

Измерение параметров ветровых волн в области атмосферного циклона по данным поляризационного космического РСА

С.В. Переслегин, И.В. Елизаветин, А.Ю. Иванов

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН

117997 Москва, Нахимовский проспект, 36

E-mail: peresleg@sio.rssi.ru

Рассматривается задача непосредственного радиолокационного измерения параметров штормовых волн, минуя искусственные калибровки и сохраняя возможность наблюдения структуры волн при соответствующем пространственном разрешении. С этой целью разработана модель измерения уклонов анизотропных волн в поляризационном РСА и алгоритм обработки поэлементно совмещенных радиолокационных изображений соосной и перекрестной поляризационных составляющих интенсивности отраженного сигнала. Для экспериментальной проверки предложенного метода используются данные, полученные на РСА аппарата ENVISAT при съемке в районе атмосферного циклона – 3 февраля 2003 года, к северо-востоку от о. Ньюфаундленд и юго-западу от Гренландии.

Расчетная модель воспроизведения поляризационных составляющих УЭПР

В данной работе предлагается некий упрощенный анализ поляризационных составляющих УЭПР с учетом пространственной анизотропии крупных (по отношению к длине волны радиолокатора) морских волн. Анализ, основанный на работах [1, 2], ставил перед собой две задачи: а) оценить интенсивности соосной (ВВ) и перекрестной (ВГ) поляризационных составляющих с учетом анизотропии крупных волн и б) оценить возможности измерения параметров анизотропных волн, не пользуясь какими-либо (внутренними либо внешними) калибровками УЭПР, т.е. исключительно по соотношению интенсивностей поляризационных составляющих отраженного сигнала.

Исходные соотношения. При использовании известной спектральной модели развитых ветровых волн (спектр Пирсона-Мошковица), УЭПР морской поверхности при наличии только мелких (брэгговских) волн имеет вид:

$$S^0(\theta) = (a_0/8) |\gamma(\varepsilon, \theta)|^2 \eta(\lambda) \operatorname{ctg}^4 \theta \quad (1),$$

где главную роль играет коэффициент $\gamma(\varepsilon, \theta)$, комплексные значения которого для соосных поляризационных составляющих ($\gamma_{\text{вв}}$ и $\gamma_{\text{вг}}$) были в свое время получены И.М.Фуксом [3] и использовались буквально во всех последующих исследованиях (комплексная диэлектрическая проницаемость водной поверхности ε зависит от температуры, солёности и длины волны λ радиолокатора). Полученные И.М.Фуксом коэффициенты рассеяния предусматривали наличие изотропной «дифракционной решетки» мелких волн, а брэгговское (резонансное) рассеяние определялось волнами длиной $\Lambda = \lambda / 2 \sin \theta$, образующих однонаправленную решетку типа «стиральной доски», т.е. **воспринимается только одна** (в направлении на локатор или от локатора) азимутальная составляющая мелких волн. Коэффициент $\eta(\lambda) > 1$ получен в работе [1] для гравитационно-капиллярной области спектра волн, коэффициент $a_0 = 6,5 \cdot 10^{-3}$ определяется принятой моделью спектра развитых ветровых волн.

С целью упрощения анализа явлений, обусловленных модуляцией мелких волн крупными, выражение (1) аппроксимировалось экспонентой относительно некоего среднего (в рабочей области $\theta = 30^\circ - 70^\circ$) угла визирования θ_0 :

$$S^0(\theta) \approx S^0(\theta_0) \exp[-m(\theta - \theta_0)/\theta_0] \quad (2),$$

где для ВВ-составляющей имеем $m_{\text{вв}}=2,7$, для ГГ-составляющей $m_{\text{гг}}=7,8$. Влияние крупной структуры принято оценивать, учитывая два фактора: «геометрический» (т.е. угловую модуляцию нормали к малой площадке, содержащей мелкие волны) и «модуляционный», природа которого определяется взаимодействием мелких волн с локальным течением, т.е с орбитальной скоростью крупной волны. Вторым фактором мы здесь сознательно пренебрегаем.

Геометрия визирования трехмерной поверхности показана на рис.1, где $\vec{n}$ – нормаль элементарной площадки; $\vec{p}$ – вектор визирования; θ_1 – угол визирования; θ_n , φ_n – координатные углы нормали; θ – истинный угол визирования площадки. Далее вводится эквивалентный угол отклонения нормали $\theta_{\text{нэке}}=\theta_1-\theta$, так что при ориентации всей поверхности аналогично рассматриваемой площадке и отсутствии крупных волн эта площадка обладала бы УЭПР

$$S^0(\theta) \approx S^0(\theta_1) \exp[-m \theta_{\text{нэке}} / \theta_0] \quad (3)$$

При этом, для относительно пологих крупных волн будем считать θ_n , $\theta_{\text{нэке}} < 20^\circ$ при θ_1 , $\theta > 30^\circ$.

