1558492

На правах рукописи

Ахияров Владимир Влерович

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ МОРЯ РАДИОЛОКАТОРАМИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ВОЛНЫ МЕТРОВОГО И ДЕКАМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПОМЕХОВОЙ И ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ

Специальность 05.12.04 - радиолокация и радионавигация

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва - 1998

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель - д.т.н., профессор,
заслуженный деятель
науки и техники РФ И.Б. Федоров

Официальные оппоненты: - д.т.н., профессор А.В. Соколов
- к.т.н. И.Н. Червяков

Ведущая организация - Научно-исследовательский институт дальней радиосвязи

Защита диссертации состоится "____" _____ 1998 г., в _____ч на заседании диссертационного совета ССД 053.02.06 в Московском университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 107005,

ся в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

_____1998 г.

1558492

Кулагин С.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время для обнаружения целей над морской поверхностью и оценки параметров морского волнения используются различные средства радиолокационного наблюдения. Для глобального контроля применяют спутники и загоризонтные РЛС пространственной волны, на малых дальностях - станции СВЧ диапазона. Для расширения зоны контроля СВЧ РЛС устанавливают на подвижные носители - корабли или самолеты.

Однако, существующие средства и организация их использования не в полной мере решают задачу оперативного контроля прибрежной экономической зоны государства. В настоящее время этот вопрос особенно актуален для обеспечения безопасности судоходства, при добыче полезных ископаемых на шельфе материка и решения ряда других задач.

Одним из перспективных путей решения поставленной проблемы является применение береговых РЛС поверхностной волны декаметрового диапазона, однако такие станции имеют достаточно большой элемент разрешения и большие габариты. Элемент разрешения можно уменьшить при использовании более высокочастотных РЛС, однако дальность обнаружения существующих станций метрового и СВЧ диапазона не превышает величину 0,6-0,8 от дальности радиогоризонта.

Проведенные исследования показали, что при увеличении времени когерентного накопления в РЛС метрового диапазона дальность обнаружения можно повысить в 2-4 раза. Такие станции существенно дешевле и более распространены, чем декаметровые, поэтому их использование представляется перспективным как в области прямой видимости, так и за радиогоизонтом. Совместное использование радиолокаторов поверхностной волны декаметрового и метрового диапазона позволяет полностью охватить зону экономических интересов государства.

Однако, в метровом и декаметровом диапазонах селекция целей происходит на фоне интенсивных отражений от моря, а поверхностная волна над морской поверхностью испытывает значительное дифракционное затухание. Для того, чтобы в полной мере реализовать потенциальные возможности береговых РЛС при контроле целевой обстановки и диагностике состояния моря актуальной является задача исследования рассеянного морем сигнала и определения дифракционного затухания вдоль трассы распространения радиоволн.

НТБ МГТУ им.Н.Э.Баумана
1558492
Ахияров В.В. Дистанционно

Цель работы заключается в повышении эффективности существующих и вновь разрабатываемых береговых РЛС метрового диапазона путем использования результатов исследований рассеяния радиоволн от морской поверхности и дифракционного затухания радиолокационного сигнала.

Научная новизна результатов заключается в следующем.

1. Исследованы спектральные характеристики пассивных помех, которые возникают при рассеянии радиолокационного сигнала метрового и декаметрового диапазона от морской поверхности. Это дало возможность установить зависимость ширины и амплитуды спектра рассеянного сигнала от степени морского волнения и выполнить теоретический расчет удельной ЭПР резонансных гармоник морской поверхности.
2. Создана математическая модель спектра рассеянного от морской поверхности радиолокационного сигнала, предназначенная для анализа помеховой обстановки. В отличие от использовавшихся ранее, предложенная модель учитывает связь между скоростью приповерхностного ветра и значением турбулентной вязкости морской воды, а также статистические характеристики рассеянного сигнала. Данная модель позволяет получить спектры резонансных отражений, соответствующие различным погодным условиям.
3. Исследовано дифракционное затухание вертикально поляризованных радиоволн над морской поверхностью в метровом диапазоне в области полутени и тени. Предложена методика определения корней функции Эйри и получены дистанционные зависимости множителя ослабления, необходимые при расчете энергетического потенциала РЛС для обнаружения маловысотных и надводных целей. Показан способ определения границы освещенной области с областью полутени.
4. Предложен метод выделения отметок от целей в области резонансных отражений путем поэлементного деления отсчетов реального спектра на соответствующие им значения математической модели, полученной при тех же погодных условиях. Данный метод позволяет повысить вероятность правильного обнаружения целей в тех случаях, когда сигнал невозможно выделить на фоне резонансных отражений другими методами.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Предложена математическая модель спектра обратного рассеяния от морской поверхности, учитывающая погодные условия. Это дает возможность моделировать помеховую обстановку при анализе существующих и разра-

ботке новых алгоритмов обнаружения низколетящих над морской поверхностью или надводных целей.

