

Космический двухпозиционный РСА для оперативного мониторинга океанских явлений

С.В. Переслегин, З.А. Халиков

Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН

117997, Москва, Нахимовский пр-т, 36

тел. (499)1247392, факс (499)1245983,

e-mail peresleg@ocean.ru

Разработка космического радиолокатора для оперативного мониторинга океанских явлений предполагает существенное увеличение информативности по сравнению с существующими радиолокационными средствами, причем физические параметры наблюдаемых полей необходимо измерять непосредственно. Это означает, что панорамное РЛ изображение должно быть прокалибровано, например, по осредненному полу высот ветровых волн, полу вариаций уровня океана или полу скорости течения, а точность отображения должна соответствовать определенным требованиям. С другой стороны, необходимая оперативность (требуемая, например, при мониторинге сейсмических волн, порождающих цунами) может быть достигнута лишь при весьма широкой зоне обзора (т.е. при ширине кадра РЛ изображения не менее ~1000км), последовательно создаваемой группировкой из нескольких малых аппаратов. Весьма экономичная и достаточно универсальная система РЛ мониторинга океанских явлений может быть создана на базе двухпозиционного принципа зондирования, где излучающий и принимающий сигнал космические аппараты находятся на равновысотных орбитах, разнесенных по широте, что дает возможность использовать квазизеркальную «дорожку подсвета». В свою очередь, высокая отражательная способность морской поверхности позволяет установить на приемном аппарате интерферометры с небольшими размерами антенных баз, для измерения скоростных и уровневых полей океана. В сжатом виде рассматриваются особенности двухпозиционного радара в квазизеркальном режиме визирования морской поверхности, вплоть до особенностей синтезирования апертуры приемных антенн, оценок точности измерений мелко- и мезомасштабных полей поверхности океана и необходимости экспериментальных работ, предшествующих космической разработке. Даются ссылки на российские и зарубежные источники, в том числе на работы авторов. Ожидаемые параметры двухпозиционного «морского тандема» сравниваются с параметрами перспективной европейской космической системы «Tandem TerraSAR-X», предназначенный для мониторинга объектов суши.

Ключевые слова: ветровые энергонесущие волны, поле скорости течения, поле уровня океана, квазизеркальное двухпозиционное рассеяние, двухпозиционный интерферометрический радар с синтезированной апертурой (ДИРСА).

1. Введение

На базе модельных исследований [1-7] возникла уверенность в том, что осуществление космического двухпозиционного радара, использующего квазизеркальную область рассеяния СВЧ сигнала морской поверхностью – не только возможно технически, но весьма целесообразно в практическом плане и выгодно экономически. Причины такой уверенности следующие. Во-первых, предлагаемый космический «тандем» позволяет создать экономичную группировку из нескольких пар идентичных малых КА, с целью организовать «беспропусковый» оперативный мониторинг океанских явлений (в том числе опасных) при малом времени повторяемости изображений. Объектами мониторинга в первую очередь являются опасные волны зыби и сейсмические волны, ответственные за цунами. Будут непосредственно наблюдаться и движущиеся атмосферные циклоны, но по сравнению с действующими СВЧ скаттерометрами QUIKSCAT (данные которых грубо калибруются по скорости приводного ветра) здесь будут измеряться непосредственно параметры волн, в том числе и при наличии сторонней зыби. Возможен и мониторинг изменчивости геострофических мезомасштабных течений, а также внутренних волн приливного происхождения – при измерении поля скорости течений. Перечисленные явления

смогут наблюдаться благодаря большой ширине зоны обзора (порядка 1000км) при умеренном пространственном разрешении и высокой чувствительности по полям уровня (единицы см) и скорости (единицы см/с). В сущности, речь идет о создании космического радара типа панорамного альтиметра и одновременно панорамного скоростемера с умеренным пространственным разрешением.

2. Геометрия визирования поверхности, основные соотношения и особенности

Геометрия визирования поверхности (рис. 1) соответствует первому варианту спутниковой системы [7,8], где оба спутника движутся по идентичным равновысотным орбитам, разнесенным по широте. Второй вариант, использующий для подсвета поверхности геостационарный аппарат – в данном материале не рассматривается.

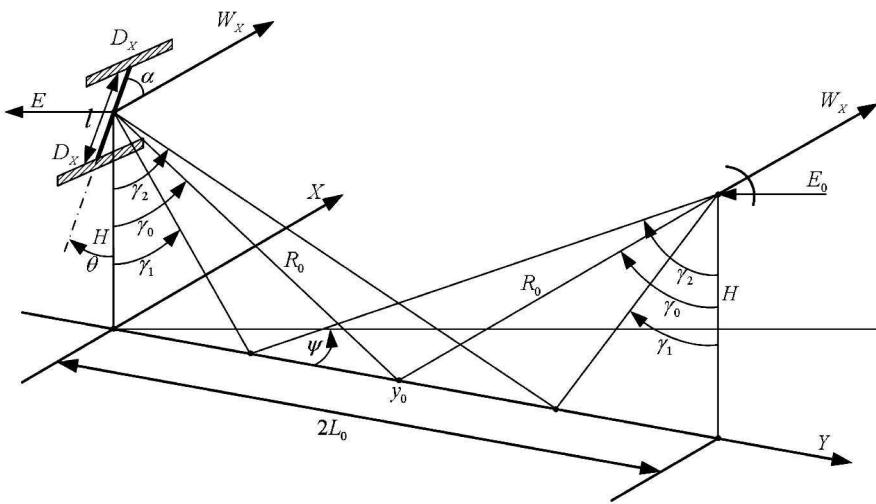


Рис. 1. Геометрия визирования поверхности в двухпозиционном ИРСА.
Шарообразность Земли на рисунке не отображена

На рис. 1 роль излучающего выполняет правый аппарат, на котором установлена слабо-направленная излучающая антенна. На левом (приемном) аппарате установлен ИРСА с двумя антеннами, имеющими горизонтальный размер D_x и разнесенные на базу l с её наклонами к горизонту(α) и к надиру (θ). В проекции $l_1=l\sin \alpha$ эта база обеспечивает канал уровенных измерений, в проекции $l_2=l\cos\alpha$ – канал скоростных измерений [10]. Координаты поверхности отсчитываются от точки О, ОХ – ось движения аппаратов, ОY – ось отсчета горизонтальной дальности, H – высота орбит, ψ – угол разворота луча приемной антенны относительно оси Y, $2L_0$ – расстояние между аппаратами, γ_0 – зеркальный угол визирования, $2R_0$ – суммарная наклонная дальность в зеркальной точке. Наименьший и наибольший углы визирования поверхности с обоих аппаратов составляют γ_1 и γ_2 . Шарообразность Земли в данном случае, безусловно, влияет на параметры визирования и, следовательно, на характеристики РЛ изображений. Однако на данном этапе этот фактор мы учитывать не будем.

