УДК 528.8+551.46.086

# ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ И НАПРАВЛЕНИЙ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО ВЕТРА: ОРБИТАЛЬНЫЙ СКАТТЕРОМЕТР

В. Ю. Караев<sup>1</sup>\*, М. А. Панфилова<sup>1</sup>, Ю. А. Титченко<sup>1</sup>, Е. М. Мешков<sup>1</sup>, Г. Н. Баландина<sup>1</sup>, Ю. В. Кузнецов<sup>2</sup>, А. Л. Шлаферов<sup>2</sup>

CKAT-3

<sup>1</sup> Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород;

<sup>2</sup> Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи, г. Ростов-на-Дону, Россия

Новая концепция, предложенная при разработке первого российского орбитального скаттерометра СКАТ-3, потребовала проведения дополнительного исследования для оценки её эффективности и сравнения с существующими концепциями скаттерометров. Благодаря применению веерной диаграммы направленности антенны (угловые размеры  $1^{\circ} \times 6^{\circ}$ ) удалось примерно в три раза снизить скорость вращения последней по сравнению с прототипом (скаттерометром «SeaWinds») и обеспечить измерение сечения обратного рассеяния в каждой ветровой ячейке на горизонтальной и вертикальной поляризациях. Была разработана численная модель скаттерометра с учётом технических характеристик радиолокатора, параметров орбиты и схемы наблюдения. Проведено моделирование работы скаттерометра с последующим формированием полосы обзора и разбиения её на ветровые ячейки. Показано, что при использовании в скаттерометре веерной диаграммы направленности можно повысить точность восстановления направления ветра в ветровой ячейке за счёт использования радиометрического разрешения в алгоритме обработки. Основная ошибка определения направления ветра связана с неоднозначностью  $\pm 180^\circ,$  которая обусловлена видом азимутальной зависимости сечения обратного рассеяния. Было показано, что с помощью двумерной угловой медианной фильтрации можно существенно уменьшить погрешность восстановления направления ветра. Эта погрешность, возможно, будет меньше, чем у существующих скаттерометров.

#### ВВЕДЕНИЕ

Орбитальный скаттерометр обеспечивает измерение сечения обратного рассеяния морской поверхности в широкой полосе обзора под несколькими углами падения и под разными азимутальными углами. Для этого могут использоваться различные схемы наблюдения. При последующей обработке скаттерометрических данных восстанавливается поле скоростей и направлений приповерхностного ветра и информация ассимилируется в метеорологические и океанологические модели.

В настоящее время на орбите находятся Европейский скаттерометр ASCAT [1], индийский скаттерометр «OceanSat-2» [2, 3] и китайский скаттерометр HY-2A [4, 5].

В скаттерометре ASCAT для измерений используются 6 неподвижных веерных антенн (по три с каждой стороны, локальный угол падения меняется от  $37^{\circ}$  до  $64^{\circ}$ ), обеспечивающих при движении скаттерометра три последовательных наблюдения каждой ветровой ячейки с размерами  $25 \times 25$  км в полосе обзора. При обработке полоса обзора скаттерометра разбивается на ветровые ячейки и в каждой ячейке восстанавливаются скорость и направление ветра. Недостатком схемы наблюдения, используемой в ASCAT, является невозможность проведения измерений и восстановления скорости и направления ветра в узкой полосе вдоль траектории полёта.

В китайском и индийском скаттерометрах применяется схема наблюдения, разработанная для американского спутника «Quikscat» (скаттермотер «SeaWinds»). В этой схеме зондирование

<sup>\*</sup> volody@hydro.appl.sci-nnov.ru



Рис. 1. Зависимость ошибки  $\Delta \varphi$  восстановления направления ветра от номера ветровой ячейки. Вычисления выполнены для скорости ветра 6 м/с и полосы обзора 1525 км (61 ветровая ячейка). Подспутниковой точке соответствует 31-ая ячейка

выполняется двумя узкими лучами (угловая ширина примерно  $1,5^{\circ}$ ), вращающимися вокруг вертикальной оси. Один из лучей (внешний, вертикально поляризованный) падает на поверхность под углом 54°, а второй (внутренний, горизонтально поляризованный) — под углом 46° [6]. Преимущество такой схемы наблюдения по сравнению со схемой скаттерометра ASCAT связано с тем, что в этом случае возможны измерения вдоль траектории движения скаттерометра, т. е. нет так называемой «мёртвой» зоны, как в случае с ASCAT. Благодаря высокой скорости вращения (примерно 18 об/мин) ветровая ячейка за время пролёта наблюдается 4 раза во внутренней области и 2 раза во внешней области полосы обзора. В общем случае, измерений под двумя азимутальными углами во внешней области недостаточно для однозначного решения обратной задачи определения вектора скорости ветра в ветровой ячейке. Это является существенным недостатком данной схемы наблюдения.

