

УДК 550.388.

ИЗМЕРЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МОРСКОГО ВОЛНЕНИЯ НАВИГАЦИОННЫМИ РЛС МАЛОЙ МОЩНОСТИ

В.А. Гарбацевич¹, А.В. Ермошкин², И.И. Иванов³, В.А. Телегин⁴

Поступила в редакцию 21.12.2015 г

В работе на базе экспериментов с РЛС FURUNO 1715 обсуждаются возможности и ограничения использования маломощных навигационных РЛС X-диапазона при дистанционных методах измерения пространственно-временных параметров морского волнения, варианты доработки аппаратуры, представлены методики и результаты обработки записей сигналов при исследовании морского волнения с помощью РЛС, установленных как на берегу, так и на движущихся судах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ВЕТРОВЫЕ ВОЛНЫ, СКОРОСТЬ ВЕТРА, НАВИГАЦИОННЫЕ РЛС

ВВЕДЕНИЕ

Радиолокационные станции (РЛС) сантиметрового диапазона длин волн широко используются при исследованиях океана последние десятилетия [1–7]. Сравнительная простота радиолокационных (РЛ) измерений, всепогодность и независимость от освещенности, возможность размещения РЛС как на стационарных объектах, так и на различных движущихся носителях дают возможность за довольно короткие интервалы времени получать информацию о состоянии морской поверхности, что существенно и для комплексных измерений, дающих более полную информацию об экологической картине.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ И МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ

Наблюдения ветрового волнения проводились с 2009 по 2011 годы на черноморских полигонах Института океанологии «Голубая бухта», Новороссийского порта, метеостанции «Тамань» и в рейсе НИС «Эколог» на Белом море. Сантиметровый радар (далее РЛС), использованный в экспериментах, выполнен на базе стандартного маломощного и недорогого импульсного некогерентного навигационного РЛ "FURUNO model 1715". РЛС обладает следующими основными характеристиками: рабочая частота — 9410 ± 30 МГц, частоты повторения импульсов 3000, 1200 и 600 Гц при 0.08, 0.3, 0.8 мкс длительности соответственно, пиковая мощность — 2.2 кВт, поляризация — горизонтальная, диаграмма направленности по горизонтали — 5.2° .

Основные доработки РЛС были связаны с выводом на АЦП не только видеосигнала, но и сигнала ПЧ 60 МГц, для чего по результатам первого этапа экспериментов, показавшего недостаточную информативность видеоканала, был разработан дополнительный блок усилителя ПЧ 60, блоки согласования, оцифровки, управления, обработки данных и программное обеспечение.

Первые результаты доработанной РЛС показали, что канал промежуточной частоты содержит намного больше полезной информации, чем видеоканал. В частности, удалось обнаружить корреляцию между длиной волн на поверхности моря и гармониками в спектре отраженного сигнала. (Рис. 1).

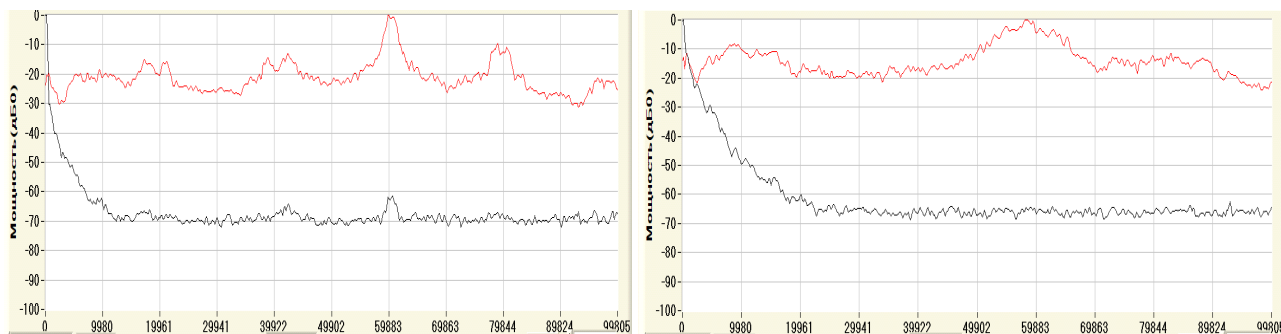
Для определения средней высоты волны был разработан алгоритм, основанный на линейной аппроксимации дистанционных данных РЛС, сопоставленных с данными непосредственных измерений гидрологов.