Обозначив напряженности падающего и отраженного поля в точках излучения и приема (E_0, E), получим следующие проекции разностного волнового вектора $k - k_0$ на оси координат, $k=2\pi/\lambda$:

$$p_x = k \frac{x}{tg\gamma_0} \left(\frac{1}{H_1} + \frac{1}{H_2} \right) \quad (1)$$

$$p_y = k \cdot \left[\frac{\frac{tg\gamma_0 - m \frac{H_2}{H_1}}{\sqrt{1 + \left(tg\gamma_0 - m \frac{H_2}{H_1} \right)^2}} - \frac{tg\gamma_0 + m}{\sqrt{1 + \left(tg\gamma_0 + m \right)^2}}}{\sqrt{1 + \left(tg\gamma_0 - m \frac{H_2}{H_1} \right)^2}} \right] \quad (2)$$

$$p_z = k \cdot \left[\frac{\frac{1}{\sqrt{1 + \left(tg\gamma_0 - m \frac{H_2}{H_1} \right)^2}} + \frac{1}{\sqrt{1 + \left(tg\gamma_0 + m \right)^2}}}{\sqrt{1 + \left(tg\gamma_0 - m \frac{H_2}{H_1} \right)^2}} \right] \quad (3)$$

Принимая высоты одинаковыми ($H=H_1=H_2$), угол $\gamma_0 \sim 65^\circ$ и вводя коэффициент $m = \frac{y - y_0}{H} < 2$, мы видим, что набег фазы по оси полета $\Delta\phi_x = p_{x,x}$ не отличается от случая обычного радара, по вертикальной оси также имеем $p_z \approx k$. Поперечный же набег $\Delta\phi_y = p_y(y - y_0) = mp_y H$ ведет себя совершенно иначе, увеличиваясь по абсолютному значению при удалении от зеркальной точки, где он равен нулю. Представление функции (2) в виде степенного ряда $f(m) = \sum_{k=0}^4 \frac{m^k}{k!} f^{(k)}(0)$ дает удовлетворительное приближение

$$\frac{p_y}{k}(m) = 2m \cos^3 \gamma_0 (1 + 2m^2 \sin^2 \gamma_0 \cos^2 \gamma_0) \quad (4)$$

позволяющее наглядно оценить особенности двухпозиционного радара данного типа.

Обозначим диапазон наклонных дальностей, измеряемых радаром относительно зеркальной точки, через ΔR . Поскольку $\Delta R(m) = 2H \int_0^m \frac{p_y}{k}(m) dm$, то малое приращение $\Delta(\Delta R)$, (т.е. размер «сжатого» импульса $c\tau_p$) характеризует поперечное разрешение r_y : $\Delta(\Delta R) = 2 \frac{p_y}{k}(m) r_y$. Отсюда, пользуясь выражением (4), получим разрешение

$$r_y = \frac{c\tau_p}{4|m| \cos^3 \gamma_0 (1 + 2m^2 \sin^2 \gamma_0 \cos^2 \gamma_0)} \quad (5)$$

Вблизи зеркальной точки, где $m = \pm \frac{r_y}{H}$, имеем разрешение

$$r_{y0} = 2r_y = \sqrt{\frac{Hc\tau_p}{2 \cos^3 \gamma_0}} \quad (6)$$

которое в точности соответствует горизонтальному разрешению радиоальтиметра при $\gamma_0=0$, а в далеких от зеркальной точек $|m| >> \frac{r_y}{H}$ разрешение не зависит от H . В частности, при $m=1,0$ (т.е. на внешнем краю ожидаемой зоны обзора), при $\gamma_0=65^0$ получим $r_y \sim 2,5c\tau_p$. Примем за внутренний (т.е. ближайший к зеркальной точке) край зоны обзора величину $m=0,3$, где $r_y \sim 12c\tau_p$ и рассчитаем, пользуясь выражением (4), коэффициенты растяжения масштаба горизонтальной дальности:

$$K(m) = \frac{y - y_0}{\Delta R} = \frac{m}{2 \int_0^m \frac{p_y}{k}(m) dm} = \frac{1}{2m \cos^3 \gamma_0 \left(1 + \frac{4}{3} m^2 \sin^2 \gamma_0 \cos^2 \gamma_0 \right)} \quad (7)$$

В точках $m_{min}=0,3$ и $m_{max}=1,0$ имеем тогда $K_{max} \sim 20$ и $K_{min} \sim 5$. Это означает, что равнотипное изображение местности требует нелинейной развертки (7) по оси Y.

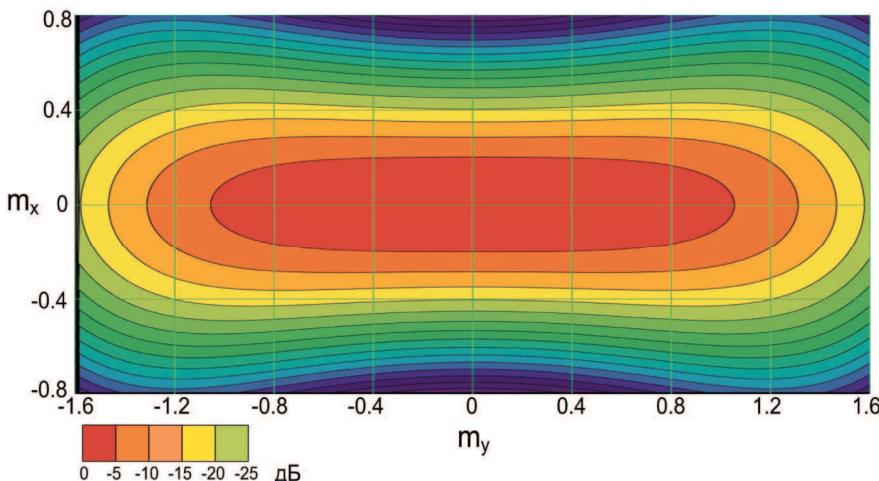


Рис. 2. Диаграмма рассеяния морской поверхности $S^0(m_x, m_y)$ в квазизеркальном двухпозиционном режиме. Угол зеркального визирования $\gamma_0=65^0$, равновысотные аппараты ($H_1 = H_2$), длина волны излучения $\lambda=3\text{ см}$, скорость ветра $W=10\text{ м/с}$, стандартное отклонение уклонов морских волн $\sigma_\theta=12^0$. Шарообразность Земли не учитывается

Диаграмма иллюстрирует известный факт: при расположении источника излучения низко над горизонтом, подсвещенная область превращается в дорожку, и в данном случае ее длина примерно в 6 раз больше ширины. Характерная особенность подобных диаграмм заключается в том, что при ослаблении ветра диаграмма несколько обостряется – т.е. в центральной области диаграммы УЭПР увеличивается, а на краях несколько уменьшается. Из рисунка видно, что в данном случае ($\gamma_0=65^0$, $H_1 = H_2$, $\lambda=3\text{ см}$, скорость ветра $W=10\text{ м/с}$), на площадке с координатами $m_x=\pm 0,25$, $m_y=\pm 1,0$, величина УЭПР не падает ниже, чем до минус 5дБ. Все расчеты производились для модели изотропных развитых волн, обладающих «стандартным» спектром Пирсона-Московитца [3]. Расчеты, проведенные ранее для такой же задачи [1], но с использованием метода «малых возмущений», показывают несколько большие значения УЭПР на краях области подсвета.

Рассмотрим теперь доплеровский частотный сдвиг при движении точки по оси Y. Очевидно, что скорость точки $V_y = \frac{d(y - y_0)}{dt} = -H \frac{dm}{dt}$, и доплеровский сдвиг $\Omega_d = \frac{d(\Delta\phi_y)}{dt} = -H p_y(m) \frac{dm}{dt} = -V_y p_y(m)$. Следовательно, из того же выражения (4) имеем:

$$F_d = -\frac{V_y}{\lambda} \frac{p_y}{k}(m) = -\frac{V_y}{\lambda} 2m \cos^3 \gamma_0 (1 + 2m^2 \sin^2 \gamma_0 \cos^2 \gamma_0) \quad (8)$$

откуда в точках $m_{min}=0,3$ и $m_{max}=1,0$ получим, соответственно, частотные сдвиги $|F_d| \sim 0,06 V_y / \lambda$ и $|F_d| \sim 0,35 V_y / \lambda$ – т.е., во столько же раз меньшие сдвиги по сравнению с обычным радаром ($\sim 2 V_y / \lambda$), во сколько раз хуже по сравнению с ним же ($\sim c t_p / 2$) получается разрешение.