2. Изучены статистические свойства резонансного рассеяния от морской поверхности. Показана необходимость статистического усреднения спектров рассеянного сигнала для дистанционной диагностики морской поверхности. Установлено наличие корреляционных связей между математическими ожиданиями амплитуд и частот резонансных отражений в секторе обзора РЛС. Эти результаты следует учитывать при создании новых алгоритмов дистанционной диагностики.
3. Получены кривые дифракционного затухания для различных значений длин волн, высот подъема антенны и проводимостей морской воды. Предложен метод экспериментального определения погонного дифракционного затухания по уменьшению амплитуды резонансных отражений от моря. Эти результаты могут быть использованы разработчиками РЛС для определения требуемого энергетического потенциала радиолокатора.
4. Получены дистанционные зависимости отношения мощности резонансных отражений от моря к мощности шума на входе приемника РЛС на основе теоретических расчетов удельной ЭПР и дифракционного затухания сигнала. Такие зависимости могут использоваться при анализе помеховой обстановки, а также для выбора диапазона частот при дистанционном определении параметров морского волнения.
5. Предложена методика определения полного вектора скорости поверхностных течений с использованием уравнения непрерывности гидродинамики по измеренным значениям радиальной компоненты этого вектора. Данную методику можно применять для построения карт поверхностных течений в секторе обзора РЛС.

Достоверность результатов. Практические исследования отраженного от моря сигнала в различных диапазонах длин волн были проведены за период с 1992 по 1995 г.г. на о.Сахалин в рамках НИР "Шерп-РВО". Предложенная математическая модель, полученная на основании теории рассеяния, хорошо согласуется с результатами экспериментальных исследований.

Апробация результатов. Материалы диссертации докладывались на двух заседаниях секций НТК НИИ РЛ и конференции, посвященной 165-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана. Полученные результаты изложены в итоговых отчетах по

пяти НИР и двух статьях, опубликованных в журнале "Вестник МГТУ".

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Обобщенные методы исследования резонансного обратного рассеяния при скользящем падении радиолокационного сигнала метрового и декаметрового диапазона на морскую поверхность.
2. Результаты теоретических и экспериментальных исследований дифракционного затухания метровых вертикально поляризованных радиоволн над морской поверхностью.
3. Математическая модель спектра обратного рассеяния метровых радиоволн, учитывающая комплексное влияние погодных условий и статистических характеристик резонансных отражений.
4. Результаты дистанционной диагностики параметров морского волнения в метровом диапазоне по спектрам рассеянного сигнала.

Объем и структура работы: диссертация содержит 162 страницы, включая 65 рисунков и 13 таблиц. Она состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения и списка использованной литературы из 48 названий.

Автор выражает глубокую благодарность сотрудникам кафедры "Радиоэлектронные системы и устройства" Кузнецову А.А., Сенину А.И. и Митрохину В.Н. за ценные советы в процессе подготовки и обсуждения работы. Автор особенно признателен научному руководителю Федорову И.Б. и научному консультанту Слукину Г.П. за помощь и содействие, оказанные при работе над диссертацией.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель работы, описаны направления исследований и приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проанализированы существующие активные и пассивные методы дистанционного зондирования морской поверхности и описаны преимущества использования радиофизических методов. Сформулированы требования, предъявляемые к средствам радиолокационного наблюдения для контроля экономической зоны. Показано, что поставленные задачи можно решить с максимальной эффективностью при использовании береговых РЛС поверхностной волны декаметрового и метрового диапазона. Изложена физическая сущ-

ность резонансного обратного рассеяния при скользящем падении радиолокационного сигнала на морскую поверхность и показано, что характеристики рассеянного сигнала связаны с параметрами состояния моря. Описан принцип построения систем дистанционной диагностики состояния морской поверхности путем совместного использования береговых РЛС метрового и декаметрового диапазона.

Во второй главе изложены основные положения теории рассеяния метровых и декаметровых радиоволн от морской поверхности и предложена математическая модель спектра рассеянного сигнала. Усредненный спектр сигнала декаметрового диапазона, рассеянного морской поверхностью на частоте 9,4 МГц, показан на рис.1. Как видно из приведенного рисунка, особенностью такого рассеяния является наличие двух узких пиков, сдвинутых в разные стороны относительно несущей частоты. Данные пики образуются при отражении от гармоник морского волнения при выполнении условия:

$$L = \frac{\lambda}{2}, \qquad (1)$$

где λ - длина волны РЛС, L - длина морской волны, на которой происходит резонансное обратное рассеяние.