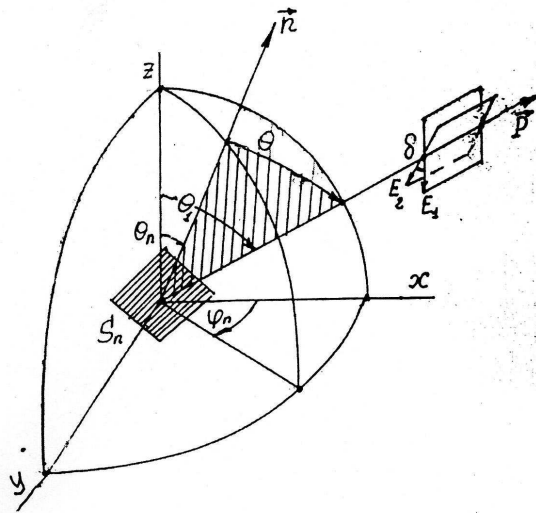


Рис. 1. Визирование трехмерной поверхности

Расчетные соотношения для вертикально-соосной и перекрестной поляризационных составляющих УЭПР. Нормальное двухосевое распределение уклонов площадки запишем в виде

$$p(\theta_{nx}, \theta_{ny}) = \frac{1}{2\pi\sigma_{\theta x}\sigma_{\theta y}} \exp\left[-0,5\left(\frac{\theta_{nx}^2}{\sigma_{\theta x}^2} + \frac{\theta_{ny}^2}{\sigma_{\theta y}^2}\right)\right] \quad (4)$$

где $\sigma_{\theta x}$, $\sigma_{\theta y}$ – стандартные отклонения уклонов волн. Далее можно показать, что $\theta_{\text{нэке}} \approx \text{tg} \theta_n \cos \varphi_n$, величина $\delta = \text{tg} \theta_n \sin \varphi_n$ играет роль «угла деполаризации» отраженного сигнала (см. рис.1), и тогда вместо (4) получаем распределение по параметру $\xi = \text{tg} \theta_n$:

$$p(\xi) = \frac{1}{2\pi\sigma_{\xi x}\sigma_{\xi y}} \exp\left[-0,5\xi^2\left(\frac{\cos^2 \phi_n}{\sigma_{\xi x}^2} + \frac{\sin^2 \phi_n}{\sigma_{\xi y}^2}\right)\right] \quad (5)$$

Среднее значение УЭПР находится путем интегрирования выражения (3) с учетом распределения (5), элементарной площадкой является $\xi d\xi d\varphi_n$. Интегрирование по ξ для случая соосно-горизонтальной поляризационной составляющей ($m_{zz}=7,8$) требует сложного математического аппарата, а для соосно-вертикальной составляющей можно обойтись простым аппаратом, разложив экспоненту $\exp(-m\xi \cos \varphi_n / \theta_0)$ в степенной ряд при допустимом (для пологих волн) ограничении $(m\xi \cos \varphi_n / \theta_0) < 1$. Кроме того, следует заменить исходные коэффициенты отражения для мелкоструктурной поверхности (коэффициенты Фукса) такими же коэффициентами, но с учетом ориентации площадки, т.е. эффекта деполяризации отраженного сигнала. Для соосной и перекрестной поляризационных составляющих эти коэффициенты приобретают вид:

$$|\gamma_{ee}|^2_{\delta} = |\gamma_{ee}|^2 (1 - 2\xi^2 \sin^2 \varphi_n) \quad (6)$$

$$|\gamma_{ez}|^2_{\delta} = |\gamma_{ee}|^2 \xi^2 \sin^2 \varphi_n \quad (7)$$

Таким образом, получаем расчетные выражения для соосной и перекрестной поляризационных составляющих УЭПР двухмасштабной взволнованной поверхности, где УЭПР мелкоструктурной поверхности выносится за интеграл:

