

УДК 528.8+551.46.086

## ПЕРВЫЙ РОССИЙСКИЙ СКАТТЕРОМЕТР ОРБИТАЛЬНОГО БАЗИРОВАНИЯ: ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

*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>*

<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

В качестве прототипа первого российского орбитального скаттерометра был выбран скатерометр «SeaWinds» с высотой орбиты около 800 км. Вынужденное уменьшение высоты орбиты до 650 км привело к необходимости выбора между сохранением первоначальной ширины полосы обзора 1 800 км или сохранением углов падения при уменьшении полосы обзора до 1 500 км. Преимуществом более широкой полосы обзора является лучшее покрытие поверхности Мирового океана. Однако это ведёт к увеличению локальных углов падения и, соответственно, к уменьшению мощности отражённого сигнала. В результате уменьшается отношение сигнал/шум и растёт ошибка восстановления скорости и направления ветра, связанная с шумами аппаратуры. Критерием выбора является ошибка восстановления вектора скорости ветра при условии использовании одинакового привода и антенны. В ходе исследования была разработана математическая модель скаттерометра и проведено численное моделирование для обоих значений ширины полосы обзора, проведена обработка данных и выполнено сравнение точности восстановления скорости и направления ветра. Было показано, что измерение на двух поляризациях позволяет существенно повысить эту точность. Полученные результаты также показали, что скорость ветра восстанавливается достаточно хорошо для обоих полос обзора, а точность восстановления направления ветра в случае более широкой полосы обзора оказывается ниже требований технического задания на скаттерометр. Таким образом, новый скаттерометр должен иметь ширину полосы обзора 1 500 км.

### ВВЕДЕНИЕ

Основной задачей орбитального скаттерометра является восстановление поля векторов скорости ветра над поверхностью Мирового океана. Эта информация является основой для прогнозирования погоды и климата и активно ассимилируется в метеорологические и океанологические модели.

Во время полёта скаттерометр выполняет измерения в широкой полосе обзора, в частности европейский скаттерометр ASCAT имеет полосу обзора около 1 000 км, а американский скаттерометр «SeaWinds» — 1 800 км [1–4].

При разработке российского скаттерометра в качестве прототипа был выбран скаттерометр «SeaWinds». Однако высота орбиты спутника была снижена до 650 км по сравнению с 800 км для американского Quikscat. Для сохранения при этом полосы обзора в 1 800 км необходимо увеличить углы визирования, что приведёт к значительному уменьшению мощности отражённого сигнала, особенно для горизонтальной поляризации. В результате полезный сигнал может «утонуть» в шумах и восстанавливать скорость и направление слабых ветров будет невозможно.

Альтернативой является вариант уменьшения полосы обзора до 1 500 км при использовании того же привода и той же зеркальной системы. В этом случае углы визирования примерно соответствуют таковым для скаттерометра «SeaWinds». Однако серьёзным минусом с точки зрения потребителей является уменьшение полосы обзора. Поэтому для принятия обоснованного выбора

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

ширины полосы обзора необходимо провести моделирование и сравнить точность восстановления скорости и направления ветра для каждого из вариантов. Данная статья посвящена ответу на вопрос о выборе полосы обзора нового скаттерометра.

### 1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛОСЫ ОБЗОРА

При обработке скаттерометрических данных полоса обзора разбивается на ячейки с размером  $25 \times 25$  км и в каждой «ветровой» ячейке (wind vector cell, WVC) восстанавливаются скорость и направление ветра [5, 6]. Размер элемента разрешения скаттерометра не совпадает с размерами ветровой ячейки, что требует дополнительной предварительной обработки данных. Иллюстрация этой процедуры показана рис. 1 [6].

Размер элемента разрешения скаттерометра по азимуту определяется диаграммой направленности антенны, а разрешение по дальности можно улучшить за счёт применения временной и/или доплеровской селекции. В результате пятно засветки, сформированное диаграммой направленности скаттерометра на водной поверхности, разбивают по дальности на несколько частей (элементов) и анализируют каждый элемент отдельно. Из рис. 1 видно, что принадлежность элемента к ветровой ячейке определяется положением его центра: если центр элемента попадает в ветровую ячейку, то он относится к данной ветровой ячейке.

В рамках разработки математической модели скаттерометра и выполнения имитационного моделирования выполняется полное тестирование процедуры обработки. На начальном этапе находится распределение элементов по ветровым ячейкам в полосе обзора орбитального скаттерометра так же, как это будет происходить при реальных измерениях. Структура смоделированных данных будет аналогична данным орбитального скаттерометра, что позволит в дальнейшем использовать разработанный комплекс программ для обработки экспериментальных данных.

Координаты ветровых ячеек вычисляются для конкретной конфигурации скаттерометра и схемы измерения. При моделировании необходимо отслеживать поступательно-вращательное

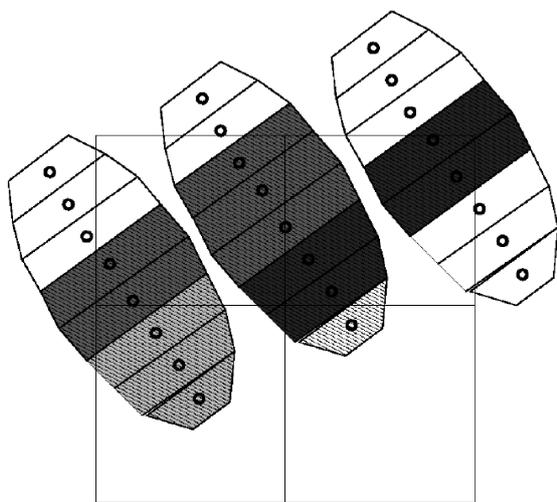


Рис. 1. Пример разбиения пятна засветки на элементы и «привязка» этих элементов к ветровым ячейкам: элементы с одним типом штриховки относятся к одной ветровой ячейке [6]

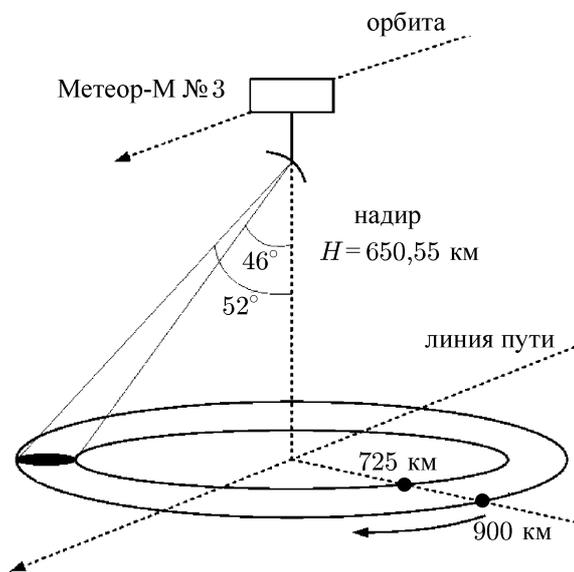


Рис. 2. Схема зондирования скаттерометра СКАТ-3 (полоса обзора 1 800 км)

Таблица 1. Параметры скаттерметров

	СКАТ-3а/СКАТ-3б
Длина волны, м	0,0218
Частота вращения, об/мин	5,556
Период повторения импульсов, с	0,0292/0,0262
Длительность импульса, мс	6,55/5,95
Высота орбиты, км	650
Угол визирования, град.	$47,0^\circ \div 51,5^\circ / 41,5^\circ \div 47,2^\circ$
Локальный угол падения, град.	$53,71^\circ \div 59,60^\circ / 46,91^\circ \div 53,96^\circ$
Полоса обзора, км	1 800/1 500
Ширина диаграммы, град.	$1,11 \times 5,48$
Поляризация	вертикальная и горизонтальная
Разрешение, км	$25 \times 25$

движение пятна засветки по морской поверхности и определять принадлежность элементов ветровым ячейкам в заданные моменты времени. Кратко обсудим процедуру формирования полосы обзора при моделировании.

Первый российский скаттерметр (далее СКАТ-3) будет размещён на океанографическом космическом аппарате Метеор-М № 3 с высотой орбиты 650 км. Схема наблюдения, согласно которой работает скаттерметр СКАТ-3, показана на рис. 2. По своим техническим характеристикам новый скаттерметр занимает промежуточное положение между скаттерметром «SeaWinds» [1] и RFSCAT [7, 8]. В отличие от «SeaWinds», СКАТ-3 использует не два, а один луч, но с веерной диаграммой направленности антенны. По сравнению со скаттерметром RFSCAT, диаграмма направленности СКАТ-3 существенно уже и составляет менее  $6^\circ$ .

