

УДК 621.371

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕКТОРА СКОРОСТИ ВЕТРА НАД ПОВЕРХНОСТЬЮ ОКЕАНА ПО СПЕКТРУ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКОГО РАДИОЛОКАТОРА С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ

М. А. Панфилова¹, М. Б. Каневский¹, Г. Н. Баландина¹, В. Ю. Караев^{1*},
А. Стоффелен², А. Верхоев²

¹ Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

² Королевский метеорологический институт, г. Де Билт, Нидерланды

Предложен новый метод определения вектора скорости ветра над поверхностью океана по данным поляриметрического радиолокатора с синтезированной апертурой антенны. Предварительные расчёты показали, что для ветрового волнения положение максимума в спектре изображения радиолокатора однозначно связано со скоростью ветра, а направление ветра восстанавливается с неопределённостью 180° , что связано с центральной симметрией спектра изображения. Для устранения неоднозначности в определении направления ветра применялся критерий, основанный на использовании информации о знаке коэффициента корреляции между комплексными сигналами на соосной и перекрёстной поляризациях. Показано, что с помощью поляриметрического радиолокатора принципиально возможно получить информацию как о скорости, так и о направлении ветра, причём точная калибровка радиолокатора для этого не требуется.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема дистанционного измерения скорости приповерхностного ветра (ключевого параметра, определяющего взаимодействие океана и атмосферы) является предметом постоянного внимания в спутниковой океанографии. Основным активным инструментом, предназначенным для определения скорости ветра над океаном из космоса, является микроволновый радиолокатор-скаттерометр, измеряющий интенсивность рассеянного электромагнитного сигнала [1, 2].

Скаттерометры обладают широкой (более 1000 км) полосой обзора. Стандартный размер ячейки, в которой восстанавливается скорость приповерхностного ветра, равен 25×25 км. Процедура восстановления скорости ветра состоит в том, что измеренное сечение обратного рассеяния сопоставляется с так называемой геофизической модельной функцией [3, 4]. Последняя описывает зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения, скорости ветра и угла между направлением зондирования (т. е. угла, под которым видна данная ячейка) и направлением ветра.

Поскольку геофизическая модельная функция имеет немонотонную квазипериодическую зависимость от азимутального угла, то возникает неопределённость в интерпретации результата измерения сечения обратного рассеяния. При этом чем больше количество азимутальных углов, под которыми наблюдается данная ячейка, тем эффективнее можно снять данную неопределённость. Геофизическая модельная функция зависит от трёх переменных, поэтому для корректного восстановления скорости и направления ветра необходимо не менее трёх измерений под разными азимутальными углами.

С высоким пространственным разрешением информацию о поле ветра можно получить при помощи радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны, обладающих номинальным пространственным разрешением порядка 10 м. Однако напрямую использовать подобный радиолокатор как скаттерометр с высоким разрешением нельзя. В радиолокаторе с синтезированной

* volody@hydro.appl.sci-nnov.ru

апертурой антенны, в отличие от скаттерометра, каждая ячейка разрешения наблюдается под единственным азимутальным углом. Для определения по геофизической модельной функции скорости и направления приповерхностного ветра одного измерения сечения обратного рассеяния недостаточно. Поэтому приходится привлекать дополнительную информацию, например об ориентации ветровых полос или гребней волн на поверхности [5], или данные буёв и скаттерометров. Алгоритмы определения скорости приповерхностного ветра по данным обычного неполяриметрического радиолокатора, работающего только на соосной поляризации, описаны, например, в работах [4, 6]. В данных алгоритмах применяются геофизические модельные функции.

Новым шагом в развитии определения скорости и направления ветра стало применение поляриметрического радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА), который работает как на соосной, так и на перекрёстной поляризациях. Алгоритм определения скорости ветра для такого радиолокатора представлен в работе [7]. Было показано, что РСА-данных на соосной (ВВ) и перекрёстной (ВГ) поляризациях достаточно для однозначного определения скорости и направления ветра даже при измерении под одним азимутальным углом. Идея предложенного в работе [7] метода заключается в том, что скорость ветра определяется по сечению обратного рассеяния на перекрёстной поляризации согласно линейному алгоритму С-2РО [7], а направление ветра находится по алгоритму СМОД5 [4]. Поскольку зависимость сечения обратного рассеяния от угла немонотонна, одной скорости ветра удовлетворяют несколько его направлений. Эта проблема решается при помощи вычисления комплексного коэффициента корреляции между измерениями на соосной и перекрёстной поляризациях, знак которого однозначно определяет квадрант направления ветра.

