А.В.Бархатов, С.П.Калениченко, В.М.Кутузов, А.Г.Попов
НИИ радиоэлектронных систем прогнозирования чрезвычайных ситуаций «Прогноз» Санкт-Петербургского электротехнического университета

УДК 621.396

МНОГОДИАПАЗОННЫЙ РАДИОЛОКАЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА АКВАТОРИЙ

Изложены результаты исследований радиолокационного комплекса дистанционного мониторинга водной поверхности в ДКМ-, УКВ- и СМ-диапазонах волн. Комплекс дает оперативные данные о состоянии водной поверхности акваторий, в частности акватории Финского залива. Данные могут быть использованы для предотвращения и ликвидации чрезвычайных ситуаций.

In this work are stated a research results of the radar complex for water area remote sensing in Short- Wave, Ultra-Short Wave and Micro Wave bands. Complex gives operative data on the water surface condition of the Gulf of Finland areas in Russia NORTHWEST region. Data are to be use for preventing and liquidations of emergence situations.

В предстоящие годы экология Финского залива может существенно осложниться. В связи со строительством новых портов возрастут транспортные потоки, рост промышленного потенциала Санкт-Петербурга и Ленинградской области будет увеличивать риск возникновения чрезвычайных ситуаций (ЧС). Важнейшими элементами, определяющими возможности прогнозирования, предотвращения и ликвидации ЧС, являются оперативные данные о состоянии водной поверхности акваторий региона.

В настоящее время рядом организаций разработаны модели течений и ветроволновой обстановки, используемых Росгидрометом для оценки состояния акваторий Северо-Западного региона РФ. Недостатком этих средств является запаздывание поступления выходной системной информации и большие ошибки в оценке гидрометеорологической ситуации, связанные с грубостью оценок и задержкой поступления информации во времени, а также получением точных оценок только для отдельных точек региона. Кроме того, зависимости, установленные на основе физико-статистических методов, носят консервативный характер и не могут быть корректными при изменении условий, для которых они были получены.

Работа моделей может быть значительно улучшена при применении радиолокационных методов мгновенной оценки гидрологического состояния на больших площадях морской поверхности с помощью многодиапазонной сети датчиков, включающих сантиметровые, метровые и декаметровые РЛС, устанавливаемые на берегу. Информация, которая присутствует в отраженных сигналах радиолокационных станций, позволяет определить ряд базовых параметров, характеризующих состояние морской поверхности, что позволяет их использовать для дистанционного контроля в задачах экологического мониторинга, прогнозирования, предотвращения и ликвидации ЧС. Информация с указанных датчиков будет дополнять данные, получаемые от спутниковых, оптических и бортовых радиолокационных

устройств, а также контактных гидрометеорологических приборов, установленных в Финском заливе в отдельных точках.

Отличительной особенностью использования РЛС ДКМ-диапазона является их повышенная дальность действия (до 150 км). РЛС СВЧ-диапазона, хотя и имеют значительно меньшую дальность действия, обладают более высокими точностными характеристиками и позволяют регистрировать нефтяные пятна на морской поверхности. РЛС УКВ-диапазона, как и РЛС КВ-диапазона, позволяют определять характеристики морского волнения, хотя и на меньшем расстоянии, но с большей точностью.

Основой для разработки методов определения состояния морской поверхности по данным ДКМ РЛС является теория рассеяния коротких радиоволн на взволнованной морской поверхности.

Теория взаимодействия радио- и морских волн первого порядка описывает возникновение брегговских линий в спектре отраженного морем сигнала. Типичный вид информации об отраженном от морской поверхности сигнале в одном из угломерных каналов, полученный на экспериментальном макете ДКМ РЛС на Финском заливе, показан на рис.1.