Описанный механизм подобен брэгговскому рассеянию световых лучей на дифракционной решетке, поэтому рассеяние радиоволн на гармониках морского волнения при выполнении условия (1) стали называть брэгговским резонансным рассеянием первого порядка. Наблюдаемые пики в спектре рассеянного сигнала также получили название брэгговских, доплеровское смещение их частоты можно определить по формуле:

$$F_б = \sqrt{\frac{g}{\pi\lambda}}. \qquad (2)$$

При отражении радиолокационного сигнала от суперпозиций морских волн происходит рассеяние высших порядков. Благодаря таким отражениям образуется непрерывный спектр рассеянного сигнала.

В настоящее время для описания рассеяния радиоволн от морской поверхности используется теория рассеяния, основанная на решении уравнения колебаний несжимаемой жидкости. При этом брэгговское резонансное рассеяние

электромагнитных волн в метровом и декаметровом диапазоне можно рассматривать как частный случай этой теории. Данная теория будет справедлива при выполнении критерия Релея:

$$2kh\sin\psi << \frac{\pi}{2}, \qquad (3)$$

где k - модуль волнового вектора падающей волны, h - высота неровности, ψ - угол скольжения.



Рис. 1. Усредненный доплеровский спектр радиолокационных отражений от морской поверхности на частоте 9,4 МГц.

На основании теории рассеяния Ф.Г. Бассом была получена следующая формула для описания спектральных компонент резонансных отражений первого порядка при незатухающих колебаниях морской поверхности:

$$S(\omega) = \frac{4k^2\sigma^2 S}{R^4} V^4 \sum_{\pm} \tilde{W}_{\pm}(\mathrm{K})\delta\left(\omega \pm \Omega(\mathrm{K})\right), \qquad (4)$$

где σ^2 - среднеквадратичное отклонение (дисперсия) поверхности относитель-

но среднего уровня, S - площадь отражающей площадки, R - расстояние от источника до точки наблюдения, V - дифракционное затухание вдоль трассы распространения, $\tilde{W}_1(\boldsymbol{K})$ - энергия пространственного спектра морского волнения, соответствующая резонансным гармоникам первого порядка, $\Omega(\boldsymbol{K})$ - круговая частота резонансной гармоники, $\delta(\omega \pm \Omega(\boldsymbol{K}))$ - дельта-функция.

Согласно формуле (4), спектр рассеянного сигнала состоит из двух дельта-функций, смещенных на величину $\Omega(\boldsymbol{K})$ относительно центральной частоты, что соответствует брэгговскому резонансному рассеянию первого порядка.

Однако, в реальных условиях свободные колебания любой поверхности затухают, так как их энергия переходит в теплоту. Чтобы колебания поверхности не затухали, необходима внешняя сила, компенсирующая убыль энергии. Для морского волнения такой силой является случайное поверхностное давление ветра.

Поэтому, согласно Ф.Г.Бассу, вблизи резонансных частот $\omega = \pm\Omega(\boldsymbol{K})$ спектральная плотность $S(\omega)$ должна описываться лоренцевой кривой:

$$S(\omega) = \frac{4k^2\sigma^2 S}{R^4} V^4 \tilde{y}(\mathrm{K},\omega) \frac{\gamma}{\left[\omega^2 - \Omega^2\right]^2 + 4\gamma^2\omega^2}, \qquad (5)$$

где $\tilde{y}(\boldsymbol{K},\omega)$ - спектральное преобразование от некоторой случайной функции, γ – декремент затухания, определяемый по формуле:

$$\gamma = \frac{2\mu K^2}{\rho}, \qquad (6)$$

где μ и ρ - соответственно вязкость и плотность морской воды.

Как следует из формулы (5), ширина лоренцевой кривой определяется вязкостью морской воды и частотой зондирующего сигнала. Наблюдения над морскими ветровыми течениями позволили обнаружить зависимость вязкости μ от скорости ветра U, порождающего эти течения. Экспериментально установленная в диссертационной работе связь между μ и U может быть представлена в виде:

$$\mu = 0{,}421U^2 + 0{,}216U - 0{,}838. \qquad (7)$$

В конечном итоге данная зависимость позволяет установить связь между спектральными характеристиками рассеянного сигнала и скоростью приповерхностного ветра.

Формула (5) описывает резонансное рассеяние первого порядка при выполнении условия (1). Однако, для анализа спектров требуется учитывать рассеяние высших порядков, которое можно рассматривать как двухпозиционное рассеяние радиолокационного сигнала от ортогональных морских волн, образующих на морской поверхности уголковый отражатель.

Принцип такого рассеяния поясняет рис.2, на котором изображены волновые векторы падающей k_i и отраженной k_s электромагнитных волн, а также волновые векторы K_1 и K_2, образующие на морской поверхности уголковый отражатель.

