

УДК: 629.052.3

Д.А. Акмайкин, Д.Б. Хоменко, Д.В. Ключев, Е.С. Фалина

ОБРАБОТКА РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫМИ СРЕДСТВАМИ

Акмайкин Денис Александрович, кандидат физико-математических наук, доцент. Окончил электромеханический факультет Морского государственного университета им. адм. Г.И. Невельского, радиоинженер. Заместитель начальника Регионального центра дополнительного морского профессионального образования МГУ им. адм. Г.И. Невельского. Имеет статьи, монографии, изобретение в области радиолокации. [e-mail: akmaykin@msun.ru].

Хоменко Дмитрий Борисович, аспирант. Окончил электромеханический факультет МГУ им. адм. Г.И. Невельского, радиоинженер. Инструктор тренажера Глобальной морской системы связи при бедствии. Имеет статьи, монографии, изобретение в области радиолокации. [e-mail: 0007177@mail.ru].

Ключев Даниэль Витальевич, аспирант. Окончил факультет электроники и информационных технологий МГУ им. адм. Г.И. Невельского, инженер по вычислительной технике. Область научных интересов: разработка программ обработки данных физических процессов. [e-mail: dan.kluev@gmail.com].

Фалина Екатерина Сергеевна, окончила факультет физики Ульяновского государственного педагогического университета им. И.Н. Ульянова. Учитель МОУ СОШ. Область научных интересов: системы автоматизации управления, разработка специализированных алгоритмов обработки данных. [e-mail: esfalina@mail.ru].

Аннотация

В статье описывается практический метод оценки состояния морской поверхности. Представлена процедура, позволяющая с помощью аналогово-цифрового преобразования и специально разработанной программы экспериментально определять высоту и направление распространения фронта морского волнения методами статистической обработки информации, поступающей от судовой радиолокационной станции (РЛС).

Ключевые слова: судовая радиолокационная станция, обработка эхосигнала, высота морских волн, радиус корреляции, эффективная площадь рассеяния, шероховатость поверхности, безопасность мореплавания.

Denis Alexanderovich Akmaykin, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor; graduated from the Faculty of Electromechanics of Nevelskoy Maritime State University; radio engineer; Deputy Head of the Regional Centre of Extended Maritime Professional Training of Nevelskoy Maritime State University; author of articles, monographs, an invention in the field of radiolocation. e-mail: akmaykin@msun.ru .

Dmitry Borisovich Khomenko, post-graduate student; graduated from the Faculty of Electromechanics of Nevelskoy Maritime State University; radio engineer; instructor of Global marine distress safety system simulator; author of articles, monographs, an invention in the field of radiolocation. e-mail: 0007177@mail.ru .

Daniel Vitallyevich Kluev, post-graduate student; graduated from the Faculty of Electronics and Information Technology of Nevelskoy Maritime State University; computer engineer; is interested in the development of programs for processing of physical process data. e-mail: dan.kluev@gmail.com .

Ekaterina Sergeevna Falina, graduated from the Faculty of Physics of Ulyanovsk State Pedagogical University named after Ilya Ulyanov; teacher at a secondary school; is interested in computer-aided management systems, development of specialized algorithms for data processing. e-mail: esfalina@mail.ru.

Abstract

The article describes a practical method for evaluation of sea water surface. It also presents a procedure which allows the definition of height and direction of sea wave spreading using analogue digital conversion and specially developed program, and methods of statistical processing of information coming from ship's radar station.

Key words: ship's radar station, processing of echosignals, height of sea waves, radius of correlation, effective space dispersion, surface roughness, navigation safety.

В настоящее время все суда, осуществляющие морское и речное сообщение, оборудуются РЛС, позволяющими своевременно и с высокой точностью определять состояние окружающей судно обстановки. РЛС представляют информацию об окружающих судах, береговой черте и прочих целях. Однако для безопасного маневрирования судоводителю не всегда достаточно только информации об окружающих судно объектах. Следует учитывать такие важные для судоходства факторы, как состояние морского волнения, скорость и направление ветра, течения и пр. В статье рассматривается возможность получения информации о состоянии морского волнения с помощью обработки сигналов, принимаемых судовой РЛС.