Приведенные расчеты показывают, что коррекция угла сноса летательного аппарата при синтезировании диаграммы направленности приемной антенны должна проводиться с учетом выражения (8), где $V_y = W_x \sin \psi \sin \psi$ – проекция скорости аппарата на ось Y, ψ – угол сноса (рис. 1). В то же время ясно, что левая и правая зоны обзора, которые не разделяются во временной области и вряд ли могут быть разделены в пространстве (при соответствующей развязке лучей в двухлучевой антенне) – эффективно разделяются в частотной области, ибо частотный сдвиг (8), измеренный относительно зеркальной точки, меняет знак в этой точке. Задача решается путем искусственного разворота приемной антенны в азимутальной плоскости на малый угол ψ , как и показано на рис. 1. Этот угол рассчитывается, исходя из величины сдвига, не меньшей чем ширина доплеровского спектра при движении аппарата $\delta F = W_x / D_x$, где D_x – горизонтальный размер приемной антенны:

$$\psi \geq \frac{\lambda}{2D_x m_{min} \sin \gamma_0 \cos^3 \gamma_0} \quad (9)$$

что в приведенных условиях ($\gamma_0=65^\circ$, $m_{min}=0,3$) дает угол $\psi \geq 15\lambda / D_x$.

В результате, при введении дополнительного (гетеродинного) частотного сдвига F_0 в схему формирования опорных сигналов для одновременного синтезирования диаграмм направленности в левой и правой зонах обзора, получается «частотная» диаграмма зон обзора, приведенная на рис. 3.

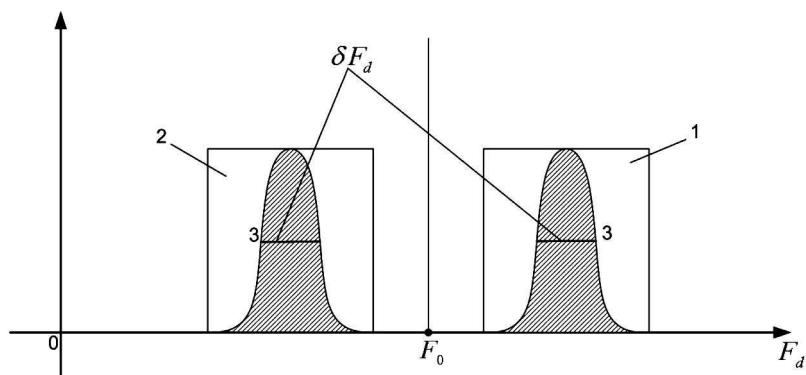


Рис. 3. Доплеровские спектры сигналов в двухпозиционном квазизеркальном РСА

На рис. 3 обозначены: 1 – правая зона обзора, 2 – левая зона обзора, 3 – спектр отраженного сигнала, F_0 – частота гетеродина, $|F_d - F_0|_{max}$ – точки, соответствующие внешним краям зон обзора, $|F_d - F_0|_{min}$ – точки, соответствующие внутренним краям, δF_d – ширина доплеровского спектра отраженного сигнала.

Таким образом, мы рассмотрели основную особенность двухпозиционного квазизеркального радара, отличающую его от привычного нам однопозиционного – сильное растяжение масштаба горизонтальной дальности по отношению к наклонной дальности, что вызывает ухудшение поперечного разрешения и уменьшение поперечного доплеровского сдвига для движущейся точки. Кроме того, возникает проблема частотного разделения левой и правой зон обзора при синтезировании диаграммы направленности приемной антенны, для чего оказывается необходимым небольшой азимутальный разворот приемной антенны, т.е. искусственный «угол сноса» летательного аппарата. Следует отметить, что в космических условиях перечисленные особенности как раз и позволяют обеспечить чрезвычайно широкую зону обзора (порядка $2H$) при достижимом (для моря) разрешении РСА, без применения управляемых многолучевых антенн (АФАР).

Рассмотрим еще одну особенность – условия защиты приемника от «прямого» излучения передатчика. Для того, чтобы прямое излучение с расстояния $2L_0$ не попадало в приемник, необходимо стробировать приемник на интервал Δt , начало которого t_0 выставляется по априорным (навигационным) данным о взаимном положении аппаратов. Поскольку время прихода прямого импульса $t_1=2L_0/c$, а отраженного от зеркальной точки $t_2=2R_0/c$, то минимальная длительность строба составит $\Delta t=t_2-t_1=\frac{2H}{c}\left(\frac{1}{\cos\gamma_0}-tg\gamma_0\right)$.

На самом деле длительность строба должна быть в 3 – 4 раза больше, чтобы вырезать область $m<0,3$ около зеркальной точки, а также получить некоторый запас, исключающий неточную установку t_0 . Учитывая, что широкополосный импульс имеет длительность $\tau^*=Q/\Delta f$ (Q – коэффициент сжатия, Δf – ширина спектра СВЧ сигнала), в результате получим следующее ограничение по коэффициенту сжатия:

$$Q \leq \frac{H\Delta f}{3c}\left(\frac{1}{\cos\gamma_0}-tg\gamma_0\right) \quad (10)$$

При выбранном $\gamma_0 = 65^\circ$ коэффициент в скобках составляет 0,22. Видно, что в космических условиях коэффициент сжатия может достигать $\sim 10^4$ при ширине спектра сигнала $\sim 10^8$ Гц.

3. Особенности синтезирования апертуры при двухпозиционном зондировании нестационарной поверхности

Режим квазизеркального рассеяния СВЧ сигнала морской поверхностью отличается от брэгговского не только высокой УЭПР, но и увеличенными пространственными интервалами корреляции отраженного сигнала. Если при брэгговском рассеянии пространственный интервал (т.е. расстояние между независимыми отражателями) имеет порядок λ , то в квазизеркальном режиме пространственный интервал уклонов морских волн имеет порядок нескольких метров и увеличивается с ростом балльности [2]. Это обстоятельство

говорит о том, что необходимое (большое) число независимых отражателей, образующих нормальный доплеровский «шумовой» спектр при движении носителя – не может существовать на малых (меньше нескольких метров) площадках разрешения и, следовательно, такое разрешение при азимутальном синтезировании попросту невозможно.

В приближении однородной изотропной поверхности, площадь которой превышает зону облучения, а размер элементарного отражателя много меньше разрешаемого, временной интервал корреляции фона для движущейся антенны составляет, как известно, $D_x/2W_x$. Этот эффект известен под названием «интерференция отражателей при движении радара», и в космических условиях интервал корреляции фона имеет порядок миллисекунды. Использование синтезированной апертуры заставляет излучать за это время по крайней мере два когерентных импульса для сохранения доплеровского сдвига $d\phi/dt$. Если же поверхность нестационарна, то случайное (медленное) перемещение отражателей нарушает фокусировку апертуры, если доплеровский сдвиг, вызываемый этим перемещением, больше определенной величины.

Будем считать, что пространственный и временной интервалы флюктуаций уклонов суть параметры одиночного отражателя, и что все соседние отражатели на морской поверхности флюктуируют независимо. Эффективное осредненное отклонение скорости отражателя $\tilde{\sigma}_V(r_x, W)$ рассмотрено в [3], а наибольшее эффективное отклонение доплеровского сдвига в двухпозиционном радаре, согласно выражению (8), составляет

$$\sigma_F \cong \frac{2\tilde{\sigma}_V(r_x, W)m_{\max} \cos^3 \gamma_0}{\lambda}, \quad W - \text{скорость приводного ветра.}$$

При работе РСА в любом

режиме (от полной фокусировки до реальной апертуры) – ширина «свернутого» доплеровского спектра стационарной поверхности составит $\Delta F_D = \frac{2W_x r_x}{\lambda R}$, где $R = \frac{H_2}{\cos \gamma_0}$ – на-

клонная дальность, W_x – скорость перемещения антенны, r_x – продольное разрешение.