1 Гарбацевич Владимир Алексеевич, «ИЗМИРАН», 8-(499)-4006215, npo@mail.ru

2 Ермошкин Алексей Валерьевич, ФБГУН «ИПФРАН», 8-(831)-4164856, al-ermoshkin@vandex.ru

3 Иванов Игорь Иванович, НИИФ ЮФУ», 8-(863)-2975063, iiivanov@sfedu.ru

4 Телегин Виктор Алексеевич, «ИЗМИРАН», 8-(495)-8510120, telegin@izmiran.ru



а) б)
 Рис. 1. По горизонтали отложена частота в кГц, по вертикали — мощность в дБ, приведенная к максимуму. Линия (вверху) — спектр сигнала промежуточной частоты, внизу — спектр видеосигнала. Номинальное значение промежуточной частоты 60 МГц. а) Спектр сигнала, отраженного поверхностью моря с волнами длиной 7–9 м. б) Спектр сигнала, отраженного поверхностью моря с волнами длиной 10–15 м.

Полученные коэффициенты корреляции (примерно 0.8) для случаев ветра со стороны моря, дают основание считать алгоритм пригодным для определения средней высоты волнения с достаточной для практики точностью.

По записям временного ряда радиолокационных сигналов, вычисляется их среднее значение по мощности, названное радиолокационным признаком - РЛП, которое определяется как:

$$РЛП = \frac{1}{M} \int_{152}^{6152} \frac{1}{N} \left(\int_{-40}^{50} \text{Интенсивность}(P, A) dA - \int_{-40}^{50} \text{Интенсивность}(6152, A) dA \right) dP$$

Интегрирование выполняется по азимуту (A) и по дальности (P). При вычислении коэффициентов пропорциональности используются усредненные по углу обзора A данные по разработанной программе. Коэффициент N равен числу элементов интегрирования по азимуту A , что дает среднее распределение интенсивности радиолокационного сигнала по дальности. M — число элементов по дальности.

После определения РЛП, вычисляется средний уровень волнения, при условии, что направление ветра совпадало или было близким к сектору интегрирования. На рисунке 2 приведена линейная и степенная зависимость облака точек РЛП от высоты волны. Числом возле точек приведено направление ветра.

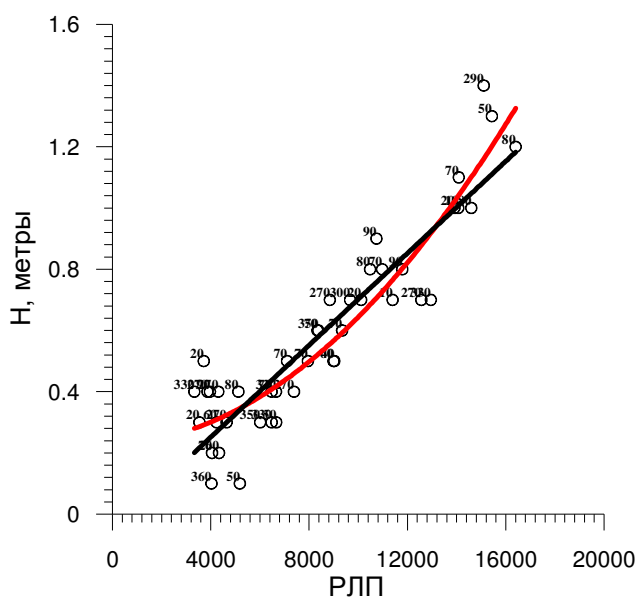


Рис. 2. Линейная и степенная аппроксимации облака точек РЛП от высоты волны.

Для линейной аппроксимации, которая как видно из рисунка 2 очень хорошо ложится на облако точек при средних значениях высот волн, получено следующее выражение:

$$H1[m]=7.51 \cdot 10^{-5} \cdot \text{РЛП} - 0.049$$

Для степенной аппроксимации выражение записывается следующим образом:

$$H2[m]=0.231+1.54 \cdot 10^{-6} \cdot \text{РЛП} + 3.98 \cdot 10^{-9} \cdot \text{РЛП}^2$$

При корреляционном анализе определялось уравнение аппроксимирующей прямой $H(W)$, затем вычислялись статистические значения данных скорости ветра и высоты волны, после чего вычислялся коэффициент корреляции.