Основной характеристикой целей в радиолокации является эффективная площадь рассеяния (ЭПР). Она характеризует способность преобразовывать падающую электромагнитную волну в рассеянную волну, распространяющуюся в направлении приемника. Величина имеет размерность площади и измеряется обычно в квадратных метрах.

Предположив, что элементарная площадка морской поверхности является вторичным излучателем, создающим во всей сфере радиуса r плотность потока мощности, равную S_m и, следовательно, рассеивает мощность $P = 4\pi r^2 S_m$, то отношение этой мощности к плотности потока мощности, рассеиваемой в направлении приемника

$$s = \frac{P}{S} = \frac{4\pi r^2 S_m}{S} \quad (1)$$

называют эффективной площадью рассеяния [1].

Поверхность моря при волнении является поверхностью со сложной шероховатостью. Она состоит из первичных, наиболее крупных и хорошо выраженных волн, и вторичных, сравнительно небольших волн, покрывающих первичные. Некоторые участки поверхности моря покрыты пеной, пузырями, каплями рассыпавшихся гребней волн и т. п.

Функция, описывающая высоту любой точки поверхности, может быть представлена в виде суммы нескольких слагаемых, каждое из которых описывает соответствующую структуру $\eta(X, Y) = \sum_{i=1}^n XH_i(X, Y)$. Для практических

целей достаточно ограничиться $n \approx 3$. Тогда h_1 будет описывать первичные волны, h_2 - вторичные, h_3 - эффективную высоту таких образований, как рябь, пена, капли и т. д.

ЭПР поверхности со сложной шероховатостью:

$$s = K_f \left[\frac{1}{a_{i,ut}} \left(1 - \frac{4\pi\sigma_h}{\lambda} \right) \cdot e^{-\frac{tg^2 p}{a_u^2}} + \frac{471(7h_h)}{m} e^{-\frac{tg^2 p}{b_u^2}} \right], \quad (2)$$

где K_f - коэффициент зеркального отражения;

σ_n - среднеквадратическое значение высоты поверхности (волн);

$$a_{i,ut}^2 = \frac{4\sigma_{h1}^2}{r_{hi}^2} + \frac{4}{r_{H2}^2} - \text{параметр шероховатости}; \quad (3)$$

r_h - радиус корреляции, расстояние, при удалении

на которое значение высоты поверхности элементарных площадок AS_i и AS_k будут все больше различаться;

$$b_{ui}^2 = a_{ui}^2 + \left(\frac{\lambda}{2nr_{h3} \cos P} \right)^2 - \text{параметр шероховатости,}$$

зависящий от таких образований, как рябь, пена, капли и т. д.

Таким образом, ЭПР поверхности, обладающей сложной шероховатостью, определяется модулем коэффициента зеркального отражения, долей поверхности, занятой мелкой структурой, среднеквадратическим значением высоты мелкой шероховатости и параметрами шероховатости крупной и мелкой структур.

С увеличением волнения a_{ui} растет, r_h уменьшается. Однако, так как поле поверхностных волн анизотропно в направлении распространения волны, при зондировании вдоль гребней морских волн шероховатость будет наименьшей, а r_h - максимальным. И, соответственно, минимальным - при зондировании поперек гребней волн.

Для расчета мощности отраженного от поверхности моря сигнала необходимо учитывать не только ее структуру, но и вид излучения, длительность импульса и угол визирования. Структура поверхности определяет наличие когерентной и некогерентной составляющей в отраженном сигнале.

Мощность когерентной составляющей:

$$P_{\text{нк2}} \sim 4n(2H)^1 \cdot K \cdot V \wedge r.$$

где P_n - мощность передатчика;

G - коэффициент усиления антенны;

H - высота волны.

Мощность некогерентной составляющей:

$$P_{\text{нк2}} = \frac{P_n \pi}{16n\%} \int_s G^2(x,y) \frac{K^2}{n_{uu}} dx dy,$$

где R_0 - расстояние до отражающей поверхности.