$$\overline{S_{\text{BB}}^0} = \frac{S_{\text{BB}}^0(\theta_1)}{\pi \sigma_{\text{ex}} \sigma_{\text{ey}}} \int_0^\pi d\varphi_n \int_0^\infty \exp\left(-\frac{m\xi \cos \varphi_n}{\theta_0} - \frac{\xi^2 \cos^2 \varphi_n}{2\sigma_{\text{ex}}^2} - \frac{\xi^2 \sin^2 \varphi_n}{2\sigma_{\text{ey}}^2}\right) (1 - 2\xi^2 \sin^2 \varphi_n) \xi d\xi \quad (8)$$

$$\overline{S_{\text{BG}}^0} = \frac{S_{\text{BB}}^0(\theta_1)}{\pi \sigma_{\text{ex}} \sigma_{\text{ey}}} \int_0^\pi d\varphi_n \int_0^\infty \exp\left(-\frac{m\xi \cos \varphi_n}{\theta_0} - \frac{\xi^2 \cos^2 \varphi_n}{2\sigma_{\text{ex}}^2} - \frac{\xi^2 \cos^2 \varphi_n}{2\sigma_{\text{ey}}^2}\right) \sin^2 \varphi_n \xi^3 d\xi \quad (9)$$

Интегрирование выражений (8) и (9) дает следующий результат:

$$\overline{S_{\text{BB}}^0} = S_{\text{BB}}^0(\theta_1) \left[1 + \frac{m^2 \sigma_{\text{ex}}^2}{4\theta_0^2} - \sigma_{\text{ey}}^2 \left(1 + \frac{m^2 \sigma_{\text{ex}}^2}{\theta_0^2} \right) \right] \quad (10)$$

$$\overline{S_{\text{BG}}^0} = S_{\text{BB}}^0(\theta_1) \frac{\sigma_{\text{ey}}^2}{2} \left(1 + \frac{m^2 \sigma_{\text{ex}}^2}{\theta_0^2} \right) \quad (11)$$

Выражения (10) и (11), найденные для вертикально-соосной и перекрестной поляризационных составляющих УЭПР, хорошо отвечают физике явлений. Во-первых, видно, что перекрестная составляющая (11) возникает исключительно за счет σ_{ey} , т.е. при наличии поперечной (по отношению к лучу локатора) крупной ветровой волны. Во-вторых, при наличии только поперечной волны соосная составляющая немного уменьшается, а при наличии только продольной (σ_{ex}) – немного увеличивается. Наконец, по отношению поляризационных составляющих можно непосредственно судить об интенсивности ветровых волн, ибо оно **не зависит** от УЭПР мелкоструктурной поверхности. Можно предположить, что и неучтенный нами второй фактор (модуляция интенсивности мелких волн орбитальными скоростями крупных волн) мало скажется на отношении соосной поляризационной составляющей к перекрестной, определяемом, по-видимому, только «геометрическим» фактором, т.е. угловой модуляцией элементарной площадки.

Отношение поляризационных составляющих УЭПР. Модельные представления [1] показывают, что при интегрировании пространственных спектров уклонов и высот развитых ветровых волн $\Psi(k)$ в пределах

от $k=0$ до $k=2\pi/\lambda$ (λ – длина волны наблюдателя), наблюдаемые «в точке» дисперсии уклонов и высот имеют вид:

$$\sigma_{\theta}^2 \cong a_0 \ln \left(\frac{5,8 W_{\text{в}}^2}{\lambda g} \right) \quad (12)$$

$$\sigma_h^2 \cong a_0 \left(0,74 \frac{W_{\text{в}}^4}{g^2} \right) \quad (13)$$

где $W_{\text{в}}$ – скорость приводного ветра. В нашем случае целесообразно отнести величины (12) и (13), измеряемые радиолокатором, к скорости ветра того же направления. Это означает, что при наличии ветра, поперечного лучу локатора ($W_{\text{вп}}$), определены величины $\sigma_{\theta\text{в}}$ и $\sigma_{h\text{в}}$, а при встречном ветре ($W_{\text{вк}}$) – величины $\sigma_{\theta\text{к}}$ и $\sigma_{h\text{к}}$. Введем теперь коэффициент анизотропии уклонов $q = \sigma_{\theta\text{в}} / \sigma_{\theta\text{к}}$, который, в зависимости от направления ветра, может изменяться в некоторых пределах. Для радиолокатора сантиметрового диапазона, как видно из выражения (12), величина σ_{θ} ощутимо зависит от длины волны радиолокатора, а экспериментальные данные позволяют принять максимальную изменчивость коэффициента анизотропии уклонов, измеряемых подобным радиолокатором, в пределах от $q=0,7$ до $q=1,4$ (дисперсии уклонов при этом изменяются в 4 раза). Столь небольшая азимутальная изменчивость дисперсии уклонов объясняется тем, что в данном случае главный вклад в нее вносят почти изотропные гравитационно-капиллярные волны, а не узконаправленные (и более пологие) энергонесущие волны.