При моделировании рассеянного поверхностью моря радиолокационного сигнала метрового диапазона необходимо использовать как океанографические параметры, так и статистические характеристики рассеянного сигнала. Поэтому в качестве исходных данных для расчета были выбраны следующие величины:

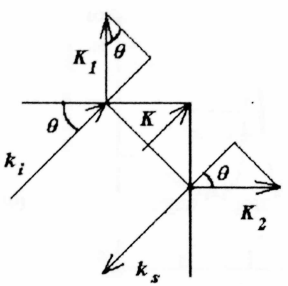


Рис.2. Рассеяние от ортогональных волн, образующих на морской поверхности уголковый отражатель

1) среднее значение скорости ветра U;

2) направление ветра относительно направления зондирования Θ;

3) радиальная (относительно направления зондирования) скорость поверхностных течений V_R;

4) частота зондирующего сигнала f;

5) математическое ожидание амплитуды большей гармоники спектра рассеянного сигнала $<A\pm>$;

6) мощность шума $P_ш$, определяемая собственным шумом приемника и шумом антенны.

Указанные шесть параметров являются исходными при моделировании рассеяния радиолокационного сигнала. Автором диссертации было установлено, что модель рассеянного сигнала в метровом диапазоне допустимо представить в виде:

$$S(\omega) \sim \sum_{\pm} \frac{\sum_{i} \frac{\Phi(\theta_i)}{\left(\omega^2 - \Omega_{\pm 1,2_i}{}^2\right)^2 + 4 \cdot \gamma^2 \cdot \omega^2} + \frac{\Phi(\theta_i)}{\left(\omega^2 - \Omega_{\pm 1,2_i}{}^2\right)^2 + 4 \cdot \gamma^2 \cdot \omega^2}}{MAX_{\pm}} \cdot A_{\pm} + P_{\text{ш}}, \quad 0 < \theta < \frac{\pi}{2}, \tag{8}$$

где знак "+" или "-" соответствует положительным или отрицательным частотам относительно несущей, а $MAX_{\pm}$ является максимальной величиной числителя дроби для положительно или отрицательно смещенного пика. Индекс i изменяется так, чтобы обеспечить изменение величины θ_i от 0 до $\pi/2$. Величины $A_{\pm}$ и $P_{\text{ш}}$ являются случайными и распределены соответственно по закону Райса и Релея.

Функция $\Phi(\theta_i)$ учитывает угловое распределение спектра морского волнения:

$$\Phi(\theta_i) = \begin{cases} \cos^n(\theta_i) & \text{для волнового вектора } K_2, \\ \sin^n(\theta_i) & \text{для волнового вектора } K_1. \end{cases} \tag{9}$$

При моделировании резонансных отражений было установлено, что величина показателя степени n может изменяться в пределах от 0 до 32 в зависимости от частоты зондирующего сигнала и степени морского волнения.

Математическое ожидание амплитуды меньшего резонансного пика определяется следующим образом:

$$< A_{\mp} > \doteq < A_{\pm} > \cdot 10^{-\frac{\varsigma}{10}}, \tag{10}$$

где величина ς зависит от угла между направлением ветра и направлением зондирования.

Скорость поверхностных течений определяется по формуле:

$$\Omega_{\pm_{1,2}} = \begin{cases} \sqrt{K_{1,2} g} + K V_R, & \text{для } \Omega > 0, \\ -\sqrt{K_{1,2} g} + K V_R, & \text{для } \Omega < 0, \end{cases} \tag{11}$$

где модули волновых векторов K_1 и K_2, соответствующие углу θ_i, определяются следующим образом:

$$K_{1i} = \frac{g \cdot K}{\sin \theta_i}, \qquad (12.а)$$

$$K_{2i} = \frac{g \cdot K}{\cos \theta_i}. \qquad (12.б)$$

На рис.3 и рис.4 показаны реальный спектр резонансного обратного рассеяния на частоте 162 МГц и математическая модель, полученная при тех же погодных условиях. Как следует из приведенных рисунков, амплитуда, положение и ширина реальных и смоделированных отражений практически совпадают.

В третьей главе описан способ определения множителя ослабления электромагнитных волн вдоль трассы распространения, а также исследовано влияние частоты и параметров морского волнения на величину удельной ЭПР резонансных отражений первого порядка.

Величина множителя ослабления характеризует ослабление дифракционного поля E в определенной точке пространства по отношению к напряженности поля E_0, которая существовала бы при распространении радиоволн в свободном пространстве:

$$V = \frac{E}{E_0}. \qquad (13)$$

Для определения множителя ослабления требуется знать эквивалентный радиус Земли. Эту величину можно определить по формуле:

$$a = \frac{r\Re}{\Re - r}, \qquad (14)$$

где $\Re$ - радиус кривизны луча, r - истинный радиус Земли.

