов данных и сопутствующей априорной информации. Поэтому реализованные при самолетных экспериментах методики измерений были разработаны с учетом особенностей рассеяния и свойств конкретного вида исследуемого ледяного покрова.

Приведены результаты измерений угловых зависимостей УЭПР основных видов дрейфующих льдов в Арктическом бассейне. Анализ экспериментальных данных, полученных в различных районах Арктики, с учетом пространственных вариаций УЭПР в пределах одной возрастной градации, позволяет сделать вывод об отсутствии региональных особенностей в характере рассеяния радиоволн морскими льдами, что свидетельствует об эффективности методов интерпретации радиофизической информации, основанных на обобщенных экспериментальных данных.

На основании анализа обобщенных зависимостей УЭПР, полученных при самолетных экспериментах, установлено, что для льдов, образовавшихся в осенне-зимний период года, с ростом толщины наблюдается уменьшение УЭПР (за исключением участков ниласовых льдов, покрытых пленкой рассола). Области значений УЭПР при переходе из одной возрастной градации в другую перекрываются, а тонкие, средние и толстые однолетние льды имеют значительную общую область значений УЭПР. Последнее обстоятельство во многом объясняет сложности, возникающие при интерпретации радиолокационных изображений морских льдов в переходных стадиях роста, а также при определении возраста однолетних льдов.

Проведен анализ результатов измерений УЭПР морских льдов, образовавшихся в осенне-зимний период года, в рамках известных моделей рассеяния с учетом общих закономерностей, описывающих изменение электрофизических и структурно-физических свойств в процессе роста ледяного покрова. Показано, что характер изменения удельной ЭПР для углов падения, отличных от вертикальных,

может быть описан на основе использования эффективных шероховатостей, учитывающих как неровности верхней границы, так и неоднородности диэлектрической проницаемости верхних слоев льда. В рамках модели избирательного рассеяния численно рассчитаны зависимости $\sigma^\circ(\theta)$, вполне удовлетворительно согласующиеся с экспериментальными данными. При вычислениях спектр эффективных шероховатостей задавался степенной функцией $S(x) = C x^{-n}$, параметры которой - показатель степени $n=2$ и коэффициент $C=1,6 \cdot 10^{-2}$ были определены из экспериментальной зависимости $\sigma^\circ(\theta)$ для ниласовых льдов. Необходимые для вычислений значения эффективной диэлектрической проницаемости заимствованы из имеющихся данных измерений электрофизических характеристик морских льдов. Результаты расчетов позволяют сделать вывод, что наблюдающееся при натуральных экспериментах снижение УЭПР с ростом ледяного покрова объясняется уменьшением средней величины диэлектрической проницаемости, характерным для верхних слоев льда, образовавшегося в осенне-зимний период года.

Описанные модельные представления могут быть использованы и при интерпретации известных данных многочастотных измерений УЭПР однолетних льдов. Расчетные кривые, полученные при использовании аппроксимации спектра эффективных шероховатостей степенной функцией с показателем степени $n=2$, достаточно хорошо описывают известные экспериментальные зависимости.

В результате самолетных исследований получены данные, которые в дальнейшем использовались при разработке методик интерпретации информации, получаемой космическими радиолокационными системами бокового обзора.

В третьей главе "Исследование ледяных покровов Земли космическими радиолокаторами бокового обзора" проведен анализ результатов экспериментов по дистанционному зондированию ледяных покровов Земли РБО ИСЗ "Космос-1500", рассмотрены пути совершенствования радиофизических средств дистанционного зондирования.

Важным качеством радиофизических средств дистанционного зондирования, установленных на космических платформах, является возможность систематических наблюдений мезо- и макромасштабных процессов на поверхности Земли. При океанографических исследованиях динамических явлений в системе атмосфера - океан - крио-

сфера требуется также высокая оперативность обработки информации. При оптимальном сочетании тактических характеристик: полосу обзора, разрешения, оперативности передачи информации широкой сети потребителей, радиофизические системы могут использоваться и для решения практических задач, таких как гидрометеорологическое обеспечение мореплавания.