В данной работе предлагается новый метод определения скорости ветра. Суть его состоит в том, что анализируется не сечение обратного рассеяния, а спектр однородного участка радиолокационного изображения. При этом точная калибровка радиолокатора с синтезированной апертурой антенны при сканировании движущейся морской поверхности не требуется.

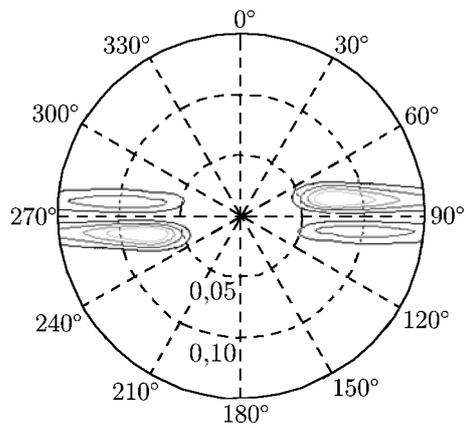
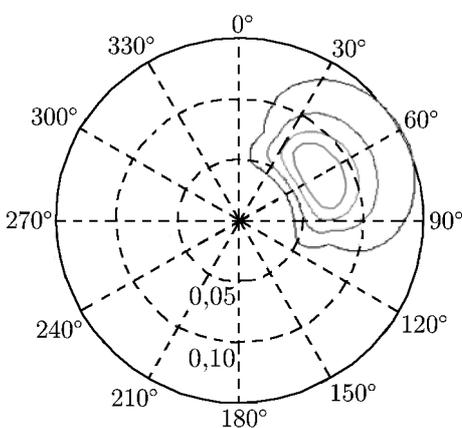
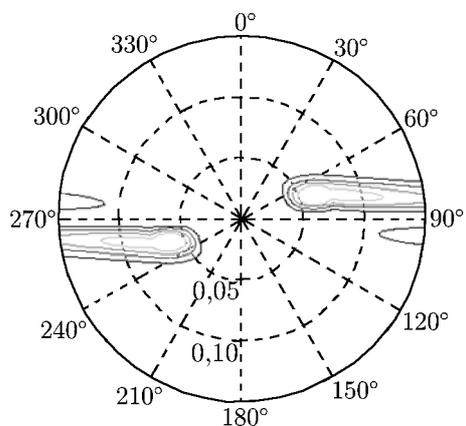
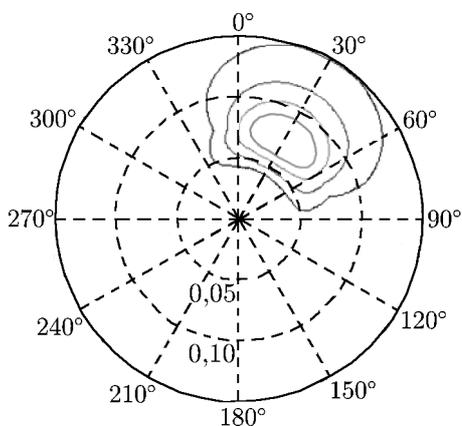
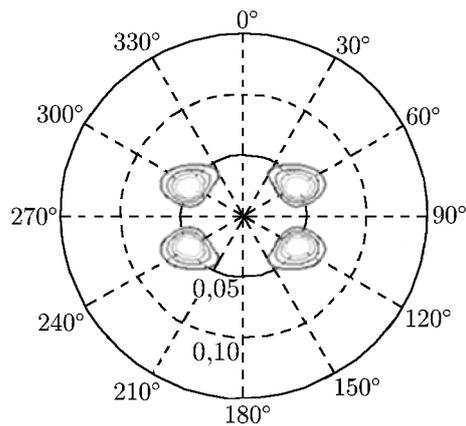
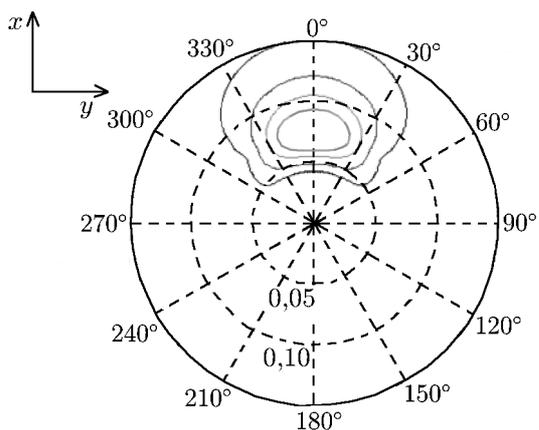
1. РАСЧЁТ СПЕКТРА РСА-ИЗОБРАЖЕНИЯ ОКЕАНА