Радиус кривизны луча может быть определен по известным параметрам состояния тропосферы, к числу которых относятся: абсолютная температура, суммарное давление всех газов воздуха и давление водяного пара.

Множитель ослабления вычислялся по методу, предложенному академиком В.А. Фоком:

$$V(x, y_1, y_2, q) = e^{j\frac{\pi}{4}} 2\sqrt{\pi x} \sum_{s=1}^{\infty} \frac{e^{j\alpha t_s}}{t_s - q^2} \frac{w(t_s - y_1)}{w(t_s)} \frac{w(t_s - y_2)}{w(t_s)}, \qquad (15)$$



Рис.3. Спектр обратного рассеяния на частоте 162 МГц при времени когерентного накопления 22,4 с на дальности 20 км. Скорость ветра 3 - 5 м/с.



Рис.4. Модель спектра рассеянного на частоте 162 МГц сигнала. Скорость ветра - 4 м/с, угол между направлением ветра и направлением зондирования - 60^0, мощность шума -60 дБ

где x - приведенное горизонтальное расстояние, y_1 - приведенная высота источника, y_2 - приведенная высота приемника, q - параметр, зависящий от поляризации излученного сигнала, $w(t_s)$ - комплексная функция Эйри, t_s - корни этой

функции.

Ряд (15) достаточно быстро сходится в области геометрической тени, несколько медленнее в области полутени и очень медленно в освещенной области. Поэтому для вычисления множителя ослабления в освещенной области использовалась формула В.А. Фока, полученная на основании геометрической оптики.

Автором диссертации было показано, что границу освещенной области с областью полутени можно определять как точку расхождения расчетов по дифракционной формуле (15) с формулой геометрической оптики.

Значения t_s определяются в результате решения дифференциального уравнения:

$$\frac{dt_s}{dq} = \frac{1}{t - q^2}. \qquad (16)$$

Приближенное решение уравнения (16) было найдено автором в виде комплексного числового ряда по отрицательным степеням параметра q:

$$t_s(p) = t_s{}^0 + p + \frac{t_s{}^0}{3} p^3 + \frac{p^4}{4} + \frac{t_s{}^0}{18} p^6, \qquad (17)$$

где $p=1/q$, а значения $t_s{}^0$ являются корнями функции Эйри при $p=0$ $(q=\infty)$.

Данное выражение можно использовать для вычисления корней функции Эйри в метровом диапазоне радиоволн при распространении вертикально поляризованного сигнала над морской поверхностью и выполнении условия $|q| > \sqrt{|t_s|}$.

На рис.5 приведены дистанционные зависимости множителя ослабления при изменении длины волны от 1 до 10 м и фиксированной высоте подъема антенны h_1 =100 м.

Наблюдаемые пики в спектре рассеянного сигнала можно рассматривать как отражение от распределенной цели, в качестве которой выступает резонансная гармоника морской поверхности. Очевидно, что ее удельная ЭПР должна зависеть от частоты сигала и степени морского волнения. Поэтому для теоретического определения удельной ЭПР автором было предложено использовать выражение:

$$\sigma(f) = 0{,}00405\pi\, e^{-0{,}74\left(\frac{3\cdot 10^2 g}{4\pi U^2 f}\right)^2}, \qquad (18)$$

где f - частота сигнала, МГц и U - скорость приповерхностного ветра.

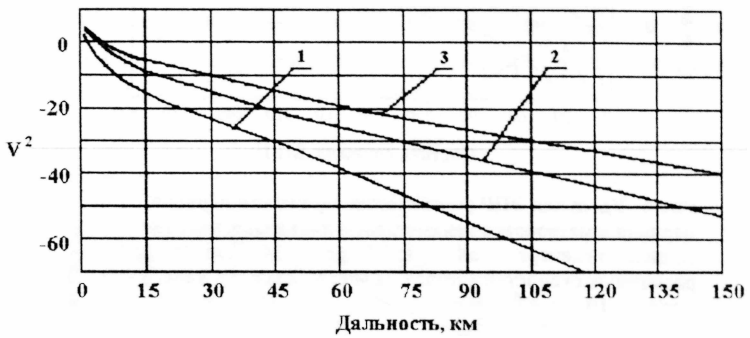


Рис.5. Квадрат множителя ослабления при высоте подъема антенны 100 м для различных значений длины волны: 1 - 1 м, 2 - 5 м, 3 - 10 м

На рис.6 показаны рассчитанные по формуле (18) значения удельной ЭПР в диапазоне частот от 3 до 300 МГц для различных скоростей ветра.