Рекомендации по созданию океанографических систем реализованы при разработке в ИРЭ НАН Украины радиолокационной системы бокового обзора ИСЗ "Космос-1500", предназначенной для всепогодного зондирования поверхности океана и ледяных покровов Земли.

Основные характеристики РБО ИСЗ "Космос-1500":

- средняя высота орбиты - 650 км,
- наклонение орбиты - 82,6°,
- рабочая длина волны - 3,15 см,
- поляризация излучения и приема - вертикальная,
- рабочий сектор углов падения - 20° - 47°,
- среднее в полосе разрешение по уровню -3дБ при передаче информации
 - по дециметровой линии - $(0,8 \times 2,5) \text{ км}^2$,
 - по метровой линии - $(2 \times 2,5) \text{ км}^2$,
- полоса обзора поверхности
 - в режиме запоминания - $((450+500) \times 2500) \text{ км}^2$,
 - в режиме непосредственной передачи - $((450+500) \times 4000) \text{ км}^2$.

Передача информации осуществляется в международном фототелеграфном стандарте, принятом в космических метеорологических системах. Кроме того, предусмотрено комплексирование РБО с оптическим сканирующим устройством МСУ-М, что позволяет использовать при обработке и интерпретации информации опыт, накопленный при наблюдениях в оптическом диапазоне.

Информация РБО представляется в виде радиолокационных изображений (РЛИ) исследуемой поверхности, которые в дальнейшем используются для тематической обработки. Наряду с этим, предусмотрена возможность проведения радиофизических измерений УЭПР и радиолокационных контрастов, что обеспечивается автоматической калибровкой потенциала РБО, учитывающей особенности форми-

рования РЛИ в блоке обработки, специфику модуляции информационных сигналов в линии передачи и их детектирования на наземных пунктах приема, способы регистрации информации.

Тематическая обработка информации осуществляется путем анализа РЛИ, основанного на установленных связях УЭПР с возрастом льда. При этом привлекается дополнительная априорная информация (данные о гидрометеорологическом режиме, отсутствующая метеорологическая информация, результаты наблюдений в оптическом диапазоне и т. д.).

Анализ экспериментов по дистанционному зондированию показал, что системы типа РБО ИСЗ "Космос-1500" могут успешно использоваться для исследований ледяных покровов Арктики и Антарктики и позволяют решать ряд важных научных и практических задач таких, как: исследования пространственной структуры дрейфующих морских льдов; определение положения границ распространения морских льдов; выделение зон включения и преобладания старых льдов; обнаружение трещин и развоидий в многолетних льдах; обнаружение крупных айсбергов, ледяных островов, многолетних ледяных полей; определение скорости и направления дрейфа ледяных массивов. Эффективность разработанных методов подтверждается положительными результатами ледовых операций по выводу каравана судов, затертых во льдах (Арктика, пролив Лонга, 1983г.) и спасению судна "М.Сомов" (Антарктика, 1985г.).

На основании информации РБО ИСЗ "Космос-1500" впервые в мире были построены радиолокационные карты Антарктиды. Результаты зондирования свидетельствуют о значительных контрастах радиолокационных отражений, формируемых различными участками ледникового покрова, определены сезонные изменения УЭПР; на РЛИ наблюдаются также проявления геологических структур в толще ледников. Все это свидетельствует о возможности проведения систематических исследований ледниковых покровов в наиболее труднодоступных районах земного шара.

Почти десятилетний опыт эксплуатации подтверждает, что системы типа РБО ИСЗ "Космос-1500" / "Океан" могут успешно использоваться как для глобальных исследований ледяных покровов, так и для региональных наблюдений, включающих решение задач непосредственного гидрометеорологического обеспечения мореплавания.

Вместе с тем, рассмотренные методы имеют ограничения, свя-

занные с неоднозначностями интерпретации данных радиолокационного зондирования на одной частоте. Ряд ограничений, возникающих при исследованиях ледяных покровов, может быть преодолен при применении более совершенных методов многочастотного зондирования. Весьма перспективным представляется совместное использование информации, получаемой в см и дм диапазонах радиоволн.

