

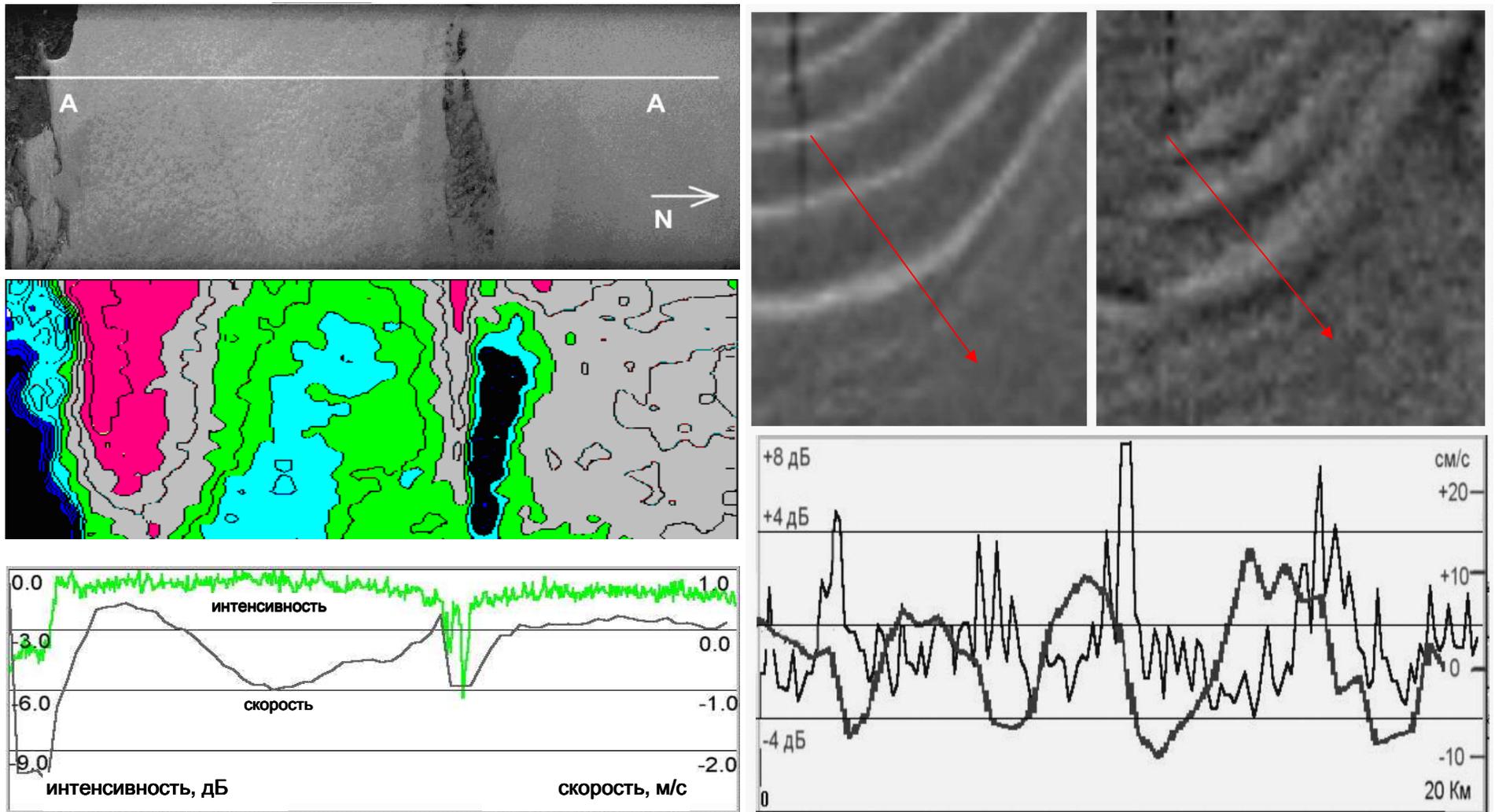
Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН

Переслегин С.В., Емельянов Б.В., Ивонин Д.В.

Радиолокационная векторно-скоростная интерферометрия морской поверхности из космоса

- 1. Радиально-скоростные изображения поля течений в космических РСА**
- 2. Радиолокационное измерение скорости и угла сноса летательного аппарата**
- 3. Основные соотношения в космических РСА и ИРСА. Энергетика и флуктуационная чувствительность**
- 4. Измерение вектора скорости фоновой площадки в ИРСА**
- 5. Скоростные ИРСА на аппаратах Shuttle и TerraSAR-X. Их параметры и полученные результаты**
- 6. Основные выводы и рекомендации**

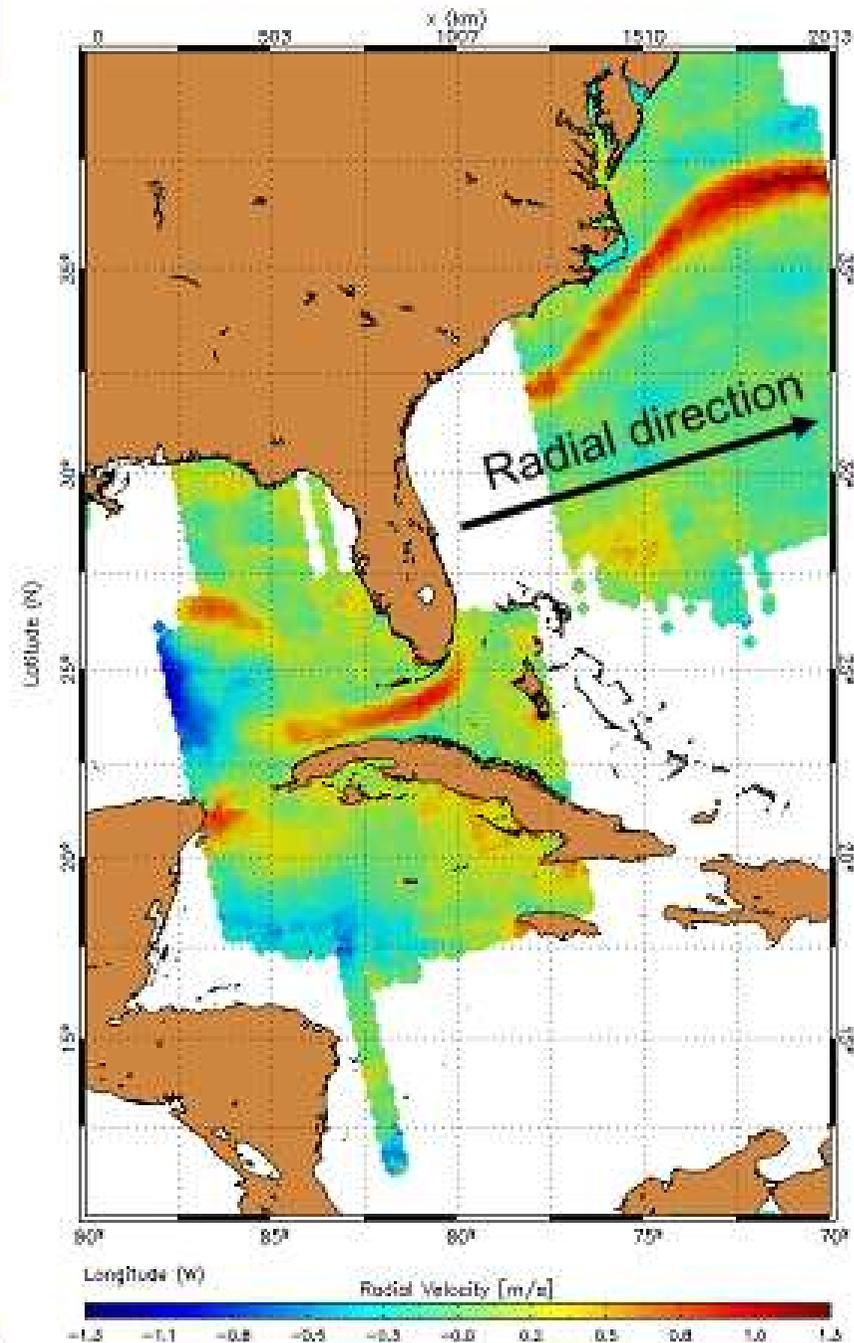
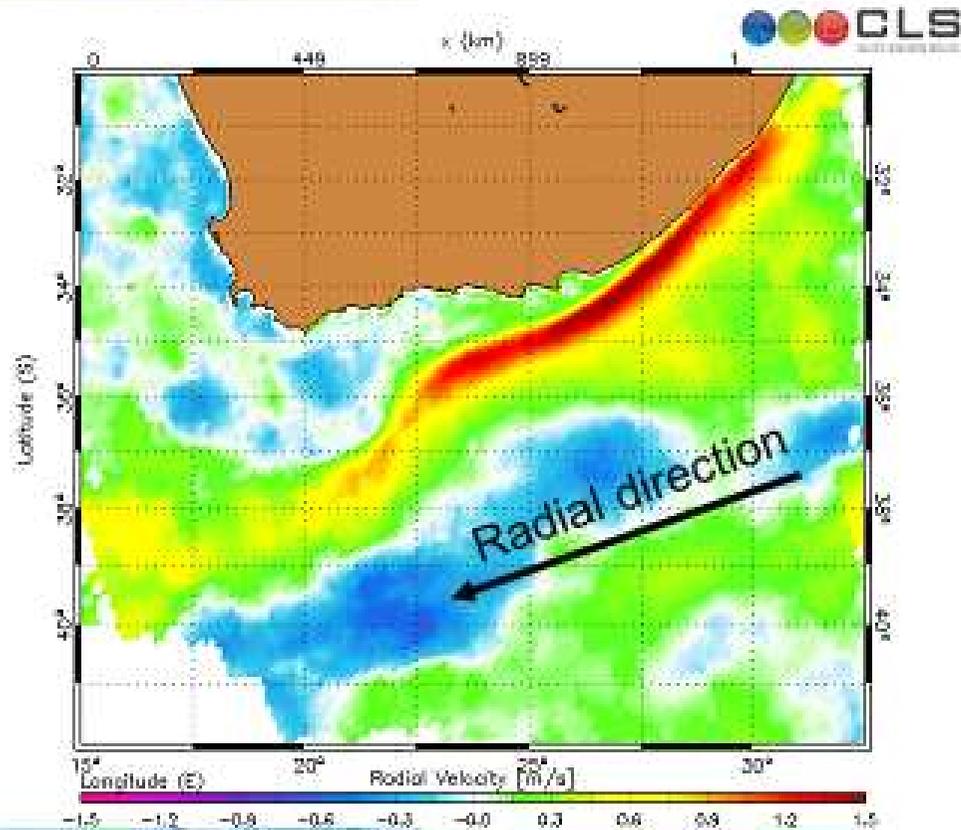
Полученные скоростные изображения морской поверхности $V_y(x,y)$