Из приведенного рисунка следует, что с увеличением частоты сигнала и скорости ветра удельная ЭПР увеличивается до максимального значения -19 дБ (ранее значение этой величины в декаметровом диапазоне считалось примерно постоянным и равным -17 дБ при достаточно больших скоростях ветра).

Рассчитанная по формуле (18) удельная ЭПР резонансных отражений позволяет теоретически оценить возможности береговых РЛС метрового диапазона по обнаружению и сопровождению целей при различных погодных условиях. Представим уравнение дальности радиолокации в виде:

$$q = \frac{P_{ср} t_{обз} G A_e \sigma_0 \cdot S}{(4\pi)^2 k T_a} \cdot \left(\frac{V(R)}{R}\right)^4, \qquad (19)$$

где q - отношение мощности резонансных отражений от моря к шуму на входе



Рис.6. Удельная ЭПР резонансных отражений первого порядка в метровом и декаметровом диапазоне, рассчитанная по спектральной модели Пирсона-Московитца для различных скоростей ветра: 1 - 1 м/с, 2 - 2 м/с, 3 - 3 м/с, 4 - 5 м/с, 5 - 10 м/с, 6 - 20 м/с

приемного устройства, $P_{ср}$ - средняя мощность излучения, $t_{обл}$ - время облучения, G - коэффициент усиления передающей антенны, A_e - эффективная площадь приемной антенны, σ_0 - удельная ЭПР морской поверхности, соответствующая резонансным отражениям первого порядка, S - площадь элемента разрешения на расстоянии R от источника излучения, k - постоянная Больцмана, T_a - шумовая температура антенны.

Для расчетов по формуле (19) использовались параметры макета РЛС метрового диапазона, который был развернут на сахалинском радиофизическом полигоне в 1994 и 1995 г.г., дифракционное затухание вычислялось по методу В.А. Фока.

На рис.7 показано уменьшение с дальностью величины q при различных высотах подъема антенны для значений удельной ЭПР резонансных гармоник морской поверхности -19 дБ. Данный график позволяет теоретически оценить дальность наблюдения резонансных отражений с требуемым отношением мощности резонансных отражений от моря к мощности шума.

В четвертой главе описаны результаты экспериментальных исследований резонансного обратного рассеяния в метровом и декаметровом диапазоне.

Экспериментальные исследования статистических и корреляционных свойств рассеянного сигнала с вертикальной поляризацией в метровом диапазоне на частоте 164 МГц были выполнены по данным дистанционной диагностики

на о.Сахалин в 1995 г. Результаты экспериментов показали, что в метровом диапазоне амплитуда резонансных гармоник распределена по обобщенному закону Релея, а частота подчиняется нормальному закону.

Было установлено, что для достоверной оценки спектральных характеристик рассеянного сигнала в метровом диапазоне необходимо проводить статистическое усреднение от 6 до 10 спектров в каждом элементе разрешения РЛС. Такое усреднение позволяет обнаружить существование достаточно устойчивых корреляционных связей математических ожиданий амплитуд и частот резонансных гармоник в секторе обзора РЛС.

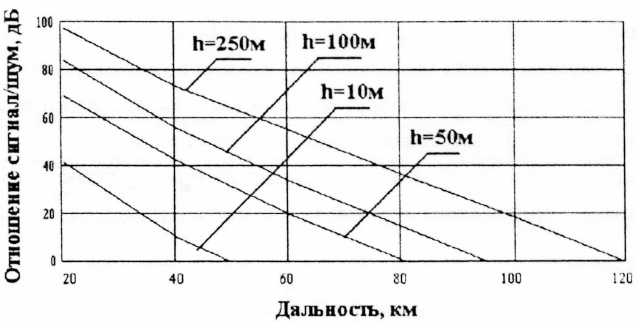


Рис.7. Дистанционные зависимости сигнал/шум для различных значений высоты подъема антенны. Удельная ЭПР моря -19 дБ

Для определения состояния морской поверхности по данным дистанционного зондирования в метровом и декаметровом диапазонах вычислялась скорость поверхностных течений и направление приповерхностного ветра в секторе обзора РЛС.

Радиальная компонента вектора скорости поверхностных течений определяется по формуле:

$$V_R = \frac{\Delta}{2}\lambda, \qquad (20)$$

где Δ - величина смещения центров брэгговских пиков относительно теоретического значения (см. рис.1):

$$\Delta = \frac{1}{2}\left(F_{+1} + F_{-1}\right), \qquad (21)$$

где F_{+1} и F_{-1} - наблюдаемые доплеровские частоты центров брэгговских пиков.