Для сохранения фокусировки необходимо, чтобы выполнялось условие $\sigma_F \leq \frac{\Delta F_D}{2}$, что

приводит к выражению для достижимого разрешения, не зависящего от λ :

$$r_x^* \geq \frac{2H}{W_x} \tilde{\sigma}_V(r_x, W)m_{\max} \cos^2 \gamma_0 \quad (11)$$

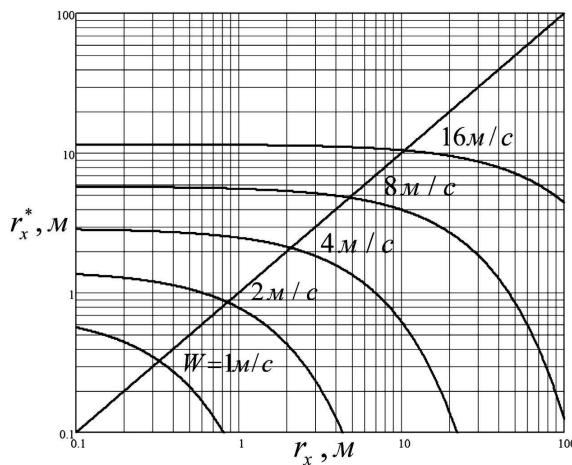


Рис. 4. Условия синтезирования апертуры двухпозиционного космического РСА при квазизеркальном рассеянии на взволнованной морской поверхности

На рис. 4 показана правая часть уравнения (11), т.е. ожидаемое разрешение с учетом нестационарности поверхности (в предположении, что заведомо обеспечивается по-перечное разрешение $r_y = r_x$). Отношение H/W_x для космических условий принимается равным 100с, учитываются и упомянутые выше величины $m_{max} = 1,0$ и $\gamma_0 = 65^0$. Из рисунка видно, что условие сохранения фокусировки (11) до $r_x^* \geq 3$ м выполняется при слабом ветре $W < 4$ м/с, а при сильном ветре $W = 16$ м/с возможна фокусировка с разрешением $r_x^* \geq 12$ м.

4. Космический ИРСА в режиме двухпозиционного зондирования поверхности

Важным параметром радара при формировании любых изображений является число независимых отсчетов сигнала N на заданной «площадке осреднения». При размере симметричной площадки $d > r_x, r_y$, когда $N > 20$ и спектральный шум нормализуется, можно говорить об удельном (на единицу площади поверхности) числе отсчетов N_0 , тогда $N = d^2 N_0$. В однопозиционном РСА, при полном использовании реальной апертуры (независимо от степени фокусировки) имеем $N_0 = \frac{4\Delta f \sin \gamma}{c D_x}$, а в рассматриваемом двухпозиционном, исходя из выражения (5), получим

$$N_0 = \frac{2}{D_{x2} r_y} = \frac{8\Delta f}{c D_{x2}} \left[m \cos^3 \gamma_0 (1 + 2m^2 \sin^2 \gamma_0 \cos^2 \gamma_0) \right] \quad (12)$$

Поскольку на краю зоны обзора ($m_{min} = 0,3$) и заданной (наименьшей) площадке осреднения d^2 , необходимо иметь не менее 20 независимых отсчетов фонового сигнала, то очевидно, что ширина спектра Δf не может быть малой. Например, при $D_{x2} = 5$ м, $d = 100$ м, $\gamma_0 = 65^0$, необходима $\Delta f > 10$ МГц.

Переходим к оценке эффективности космического ДИРСА, предназначенного для формирования поля энергонесущих ветровых волн, а также полей среднего уровня и скорости течений на поверхности океана. Прежде всего отметим, что двухпозиционный квазизеркальный режим по разным причинам малоэффективен при формировании яркостного поля открытого океана (отображающего вариации УЭПР), а также скоростного поля при использовании поперечно-доплеровского эффекта. В то же время, он обещает быть исключительно эффективным при формировании уровенного и скоростного полей при помощи интерферометра, ибо обладает энергетическим потенциалом, позволяющим в принципе работать с очень большими отношениями фон/собственный шум, что дает возможность снизить разностно-фазовую флуктуационную ошибку при заданном размере антенной базы.

Применение интерферометра предполагает использование оптимального алгоритма обработки разностно-фазового сигнала, исключающего влияние интенсивности сигнала на измеряемый параметр [4,5]. Высоты крупных волн и вариации среднего уровня при этом вычисляются из соотношения

$$h, \Delta h = \frac{\lambda H}{2\pi l_1 C t g \gamma_n \cos(\gamma_n - \theta)} \frac{\sum_{n=1}^N \sin(\phi_n - \alpha_{n1})}{\sum_{n=1}^N \cos(\phi_n - \alpha_{n1})} \quad (13)$$

где N – число независимых отсчетов случайной разности фаз φ_n , измеряемой на площадке заданного размера, расположенной под углом визирования γ_n с приемного аппарата, $\alpha_{n1} = \frac{2\pi l_1}{\lambda} \sin(\theta - \gamma_n)$ – априорный фазовый набег на базе l_1 , θ – угол наклона антенной базы относительно горизонта. Углы θ и γ_n близки, однако величина α_{n1} остается огромной и требует компенсации хотя бы до величины 30° , тогда вариации среднего значения φ_n в формируемом РЛ изображении нетрудно отделить от остатка α_{n1} , т.е. от дрейфа измеряемой величины по дальности.

Нормированная флуктуационная ошибка составляет

$$\frac{\sigma_{\Delta h}}{\sigma_{\Delta h0}} \cong \frac{\sqrt{\pi}}{\beta_1} \sqrt{\left[\left(1 + \frac{1}{q^2} \right)^2 \exp\left(\frac{\beta_1^2}{\pi}\right) \right] - 1} \quad (14)$$

где q – энергетический потенциал радара (отношение фон/собственный шум),

$$\sigma_{\Delta h0} \cong \frac{c}{4\Delta f d \sqrt{N_0} \cos \gamma_n} \quad (15)$$

– предельная (нормирующая) величина флуктуационной чувствительности, и

$$\beta_1 \approx \frac{4\pi c l_1 \cos \gamma_n \sin \gamma_n \cos(\gamma_n - \theta)}{m \lambda H \Delta f} \quad (16)$$

– безразмерный коэффициент, входящий в выражение (14), представленное на рис. 5. Из рисунка видно, что допустимая (~ 1 дБ) потеря чувствительности относительно предельной требует тем большего потенциала q , чем меньше величина β_1 , зависящая от отношений двух малых величин: l_1/H и $\Delta f/f$, $f=c/\lambda$. Именно эти параметры ИРСА должны выбираться по графикам рис. 5, исходя из рациональных величин β_1 и q .

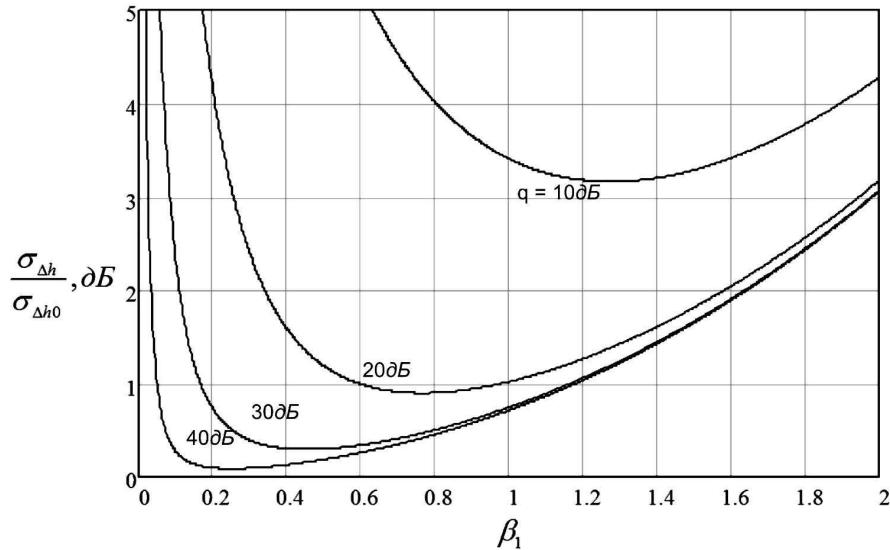


Рис. 5. Нормированная флуктуационно-уровенная чувствительность РЛ интерферометра

Скоростной интерференционный канал во многих отношениях вызывает меньше проблем, нежели уровенный. В принципе, наличие продольной антенной базы позволяет