Если шероховатость поверхности имеет смешанную структуру и $H > \lambda/4$, то когерентная составляющая близка к нулю, а некогерентная - определяется формулой [2]

$$P_{\text{нк2}}(\tau_u) = \frac{P_n s}{16 * \tau^3} \cdot \frac{K_f^2}{4} \sigma \tau G. \quad (4)$$

С увеличением высоты морского волнения площадь элементарных отражающих площадок в сторону приемника растет и, соответственно, увеличивается мощность отраженного сигнала P' в сторону приемника РЛС. Зная мощность излучения и коэффициент усиления антенны, можно определить среднеквадратическое значение высоты морских волн.

Согласно [3], при наклонном облучении водной поверхности амплитуда сигналов, рассеянных в направлении зеркального отражения, определяется углом и амплитудой первой гармоники пространственного спектра поверхностного волнения. С приближением угла зондирования к горизонтали амплитуда обратного рассеяния уменьшается. Однако с увеличением высоты волнения амплитуда сигналов, рассеянных в обратном направле-

нии, увеличивается для малых углов, и чем меньше угол зондирования, тем эта зависимость сильнее.

Для оценки возможности практического определения высоты и направления морского волнения в работе использовалась судовая РЛС JMA-2044 фирмы Japan Radio Company [4]. Основные характеристики РЛС JMA-2044 приведены в таблице 1.

Преобразование принятого эхосигнала из аналоговой

Таблица 1
Технические и навигационные характеристики РЛС JMA-2044

Параметр	Значение
Максимальная дальность обнаружения	32 мили
Минимальная дальность обнаружения	32 м
Несущая частота	9445 МГц
Длительность зондирующего импульса	0.12 мкс
Частота вращения антенны	24 об/мин
Частота зондирующих импульсов	820 импульсов/с

в цифровую форму осуществлялось аналогово-цифровым преобразователем (АЦП) Ла-н20-12РС1. Схема коммутации и параметры судовой РЛС JMA-2044 и платы АЦП Ла-н20-12РС1 представлены в [5].

Видеосигнал с выхода приемника РЛС подавался на вход Ла-н20-12РС1 для преобразования аналоговых входных сигналов в цифровую форму, которая удобна для дальнейшей обработки сигнала при помощи персонального компьютера. Частота дискретизации составляла 50 МГц, являющейся максимальной для данного устройства. При объеме буфера памяти 256 килоСлов использовалось 1024 Слова, что позволяло получить 1024 отсчета каждого зондирующего импульса с пространственным разрешением 3 м и разрешением оцифровки 12 бит [6]. Входной сигнал в устройствах АЦП, как принято, определяется шагом

квантования, который равен $U_{\text{вх, макс}} / 2^N$ и измеряется в процентах от максимума или единицах младшего значащего разряда (МЗР). Для АЦП с разрешением оцифровки 12 бит МЗР¹² составляет 4096 единиц. Для синхронизации преобразования эхосигналов на вход синхронизации платы подавался импульс синхронизации зондирующих импульсов РЛС, а на цифровой вход платы - импульс начала отсчета курсового угла антенны.

Натурные измерения производились на научно-исследовательском катере, который для исключения погрешностей, обусловленных качкой, при всех условиях эксперимента находился у причала. Скорость ветра измерялась с помощью чашечного анемометра МС-13. Высота морской волны измерялась с помощью зафиксированного на волнорезе гавани лазерного безотражательного дальномера Disto D8.

Сбор натуральных данных проводился при трех состояниях волнения моря, приведенных в таблице 2. Направление ветра для случаев 2 и 3 северо-западное, курсовой угол направления фронта волны визуально составлял около 200-230°.

Таблица 2
Состояние моря при проведении эксперимента

№ п.п.	Состояние моря	Скорость ветра, м/с	Высота волны, м
1	Штиль	0	0
2	Легкий бриз	3,5	0,4-0,5
3	Сильный бриз	12	1,3-1,5

Обработка данных осуществлялась специально разработанной программой, которая является интеллектуальной собственностью разработчиков. Для оценки информации, принятой за полный оборот антенны, в программе был разработан режим, элементы которого представлены на рисунке 1. В левой части отображается график принятых зондирующих импульсов. В правой части находятся элементы управления с полями редактирования, раскрывающимися списками и списками выбора параметров работы программы.