Европейское космическое агентство при разработке концепции нового скаттерометра провело сравнение двух схем наблюдения [7] и по результатам исследования выбрало схему наблюдения ASCAT, т. к. обе схемы показывают примерно одинаковую точность восстановления скорости и направления ветра.

В проектируемом российском скаттерометре СКАТ-3 используется модифицированная схема наблюдения прибора «SeaWinds». В предыдущих работах [8–10] подробно обсуждалась концепция этого скаттерометра, особенности его функционирования и была разработана его численная модель. В ходе численного эксперимента были получены оценки точности восстановления скорости и направления приповерхностного ветра в отдельной ветровой ячейке. Было показано, что скорость ветра может быть восстановлена с высокой точностью, а основные проблемы возникают при восстановлении его направления.

Основная ошибка определения направления ветра связана с неоднозначностью типа ±180°. Это видно из рис. 1, где приведён пример разреза полосы обзора скаттерометра СКАТ-3 в направлении, перпендикулярном направлению полёта (результат обработки численного эксперимента). Показана зависимость ошибки восстановления направления ветра от номера ветровой ячейки.

Ошибка восстановления направления ветра вычисляется следующим образом:  $\Delta \varphi = \varphi_{\rm r} - \varphi_{\rm m}$ , где  $\varphi_{\rm r}$  и  $\varphi_{\rm m}$  — восстановленное и модельное (исходное) направление ветра соответственно. Аналогично вводится ошибка восстановления скорости ветра:  $\Delta U_{10} = U_{10\rm r} - U_{10\rm m}$ .

Численное моделирование показывает, что без учёта информации из соседних ветровых ячеек среднеквадратическая ошибка определения направления ветра в ветровой ячейке превосходит 40° даже при использовании измерений на двух поляризациях. Такая ошибка является недопустимой для скаттерометра [10].

Основная причина неоднозначности ±180° связана с характером азимутальной зависимости сечения обратного рассеяния [11, 12]. Разность сечений обратного рассеяния, измеренных по ветру и навстречу ветру, невелика (особенно на вертикальной поляризации), поэтому при небольшом числе измерений под разными азимутальными углами задача определения направления ветра в

288

условиях шумов может решаться с большой ошибкой, даже если скорость ветра восстанавливается достаточно точно.

В настоящее время для решения проблемы неоднозначности определения направления ветра используются два подхода: медианная фильтрация (см., например, [13]) и вариационный анализ.

В данной работе проанализирована эффективность применения медианной фильтрации для обработки смоделированных данных будущего скаттерометра СКАТ-3 и получены оценки погрешности восстановления скорости и направления ветра. Кроме того, в связи с тем, что концепция этого скаттерометра существенно отличается от концепций скаттерометров ASCAT и «SeaWinds», существуют другие варианты повышения точности восстановления скорости ветра, которые также рассмотрены в работе.

# 1. ВОССТАНОВЛЕНИЕ СКОРОСТИ И НАПРАВЛЕНИЯ ВЕТРА В ВЕТРОВОЙ ЯЧЕЙКЕ

Особенности схемы наблюдения и технические характеристики скаттерометра СКАТ-3 подробно обсуждаются в работах [10, 14].

В работе [10] рассматривалось восстановление скорости и направления ветра в отдельной ветровой ячейке и было показано, что измерений в одной ячейке в общем случае недостаточно для определения направления ветра с необходимой точностью. Рассмотрим на модельном примере, как можно повысить точность восстановления скорости ветра в ячейке, используя особенности антенной системы скаттерометра СКАТ-3, для чего смоделируем его полосу обзора и последовательно применим различные подходы к обработке данных.

Для восстановления скорости и направления ветра применяется оценка максимального правдоподобия и связанная с ней так называемая целевая функция. Последняя записывается в виде [15]

$$G = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} \frac{(\sigma_n - \sigma_n^{\text{mod}})^2}{\sigma_{\text{noise},n}^2},$$
(1)

где N — число измерений, выполненных под различными азимутальными углами и углами падения,  $\sigma_n^{\text{mod}}$  — значение сечения обратного рассеяния из априорной модели,  $\sigma_{\text{noise},n}^2$  — дисперсия погрешности. Если информация о дисперсии погрешности неизвестна, то используется предположение, что она одинакова для всех измерений и её можно вынести за знак суммы. В этом случае формула (1) упрощается.