а – яркостное изображение Флоридского пролива,
 (КА ERS-1, 28.12.1995), б – скоростное изображение,
 в – разрезы изображений по линии AA

Яркостное и скоростное изображения цуга внутренних
 волн в Гибралтарском проливе (КА ERS-1, 01.01.1995),
 внизу – совмещение разрезов по указанным сверху
 стрелкам

Annual mean over Agulhas and Gulf stream using ASAR Wide swath ascending tracks



Скоростные портреты в РСА при использовании доплеровского сдвига медианы спектра (Достовалов, Переслегин, Неронский, Океанология, 2003)

При восстановлении скоростных портретов океанских течений и и других крупных (фоновых) объектов требовалось разрешение порядка 1км – что достигалось в РСА ERS 1/2 при использовании нефокусированного режима (или даже режима PPA) и некогерентного суммирования большого числа

отсчётов частоты сигнала. Для доплеровского спектра гауссовой формы $G(f) = \exp\left[-\pi \frac{(f - f_0 + f_{dy})^2}{\sigma_f^2}\right]$,

$\sigma_f = 2W_x/L_x$ – полуширина доплеровского спектра от стационарной площадки. Сдвиг f_{dy} оценивался путём вычисления положения медианы спектра относительно её положения для района, где заведомо нет течения. Скорость вращения Земли исключалась при обработке. Флуктуационно-скоростная чувствительность (в пренебрежении шумом приёмника) **не зависит от степени фокусировки** (величины

L_x) и для симметричной стационарной площадки **любой величины** составляет $\delta V_y = \frac{W_x}{2H \operatorname{tg} \gamma_n \sqrt{N_0}}$, где

$N_0 = \frac{4\Delta f}{cD_x}$ – число независимых отсчётов сигнала на 1 м² поверхности. Для РСА ERS1/2 при

$D_x = 10\text{м}$, $\Delta f = 15\text{МГц}$, $\gamma_n = 30^\circ$, $N_0 = 0,02\text{м}^{-2}$, мы имели $\delta V_y \approx 10\text{см/с}$. Для малой стационарной площадки при полной фокусировке мы имели бы точно такую же величину чувствительности на площадке

размером $r_x = 5\text{м}$: $\delta V_y = \frac{\lambda W_x}{2L_x \sin \gamma_n} = \frac{r_x W_x}{2H \operatorname{tg} \gamma_n}$, однако для этого необходимо соответствующее разрешение

по дальности $r_y = r_x$, обеспечиваемое шириной спектра сигнала Δf , что требует (при наличии собственного шума приёмника) соответствующей энергетики. Например, для получения флуктуационной чувствительности $\delta V_y = 3\text{см/с}$ необходимо иметь $N_0 = 0,2\text{м}^{-2}$. Если горизонтальный размер антенны составляет $D_x = 5\text{м}$ при $\Delta f = 100\text{МГц}$, а энергетика позволяет получить отношение сигнал/шум порядка 10дБ при работе по морской поверхности (TerraSAR-X), то задача решается – как для орбитальных скоростей крупных волн, так и для течений. Однако, получению фокусированного разрешения в РСА мешает случайная составляющая той же орбитальной скорости, расширяющая спектр частотных флуктуаций сигнала. При волнении средней балльности возможно работать с разрешением $r_x > 20\text{м}$.

Измерение вектора скорости самолёта в корреляционном измерителе (КИСС). М.К.Боркус, А.Е.Чёрный, 1975

Используются задержки огибающих квазинепрерывного отражённого сигнала на двух антенных базах, W_x – скорость самолёта, β – угол сноса. Отслеживались максимальные значения коэффициентов корреляции, достигаемые при $\tau_{x0} = l_x / W_x \cos \beta$ и $\tau_{y0} = l_y / W_x \sin \beta$, тогда

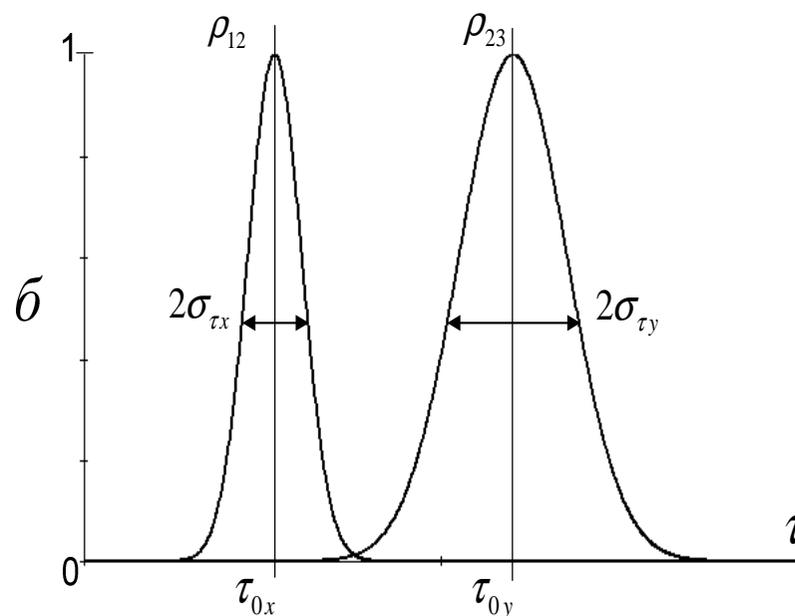
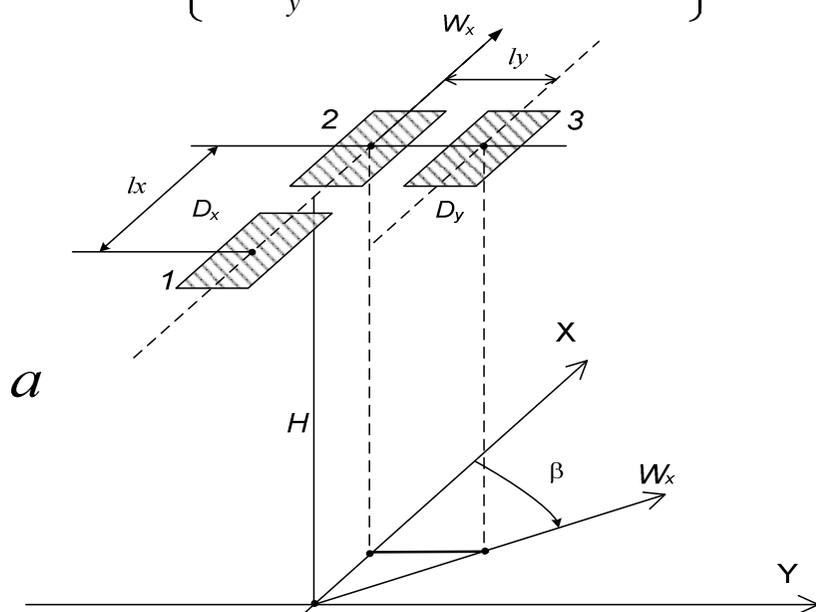
$$\beta = \arctg \frac{l_x \tau_{y0}}{l_y \tau_{x0}} \quad W_x = \frac{l_x}{\tau_{x0} \cos \beta}$$

Полуширина гауссовых корреляционных функций

$$\sigma_{\tau_x} = \frac{D_x}{W_x \cos \beta}, \quad \sigma_{\tau_y} = \frac{D_y}{W_x \sin \beta}$$

$$\rho_{23}(\tau_y) \approx \exp \left\{ -\frac{2\pi}{D_y^2} [l_y - \tau_y W_x \sin \beta]^2 \right\}$$

$$\rho_{12}(\tau_x) \approx \exp \left\{ -\frac{2\pi}{D_x^2} [l_x - \tau_x W_x \cos \beta]^2 \right\}$$



Основные соотношения в РСА

Отклик когерентного накопителя

$$g(x) = \frac{g_0}{D_x} \int_{-L_x/2}^{L_x/2} \exp \left\{ -j \left[\varphi_0 + \frac{k}{R_n} \left(x - \frac{V_y R_n \sin \gamma_n}{W_x - V_x} - u \right)^2 - \frac{ku^2}{R_n} \right] \right\} du$$

При аппроксимации $\sin\beta/\beta \rightarrow \exp(-\beta^2/2\pi)$,

$$\beta = \frac{kL_x}{R_n} \left(x - \frac{V_y R_n \sin \gamma_n}{W_x - V_x} \right) \quad \text{свёртка с} \quad g_{00} = \exp \left(j \frac{ku^2}{R_n} \right)$$

даёт

$$g(x) = g_0 \frac{L_x}{D_x} \exp \left[-\frac{2\pi L_x^2}{\lambda^2 R_n^2} \left(x - \frac{V_y R_n \sin \gamma_n}{W_x - V_x} \right)^2 \right] \exp \left\{ j \left[\varphi_0 - \frac{2\pi}{\lambda R_n} \left(x - \frac{V_y R_n \sin \gamma_n}{W_x - V_x} \right)^2 \right] \right\}$$