измерять как поперечную составляющую скорости (по разности фаз сигналов за время пролета антенной базы), так и продольную составляющую (по сдвигу максимума коэффициента корреляции). Ограничиваюсь только поперечной составляющей, запишем соотношение, вытекающее из того же оптимального алгоритма обработки разностно-фазовых сигналов и служащее для вычисления орбитальной скорости крупных волн и скорости течений [6]:

$$V_{op\delta}, \bar{V}_y = \frac{\lambda W_x}{2\pi l_2 \sin \gamma_n} \frac{\sum_{n=1}^N \sin(\varphi_n - \alpha_{n2})}{\sum_{n=1}^N \cos(\varphi_n - \alpha_{n2})} \quad (17)$$

где W_x – скорость аппарата, $\alpha_{n2} = \frac{2\pi l_2 \cos \gamma_n}{\lambda H}$ – априорный фазовый набег на базе l_2 . Сразу видно, что этот набег мал по сравнению с набегом α_{n1} , так что, по-видимому, можно обойтись и без его компенсации. Нормированная флюктуационная ошибка:

$$\frac{\sigma_{V_y}}{\sigma_{V_y 0}} = \frac{\sqrt{\frac{3}{2}}}{\beta_2} \sqrt{\frac{4 \left(1 + \frac{1}{q^2}\right)^2 \beta_2^2}{\pi \Phi^2(\beta_2)} - 1} \quad (18)$$

нормирующая (предельная) флюктуационная чувствительность:

$$\sigma_{V_y 0} = \frac{W_x L_x \operatorname{ctg} \gamma_n}{dH \sqrt{6\pi N_0}} \quad (19)$$

и безразмерный коэффициент:

$$\beta_2 = \frac{2\sqrt{\pi}}{\lambda H} L_x l_2 \cos \gamma_n \quad (20)$$

В выражениях (17 – 20): W_x – скорость аппарата, L_x – размер синтезированной апертуры, l_2 – размер антенной базы, $\Phi(\beta_2) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\beta_2} \exp(-t^2) dt$ – интеграл вероятностей.

Выбор параметров ИРСА на базе выражения (18) иллюстрируется рис. 6.

Анализ чувствительности интерферометров [4,5] показывает, что наличие крупных ветровых волн практически не влияет на коэффициент корреляции, определяемый формой сигнала и энергетическим потенциалом (q). В то же время крупные волны являются помехой при формировании в ИРСА панорамных изображений уровенного и скоростного полей. Если сформировать изображение с осреднением разностно-фазового сигнала на симметричной площадке размером d , а ветровые волны считать изотропными и гауссовыми, то уместно определить пороговую чувствительность ИРСА как результат сложения трех независимых случайных процессов, т.е. теплового шума, спекл-шума и ветрового волнения:

$$(\Delta h)_{nop} = q_0 [\sigma_{\Delta h}^2(\beta_1, q, d) + \tilde{\sigma}_h^2(d, W)]^{1/2} \quad (21)$$

$$\left(V_y\right)_{nop} = q_0 \left[\sigma_{V_y}^2(\beta_2, q, d) + \tilde{\sigma}_V^2(d, W) \right]^{1/2} \quad (22)$$

В выражениях (21) и (22) q_0 – пороговый коэффициент (обычно принимают $q_0=2$), а первые слагаемые являются аппаратурными флюктуационными чувствительностями (15) или (19), предполагая оптимальный выбор параметров β и q при минимальной (порядка 1 дБ) потере чувствительности, исходя из графиков рис. 5 и рис. 6. Вторые слагаемые являются осредненными на площадке дисперсиями флюктуаций, рассчитанными для высот и орбитальных скоростей ветровых волн по их пространственным спектрам в зависимости от скорости приводного ветра W [3].

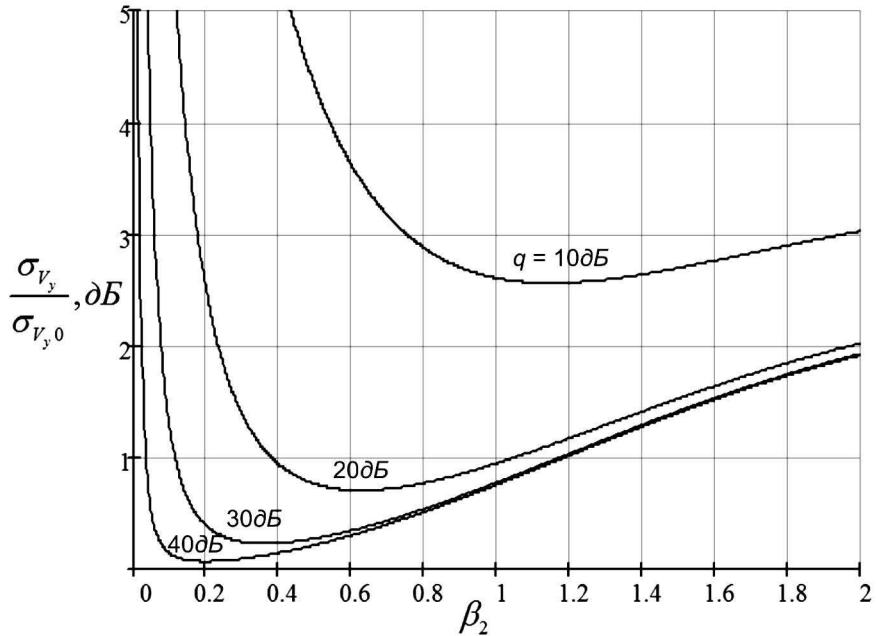


Рис. 6. Нормированная флюктуационно-скоростная чувствительность РЛ интерферометра

Совершенно ясно, что при соответствующих задаче параметрах аппаратуры мы получим инструмент, позволяющий при осреднении на малых площадках формировать изображения морских волн (т.е. непосредственно измерять их высоты h или орбитальные скорости V_y). Тот же инструмент при осреднении на больших площадках, позволяющих исключить второе слагаемое, должен обеспечить формирование вариаций мезомасштабного поля уровня океана $\Delta h(x,y)$ или мезомасштабного поля течений $V_y(x,y)$.

5. Расчетные параметры космического ДИРСА

Исходя из схемы рис.1, а также из работы [10] и изложенных выше ограничений, примем за основу следующие главные параметры двухпозиционного квазизеркального космического ДИРСА: высота орбит $H_1=H_2=800$ км; зеркальный угол $\gamma_0=65^0$; продольные размеры антенн $D_{x1}=D_{x2}=5$ м; поперечные размеры антенн $D_{z1}=D_{z2}=0,5$ м; размер продольной антенной базы $l_2=5$ м; размер поперечной антенной базы $l_1=15$ м; скорость аппарата $W_x=8$ км/с; длина волны $\lambda=3$ см; максимальная ширина спектра сигнала (Δf) =100МГц; зоны обзора лежат в пределах от $m_{min}=0,3$ до $m_{max}=1,0$ слева и справа от зеркальной точки; минимальное значение УЭПР (S^0)_{min}=1 (0дБ).

Не учитывая на этом этапе кривизну (шарообразность) Земли, основные геометрические параметры обзора получаются следующими:

- расстояние между аппаратами $2L_0=2Htg\gamma_0=3430\text{км}$;
- минимальная (суммарная) наклонная дальность $2R_0=\frac{2H}{\cos\gamma_0}=3782\text{км}$;
- минимальный угол визирования поверхности
$$\gamma_1 = \arcsin \frac{\operatorname{tg}\gamma_0 - m_{\max}}{\sqrt{1 + (\operatorname{tg}\gamma_0 - m_{\max})^2}} = 48,8^0;$$
- максимальный угол визирования поверхности
$$\gamma_2 = \arcsin \frac{\operatorname{tg}\gamma_0 + m_{\max}}{\sqrt{1 + (\operatorname{tg}\gamma_0 + m_{\max})^2}} = 72,4^0;$$
- минимальное расстояние зоны обзора от надира к траектории аппарата $a=Htg\gamma_l=914\text{км}$;
- максимальная (суммарная) наклонная дальность $R_{\max}=\frac{H}{\cos\gamma_1}+\frac{H}{\cos\gamma_2}=3862\text{км}$;
- диапазон наклонных дальностей $R_{\max}-2R_0=80\text{км}$.

