

Определение вектора скорости течения по измерениям навигационного радара с широкой диаграммой направленности антенны

Д.В. Ивонин¹, В.А. Телегин², А.И. Азаров³, А.В. Ермошкин⁴, В.В. Баханов⁴

¹ *Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
117997, Москва, Нахимовский проспект 36
e-mail: ivonin@ocean.ru, toulon@bk.ru*

² *НИИ дальней радиосвязи,
107076, Москва, Бухвостова 1-я ул., 12/11
e-mail: telvik@rambler.ru*

³ *Южное отделение института океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
353470, Краснодарский край, Геленджик, ул. Просторная, 1-г
e-mail: itkillerr@rambler.ru*

⁴ *Институт прикладной физики РАН,
603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46
e-mail: al-ermoshkin@yandex.ru*

Исследуется возможность применения навигационных СВЧ локаторов с широкой диаграммой направленности антенны (1.9°) для дистанционных измерений векторного поля поверхностных течений. Для пересчета яркостных радиолокационных изображений в поля гидродинамических характеристик морской поверхности используется спектральный метод, разработанный для радиолокационных систем WaMos II. Ключевым моментом метода является разделение полезного сигнала и спекл-шума, используя фильтр, построенный на основе дисперсионного соотношения для поверхностных гравитационных волн. На базе измерений в Черном море приводится пример восстановления вектора скорости течения.

Ключевые слова: навигационный радар, дистанционное зондирование, течения.

Введение

Данная статья входит в цикл работ посвященных исследованию возможностей и ограничений навигационных локаторов СВЧ-диапазона для применения в системах дистанционного мониторинга параметров морского волнения и течений. Подобные системы сейчас активно развиваются на российском побережье Черного море, и все более актуальным становятся задачи адаптации подобных систем к условиям исследования различных динамических процессов береговой зоны. Данные процессы отличаются, прежде всего, характером быстрой изменчивости во времени и пространстве (порядка часа по времени и сотни метров по пространству, если говорить о течениях и волнении), поэтому системы дистанционного мониторинга прибрежной зоны должны в идеале отвечать этим двум важным условиям.

Использование навигационных локаторов для исследований морского волнения и течений в микроволновом диапазоне имеет относительно недавнюю историю. Одной из первых была работа Розенберга 1981 года [1] и дальше цикл работ Харьковского института радиоэлектроники [2] и Института космических исследований [3-7], где были продемонстрированы возможности измерения волнения, в том числе оценки нелинейных волновых эффектов, а также предложена трехмасштабная модель рассеяния радиоволн.

Перенесение опыта измерений волнения, накопленного при работе с космическими радарми синтезированной апертуры (РСА) [8], на условия применения навигационных локаторов позволило создать коммерческие СВЧ системы для мониторинга волнения, такие, как Wamos, SeaDarQ [9-12].

Минимальные требования к навигационному радару составляют: 1) минимальная скорость вращения антенны 32 об/мин (время оборота антенны примерно 2 сек); 2) максимальная длина импульса радара 80 нс; 3) минимальная ширина антенны 2.44 м (горизонтальная диаграмма направленности лучше 1°); 4) минимальное время накопления данных 1 минута. Как правило, используется горизонтальная поляризация. По спецификациям разработчиков данная система позволяет проводить измерения в диапазоне расстояний от 0.1 км до 5 км в зависимости от скорости ветра и высоты установки антенны. Минимальная скорость ветра для проведения измерений 3 м/сек. Существуют и серьезные ограничения при использовании таких систем. В первую очередь это необходимость калибровки каждого локатора во время инсталляции. Калибровочные коэффициенты зависят от варианта исполнения самого локатора, высоты его установки, дальности измерений, типа антенны [13]. Калибровка проводится по независимым измерениям волнения, например, по буйковым данным. Для проведения измерений течений калибровка не требуется.