Видно, что наличие V_y приводит к смещению как амплитуды (т.е. яркостной отметки) по оси X, так и к фазовому набегу внутри отметки. Продольное разрешение $r_x = \lambda R_n / 2L_x$ при полной фокусировке $L_x = \lambda R_n / D_x$ составляет $r_x = D_x / 2$. Уточнённое выражение для космического РСА с учётом скорости W_E вращения Земли

$$g(x, V_x, V_y) = g_0 \frac{L_x}{D_x} \exp \left[-\frac{2\pi L_x^2}{\lambda^2 R_n^2} F^2(x, V_x, V_y, V_E) \right] \exp \left\{ j \left[\varphi_0 - \frac{2\pi}{\lambda R_n} F^2(x, V_x, V_y, V_E) \right] \right\}$$

где

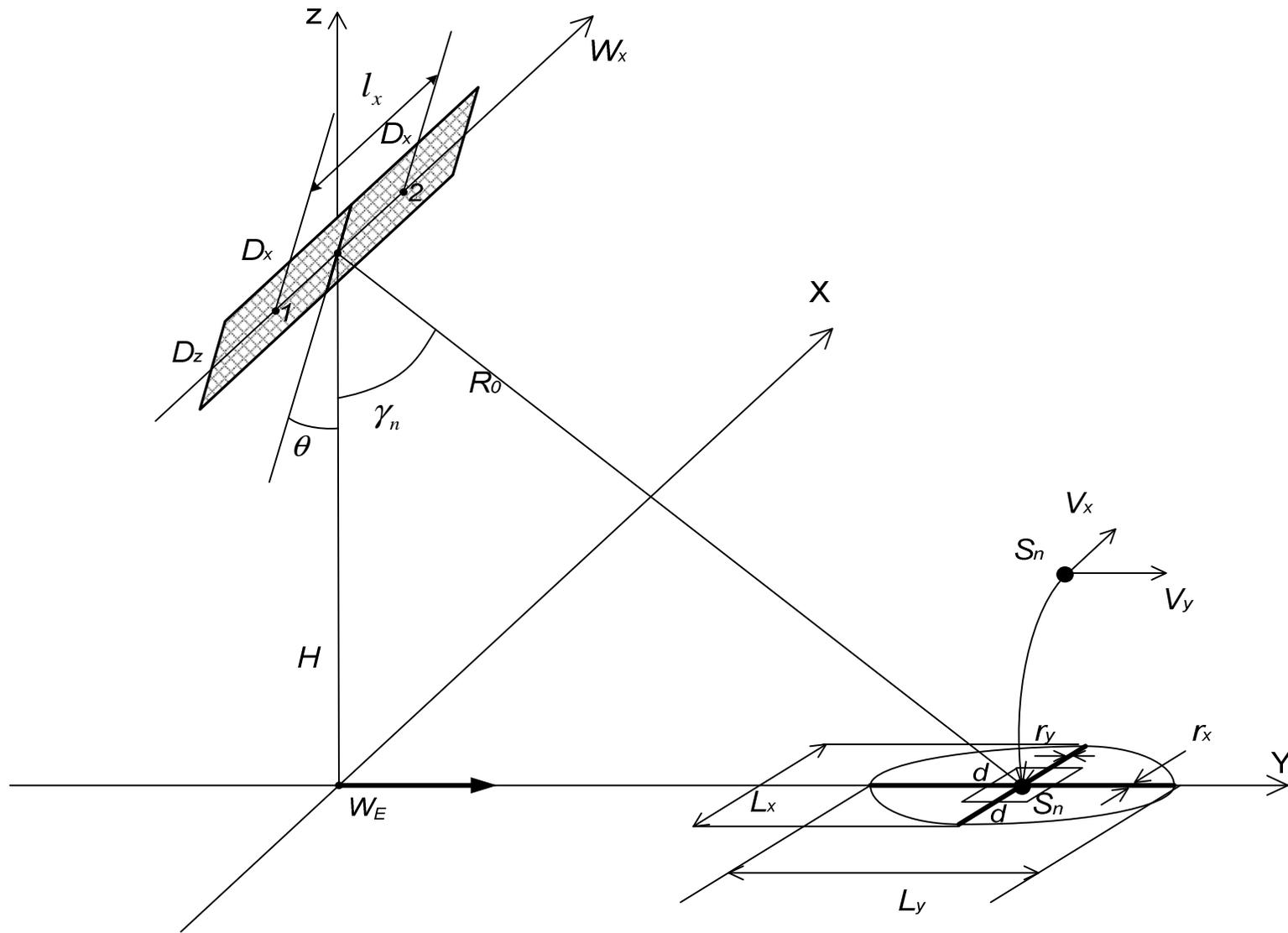
$$F(x, V_x, V_y, V_E) = x \left(1 - \frac{V_x}{W_x} \right) - \frac{(V_y + W_E) R_n \sin \gamma_n}{W_x - V_x}$$

Заменяя координату x на частотную $f = 2W_x x / \lambda R_n$, принимая начальный сдвиг f_0 относительно несущей f и движение КА точно по меридиану, имеем

$$g(f) = g_0 \frac{L_x}{D_x} \exp \left[-\frac{\pi L_x^2}{2(W_x - V_x)^2} (f - f_0 - f_{dy} - f_E)^2 \right] \exp \left\{ j \left[\varphi_0 - \frac{\pi \lambda R_n}{2(W_x - V_x)^2} (f - f_0 - f_{dy} - f_E)^2 \right] \right\}$$

где $f_{dy} = \frac{2}{\lambda} V_y \sin \gamma_n$, $f_E = \frac{2}{\lambda} W_E \sin \gamma_n$, $W_E = W_{E0} \cos \alpha$, $W_{E0} = 463 \text{ м/с}$, α – широта места

Визирование поверхности в ИРСА с продольной антенной базой



Корреляционные параметры продольного ИРСА (Переслегин и Сеницын, Изв. ВУЗов, Радиофизика,, 2011)

Информация о величинах V_x и V_y заключена в комплексном коэффициенте взаимной корреляции сигналов от разнесённых в пространстве антенн. Допускается, что за время пролёта антенной базы $\tau_x=L_x/W_x$, амплитуда и начальная фаза отражённого сигнала не изменяются, не изменяются они и за время синтезирования $\tau_s=L_x/W_x$:

$$\rho_n \exp(j\psi_n) = \frac{\overline{U_{1n}U_{2n}^*}}{\sqrt{|U_{1n}|^2 \cdot |U_{2n}|^2}}, \text{ черта сверху означает осреднение во времени (т.е. по размеру}$$

синтезированной апертуры). Роль интерферометра: измерение вектора скорости фазовым методом, что, например, возможно при использовании ФАР с двумя фазовыми центрами (ФЦ). На излучение работает вся поверхность антенны с ФЦ в её центре. При измерении V_y **на приём работают левая и правая секции ФАР, их осреднённые отклики**

$$\dot{g}_1(f) = g_0 \exp\left[-\frac{\pi d_x^2}{2W_x^2} \left(f - f_0 - \frac{f_x}{2} - f_E - f_{dy}\right)^2\right] \exp\left\{j \left[\varphi_0 - \frac{\pi \lambda R_n}{2W_x^2} \left(f - f_0 - \frac{f_x}{2} - f_E - f_{dy}\right)^2\right]\right\}$$

$$\dot{g}_2(f) = g_0 \exp\left[-\frac{\pi d_x^2}{2W_x^2} \left(f - f_0 + \frac{f_x}{2} - f_E - f_{dy}\right)^2\right] \exp\left\{j \left[\varphi_0 - \frac{\pi \lambda R_n}{2W_x^2} \left(f - f_0 + \frac{f_x}{2} - f_E - f_{dy}\right)^2\right]\right\}$$

Здесь $f_x=2l_xW_x/\lambda R_n$ – частотный сдвиг левой секции по отношению к правой. Коэффициент корреляции при введении в оба канала сдвига f_E с обратным знаком, в точке максимальной амплитуды $f=f_0$:

$$(\dot{\rho}_{12})_m = \left(\frac{g_1(f) \times g_2^*(f)}{g_0^2}\right)_{f=f_0} = \exp\left(-\frac{\pi d_x^2}{r_x^2}\right) \exp\left(j \frac{2\pi d_x}{W_x} f_{dy}\right) \quad f_{dy} = \frac{2V_y}{\lambda} \sin \gamma_n \quad r_x = \frac{\lambda R_n}{L_x}$$

По сравнению с РСА, в фазовом множителе **исчезает φ_0** , и **появляется ослабляющий амплитуду коэффициент**

– **но зависимость $\Delta \varphi(V_y)$ становится линейной**, с крутизной $\frac{\partial(\Delta \varphi_y)}{\partial V_y} = \frac{4\pi d_x}{\lambda W_x} \sin \gamma_n$.

Допустимое ослабление амплитуды (~1дБ) получается при условии $r_x=4l_x$, при этом крутизна $\frac{\partial(\Delta \varphi_y)}{\partial V_y} = \frac{\pi r_x \sin \gamma_n}{\lambda W_x}$

Таким образом, сдвиг фазы подвижного отклика в ИРСА пропорционален скорости V_y – тогда как пространственный и частотный сдвиги амплитуды пропорциональны квадрату скорости V_y .