Тем не менее, такая схема измерений позволяет существенно уменьшить скорость вращения антенны по сравнению со скаттерметром «SeaWinds» (примерно с 18 до 6 оборотов в минуту), а также увеличить число наблюдений каждой ветровой ячейки. Кроме того, время наблюдения ветровой ячейки увеличивается, что позволяет переключать поляризацию и проводить измерения в ветровой ячейке на двух поляризациях для одного азимутального угла при одном и том же угле падения. Измерения на двух поляризациях важны при наличии ледяного покрова, а также для повышения точности восстановления скорости и направления ветра.

Как уже обсуждалось в работе [9, 10], рассматриваются два варианта скаттерметра, отличающиеся шириной полосы обзора: 1 800 км и 1 500 км. Параметры скаттерметров СКАТ-3а и СКАТ-3б приведены в табл. 1. Подробную техническую информацию можно найти в работе [11].

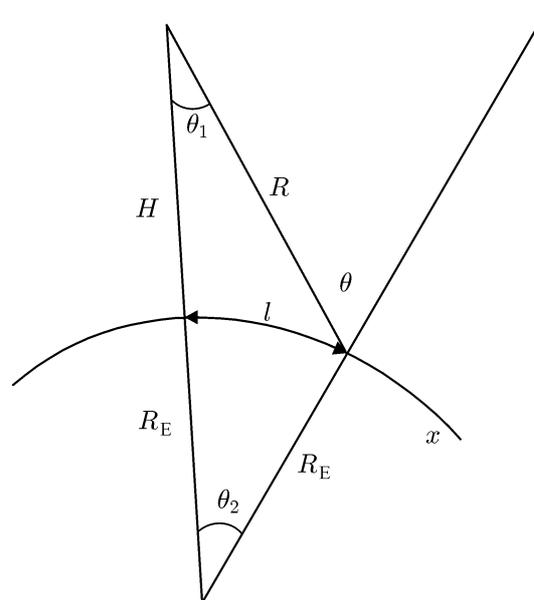


Рис. 3. Схема наблюдения в случае сферического приближения земной поверхности

Линейная скорость скаттерометра на орбите равна 7,522 км/с. При моделировании скорость относительно поверхности Земли подспутниковой точки будем считать равной 6,905 км/с. Размер пятна засветки на поверхности в обоих случаях примерно равен  $150 \times 14$  км.

При измерениях со спутника необходимо учитывать кривизну поверхности Земли, т. к. она приводит к изменению локального угла падения. Последний может существенно отличаться от угла визирования и является одним из ключевых параметров в геофизической модельной функции [12, 13].

Рисунок 3 иллюстрирует связь угла падения относительно вертикали (т. е. угла визирования) и локального угла падения с учётом кривизны земной поверхности. Локальный угол падения  $\theta$  зависит от угла визирования  $\theta_1$  и угла  $\theta_2$ , определяемого длиной дуги  $l$ , и равен

$$\theta = \theta_1 + \theta_2,$$

где  $\theta_2 = \arcsin(R \sin \theta_1 / R_E)$  и  $R = (R_E + H) \cos \theta_1 - \sqrt{(R_E + H)^2 \cos^2 \theta_1 - H^2 - 2R_E H}$ ,  $H$  — высота орбиты,  $R_E$  — радиус Земли.

Во время измерений антенна скаттерометра вращается вокруг вертикальной оси (см. рис. 2), что позволяет сформировать широкую полосу наблюдения.

Для вычисления сечения обратного рассеяния воспользуемся геофизической модельной функцией, которая в общем виде даётся формулой [14]

$$\sigma_{0p} = F_p(\theta, U_{10}, \phi) - A_{0p} [1 + A_{1p} \cos \phi + A_{2p} \cos(2\phi)]. \tag{1}$$

Здесь индекс  $p$  обозначает поляризацию (вертикальную или горизонтальную),  $\phi$  — относительное направление ветра ( $\phi = 0^\circ$  соответствует измерению навстречу ветру). Коэффициенты  $A_{1p}$  и  $A_{2p}$  зависят только от локального угла падения  $\theta$ , скорости ветра и поляризации. Подробно эти коэффициенты обсуждаются в работе [13], здесь мы воспользуемся готовыми формулами для вычисления сечения обратного рассеяния и анализа его свойств.

Процедура восстановления скорости и направления ветра в ветровой ячейке основана на измерении сечения обратного рассеяния под разными азимутальными углами и углами падения. Поскольку в формуле (1) имеются три неизвестных коэффициента, то для однозначного определения скорости и направления ветра должно быть не менее трёх измерений.

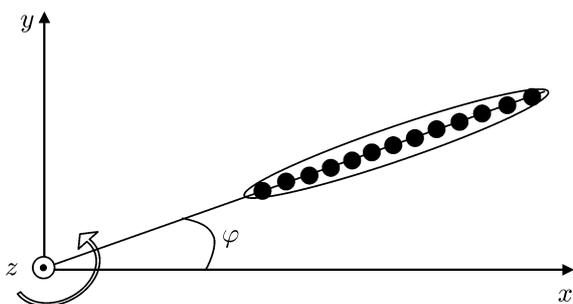


Рис. 4. Пример разбиения освещённой площадки на элементы. Кружками выделены центры элементов. Вращение происходит вокруг вертикальной оси  $z$

Процедура моделирования полосы обзора скаттерометра состоит в вычислении для каждого элемента координат его центра, локального угла падения, азимутального угла и определения его принадлежности к конкретной ветровой ячейке полосы обзора.

Перейдём в систему координат, связанную с поверхностью Земли, и будем считать, что скаттерометр движется вдоль оси  $x$  (см. рис. 4). При моделировании задаётся начальное положение спутника  $x_0, y_0$ , начальное направление зондирования  $\varphi_0$ , угловая частота вращения  $\omega_0$  и для заданных углов падения (см. Приложение, табл. П1) вычисляются длина дуги  $l$  и соответствующее ей значение  $x$ . Считаем, что  $y_0 = 0$  и центр центральной ветровой ячейки расположен на оси  $x$ , т. е. номера ячеек по оси  $y$  как положительные, так и отрицательны.

На рис. 4 показано положение антенны во время вращения в момент  $t$ . Размер минимального элемента разрешения вдоль направления зондирования составляет  $320 \pm 55$  м для полосы обзора

1 800 км и  $420 \pm 120$  м для полосы обзора 1 500 км. Для получения достаточного радиометрического разрешения отсчёты принимаемой от элементов энергии после радиометрической коррекции должны усредняться. Частично указанное усреднение по 8 отсчётам происходит до коррекции в бортовой аппаратуре скаттерометра, что позволяет уменьшить поток информации, отправляемой на Землю. Для того, чтобы уменьшить объём обрабатываемой информации и в то же время правильно отразить процесс «привязки», элементы разрешения объединяются в элементы с длиной по дальности 11,9 км (для полосы обзора 1 800 км) или 11,6 км (для полосы обзора 1 500 км). Центры таких элементов на рис. 4 показаны кружками.

Элемент с длиной 11,9 км для полосы обзора 1 800 км содержит  $31 \div 45$  минимальных элементов разрешения, а элемент с длиной 11,6 км для полосы обзора 1 500 км —  $21 \div 39$ . Поэтому можно предполагать, что погрешность аддитивна и имеет близкое к нормальному распределение.

Пусть вращение вокруг вертикальной оси происходит с угловой скоростью  $\omega_0$  в направлении против часовой стрелки. В результате координаты центра элемента на плоскости  $xy$ , расположенного на расстоянии  $l_{s1}$  от подспутниковой точки, описываются следующими формулами:

$$l_x = V_s t + l_{s1} \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (2)$$

$$l_y = l_{s1} \sin(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (3)$$

где  $V_s = 6,905$  км/с — скорость перемещения подспутниковой точки,  $\varphi_0$  — начальный угол поворота антенны. Подробно информация о диаграмме направленности и параметрах элементов приведена в Приложении.

Результаты моделирования числа наблюдений (элементов) для полос обзора 1 800 км и 1 500 км приведены на рис. 5. Имеющаяся на рис. 5 небольшая «негладкость» линий является объективным фактом, т.к. число элементов может меняться для соседних ветровых ячеек из-за несовпадения скорости вращения антенны и скорости смещения скаттерометра за период. В данном случае считается, что «нулевая» ячейка расположена на траектории движения. В связи с этим на рис. 5 есть как положительные, так и отрицательные номера ячеек. Максимальный номер определяется шириной полосы обзора (для полосы 1 800 км максимальный номер близок к 40).