На основании анализа результатов экспериментальных исследований энергетических характеристик обратного рассеяния и закономерностей изменения структурно-физических и электрофизических параметров с ростом толщины ледяного покрова показано, что при синхронных наблюдениях в см и дм диапазонах радиоволн устраняется неоднозначность интерпретации данных зондирования молодых и однолетних льдов, возможно также выделение зон торошения ледяного покрова.

Приведенные в работе рекомендации реализованы при создании в ИРЭ НАН Украины многоцелевого радиолокационного комплекса (МРЛК), установленного на борту самолета ИЛ-18Д, в состав которого входят РБО 3см и РСА 23см диапазонов.

Высокая эффективность методов многочастотного зондирования подтверждается результатами научно-эксплуатационных работ по гидрометеорологическому обеспечению высокоширотной навигации в Арктике. Так, информация МРЛК использовалась при подготовке и обеспечении рейсов атомного ледокола "Советский Союз" на Северный полюс в период летних навигаций 1992 и 1993 годов.

В работе рассматривается вариант построения перспективной многочастотной космической радиолокационной системы, в состав которой входят РБО 3см и РСА дм диапазонов. В основу РБО положены принципы, апробированные при создании РБО ИСЗ "Космос-1500". Полоса захвата РСА составляет 100-150 км, а ее положение может оперативно изменяться в пределах полосы обзора РБО.

При таком подходе обеспечивается достаточно быстрый обзор обширных полярных районов Арктики и Антарктики; кроме того, информация РСА может оперативно использоваться для решения тактических задач ледовой разведки непосредственно в районе проведения морской операции. При этом, учитывая, что наблюдения в см и дм диапазонах проводятся в сопоставимых масштабах, возможна совместная обработка многочастотной информации в пределах полосы захвата РСА.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

1. Проведен направленный анализ результатов экспериментов и возможных физических механизмов рассеяния радиоволн морскими льдами. Отмечено, что характеристики рассеяния радиоволн СВЧ во многом определяются физико-химическими и электрофизическими свойствами льда. Электрофизические свойства морского льда, в свою очередь, в большой степени зависят от содержания жидкой фазы (ячеек с рассолом) в толще льда и непосредственно связаны с его возрастом, соленостью, температурой, условиями образования, а также динамическими и термодинамическими процессами в атмосфере и океане.

При описании электродинамических свойств льда и интерпретации данных дистанционного зондирования необходимо учитывать неоднородности диэлектрической проницаемости, которые обуславливают эффекты распространения и рассеяния электромагнитного излучения в морских льдах.

2. Обоснованы и определены основные требования к условиям наблюдения и параметрам океанографических радиофизических систем дистанционного зондирования поверхности океана и ледяных покровов Земли из космоса. Показано, что для всепогодных оперативных исследований поверхности океана и ледяных покровов целесообразно использовать космические РБО с рабочей длиной волны $\lambda \approx 3-4$ см, поляризация излучения и приема вертикальная, сектор углов падения $20^\circ - 80^\circ$, разрешение не хуже 1 ± 2 км, полоса обзора $\geq 450-500$ км. Обработка информации должна проводиться на борту ИСЗ в реальном времени, кроме того должна быть предусмотрена возможность оперативной передачи получаемой информации непосредственно потребителям.

3. С учетом требований, предъявляемых к условиям наблюдения и параметрам океанографических радиофизических систем дистанционного зондирования, разработан самолетный РБО "Аналог". Проведены серии экспериментов по дистанционному зондированию морских льдов в натуральных условиях с борта самолета-лаборатории. Рекомендации и выводы, полученные при самолетных исследованиях, использованы при разработке космических радиолокационных систем бокового обзора и реализованы при создании РБО ИСЗ "Космос-1500", "Космос-1602".

4. В процессе выполнения самолетных экспериментов получены данные, подтверждающие наличие устойчивых связей удельной ЭПР морского льда с его возрастом. Анализ результатов, полученных в различных районах Северного Ледовитого океана, свидетельствует об отсутствии региональных особенностей в характере рассеяния радиоволн морскими льдами одного и того же возраста, что подтверждает эффективность и возможность широкомасштабного использования методов дистанционной диагностики, основанных на использовании обобщенных экспериментальных данных. Результаты самолетных экспериментов были использованы при разработке методик обработки и интерпретации космической радиолокационной информации.