Результаты измерений высоты волнения системой Wamos были многократно протестированы с помощью буйковых или других независимых измерений. Основным акцентом при использовании таких систем ставится на получении информации о значительной высоте волн. Также анонсируется возможность получения направленного спектра волнения и вектора скорости течений в оперативном режиме. Однако примеры реконструкции поля поверхностных течений практически отсутствуют в литературе, можно выделить только совершенно недавно появившуюся работу 2011 года [14], где авторы сопоставляли результаты измерений течений в узком проливе системой SeaDarQ и рассчитанные по модели.

Авторы данной работы ставили своей целью тестирование возможностей СВЧ-локатора для реконструкции поля поверхностных течений на основе данных собранных в 2008-2009 годах на Черном море в районе г. Геленджик. В частности, представляет интерес потенциальная возможность использования более доступных по цене и, соответственно, более слабых по возможностям, радаров с менее широкой антенной (1.2 м, что вдвое меньше используемого Wamos) и, соответственно, вдвое худшим угловым разрешением (1.9° против требуемых 0.9°) и даже еще более скромными характеристиками (разрешение 5.2°). Результаты измерений поля радиальной компоненты скорости течений такими локаторами были представлены в работе [15]. Данная работа посвящена следующему шагу – тестированию возможности измерять векторное (амплитуда и направление) поле поверхностных течений.

Радиолокатор

Для проведения радиолокационных измерений использовалась радиолокационная станция (РЛС), созданная в Институте прикладной физики РАН на базе навигационного радара FURUNO 1832 (рис. 1). Рабочая частота РЛС 9.41 ГГц, длина радиоволны 3.14 см, поляризация горизонтальная. Использовалась длина зондирующего радиоимпульса 80 нс (соответствует разрешению по дальности 12 м). Антенна имеет угловое разрешение 1.9° . Ви-

деосигнал РЛС подавался на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП), где дискретизировался с частотой 25 МГц (соответствует дискретизации 6 м по дальности). По дальности записывалось 1022 точки, что дает максимальную дальность 6 км. За один оборот антенны записывалось в среднем 574 направления (соответствует дискретизации 0.63° по углу). Антенна РЛС совершала 24 оборота в минуту, что давало период дискретизации сигнала по времени 2.5 сек (или 0.4 Гц). Последнее обстоятельство создавало некоторые трудности при обработке информации, поскольку частота Найквиста для данного режима составляет 0.2 Гц, что в точности попадает в область частот поверхностных гравитационных волн, чьи частоты расположены, в основном, в диапазоне от 0.15 до 0.3 Гц. За один сеанс записывалось около ста оборотов антенны. Мониторинг ветра велся переносной портативной метеостанцией Davis Instrument Wantage Pro2.

Метод

Для восстановления скорости течения и оценки высоты значительных волн был использован метод обработки сигнала, описанный в работах [9-13]. Метод основан на использовании двухмасштабной модели рассеяния, поэтому обладает некоторыми недостатками такого подхода [4], когда требуется определение высоты одиночной волны. Однако в целом, когда требуются измерения спектра волнения, метод работает достаточно хорошо [16]. Ключевой чертой метода является разделение полезного сигнала и спекл-шума на основе использования трехмерных диаграмм (аналога двумерных RTI-диаграмм [7]), трехмерного преобразования Фурье и последующего применения дисперсионного соотношения для поверхностных гравитационных волн для их фильтрации. Метод включает следующие этапы обработки:

- 1) получение серии изображений морской поверхности за 2 мин (32 оборота);
- 2) выделение интересующей области 128 отсчета по расстоянию на 32 отсчета по направлению (что соответствует площадке 768 x 1050 м² на удалении 3 км от радара) и пересчет ее из полярных в декартовы координаты; в результате формируется трехмерный массив $S_3(x_i, y_j, t_n)$, (нижний индекс «3» здесь означает, что массив трехмерный, x – расстояние вдоль луча радара, в метрах, y – расстояние поперек луча, в метрах, t – время в секундах, индексы пробегают значения: $i = 1 \div 128, j = 1 \div 32, n = 1 \div 32$);
- 3) трехмерное преобразование Фурье $F_3(k_x, k_y, \omega)$ массива изображений $S_3(x_i, y_j, t_n)$;
- 4) преобразование трехмерного спектра сигнала $F_3(k_x, k_y, \omega)$ в двумерный $F_2(|k|, \omega)$ (нижний индекс «2» означает, что массив двумерный):

$$F_2(|k|, \omega) = \int_{k_x^2 + k_y^2 = |k|^2} F_3(k_x, k_y, \omega) dk_x; \quad (1)$$

5) фильтрация колебаний связанных со спекл-шумом и выделение сигнала связанного с поверхностными гравитационными волнами (описано ниже);

б) определение скорости течения.