Оценить влияние разных факторов на точность восстановления скорости и направления ветра можно с помощью численного моделирования. Вычисления были выполнены для скорости ветра 6 м/с и 100 линий по траектории. Число ветровых ячеек поперёк траектории (в линии) равно 61, т. е. полное число ветровых ячеек для обработки равно 6 100. Точность восстановления скорости и направления ветра зависит от угла между направлением ветра и направлением движения скаттерометра, поэтому в тестовый массив необходимо включить все возможные направления ветра, что и было сделано за счёт изменения направления ветра.

При моделировании направление ветра менялось от 0° (для первой ячейки) до 360° (для последней 100-й ячейки) с равномерным шагом. Результаты восстановления для трёх вариантов обработки приведены в табл. 1. Вычислялись среднее значение погрешности M и среднеквадратическое отклонение (СКО).

В первом варианте обрабатываются все данные (все элементы, попадающие в ветровую ячейку) и предполагается, что дисперсия погрешности одинаковая для всех измерений, т. е. исполь-

		гориз	онтальная	верти	кальная	горизонтальная		
		поляризация		поляризация		и вертикальная		
					поля	поляризация		
способ обработки	параметры	M	CKO	M	CKO	M	CKO	
все элементы	скорость ветра, м/с	0,1	1,0	0,3	1,4	0,1	$0,\!7$	
	направление ветра,	-0,3	83,8	-0,8	101,5	-0,1	49,1	
	градусы							
элементы с 3 по 11	скорость ветра, м/с	0,0	1,0	0,3	1,4	0,0	$0,\!7$	
	направление ветра,	-0,7	84,0	-0,6	102,2	-0,4	46,0	
	градусы							
учёт	скорость ветра, м/с	0,3	1,0	0,4	1,4	0,2	$0,\!6$	
радиометрического	направление ветра,	0,5	83,7	-0,9	$101,\! 6$	-0,3	44,6	
разрешения	градусы							

Таблица 1. Результаты восстановления скорости и направления ветра в ветровой ячейке по данным численного моделирования

зуется упрощённый вариант формулы (1). Обработка измерений для каждой поляризации проведена отдельно, также рассмотрен случай обработки измерений на обеих поляризациях.

Из табл. 1 видно, что при обработке скорость и направление ветра точнее восстанавливаются для горизонтальной поляризации, чем для вертикальной. Это обусловлено тем, что в данном случае неоднозначность ±180° сильнее проявляется для вертикальной поляризации, приводя к бо́льшим ошибкам. Совместная обработка измерений для вертикальной и горизонтальной поляризации ветра.

В отличие от других схем наблюдения, в данном случае в каждую ветровую ячейку попадает достаточно много элементов (см. рис. 5 в работе [10]), соответствующих разным углам падения. Очевидно, что по краям диаграммы направленности (первые и последние элементы) уровень погрешности выше и «качество» данных хуже [10]. Если удалить эти элементы, то качество исходных данных для обработки улучшится. В этом случае проблема с недостатком числа наблюдений возникнет только для самых крайних ветровых ячеек полосы обзора, которые наблюдаются под одним углом падения. Эти ячейки не участвуют в обработке, т. е. полоса обзора немного сужается.

Проведём восстановление вектора скорости ветра без учёта краёв диаграммы направленности антенны, например используем элементы с 3 по 11. В табл. 1 приведены результаты восстановления скорости и направления ветра для этого случая. Из неё видно, что при использовании обеих поляризаций наблюдается улучшение точности восстановления направления ветра.

В обоих рассмотренных выше случаях не делалось предположений о величине дисперсии шума (или радиометрическом разрешении), т. е. использовался упрощённый вариант формулы (1).

Другой способ учёта диаграммы направленности антенны связан с использованием информации о радиометрическом разрешении  $K_r$  и формулы (1). Зависимость радиометрического разрешения от угла падения (номера элемента) приведена в работе [10]. Результаты обработки также приведены в табл. 1. Видно, что учёт радиометрического разрешения позволяет уменьшить погрешность определения скорости и направления ветра при использовании измерений на двух поляризациях. Для измерений на одной поляризации эффект не заметен.