При одинаковой частоте вращения число элементов будет в этом случае больше для полосы 1 500 км и, соответственно, неопределённость сечения обратного рассеяния при прочих равных условиях будет меньше. Кроме того, сечение обратного рассеяния при меньших углах падения больше, что приводит к увеличению отношения сигнал/шум. Это также повышает точность восстановления скорости и направления приповерхностного ветра по измеренным сечениям обратного рассеяния.

Наблюдение ветровой ячейки происходит под разными углами падения и разными азимутальными углами. Эффективность алгоритмов восстановления скорости ветра по сечению обратного

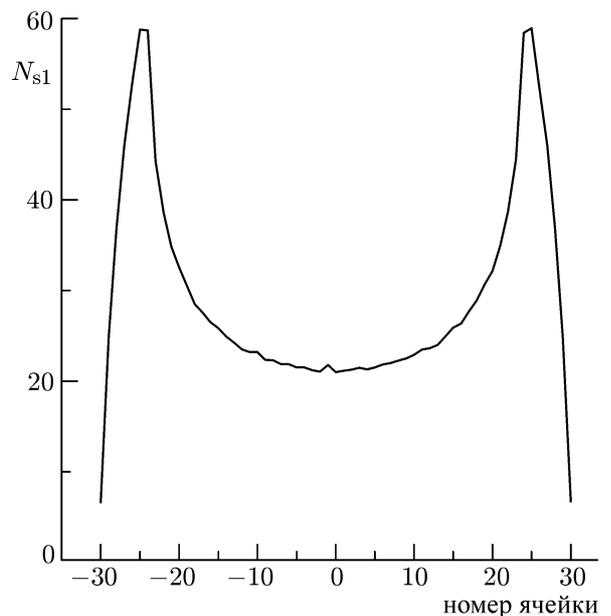


Рис. 5. Зависимость числа элементов в ячейке  $N_{s1}$  от номера ячейки. Нулевая ячейка соответствует подспутниковой точке. Полоса обзора 1 500 км

рассеяния зависит также от разности азимутальных углов, под которыми ячейка наблюдается во время пролёта. Это связано с тем, что азимутальная зависимость сечения обратного рассеяния является периодической функцией и для однозначности решения задачи необходимы измерения под разными азимутальными углами.

Таким образом, на первом этапе моделирования происходит имитация работы скаттерометра на орбите и для каждой ветровой ячейки в полосе обзора определяется число попадающих в неё элементов. Для каждого элемента записывается локальный угол падения и азимутальный угол (угол наблюдения), и эта информация используется на следующей стадии при моделировании сечения обратного рассеяния.

## 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ СЕЧЕНИЯ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ

«Заполнение» ветровых ячеек элементами позволяет перейти к следующему этапу моделирования и начать решать прямую задачу, т. е. для каждой ветровой ячейки вычислить сечение обратного рассеяния всех попавших в данную ветровую ячейку элементов. В результате получим исходный массив модельных скаттерометрических данных для последующей обработки и восстановления скорости приповерхностного ветра. Такой же массив будет получен от реального скаттерометра, и при их обработке будут использоваться одинаковые алгоритмы.

Даже в предположении, что зависимость сечения обратного рассеяния от скорости ветра, угла падения и азимутального угла описывается известной геофизической модельной функцией (см. например, работу [13]) и, следовательно, известна точно, задача определения скорости и направления приповерхностного ветра имеет однозначное решение только при наличии достаточного количества измерений под разными азимутальными углами и углами падения. Минимальное число измерений под разными углами должно быть не меньше трёх. В этом случае задача определения скорости и направления ветра может быть однозначно решена во всей полосе обзора при отсутствии погрешностей измерения сечения обратного рассеяния [6, 15].

На работу алгоритмов существенно влияют собственные шумы аппаратуры и флуктуации оценки сечения обратного рассеяния вследствие замираний радиолокационного сигнала.

Сечение обратного рассеяния при моделировании вычисляется по формуле

$$\sigma_0 = 10 \lg(P_0 + P_N), \quad (4)$$

где  $P_0$  — мощность полезного сигнала,  $P_N$  — аддитивная погрешность. Предполагается, что  $P_N$  представляет собой случайную величину, имеющую нормальное распределение с нулевым средним и среднеквадратическим отклонением

$$r = K_r P_0. \quad (5)$$

Здесь  $K_r$  — число, которое характеризует радиометрическое разрешение. Таким образом, инструментальная погрешность зависит от  $K_r$ .

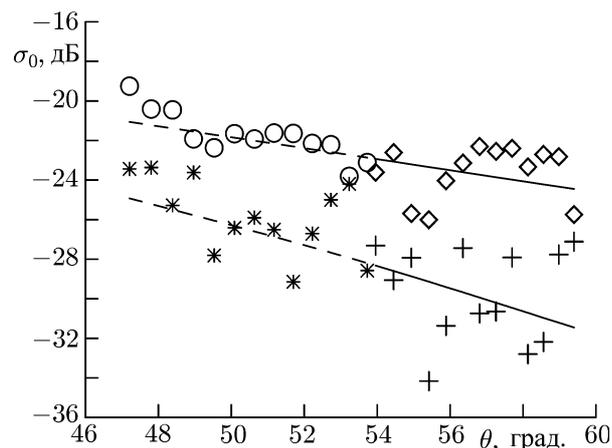
Формула для радиометрического разрешения  $K_r$  аналогична формуле, приведённой в работе [16], и имеет вид

$$K_r = \sqrt{A + B/P_0 + C/P_0^2}. \quad (6)$$

В Приложении указаны значения коэффициентов  $A$ ,  $B$ ,  $C$  для вычисления радиометрического разрешения  $K_r$  в каждом элементе для обоих вариантов скаттерометра.

Коэффициенты формулы (6) получены на основе одинаковых для обоих вариантов значения ширины полосы обзора предположений, что мощность зондирующего сигнала составляет 100 Вт,

Рис. 6. Зависимость сечения обратного рассеяния для элементов внутри диаграммы направленности антенны для полосы 1 800 км (сплошная линия) и 1 500 км (штриховая линия) от угла падения. Звёздочками и крестиками показаны результаты моделирования с учётом вносимых погрешностей для горизонтальной поляризации; кружками и ромбами — для вертикальной поляризации. Скорость ветра 6 м/с, угол между направлением зондирования и направлением ветра  $60^\circ$



диссипативные потери при приёме и передаче составляют 3,3 дБ, коэффициент шума приёмника равен 3 дБ. Циклограмма и девиация частоты зондирующего сигнала с линейной частотной модуляцией оптимизированы по критерию максимума энергии сигнала при ограничении на число независимых измерений (некогерентное усреднение).

При численном моделировании из-за аддитивного характера погрешности при малых значениях полезного сигнала сечение обратного рассеяния может становиться отрицательным, т. к. используется нормальное распределение. Поэтому при моделировании отрицательным значениям будет присваиваться значение  $-40$  дБ и в дальнейшем эти точки не будут участвовать в обработке.

Отметим, что для горизонтальной поляризации сечение обратного рассеяния существенно меньше, чем для вертикальной, поэтому разброс данных для горизонтальной поляризации существенно выше по сравнению с вертикальной поляризацией.

На рис. 6 приведена зависимость сечения обратного рассеяния в элементах от угла падения внутри диаграммы направленности антенны для полосы обзора с шириной 1 800 км (сплошная линия) и 1 500 км (штриховая линия). Вычисления выполнены для скорости ветра 6 м/с и угла между направлением зондирования и направлением распространения волнения (т. е. азимутального угла)  $60^\circ$ .

Маркерами на рис. 6 показаны результаты моделирования неопределённости, вносимой скаттерометром в значения сечения обратного рассеяния для вертикальной и горизонтальной поляризаций. Видно, что разброс значений сечения обратного рассеяния увеличивается с ростом угла падения (уменьшением сечения обратного рассеяния). Это ведёт к увеличению ошибки при восстановлении скорости ветра по данным скаттерометра.

Таким образом, в процессе формирования полосы обзора для каждой ветровой ячейки вычисляются углы падения и азимутальные углы всех элементов, попавших в ячейку. После этого задаётся скорость и направление ветра.