Проиллюстрируем суть метода при помощи численного моделирования. Проиллюстрируем суть метода при помощи численного моделирования. Введём оси x и y по морской поверхности. РСА установлен на космическом спутнике, который движется в направлении x , локатор сканирует вдоль направления y . Спектр РСА-изображения будем рассчитывать в рамках квазилинейного приближения [8]:

$$W^{\text{q-lin}}\text{SAR}(\kappa_x, \kappa_y) \propto \left[|T_{\text{RAR}}|^2 \kappa_y^2 + g \left(\frac{R}{V} \right)^2 \left(\cos^2 \vartheta_0 + \frac{\kappa_y^2}{\kappa_x^2 + \kappa_y^2} \sin^2 \vartheta_0 \right) (\kappa_x^2 + \kappa_y^2)^{1/2} \kappa_x^2 \right] \times \\ \times W(\kappa_x, \kappa_y) \exp \left[-\kappa_x^2 \left(\frac{R}{V} \right)^2 \sigma_{\text{rad}}^2 \right]. \quad (1)$$

Здесь ϑ_0 — угол падения зондирующего излучения, κ_x — волновое число в направлении оси x (см. рис. 1), κ_y — волновое число в направлении оси y , $\kappa_y^2/(\kappa_x^2 + \kappa_y^2) = \sin^2 \beta$, где β — угол между волновым вектором и осью x , T_{RAR} — модуляционная передаточная функция для радиолокатора с реальной апертурой, $g = 9,8$ м/с² — ускорение свободного падения, R/V — отношение наклонной дальности к скорости радиолокатора, $W(\kappa_x, \kappa_y)$ — спектр возвышений морских волн, σ_{rad}^2 — дисперсия радиальной составляющей орбитальной скорости.

Зависимость последней величины от скорости ветра можно получить при помощи аппроксимации зависимости дисперсий от скорости ветра U_{10} (дисперсии вычисляются интегрированием



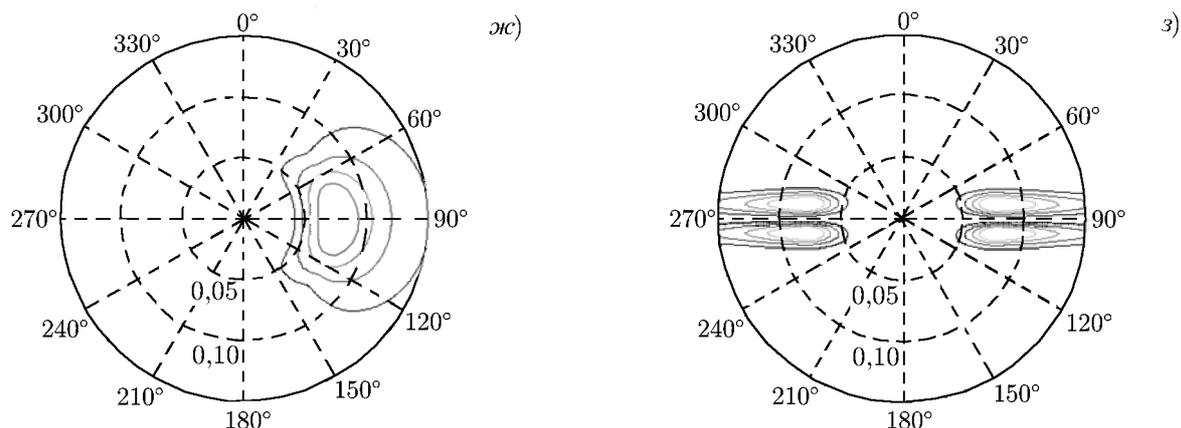


Рис. 1. Спектры морского волнения (*a, б, д, ж*) и соответствующие им спектры PCA-изображений, вычисленные в квазилинейном приближении (*б, г, е, з*). На лимбе панелей отмечены значения азимутального угла, на радиусе — волновое число κ в радианах на метр. Скорость ветра равна 12 м/с

по спектру):

$$\sigma_{\text{rad}}^2 = 0,003(\cos^2 \vartheta_0 + \sin^2 \beta \sin^2 \vartheta_0) U_{10}^2. \quad (2)$$

Спектр PCA-изображения в квазилинейном приближении (1) состоит из трёх множителей. Первые два из них представляют собой PCA-спектр в линейном приближении, при этом первый является модуляционной передаточной функцией. Она складывается из модуляции T_{RAR} , свойственной в том числе радарам с реальной апертурой, и модуляции за счёт скоростной группировки рассеивателей. Величина модуляции T_{RAR} для данного угла падения была оценена исходя из результатов расчётов, приведённых в [9].