5. Анализ экспериментальных результатов, проведенный в рамках известных моделей рассеяния, позволил установить связи между удельной ЭПР морских льдов, образовавшихся в осенне-зимний период года, с их диэлектрической проницаемостью, которая в свою очередь связана с температурой, соленостью и толщиной льда. Показано, что характер изменения удельной ЭПР для углов падения, отличных от вертикальных, может быть описан на основе использования эффективных шероховатостей, учитывающих как неровности верхней границы, так и неоднородности диэлектрической проницаемости верхних слоев льда. Вид угловой зависимости удельной ЭПР определяется спектральными характеристиками эффективных шероховатостей, а динамические изменения удельной ЭПР, наблюдающиеся в процессе роста льда, связаны с изменением средней диэлектрической проницаемости в верхних слоях льда.

6. В соответствии с рекомендациями работы созданы РБО ИСЗ "Космос-1500", "Космос-1602". Проведены натурные испытания радиофизических средств дистанционной диагностики ледяных покровов Земли из космоса. Результаты экспериментов подтверждают справедливость основных требований к условиям наблюдения и параметрам космических океанографических систем, обеспечивающих всепогодные оперативные исследования океана и ледяных покровов.

7. Проведен анализ эффективности использования космической радиолокационной информации. Показаны возможности решения широкого круга научных и практических задач дистанционной диагностики ледяных покровов в труднодоступных районах Арктики и Антарктики:

- определение возрастных градаций и пространственной структуры дрейфующих морских льдов;
- исследования динамики морских льдов (в том числе изменчивости границы многолетних льдов, определение скорости и направления дрейфа ледяных массивов и т. д.);
- определение границ распространения морских льдов;
- обнаружение трещин и разводий в многолетних льдах;
- обнаружение крупных айсбергов, ледяных островов и многолетних льдин.

Информация, получаемая космическими РБО, может также оперативно использоваться для гидрометеорологического обеспечения мореплавания в полярных районах.

8. Предложены пути совершенствования радиофизических методов дистанционного зондирования морских льдов с аэрокосмических носителей. Показано, что при синхронных наблюдениях в см и дм диапазонах радиоволн устраняется неоднозначность интерпретации данных зондирования молодых и однолетних льдов, возможно также получение дополнительной информации о пространственной структуре ледяного покрова (выделение зон торошения и т. д.).

Перспективным представляется создание космических радиоокеанографических систем дистанционного зондирования, в состав которых входят обзорная РБО см и РСА дм диапазонов для детальных исследований.

Основные публикации по теме диссертации:

1. Энергетические характеристики и особенности радиолокационных отражений поверхностью моря при малых углах падения/ Д.М.Галаев, А.И.Калмыков, В.Б.Ефимов и др.//Рассеяние электромагнитных волн. Вып. 2. - Таганрог, ТРТИ, 1978. - с. 97-103.
2. Особенности радиолокационных отражений поверхностью моря при малых углах падения/ Д.М.Галаев, В.Б.Ефимов, А.И.Калмыков и др.//XII Всесоюзная конференция по распространению радиоволн. : Тез. докладов. - М.: Наука, 1978, ч. 2. - с. 221-225.
3. Возможности исследования ледовых покровов радиофизическими методами с аэрокосмических носителей/ В.Б.Ефимов, А.С.Гавриленко, А.И.Калмыков и др.//XIV Всесоюзная конференция по распространению радиоволн. : Тез. докладов. - М.: Наука, 1984,