Сигнал, соответствующий модуляции ряби длинными волнами, должен лежать в области, определяемой дисперсионным соотношением для поверхностных гравитационных волн:

$$\omega = \sqrt{gk} + kU \cos \alpha, \quad (2)$$

$g=9.8$ м/сек², U – скорость течения, α – угол между волновым вектором и течением. Второе слагаемое отражает результат взаимодействия поверхностных гравитационных волн с течением. По величине сдвига пика (рис. 1в) относительно величины \sqrt{gk} делалась оценка радиальной компоненты скорости поверхностного течения $U \cos \alpha$. Если удавалось наблюдать сигнал для достаточно широкого по направлению спектра волнения, то восстанавливалась и скорость U , и направление течения α . Сдвиг определялся по величинам (U, α) , для которых достигался максимум интеграла по профильтрованному сигналу по области:

$$I(U, \alpha) = \int_{k_1}^{k_2} \int_{\omega_1}^{\omega_2} F_2(k, \omega) dk d\omega, \quad \text{где} \quad \begin{cases} k_1 = 0.13 \text{ rad/m}; & k_2 = 0.27 \text{ rad/m}, \\ \omega_1 = \sqrt{gk} + kU \cos \alpha - 2\pi\Delta f, \\ \omega_2 = \sqrt{gk} + kU \cos \alpha + 2\pi\Delta f, \\ \Delta f = 0.15 \text{ Гц}. \end{cases} \quad (3)$$

Результаты

Эксперимент проводился ИПФ РАН в 2006-2009 годах в Геленджике в Голубой бухте. Координаты установки радара в 2008 году: N 44.576°, E 37.976°. За период 2006-2009 годов был накоплен обширный материал радиолокационных данных. В процессе обработки данных было выделено три типичные погодные ситуации: 1) ветер с моря (южный или юго-западный ветер 3-6 м/с), 2) ветер вдоль берега (западный ветер 3-6 м/с), 3) ветер с берега (северный ветер около 10 м/с).

Самой благоприятной ситуацией для зондирования течений оказалась ситуация при ветре дующем с моря. В качестве примера на рис. 1 представлены результаты полученные 12/09/2008 16:00. Видно (рис. 1г), что предыдущие 5 часов дул ветер 3-6 м/с, постепенно меняя свое направление от северного 2 м/с на восточное, и южное 3-6 м/с. В целом ветер можно охарактеризовать как южный/юго-восточный, волнение приходило с южного направления. На рис. 1а показан радиолокационный сигнал так, как он отображался на экране локатора (показан участок размерами 768 x 768 м² на расстоянии 1 км от берега в направлении точно на юг). На рис. 1б показан профильтрованный радиолокационный сигнал, который отображает положение морских волн в некоторый момент времени. Изображение на рис. 1б отображает не высоту волны, а ее яркостную характеристику. Т.е. количество отражателей (интенсивность ряби, мезообрушений) приходящихся на данную волну. По этой причине на рис. 1а и 1б не приведены абсолютные шкалы измерений, а только относительные цвета «черный-белый», т.е. «есть рассеиватели-нет рассеивателей». Полностью соотносить изображение рис. 1б с высотой волнения не имеет смысла, поскольку для этого необходимо решить задачу интерпретации яркостных изображений 1а и 1б в рамках адекватной физической модели рассеяния, что выходит за рамки данной работы.

Длина поверхностных волн в это время составляет около 30 м (волновое число 0.2 рад/м, см. рис. 1в). Глубины на данном участке составляют от 27 до 15 метров, т.е. волны длиной 30 м уже начинают «чувствовать» дно. Однако поправка дисперсионного соотношения (2) на конечную глубину $\omega = \sqrt{gk \tanh(kH)}$ составляет незначительную величину всего 0.3% (для $k=0.2$ рад/м и $H=15$ м), поэтому поправками на конечные глубины мы пренебрегаем.