Нестационарная морская поверхность (Переслегин, Халиков, Изв. РАН, Физика атмосферы и океана, 2011)

Отличие от поверхности суши заключается в том, что за время синтезирования порядка 1с элементарные отражатели (мелкие волны внутри площадки) перемещаются не только поступательно, но и случайным образом. Допуская эти перемещения только в радиальном направлении (что отвечает физике синтезирования, где тангенциальной составляющей скорости можно пренебречь) и считая волнение изотропным, суммарную полуширину доплеровского спектра сигнала в РСА можно записать в виде :

$$(\sigma_f)_{\Sigma} = \left\{ \left(\frac{r_x W_x \cos \gamma_n}{\lambda H} \right)^2 + \left[\frac{\tilde{\sigma}_V(r_x, W) \sin \gamma_n}{\lambda} \right]^2 + \left(\frac{V_{ph} \sin \gamma_n}{\lambda} \right)^2 \right\}^{1/2}$$

где первая составляющая (спекл-шум) определяется аппаратурой, вторая – осреднёнными (на симметричной площадке размером r_x) орбитальными скоростями крупных волн, третья – фазовыми скоростями V_{ph} мелких волн. Если принять (для космических условий) $H/W_x=100$ с, $\gamma_n=30^\circ$ и пренебречь флуктуациями мелких волн по сравнению с флуктуациями крупных, то при известном соотношении

$$\tilde{\sigma}_V = 0,08W \exp\left(-\frac{gr_x}{4W^2}\right), \quad W - \text{ скорость приводного ветра,}$$

получим оценку достижимого продольного разрешения РСА из соотношения

$$r_x(W) \geq 0.08W \left(\frac{H}{W_x} \right) \operatorname{tg} \gamma_n \exp\left(-\frac{gr_x}{4W^2}\right)$$

Расфокусировка РСА и ИРСА с продольной базой

Примем для космических условий $H/W_x=100c$, $\gamma_n=30^\circ$ и рассчитаем достижимое продольное разрешение r_x .

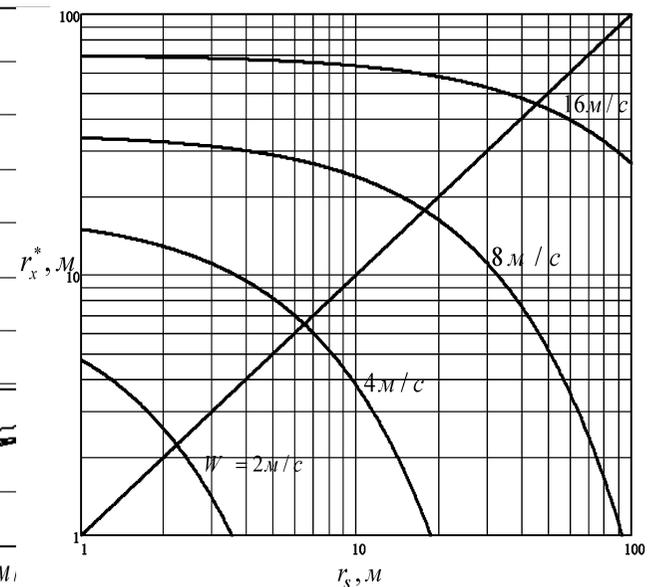
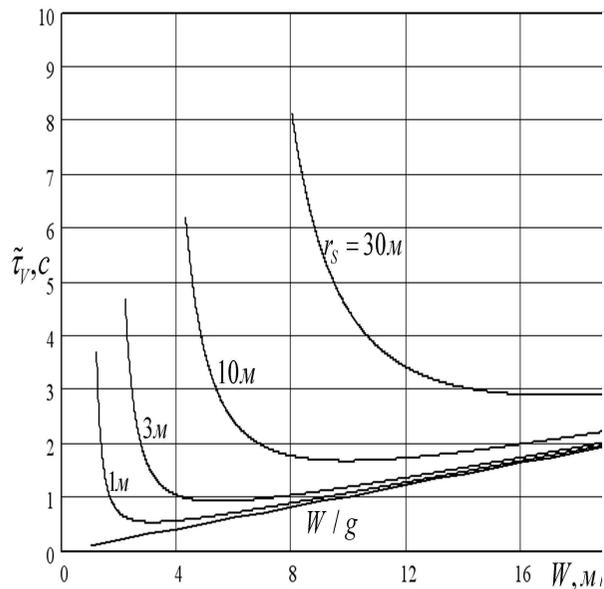
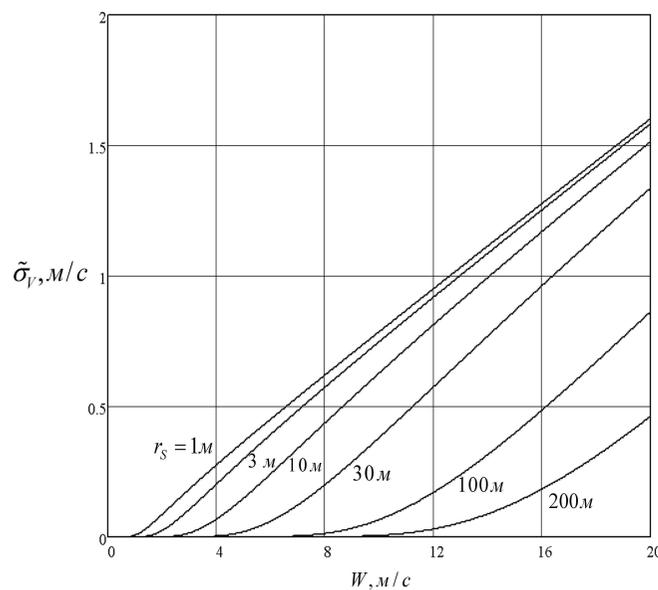
Приведенные графики показывают следующее:

1. Осреднённое в пространстве отклонение орбитальных скоростей крупных волн резко уменьшается с увеличением размера площадки (рис.1).
2. Временной интервал флуктуаций орбитальной скорости волн в данном случае ($r_x > 10m$) значительно превышает ожидаемое время синтезирования и его можно не учитывать при осреднении (рис.2).
3. Достижимое продольное разрешение в условиях развитых ветровых волн определяется скоростью ветра (W) и орбитальными параметрами аппарата (отношением H/W_x), и не зависит от длины волны сигнала.
4. Достижимое продольное разрешение $r_x \sim 20m$ получается при скорости приводного ветра $W \sim 8m/c$ и еще ухудшается с ростом балльности – однако и длина энергонесущей волны при этом остаётся в ~ 6 раз большей величины r_x (рис.3).

В качестве общих выводов приходим к следующему:

– Пороговая чувствительность $\sim 3\sigma_v$ (т.е. разрешение по скорости) определяется параметрами аппаратуры и не зависит от достижимого r_x . При соответствующей энергетике космический РСА типа TerraSAR-X в принципе позволяет формировать поле орбитальных скоростей развитых ветровых волн (а также волн сторонней зыби) с пороговой чувствительностью около 10см/с.

– Улучшение пороговой чувствительности до 3см/с (что необходимо для мониторинга изменчивости океанских течений) требует значительного удельного числа независимых отсчётов сигнала на зондируемой поверхности, $N_0 \geq 0,6m^{-2}$ – что достигается лишь при соответствующей энергетике.



\bar{U}_u

Флуктуационная чувствительность в РСА и ИРСА

Яркостный канал.

Поскольку полезный сигнал накапливается когерентно, а собственный шум – некогерентно, то при большом числе N накапливаемых (приходящихся на элементарную площадку) импульсов пороговое соотношение

выглядит следующим образом: $\frac{\Delta U_0^2}{\bar{U}_u^2} = \frac{q_0}{\sqrt{N}}$, где \bar{U}_u – средне-квадратическое отклонение

амплитуды шума, $q_0=3$ – пороговый коэффициент. Введя сюда сигнал U_0^2 , получаем соотношение, где в левой части имеем рабочее отношение сигнал/шум q^2 , а в знаменателе правой части – требуемую пороговую величину интенсивности сигнала $\Delta U_0^2/U_0^2$:

$$q^2 = \frac{U_0^2}{\bar{U}_u^2} = \frac{q_0}{\frac{\Delta U_0^2}{U_0^2} \sqrt{N}} \quad \text{где обычно принимают } 10\lg(1+K_{\text{пор}})=1\text{дБ}, \quad K_{\text{пор}}=\Delta U_0^2/U_0^2=0,26.$$

Если площадка неподвижна или движется со скоростью $V_{x0} \leq \frac{r_x}{t_s} = \frac{W_x}{H} \frac{r_x^2 \cos \gamma_n}{\lambda}$ (что в наших условиях

выполняется) то число накапливаемых некогерентно реализаций шума $N = \frac{2L_x}{D_x} = \frac{2\lambda R_n}{r_x D_x}$

весьма велико ($N \sim 10^3$), и для требуемого отношения сигнал/шум при $q_0=3$ и $K_{\text{пор}}=1\text{дБ}$ получаем $q^2 \sim 1$ (!!). Таким образом, благодаря когерентному накоплению оказалось возможным сформировать яркостное РЛ изображение при малом отношении сигнал-шум, отнесённому к элементарной площадке.

Скоростной канал.

Флуктуационная ошибка при измерении разностно-фазового приращения на выходе коррелятора зависит как от числа N накапливаемых отсчетов сигнала (спекл-шума), так и от модуля коэффициента корреляции сигнала. Коэффициент корреляции с учетом отношения сигнал/собственный шум q имеет вид

$$\dot{\rho}_n = \frac{q^2}{1+q^2} \exp\left(-\frac{\pi d_x^2}{r_x^2}\right) \exp\left(j \frac{4\pi d_x V_y \sin \gamma_n}{\lambda W_x}\right),$$

а флуктуационная ошибка при измерении скорости V_y

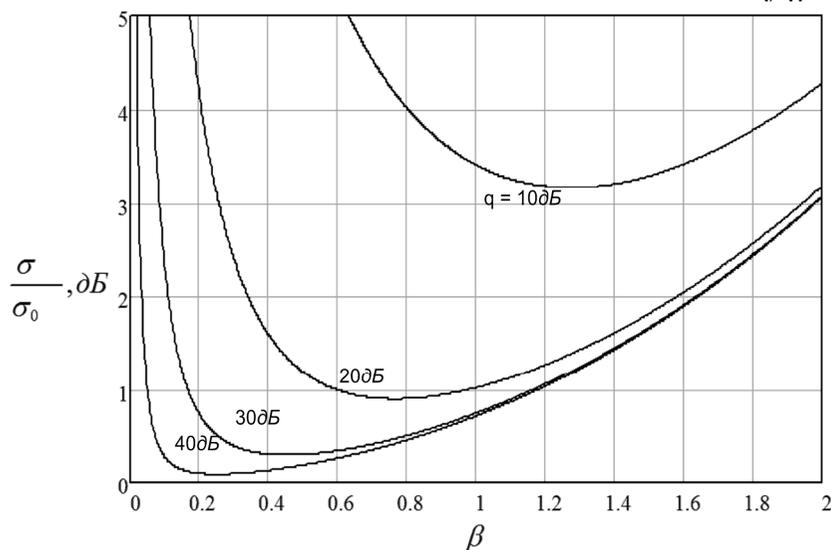
составляет $\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{\rho^2} - 1} \left/ \frac{\partial \psi_n}{\partial V_y} \right. \sqrt{N}$, где ρ_n и ψ_n – модуль и фаза коэффициента корреляции,