Второй множитель $W(\kappa_x, \kappa_y)$ представляет собой спектр возвышений морских волн. В общем случае он складывается из спектра зыби и спектра ветровых волн, но здесь мы ограничимся рассмотрением только ветрового волнения. Спектр ветрового волнения был рассчитан с помощью модели JONSWAP [10]. Угловое распределение спектра волнения было взято из работы [11]. Нелинейность PCA-изображения заложена в третьем экспоненциальном множителе, который проявляется как фактор отсечки PCA-спектра при больших волновых числах и обусловлен дисперсией орбитальных скоростей в пределах ячейки разрешения.

Чтобы проиллюстрировать трансформацию спектра волнения при построении PCA-изображения, были проведены расчёты по формуле (1) при следующих значениях параметров: $U_{10} = 12$ м/с, $R/V = 120$ с (соответствует схеме наблюдения для спутника RADARSAT-2), $T_{\text{RAR}} = 3$ (соответствует С-диапазону при угле падения 30°).

Модельные спектры ветрового волнения при направлении ветра под углами $\Psi = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ и 90° изображены на рис. 1*a, б, д* и *ж* соответственно (угол Ψ отсчитывается от оси x). Модельные спектры PCA-изображений для тех же условий представлены на рис. 1*б, г, е* и *з*. Из рис. 1 видно, что спектр становится ограниченным по азимутальному волновому числу, а спектральный максимум поворачивается в сторону оси y . При направлениях ветра, близких к 90° относительно оси x , максимум распадается на два. Это связано с тем, что вдоль оси y модуляция за счёт скоростной группировки рассеивателей практически отсутствует, но сразу «включается» при ненулевых κ_x .

Отметим ещё, что в формуле (1) не учитывается спекл-шум, который связан с интерференцией сигналов от отражателей при поступательном движении антенны. Наличие спекл-шума приводит к тому, что спектр PCA-изображения волн при малых волновых числах становится неразличим.

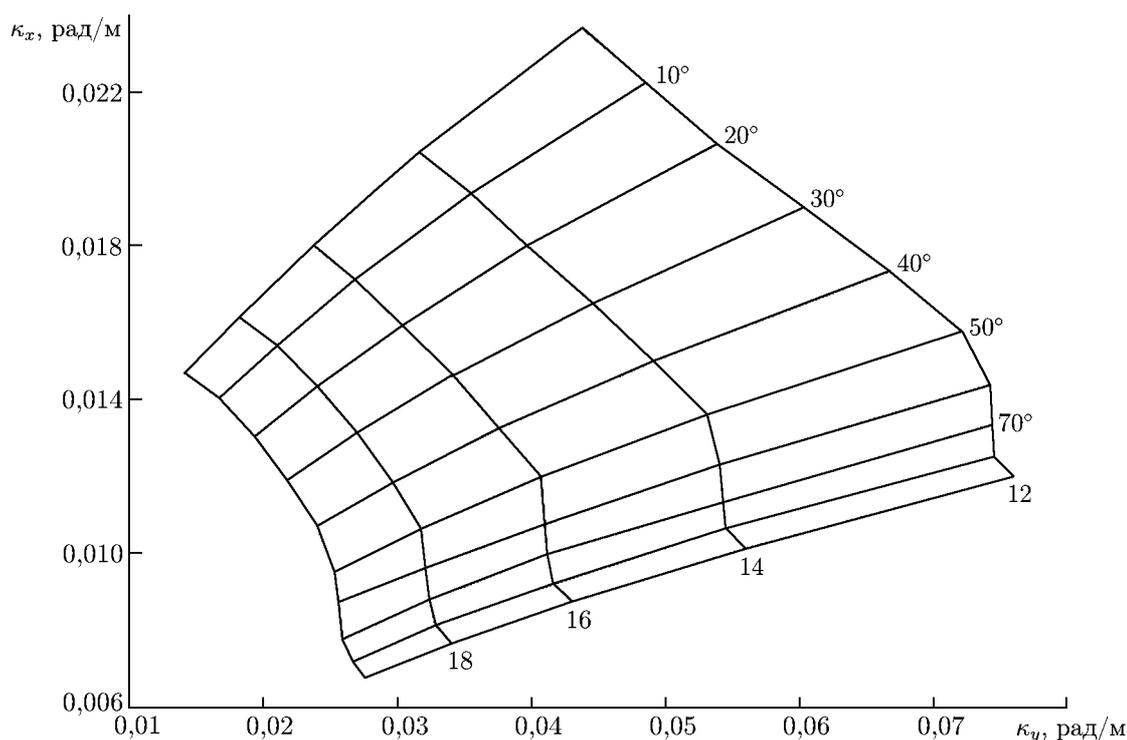


Рис. 2. «Номограмма» для определения скорости и направления ветра по положению максимумов спектра РСА-изображения. Направление ветра отсчитывается от оси x

2. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ И НАПРАВЛЕНИЯ ВЕТРА

Нами были рассчитаны двумерные спектры РСА-изображения и определены положения максимумов для ряда скоростей и направлений ветра при половинном разгоне.

Из рис. 2 видно, что при фиксированном разгоне ветрового волнения положения спектральных максимумов однозначно связаны с направлением и скоростью ветра (если не учитывать неопределённость 180°). Теперь, зная положение максимумов спектра реального РСА-изображения, можно определить скорость ветра и его направление (с указанной неопределённостью), пользуясь номограммой, подобной изображённой на рис. 2.

Неопределённость в 180° в направлении ветра связана с симметрией относительно начала координат пространственного спектра РСА-изображения. Она может быть снята с помощью использования информации о коэффициенте корреляции между комплексными сигналами на соосной и перекрёстной поляризациях,

$$\rho = \frac{\langle P_{\text{ВВ}} P_{\text{ВГ}}^* \rangle}{\sqrt{\langle |P_{\text{ВВ}}|^2 \rangle \langle |P_{\text{ВГ}}|^2 \rangle}}. \quad (3)$$

Здесь угловыми скобками обозначено усреднение по рассматриваемой области РСА-изображения.

В работе [7] показано, что реальная и мнимая части коэффициента корреляции имеют нечётную зависимость от азимутального угла. Этот результат был получен на основе большого массива РСА-данных и данных измерений скорости ветра морскими буями. Чтобы определить квадрант, в котором находится вектор направления ветра относительно направления сканирования, необ-

ходимо воспользоваться следующим критерием:

- 1) если $\operatorname{Re}\rho < 0$ и $\operatorname{Im}\rho > 0$, то $-180^\circ < \phi < -90^\circ$;
 - 2) если $\operatorname{Re}\rho > 0$ и $\operatorname{Im}\rho > 0$, то $-90^\circ < \phi < 0^\circ$;
 - 3) если $\operatorname{Re}\rho < 0$ и $\operatorname{Im}\rho < 0$, то $0^\circ < \phi < 90^\circ$;
 - 4) если $\operatorname{Re}\rho > 0$ и $\operatorname{Im}\rho < 0$, то $90^\circ < \phi < 180^\circ$.
- (4)

Здесь ϕ — угол между направлением ветра и направлением сканирования (осью y).

Таким образом, вектор скорости ветра по данным поляриметрического радиолокатора определяется в два этапа. Сначала по сетке номограммы находятся скорость и направление ветра с неопределённостью в 180° , а затем направление ветра уточняется по знаку комплексного коэффициента корреляции между сигналами на соосной и перекрёстной поляризациях.

Отметим, что рис. 2 является только иллюстрацией метода, поскольку данный расчёт проводился при фиксированном (половинном) безразмерном разгоне, в то время как в действительности разгон в статистическом смысле зависит от скорости ветра. Так, для слабых ветров наиболее вероятным является полный разгон, а для сильных ветров вероятность полного разгона мала, поскольку для этого требуется постоянный ветер, дующий в течение очень долгого времени на большой акватории. Поэтому для получения настоящей номограммы необходимо обработать большое количество реальных спектров, каждый из которых получен при известной скорости ветра, после чего можно будет сделать вывод относительно точности данного метода.

Оценим пределы применимости метода. В качестве критерия примем, что длина волны превышает элемент разрешения не менее, чем в 8 раз. Тогда для спутника RADARSAT-2 с пространственным разрешением 5 м минимальная длина волны, которую способен видеть радиолокатор, составляет 40 м, что соответствует скорости ветра 6,5 м/с по спектру модели JONSWAP [10]. Также известно, что при распространении волнения вдоль оси x возникают проблемы с определением его спектра по РСА-изображению. Поэтому при обработке данных будем рассматривать РСА-изображения, где волнение распространяется по направлению, близкому к направлению зондирования.