Программа моделирования вычисляет сечение обратного рассеяния для каждого элемента с учётом вносимой неопределённости. Это имитирует процедуру измерения скаттерометра, и в дальнейшем вычисленные значения сечения обратного рассеяния поступают на вход алгоритма обработки данных для определения скорости и направления приповерхностного ветра.

### 3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛОСЫ ОБЗОРА

Точность восстановления скорости и направления ветра в ветровой ячейке зависит от числа элементов, попавших в неё, и от углов, под которыми они наблюдаются.

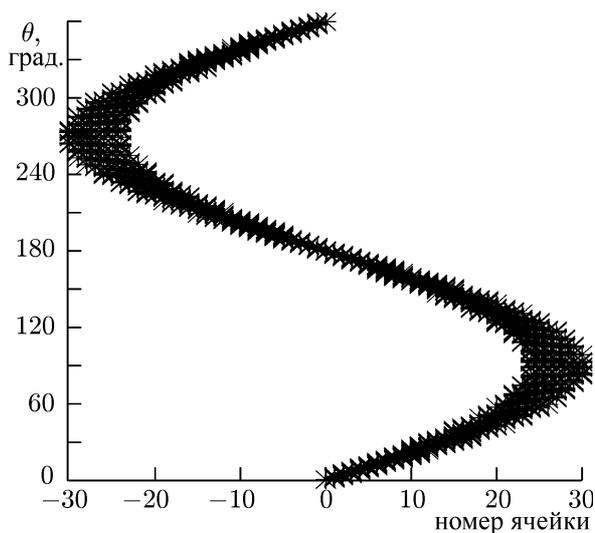


Рис. 7. Зависимость азимутального угла наблюдения элементов (угла визирования) от номера ветровой ячейки. Каждый угол отмечен звёздочкой, ширина полосы обзора 1 500 км

одним азимутальным углом, равным примерно  $90^\circ$  или  $270^\circ$ , и при наличии погрешностей задача снова решается неоднозначно. Отметим также, что на краях полосы обзора ветровая ячейка зондируется краем диаграммы направленности, где радиометрическое разрешения  $K_r$  принимает максимальное значение и, соответственно, уровень шумов высокий.

В промежутке между этими крайними случаями ячейка наблюдается в некотором интервале азимутальных углов и задача восстановления скорости и направления ветра решается достаточно успешно.

#### 4. АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ И НАПРАВЛЕНИЯ ВЕТРА

В основе алгоритма обработки скаттерометрических данных и восстановления скорости приповерхностного ветра лежит известная формула Байеса, которую применительно к рассматриваемой проблеме можно записать следующим образом [6, 17]:

$$P(\mathbf{U}_{10}/\boldsymbol{\sigma}) \propto P(\mathbf{U}_{10})P(\boldsymbol{\sigma}/\mathbf{U}_{10}). \quad (7)$$

Здесь  $P(\mathbf{U}_{10}/\boldsymbol{\sigma})$  — вероятность того, что вектор скорости ветра  $\mathbf{U}$  имеет значение  $\mathbf{U}_{10}$  при полученном в данном эксперименте наборе  $\boldsymbol{\sigma}$  значений сечения обратного рассеяния (апостериорная вероятность),  $P(\mathbf{U}_{10})$  — полная (априорная) вероятность события  $\mathbf{U}_{10}$  и, наконец,  $P(\boldsymbol{\sigma}/\mathbf{U}_{10})$  — вероятность получить в эксперименте данный набор  $\boldsymbol{\sigma}$  при скорости ветра  $\mathbf{U}_{10}$ . Набор (вектор) значений величины  $\boldsymbol{\sigma}$  является результатов нескольких измерений под разными азимутальными углами:  $\boldsymbol{\sigma} = \{\sigma_n\}$ .

После ряда предположений и преобразований (см. работу [6]), на основе формулы (7) получается наиболее употребительная в скаттерометрии статистическая оценка, известная как оценка максимального правдоподобия, и связанная с ней так называемая целевая функция. Последняя записывается в виде

$$G = \frac{1}{N} \sum_{N=1}^N \frac{(\sigma_n - \sigma_n^{\text{mod}})^2}{\sigma_{\text{noise},n}^2}, \quad (8)$$

На рис. 7 приведено распределение азимутальных углов элементов в зависимости от номера ветровой ячейки для ширины полосы обзора 1 500 км (для ширины полосы обзора 1 800 км картина качественно такая же). Каждый угол (элемент) отмечен звёздочкой. Количество элементов в каждой ячейке приведено на рис. 5.

Как обсуждалось ранее, для однозначного определения скорости и направления ветра необходимо выполнить измерения под тремя разными азимутальными углами.

Сложности определения направления ветра возникают, прежде всего, когда оно совпадает с направлением полёта, т. к. ячейка наблюдается под двумя азимутальными углами:  $0$  и  $180^\circ$ . Поскольку азимутальных угла всего два, то в общем случае решение будет неоднозначным. Кроме того, из рис. 7 видно, что по краям полосы обзора ветровые ячейки наблюдаются практически под

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.

Очевидно, что формула (8) определяет «расстояние» между вектором измерений и модельным вектором, и задача состоит в минимизации целевой функции путём перебора параметров модельной функции и, таким образом, подборки соответствующей модельной функции  $\sigma_{\text{mod}}(\mathbf{U})$ .

Если дисперсия погрешности не зависит от азимутального угла и угла падения, то формула упрощается и необходимо минимизировать следующее выражение:

$$G \propto \sum_{N=1}^N (\sigma_n - \sigma_n^{\text{mod}})^2. \quad (9)$$

Для проверки корректности работы программы моделирования были проведены вычисления в предположении отсутствия погрешностей, вносимых прибором. Обработка показала, что скорость и направление ветра восстанавливаются точно для обоих вариантов скаттерометра во всей полосе обзора. Небольшой азимутальный угол делает решение обратной задачи однозначным.

Таким образом, выполненная проверка подтвердила работоспособность разработанных программ моделирования, обработки данных и эффективность алгоритма определения скорости и направления ветра в случае идеального скаттерометра.

## 5. МОДЕЛИРОВАНИЕ СКАТТЕРОМЕТРА И ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СКОРОСТИ ВЕТРА

Наличие погрешностей, вносимых аппаратурой, приводит к ошибкам измерения сечения обратного рассеяния и в дальнейшем ведёт к ошибке восстановления скорости и направления приповерхностного ветра. Особенно это актуально для слабых ветров, когда уровень отражённого сигнала мал и отношение сигнал/шум принимает минимальное значение. При скоростях ветра ниже 3 м/с ветровое волнение не генерируется [18, 19] и, следовательно, нет связи сечения обратного рассеяния и скорости ветра. В данном исследовании мы будем рассматривать интервал скоростей ветра от 3 до 20 м/с.

Сечение обратного рассеяния в рамках его представления геофизической модельной функцией зависит от скорости и направления ветра. Поэтому для оценки точности алгоритма необходимо рассмотреть все возможные варианты, т. е. сформировать статистически достоверную выборку.

Процедура моделирования скаттерометрических измерений с последующей обработкой и определением скорости и направления ветра является длительным процессом, поэтому в данном исследовании были выбраны для сравнения три характерных значения скорости ветра: 4, 8 и 12 м/с. Предпочтений по азимутальным углам нет, поэтому вычисления выполнялись для 100 направлений с равномерным шагом в интервале от  $0^\circ$  до  $360^\circ$ .

В результате были сформированы две таблицы (см. табл. 2 для ширины полосы обзора 1 800 км и табл. 3 для ширины полосы обзора 1 500 км) с оценкой точности восстановления скорости и направления ветра для заданных скоростей ветра (усреднение по азимутальному углу проводилось с одинаковым весом, т. к. все направления равновероятны). Наличие измерений на двух поляризациях позволяет получить три оценки скорости ветра: для горизонтальной и вертикальной поляризации, а также при одновременном анализе измерений для обеих поляризации.