- ч.2.-с.191-193.
4. Радиолокационная система ИСЗ "Космос-1500" / А.И.Калмыков, В.Б.Ефимов, С.С.Кавелин и др.//Исслед.Земли из космоса.-1984.-№5.-с.84-93.
 5. Дистанционные исследования морских льдов комплексным радиолокационно-радиометрическим методом/ А.С.Гавриленко, В.Б.Ефимов, А.И.Калмыков и др.//Неконтактные методы и средства измерений океанографических параметров.5-й Всесоюзный семинар (Москва,1983):Сб. докладов.-М.:Моск.отд.Гидрометеоздата,1986.-с.130-134.
 6. Исследование ледовых покровов радиофизическими средствами с аэрокосмических носителей/ В.Б.Ефимов, А.И.Калмыков, В.А.Комяк и др.// Изв.АН СССР.Физика атмосферы и океана.-1985.-21,№5.-с.512-520.
 7. Радиолокационные методы исследования природной среды Земли и их испытания с ИСЗ "Космос-1500"/ В.П.Шестопалов, А.И.Калмыков, В.Б.Ефимов и др.//Космическая наука и техника.-1986.-№1.-с.25-36.
 8. А.С. 1111582(СССР) Способ дистанционного зондирования атмосферы и подстилающей поверхности Земли/ В.П.Шестопалов, А.И.Калмыков, В.Б.Ефимов и др.-заявлено 10.03.83г.№3581264.
 9. Комплексные исследования природной среды оптическими и радиолокационными методами / В.П.Шестопалов, А.И.Калмыков, В.Б.Ефимов и др.//ДАН СССР.-279,№3.-с.621-623.
 10. Информационные возможности радиолокационной системы бокового обзора ИСЗ "Космос-1500"/ В.Н.Цымбал, А.И.Калмыков, В.Б.Ефимов и др.//Исслед.Земли из космоса.-1985.-№3.-с.84-92.
 11. Особенности цифровой обработки радиоизображений,полученных РЛС БО ИСЗ "Космос-1500"/А.П.Пичугин, Л.В.Еденский, В.Б.Ефимов и др.//Исслед.Земли из космоса.-1984.-№6.-с.82-90.
 12. А.С. 1236910(СССР) Радиолокационное устройство для дистанционного зондирования/ А.С.Курекин, В.Б.Ефимов, А.И.Калмыков и др.-заявлено 13.12.84,№3824366.
 13. Исследование состояния ледниковых покровов Антарктиды с помощью радиофизической аппаратуры / В.Б.Ефимов, В.А.Комяк, А.С.Курекин и др.//Исслед.Земли из космоса.-1990.-

N4.-с.3-11.

14. Determination of oceanic surface structures with "Kosmos-1500" satellite sidelooking radar / A.I.Kalmykov, V.B.Efimov, V.I.Zeldis et al.//Preprint IAF-84-103A (Interkosmos council).-Moscow,1984.-31 p.

15. Radar investigations of ocean, sea ice and glaciers by space borne SLR on satellites "Kosmos-1500" ("Okean")/ A.I.Kalmykov, V.N.Tsybal, V.B.Efimov et.al.// XXIII General Assembly of the International Union of Radio Science (URSI), Prague, Czechoslovakia, 28 Aug.- 5 Sept.1990. Abst.-2.-p.584.

N4.-с.3-11.

16. Влияние внутренней структуры ледниковых покровов на характеристики радиолокационных сигналов/ В.В.Ефимов, В.А.Комяк, А.С.Курекин и др.//XV Всесоюзная конференция по распространению радиоволн.:Тез.докладов.-М.:Наука, 1987.-с.406.

17. Радиолокационная многочастотная диагностика морских льдов в интересах безопасности судоходства и природопользования в Арктике и Антарктике/ А.И.Калмыков, В.В.Ефимов, А.Д.Маганов и др.//Международный научный семинар по аэрокосмическому мониторингу земных покровов и атмосферы (Киев, 1993):Тез. докладов.-Киев:Общество "Знание" Украины, 1993.- с.33-36.

Научное издание

ЕФИМОВ Валентин Борисович

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЛЕДЯНЫХ
ПОКРОВОВ ЗЕМЛИ РАДИОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ
С АЭРОКОСМИЧЕСКИХ НОСИТЕЛЕЙ

Подп. в печ. 23.08.94. Формат 60x84/16.
Бум. офс. Офс. печ. Усл. печ. л. 1. Уч. - изд. л. 1
Тираж 100 экз. Зак. 56. Бесплатно

Ротапринт ИРЭ НАН Украины
Харьков-85, ул. Академика Проскуры, 12