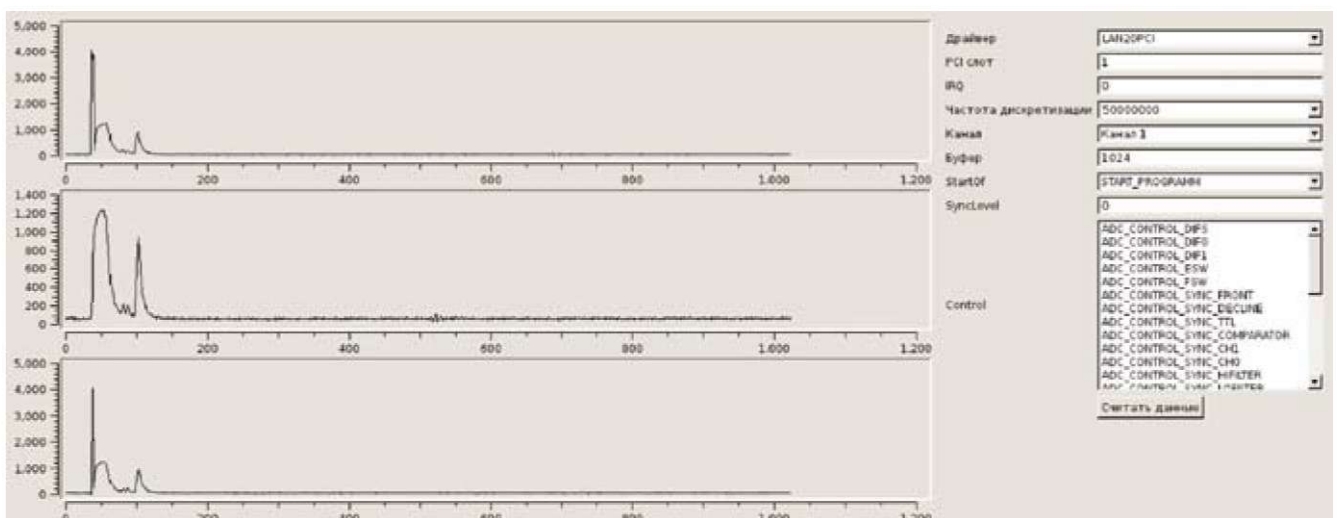


Рис. 1. Пример отображения последовательно принятых импульсов РЛС

Анализ отраженного сигнала проводился в восьми секторах размером 100x100 м, центры которых расположены на удалении 300 м от антенны РЛС, как показано на рисунке 2. При разрешении 3 м по расстоянию разрешающая способность по углу между смежными импульсами зондирования не превышала 1,1 м.

Угол между центрами анализируемых секторов с первого по восьмой и нулевым курсовым углом составляли 290°, 262.5°, 235°, 207.5°, 180°, 152.5°, 55° и 0° соответственно.

При увеличении интенсивности волнения увеличивается количество импульсов, отраженных от фронта морской волны. Данные сигналы не отображаются на экране РЛС, т. к. фильтруются методом межобзорной фильтрации [7]. В процессе проведения эксперимента дополнительным подтверждением того, что эти сигналы отразились от фронта морской волны, а не от морских навигационных целей, служил визуальный контроль отсутствия навигационных целей в исследуемом секторе.