3. ИСТОЧНИК ДАННЫХ И ОБРАБОТКА РСА-ИЗОБРАЖЕНИЙ

Нами обрабатывались квадратурные РСА-изображения со спутника RADARSAT-2, работающего в С-диапазоне на частоте 5,405 ГГц с пространственным разрешением 5 м. Использовались данные на соосной и перекрёстной поляризациях. Информация об условиях съёмки приведена в табл. 1.

В тех же географических областях скорость и направление ветра определялись по климатической модели Европейского центра мезомасштабных прогнозов погоды (Centre for Medium-Range Weather Forecasts ECMWF) [12]. В этих данных содержится информация о двух компонентах скорости ветра вдоль параллели и меридиана с разрешением по времени 3 ч, а по пространству — около 5 км.

Для РСА-изображений были предоставлены подспутниковые данные о скорости и направлении ветра на высоте 10 м с научно-исследовательского судна. Однако стоит иметь в виду, что спутниковые и подспутниковые измерения территориально разнесены. Расстояние от исследуемой области до судна составляет порядка 100 км, при этом измерения проводились в открытом океане.

Обработка РСА-изображений проводилась следующим образом. В каждом изображении выбиралась область с размером 5×5 км, где волнение было достаточно однородно. Такие области

Таблица 1. Информация о РСА-изображениях

Номер снимка	Координаты	Время, дата	Угол падения
1	59°41'33" ю. ш., 42°48'36" з. д.	22:46:14 UT, 29.11.2012	45°
2	59°51'23" ю. ш., 66°45'05" з. д.	00:22:36 UT, 07.12.2012	45°
3	55°41'48" ю. ш., 66°40'44" з. д.	23:54:52 UT, 07.12.2012	45°

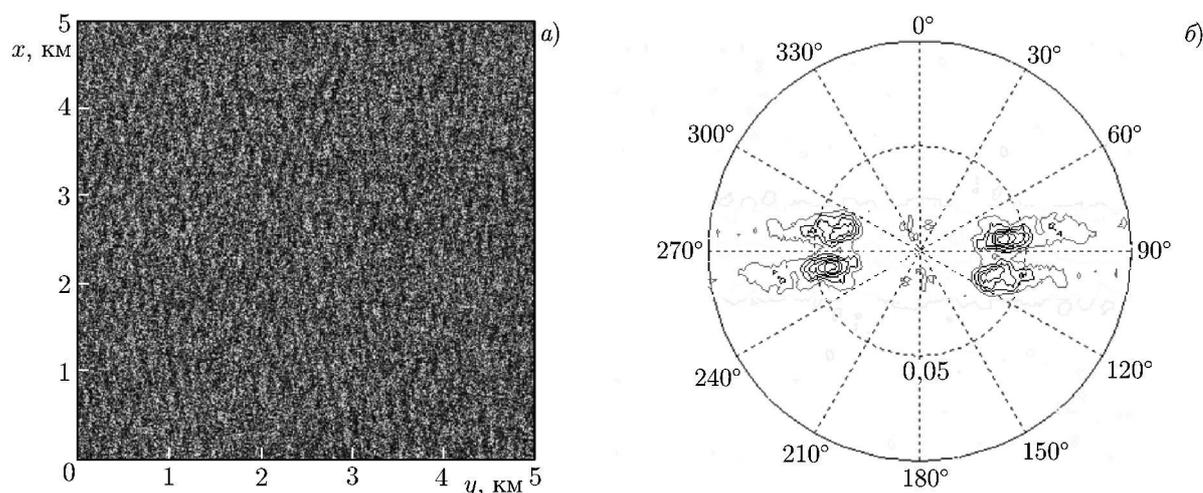
Рис. 3. РСА-изображение на соосной поляризации (а) и его спектр (б). На панели (б) на лимбе отложен азимутальный угол, на радиусе — κ в рад/м

Таблица 2. Значения комплексного коэффициента корреляции между сигналами на разных поляризациях

Номер снимка	$\text{Re}\rho$	$\text{Im}\rho$	Квадрант
1	0,04	-0,032	$90^\circ < \phi < 180^\circ$
2	0,04	-0,031	$90^\circ < \phi < 180^\circ$
3	0,10	-0,078	$90^\circ < \phi < 180^\circ$

содержат порядка $1\,000 \times 1\,000$ точек. В качестве спектральной оценки РСА-изображения использовалось быстрое преобразование Фурье для изображения на соосной поляризации, т. к. влияние шумов на данной поляризации значительно меньше.

Спектр РСА-изображения всегда содержит спекл-шум. Чтобы устранить его и тем самым сделать спектральные максимумы более контрастными, применялся метод модифицированной спектральной оценки, описанный в работе [13].