На рис. 1д представлен пространственный спектр профильтрованного радиолокационного сигнала. Следует снова отметить, что пространственный спектр профильтрованного сигнала не является в точности пространственным спектром поверхностного волнения. Он может быть пересчитан в пространственный спектр поверхностного волнения, используя определенные нормировки, полученные эмпирическим путем [9-11,13]. Для получения в точности таких нормировок требуется предварительная калибровка радара по буйковым или другим достоверным источникам о высоте волнения или о спектрах волнения [9-11,13]. Пространственный спектр профильтрованного сигнала (рис. 1д) получается в результате обработки радиолокационного видео-сигнала после этапа обозначенного в п.5 метода обработки сигнала. Он дает представление о спектральном составе, длинах и направлении распространения морских волн, но не их амплитудах.

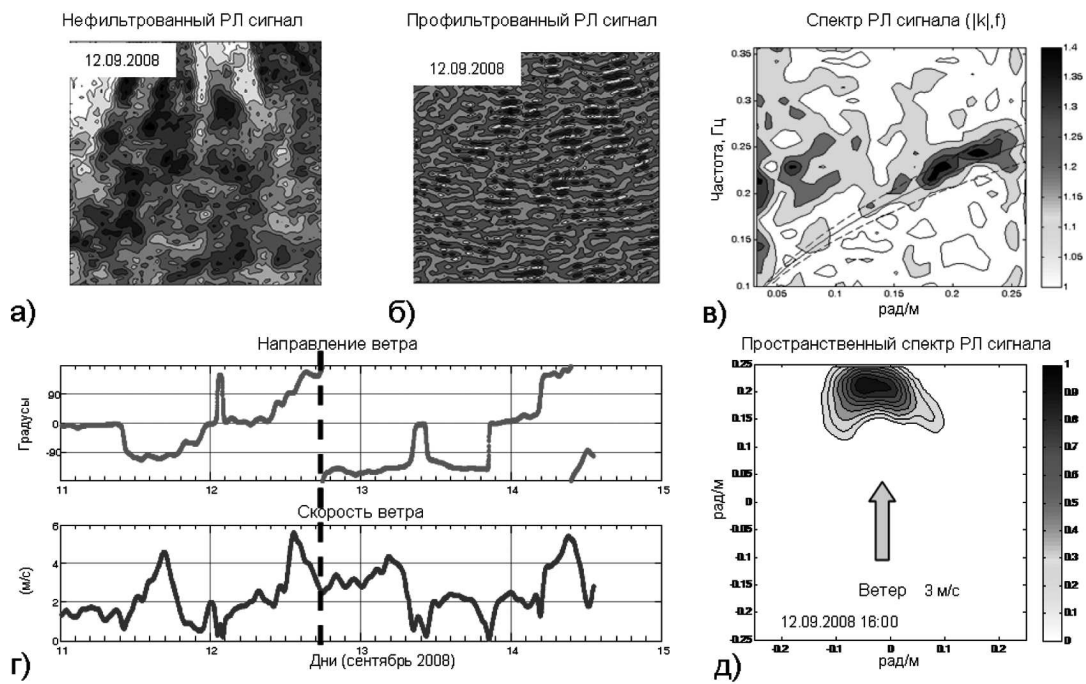


Рис. 1. Радиолокационный видео-сигнал, ветер с моря (юго-восточный/южный, 3-6 м/с), 12 сентября 2008 года, дальность 1 км. а) исходный сигнал (размеры участка 768 x 768 м²);

б) профильтрованный сигнал в относительных цветах: черный – есть рассеиватели, белый – нет рассеивателей; в) направление и скорость ветра (пунктирная линия обозначает момент измерений);

г) пространственный спектр профильтрованного радиолокационного сигнала (нормирован на максимальное значение), стрелкой показано направление ветра на текущий момент