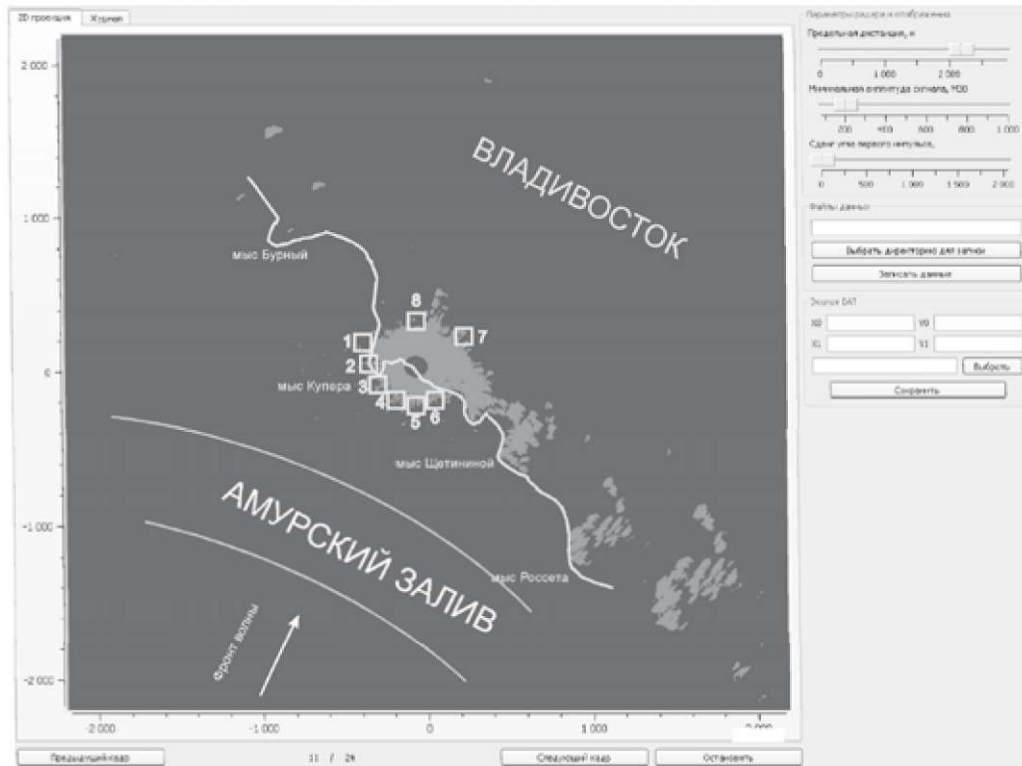


Рис. 2. Пример развертки экрана РЛС относительно береговой черты

Секторы 7 и 8 располагались в зоне отображения земной поверхности, и для всех типов анализа и вариантов эксперимента уровень принятого эхосигнала в максимальном количестве координат поверхности соответствовал значению $MЗР^{\wedge}$, а в секторах расположенных над морской поверхностью, при отсутствии целей в секторе, уровень МЗР зависел от интенсивности морского волнения. Пример таких эхосигналов приведен на рисунке 3. Данный фактор экспериментально подтверждает работоспособность предложенного метода. Поэтому для дальнейшей обработки использовались данные, полученные с развертки экрана РЛС, соответствующие координатам секторов с 1 по 6.

При отсутствии волнения во всех секторах наблюдались схожие результаты. Уровень сигнала на входе приемника не превышал 150 МЗР, что соответствует уровню шумов приемника РЛС. При наличии навигационной цели в секторе уровень сигнала достигал $MЗР_{max}^{\wedge}$, цель отмечалась на экране РЛС и в программе обработки.

По количеству точек координатной сетки, в которых МЗР достигает своего максимума, можно судить о высоте морского волнения. Для численной оценки принятого сигнала в работе использовалась величина, обозначенная $R_{MЗР_{max}^{\wedge}}$ отражающая количество точек $MЗР^{\wedge}$ на единицу площади. Значения $R_{MЗР_{max}^{\wedge}}$ приведены в таблице 3.

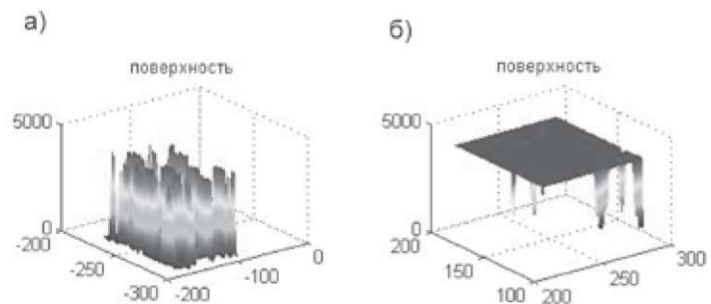


Рис. 3. Принятый сигнал при одинаковой настройке программы обработки: а) сектор 4 - водная поверхность; б) сектор 7 - земная поверхность