Пользуясь выражениями (10) и (11), запишем отношение поляризационных составляющих УЭПР, которое зависит только от дисперсий уклонов:

$$A_{\Pi} = \frac{\overline{S_{\text{ВВ}}^0}}{\overline{S_{\text{ВГ}}^0}} = 2 \left[\frac{1 + \frac{m^2 \sigma_{\theta\text{к}}^2}{4\theta_0^2}}{\sigma_{\theta\text{в}}^2 \left(1 + \frac{m^2 \sigma_{\theta\text{к}}^2}{\theta_0^2} \right)} - 1 \right] \quad (14)$$

Из выражения (14) видно, что при относительно слабом волнении поляризационное отношение УЭПР определяется величиной $2 / (\sigma_{\theta\text{в}})^2$, а если известен еще и коэффициент анизотропии, то «прямая» задача решается и при сильном волнении. То же самое относится и к случаю, когда известны значения $(\sigma_{\theta\text{к}})^2$ и q , однако поляризационное отношение при этом сильнее зависит от коэффициента анизотропии.

Для решения «обратной» задачи, т.е. для определения параметров волнения по данным поляризационного радара, на основе приведенных выражений построим графики, учитывающие параметры определенного радара. Например, для РСА на аппарате ENVISAT примем $m=2,7$, $\theta_0=45^\circ$, $\lambda=5,6\text{см}$. Согласно выражениям (12) и (13), на **рис.2** построены зависимости $(\sigma_{\theta})^2$ и σ_h от скорости ветра $W_{\text{в}}$. Как указывалось выше, азимутальное направление волн здесь приходится принимать соответствующим направлению ветра. Видно, что область изменчивости уклонов относится к малым скоростям ветра, а изменчивости высот – к большим скоростям ветра. На **рис.3** построены графики поляризационного отношения УЭПР (14) для двух случаев. В первом случае (**рис.3а**) известны дисперсия поперечных уклонов $(\sigma_{\theta\text{в}})^2$ и коэффициент анизотропии $q = \sigma_{\theta\text{в}} / \sigma_{\theta\text{к}}$, во втором случае (**рис.3б**) – дисперсия встречных уклонов $(\sigma_{\theta\text{к}})^2$ и коэффициент анизотропии. Естественно, что при изотропном волнении ($q=1$) зависимости поляризационного отношения от дисперсии уклонов одинаковы.

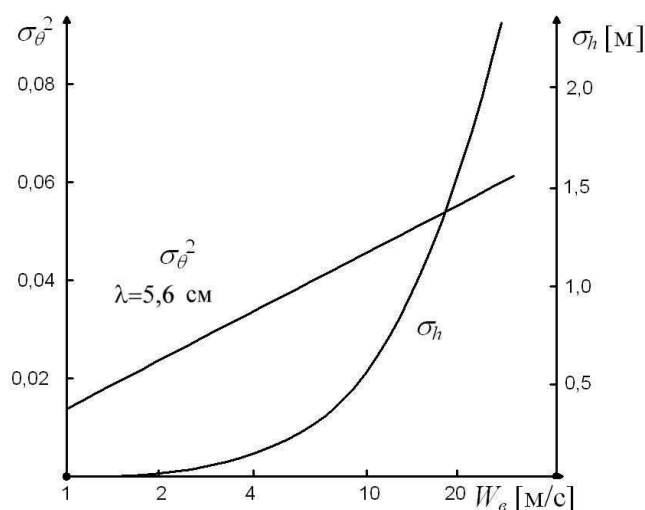


Рис. 2. Зависимости дисперсии уклонов $(\sigma_\theta)^2$ и стандартного отклонения высот σ_h развитых ветровых волн от скорости приводного ветра W_e