Полный вектор скорости поверхностных течений может быть получен по совокупности измеренных радиальных компонент с использованием уравнения непрерывности гидродинамики, которое в цилиндрических координатах имеет вид:

$$V_R + R\frac{\partial V_R}{\partial R} + \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi} = 0. \qquad (22)$$

Автором был предложен метод решения дифференциального уравнения (22) с использованием сплайн-интерполяции. Это дает возможность вычислить азимутальную компоненту вектора скорости в каждом элементе разрешения РЛС и далее найти полный вектор скорости поверхностных течений.

Для определения угла Θ между направлением приповерхностного ветра и направлением зондирования морской поверхности использовалось соотношение:

$$\Theta = \pm\frac{1}{2}\arccos\left[2\left(10^{\frac{\zeta-24,08}{20}} - 0,56\right)\right], \qquad (23)$$

где

$$\zeta = 10\log\left(\frac{A_1}{A_2}\right), \qquad (24)$$

где A_1 и A_2 - амплитуды соответственно большего и меньшего брэгговских пиков.

Для дистанционной диагностики морского волнения в декаметровом диапазоне использовались спектры сигналов, полученные в 1992 г. на о.Сахалин. Морская поверхность облучалась радиолокатором поверхностной волны на частоте 5172 кГц при вертикальной поляризации сигнала. По результатам обработки доплеровских спектров вычислялась радиальная компонента вектора скорости поверхностных течений, направление приповерхностного ветра и среднеквадратичная высота морских волн в каждом элементе разрешения РЛС.

В метровом диапазоне состояние моря оценивалось по спектрам сигналов, которые были получены в ходе экспериментов на о.Сахалин в 1994 и

1995 г.г. Морская поверхность облучалась вертикально поляризованным сигналом на частотах 164 и 162 МГц. По результатам дистанционной диагностики была построена карта поверхностных ветров и выполнены расчеты полного вектора скорости поверхностных течений. Результаты были проверены по атласу типовых полей ветра шельфовой зоны о.Сахалин для данного времени года.

Условия проведения экспериментов были таковы, что в спектрах обратного рассеяния всегда присутствовал сигнал на нулевой доплеровской частоте, отраженный от суши вблизи РЛС. Флюктуации амплитуды этого сигнала незначительны, поэтому автором диссертации было предложено использовать его в качестве опорного при экспериментальном определении погонного дифракционного затухания. На частоте 162 МГц при высоте подъема антенны 240 м и изменении дальности от 20 до 28 км затухание было равно 0,75 дБ/км. Расчеты по методу В.А.Фока для четвертой степени множителя ослабления дают величину 0,84 дБ/км. Таким образом, экспериментальное определение погонного дифракционного затухания может использоваться для проверки теоретических расчетов по методу В.А. Фока.

1555492

Точное знание структуры помех при рассеянии от моря позволяет дать рекомендации к решению задачи выделения целей на фоне резонансных отражений. В диссертационной работе было показано, что отметку от цели можно выделить делением отсчетов реального спектра на соответствующие отсчеты модели спектральной плотности, которая была получена при тех же погодных условиях, что и реальный спектр (см. рис.8). Пунктирная кривая показывает уровень порога, который рассчитывался по алгоритму "скользящего окна":

$$U_{пор_i}{}^2 = \left(\sum_{j=-0,5(m_1+m_0)}^{-0,5m_0-1} U_{i+j}{}^2 + \sum_{j=0,5m_0+1}^{0,5(m_1+m_0)} U_{i+j}{}^2 \right) \cdot \left(10^{\frac{\nu}{m_1}} - 1 \right), \qquad (25)$$

где $U_{пор\,i}$ и U_{i+j} - соответственно порог и амплитуда для i-го и $i+j$-го отсчета. Входящие в формулу (25) параметры выбраны равными: m_0=8, m_1=10, ν=3.

На рис.9 показана вероятность правильного обнаружения без использования компенсации отражений от моря и с ее использованием. Как видно из приведенного рисунка, применение данного метода позволяет увеличить вероятность правильного обнаружения целей.

В Приложении изложены вспомогательные сведения об основных пара-

МГТУ
им. Н.Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

метрах ветровых волн и поверхностных течений. Приведено статистическое описание морской поверхности и описаны математические модели спектров морского волнения.



Рис.8. Компенсация резонансных отражений от моря моделью спектра обратного рассеяния

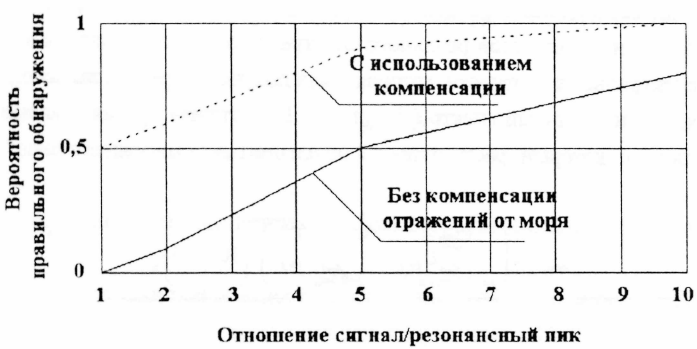


Рис.9. Вероятность правильного обнаружения при использовании алгоритма скользящего окна

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Основные результаты работы сводятся к следующему:

1. Исследованы спектральные характеристики пассивных помех, которые

возникают при рассеянии радиолокационного сигнала от взволнованной морской поверхности в метровом и декаметровом диапазоне. Это дало возможность изучить основные закономерности рассматриваемого процесса и предложить метод выделения отметок от целей в области резонансных отражений от моря.