С физической точки зрения такой результат обусловлен характером азимутальной зависимости сечения обратного рассеяния [11, 12]. Для вертикальной поляризации можно точнее определить направление, вдоль которого дует ветер, но остаётся неоднозначность ±180°. Горизонтальная поляризация лучше «чувствует» направление на радиолокатор и от него, т. е. при сов-

местной обработке измерений для горизонтальной и вертикальной поляризаций они дополняют друг друга. В результате погрешность определения направления ветра в ветровой ячейке при использовании измерений на двух поляризациях существенно уменьшается, но всё ещё остаётся достаточно большой, и необходимо искать методы её дальнейшего снижения. Таким образом, использование в скаттерометре измерений на двух поляризациях является необходимым условием для эффективной работы алгоритма восстановления вектора скорости ветра в рассматриваемой схеме измерения.

## 2. ВОССТАНОВЛЕНИЕ СКОРОСТИ И НАПРАВЛЕНИЯ ВЕТРА В ПОЛОСЕ ОБЗОРА СКАТТЕРОМЕТРА: МЕДИАННАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ

Из рис. 1 видно, что основной ошибкой определения направление ветра является неоднозначность ±180°. Для борьбы с такими ошибками в скаттерометрических изображениях используется двумерная медианная фильтрация. Преимущество медианной фильтрации по сравнению с другими методами (линейные фильтры, билатеральные, трилатеральные фильтры и т. д. [16, 17]) проявляется особенно отчётливо, если ошибка имеет импульсный характер. В нашем случае это резкий «скачок» направления ветра.

В результате применения медианного фильтра как плавные участки, так и резкие перепады яркости на изображениях не изменяются. В применении к скаттерометрическим изображениям это могут быть фронты, и их важно сохранить для дальнейшего анализа в метеорологических и океанологических приложениях.

При медианной фильтрации степень сглаживания контуров изображений зависит от размеров апертуры фильтра и формы маски. При малых размерах апертуры лучше сохраняются контрастные детали изображения, но в меньшей степени подавляются импульсные шумы. При больши́х размерах апертуры наблюдается обратная картина. Оптимальный выбор формы сглаживающей апертуры зависит от специфики решаемой задачи и формы объектов. В применении к скатерометрическим изображениям этот вопрос подробно исследовался, например, в работе [13]. Приведём краткую информационную справку по медианной фильтрации.

Медианная фильтрация представляет собой эвристический метод обработки, её алгоритм не является математическим решением строго сформулированной задачи. Изначально медианная фильтрация была разработана для скалярной одномерной величины. Исходный массив проходился последовательно окном с заданным размером (обычно состоящим из нечётного числа точек). Попадающие в окно значения выстраивались в порядке возрастания, и центральный элемент сформированной таким образом последовательности замещает центральный элемент исходного массива.

При переходе к двумерным изображениям процедура в целом сохраняется, но появляется вариативность в выборе вида окна (медианного фильтра) [16, 17]. В общем случае размеры окна по осях x и y могут не совпадать.

При двумерной медианной фильтрации происходит последовательная обработка каждой точки изображения (скользящее двумерное окно), в результате чего образуется последовательность оценок нового изображения. При каждом шаге из элементов, попадающих в окно, формируется выборка. Если упорядочить выборку по возрастанию, то её медианой будет элемент выборки, занимающий центральное положение в этой упорядоченной последовательности. Полученное таким образом число и является продуктом фильтрации для текущей точки изображения, находящейся в центре окна. Обычно применяют окна с нечётным числом точек, и в этом случае центральная точка легко идентифицируется.

В скаттерометрии необходимо работать с векторным полем, и поэтому алгоритм был модифи-

	горизон	тальная	вертик	альная	горизонтальная			
	поляри	изация	поляри	изация	и вертикальная			
					поляризация			
способ обработки	M,	CKO,	M,	CKO,	M,	CKO,		
	градусы	градусы	градусы	градусы	градусы	градусы		
без фильтрации	-0,3	83,8	-0,8	101,5	-0,1	49,1		
окно $3 \times 3$	-0,2	$52,\!8$	$-0,\!6$	65,1	$0,\!0$	19,2		
окно $5 \times 5$	-0,8	40,6	-1,1	50,3	-0,0	$15,\!5$		
окно $7 \times 7$	-0,5	33,1	-1,3	42,1	$0,\!2$	13,2		

Таблица 2. Результаты применения медианной фильтрации по углу (скорость ветра 6 м/с, направление меняется от 0° до 360°)

цирован. Для перехода от вектора к скалярной величине авторы работы [13] предлагают перейти к разностной величине, которая может быть сформирована несколькими способами, например в виде новой матрицы, каждый элемент которой вычисляется как разность между исходным и центральным элементами. Элементом матрицы является ветровая ячейка.