Например, для эксперимента в Новороссийске получено значение коэффициента корреляции 0.91, что говорит о хорошем соответствии данных скорости ветра, определенных с помощью РЛС, и контрольного лазерного высотомера. Во время экспериментов гидрометеорологические условия существенно менялись, что позволило наблюдать различные состояния морского волнения и других гидрологических характеристик. Скорость ветра изменялась от 0 до 15 м/с, волнение от 0 до 4 баллов, скорость течения от 0 до 1 м/с. На рисунке 3 приведены круговые радиолокационные панорамы для разных метеоусловий.

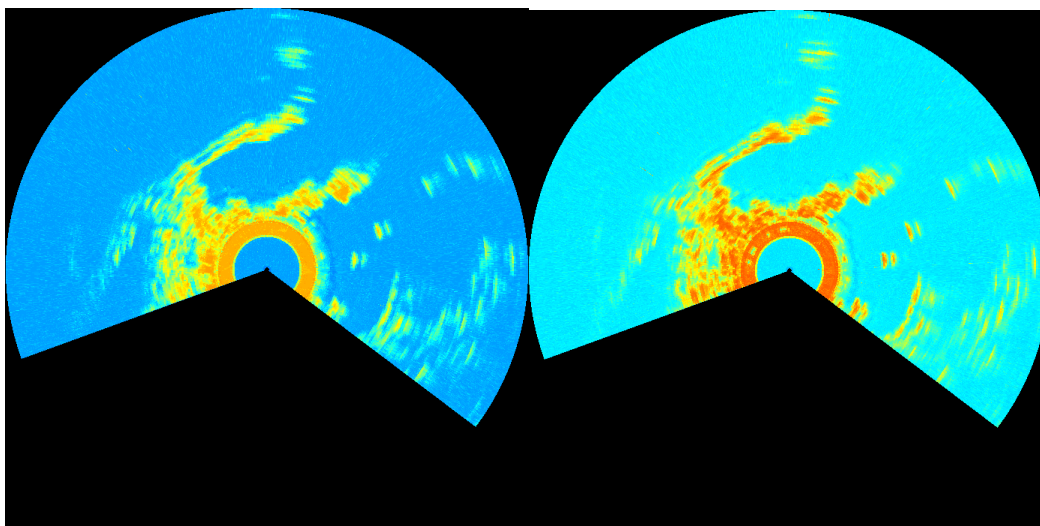


Рис. 3. Круговые РЛ панорамы при скорости ветра 11 и 6 м/с.

При росте скорости ветра наблюдается рост сигнала и увеличение дальности, на которой сигнал превышает уровень шумов, зависимость расчетного параметра РЛП от скорости ветра и силы волнения представлены на рис 4.

Пересчет скорости ветра проводился по эмпирической формуле

$$\text{Скорость ветра [м/с]}=1.35 \cdot 10^{-5} \cdot \text{РЛП} - 333.71$$

в которой последнее слагаемое может меняться от силы и направления ветра. Вариации коэффициентов в формулах близки, но, не смотря на это, могут вызывать ошибку в определении скорости ветра 1–2 м/с, если направление ветра определено не верно.

Направление ветра определяется нахождением максимального уровня сигнала, затем вычисляется РЛП для направления зондирования против, поперек и по ветру и находится среднее арифметическое 4-х значений ветра.

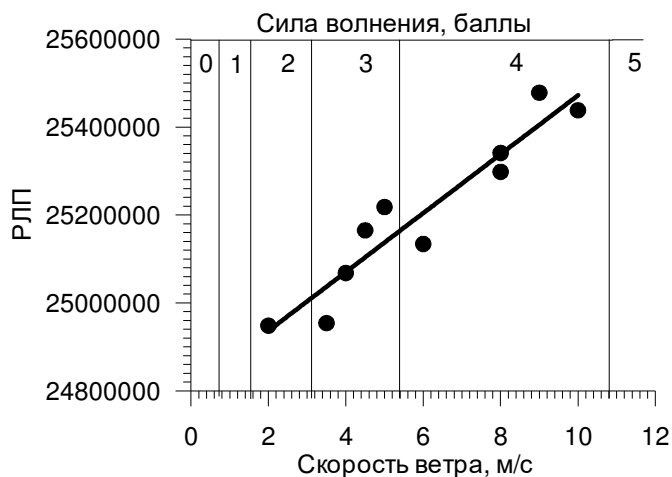


Рис. 4. Зависимость РЛП от скорости ветра и силы волнения.