Затем двумерный спектр сглаживался окном с размером 5×5 точек. Пример РСА-изображения на соосной поляризации и его сглаженного спектра представлен на рис. 3а и б соответственно.

По спектрам РСА-изображений были определены скорость и направление ветра согласно описанному выше методу при помощи номограммы на рис. 2. Затем по формуле (3) вычислялись коэффициенты корреляции между сигналами на соосной и перекрестной поляризациях. Усреднение проводилось по всем элементам разрешения рассматриваемого участка. Квадрант направления ветра определялся по критерию (4). Значения реальных и мнимых частей коэффициента корреляции и соответствующие им диапазоны углов направления ветра относительно оси y приведены в табл. 2. Координаты максимумов в первом квадранте и соответствующие им скорости и направление ветра приведены в табл. 3.

Таблица 3. Координаты максимумов спектра и соответствующие им скорость и направление ветра относительно оси x

Номер снимка	κ_x , рад/м	κ_y , рад/м	Скорость, м/с	Направление (Ψ), градусы
1	0,010	0,160	8,5	90
2	0,003	0,025	20,0	90
3	0,005	0,030	18,0	90

4. ПРОВЕРКА РЕЗУЛЬТАТОВ (СТАТИСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД)

Скорость ветра, найденная по спектру РСА-изображения, сравнивалась со скоростью ветра, полученной из усреднённого по исследуемой области сечения обратного рассеяния, определяемого по откалиброванным данным радиолокатора с синтезированной апертурой антенны. В качестве дополнительной информации о скорости и направлении ветра применялись данные реанализа от центра ECMWF. Оба эти источника информации содержат ошибки, поэтому для определения наиболее вероятного вектора скорости ветра применялся метод максимального правдоподобия, аналогично тому, как это было сделано в работе [14].

Рассматривается целевая функция

$$J = \left(\frac{\sigma - \sigma^0}{\Delta\sigma} \right)^2 + \left(\frac{u - u^0}{\Delta u} \right)^2 + \left(\frac{v - v^0}{\Delta v} \right)^2, \quad (5)$$

где u и v — искомые компоненты вектора скорости ветра, u^0 и v^0 — оценка компонент вектора скорости ветра по модели ECMWF (u и u^0 направлены с запада на восток, а v и v^0 — с юга на север); σ^0 — оценка сечения обратного рассеяния по данным радиолокатора с синтезированной апертурой антенны и σ — сечение обратного рассеяния, которое вычисляется в зависимости от u и v с учётом направления зондирования радиолокатора. Для данных спутника RADARSAT-2 сечение σ вычисляется по алгоритму C-MOD5 [4]. Параметр $\Delta u = \Delta v = 1$ м/с — ошибка модели ECMWF, $\Delta\sigma = 0,078\sigma^0$ [14] — ошибка в сечении обратного рассеяния.

Наиболее вероятные значения компонент вектора скорости ветра находятся минимизацией функции (5). Таким образом, найденная скорость ветра, с одной стороны, максимально приближена к предсказанной по модели ECMWF, а с другой — сечение обратного рассеяния при этой скорости ветра максимально близко к измеренному радиолокатором.

5. СРАВНЕНИЕ И АНАЛИЗ

В табл. 4 приведено сравнение скорости ветра, полученного по спектру РСА-изображения с помощью предлагаемого метода, с помощью метода максимального правдоподобия (ММП), корабельным измерениям и с помощью метода из работы [7]. Сравнение полученных направлений ветра приводится в табл. 5.

Различия в скоростях ветра могут быть связаны, во-первых, с присутствием волн зыби. Во-вторых, измерения с судна и участок, где было сделано РСА-изображение, были территориально

Таблица 4. Сравнение значений скорости ветра, полученных разными способами

Номер снимка	По спектру, м/с	ММП, м/с	С судна, м/с	[7], м/с
1	8,5	10,0	10,0	14
2	20,0	9,5	7,8	16
3	18,0	18,0	21,0	21

Таблица 5. Сравнение направлений ветра (угол Ψ), полученных разными способами

Номер снимка	По спектру, градусы	ММП, градусы	С судна, градусы	[7], градусы
1	90	240	84	90
2	90	80	76	90
3	90	84	84	90

разнесены. Также стоит отметить, что настоящая номограмма должна быть построена на основе большого количества экспериментальных данных, а не с помощью теоретической модели. Данные оценки носят иллюстративный характер и показывают работоспособность предлагаемого метода.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассматривается методика определения скорости и направления ветра по данным поляриметрического радиолокатора с синтезированной апертурой антенны.