В скаттерометрии применяются два варианта медианной фильтрации: медианная фильтрация только по углу и векторная фильтрация. В первом случае вычисляется угол между текущим вектором скорости ветра элемента матрицы (ветровой ячейки) и, например, вектором скорости центрального элемента матрицы. Для простоты считаем, что матрица является квадратной с нечётным числом элементов. Амплитуда вектора (т. е. скорость ветра) в этом случае не учитывается. Для всех значений, попадающих в окно, выполняется ранжирование и происходит замена центрального элемента окна на медиану ранжированной выборки.

При переходе к разностной величине появляется возможность альтернативного определения медианы. В математическом виде медианная фильтрация по углу может быть представлена следующим образом [13]:

$$E_{ij} = \sum_{n=i-h}^{i+h} \sum_{m=j-h}^{j+h} |\varphi_{ij} - \varphi_{nm}|, \qquad (2)$$

где размер окна равен 2h + 1. Задача поиска медианы сводится к определению минимального значения суммы  $E_{ij}$  и присвоению центральному элементу в окне её значения. В этом случае угол  $\varphi$  характеризует восстановленное скаттерометром направление ветра в каждом элементе окна (ветровой ячейке).

Результаты применения угловой медианной фильтрации приведены в табл. 2. Для вычислений использовались три окна с размерами  $3 \times 3$ ,  $5 \times 5$  и  $7 \times 7$  элементов, т. е. максимальный размер окна составлял  $175 \times 175$  км. В проведённом ранее исследовании было показано, что окно с размерами  $7 \times 7$  элементов является оптимальным для обработки данных скаттерометра NSCAT [13].

При обработке фильтровались данные, на основе которых была составлена табл. 1. В связи с тем, что для краёв полосы обзора невозможно применить двумерную медианную фильтрацию, для них использовалась одномерная медианная фильтрация вдоль направления полёта. При размерах окна 7 × 7 элементов для 2-й колонки использовалось окно с размерами 3 × 3 элементов, для 3-ей колонки —  $5 \times 5$  элементов и только начиная с 4-й переходили к окну с размерами 7 × 7 элементов.

При обработке использовался только один проход медианным фильтром. Тем не менее, видно, что при использовании измерений на двух поляризациях удаётся достичь хорошей точности восстановления направления ветра. Этот результат проиллюстрирован на рис. 2 и 3.

В. Ю. Караев, М. А. Панфилова, Ю. А. Титченко и др.

292





Рис. 2. Полутоновое изображение восстановленного направления приповерхностного ветра в полосе обзора скаттерометра СКАТ-3. Панель a иллюстрирует измерения сечения обратного рассеяния на горизонтальной поляризации, панель  $\delta$  — на вертикальной поляризации, панель 6 — на обеих поляризациях. Скорость ветра 6 м/с, направление ветра менялось от 0° (1 строчка) до 360° (100 строчка)

В. Ю. Караев, М. А. Панфилова, Ю. А. Титченко и др.

293







Рис. 3. Полутоновое изображение восстановленного направления приповерхностного ветра в полосе обзора скаттерометра СКАТ-3 после применения двумерной медианной фильтрации с окном с размерами 5 × 5 элементов. Панель *а* иллюстрирует измерения сечения обратного рассеяния на горизонтальной поляризации, панель *б* — на вертикальной поляризации, панель *б* — на вертикальной поляризации, панель *в* — на обеих поляризациях. Скорость ветра 6 м/с, направление ветра менялось от 0° (1 строчка) до 360° (100 строчка)

Поля направления скорости ветра, восстановленные после работы алгоритма, приведены на рис. 2. При моделировании направление ветра вдоль направления полёта менялось от 0° в первой строчке до 360° в 100 строчке с равномерным шагом. Поперёк направления полёта (61 ветровая ячейка) направление ветра не менялось. Из рис. 2 видно, что направление ветра для горизонтальной (*a*) и вертикальной (*б*) поляризаций восстанавливается плохо из-за неоднозначности  $\pm 180^{\circ}$ . Просматриваются «точки», резко отличающиеся по цвету от фона. При использовании в алгоритме измерений на двух поляризациях точность существенно улучшается (см. рис. 2*6* и табл. 2).