При большой скорости ветра, большей 10 м/с и определенной продолжительности на поверхности моря развиваются длинные энергонесущие волны (ДВ) с характерными длинами 40–80 метров, а при более сильном ветре и большей длины. На рисунке 5 показано проявление таких энергонесущих ветровых волн в радиолокационной панораме морской поверхности. Они выглядят как длинные параллельные полосы повышенной интенсивности РЛ сигнала и распространяются в определенном направлении.

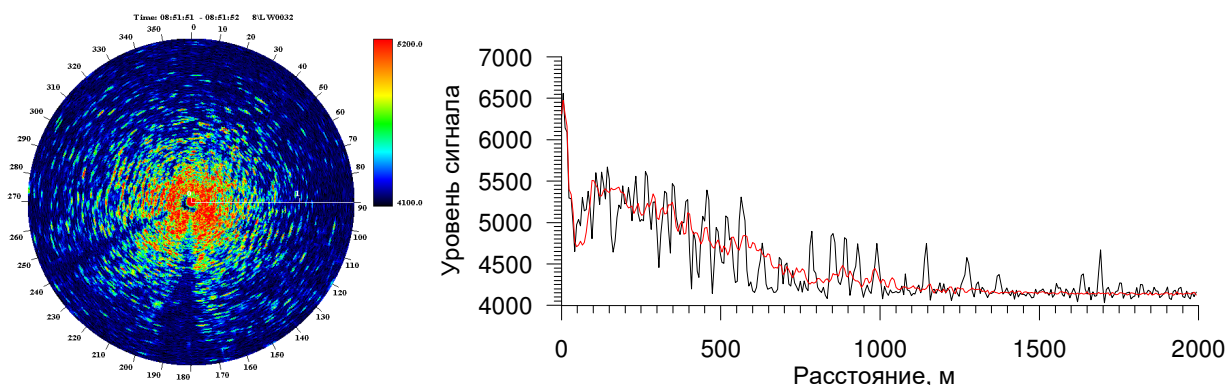


Рис. 5. Проявления длинных ветровых волн и внутренних волн на радиолокационной панораме, справа показано сравнение разрезов радиолокационных сигналов длинных ветровых волн (черная линия) и отсутствием длинных волн (красная линия) при близких скоростях ветра.

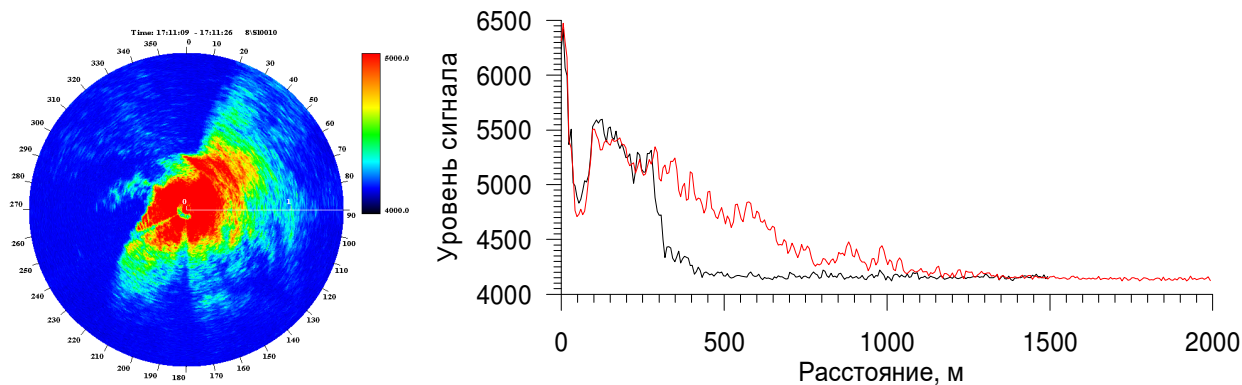


Рис. 6. Проявление слика (область выглаживания морского волнения) в радиолокационной панораме.

