

Комбинированный метод определения вектора скорости поверхностного течения с помощью двух поляризационного радиолокатора X-диапазона

М.Д. Раев, Е.И. Скворцов

Институт космических исследований РАН,
117997, Москва, Профсоюзная 84/32
E-mail: mraev@iki.rssi.ru

Разработан комбинированный метод измерения вектора скорости поверхностных течений с помощью модернизированного двухполяризационного радиолокатора 3-см диапазона. Предложены нестандартный режим работы радиолокатора, методика получения и обработки радиолокационных изображений (РЛИ), позволяющие повысить точность измерения параметров поверхностных течений.

Ключевые слова: локатор 3-см диапазона, радиолокационные изображения, ветровые волны, поверхностное течение, дисперсионное соотношение, две поляризации.

Введение

История использования микроволновых навигационных радиолокаторов для получения информации о параметрах морского волнения и полях поверхностных течений насчитывает более 30 лет. Однако интерес к таким системам дистанционного зондирования не утихает. Это объясняется, с одной стороны, широким распространением навигационных локаторов и их относительно небольшой стоимостью, а с другой – возможностью оперативного просмотра больших площадей морской поверхности (дальность до 5 км), при достаточно высоком пространственном разрешении (8...10 м по дальности и 0,8...1° по азимуту). Поляризация сигналов у таких локаторов традиционно горизонтальная, скорость вращения антенны 25...32 оборота в минуту.

Для определения скорости и направления поверхностных течений с помощью навигационных локаторов обычно используется стандартный алгоритм, основанный на трехмерной спектральной обработке радиолокационных данных, полученных в режиме кругового сканирования, с последующего вычисления скорости течения U по дисперсионному соотношению для гравитационных волн для глубокой воды [Young et al., 1985]:

$$\omega = \sqrt{gk} \operatorname{th}(kh) + kU \cos \alpha , \quad (1)$$

где ω – частота; g – ускорение свободного падения, $g = 9,8$ м/с; U – скорость течения; k – волновое число; α – угол между волновым вектором и течением; h – глубина.

Один из недостатков навигационного локатора как средства дистанционного зондирования морской поверхности — невозможность проведения измерений параметров морского волнения при слабых ветрах и высоте волн менее 1 м. Причина в преобладании небрэговского механизма рассеяния электромагнитных волн от морской поверхности при настильных углах на горизонтальной поляризации, формирующего РЛИ в виде отдельных ярких точек, затрудняющего отображение волновые структуры на морской поверхности. При увеличении скорости ветра более 8...10 м/с различия в текстуре РЛИ на вертикальной и горизонтальной поляризациях сглаживаются, хотя механизмы формирования отражённых сигналов остаются разными. На вертикальной поляризации по-прежнему преобладает резонансное рассеяние. В тоже время на горизонтальной поляризации основной вклад в отражённый сигнал вносит нерезонансное рассеяние на заостряющихся перед обрушением вершинах гра-

витационных волн. В РЛИ на горизонтальной поляризации появляются наклонные треки, подобные трекам в РЛИ на вертикальной поляризации, но более короткие и имеющие прерывистый характер. Соответственно и пространственно-частотные спектры, полученные в результате преобразования Фурье, также имеют сходный вид. На рис. 1 a и b приведены примеры исходных радиолокационных изображений, полученных в режиме кругового обзора и соответствующие этим изображениям пространственные спектры – для горизонтальной (рис. 2 a) и вертикальной (рис. 2 b) поляризациях при скорости ветра 10…14 м/с. При сравнении этих рисунков можно сделать вывод, что в случае средних и больших значений скорости ветра, независимо от используемой поляризации, определение характеристик поверхностного волнения по двумерным пространственным спектрам без применения дополнительных обработок представляет собой достаточно сложную задачу. Кроме того, при таком режиме работы радиолокатора основным препятствием в повышении точности измерения параметров поверхностных течений является малое время накопления радиолокационных сигналов, обусловленное скоростью вращения антенны.

Метод

Для преодоления этих недостатков при использовании штатного навигационного локатора с целью измерения параметров течений предлагается следующая двухэтапная методика. На первом этапе – в начале измерения – в режиме кругового обзора проводится предварительная оценка направления ветрового волнения. На втором этапе измерения выполняются в режиме неподвижной антенны в фиксированных направлениях (как минимум двух) вблизи определенного ранее направления ветрового волнения при значительном времени накопления по каждому азимутальному направлению. В результате для двух азимутальных направлений получаются изображения-диаграммы, построенные в координатах время – дальность (RTI – range time intensity) обычно длительностью 300…600 с (рис. 3 a и b). Двумерные спектры полученных таким образом изображений представлены на рис. 4 a и b . На рисунках можно выделить две области: центральная (1), лежащая вблизи нуля, соответствует спектру групповых скоростей поверхностных волн; вторая область (2) соответствует спектру фазовых скоростей волн и располагается вдоль кривой, соответствующей дисперсионному соотношению. По отклонению полученного спектра (в этой области) от кривой, соответствующей дисперсионному соотношению, построенному в соответствии с уравнением (1) определяется проекция скорости поверхностного течения на выбранные фиксированные направления зондирования и последующее вычисление скорости и направления течения.