Скорость ветра определяется по положению максимумов спектра РСА-изображения, свободного от спекл-шума, связанного с аддитивной добавкой. Предварительные расчёты показали, что для чисто ветрового волнения при фиксированном разгоне положение максимумов спектра однозначно связано со скоростью ветра. В определении направления существует неоднозначность в 180° , которая обусловлена центральной симметрией пространственного спектра. Для её устранения применяется способ определения направления ветра по коэффициенту корреляции между измерениями на соосной и перекрёстной поляризациях.

Таким образом, показана возможность с помощью поляриметрического радиолокатора получить информацию как о скорости, так и о направлении ветра, причём точная калибровка радиолокатора для этого не требуется, т. к. анализируется спектр РСА-изображения. Последнее обстоятельство позволяет обойти известную сложность точной калибровки радиолокатора с синтезированной апертурой антенны при работе с морским волнением.

В настоящее время оценить точность предложенного метода сложно, т. к. для этого требуется накопить большое число РСА-изображений и соответствующих им подспутниковых измерений. Например, для построения геофизических модельных функций скаттерометра использовалось больше тысячи измерений, и их уточнение продолжается до настоящего времени. Также стоит отметить, что алгоритм, построенный по реальным данным, должен будет учитывать региональные особенности волнения.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках соглашения о предоставлении субсидии от 26 августа 2014 года 14.607.21.0055 (уникальный идентификатор соглашения RFMEFI60714X0055).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Naderi F. M., Freilich M., Long D. // Proc. IEEE. 1991. V. 79, No. 6. P. 850.
2. Ebuchi N., Graber H. C., Vakkayil R. Evaluation of ERS-1 scatterometer winds with wind and wave ocean buoy observations, Tech. Rep., CAOS, Tohoku University, CAOS 96-1, Sendai, Japan, 1996. 69 p.
3. Wentz F. J., Peteherych S., Thomas L. A. // J. Geophys. Res. C. 1984. V. 89, No. 3. P. 3689.
4. Hersbach H., Stoffelen A., de Haan S. // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. P. C03006
5. Lehner S., Horstmann J., Koch W., et al. // J. Geophys. Res. C. 1998. V. 103, No. 4. P. 7847.

6. Fetterer F., Gineris D., Wackerman C. C. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1998. V. 36. P. 479.
7. Zhang B., Perrie W., Vachon P. W. // Trans. Geosci. Remote Sens. 2012. V. 50, No. 11. P. 4252.
8. Hasselmann K., Hasselmann S. // J. Geophys. Res. C. 1991. V. 96, No. 6. P. 10713.
9. Alpers W., Ross D., Rufenach C. L. // J. Geophys. Res. C. 1981. V. 86, No. 7. P. 6481.
10. Hasselmann K., Barnett T. P., et al. // Deut. Hydrogr. Z. Reihe A. 1973. No. 12. P. 1.
11. Mitsuyasu H., Tasai F., Suhara T. // J. Phys. Oceanography. 1975. V. 5. P. 750.
12. Wedi N. P., Hamrud M., Mozdzyński G. // Proc. ECMWF Workshop on Recent Developments in numerical methods for atmosphere and ocean modelling, Reading, UK. Eur. Cent. For Medium-Range Weather Forecasts. 2013. P. 1.
13. Kanevsky M. B. Radar imaging of the ocean waves. Elsevier. 2009. 196 p.
14. Portabella M., Stoffelen A., Johannessen J. A. // J. Geophys. Res. C. 2002. V. 107, No. 8. P. 3086.

Поступила в редакцию 16 сентября 2014 г.; принята в печать 2 декабря 2014 г.

DETERMINATION OF THE WIND-VELOCITY VECTOR ABOVE THE OCEAN SURFACE USING THE IMAGE SPECTRUM OF A POLARIMETRIC RADAR WITH SYNTHESIZED APERTURE

M. A. Panfilova, M. B. Kanevsky, G. N. Balandina, V. Yu. Karaev, A. Stoffelen, and A. Verkhoev

A new method for determining the wind-velocity vector above the ocean surface using the data of a polarimetric radar with synthesized antenna aperture is proposed. The preliminary calculations show that the maximum location in the radar-image for the wind waves is unambiguously related to the wind velocity and the wind direction is reconstructed with an uncertainty of 180° , which is related to the central symmetry of the image spectrum. To eliminate ambiguousness when determining the wind direction, the criterion based on the information on the sign of the coefficient of correlation among the complex signals on the coaxial and cross polarizations is used. It is shown that using a polarimetric radar, it is theoretically possible to obtain information on both the wind velocity and direction without exact radar calibration.