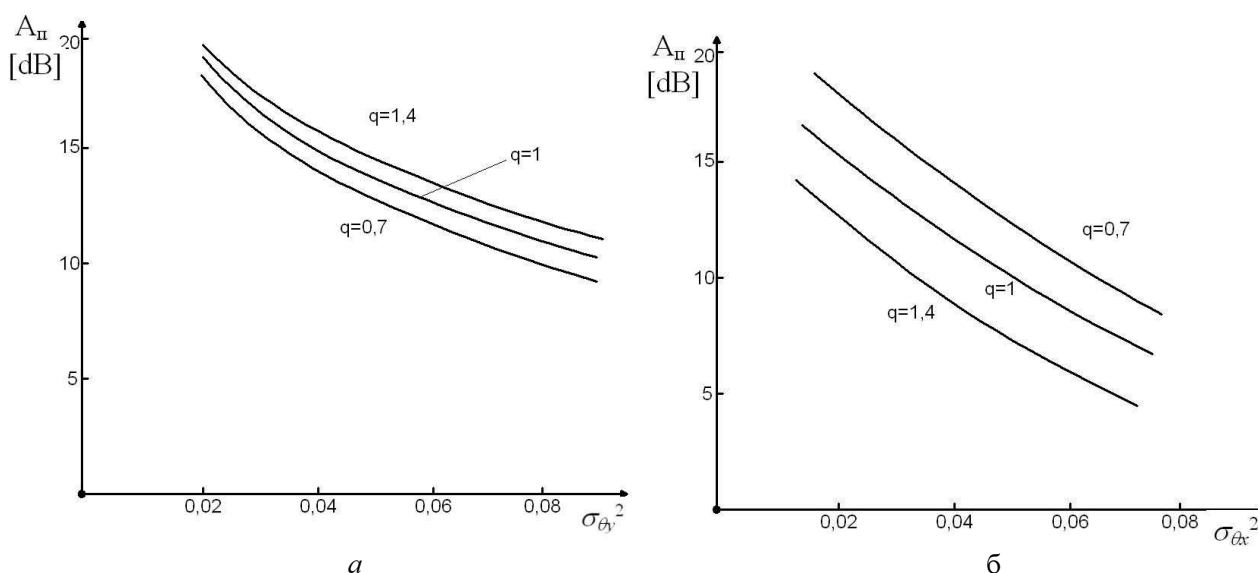


Рис. 3. Отношение интенсивностей поляризационных составляющих отраженного сигнала (соосной ВВ к перекрестной ВГ): а) в зависимости от дисперсии поперечных уклонов $(\sigma_\theta)^2$ и степени анизотропии волн $q = \sigma_{\theta_y} / \sigma_\theta$; б) в зависимости от дисперсии встречных уклонов $(\sigma_\theta)^2$ и степени анизотропии волн $q = \sigma_{\theta_y} / \sigma_\theta$

Обработка данных поляризационного РСА

Полученные из архива ESA данные поляризационного РСА аппарата ENVISAT были записаны на 9-ти CD-дисках. Каждый диск содержал поэлементно совмещённые амплитудные портреты двух поляризационных составляющих (VV и VH) в кадре размером 100x100 км, при разрешении ~30м x 30 м, что соответствует необходимому (минимальному) подавлению спекл-шума при 6-ти независимых отсчётах сигнала на данной площадке.

Дальнейшие операции заключались в следующем:

- девять фрагментов «сшивались» в один кадр размером 100 x 900 км, при этом автоматически выравнивались средние яркости. Таким образом были сформированы кадры VV и VH составляющих (рис.4а и рис.4б), прокалиброванные по амплитуде;
- вводилась логарифмическая калибровка, (в децибелах относительно начального уровня U_0), тогда $A = 20 \lg(U/U_0)$;
- путём поэлементного вычитания логарифмированных амплитуд формировался кадр VH/VV, прокалиброванный в децибелах, т.е. $(A_{\pi})^{-1} = A_{\pi} - A_{\pi\pi}$ (рис. 4 в);

- для получения искомого результата при измерении параметров штормовых волн, выделялся характерный фрагмент высокого разрешения в сформированных VV, VH и VH/VV изображениях, сопровождаемый компьютерным «разрезом» по заданной линии (рис. 5, рис.6 и рис. 7).