В данном эксперименте измерения проводились с помощью модернизированного радиолокатора ИКИ-2м [Kravtsov et al., 2009], имеющего следующие основные технические характеристики:

- 1) рабочая частота – 9800 МГц;
- 2) импульсная мощность излучения – 7,5 КВт;
- 3) длительность импульса – 50 нс;
- 4) разрешение по азимуту – 1°;
- 5) поляризация – вертикальная и горизонтальная, переключаемая;
- 6) скорость вращения антенны – 30 об/мин;
- 7) высота размещения антенны – 7,5 м, что соответствует максимальной дальности наблюдения ~1,5…2 км (из-за малого угла визирования);
- 8) 16-разрядный АЦП с частотой 100 МГц;
- 9) программное обеспечение для работы локатора, позволяющее выполнять непрерывную запись сигнала радиолокатора в режиме реального времени, обработку полученных данных как в режиме кругового вращения антенны, так и в режиме дискретного накопления.

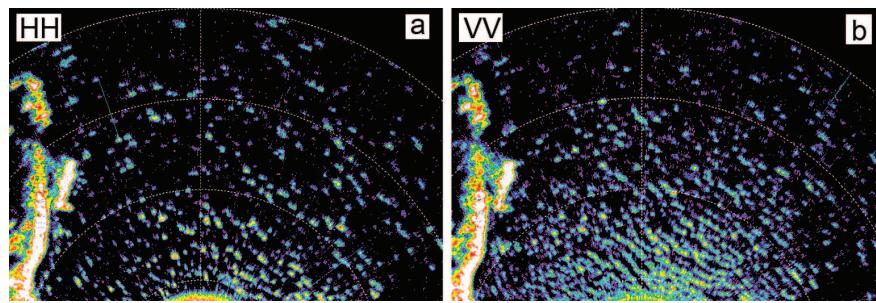


Рис. 1. Радиолокационное изображение (РЛИ), полученное в режиме кругового обзора. Скорость ветра 10 м/с, направление 170 градусов, (а) - горизонтальная поляризация, (б) – вертикальная поляризация

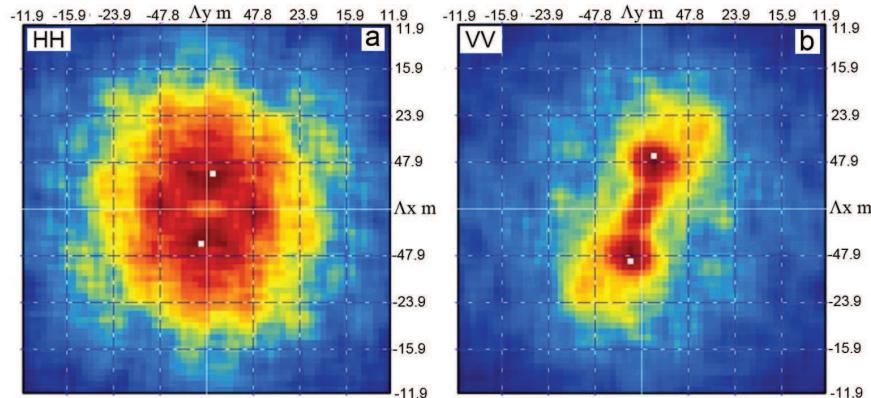


Рис. 2. Двумерный спектр РЛИ на горизонтальной (а) и вертикальной поляризациях (б)

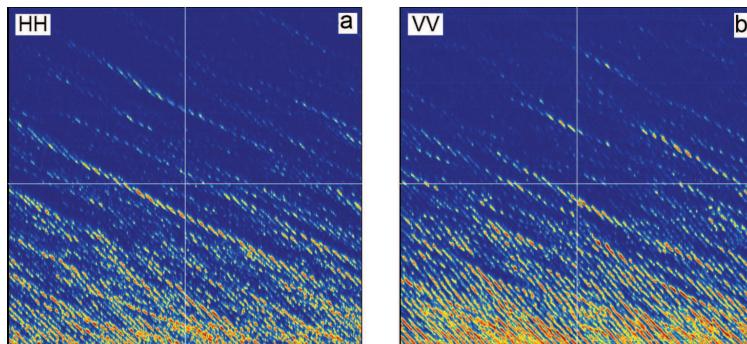


Рис. 3. РЛС изображения в координатах дальность – время (RTI диаграммы), полученные на вертикальной поляризации для двух азимутальных направлений: (а) угол визирования 185 градусов и (б) – 215 градусов