На записи радиолокационных сигналов длинные ветровые волны проявляются в виде периодических усилений и ослаблений сигнала с расстоянием равным длине ДВ, что может быть использовано при разработке нового алгоритма, основанного на спектральной обработке радиолокационных панорам.

Основным мешающим явлением при интерпретации результатов можно назвать проявление неоднородных течений на морской поверхности (слики — области выглаживания морской поверхности). Такое явление сильно искажает радиолокационную панораму (рис. 6).

Видно, как практически половина РЛ панорамы находится в области влияния слика, который проявился в резкой границе между наличием РЛ сигнала и его отсутствием. На рисунке 6 справа представлено сравнение временного ряда сигналов со сликом (черная линия) и его отсутствием (красная линия). Видно, что при одной и той же скорости ветра наличие слика приведет к существенному занижению результата вычислений скорости ветра используемым алгоритмом. На расстоянии 400 метров уровень РЛ сигнала упал практически до шумов, хотя при отсутствии слика сигнал наблюдался более 1000 метров.

Еще одно наблюдаемое явление, представленное на рис. 7 — это проявление на морской поверхности внутренних волн.

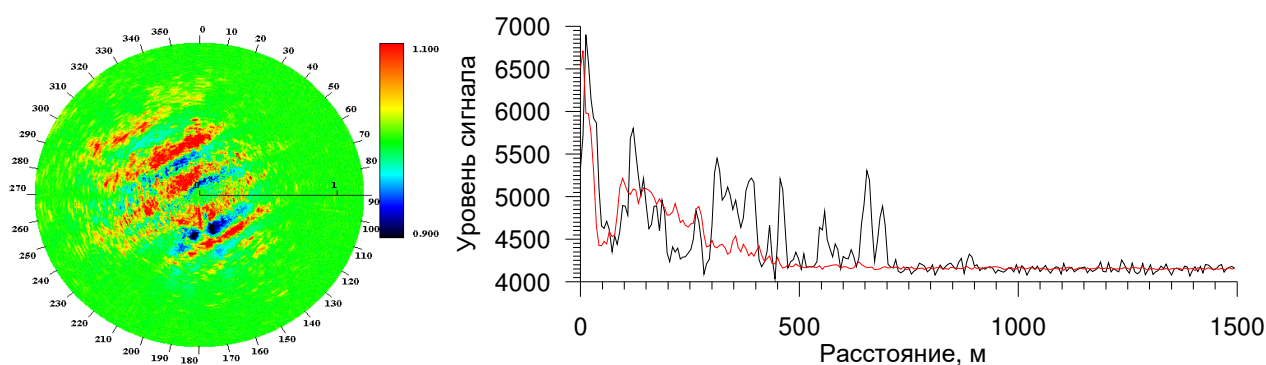


Рис. 7. Проявление внутренних волн в радиолокационной панораме, справа — разрез радиолокационной панорамы с проявлением внутренних волн (черная линия) и их отсутствием (красная линия).

Внутренние волны проявляются в виде периодических областей усиления и ослабления РЛ сигнала с характерными размерами сотни метров. Видно, что внутренние волны приводят к усилению сигнала, что в целом может привести к ошибке в дистанционном определении скорости ветра РЛС в большую сторону. На практике, описанные явления наблюдаются редко и обладают характерными признаками, что не составит труда их идентифицировать и учитывать в алгоритме определения скорости ветра и силы волнения по данным РЛС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных экспериментов и анализа результатов подтверждается целесообразность применения маломощных навигационных РЛС для контроля волнения и скорости ветра при малых углах скольжения луча РЛС.

Соотношение сигнал/шум для малых дистанций от уровня мощности практически не зависит, однако для береговых РЛС мощность излучения необходима гораздо выше, чем для судовых РЛС. Если при стандартной высоте мачты РЛС на судне 10 м, РЛС с пиковой мощностью на выходе 4 кВт “видит” до 2-3 км в случае сильного волнения, то для берега такой мощности явно не достаточно. При высоте береговых мачт 40–50 метров, или в условиях крутого берега можно увеличить зону обзора до 6 км при пиковой мощности излучения 10 кВт. Выбор вертикальной поляризации для малых углов скольжения в ряде случаев, по литературным данным, дает выигрыш в 5–10 дБ. Выполненные эксперименты с поворотом излучателя РЛС “Furuno” на 90° заметного выигрыша не дали.