Более полное представление о длинах волн, которые формируют изображение, показанное на рис. 1б, дает рис. 1в. Данный спектр в координатах волновое число/частота ($|k|, f$) получен на этапе п.5 после фильтрации колебаний связанных со спекл-шумом. Из рисунка видно, что присутствует сигнал в диапазоне поверхностных волн от 0.15 рад/м до 0.25 рад/м, т.е. для волн от 40 м до 12 м. Верхний предел 0.25 рад/м (волны 12 м) связан с физическим разрешением РЛС, которая использует для зондирования импульс продолжительностью 80 нс, что в пересчете на разрешение радиолокатора (половина длины излученного импульса) дает 12 м.

Для условий юго-восточного ветра 12/09/08 наблюдался достаточно широкий по углу пространственный спектр сигнала (рис. 1д). В этих условиях было возможно сделать оценку вектора скорости течения (рис. 2). Область наблюдения направленного спектра РЛ сигнала была разбита на четыре сектора: 1) от -45° до -22.5° , 2) от -22.5° до 0° , 3) от 0° до 22.5° ,

4) от 22.5° до 45° (рис. 2а, направление указано от севера). Для каждого из этих секторов были построены пространственно-частотные спектры в координатах волновое число/частота ($|k|, f$) (рис. 2б-2д). Для каждого направления была найдена радиальная компонента скорости течения такая, что кривая дисперсионного соотношения, определенного выражением (2), проходила через «центр масс» пика сигнала волнения (верхняя кривая на рис. 2б-2д, нижняя кривая соответствует нулевой компоненте скорости). Для всех четырех направлений радиальная компонента скорости отличалась между собой (см. рис. 2е).