N – число некогерентных отсчетов сигнала, т.е. число осредняемых элементарных площадок $S_n = r_x r_y$ на

симметричной площадке размером d : $N = d^2 \frac{4\Delta f \sin \gamma_n}{c D_x}$. Если принять за минимальную ту ошибку,

которая получается при $N=1$ и отсутствии собственного шума ($q \rightarrow \infty$): $\sigma_{v0} = \frac{\lambda W_x}{8\pi r_x}$ то потеря

чувствительности при реальном q : $\frac{\sigma_v}{\sigma_{v0}} = \frac{\sqrt{\pi}}{\beta_x} \sqrt{\left[\left(1 + \frac{1}{q^2}\right)^2 \exp\left(\frac{\beta_x^2}{\pi}\right) \right] - 1}$ $\beta_x = \frac{\pi l_x}{r_x}$



Задавая $r_x = 4l_x$ (ослабление сигнала 1дБ), т.е. $\beta_x = \pi/4$, мы тем самым определяем и требуемое $q = 10$ (20дБ) на площадке S_n . Положение спасает тот факт, что при $r_x > r_y$, на симметричной площадке r_x^2 возникают независимые отсчеты дальности:

$$N_y = \frac{2r_x \Delta f \sin \gamma_n}{c} \text{ т.е. при } r_x = 20\text{м}, \Delta f = 300 \text{ МГц}, N_y = 20,$$

отношение фон/шум на площадке составит 3дБ, а флуктуационная чувствительность составит 10см/с

Измерение вектора скорости в ИРСА

1. Использование смещений ФЦ благодаря наклону плоскости антенны относительно вертикали (если представить рисунок в плане, то можно видеть «угол сноса» $\beta = \arctg(I_z \sin \theta / I_x)$). Скорости КА и объекта на луч антенны якобы проектируются в верхних (1,2) и нижних (3,4) секциях. На самом деле эти скорости остаются ортогональными относительно плоскости ZOY, и соответствующих доплеровских сдвигов не возникает. Тем не менее, аналогия с КИСС имеется: к задержке по оси X за счёт $W_x - V_x$ добавляется задержка по оси Y за счёт $W_E + V_y$.

2. Можно показать, что если по приведенной выше методике измерен фазовый сдвиг $\Delta\varphi_y$ (с компенсацией W_E), то дополнительное его приращение за счёт продольной скорости составит

$$\Delta\varphi_x = \frac{4\pi l_x W_{E0} \cos \alpha \sin \gamma_n}{\lambda W_x^2} V_x$$

Мы видим, что в этом случае чувствительность $\Delta\varphi_x / V_x$ гораздо хуже

(по сравнению с рассмотренным способом), из-за высокой скорости КА по сравнению со скоростью вращения Земли, а на высоких широтах она еще хуже.

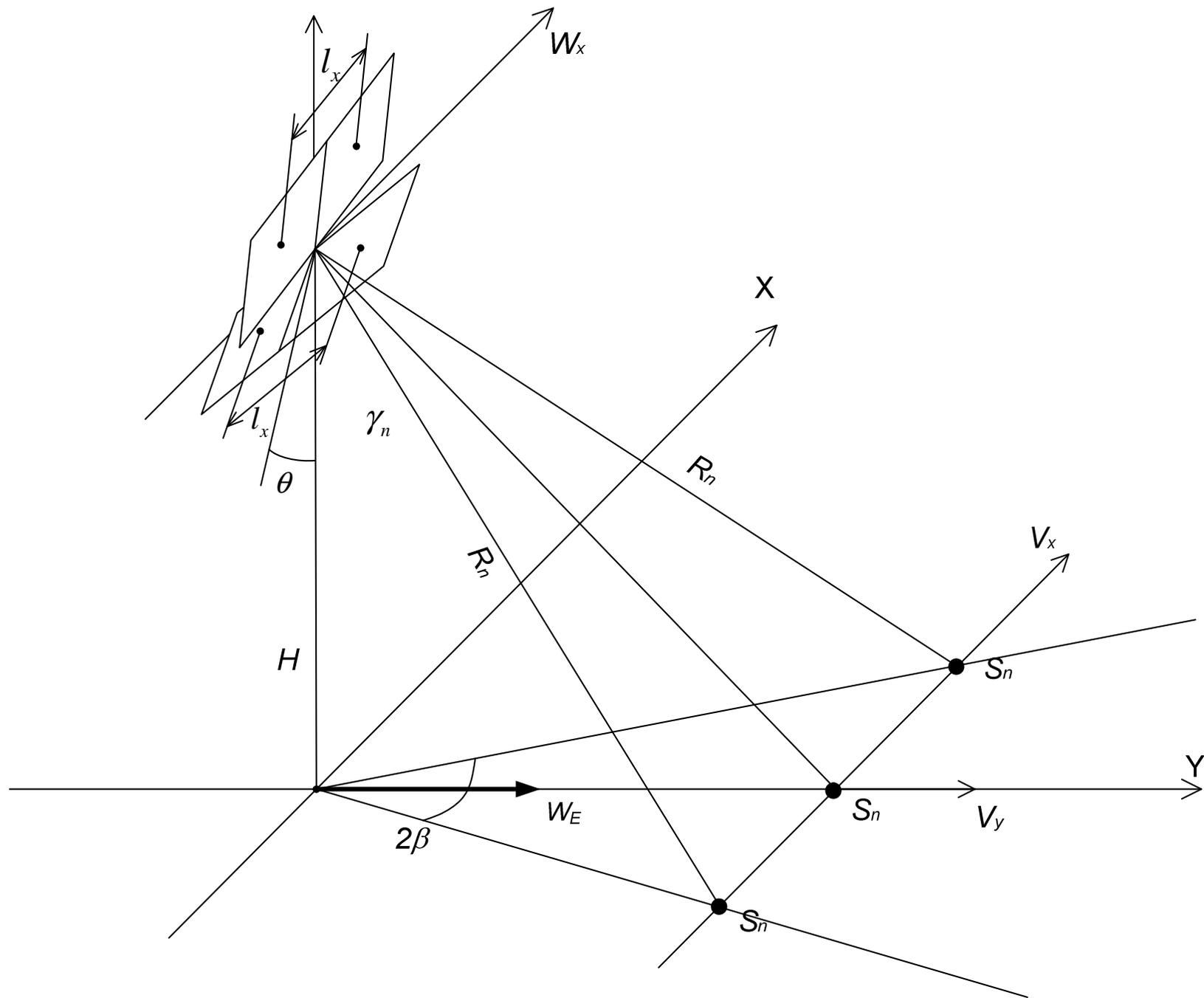
3. Азимутальный разворот плоскости антенны на угол $\beta \sim 15^\circ$ (искусственный угол сноса). Возможное решение заключается в развороте верхних и нижних секций на углы $\pm \beta$, т.е. в переходе на двух лучевую систему (рис.1).

Используя ту же методику с компенсацией W_E и W_x путём введения априорных частотных сдвигов, на выходах двух корреляторов получим фазовые сдвиги:

$$\Delta\varphi_{x(1+2)} = \frac{4\pi l_x}{\lambda W_x} \sin \gamma_n (V_y \cos \beta + V_x \sin \beta) \quad \Delta\varphi_{x(3+4)} = \frac{4\pi l_x}{\lambda W_x} \sin \gamma_n (V_y \cos \beta - V_x \sin \beta)$$

Складывая и вычитая эти сдвиги с определённой задержкой, можно получить обе составляющие скорости для каждой площадки с достижимой точностью при заданном разрешении. По-видимому, этот способ годится для мониторинга течений – но непригоден для волнения, ибо время задержки (несколько минут) несоизмеримо с временем прохождения волны по элементу разрешения (доли секунды).

4. Два аппарата, перемещающиеся по одной и той же орбите на расстоянии, необходимом для получения того же эффекта при «почти совмещённых» элементах разрешения (рис.2). В этом варианте возможно совмещение во времени – но только для небольшой области перекрытия лучей. По-видимому, и здесь возможен «векторный» мониторинг поля течений во всей зоне обзора, но не поля волнения.