Плотность МЗР_{max} при различном состоянии моря

№ п.п.	Состояние моря	Высота волны, м	$\rho_{\text{МЗРmax}} \text{ МВР}_{\text{max}} / \text{М}^2$
1	Штиль	0	$0,1 \cdot 10^{-2} \pm 0,0440 \cdot 10^{-2}$
2	Легкий бриз	0,4-0,5	$3,2 \cdot 10^{-2} \pm 0,10 \cdot 10^{-2}$
3	Сильный бриз	1,3-1,5	$7,5 \cdot 10^{-2} \pm 0,5540 \cdot 10^{-2}$

Таким образом, зная значение $\rho_{\text{МЗРmax}}$ для нескольких значений высоты морских волн, можно с помощью интерполяции, пользуясь предложенным методом, определить высоту морского волнения вокруг РЛС.

Между высотой волн и шероховатостью морской поверхности существует прямая связь (зависимость). Однако шероховатость при зондировании поперек фронта волн больше, чем при зондировании вдоль фронта. Соответственно, радиус автокорреляционной функции в секторе позволит судить о направлении распространения фронта морских волн вокруг РЛС. Для всех полученных данных в исследуемых секторах были рассчитаны автокорреляционные функции и определены значения радиуса корреляции во всех азимутальных направлениях (рис. 4). Из рисунка видно, что фронту волны соответствует курсовой угол 210°. Данные, полученные экспериментально, под-

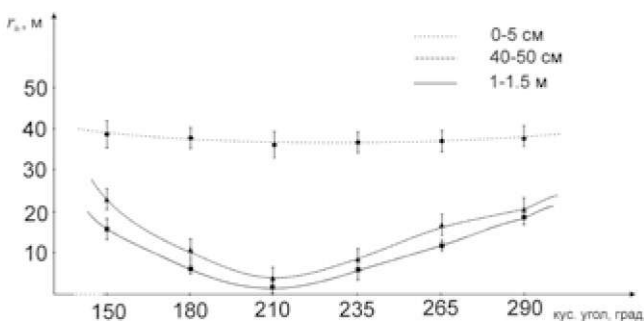


Рис. 4. График зависимости значения радиуса корреляции от направления распространения фронта морских волн

тверждают результаты визуальных наблюдений.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что по величине отраженного от морской поверхности сигнала можно судить об интенсивности морского волнения, а по минимальному значению радиуса автокорреляции принятого сигнала - о направлении его распространения.

Пользуясь методами статистического анализа, возможно автоматическое определение высоты и направления распространения фронта морского волнения вокруг судна. Если модернизировать экспериментальную установку в компактный программно-аппаратный комплекс морского исполнения, то полученное устройство сможет определять не только параметры морского волнения вокруг судна, но и предупреждать судоводителей об опасных сочетаниях курсовых углов и скоростей при штормовании судна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теоретические основы радиолокации / под ред. Я.Д. Ширмана: учеб. пособие для вузов. - М. : Советское радио, 1970. - 560 с.
2. Зубкович С.Г. Статистические характеристики радиосигналов, отраженных от земной поверхности. - М. : Советское радио, 1968. - 224 с.
3. Ушаков И.Е., Шишкин И.Ф. Радиолокационное зондирование морской поверхности. - М. : РИЦ «Татьянин день», 1997. - 264 с.
4. Marine radar equipment JMA-2044MII., Instruction manual., Japan Radio Co., LTD. - 68 p.
5. Хоменко Д.Б. Использование программно-аппаратных средств в обработке радиолокационной информации // Сб. докл. 58-й науч.-техн. конф. «Молодежь-Наука-Инновации», 24-26 ноября 2010 г. В 2 т. - Владивосток : Мор. гос. ун-т, 2010. - Т. 1. - С. 23-26.
6. Описание унифицированных драйверов для работы с платами ЛА-XXX в операционной системе Windows 95/98/Me/2K/XP: руководство пользователя. - М. : ЗАО «Руднев-Шиляев», 2001. - 78 с.
7. Судовые радиолокационные системы: учебник / В.В Афанасьев [и др.] ; под ред. Ю.М. Устинова. - СПб. : Веленара, 2009. - 366 с.