Точность восстановления скорости ветра зависит от его направления относительно направления полёта скаттерометра. На рис. 8 показана зависимость ошибки восстановления скорости ветра, определённой как разность между восстановленной скоростью ветра и заданной скоростью

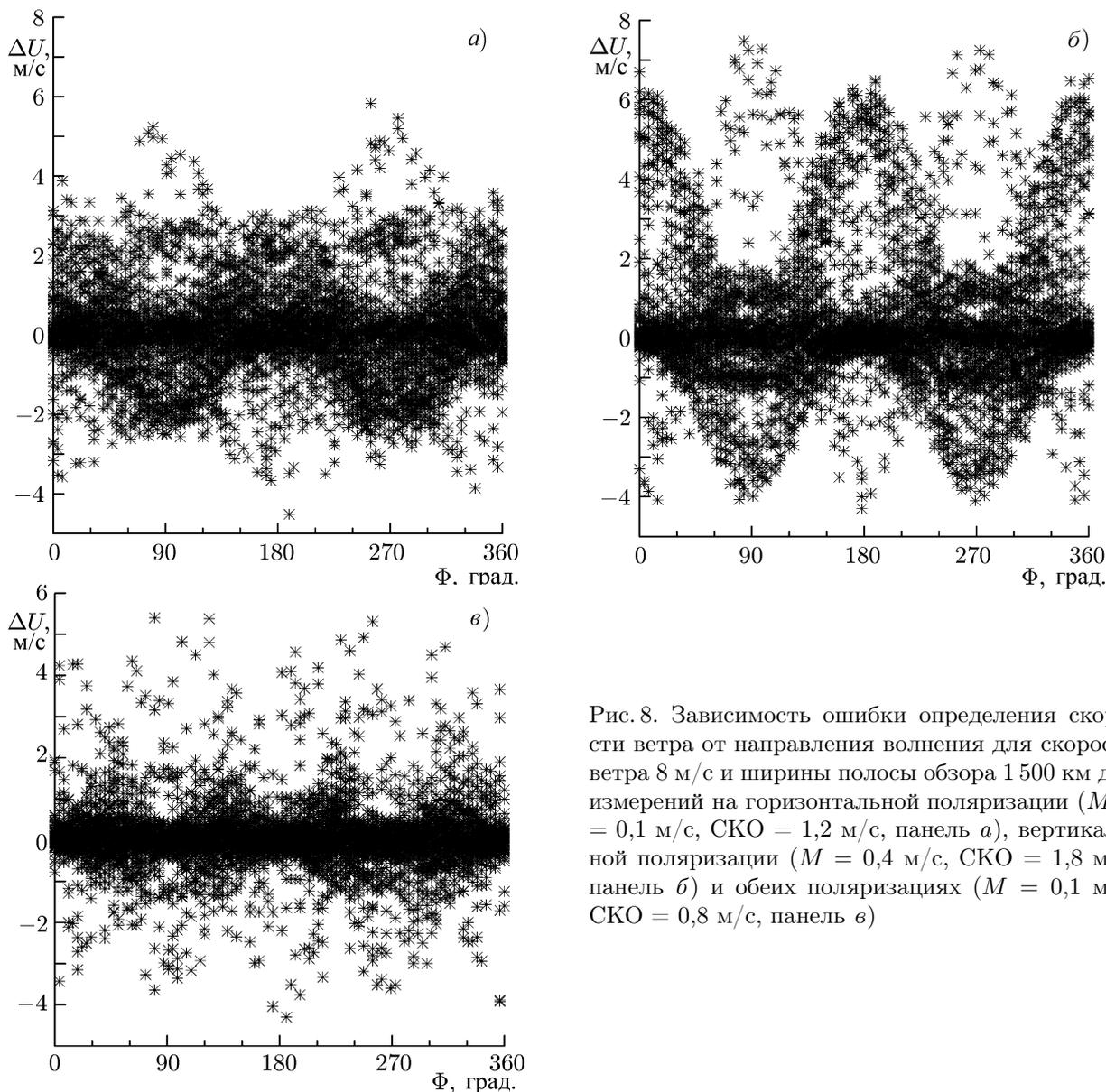


Рис. 8. Зависимость ошибки определения скорости ветра от направления волнения для скорости ветра 8 м/с и ширины полосы обзора 1 500 км для измерений на горизонтальной поляризации ( $M = 0,1$  м/с, СКО = 1,2 м/с, панель *а*), вертикальной поляризации ( $M = 0,4$  м/с, СКО = 1,8 м/с, панель *б*) и обеих поляризациях ( $M = 0,1$  м/с, СКО = 0,8 м/с, панель *в*)

ветра  $U_{10}$ ,  $\Delta U = U_{10}^* - U_{10}$ . Вычисления проводились для скорости ветра 8 м/с, направление ветра изменялось от  $0^\circ$  до  $360^\circ$ , ширина полосы обзора равнялась 1 500 км.

Из рис. 8 видно, что наибольшая ошибка определения скорости ветра обнаруживается для вертикальной поляризации (среднее значение ошибки  $M = 0,4$  м/с, среднеквадратичное отклонение СКО = 1,8 м/с). Такой разброс обусловлен тем, сечения обратного рассеяния для вертикальной поляризации, измеренные по ветру и навстречу ветру, отличаются меньше, чем в случае горизонтальной поляризации. Поэтому точность определения скорости ветра выше для горизонтальной поляризации ( $M = 0,1$  м/с, СКО = 1,2 м/с).

Комбинация измерений для вертикальной и горизонтальной поляризаций позволяет существенно улучшить результат:  $M = 0,1$  м/с, СКО = 0,8 м/с. Таким образом видно, что скаттерометр, работающий на двух поляризациях, точнее восстанавливает скорость приповерхностного ветра.

Такая высокая точность определения скорости ветра на практике не достижима, т.к. при

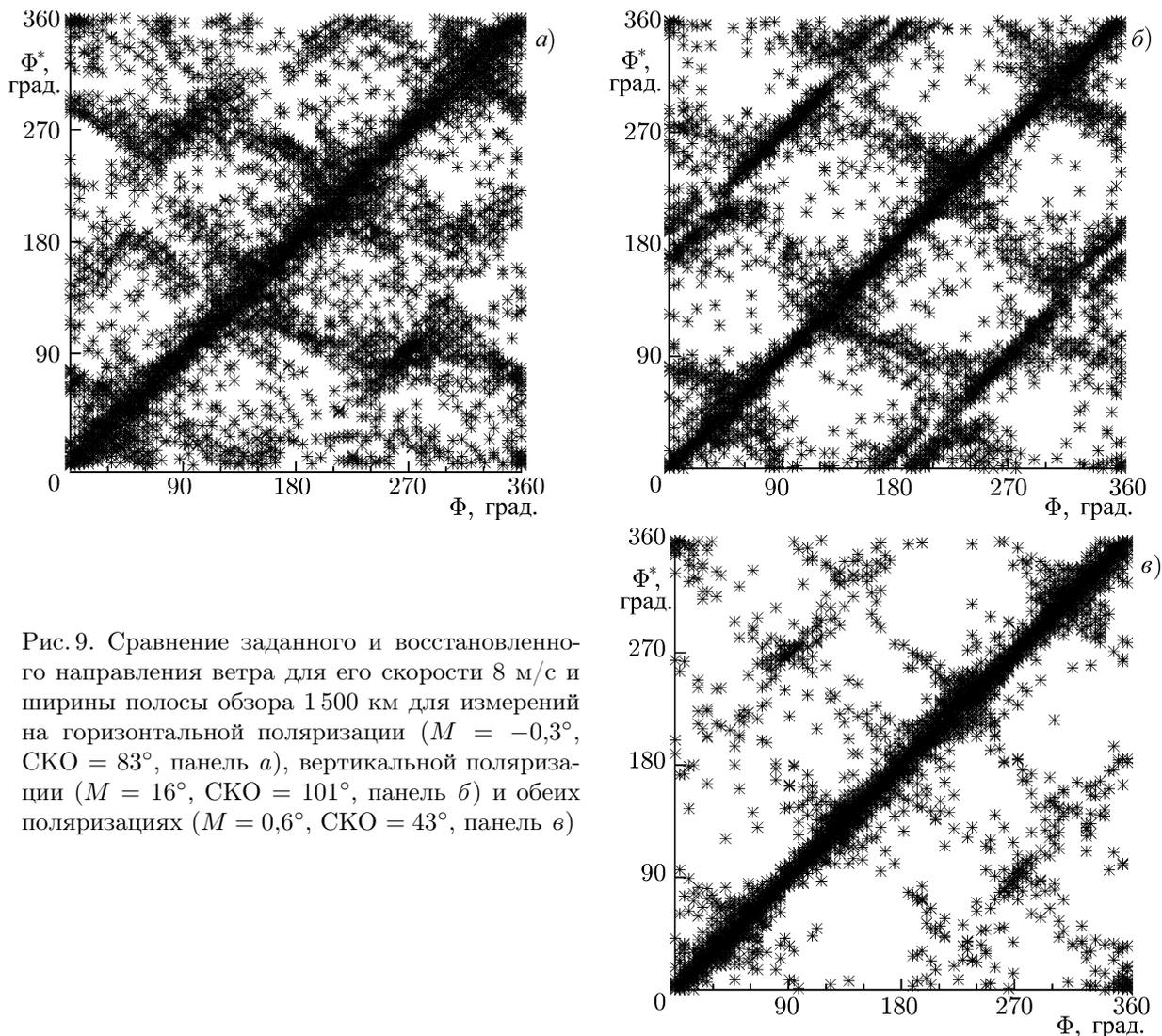


Рис. 9. Сравнение заданного и восстановленного направления ветра для его скорости 8 м/с и ширины полосы обзора 1500 км для измерений на горизонтальной поляризации ( $M = -0,3^\circ$ , СКО =  $83^\circ$ , панель *a*), вертикальной поляризации ( $M = 16^\circ$ , СКО =  $101^\circ$ , панель *б*) и обеих поляризациях ( $M = 0,6^\circ$ , СКО =  $43^\circ$ , панель *в*)