2. Создана математическая модель спектра рассеянного сигнала, предназначенная для анализа помеховой обстановки. Предложенная модель основана на эмпирической зависимости вязкости морской воды от скорости приповерхностного ветра и полученных экспериментально статистических характеристик спектра обратного рассеяния.
3. Предложена методика вычисления корней функции Эйри и получены кривые дифракционного затухания в метровом диапазоне для расчета энергетического потенциала РЛС при малых высотах подъема антенны.
4. Предложена методика определения полного вектора скорости поверхностных течений с использованием уравнения непрерывности по измеренным значениям радиальной компоненты этого вектора.
5. Предложен метод выделения отметок от целей в области резонансных отражений путем поэлементного деления отсчетов реального спектра на соответствующие им значения математической модели, полученной при тех же погодных условиях.

НАУЧНЫЕ РАБОТЫ

Основные результаты диссертации изложены в работах:

1. Ахияров В.В., Слукин Г.П., Федоров И.Б. Оценка параметров морского волнения и приповерхностного ветра по данным радиолокационных наблюдений декаметрового и метрового диапазонов: Тезисы докладов научно-технической конференции, 21-23 ноября 1995 г. / МГТУ им. Н.Э. Баумана.- М., 1995. С.69.
2. Исследование принципов создания систем радиофизического мониторинга оперативной, экологической, надводной и воздушной обстановки на основе комплексирования активных и пассивных систем космического, воздушного и наземного наблюдения в дальневосточном и северо-западном регионах страны: Отчет о НИР (заключ.) / МГТУ. НИИ РЛ; Руководитель И.Б.Федоров.- НИО-1; Инв. № Л017492.- М., 1995.- 168 с.- д.с.п.

3. Исследование путей создания экологически чистых, энергетически независимых, надежных и мобильных РЛС поверхностной волны диапазона 30-300 МГц оборонного и конверсионного назначения для обнаружения низколетящих над морем и надводных целей в условиях дальневосточного региона: Отчет о НИР (заключ.) / МГТУ. НИИ РЛ; Руководитель И.Б.Федоров.- НИО-1; Инв. № Л016092.- М., 1995.- 184 с.- д.с.п.
4. Поиск принципов , разработка теории и создание новых радиоэлектронных комплексов, систем и устройств для локации, решения связных и навигационных задач: Отчет о НИР (заключ.) / МГТУ. НИИ РЛ; Руководитель И.Б.Федоров.- НИО-1; Инв. № ГРЛ139.- М., 1995.- 134 с.- д.с.п.
5. Разработка принципов построения загоризонтной РЛС поверхностной волны для контроля экономической зоны: Отчет о НИР (заключ.) / МГТУ. НИИ РЛ; Руководитель И.Б.Федоров.- НИО-1; Инв. № ГРЛ809.- М., 1995.- 168 с.- д.с.п.
6. Разработка технологии создания многофункционального лидарно-радиолокационного комплекса обнаружения загрязнений и контроля их распространения для решения задач экологического мониторинга и инспекции военных объектов: Отчет о НИР (заключ.) / МГТУ. НИИ РЛ; Руководитель И.Б.Федоров.- НИО-1; Инв. № Л81496.- М., 1996.- 168 с.- д.с.п.
7. Статистические и корреляционные свойства рассеянного морской поверхностью сигнала в метровом диапазоне радиоволн для оценки параметров морского волнения / И.Б.Федоров, Г.П.Слукин, В.В.Ахияров и др. // Вестник МГТУ. Приборостроение. - 1996. - № 4. - С.3-13.
8. Федоров И.Б., Слукин Г.П., Ахияров В.В. Вычисление множителя ослабления при распространении вертикально поляризованных радиоволн метрового диапазона над морской поверхностью по методу В.А. Фока. // Вестник МГТУ. Приборостроение.- 1997.- № 4. - С.27-36.
9. Федоров И.Б., Слукин Г.П., Ахияров В.В. Аналитическое представление энергетического спектра резонансного рассеяния метровых и декаметровых радиоволн от морской поверхности // Вестник МГТУ. Приборостроение.- 1998.- № 4. - (В печати).