На рис. 3 показаны результаты применения двумерной медианной фильтрации с окном с размерами  $5 \times 5$  элементов для изображения, приведённого на рис. 2. Использовался один проход медианным фильтром. Для всех вариантов обработки наблюдается уменьшение погрешности. Особенно это заметно при использовании в алгоритме измерений сечения обратного рассеяния на горизонтальной и вертикальной поляризациях. На рис. 36 хорошо просматривается «переход» от светлого (0°) к тёмному (360°) цвету вдоль направления полёта, что соответствует моделируемой ситуации.

При использовании медианной фильтрации обычно применяют несколько «проходов» медианным фильтром. Критерием окончания таких итераций является выполнение заданного количества проходов или отсутствие изменений при новой итерации. Это дополнительный резерв «повышения» точности, т. к. в данном исследовании использовался только один проход.

Для коррекции не только направления, но и величины скорости ветра необходимо использовать векторную фильтрацию, при которой находится длина разностного вектора [13]. При наличии внешней информации о поле скорости ветра, например из модели ECMWF, в качестве результатов начальной итерации используется эта информация. В данном случае не использовалось предположение об исходном поле скорости ветра, и векторная медианная фильтрация не применялась.

# 3. ВОССТАНОВЛЕНИЕ СКОРОСТИ И НАПРАВЛЕНИЯ ВЕТРА: РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для количественной оценки эффективности алгоритмов восстановления скорости и направления приповерхностного ветра воспользуемся численным моделированием при следующих параметрах:

1) величина скорости ветра  $U_{10}$  равна 4; 8; 12 и 16 м/с;

2) направление ветра меняется от  $0^{\circ}$  до  $360^{\circ}$  с равномерным шагом.

Для оценки работы алгоритмов моделируется полоса обзора с шириной 1525 км (61 ячейка) и длиной 2500 км (100 ветровых ячеек-строк).

На первом этапе обработки восстанавливаются скорость и направление ветра в каждой ветровой ячейке без учёта диаграммы направленности антенны. Рассматривается только случай совместного использования измерений на вертикальной и горизонтальной поляризациях. В ходе второго этапа проводится угловая медианная фильтрация без учёта величины скорости ветра. В этом случае происходит коррекция только направления ветра.

Результаты обработки приведены в табл. 3. Из неё видно, что медианная фильтрация позволяет существенно повысить точность определения направления ветра. Алгоритм успешно работает, если поле скорости ветра достаточно однородно в окне. При больши́х размерах окна это условие может нарушаться, что, возможно, приведёт к росту ошибки. Поэтому при обработке надо стараться использовать окна с минимальными размерами, чтобы не потерять информацию о пространственной структуре поля скорости ветра.

Традиционно полосу обзора скаттерометра делят на участки в зависимости от погрешно-

В. Ю. Караев, М. А. Панфилова, Ю. А. Титченко и др.

295

		$U_{10} = 4$ м/с		$U_{10} = 8$ м/с		$U_{10} = 12$ м/с		$U_{10} = 16$ м/с	
способ	параметры	M	CKO	M	CKO	M	CKO	M	CKO
обработки									
все	скорость ветра, м/с	$^{0,1}$	0,6	$0,\!2$	$0,\!6$	0,0	$1,\!0$	-0,1	1,2
элементы	направление ветра,	0,1	64,0	0,0	38,1	-1,0	$52,\!6$	$0,\!8$	68,1
	градусы								
окно $3 \times 3$	направление ветра,	$0,\!3$	28,1	$0,\!6$	14,2	-0,9	20,5	-0,2	31,7
	градусы								
окно $5 \times 5$	направление ветра,	$0,\!4$	20,5	$0,\!4$	8,6	-0,7	$13,\!6$	-0,1	17,7
	градусы								
окно $7 \times 7$	направление ветра,	$^{0,1}$	15,7	$0,\!4$	$^{7,3}$	-0,3	9,9	0,0	13,9
	градусы								

Таблица 3. Результаты восстановления скорости и направления ветра в ветровой ячейке по данным численного моделирования (используются измерения на вертикальной и горизонтальной поляризациях)

Таблица 4. Результаты восстановления скорости и направления ветра в ветровой ячейке по данным численного моделирования (двумерная медианная фильтрация с окном с размерами 3×3 элементов)