Поскольку нет смысла включать в зону обзора области вблизи зеркальной точки, то примем величину $m_{\min}=0,3$ за «внутренний» край обеих зон, тогда минимальная наклонная дальность составит $R_{\min}=\frac{H}{\cos\gamma_1^1}+\frac{H}{\cos\gamma_2^1}=3793\text{км}$, где

$$\gamma_1^1 = \arcsin \frac{\operatorname{tg}\gamma_0 - m_{\min}}{\sqrt{1 + (\operatorname{tg}\gamma_0 - m_{\min})^2}} = 61,5^0, \quad \gamma_2^1 = \arcsin \frac{\operatorname{tg}\gamma_0 + m_{\min}}{\sqrt{1 + (\operatorname{tg}\gamma_0 + m_{\min})^2}} = 67,8^0, \text{ и тогда}$$

диапазон наклонных дальностей составит $R_{\max}-R_{\min}=69\text{км}$.

Таким образом, при диапазоне наклонных дальностей 69км мы имеем в каждой из двух зон обзора диапазон горизонтальных дальностей $H(m_{\max}-m_{\min})=560\text{ км}$, т.е. средний коэффициент растяжения составляет 8,1. Было показано, что для формирования нелинейной развертки изображений можно ввести локальный коэффициент растяжения (7), тогда для точек m_{\max} и m_{\min} он составит, соответственно, 5 и 20. При этом, поперечное разрешение (5) в тех же точках, при $\Delta f=100\text{МГц}$ составит $\sim 7,5\text{м}$ и $\sim 30\text{м}$. Таким образом, масштаб изображения растягивается примерно в той же пропорции, что и поперечное разрешение.

Оценим теперь количественно, как формируются зоны обзора с указанными параметрами. При синтезировании диаграммы направленности приемной антенны, обеспечивающей одновременное и независимое формирование изображений в ближней и дальней зонах – необходимо, как было показано, развернуть обе антенны по азимуту на малый угол $\psi \sim 13\lambda/D_x$, что составляет $\sim 4^0$. При этом доплеровский сдвиг частоты сигнала относительно зеркальной точки ($m=0$) составит, используя выражение (8):

$$F_d = -\frac{W_x}{\lambda} 2m \cos^3 \gamma_0 \sin \psi \sin \gamma_0 (1 + 2m^2 \sin^2 \gamma_0 \cos^2 \gamma_0) \quad (23)$$

В точках $m=\pm 0,3$ получаются сдвиги $\pm \sim 1$ КГц, в точках $m=\pm 1,0$ сдвиги составляют $\pm \sim 4$ КГц. Следовательно, для спектрального разделения зон необходимо использовать гетеродинную частоту F_0 в пределах $(5 - 10)$ КГц (рис. 3). Показанный на рисунке азимутальный спектр сигнала имеет ширину $\delta F = W_x/D_x \sim 1,6$ КГц и центральную частоту, зависящую от заданной дальности (точки m), согласно выражению (23). Таким образом, генератор опорных сигналов, вырабатываемых для синтеза диаграммы направленности приемных антенн, должен быть построен с учетом приведенного здесь механизма спектрального разделения зон обзора.

Остается рассчитать энергетику двухпозиционного РСА, а также параметры РЛ изображений полей уровня и скорости на поверхности океана, достижимые в космическом ДИРСА при его работе в режиме квазизеркального рассеяния. Для расчета энергетики будем считать, что на всем протяжении обеих зон обзора, т.е. при $m=\pm(0,3-1,0)$, в наиболее вероятных гидрометеоусловиях, т.е. при скорости ветра в пределах $W=(1-10)$ м/с, величина УЭПР (удельной эффективной поверхности квазизеркального рассеяния S^0) не падает ниже 0 дБ, $(S^0)_{\min}=1$ – что обосновывается в работах [7,8]. Воспользуемся стандартным уравнением радиолокации для мощности принимаемого импульсного сигнала, сжатого по спектру шириной Δf :

$$P_2 = \frac{P_1 G_{a1} G_{a2} \lambda^2 S_p S^0}{(4\pi)^3 R_0^4} \geq q^2 k T_u \Delta f, \quad (24)$$

где P_1 – мощность излучаемого импульса, $G_{a1} = \frac{4\pi D_{x1} D_{z1}}{\lambda^2 \cos^2 \gamma}$ – усиление передающей антенны с размерами раскрытия D_{x1} и D_{z1} , $G_{a2} = \frac{4\pi D_{x2} D_{z2}}{\lambda^2 \cos^2 \gamma}$ – усиление приемной антенны с такой же формой (cosec^2) диаграммы направленности, $S_p = \frac{\lambda R_0}{D_{x2}} r_y(m)$ – минимальная площадь « пятна» от излучаемого импульса на поверхности, $k T_u$ – спектральная плотность теплового шума, для современных СВЧ приемников составляющая $\sim 10^{-20}$ вт/Гц. Поскольку рабочий диапазон наклонных дальностей мал ($R_{max} \sim R_0$), и $R_0 = H / \cos \gamma_0$, после подстановки перечисленных величин в (23) найдем необходимую пиковую мощность излучения для эквивалентного (сжатого) импульса:

$$P_1 \geq \frac{4\pi q^2 k T_u \Delta f \lambda H^3 \cos \gamma_0}{D_{x1} D_{z1} D_{x2} r_y(m) S^0} \quad (25)$$

Средняя излучаемая мощность меньше пиковой (25) в $T_p \Delta f$ раз. Из выражения (7) можно получить период следования импульсов $T_p = \frac{(\Delta R)_{\max}}{c} = \frac{m_{\max} H}{c K(m_{\max})}$, где $K(m_{\max})$ – коэффициент растяжения масштаба наклонной дальности на внешней границе зоны обзора. При этом, величина $m/K(m)$, согласно с (7), примерно составляет $\sim 2 m^2 \cos^3 \gamma_0$, тогда получаем:

$$T_p = \frac{2Hm_{\max}^2 \cos^3 \gamma_0}{c} \quad (26)$$

Для средней излучаемой мощности с учетом (26) получаем соотношение

$$\bar{P}_1 \geq \frac{2\pi q^2 k T_u H^2 \lambda c}{D_{x1} D_{z1} D_{z2} m^2 r_y(m) (S^0)_{\min} \cos^2 \gamma_0} \quad (27)$$

причем величина $m^2 r_y(m)$ мало изменяется по диапазону дальностей, и при ширине спектра сигнала $\Delta f = (10-100)\text{МГц}$ составляет $\sim(5-50)\text{м}$. При этом, период следования импульсов (26) хорошо согласуется с величиной, диктуемой шириной доплеровского спектра отраженного сигнала $T_p \leq D_{x2}/2W_x$.

Подставим в (27) принятые выше величины, а также интенсивность теплового шума $kT_u = 10^{-20}\text{вт}\cdot\text{с}$. Необходимая средняя мощность излучения, определяемая из выражения (27), составит $\sim 30\text{вт}$ при $q=10$ (20дБ) и $\Delta f = 100\text{МГц}$. При $q=100$ (40дБ) и такой же ширине спектра необходима мощность $\sim 3\text{Квт}$. Это означает, что при располагаемой средней мощности $\sim 1\text{Квт}$ и ширине спектра излучаемого сигнала $\Delta f \sim 30\text{МГц}$ можно работать при $q=100$ – в этом, собственно, и состоит основное преимущество двухпозиционного ИРСА при работе по морской поверхности.