Энергетика ИРСА

Энергетика РСА при работе по фоновой поверхности рассчитывается стандартным способом, на основе

известного соотношения
$$P_2 = P_1 \frac{G_{a1} G_{a2} \lambda^2 r_x r_y S^0}{(4\pi)^3 R_n^4} \geq q^2 k T_w \Delta f$$
 где P_1, P_2 – мощности

излучаемого и принимаемого коротких импульсов (без учета коэффициента сжатия), S^0 – удельная эффективная

поверхность рассеяния, Δf – ширина спектра сигнала,
$$G_{a1} = \frac{4\pi D_x D_z}{\lambda^2}$$
 – усиление антенны на передачу,

$$G_{a2} = \frac{4\pi L_x D_z}{\lambda^2}$$
 – усиление синтезированной антенны на приём. Будем считать, что ширина зоны обзора в точности

соответствует достижимому в РСА диапазону наклонных дальностей ΔR , и что угол наклона антенной плоскости θ согласован со средним углом визирования γ_0 , $\gamma_0 = (\pi/2) - \theta$. В результате, для средней мощности излучения с учетом фокусировки антенны и некогерентного накопления N реализаций шума за время синтезирования получается простое соотношение:

$$\bar{P}_1 \geq \frac{2\pi q^2 k T_w c R_n^2}{D_z r_x r_y S^0 \sqrt{N}}$$
 где
$$N = \frac{2\lambda R_n}{r_x D_x}$$
 Мы видим, что задаваемое продольное разрешение r_x (т.е. размер

синтезированной апертуры L_x) почти не влияет на требуемую энергетику. Поскольку для скоростных фоновых

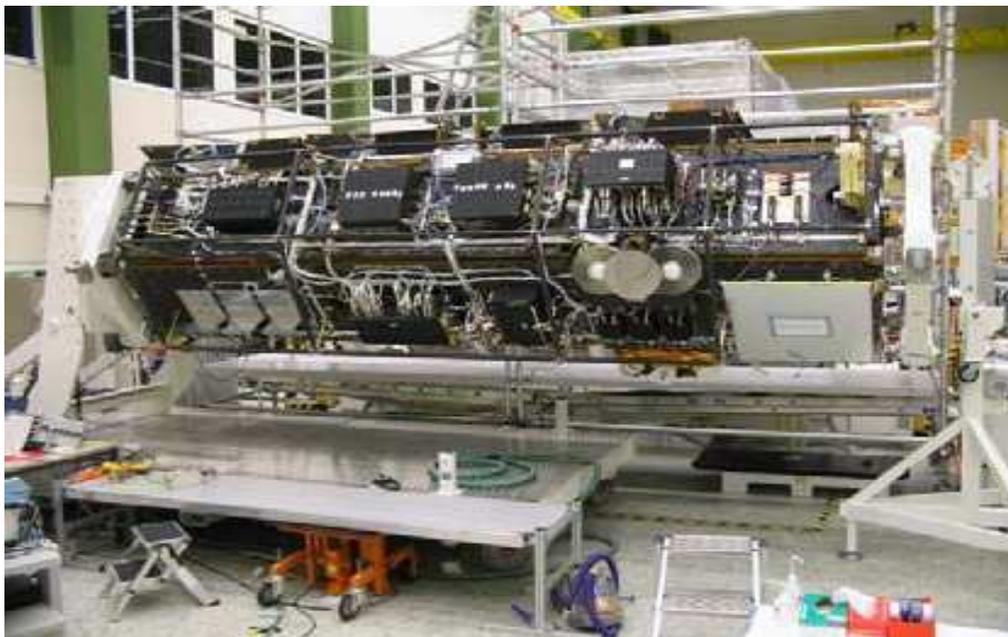
измерений в океане необходимо иметь (с запасом) $q=10$, то для заданных величин $kT_w=10^{-20}$ Вт/Гц, $R=6 \cdot 10^5$ м, $D_z=1$ м,

$D_x=5$ м, $S^0=10^{-3}$, $r_x=20$ м, $r_y=1$ м, получим $N=600$ и $\bar{P}_1 \geq 1200$ Вт. Таким образом, известная из публикаций средняя

излучаемая мощность в ИРСА TerraSAR-X (800 Вт) близка к расчётной – что позволяет надеяться на получение необходимых нам скоростных изображений поверхности океана, т.е. «портретов» энергонесущих ветровых волн, зыби и мезомасштабных течений.

ИРСА TerraSAR-X. Основные сведения.

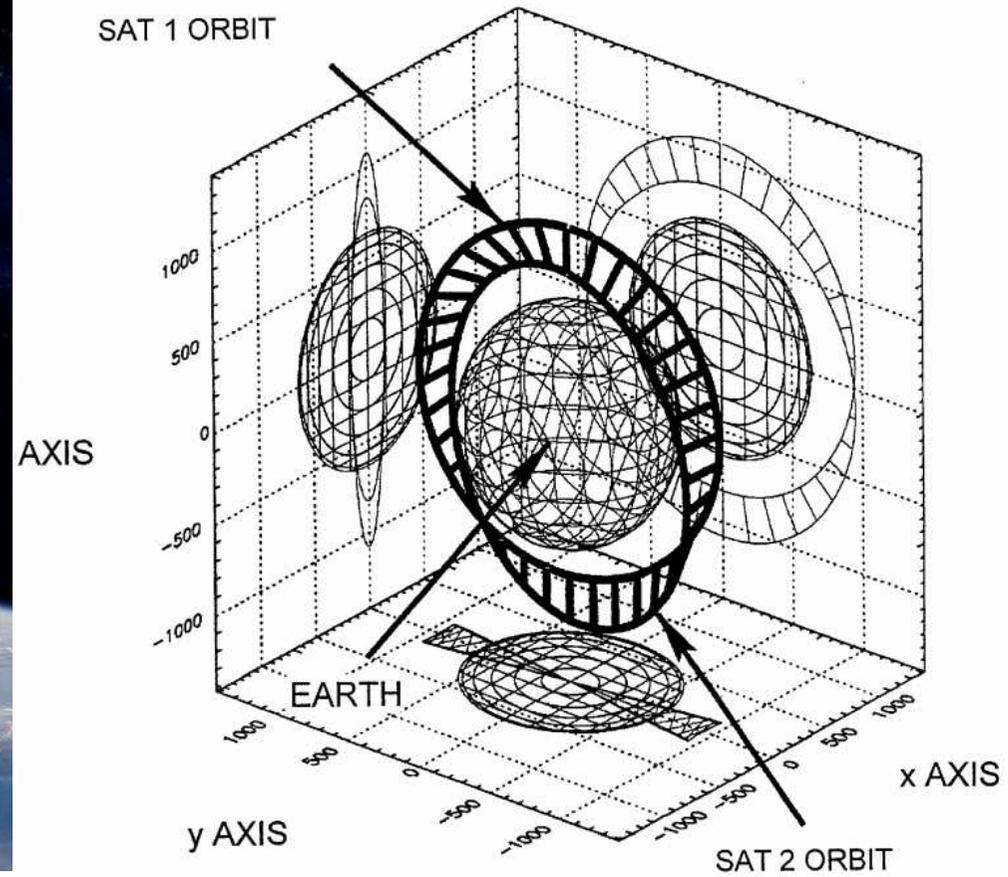
Европейский аппарат TerraSAR-X запущен с Байконура в июне 2007 года, с тех пор получено множество РЛ изображений высочайшего качества – как для всевозможных объектов суши (сельхозугодья, леса, города, прибрежные районы и т.п.), так и для морских акваторий. По сравнению с прежними европейскими аппаратами (ERS-1, ERS-2, ENVISAT), установленный на нем РСА обладает намного лучшими характеристиками. Прежде всего, это переход на более короткую длину волны (3см вместо 6см), а также расширение ширины спектра излучения (300МГц вместо 30МГц). Увеличилась также и располагаемая средняя мощность излучения (800вт вместо 150вт). Антенна РСА представляет собой многоэлементную фазированную решетку с электронным управлением (АФАР), что при боковом обзоре поверхности с космического аппарата позволяет сканировать узким лучом по углу места.



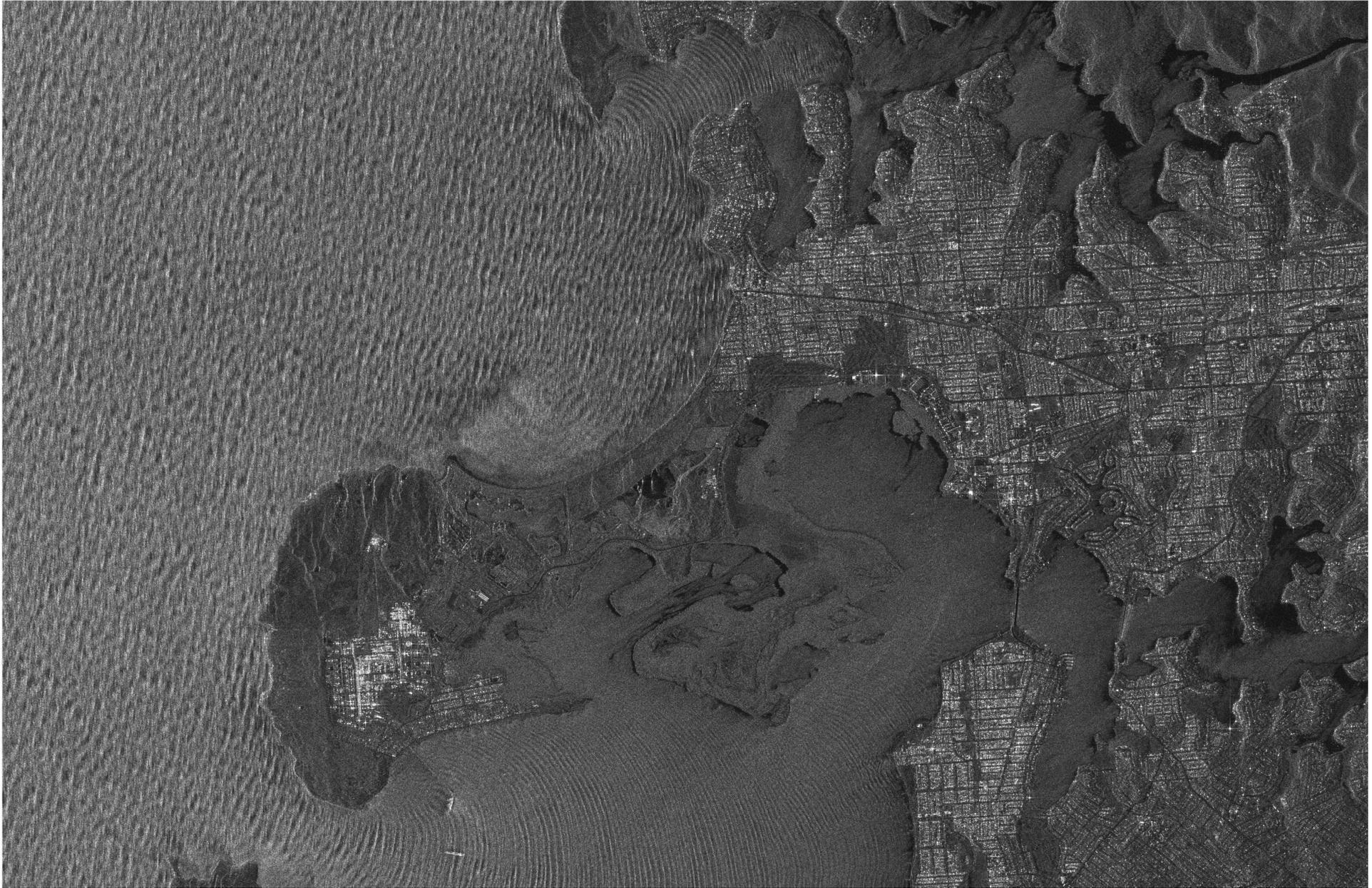
Dimensions	4,88 m x 2,4 m x 2,4 m
Launch Mass	1350 kg (payload 400 kg)
Radar Frequency	9,65 GHz (X-band)
Bandwidth	50-300 MHz
Power Consumption	800 W (average)
Stripmap Mode	30 km swath width 3 m resolution
ScanSAR Mode	100 km swath width 16 m resolution
Spotlight Mode	5 km x 10 km scene 1 m resolution
Add. Modes	Left locking mode Dual Receive Antenna Mode Multi polarisation
Sec. Payloads	TDX: LCT/ TSX: TOR/LCT
Launcher	Dnepr 1 (former SS-18)
Orbit	514 km
Inclination	97,4°, Sun-synchronous
Life time	> 5 years