моделировании не учитывался ещё один фактор. Для вычисления сечения обратного рассеяния использовалась геофизическая модельная функция, которая однозначно связывает скорость ветра и сечение обратного рассеяния. На практике связь сечения обратного рассеяния и скорости ветра не является однозначной: есть разброс значений вблизи сечения обратного рассеяния, вычисляемого по геофизической модельной функции. При обработке это ведёт к ошибке даже при отсутствии дополнительных погрешностей, вносимых аппаратурой скаттерометра. Однако на данной стадии исследования мы не учитываем этот фактор, т. к. он одинаков для обеих ширинок обзора.

Для ширины полосы обзора 1800 км углы визирования больше, поэтому погрешность выше и в результате точность восстановления скорости ветра немного ниже. В частности, для случая одновременного анализа на обеих поляризациях среднеквадратичное отклонение равно 0,9 м/с.

Моделирование показало, что определить направление ветра значительно сложнее. На рис. 9 показано сравнение результатов восстановления направления ветра с исходными данными. Визуально для горизонтальной поляризации разброс точек существенно больше, чем для вертикальной. Однако вычисления показывают, что в первом случае в среднем ошибка меньше, т. к. для вертикальной поляризации основная ошибка, связанная с некорректным определением направ-

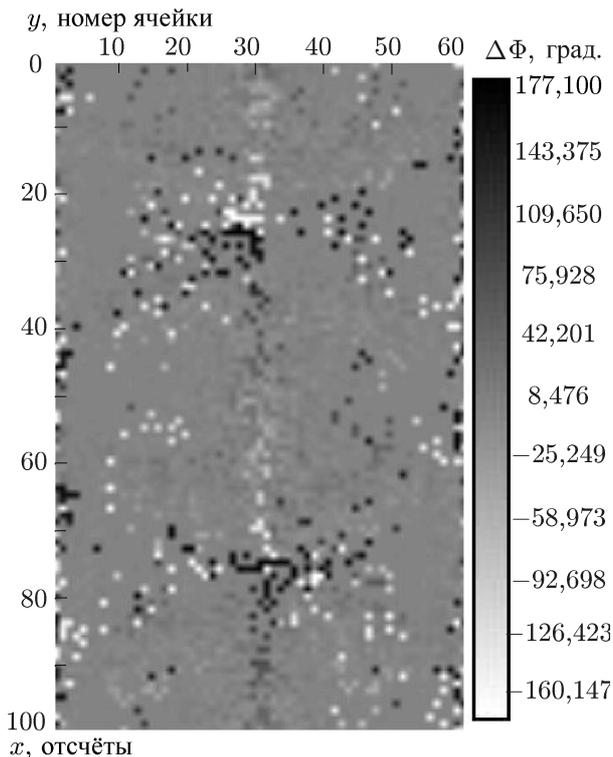


Рис. 10. Полутоновое изображение ошибки восстановления направления ветра в полосе обзора 1 500 км: скорость ветра 8 м/с, направление ветра меняется от 0° (первая линия) до 360° (100 линия). Подспутниковая траектория проходит через центр (30 ячейка)

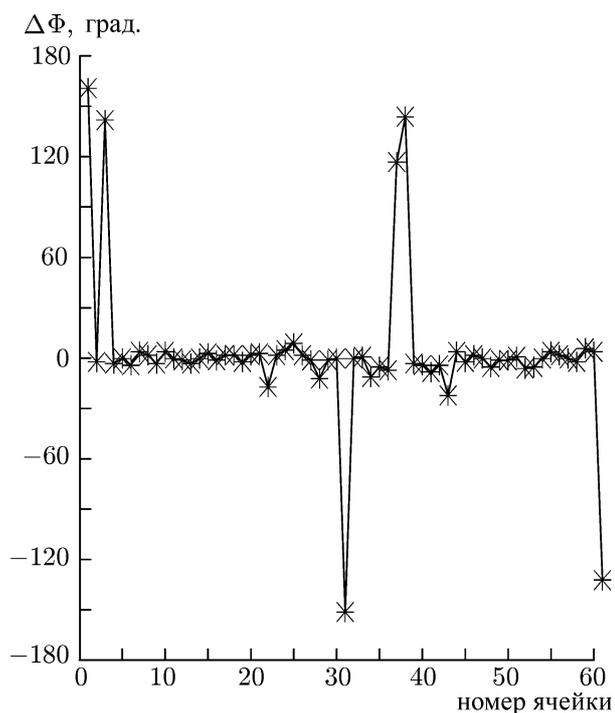


Рис. 11. Зависимость ошибки восстановления направления ветра от номера ветровой ячейки. Вычисления выполнены для скорости ветра 8 м/с и ширины полосы обзора 1 500 км

ления ветра, соответствует направлению вблизи 180°.

Для вертикальной поляризации точнее определяется линия, вдоль которой дует ветер, т.к. геофизическая модельная функция сильнее зависит от направления ветра. Однако вследствие небольшой разницы в сечениях обратного рассеяния для углов 0° и 180° для вертикальной поляризации, эти направления плохо разделяются при наличии флуктуаций сечения обратного рассеяния, связанных с шумами, и ошибка в 180° часто встречается.

Для горизонтальной поляризации эта разница между сечениями больше и указанная ошибка встречается реже. Объединив измерения на обеих поляризациях, получим существенное улучшение: среднее значение ошибки  $M_{cp} = 0,6^\circ$ , СКО = 43,4°.

Отметим, что при увеличении ширины полосы обзора растёт локальный угол падения и уменьшается сечение обратного рассеяния. Это ведёт к снижению точности. В частности, для той же скорости ветра при измерении на обеих поляризациях СКО = 69,3° (полоса 1 800 км).

Приведённые выше оценки показали, что скорость ветра восстанавливается достаточно точно для обеих полос обзора, а ошибки восстановления направления ветра отличаются значительно. Поэтому, чтобы повысить точность восстановления направления ветра, необходима дополнительная обработка.

Ошибка восстановления направления ветра связана с влиянием погрешностей измерения сечения обратного рассеяния и зависит от  $K_T$  (см. Приложение). В связи с этим надо использовать для обработки данных не формулу (9), а формулу (8). В этом случае «вес» каждого слагаемого

Таблица 2. Восстановление вектора скорости ветра для ширины полосы обзора 1 800 км (измерения для обеих поляризаций,  $\Delta U_{10} = U_{10}^* - U_{10}$ ,  $\Delta \Phi = \Phi^* - \Phi$ , где  $U_{10}^*$ ,  $U_{10}$ ,  $\Phi^*$ ,  $\Phi$  — восстановленные и измеренные значения скорости и направления ветра соответственно)

$U_{10}$ , м/с	$\Delta U_{10}$ , м/с		$\Delta \Phi$		$\Delta N$ , %
	$M$	СКО	$M_{\text{ср}}$ , град.	СКО, град.	
4	0,3	0,8	-0,5	39,5	25,9
8	0,1	0,9	-0,1	23,4	14,8
12	-0,1	1,0	-0,2	24,4	17,9

Таблица 3. Восстановление вектора скорости ветра для ширины полосы обзора 1 500 км (измерения для обеих поляризаций)

$U_{10}$ , м/с	$\Delta U_{10}$ , м/с		$\Delta \Phi$		$\Delta N$ , %
	$M$	СКО	$M_{\text{ср}}$ , град.	СКО, град.	
4	0,2	0,6	0,3	31,8	10,6
8	0,1	0,8	0,0	19,8	5,3
12	0,0	0,9	0,1	19,3	7,2

в формуле будет зависеть от уровня погрешности для каждого угла падения, что позволит повысить точность определения направления ветра. Реализация такого подхода выходит за рамки данной статьи и будет осуществлена в дальнейшем.