Соотношение амплитуд этих линий для «приближающейся» и «удаляющейся» систем волн несет информацию о генеральном направлении распространения морских волн и ветра у поверхности моря относительно угла визирования. Как показали экспериментальные исследования, ширина линий Брегга на уровне 10 дБ несет информацию о скорости ветра, воздействующего на морскую поверхность. Поскольку положение брегговских линий по частоте детерминировано, любое их смещение вправо или влево свидетельствует о наличии поверхностных течений.

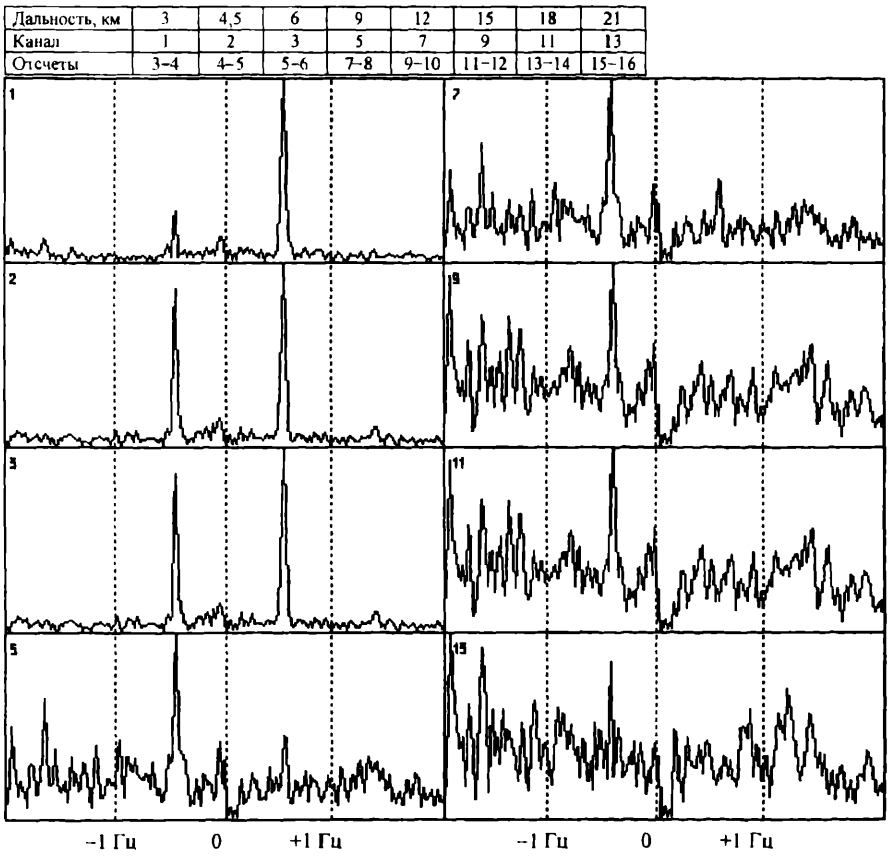


Рис.1. Доплеровские спектры отраженных от моря сигналов в различных дальностных каналах

Теория резонансного взаимодействия второго порядка описывает континуальный доплеровский спектр рассеянного морем сигнала, сосредоточенный вокруг брегговских линий. Этот спектр содержит основную информацию о морском волнении. Огибающая спектра справа и слева от линий Брегга описывает с учетом масштабирующей поправки скалярный спектр морского волнения, в котором возможны выделение доминирующей длины волны и оценка ее средней высоты. При наличии зыби в скалярном спектре морского волнения возможно не только определение длины ее волны, но и направления ее прихода. Для получения усредненной оценки средней высоты морских волн (балльности волнения) рекомендуется использовать соотношение площадей, заключенных под огибающими спектра первого и второго порядков.

Рассеяние радиоволн СВЧ-диапазона взволнованной морской поверхностью описывается двухмасштабной моделью в виде суперпозиции крупных и мелких волн. Роль крупных волн сводится к амплитудной и фазовой модуляции рассеянного на резонансной ряби радиоизлучения. Смещение спектра отраженного сигнала позволяет определить векторы радиальной скорости течения в просматриваемых элементах дальности.