Анализ полученных фрагментов и их разрезов показал, что выдвинутая модель прямых измерений дисперсий уклонов штормовых волн подтверждается. Рис. 5, отображающий сильную амплитудную модуляцию мелких волн в областях конвергенции (схождения орбитальных течений) энергонесущих волн, позволил оценить и среднюю по разрезу длину энергонесущей волны, которая составила $L_0 = 160$ м. Для развитых ветровых волн это соответствует фазовой скорости $V_\phi = 17$ м/с, что и принимается за скорость приводного ветра. Сравнение изображений рис. 5 и рис. 6 показывает, что действительно, как и предсказывает модель, коэффициент амплитудной модуляции мелких волн крупными остался прежним при существенном уменьшении средней интенсивности сигнала перекрёстной поляризации по сравнению с соосной. И, наконец, калиброванный в дБ «разрез» рис. 7 показывает, что величина поляризационного отношения $A_\Pi = \overline{S_{VV}^0} / \overline{S_{VH}^0}$ в среднем по разрезу составляет 12 дБ – при существенном подавлении анизотропной «паразитной» модуляции и при слабой «остаточной» анизотропии наблюдаемого волнового поля. Из нашей модели (рис. 3) следует, что это отвечает дисперсии уклона $\sigma_\theta^2 = 0,08$ (стандартному отклонению 16°). В то же время, для модели развитых волн (рис. 2), предполагаемой скорости ветра $W_B = 17$ м/с отвечает существенно меньшая дисперсия уклона $\sigma_\theta^2 = 0,05$ при ее измерении данным радиолокатором. Таким образом, измеренная дисперсия уклона реальных штормовых волн оказалась большей, нежели следует из приближения развитых волн при известной скорости ветра.

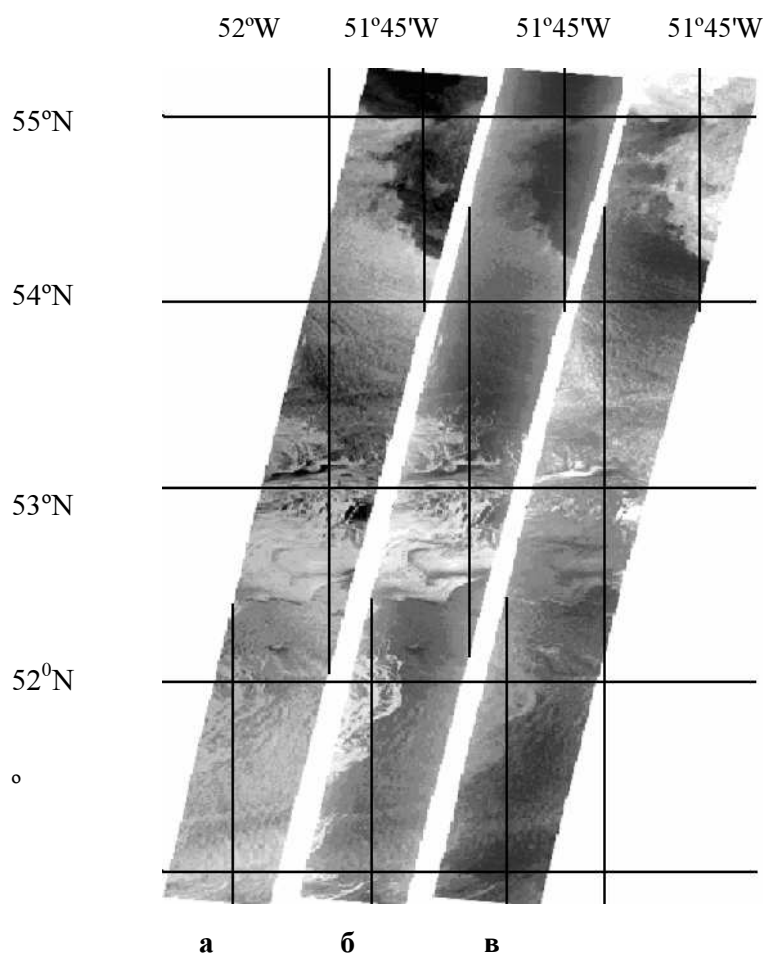


Рис. 4. Поэлементно совмещенные радиолокационные изображения амплитуды сигнала, полученные PCA аппарата ENVISAT, 15.02.2003, время 13.34 – 13.52 UTS. Длина кадра, «сшитого» из 9-ти элементов, составляет 900км, ширина 100км. а) – составляющая VV, б) – составляющая VH, в) – полученное изображение VH/VV