Из рис. 9 видно, что формальный подход к вычислению разности углов может приводить к завышению ошибки. В частности, если направление ветра было  $10^\circ$ , а восстановленное значение  $350^\circ$ , то ошибка будет не  $340^\circ$ , а всего лишь  $-20^\circ$ .

Для оценки потенциально достижимой точности определения направления ветра можно также использовать информацию из соседних ячеек. На рис. 10 приведён пример восстановления направления ветра в полосе обзора 1 500 км (61 ветровая ячейка) для 100 последовательных отсчётов. Скорость ветра 8 м/с, направление ветра меняется от  $0^\circ$  (первый отсчёт) до  $360^\circ$  (100-й отсчёт). В связи с вариацией азимутального угла наблюдается изменение точности восстановления направления ветра. Для удобства тоновое изображение показывает разность между восстановленным и истинным направлением ветра. Движение скаттерометра происходит по оси  $x$ , по оси  $y$  отложен номер ячейки. В данном случае подспутниковая точка находится в 30-й ячейке. На рис. 11 приведён типичный разрез рис. 10 по оси  $y$ . Из рис. 11 видно, что в основном доминирует ошибка  $\pm 180^\circ$ , при этом «выбиваются» одна–две точки.

Резкое изменение направления ветра примерно на  $180^\circ$  по сравнению с соседними ячейками с физической точки зрения маловероятно и трудно объяснимо, поэтому вопрос восстановления направления ветра в таких ячейках должен решаться отдельно, а в данном исследовании мы просто не будем учитывать эту ячейку (в массиве ставится «флаг» — направление ветра не определено).

В применяемых стандартных алгоритмах для обработки скаттерометрических данных используются два подхода к решению проблемы неоднозначности восстановления скорости ветра: медианная фильтрация (см., например, работу [20]) и вариационный анализ [21]. В обоих случаях для уточнения направления ветра в данной ячейке привлекается информация из соседних ячеек. Оба эти подхода будут использоваться в дальнейшем, а в данной работе такие ветровые ячейки будут только выявляться и маркироваться как ячейки с невозстановленным направлением ветра. Такие ячейки не будут учитываться при оценке точности определения направления ветра.

В результате такого «отсева» мы получим новый массив, по которому можно оценить достижимую точность восстановления направления ветра. Результаты, полученные при анализе для

обеих поляризацій, приведены в табл. 2 и 3. При использовании одной поляризации точность существенно ниже.

При оценке ошибки восстановления скорости ветра учитывались все точки. При оценке точности определения направления ветра использовались только «хорошие» ячейки, и в последней колонке таблиц показано число ячеек  $\Delta N$ , в которых направление ветра не было восстановлено.

Видно, что при низкой скорости ветра в полосе обзора 1 500 км количество ячеек, в которых направление ветра не восстановлено, превосходит 10 %, в полосе 1 800 км — 25 %. При других ветрах число точек с невосстановленным направлением в полосе обзора 1 800 км в 2–3 раза больше, чем в полосе обзора 1 500 км.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При разработке концепции первого российского орбитального скаттерометра возникла необходимость сделать обоснованный выбор между двумя значениями ширины полосы обзора: 1 800 или 1 500 км. При этом предполагается, что в обоих случаях будет использоваться одинаковый привод и зеркальная система для антенны.

Преимуществом более широкой полосы обзора является лучшее покрытие поверхности Мирового океана, но при этом увеличиваются локальные углы падения и, соответственно, уменьшается мощность отражённого сигнала. В результате уменьшается отношение сигнал/шум и растёт ошибка восстановления скорости и направления ветра, связанная с погрешностью измерения, вносимой аппаратурой.

Критерием выбора ширины полосы обзора является ошибка восстановления вектора скорости ветра, поэтому необходимо провести сравнение результатов такого восстановления для обеих полос.

В ходе проведённого исследования была разработана численная модель орбитального скаттерометра. При моделировании полностью имитировалось его движение по орбите на заданной высоте. Вращение антенны с веерной диаграммой направленности вокруг вертикальной оси формировало полосу обзора. Она разбивалась на «ветровые» ячейки с размером  $25 \times 25$  км, в которых затем восстанавливались скорость и направление ветра. За счёт селекции сигнала выполнялось деление пятна засветки на элементы и проводилась привязка этих элементов к ветровым ячейкам. Для каждого элемента вычислялись локальный угол падения, направление зондирования и сечение обратного рассеяния по геофизической модельной функции с учётом погрешностей, вносимых аппаратурой. Таким образом, была проведена численная имитация работы орбитального скаттерометра.

В результате моделирования были сформированы входные данные для алгоритма восстановления скорости и направления ветра для полос обзора 1 800 и 1 500 км. Обработка данных показала, что максимальной точности восстановления скорости и направления ветра можно добиться, используя при обработке измерения на вертикальной и горизонтальной поляризациях. Оказалось, что скорость ветра восстанавливается примерно с одинаковой точностью для обеих полос обзора.

Значительно сложнее точно определить направление ветра, особенно при его невысокой скорости. В данном случае преимущество узкой полосы обзора (1 500 км) по сравнению с более широкой (1 800 км) является очевидным, поэтому для корректного восстановления поля приповерхностного ветра новый скаттерометр должен иметь ширину полосы обзора 1 500 км и позволять проводить измерения для двух поляризацій.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект 13–05–00852а).

## ПРИЛОЖЕНИЕ

## Модель погрешности измерения скаттерометра

Как уже отмечалось ранее, на точность алгоритмов восстановления скорости приповерхностного ветра существенно влияют собственные шумы аппаратуры и флуктуации оценки сечения обратного рассеяния вследствие замираний радиолокационного сигнала. Оценим эти флуктуации, используя параметры будущего скаттерометра и описанную процедуру обработки полученных от него данных.

В нашей первой статье [9], посвящённой скаттерометру СКАТ-3, были приведены оценки влияния шумов на сечение обратного рассеяния, соответствующие средним значениям сечения обратного рассеяния в ветровой ячейке с размерами  $25 \times 25$  км.

Каждый излучённый импульс «отпечатывает» на рассеивающей поверхности много элементов разрешения. В ходе первичной обработки происходит их группировка, и в итоге формируется 13 элементов разрешения. Рассеивающая площадка «нарезается» на «элементы» по дальности. Для ширины полосы обзора 1800 км шаг по дальности равен 11,9 км, для полосы 1500 км — 11,6 км.

В табл. П1 и П2 приведены значения параметров, которые будут использоваться для оценок при моделировании шумов скаттерометра СКАТ-3 для двух значений ширины полосы обзора: 1800 и 1500 км. Эти значения получены на основе одинаковых для обоих вариантов предположений, что мощность зондирующего сигнала составляет 100 Вт, диссипативные потери при приёме и передаче равны 3,3 дБ, коэффициент шума приёмника 3 дБ. Циклограмма и девиация частоты зондирующего сигнала с линейной частотной модуляцией оптимизированы согласно критерию максимума энергии сигнала при ограничении на число независимых измерений (некогерентное усреднение).

Приведённые коэффициенты учитывают флуктуации и погрешности потерь в атмосфере (ясное небо), уровня сигнала вследствие фазовых шумов, ориентации космического аппарата и положения антенны, а также определения частоты, времени и спектральной плотности мощности шумов (радиометрическая часть). Также учитывается влияние распределения доплеровского сдвига по зондируемой поверхности с учётом достижимого уровня компенсации этого влияния.