Аппарат представляет собой шестигранник, на одной из панелей которого располагается мощная солнечная батарея, а на другой такой же панели – АФАР, состоящая из 32 съемных (модульных) блоков. При общей длине антенны 5м и ширине 0,5м в ней предусмотрен режим работы с двумя фазовыми центрами, разнесенными на 2,5м – что позволяет использовать вдоль-траекторный интерферометр (ИРСА). Основные параметры РСА приведены в **таблице**. Как и в прежних модификациях РСА с АФАР, предусмотрены три режима съемки: с предельным разрешением ~1м при ширине луча 10км (*Spotlight Mode*); с умеренным разрешением ~3м при ширине луча 30км (*Stripmap Mode*) и с грубым разрешением ~16м при ширине луча 100км (*ScanSAR Mode*). Предусмотрена также возможность выделения поляризационных составляющих отраженного сигнала, вплоть до полной когерентной матрицы рассеяния – однако это возможно лишь в режиме предельного разрешения, а в режиме умеренного разрешения – только определенного их сочетания, например составляющих VV и VH, т.е. соосно-вертикальной и перекрестной поляризационных составляющих.

Новейший ИРСА «Tandem TerraSAR-X»

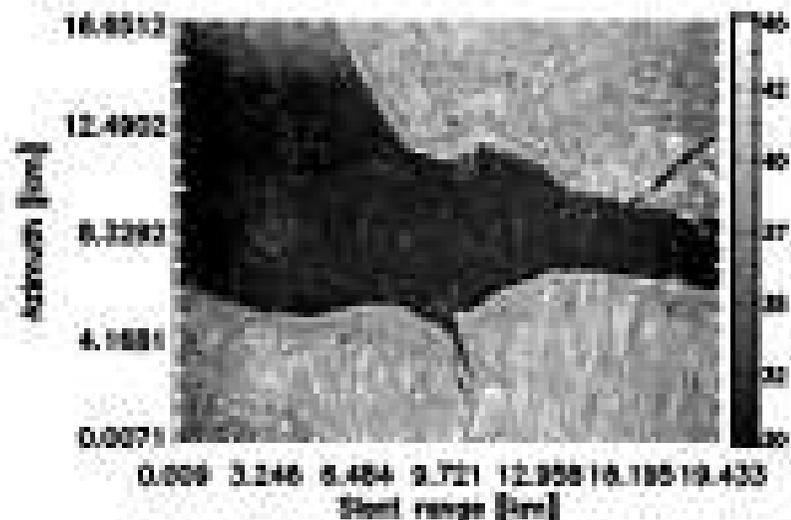


TerraSAR-X-1, TerraSAR-X-2
(2007,2010)

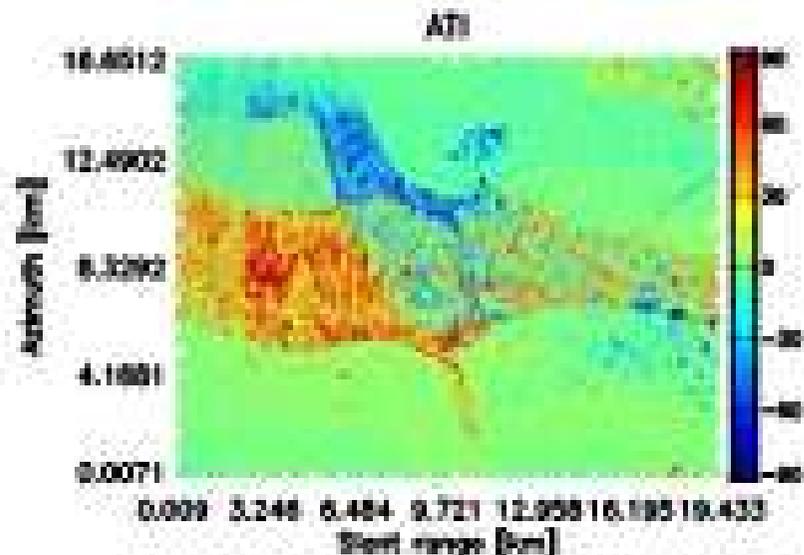


Изображение рефрагирующих волн, полученное аппаратом TerraSAR-X . Бухта Ботани-Бей, Австралия, 9 июля 2007г, VV-поляризация, StripMap mode, разрешение 3м.

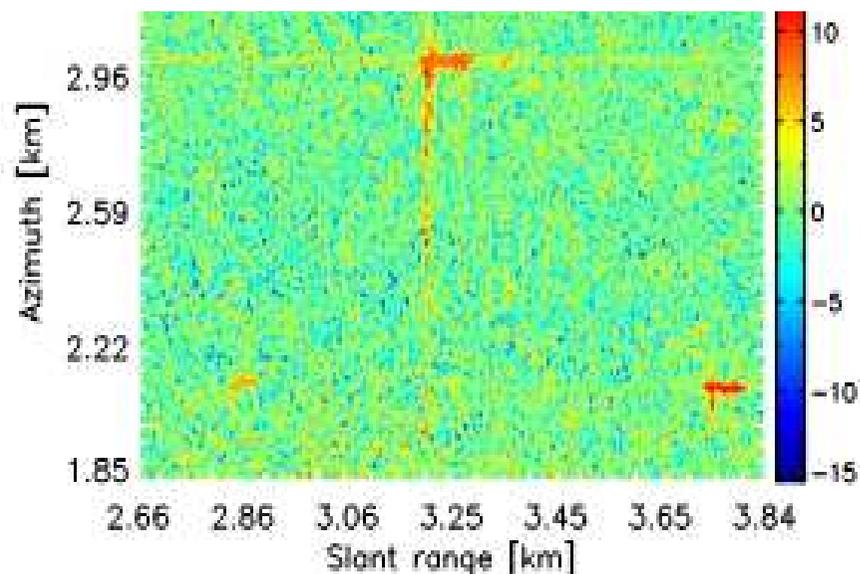
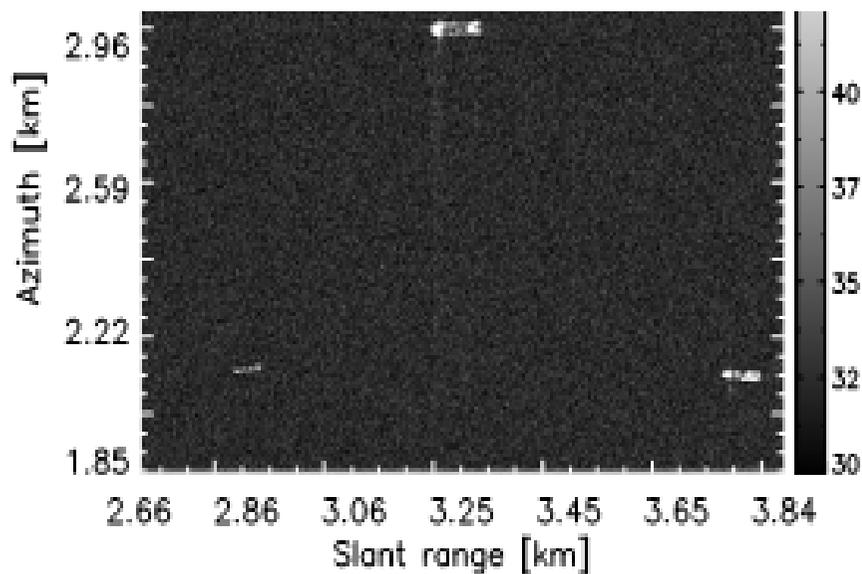
Совмещение яркостных и скоростных изображений в ИРСА TerraSAR-X