При умеренном волнении моря (для скорости ветра, не превосходящей 10 м/с) смещение частоты определяется эффектом сдвига частоты при резонансном рассеянии на пространственной структуре ряби:

$$f_{см} = nF_0;\ F_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{g\chi_0 + \frac{\alpha_н}{\rho_н}\chi_0^3} + v_{в.с}\chi_0;$$

$$\chi_0 = 2k\cos\gamma,$$

где γ – угол скольжения; k – волновое число радиоизлучения; n порядок пространственного спектра; g – гравитационная постоянная; $\alpha_н$ – поверхностное натяжение воды; $\rho_н$ – плотность воды; $v_{вс}$ – скорость ветрового сноса.

Групповая скорость поверхностного волнения C с ростом длины морской волны l сначала падает до значения $C_1 = \sqrt[4]{4g\alpha_н/\rho_н}$ при $l_1 = 2\pi\sqrt{\alpha_н/g\rho_н}$, а затем растет. Для воды $l_1 = 1{,}72$ см, что соответствует длине радиоволны $\lambda = 3{,}44$ см. Для $l < l_1$ групповая скорость определяется в основном капиллярной составляющей волнения, а для $l > l_1$ – гравитационной составляющей.

Для получения спектральной информации из сигналов, отраженных от морской поверхности в сантиметровом диапазоне, была выполнена модернизация судовой РЛС «Лоция-А», позволяющая осуществлять работу в квазикогерентном режиме.

Вращение антенны накладывает ограничения на значение разрешающей способности по частоте. При вращении антенны в штатном режиме РЛС «Лоция-А» с частотой 20 мин$^{-1}$ и ширине луча диаграммы направленности в азимутальной плоскости 2° время контакта с целью (время анализа) составляет 17 мс. При этом частотное разрешение равно 60 Гц, что соответствует разрешению по радиальной скорости 96 см/с. Это приблизительно в 10 раз больше скорости движения льда и скорости поверхностных течений в месте проведения эксперимента. Следовательно, в режиме кругового обзора целесообразно уменьшить скорость вращения антенны, по крайней мере, в 10 раз.

Диаграмму направленности антенны (ДНА) в режиме работы с неподвижной антенной ориентировали против и вдоль течения. Рассеянный морской поверхностью сигнал после фазового детектирования подвергали аналого-цифровому преобразованию. Анализ данных позволял определить радиальную составляющую скорости движения льда при двух направлениях облучения.

Результаты экспериментальных исследований с использованием когерентизированной РЛС «Лоция-А» на защитной дамбе Финского залива представлены на рис.2 и 3. В первом эксперименте (рис.2) время анализа составляло 1,165 с, что соответствует частотному разрешению 0,732 Гц и разрешению по скорости 1 см/с. По оси ординат отложена величина, пропорциональная мощности спектральной составляющей, ось абсцисс пронумерована в единицах скорости.