		$U_{10} = 4$ м/с		$U_{10}=8$ м/с		$U_{10} = 12$ м/с		$U_{10} = 16$ м/с	
способ	параметры	M	CKO	M	CKO	M	CKO	M	CKO
обработки									
все ячейки	скорость ветра,	0,1	$0,\!6$	0,2	$0,\!6$	$0,\!0$	$1,\!0$	-0,1	1,2
	M/C								
	направление	$0,\!3$	28,1	$0,\!6$	14,2	-0,9	20,5	$^{0,2}$	31,7
	ветра, градусы								
дальняя зона	скорость ветра	0,4	$1,\!0$	$0,\!6$	$1,\!3$	$^{0,1}$	$1,\!6$	-0,4	1,7
	направление	1,4	31,0	1,7	$_{30,5}$	-3,0	44,8	0,2	$54,\! 6$
	ветра, градусы								
средняя зона	скорость ветра	0,0	$0,\!4$	$0,\!2$	0,36	$0,\!0$	$0,\!8$	0,0	1,1
	направление	0,2	11,1	0,0	1,5	-0,2	$^{6,5}$	-0,3	25,0
	ветра, градусы								
надирная зона	скорость ветра	0,2	0,7	$0,\!2$	$0,\!5$	0,0	0,9	0,0	1,0
	направление	0,4	38,7	$1,\!4$	16,4	-1,5	21,1	-0,1	$29,\!6$
	ветра, градусы								

сти восстановления вектора скорости ветра. В частности, у скаттерометра «SeaWinds» ветровые ячейки с 1-й по 8-ую и с 69-й по 76-ую попадают во внешнюю область, в которой погрешность восстановления скорости и направления ветра была наихудшей. В областях с 9-й по 28-ую и с 49-й по 68-ую ветровую ячейку погрешность определения вектора скорости ветра минимальна. В надирной области с 29-й по 48-ую ячейку погрешность снова увеличивается [15]. В нашем случае выделим следующие области: с 1-й по 4-ую и с 58-й по 61-ую ячейки (дальняя зона с наибольшей погрешностью), с 5-й по 22-ую и с 40-й по 57-ую ячейки (минимальная погрешность, средняя зона) и область с 23-ей по 39-ую (надирная область). В табл. 4 приведены оценки погрешности восстановления скорости и направления ветра в этих областях с учётом медианной фильтрации окном с размерами 3 × 3 элементов.

Из табл. 4 видно, что наибольшие погрешности восстановления скорости и направления ветра

отвечают краям полосы обзора, т. е. дальней зоне. В надирной и в средней областях погрешность ниже. Погрешность уменьшится, если использовать несколько итераций или увеличить размер окна. В данном случае использовался минимальный размер окна (3×3) и один проход медианным фильтром. Применение при обработке радиометрического разрешения дополнительно повышает точность определения направления ветра на 3°÷6° в зависимости от величины его скорости и зоны.

Таким образом, проведённое численное моделирование подтвердило, что разрабатываемая концепция первого российского скаттермотера может обеспечить высокую точность восстановления направления ветра.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для оценки работоспособности нового скаттерометра СКАТ-3 была построена численная модель, на её основе проведено моделирование и восстановлено поле скорости и направления приповерхностного ветра по модельным данным. Сравнение восстановленного поля ветра с исходным необходимо для оценки работоспособности скаттерометра и эффективности алгоритмов обработки данных.

В исследовании рассматривалась концепция скаттерометра с веерной диаграммой направленности антенны (угловые размеры  $1^{\circ} \times 6^{\circ}$ ), вращающейся вокруг вертикальной оси. Для выбранной схемы измерения основной технической характеристикой скаттерометра, использованной при моделировании, было радиометрическое разрешение  $K_{\rm r}$ , которое определяет отношение сигнал/шум. При его вычислении использовалась информация о технических характеристиках будущего скаттерометра.

Было показано, что измерение на двух поляризациях в одной ветровой ячейке позволяет существенно повысить точность определения скорости и направления ветра по сравнению с измерениями на одной поляризации. Величина скорости ветра восстанавливается в отдельной ветровой ячейке достаточно точно, и основная проблема возникает при определении направления ветра. Главная погрешность при этом связана с неоднозначностью ±180°. Веерная диаграмма направленности и схема измерения позволяют использовать различные способы уменьшения погрешности в отдельно взятой ячейке. Однако они являются является лишь частичным решением проблемы и не позволяют достичь необходимой точности.