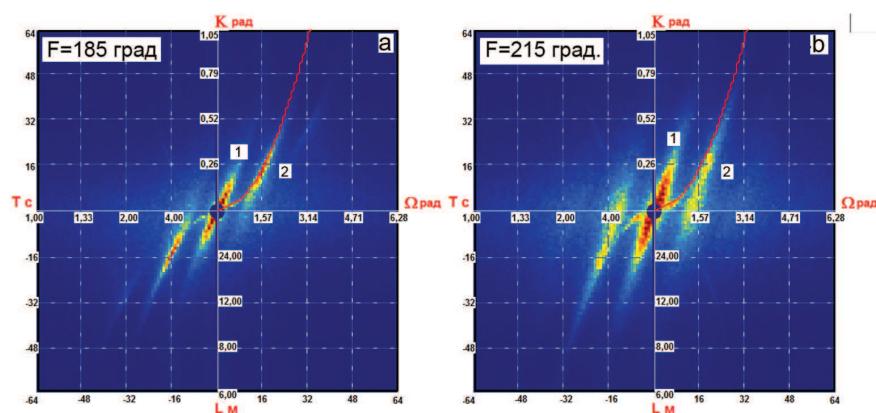


Рис. 4. Двумерный спектр диаграмм RTI, полученные на вертикальной поляризации для двух азимутальных направлений: (а) - 185 градусов и (б) - 215 градусов. (1) – спектр, соответствующий групповой скорости волн, (2) – спектр, соответствующий фазовой скорости волн. Красная кривая на рисунках соответствует дисперсионному соотношению при нулевой проекции скорости

Условия проведения и результаты экспериментов

Радиолокационные измерения скорости и направления приповерхностных течений проводились в Голубой бухте (Геленджик) в ходе осенних экспедиций 2010–2011 гг. Из-за географических особенностей бухты при круговом обзоре для наблюдений был пригоден сектор приблизительно в 100° – юго-запад – юго-восток ($140\ldots240^\circ$). Соответственно и измерения проводились при ветрах, дующих в этом секторе. Направление распространения морских волн, в основном, совпадало с направлением ветра. Скорость ветра при проведении экспериментов находилась в пределах 3…16 м/сек, причём выбирались ситуации, когда ветер был относительно устойчив в течение 3…4 ч, предшествующих проведению экспериментов. Для выполнения измерений параметров волнения при умеренных и сильных ветрах выбирались участки морской поверхности, отстоящие от локатора на 800…1500 м. При ветре 3…4 м/с это расстояние составляло 500…700 м.

В качестве иллюстрации предложенного метода приведены результаты измерений скорости и направления течения, полученные 18 сентября 2001 г. Скорость ветра в момент проведения измерений составляла 10…12 м/с, направление – $160\ldots180^\circ$. На основании пространственного спектра радиолокационного изображения, полученного в режиме кругового обзора, представленного на рис. 2, выбираются два азимутальных направления – 185 и 215° , в пределах которых находится вектор дрейфового течения. Далее, уже в режиме неподвижной антенны с накоплением сигнала в течение 6…10 мин, строятся RTI-диаграммы и двумерные БПФ-спектры, по которым путем вычисления отклонения реального спектра от кривой, соответствующей дисперсионному соотношению (построением профиля сигнала и определения максимального значения), вычисляются проекции вектора скорости на азимутальные направления 185 и 215° . Для значений k , лежащих в пределах $0,2\ldots0,5$ рад (длина поверхностных волн $14\ldots25$ м), и ω в пределах $1,5\ldots3$ рад (период волн $3\ldots5$ с), соответствующих максимальным значениям спектральных составляющих (вблизи дисперсионной кривой), вычислялись проекции скорости поверхности течения на направление визирования; по этим двум величинам восстанавливались направление и скорость. Типичные картинки полученных спектров представлены на рис. 4а и б.

При анализе результатов обработки экспериментов 2010–2011 гг. и численных модельных экспериментов, в том числе детального изучения данных 18 октября 2011 г., сделаны следующие выводы:

Обработка большого количества экспериментов при разных скоростях ветра и вычисление отдельных компонент поверхности течения при использовании RTI-диаграмм показало, что среднеквадратическая ошибка вычисления составляет величину порядка $1\ldots2$ см/с. Эта величина была подтверждена в результате обработки модельных RTI-диаграмм, построенных с учетом дисперсионного соотношения $k - \omega$ и заданных компонент скорости поверхности течения.

