

Двухпозиционная квазизеркальная радиолокация морской поверхности

З.А. Халиков

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН.
117997, Москва, Нахимовский проспект, 36,
Тел.: (499)124-7392, e-mail: peresleg@ocean.ru

Основные особенности двухпозиционной радиолокации морской поверхности рассматриваются в приближении квазизеркального рассеяния от изотропных поверхностных волн. Диаграмма рассеяния взволнованной поверхности (бликовая дорожка) определяющая энергетику и ширину зоны обзора аэрокосмических локаторов, рассчитывается для значительных углов падения облучающей поверхность луча. Разрешающая способность по оси горизонтальной дальности является наихудшей в зеркальной точке, однако на большей части широкой зоны обзора она лишь в несколько раз хуже разрешения обычного (однопозиционного) локатора при той же ширине спектра сигнала. Рассматриваются также условия синтезирования двухлучевой диаграммы направленности приемной антенны при зонах обзора, не разделяющихся по наклонной дальности.

The basic features of bistatic radar are considered in approach of quasi-mirror scattering from isotropic wind waves. The scattering diagram of waving surface defining the radar energy and width of survey zone for aerospace radar, is calculated for considerable angles to normal. Resolution on a ground range axis is the worst in a mirror point, however on the more a part of survey zone it only in several times worse than a resolution of a usual (monostatic) radar with the same of signal spectrum width. Conditions of synthesis of the two-beam receiving antenna diagram are considered also at the survey zones which are not divided on the slant range.

Введение

В настоящее время поверхность океана всесторонне изучена как в плане гидрофизики, так и радиофизики, т.е. в плане взаимодействия океанских явлений с электромагнитным сигналом [1–9]. Всё вместе взятое позволяет провести оптимизацию аппаратных решений под задачи распознавания и диагностики океанских явлений. Эти задачи сводятся, главным образом, к измерению параметров трех физических полей: энергонесущих ветровых волн (высота и орбитальная скорость), скорости течения и аномалий среднего уровня.

Первая задача косвенным образом решается существующими РЛ средствами. Высокоразрешающие радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА), работая в режиме брэгговского рассеяния, воспроизводят картину модуляции мелких волн крупными, но не интересующую нас картину крупных волн [10]. На сегодня еще не существует космических РЛ средств, способных непосредственно наблюдать пространственную структуру и измерять параметры (высоту, орбитальную скорость) энергонесущих ветровых волн.

Вторая задача предусматривает измерение вектора скорости течения, т.е. осредненной величины, относящейся к некоей заданной (мезомасштабной) площадке, по своим размерам заведомо превышающей размеры энергонесущих волн. Обработка исходных данных (радиоголограмм) от современных космических РСА позволяет измерять, с некоторыми ограничениями, радиальную составляющую скорости течения по частотному доплеровскому сдвигу отраженного сигнала. При обработке здесь устраняются многие ошибки, в частности частотный дрейф из-за изменения скорости вращения Земли вдоль меридиана [11].

Третья задача – панорамное восстановление поля уровня океана – представляется наиболее важной. Многолетнее использование радиовысотометров произвело, без

преувеличений, революцию в физической океанологии. Массовая обработка данных, полученных на космических радиовысотомерах (РВ) позволила, отделяя статические вариации уровня от динамических – получить, например, картину океанических хребтов и впадин по возникающим на поверхности гравитационным аномалиям. Являясь трассерными приборами, существующие РВ способны формировать и панорамное поле уровня – но за достаточно большое время, для одного РВ примерно за месяц. Таким образом, существует огромная потребность в создании космических панорамных измерителей поля уровня океана. При этом векторное поле геострофических течений рассчитывается общеизвестным методом через поле уровня.

Использование двухпозиционного квазизеркального принципа позволяет решить эти задачи благодаря высокой отражательной способности морской поверхности – что, в свою очередь, позволяет разместить на приемном аппарате интерферометр с допустимой по размеру антенной базой [12]. Здесь мы ограничимся анализом двухпозиционного квазизеркального зондирования морской поверхности, не касаясь проблем радиоинтерферометрии.

Амплитудно-фазовые характеристики сигнала при двухпозиционном квазизеркальном рассеянии на взволнованной поверхности

Поле квазизеркального рассеяния на поверхности с пологими неровностями рассмотрено в общем виде в работе [1]. На поверхность, содержащую трехмерные пологие волны $h(x,y)$, падает плоская электромагнитная волна E_0 , а наблюдение площадки S производится во френуговской зоне приемной антенны (рис. 1). При отсутствии затенений, воспринимаемое поле E образуется только теми участками («фасетками») поверхности внутри площадки, нормали к которым отвечают зеркальному отражению. Ввиду того, что френелевский коэффициент отражения $\Gamma(\gamma_0)$ примерно одинаков для всей площадки, его можно вынести за интеграл, описывающий воспринимаемое поле E . Не учитывая направленных свойств антенн, можно получить следующее приближенное выражение для осредненного по площадке S отраженного поля:

$$E \cong -E_0 \frac{\Gamma(\gamma_0) \exp[jk(R_{01} + R_{02}) - 2jp_z \Delta h] p^2}{4\pi(R_{01} + R_{02}) p_z} \int_S [\exp j\Phi(x, y) dx dy] \quad (1)$$