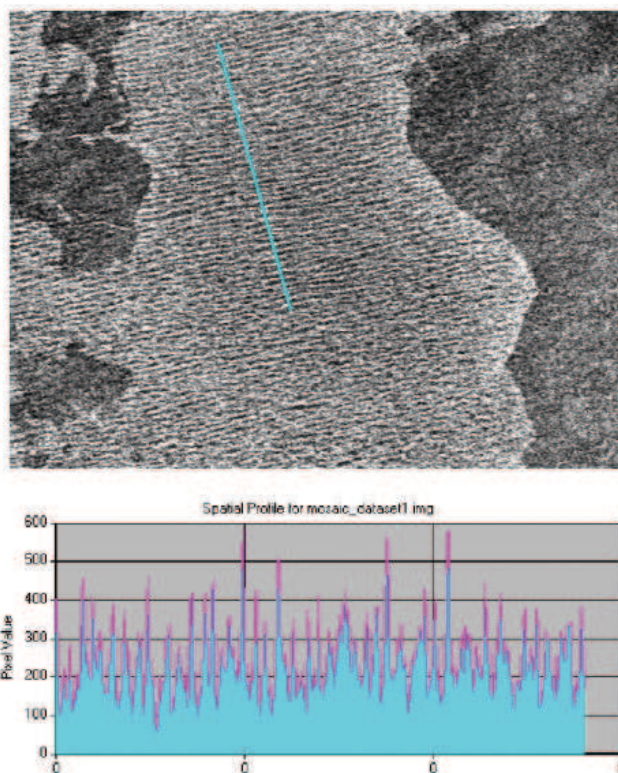


Рис. 5. Выделенный фрагмент VV изображения. Осредняющая площадка 30×30 м, длина компьютерного разреза 6,2 км, средняя по разрезу длина энергонесущей волны 160 м

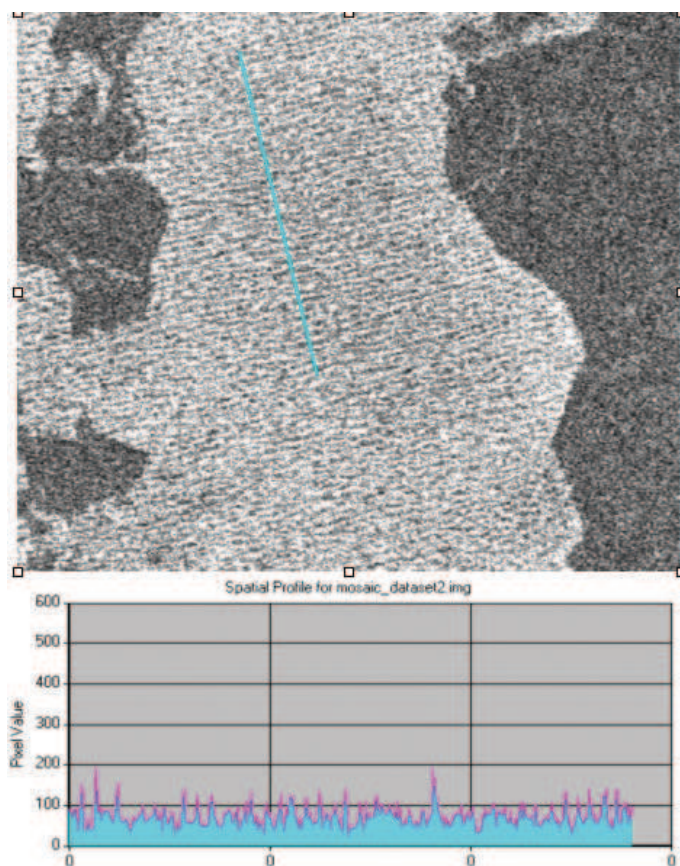


Рис. 6. Тот же фрагмент VH изображения. Средняя амплитуда сигнала резко уменьшилась, средний коэффициент амплитудной модуляции УЭПР энергонесущими волнами уменьшился незначительно