Для устранения неоднозначности  $\pm 180^{\circ}$  в скаттерометрии применяют двумерную медианную фильтрацию. В проведённом исследовании использовалась только угловая медианная фильтрация, т. к. величина скорости ветра восстанавливается достаточно точно, а предположений об исходном поле скорости ветра, которые обычно требуются для векторной фильтрации, не делалось. Обработка смоделированных данных медианным фильтром показала, что удаётся существенно повысить точность определения направления ветра. Исходя из результатов моделирования можно предположить, что новый скаттерометр будет точнее восстанавливаеть скорость приповерхностного ветра по сравнению с существующими скаттерометрами.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 13–05–00852а) и программы ОФН РАН «Радиофизика».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Figa-Saldana J., Wilson J. J. W., Attema E., et al. // Can. J. Rem. Sens. 2002. V. 28, No. 3. P. 404.
- Gowrisankar D. // Proc. 49th Session of UNCOPUOS-STSC. Vienna, Austria, February 6–17, 2012.

- 3. Gohil B. S., Sarkar A., Varma A. K., Agarwal V. K. // Proc. SPIE. 2006. V. 6 410. Art. no. 64100S.
- Xiaolong D., Ke X., Heguang L., Jingshan J. // Proc. IGARSS 2004, Anchorage, AK, USA, September 20–24, 2004.
- Xiaofeng Y., Xiaofeng L., Yang Y., Ziwei L., // Proc. IGARSS (IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium), Melbourne, Australia, July 21–26, 2013. P. 1 250.
- 6. Spencer M. W., Wu C., Long D. G. // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 1997. V. 35, No. 1. P. 115.
- Lin C. C., Betto M., Belmonte-Rivas M., et al. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 2012. V. 350, No. 7. P. 2458.
- Karaev V., Meshkov E., Shlaferov A., Kuznetsov Yu. // Abstracts Int. Geosci. Remote Sensing Symp., Melburne, Australia, 21–26 July 2013. Art. no. 1 368.
- Karaev V., Titchenko Yu., Panfilova M., et al. // Abstracts 40th COSPAR Sci. Assembly, Moscow, Russia, 2–10 August 2014. P. 1815.
- Караев В., Панфилова М., Титченко Ю. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2015. Т. 58, № 11. С. 935.
- 11. Wentz F. J., Peteheryh S., Thomas L. // J. Geophys. Res. 1984. V. 89, No. C3. P. 3689.
- 12. Wentz F., Smith D. // J. Geophys. Res. 1999. V. 104, No. C5. P. 11 499.
- Shaffer S. J., Dunbar R. S., Hsiao S. V., Long D. G.// IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 1991. V. 29, No. 1. P. 167.
- 14. Габриэльян Д. Д., Демченко В. И., Иванов С. В. и др. // Радиотехника. 2014. № 8. С. 6.
- Portabella M., Wind Field Retrieval from Satellite Radar Systems. Doctoral Thesis in Physics, University of Barcelona, 2002. http://diposit.ub.edu/dspace/handle/2445/35250.
- Фисенко В. Т., Фисенко Т. Ю. Компьютерная обработка и распознавание изображений. СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. 192 с.
- 17. Стругайло В. В. // Наука и образование. 2012. № 5. С. 270.

Поступила в редакцию 17 апреля 2015 г.; принята в печать 27 августа 2015 г.

## RECONSTRUCTION OF THE NEAR-SURFACE WIND VELOCITY AND DIRECTION: SKAT-3 ORBITAL SCATTEROMETER

V. Yu. Karaev, M. A. Panfilova, Yu. A. Titchenko, E. M. Meshkov, G. N. Balandina, Yu. V. Kuznetsov, and A. L. Shlaferov

The new concept proposed during the development of the first Russian orbital scatterometer SKAT-3 requires an additional study for estimating its efficiency and comparison with the current scatterometer concepts. Using the fan antenna pattern (the angular dimensions  $1^{\circ} \times 6^{\circ}$ ), we reduced the antenna rotation speed by about a factor of three compared with the prototype (the "SeaWinds" scatterometer) and measured the backscattering cross section for each wind cell for the horizontal and vertical polarizations. The numerical model of the scatterometer was developed with allowance for the technical characteristics of the radar, orbital parameters, and observation scheme. The scatterometer operation was simulated with the subsequent swath formation and its partitioning into the wind cells. It is shown that with the fan pattern in the scatterometer, one can improve the accuracy of the wind-direction reconstruction in a wind cell due to using the radiometric resolution in the processing algorithm. The main error in determining the wind direction is related to the ambiguity  $\pm 180^{\circ}$ , which is caused by the type of the azimuthal dependence of the backscattering cross section. With the help of the twodimensional median filtering, we can significantly reduce the wind-direction reconstruction error. This error will probably be smaller than that for the current scatterometers.