Радиальная компонента скорости определяется как

$$U_r(\alpha; \alpha_0) = U_0 \cos(\alpha - \alpha_0), \quad (4)$$

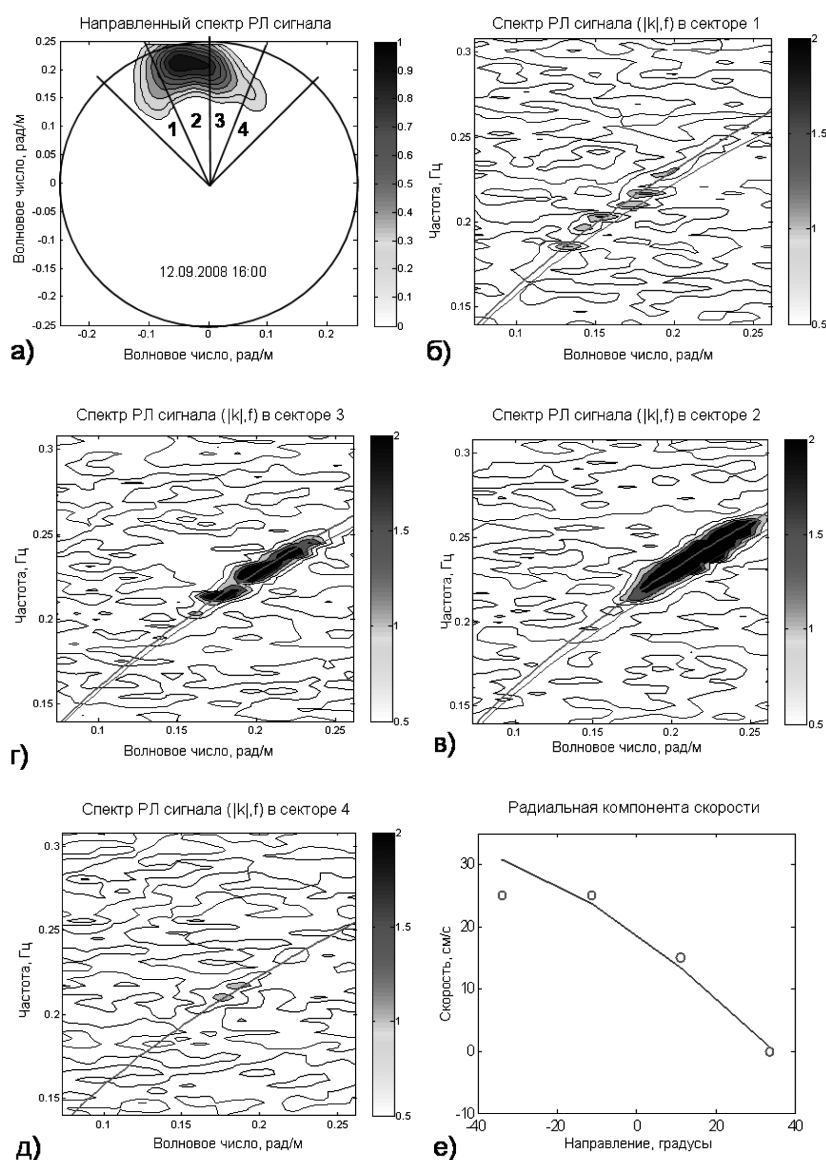


Рис. 2. Спектры 12 сентября 2008 года: (а) Четыре сектора в области наблюдения направленного спектра РЛ сигнала; (б) пространственно-частотный спектр для первого сектора, кривые обозначают дисперсионное соотношение (2): нижняя кривая для $U_r=0$, верхняя $U_r=25$ см/с; (в) спектр для второго сектора, верхняя кривая $U_r=25$ см/с; (г) спектр для третьего сектора, верхняя кривая $U_r=15$ см/с; (д) спектр для четвертого сектора, $U_r=0$ см/с; (е) радиальная компонента скорости течения по четырем направлениям (кружочки), кривая обозначает синусоидальный закон (4) поведения радиальной компоненты от угла наблюдений (здесь направление течения $\alpha_0 = -55^\circ$, $U_0 = 33$ см/с)

где U_r – радиальная компонента скорости течения, U_0 – модуль скорости течения, α – направление измерений (направление волнового вектора) и α_0 – направление течения, соответственно, $\alpha - \alpha_0$ – угол между волновым вектором и течением. Четыре точки для четырех направлений для радиальной компоненты скорости течения позволяют определить направление и амплитуду скорости течения. На рис. 2е показаны результаты соответствия экспериментальных точек синусоидальному закону (4). Данный результат получен для направления течения $\alpha_0 = -55^\circ$ и амплитуды скорости $U_0 = 33$ см/с.

Определение величин радиальной скорости производилось визуальным способом с точки зрения наилучшего визуального совпадения кривой «центру масс» пика сигнала волнения. Нахождение параметров синусоидального закона (4) также производилось визуальным способом с точки зрения наилучшего прохождения кривой между точками измерений. Поскольку очевидно, что ошибки определения радиальной компоненты исходя из рис. 2б и 2д больше, чем при использовании рис. 2в и 2г, то весовой коэффициент этих крайних точек принимался меньшим, чем для центральных точек. Точное вычисление погрешности измерений параметров течения (скорости и направления) требует достаточно адекватного учета влияния спекл-шума на качество измерений. Это требует отдельного исследования и лежит за рамками целей данной статьи. Без проведения такого подробного исследования авторы считают, что погрешность будет определена достаточно условно, что, в итоге, будет выражаться опять же в терминах «лучше-хуже».

Следует отметить факт полного согласия направления вектора течения с пространственной картиной течений наблюдавшихся 12/09/08. В этот день, согласно реконструкции поля течений по характеру поведения радиальной составляющей скорости течений на участке 3 x 3 кв.км наблюдалось прохождение циклонического суб-мезомасштабного вихря [15], которые регулярно возникают возле побережья Черного моря [17]. Аналогичные возможности восстановления вектора течения были реализованы для других дат при условии возникновения волнения при южном ветре. Практически всегда удавалось для таких условий восстанавливать вектор течения. Исключения составляли ситуации, когда сами радиальные составляющие течения оказывались достаточно малыми, меньше 5 см/с, что по нашим наблюдениям является пределом точности измерения течения таким способом, тогда определение вектора течения оказывалось затрудненным.