Перейдем, наконец, к расчету ожидаемых параметров РЛ изображений. При по-перечной антеннной базе $l_1 = 15\text{м}$, установленной с оптимальным наклоном $\theta = \gamma_0 = 65^\circ$, необходимо обеспечить приемлемый коэффициент β_1 , как следует из рис. 6. Принимая $\Delta f = 10\text{МГц}$, для уровненного канала в крайней точке зоны обзора ($m=1$) имеем из выражения (16) коэффициент $\beta_1 = 0,1$. Как видно из рис. 6, даже при такой полосе сигнала приходится работать с отношением фон/шум $q=100$ (40дБ), а средняя мощность излучения должна составить $\sim 300\text{вт}$. При этом, удельное число отсчетов (12) невелико, $N_0 = 0,003\text{м}^{-2}$, и зависящая от размера площадки d аппаратурная флюктуационно-уровненная чувствительность (15) составит $\sigma_{\Delta h} \sim \frac{300}{d}\text{ м}$. Видно, что при такой чувствительности нельзя измерять высоту энергонесущих ветровых волн. В то же время при осреднении на площадках размером $d \sim 10\text{км}$, вариации поля уровня могут фиксироваться с приемлемой чувствительностью $\sim 3\text{см}$.

Для скоростного канала, принимая упомянутые значения λ , H , $l_2 = 5\text{м}$ и $\Delta f = 30\text{МГц}$, а также характерный для космического РСА минимальный размер синтезированного раскрыва (при работе по морю) $L_x = 1\text{км}$, найдем из выражения (20) коэффициент $\beta_2 = 0,32$. Как видно из рис. 6, это позволяет работать с отношением фон/шум $q \sim 30$ (30дБ), а оценка аппаратурной флюктуационной чувствительности (19) дает величину $\sigma_{V_y} \sim \frac{4}{d}\text{ м/с}$ при удельном числе отсчетов $N_0 = 0,01\text{ м}^{-2}$ и той же средней мощности излучения 300вт.

При малом размере d площадки мы сможем наблюдать панораму орбитальных скоростей крупных (энергонесущих) волн, а при больших размерах d можно говорить о воспроизведении поля средней скорости течений с пороговой чувствительностью $2\sigma_{V_y}$. Выражение (22) позволяет произвести расчет пороговой скоростной чувствительности в зависимости от размера площадки и скорости ветра, предполагая волновую помеху изотропной и гауссовой, а спектр волн соответствующим спектру

Пирсона-Московитца, следуя работам [2,3]. Результаты расчетов представлены на рис. 7.

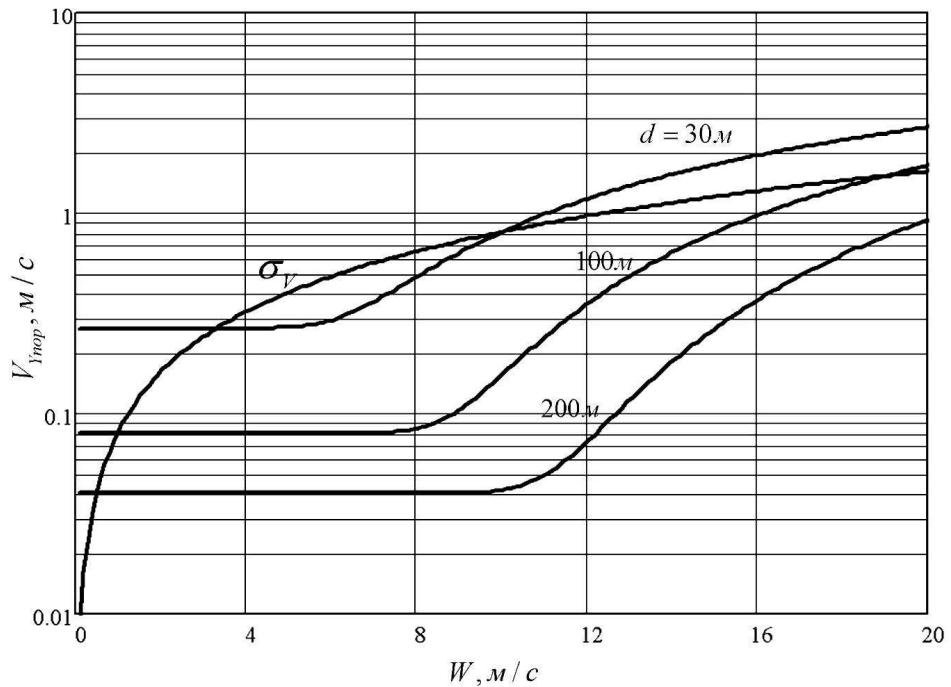


Рис. 7. Расчетные зависимости пороговой чувствительности (V_y)_{пор} космического ДИРСА от скорости при водного ветра W и размера симметричной площадки осреднения d . Показана также зависимость стандартного отклонения «точечной» орбитальной скорости волн от скорости ветра $\sigma_V(W)$. Параметры интерферометра: $H=800\text{км}$, $L_x=1\text{км}$, $l_2=5\text{м}$, $\lambda=3\text{см}$, $\Delta f=30\text{МГц}$, $q=30$ (30дБ), $\beta_2=0,32$, $(N_0)=0,01\text{м}^{-2}$

Из рисунка видно, что при скорости ветра $W < 8\text{м/с}$, используя площадки осреднения с размером $d \geq 100\text{м}$, можно восстанавливать поле скорости течений с пороговой чувствительностью $2\sigma_V < 8\text{см/с}$. Используя же малые площадки с размером $d \sim 30\text{м}$, можно восстанавливать поле орбитальной скорости энергонесущих волн при скорости ветра $W \geq 12\text{м/с}$. Показана также зависимость «точечного» стандартного отклонения орбитальной скорости развитых (изотропных) ветровых волн от скорости ветра $\sigma_V(W)$.

Сравнивая параметры уровенного и скоростного интерферометров, мы видим, что режим уровенного интерферометра далек от оптимального, ибо при максимально возможном размере антенной базы $l_1=15\text{м}$ он требует громадного отношения фон/шум ($q=40\text{дБ}$), однако его пороговая чувствительность оказывается всё же достаточной для формирования вариаций поля уровня океана на больших площадках. Режим скоростного интерферометра при меньшем размере антенной базы $l_2=5\text{м}$ ближе к оптимальному, требуемое отношение фон/шум $q=30\text{дБ}$ не столь велико, а его пороговая чувствительность оказывается достаточной для формирования – как мелкомасштабного поля орбитальных скоростей ветровых волн, так и мезомасштабного поля скорости течений.

В этом плане уместно сопоставить приведенные здесь характеристики двухпозиционного радиолокатора, или «морского тандема», с характеристиками европейского радиолокационного проекта «Tandem TerraSAR-X». В этом проекте, также использующем ИРСА с продольной и поперечной антенными базами, значительный их размер ($\sim 200\text{м}$) обусловлен размещением антенн на двух независимых космических аппаратах [12]. Находясь на различных (слабо-эллиптических) полярных орбитах, эти антенны воспринимают отраженный от поверхности сигнал при близких углах визирования, но с изменяющимися

во времени проекциями антенной базы (l_1 , l_2). В отличие от схемы визирования рис. 1, рассеяние поверхности не отличается от традиционного («обратного»). Разумеется, эта система могла бы работать и по морской поверхности при соответствующих параметрах аппаратуры – прежде всего, при огромной мощности излучения, обеспечивающей необходимую ширину зоны обзора с применением АФАР (активной фазированной антенной решетки на обоих аппаратах). По-видимому, значительно проще в этой системе решается задача восстановления рельефа суши, где требуется предельно-достижимое горизонтальное разрешение, необходимая ширина зоны обзора не столь велика, а требуемое вертикальное разрешение (т.е. уровенная чувствительность) сопоставимо с горизонтальным. Таким образом, различные пути оптимизации ИРСА для решения сухопутных и морских задач представляются естественными, и предлагаемый «морской tandem» не следует считать альтернативой «сухопутному tandem».