Рис. П1. Зависимость радиометрического разрешения элемента от угла визирования для полосы 1800 км (звёздочки) и 1500 км (кружки). Вычисления выполнены для мощности 100 Вт и сечения обратного рассеяния, равного  $-10$  дБ (кривые 1),  $-15$  дБ (2) и  $-20$  дБ (3)

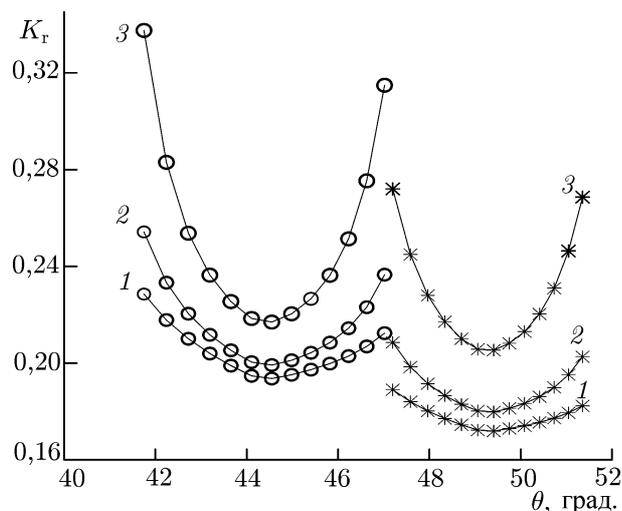


Таблица П1. Ширина полосы обзора 1 800 км. Длина элемента 11,9 км

№	$Q$ , град.	$A$	$B$	$C$
1	47,19737351	0,032428044	0,000319865	$9,57387 \cdot 10^{-7}$
2	47,58584127	0,031480907	0,000232846	$5,20370 \cdot 10^{-7}$
3	47,96608853	0,030616324	0,000181232	$3,23419 \cdot 10^{-7}$
4	48,33829489	0,029826576	0,000150213	$2,27971 \cdot 10^{-7}$
5	48,70263690	0,029104881	0,000132074	$1,80830 \cdot 10^{-7}$
6	49,05928793	0,028445247	0,000122739	$1,60224 \cdot 10^{-7}$
7	49,40841818	0,028360295	0,000122483	$1,60115 \cdot 10^{-7}$
8	49,75019462	0,028600148	0,000129674	$1,77907 \cdot 10^{-7}$
9	50,08478093	0,028849735	0,000143535	$2,16251 \cdot 10^{-7}$
10	50,41233751	0,029110639	0,000165644	$2,85897 \cdot 10^{-7}$
11	50,73302149	0,029382029	0,000198756	$4,08820 \cdot 10^{-7}$
12	51,04698667	0,029663113	0,000247328	$6,28984 \cdot 10^{-7}$
13	51,35438359	0,029953142	0,000318397	$1,03603 \cdot 10^{-6}$

Таблица П2. Ширина полосы обзора 1 500 км. Длина элемента 11,9 км

№	$Q$ , град.	$A$	$B$	$C$
1	41,74938	0,047001821	0,000506041	1,63159E-06
2	42,24048	0,044397965	0,000297970	$5,89684 \cdot 10^{-7}$
3	42,72151	0,042134313	0,000195704	$2,65202 \cdot 10^{-7}$
4	43,19265	0,040159156	0,000142426	$1,46470 \cdot 10^{-7}$
5	43,65410	0,038430408	0,000114135	$9,80979 \cdot 10^{-8}$
6	44,10604	0,036913412	0,000100118	$7,87223 \cdot 10^{-8}$
7	44,54866	0,036494471	$9,81387 \cdot 10^{-5}$	$7,66074 \cdot 10^{-8}$
8	44,98214	0,037013395	0,000106598	$8,91747 \cdot 10^{-8}$
9	45,40668	0,037657035	0,000124776	$1,20427 \cdot 10^{-7}$
10	45,82244	0,038335949	0,000156292	$1,86480 \cdot 10^{-7}$
11	46,22962	0,039045928	0,000208573	$3,28116 \cdot 10^{-7}$
12	46,62838	0,039783185	0,000295316	$6,50402 \cdot 10^{-7}$
13	47,01890	0,040544319	0,000441881	$1,44069 \cdot 10^{-6}$

В табл. П1 и П2 приведены коэффициенты  $A, B, C$  для различных углов визирования, соответствующих центрам элементов. Эти коэффициенты используются для вычисления радиометрического разрешения  $K_r$  по формуле (6).

На рис. П1 показана зависимость радиометрического разрешения от угла визирования для ширин полос обзора 1 800 км и 1 500 км. Вычисления выполнены для сечений обратного рассеяния  $-10, -15$  и  $-20$  дБ. Видно, что в центральных элементах шум значительно ниже, чем по краям диаграммы (отношение сигнал/шум обратно пропорционально величине  $K_r$ ).

Новый скаттерометр будет измерять сечение обратного рассеяния для вертикальной и горизонтальной поляризаций при одинаковых углах падения. Поскольку сечение обратного рассеяния для вертикальной поляризации значительно больше, то погрешности будут сильнее влиять на сечение обратного рассеяния для горизонтальной поляризации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Spencer M. W., Wu C., Long D. G. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 1997. V. 35, No. 1. P. 115.
2. Spencer M. W., Wu C., Long D. G. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 2000. V. 38, No. 1. P. 89.
3. Figa-Saldana J., Wilson J. J. W., Attema E., et al. // Can. J. Rem. Sens. 2002. V. 28, No. 3.
4. Lin C. C., Betto M., Belmonte-Rivas M. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 2012. V. 50, No. 7. P. 2458.
5. Leidner M., Hoffman R., Augenbaum J. SeaWinds scatterometer real-time BUFR geophysical data product, version 2.2.0. NOAA/NESDIS, February 2000. Cambridge, USA. 44 p.
6. Portabella M. Wind field retrieval from satellite radar systems: Doctoral thesis in physics, University of Barcelona. 2002. 200 p.
7. Lin C.-C., Rommen B., Wilson J. J. W., et al. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 2000. V. 38, No. 5. P. 2114.
8. Xiaolong D., Wemming L. // Proc. IGARSS 2008 (IEEE Intern. Geosci. & Remote Sensing Symposium), Boston, MA, USA, July 6–11, 2008.
9. Караев В., Титченко Ю., Панфилова М. и др. // Исследование Земли из космоса. 2015. № 6. С. 79.
10. Караев В., Панфилова М., Титченко Ю. и др. // Тезисы докл. XII открытой всерос. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», 10–14 ноября 2014, Москва: ИКИ РАН.
11. Габриэльян Д. Д., Демченко В. И., Иванов С. В. и др. // Радиотехника. 2014. № 8. С. 6.
12. Wentz F. J. // J. Atmosph. and Oceanic Technology. 1991. V. 8. P. 697.
13. Wentz F., Smith D. // J. Geophys. Res. 1999. V. 104, No. C5. P. 11, 499-11, 514.
14. Jones W., Schroeder L., Mitchel J. // IEEE J. Oceanic Eng. 1977. OE-2, P. 52.
15. Karaev V., Meshkov E., Shlaferov A., Kuznetcov Yu. // Intern. Geosci. and Remote Sensing Symposium, 21–26 July 2013, Melbourne.
16. Spencer M. W., Wu C., Long D. G. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 2000. V. 38, No. 1. P. 89.
17. Чашкин Ю. Р. Математическая статистика. Анализ и обработка данных. Ростов-на Дону: Феникс, 2010. 236 с.
18. Donelan M., Pierson W. // J. Geophys. Res. 1987. V. 92, No. C5. P. 4971.
19. Donelan M. A., Plant W. J. // J. Geophys. Res. 2009. V. 114, No. C13. C07012.
20. QuikSCAT science data product user's manual, version 2.2. Jet Propulsion Laboratory D-12985, December 2001. Pasadena, USA. 89 p.
21. Stoffelen A., de Vries J., Voorrips A. Towards the real-time use of QuikSCAT winds. Final Report USP-2/00-26, Beleidscomissie Remote Sensing. The Netherlands, De Bilt, Netherlands, 2000. 70 p.

Поступила в редакцию 11 декабря 2014 г.; принята в печать 30 апреля 2015 г.

## THE FIRST RUSSIAN ORBIT-BORNE SCATTEROMETER: NUMERICAL SIMULATION

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

The “SeaWinds” scatterometer with an orbital height of about 800 km was chosen as a prototype of the first Russian orbital scatterometer. A forced orbital-height decrease to 650 km made us choose between conservation of the initial swath width 1800 km or the incidence angles with the swath-width decreasing to 1500 km. A wider swath width has the advantage of a better coverage of the World-ocean surface. However, it leads to an increase in the local incidence angles and, hence, a decrease in the reflected-signal power. As a result, the signal-to-noise ratio decreases and an error in the wind velocity and direction reconstruction because of the equipment noise increases. The error of the wind-velocity vector reconstruction for the same drive and antenna is the choice criterion. During the study, the mathematical model of the scatterometer was developed, the numerical simulation for both swath widths was performed, the data were processed, and the reconstruction accuracies of the wind velocity and direction were compared. It is shown that the above accuracy can be significantly improved if the measurement for two polarizations is used. The obtained results also show that the wind velocity is sufficiently well reconstructed for both swaths, while the wind-direction reconstruction accuracy in the case of a wider swath is worse than that required by the technical specifications for the scatterometer. Therefore, the new-scatterometer swath should be 1500 km.