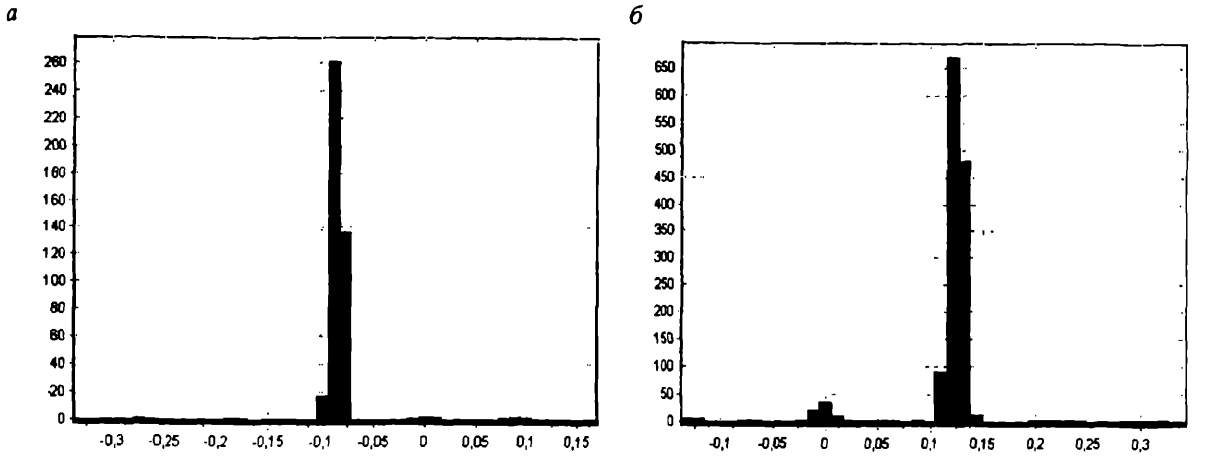


Рис.2. Спектры сигналов, отраженных от льдин, движущихся в разрыве дамбы, при облучении против (*а*) и вдоль (*б*) течения

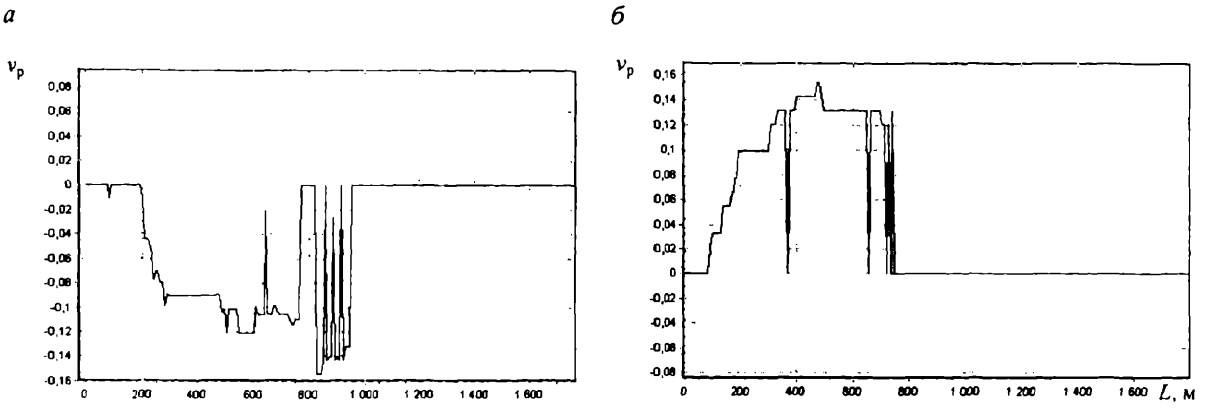


Рис.3. Зависимость радиальной составляющей скорости $v_р$ от дальности L при облучении против (*а*) и вдоль (*б*) течения

Для подавления боковых лепестков в спектре сигнала во временной области использовано окно Хэмминга.

Во втором эксперименте (рис.3) изучена зависимость радиальной составляющей скорости от дальности при неподвижной антенне.

Пунктирные линии на рис.2 и 3 демонстрируют эффект изменения скорости течения и льдин в зависимости от расстояния до берега, на котором находился радар.

Исследования показали также перспективность использования РЛС УКВ-диапазона для контроля состояния морской поверхности на расстоянии до 15-20 км. Эта возможность обусловлена схожестью процессов, происходящих при рассеянии коротких и ультракоротких волн на морской поверхности. В своей зоне ответственности УКВ РЛС позволяет получить более детальную информацию о контролируемых параметрах, чем ДКМ РЛС.

Таким образом, в задачах экологического мониторинга на море совместное использование РЛС декаметрового, метрового и сантиметрового диапазонов позволяет повысить качество, достоверность и оперативность информации о состоянии морской поверхности и ледового покрова и обеспечить своевременную оценку возможности возникновения опасных ситуаций и информационную поддержку при ликвидации последствий ЧС.