Установлено, что компоненты скорости поверхности течения, полученные при фиксированных направлениях визирования, и, следовательно, направление и скорость вычисленного течения существенно зависят от длины поверхности волны k , что можно объяснить влиянием глубины (в районе измерения глубина варьировалась от 6 до 20 м).

В результате обработки данных 18 октября 2011 г. установлено, что направление и скорость течения меняются с изменением расстояния до берега. На максимальном расстоянии, на котором нам удалось произвести измерения (порядка $1,1\ldots1,2$ км), направление течения составляло $15\ldots25^\circ$ при скорости $\sim0,25\ldots0,30$ м/с. С приближением к берегу до $400\ldots600$ м направление течения поворачивалось в сторону левого берега и менялось до $90\ldots100^\circ$ при увеличении скорости до $0,7\ldots0,8$ м/с. Такое поведение течения дает основание предполагать наличие в районе Голубой бухты в этот день небольшого вихря циклонического характера.

Из-за отсутствия синхронных контактных измерений правильность полученных 18 октября 2011 г. результатов оценивалась косвенным способом. Можно предположить, что в районе достаточно близком к берегу (1,0…1,5 км) основное влияние на поверхностное течение оказывает дрейфовое течение, обусловленное ветром. Известно [Wu, 1975], что скорость поверхностных течений при подобных условиях проведения эксперимента составляет примерно 2,5…3 % от скорости приповерхностного ветра. Также необходимо учитывать, что направление дрейфового течения, согласно сдвигу Экмана [Ekman, 1905], отклоняется от направления ветра вправо примерно на 45°. Для наших метеоусловий (скорость ветра 10…12 м/с, направление 160…180°) можно оценить (теоретически) скорость поверхностного течения — она лежит в пределах 0,28…0,33 м/с и направление — 35°. Несмотря на определённую условность таких оценок, сопоставление экспериментальных и расчетных данных дает хороший результат для случая значительного удаления от берега. При приближении к берегу начинает сказываться географические особенность экспериментального района — наличие бухты.

Выводы

Использование штатных навигационных локаторов 3-см диапазона для измерения характеристик морской поверхности имеет ряд ограничений, обусловленных особенностями формирования РЛИ на горизонтальной поляризации излучаемых и принимаемых сигналов, а также сканированием антенны. Предложенный комбинированный метод с проведением основных измерений при неподвижной антенне, позволяет ввести накопление сигнала, повысить чувствительность (работа с меньшими уровнями сигнала) и точность измерений. Кроме того, использование вертикальной поляризации (вместо штатной горизонтальной) позволяет проводить измерения при малых и средних ветрах.

Предлагаемая в докладе модернизация локатора при современном состоянии антенной и вычислительной техники не требует больших трудовых и материальных затрат, но позволяет качественно улучшить мониторинг морской поверхности, как в открытых акваториях, так и в прибрежной зоне.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований ОФН РАН № IV.13.

Литература

1. [Young et al., 1985] *Young I.R., Rosenthal W., Ziemer F.* A three dimensional analysis of marine radar images for the determination of ocean waves directionality and surface currents // *J. Geophysical Research.* 1985. V. 90. P 1049–1059.
2. [Kravtsov et al., 2009] *Kravtsov Yu.A., Raev M.D., Skvortsov E.I.* Manifestations of the resonant (Bragg) and non-resonant mechanisms of scattering on radar images of the sea surface // *Intern. Radar Symposium'09.* 2009. Hamburg, Sept. 9–11.
3. [Wu, 1975] *Wu J.* Wind-Induced Drift Current // *J. Fluid Mechanics.* 1975. V. 68. P. 49–52.
4. [Ekman, 1905] *Ekman V.W.* On the influence of the earth's rotation on ocean currents // *Ark. Mat. Astron. Fys.* 1905. V. 2. N. 11. P. 1–52.

The combined method of measurement of a vector of speed of surface currents by means two polarizing radar X – of a range

M.D. Raev, E.I. Skvortsov

*Space Research Institute
117997, Moscow, Profsojuznaya, 84/32
E-mail: mraev@iki.rssi.ru*

The combined method of measurement of a vector of speed of surface currents by means of 3-cm of a range modernized two polarizing radar is developed. The non-standard operating mode of the radar, a technique of receiving and processing of the radar images (RLI), allowing raising accuracy of measurement of parameters surface currents are offered.

Keywords: X-band radar, radar images, wind waves, surface current, dispersive ratio, dual polarizations.