Были также сделаны попытки построить векторные поля скоростей. Однако, это оказалось возможным сделать только до дальностей меньше 1 км из-за недостаточного разрешения волновых чисел k_y поперек луча для больших дальностей. Для углового разрешения антенны $\Delta\phi$ получаем на расстоянии R разрешение $k_y = \pm\pi/(\Delta\phi R)$. Для апертуры антенны $\Delta\phi = 1.9^\circ$ и дальности 1 км фактическое разрешение $k_y = 0.09$ rad/m (т.е. в 3 раза меньше, чем максимальные значения на рис. 1д). Фактическая максимальная дистанция R_{max} , для которой можно полноценно наблюдать направленный спектр волнения и восстанавливать векторное поле скоростей

$$R_{max} = 2\pi/(\Delta\phi k_{min}), \quad (3)$$

где k_{min} – это минимальное волновое число, необходимое для наблюдений направленного спектра; множитель «два» появился в результате учета плюса и минуса для k_y . Если положить минимальную допустимую ширину направленного спектра $k_{min} \sim 0.18$ rad/m (см. рис. 2а), то для апертуры антенны $\Delta\phi = 1.9^\circ$ максимальная допустимая дистанция составит $R_{max} = 1060$ м, для $\Delta\phi = 0.9^\circ$ $R_{max} = 2200$ м. Т.е. представленные выше результаты были получены на грани технических возможностей локатора с апертурой 1.9° .

Заключение

В качестве заключения можно сформулировать следующие выводы и рекомендации. Метод, разработанный для навигационных некогерентных СВЧ радаров с угловым разрешением лучше 0.9° , вполне успешно можно применять для радаров с худшим угловым разрешением, но, естественно, с определенными ограничениями. Радар с угловым разрешением 1.9° уверенно наблюдает отклик от волнения с длинами волн от 25 до 50 м. Ограничения на скорость ветра остаются те же (> 3 м/сек). Однако измерения не могут быть проведены, если ветер дует с берега.

Для радара с угловой диаграммой направленностью 2° возможно измерение вектора течения для дальности до 1 км включительно и при условии достаточно широкого по углу спектра волнения. Для больших дальностей необходимо применять либо антенны с более узкой диаграммой направленности, либо применять специальные спектральные методы высокого разрешения. Для восстановления вектора скорости течения и направленного спектра волнения до расстояний 5 км необходима апертура антенны 0.4° . Радары с апертурой 0.9° могут успешно применяться для этих целей до дистанций 2 км.

Работа выполнена при поддержке НИИ Дальней Радиосвязи, программы ФЦП «Мировой океан» и Мин. обр. «Исследования ветрового волнения в океане», Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Фундаментальные проблемы океанологии: физика, геология, биология, экология» (раздел Теория мониторинга и прогноза ветрового волнения)

Литература

1. Розенберг А.Д. Измерение морского волнения радиолокационным амплитудным методом // АН СССР, Океанология. 1981. Т. 21. Вып. 2. С. 197–292.
2. Гонтарь И.Д., Кивва Ф.В., Рязанцев В.Ю., Синуцкий В.Б., Тургенев И.С., Хоменко С.И. Экспериментальные исследования радиолокационных сигналов, рассеянных морской поверхностью в диапазоне СВЧ // Сборник научных трудов: Радиофизические исследования мирового океана. Харьков. 1992. С. 51-79
3. Булатов М.Г., Кравцов Ю.А., Кузьмин А.В. и др. Микроволновые исследования морской поверхности в прибрежной зоне (Геленджик, 1999–2002 гг.). М.: Книжный дом «Университет». 2003. 136 с.
4. Булатов М.Г., Кравцов Ю.К., Лаврова О.Ю. и др. Физические механизмы формирования аэрокосмических радиолокационных изображений океана // УФН. 2003. Т. 173. № 1. С. 67–89.
5. Булатов М.Г., Раев М.Д., Скворцов Е.И. Радиолокационные наблюдения нелинейных волновых процессов в прибрежной зоне // Сборник тезисов Третьей всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, ИКИ РАН, 14-17 ноября 2005 г.
6. Bulatov M.G., Raev M.D., Skvorsov E.I. Dynamics of Sea Waves in Coastal Region According to Date of High-Resolution Radar Observation // Physics of Wave Phenomena, Allerton Press, Inc. 2004. V. 12(1). P. 18–24.
7. Шарков Е.А. Обрушающиеся морские волны: структура, геометрия, электродинамика. М.: Научный мир, 2009. 304 с.
8. Alpers W., Hasselmann K. Spectral Signal to Clutter and Thermal Noise Properties of Ocean Wave Imaging Synthetic Aperture Radars // Int. J. Rem. Sens., 1982. V. 3. P. 423-446.
9. Nieto J. C. Borge Hessner K., Reichert K., Estimation of the Significant Wave Height With X-Band Nautical Radars // OMAE 99 Proceedings, 1999.