Для повышения информативности желательно отраженный сигнал РЛС снимать с ПЧ, кроме того представляется необходимым переходить к спектральным измерениям отраженных от моря сиг-

налов, что даст больше информации, чем только амплитудные измерения. Частота квантования АЦП для оцифровки видеосигнала должна обеспечивать, как минимум, разрешения вдвое превосходящее разрешение РЛС.

Режимы простых навигационных РЛС не в полной мере соответствуют требованиям в отношении радиального разрешения по поверхности (Для волн порядка десятка метров разрешение на поверхности должно быть не менее 5 м и длительность импульса — 30-40 нс). Ширина диаграммы направленности (ДН) определяет азимутальное разрешение РЛС и хотя связана с увеличением габаритов антенны, но узкие ДН меньше 1 градуса предпочтительней, что дает разрешение примерно 100 м на дальности 6 км.

Для гидрофизических исследований важный параметр РЛС — ее когерентность. С помощью доплеровского сдвига частот можно восстановить радиальную компоненту скорости рассеивающих структур, которая связана с ветром и течением.

В планируемых экспериментах по исследованию морского волнения, течений и вихревых образований для существенного повышения информативности предпочтительно использовать когерентные навигационные РЛС СВЧ (С и Х) диапазона с изменяющейся (горизонтальной и вертикальной) поляризации.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта № 213.01-2014/-013 ВГ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дистанционные методы исследования океана. // Сб. научн. Трудов ИПФ АН СССР, Горький, 1987. с. 5-33.
2. Калмыков А.И., Островский И.Е., Розенберг А.Д., Фукс И.М. Обратное рассеяние сантиметровых радиоволн взволнованной поверхностью моря при малых углах скольжения // Изв. вузов. Радиофизика. 1966, Т. 9. № 6. С. 1095–1099.
3. Hunter I.M., Senior T.B. Experimental Studies of Sea Surface Effects on Low-Angle Radars // Proc. IEEE. 1966. V. 113. № 11. P. 1731–1740.
4. Дж. Кроней Гражданские судовые радиолокационные станции. // Справочник по радиолокации. Т.4, Гл.3, М., Сов.радио, 1978.
5. Naeto-Rorge J.C., Hessner K., Jarabo-Amores and La Mata-Moya Signal-to-noise ratio analysis to estimate ocean wave height from X-band marine radar image time series. TET Radar Sonar Navig. 2008. 2. (1). pp. 35–41.
6. Басс Ф.Г., Брауде С.Я., Калмыков А.И., Мень А.В., Островский И.Е., Пустовойтенко В.В., Розенберг А.Д., Фукс И.М. Методы радиолокационных исследований морского волнения (радиоокеанография) // Успехи физических наук. 1975. №116. С.741–743.
7. Загородников А.А. Корреляционная функция флуктуаций амплитуд радиолокационного сигнала, рассеянного морской поверхностью. // Радиотехника и электроника, 1966, т.14, № 10, с. 1020.
8. Ивонин Д.В., Овечкин В.Е., Баханов В.В., Ермошкин А.В., Телегин В.А. Возможность определения параметров морского волнения по измерениям некогерентного навигационного радара СВЧ диапазона // Труды Международной научной конференции «Излучение и рассеяние электромагнитных волн» ИРЭМВ-2009. Таганрог—Дивноморское. 2009 г., с. 602-606.
9. Телегин В.А., Гарбацевич В.А., Ермошкин А.В., Иванов И.И. Использование навигационных РЛС малой мощности X-диапазона для измерения пространственно-временных характеристик морского волнения // Труды Международной научной конференции «Излучение и рассеяние электромагнитных волн» МНК ИРЭМВ-2015, 28 июня – 03 июля 2015 года, Таганрог—Дивноморское, с. 421–425.

USE LOW POWER MARINE RADAR X - BAND TO MEASURE THE SPATIAL-TEMPORAL CHARACTERISTICS OF THE OCEAN WAVE

Garbatsevith V.A., Ermoshkin A.V., Ivanov I.I., Telegin V.A.

The paper on the basis of experiments with radar FURUNO 1715 discusses the possibilities and limitations of using low-power navigation radar X-band options for modification of equipment, presents the results of processing records signals in the study of sea waves by radar, established at the shore, and on moving ships.

KEYWORDS: X-BAND, MARINE RADAR, SEA SURFACE EFFECTS