(a) SAR image



(b) ATI phase image



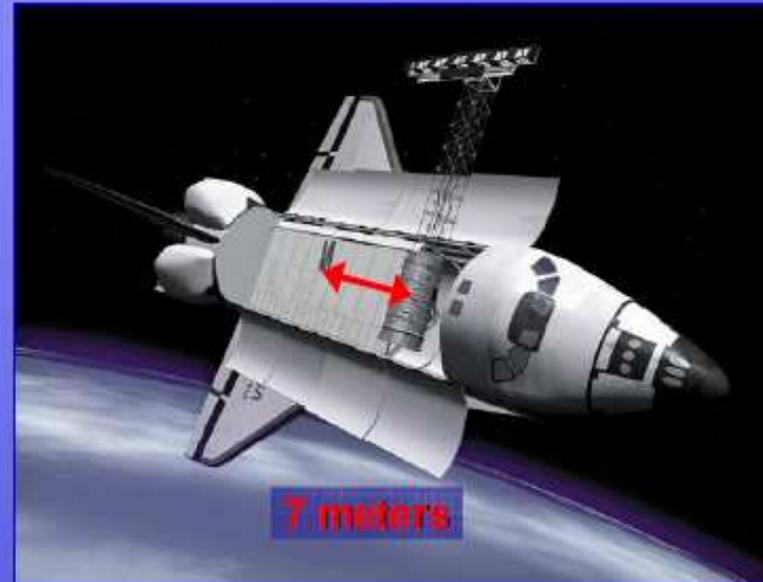
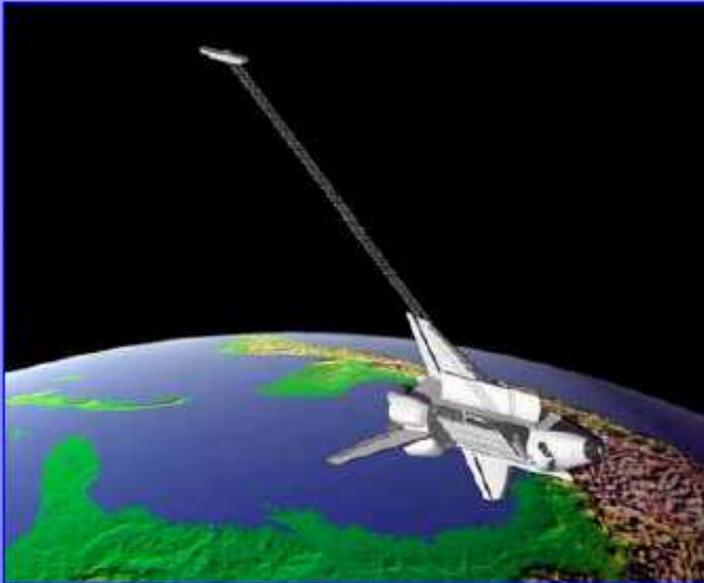
Оценка известных данных по ИРСА TerraSAR-X

Верхние изображения имеют размер ~16км по оси траектории КА (почти по меридиану), и ~12км по горизонтальной дальности (почти по широте). Нижние изображения имеют по обеим осям размер ~1,2км. Яркостные изображения выполнены как чёрно-белые с контрастными градациями в пределах 15дБ, скоростные изображения выполнены в псевдоцвете с градациями измеряемого фазового сдвига в пределах $\pm 84^0$ для фона и $\pm 15^0$ для движущихся целей. Чётко видны преимущества одновременного формирования яркостных и скоростных изображений: на яркостном изображении слабый фон отсекается, причём для речной поверхности (очевидно, при слабом ветре) интенсивность фона на ~15дБ ниже интенсивности сигнала от речных судов. Что же касается скоростных изображений, то они, по всей видимости, были прокалиброваны с различными «коэффициентами цветности» для фона и для движущихся целей. Из текста можно установить, что истинные скорости судов были известны, коэффициент «скоростной калибровки» для трех судов лежал в пределах от 1,75 до 1,90 град/м/с. Кроме флуктуационной ошибки, здесь, по-видимому, играло роль и истинное направление движения судов, которые шли с небольшими отклонениями от определённого курса (по фарватеру). Сведений о способах определения направления вектора скорости судов в текстах не содержится. Грубо определяемая по нижним изображениям разрешающая способность составила ~10м.

О характеристиках речной поверхности, т.е. о скорости и направлении течений – в тексте цитируемых докладов вообще нет сведений. Зная параметры ИРСА TerraSAR-X и сопоставляя их с приведенными изображениями, можно предположить следующее. При разносе в TerraSAR-X фазовых центров антенн на длину антенны ($D_x=l_x=2,4\text{м}$), нет принципиальной возможности обеспечить фокусированное продольное разрешение $r_x=1,2\text{м}$. Далее мы видим, что отметки судов вытянуты по оси горизонтальной дальности, их длина примерно соответствует длине корпуса речного судна (длина одной из «полосок» ~70м при скорости ~5м/с, практически параллельной «полоске»). Это объясняется, конечно, малым перемещением судна за время формирования изображения, ибо даже при использовании всех субапертур «траекторное» время формирования составляет ~1,5с, и судно за это время перемещается всего на ~8м. Конечно, по азимутальной оси отметки судов сдвинуты значительно, на величину ~250м при скорости судна ~5м/с. Из цитируемых текстов опять-таки нельзя выяснить, использовались ли при восстановлении изображений все (нефокусированные) субапертуры, и велась ли вторичная обработка с восстановлением истинного положения судов.

Совершенно неестественным представляется изображение, которое, по-видимому, следует считать отображающим структуру скорости течения в устье Эльбы. Здесь, если принять скоростной калибровочный коэффициент тем же, что был измерен по движущимся судам (~2град/м/с), то максимальный скоростной контраст (синее – красное) достигает ~40м/с, чего в принципе быть не может. Представляется, что авторы допустили ошибку при построении калиброванного фонового изображения, причем построили его без необходимого в этом случае пространственного осреднения.

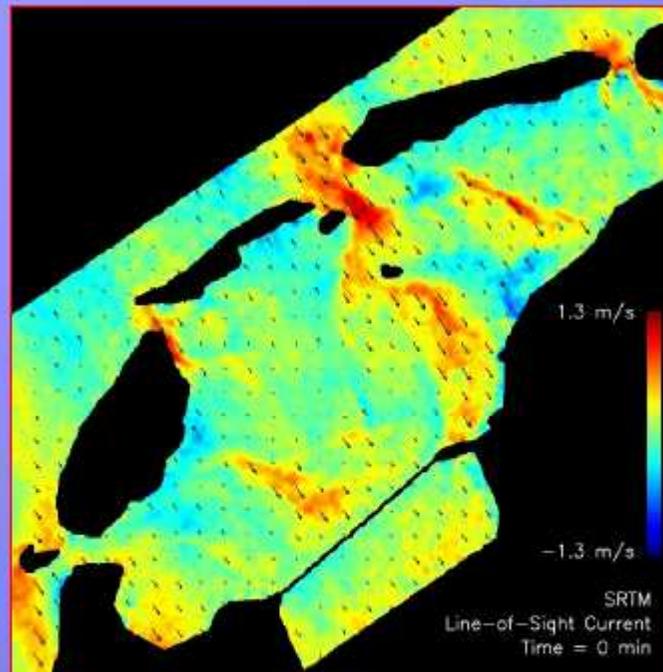
Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)



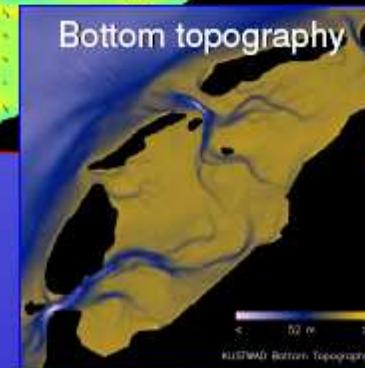
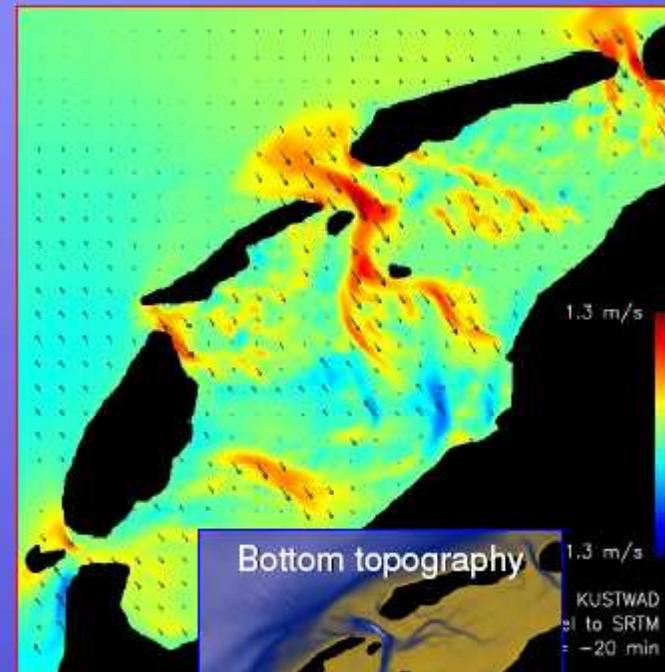
- Cross-track InSAR mission for topographic measurements, February 2000
- Expanding antenna mast, cross-track antenna spacing = 60 m
- Additional along-track antenna spacing of 7 m

Wadden Sea Results

Line-of-sight current from SRTM



...and from a circulation model of RWS



- Good statistical agreement
- Accuracy: 0.1 m/s at eff. resolution of 1 km
- Results are consistent with InSAR theory

Основные выводы и рекомендации

1. Задача формирования векторно-скоростных РЛ изображений океана из космоса – в принципе решается с применением современных технологий (секционированная АФАР, быстродействующая обработка сигналов, многомерный дисплей).
2. В каналах ИРСА, калиброванных по проекциям скорости, необходимо отображать и неподвижную поверхность.
3. Одновременно формируемое яркостное изображение с калибровкой по амплитуде необходимо для получения общей картины океанских явлений и привязки их географических координат.
4. Обработка сигналов ИРСА и формирование векторно-скоростных изображений возможны при условии, что скорость КА и скорость вращения Земли известны с определённой точностью для каждого участка поверхности.
5. При реальных параметрах морского фона и космического ИРСА (типа TerraSAR-X), возможно получить пространственное разрешение не лучше ~15м по обеим осям при скоростной флуктуационной чувствительности ~10см/с для формирования поля орбитальных скоростей ветровых волн. Скоростная чувствительность порядка ~1см/с, требуемая для формирования поля градиентных мезомасштабных течений – может быть получена на площадках размером (0,3 – 1)км в зависимости от вида волнения, определяющего возможность пространственной фильтрации изображений.
6. Германский опыт создания и использования ИРСА на КА TerraSAR-X в основном подтверждает наши расчёты. По имеющимся у нас данным, при создании этого комплекса не ставилась задача формирования векторно-скоростных изображений поверхности океана.

**СПАСИБО ЗА
ВНИМАНИЕ**