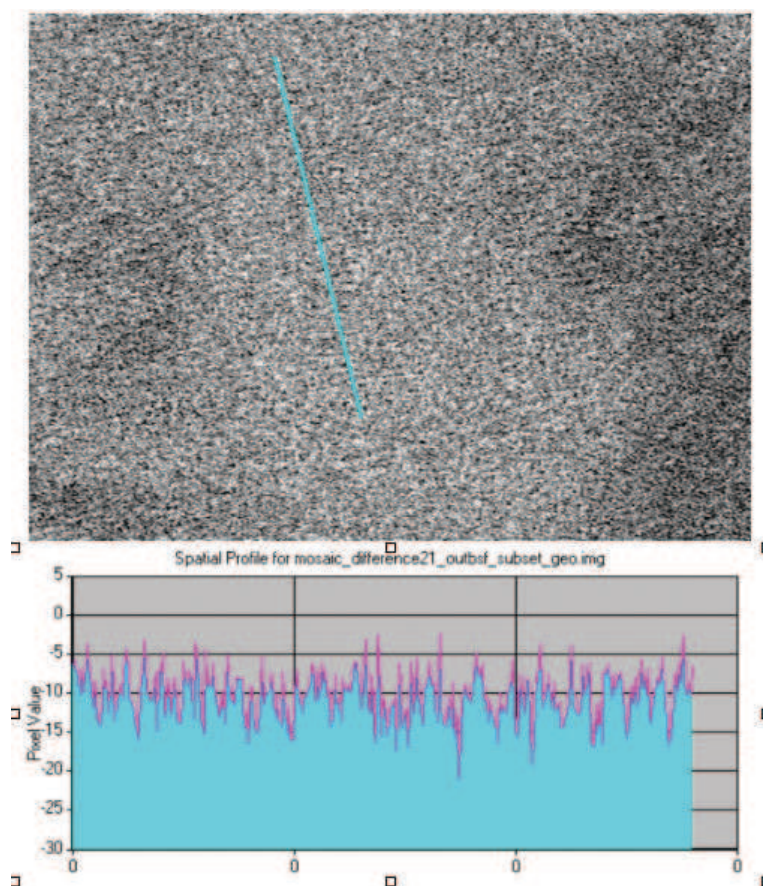


Рис. 7. Тот же фрагмент VH/VV изображения, представляющий разность логарифмированных VH и VV изображений. Компьютерный разрез калиброван в дБ. Среднее по разрезу «поляризационное отношение» УЭПР (минус 12 дБ) соответствует дисперсии уклонов 0,08 или стандартному отклонению 16^0 . Изображение и его разрез иллюстрируют слабую анизотропию «интегральных» уклонов и сильное подавление амплитудной модуляции мелких волн крупными. Вклад анизотропной флуктуационной составляющей резко падает

Выводы

1. Анализ взаимосвязей соосной (ВВ) и перекрестной (ВГ) поляризационных составляющих УЭПР с параметрами уклонов крупных волн (дисперсией и коэффициентом анизотропии) при боковом РЛ обзоре морской поверхности показывает, что способом измерения этих параметров является формирование РЛ изображений, отображающих отношение данных поляризационных составляющих. При невысокой (в реальных условиях) степени анизотропии можно определить поперечную составляющую дисперсии уклонов $(\sigma_{\theta})^2$ с допустимой точностью (рис.3а). При определении по этим данным скорости ветра (рис.2) необходимо помнить об условности модельных представлений, связывающих статистические параметры развитых морских волн со скоростью ветра. Таким образом, модель взаимосвязей поляризационных составляющих УЭПР с параметрами уклонов ветровых волн дает возможность непосредственно определять дисперсии уклонов по соотношению VH/VV, без использования искусственных калибровок УЭПР.

2. Обработка данных ENVISAT (выделенный фрагмент штормовых волн) подтверждает эту возможность. Измеренное осредненное значение дисперсии составило 0,08, что превышает модельные значения для «развитых» ветровых волн при реально наблюдаемых длинах энергонесущих волн (~ 160 м) и предполагаемой для них скорости ветра ~17 м/с. Радиолокационное VH/VV изображение (рис. 7) при этом практически не содержит ярких полос, обусловленных эффектом амплитудной модуляции мелких волн на склонах энергонесущих волн. Это обстоятельство позволяет считать, что мы действительно имеем дело с радиолокационным восстановлением поля уклонов морских волн – при глубоком подавлении

«паразитного» нелинейного эффекта. Основываясь на предлагаемом принципе восстановления поля уклонов, в дальнейшем следует строить и анализировать пространственные спектры уклонов ветровых волн, свободные от эффекта «паразитной» модуляции.

3. Общая картина циклона, наблюдаемая на 900-км отрезке траектории ENVISAT (рис.4) чрезвычайно сложна. Можно предположить, что эта картина, как и отдельный её фрагмент (рис 5 – рис. 7) содержит элементы разбитого волнами ледового покрова (ледяная «шуга»). Однако же главный результат остается прежним: наличие «шуги» несколько не мешает восстановлению поля уклонов ветровых волн, а более сильный в этом случае эффект «паразитной» амплитудной модуляции прекрасно подавляется.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 03-02-16763

Литература

1. Переслегин С.В. Связь СВЧ-рассеяния от морской поверхности с пространственно-временными характеристиками развитого волнения // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1975. Т.11. № 5. С. 481-490.
2. Переслегин С.В. Статистические характеристики СВЧ-рассеяния от морской поверхности с учетом конечного разрешения и фактора деполяризации // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1975. Т.11. №6. С. 610-619.
3. Фукс И.М. К теории рассеяния радиоволн взволнованной поверхностью моря // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 1966. Т. 6. №5. С. 876-885.