10. Reichert K., Hessner K., Nieto Borge J.C. et al. WaMos II: A Radar Based Wave and Current Monitoring System // ISOPE 99 Proceedings, Brest, May 1999, V. 3.
11. Nieto Borge J.C., Rodriguez G.R., Hessner K., Gonzalez P.I. Inversion of Marine Radar Images for Surface Wave Analysis // J. Atmos. Oceanic Technol., 2004. V. 21. P. 1291-1300. doi:10.1175/1520-0426(2004)021<1291:IOMRIF>2.0.CO;2.
12. <http://www.seadarq.com>
13. Izquierdo P., Nieto Borge J.C., Guedes Soares C. et al. Comparison of Wave Spectra from Nautical Radar Images and Scalar Buoy Data // Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering. 2005. V. 131. N. 3. doi: 10.1061/(ASCE)0733-950X(2005)131:3(123)
14. Groeneweg J. et al. Application of navigation radar data to analyse spatial current and wave fields in the tidal inlet of Ameland // Waves In Shallow Environments (WISE) 2011 Meeting, Qingdao, China, May 2011.
15. Ivonin D.V., Bakhanov V.V., Ermoshkin A.V. et al. Application of nautical X-band radar for measurements of surface currents. Testing. The Black Sea // Materials of 2nd International Conference on the Dynamics of Coastal Zone of Non-Tidal Seas (school-seminar), Baltiysk (Kaliningrad Oblast, Russia), 26-30 June 2010.
16. Wyatt L.R., Green J.J., Gurgel K.-W. et al. Validation and intercomparisons of wave measurements and models during the EuroROSE experiments // Coastal Engineering. 2003. V. 48, P. 1-28.
17. Зацепин А.Г., Баранов В.И., Кондрашов А.А. и др. Суб-мезомасштабные вихри на кавказском шельфе Черного моря и порождающие их механизмы // Океанология. 2009. Т. 51. № 4. С. 581-766.

Possibility to measure velocity vector of surface currents by means of nautical radar with wide beamwidth antenna

D.V. Ivonin¹, V.A. Telegin², A.I. Azarov³, A.V. Ermoshkin⁴, V.V. Bakhanov⁴

¹ P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS,
36, Nakhimovsky av., Moscow, 117997, Russia
e-mail: ivonin@ocean.ru, toulon@bk.ru

² Research Institute for Long-Range Radiocommunication,
12/11, Bukhvostov str., Moscow, 107076, Russia,
e-mail: telvik@rambler.ru

³ Southern Branch, P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS,
1-g, Prostornaja str., Gelendzhik, Krasnodar region, 353470, Russia,
e-mail: itkillerr@rambler.ru

⁴ Institute of Applied Physics RAS,
46, Ulyanov str., Nizhnij Novgorod, 603950, Russia,
e-mail: al-ermoshkin@yandex.ru

An opportunity to use the nautical X-band radar with the wide antenna beamwidth (1.9°) for reconstruction of vector velocity of sea surface currents is testing. Method developed for Wamos systems to obtain the sea wave spectrum from sequences of nautical radar images is applied. The method is based on a technique of separating the wave signal from the speckle-noise using the dispersion relation for surface gravity waves. Results of the experiments at the Black Sea are reported. A successful example of a set of reconstructions of vector velocity is presented.

Keywords: X-band, nautical radar, remote sensing, currents, coastal zone.