6. Краткие выводы

6.1. Приведенные расчеты показывают, что двухпозиционные космические радары данного типа обладают определенными преимуществами по сравнению с радарами, использующими брэгговское (резонансное) рассеяние морской поверхности. Основное преимущество заключается в более высокой (на три порядка) отражательной способности поверхности, что позволяет, в частности, обеспечить высокую точность разностно-фазовых (интерференционных) измерений полей скорости и уровня при малых антенных базах. Второе преимущество заключается в растяжении (на порядок) зоны обзора по горизонтальной дальности по сравнению с наклонной. Это позволяет обойтись без управляемых антенных решеток, при разделении двух «естественных» зон (находящихся по обе стороны от зеркальной точки) по доплеровскому частотному сдвигу при синтезировании апертуры приемной антенны. В то же время, двухпозиционный квазизеркальный радар при использовании столь же широкополосного сигнала проигрывает однопозиционному в поперечной разрешающей способности. При этом не следует забывать, что продольная разрешающая способность (как и в однопозиционном РСА) ограничена эффектом расфокусировки апертуры из-за нестационарности морской поверхности. По-видимому, для мониторинга ветровых волн достаточно иметь горизонтальное разрешение по обеим осям порядка 20м, однако применение широкополосного СВЧ сигнала диктуется необходимостью обеспечить большое число независимых отсчетов разностно-фазовых сигналов при измерении полей уровня и скорости на мезомасштабных «площадках осреднения» [8,9].

6.2. Впечатляет известный нам германский опыт по созданию самолетного интерференционного РСА (ИРСА), проведенным на нем исследованиям и в конечном итоге – разработке проекта двухпозиционной космической системы Tandem TerraSAR-X [10-12]. В этой системе, предназначеннной для мониторинга объектов суши, антенны обоих аппаратов, составляющих интерферометр, визируют поверхность под близкими углами – как и в однопозиционном ИРСА. Для работы такой системы по морской поверхности необходима огромная мощность излучения, а для расширения зоны обзора – многолучевая АФАР (активная фазированная антенная решетка). Предлагаемый здесь «морской tandem» решает иные задачи и не может стать, как нам представляется, конкурентом «сухопутному».

6.3. Из расчетов выясняется, что при малых антенных базах интерферометра, размещаемых на приемном космическом аппарате, возможно восстанавливать как мезомасштабное поле скорости течений, так и мелкомасштабные скоростные поля (например, изображения орбитальных скоростей ветровых волн). В то же время, восстановление с необходимой чувствительностью поля уровня возможно лишь в мезомасштабе, с разрешением порядка нескольких километров (например, изображений вызывающих цунами сейсмических волн в открытом океане). Это обстоятельство заставляет подумать о переходе из X диапазона излучения в Z диапазон – имея в виду, что при квазизеркальном зондировании морской поверхности её УЭПР на порядки превышает УЭПР атмосферных явлений, включая дождь.

6.4. Разработке предлагаемого космического ИРСА, как и любой новой разработке дистанционного космического средства, должен предшествовать самолетный натурный эксперимент. В этом эксперименте, выполняемом по схеме рис. 1, необходимо, во-первых, уточнить расчетные данные по УЭПР, разрешению, растяжению масштаба изображений и синтезированию апертуры – при работе по морской поверхности в различных гидрометеоусловиях. Во-вторых, необходимо получить экспериментальные данные по восстановлению скоростных и уровенных изображений в РЛ интерферометре – как в двухпозиционном, так и в однопозиционном режимах визирования. Наконец, необходима проверка специфических аппаратурных решений – таких как одновременное синтезирование «ближней» и «далней» апертур при одинаковой наклонной дальности, защита от прямого излучения и выделение слабого разностно-фазового сигнала при высоком отношении фон/собственный шум.

Литература

1. Калмыков А.И., Лемента Ю.А., Островский И.Е., Фукс И.М. Энергетические характеристики рассеяния радиоволн СВЧ диапазона взволнованной поверхностью моря // Препринт №71, ИРЭ АН УССР, Харьков, 1976, 60с.
2. 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.
3. Переслегин С.В. О пространственно-временном осреднении вариаций высот, уклонов и скоростей развитых ветровых волн при дистанционном зондировании поверхности океана // Исследование Земли из космоса, 1985, № 6, с.3-7.
4. Синицын Ю.П., Переслегин С.В. Потенциальная точность и оптимальный алгоритм восстановления мезомасштабного рельефа морской поверхности космическим радиолокатором бокового обзора // Исследование Земли из космоса, 2000, № 1, с.51-57.
5. Переслегин С.В., Неронский Л.Б., Плющев В.А. Флуктуационно-уровенная чувствительность РЛ интерферометра при двухпозиционном зондировании морской поверхности // В сб. «Проявление глубинных процессов на морской поверхности». ИПФ РАН, Нижний Новгород, 2008, с.104 -114.
6. Переслегин С.В., Синицын Ю.П., Плющев В.А. Формирование скоростных и уровенных портретов морской поверхности в аэрокосмических интерференционных РСА (ИРСА) // В сб. «Проявление глубинных процессов на морской поверхности», Нижний Новгород, 2006, ИПФ РАН, вып.2, с. 35-48.
7. Переслегин С.В. Халиков З.А. Двухпозиционная радиолокация морской поверхности // В сб. «Проявление глубинных процессов на морской поверхности». ИПФ РАН, 2008, с.95-103.
8. Khalikov Z.A. Bistatic quasi-mirror radar imaging of the sea surface // Report on the «Ocean SAR-2009» Workshop, Herrshing, Germany, Sept. 2009.

9. *Pereslegin S.V.* Bistatic interferometric SAR (BiSAR) for operational monitoring of ocean phenomena // Report on the «Ocean SAR-2009» Workshop, Herrshing, Germany, Sept. 2009.
10. *Siegmund R., Minguan Bao, Lehner S., Mayerle R.* First demonstration of surface currents imaged by hybrid along- and cross-track interferometric SAR // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 2004, v. 42 (3), p.511-519.
11. *Schulz-Stellenfleth J., Horstmann J., Lehner S., Rosenthal W.* Sea Surface Imaging With an Across-Track Interferometric Synthetic Aperture Radar: The SINEWAVE Experiment // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 2001, v. 39(9), p.2017-2028.
12. *Bartusch M., Hermann J., Siebertz O.* The TanDEM-X Mission // Proceedings of 7th European Conf. on Synthetic Aperture Radar, 2008, v.4, p. 27-30.

Bistatic space sar for ocean phenomena operation monitoring

S.V. Pereslegin, Z.A. Khalikov

*P.P.Shirshov Institute of Oceanology
of the Russian Academy of Sciences (IO RAS)
36, Nahimovski prospect, Moscow, Russia, 117997
E-mail: peresleg@ocean.ru*

Development of space radar for the ocean phenomena operative monitoring supposes the substantial increase of informing as compared to existent means, and the physical parameters of ocean fields must be measured directly. It means that the panoramic radar image must represent, for example, meso-scale field of averaged waves height, field of ocean level variations or field of currents velocity, and exactness of restoration must be equal to the requirements. To other side, the necessary quickness (required, for example, with produced a tsunami seismic waves) can be attained with very wide area of review (width of image ~1000 km), that created by few small satellites. Very economical radar system for ocean phenomena monitoring can be created on the base of two-position principle of sensing, where radiating and received satellites are on the same height of orbits, difference on the latitude. This enables to use a quasi-mirror «illumination track». In same queue, high reflecting ability of marine surface allows to set the interferometer on a receiving satellite with small antenna baseline, for measuring of level and current velocity fields. In the compressed kind the features of two-position radar are examined in the quasi-mirror mode of sea surface sensing, including the aperture synthesis, estimations of measuring exactness for small-scale and meso-scale fields of ocean surface, and necessity of experimental works that's preceding of space development. Citations are given of Russian and foreign authorities, including authors works. The expected parameters of two-position «marine tandem» are compared to the parameters of the European space system project «Tandem TERRASAR-X», intended for monitoring of land objects.

Keywords: large wind waves, seismic waves, current velocity field, ocean level field, quasi-mirror bistatic scattering, bistatic interferometric SAR (BiSAR).