где $\Phi(x,y) = p_x x + p_y (y-y_0) - p_z h(x,y)$ – фазор, определяющий осреднение сигнала на площадке S , Δh – приращение уровня, неизменное на всей площадке, $h(x,y)$ – случайное поле высот морских волн. Волновые числа p_x, p_y, p_z являются проекциями разностного волнового вектора $\mathbf{k} - \mathbf{k}_0$ электромагнитного сигнала, $k = 2\pi/\lambda$, $p_x = k(\sin\varphi_1 + \sin\varphi_2)$, $p_y = k(\sin\gamma_1 - \sin\gamma_2)$, $p_z = k(\cos\gamma_1 + \cos\gamma_2)$, $p^2 = p_x^2 + p_y^2 + p_z^2$.

Из геометрии рис.1 эти проекции получаются в виде:

$$p_x = k \left(\frac{x}{y} + \frac{x}{L-y} \right), \quad p_y = k \cdot \left[\frac{L-y}{\sqrt{H_1^2 + (L-y)^2}} - \frac{y}{\sqrt{H_2^2 + y^2}} \right],$$

$$p_z = k \cdot \left[\frac{H_1}{\sqrt{H_1^2 + (L-y)^2}} + \frac{H_2}{\sqrt{H_2^2 + y^2}} \right],$$

где $L = tg\gamma_0(H_1 + H_2)$, γ_0 – угол визирования зеркальной точки. Обозначив текущую координату $y = y_0 + l_y$, где l_y – размер, характеризующий положение точки в зоне обзора, и вводя относительную величину $m = m_y = l_y/H_2$, те же проекции запишем в виде

$$p_x = k \frac{x}{\operatorname{tg} \gamma_0} \left(\frac{1}{H_1} + \frac{1}{H_2} \right) \quad (2)$$

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

$$p_z = k \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{1 + \left(\operatorname{tg} \gamma_0 - m \frac{H_2}{H_1} \right)^2}} + \frac{1}{\sqrt{1 + (\operatorname{tg} \gamma_0 + m)^2}} \right] \quad (4)$$

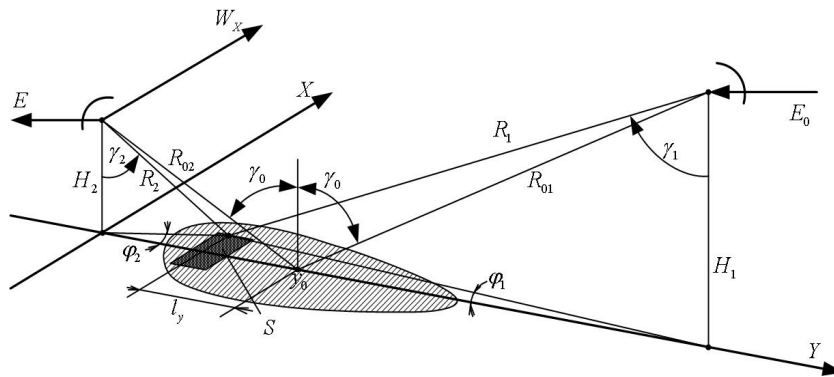


Рис. 1. К анализу особенностей двухпозиционного «квазизеркального» радара. Кривизна поверхности Земли на рисунке не отображена

Применительно к космическим условиям нас интересуют два случая: равновысотные орбиты космических аппаратов ($H_1=H_2$) и «подсвет» поверхности с геостационарного аппарата (ГСКА), $H_1 \gg H_2$. Из выражения (2) следует, что в первом случае продольный (по линии полета) набег фазы $p_x x$ не отличается от набега в однопозиционном радаре, а во втором случае он уменьшается в 2 раза. Из выражения (4) следует, что вертикальный набег фазы в обоих случаях одинаков, и при допустимых $|m| \leq 2$ практически $p_z = k$. Из выражения (3) следует, что поперечный набег фазы $p_y(y - y_0) = m H_2 p_y$, равный нулю в зеркальной точке ($m=0$), в рассматриваемых двух случаях визирования существенно различен. Поскольку этот набег соответствует изменению по оси Y измеряемой локатором суммарной наклонной дальности: $\Delta \varphi_y \approx k \Delta R_\Sigma = k(R_1 + R_2 - R_{10} - R_{20})$, то ясно, что при измерении локатором величины ΔR_Σ появляется неоднозначность – слева или справа от зеркальной находится искомая точка.

Таким образом, именно второе слагаемое фазора (3) отличает двухпозиционный случай от однопозиционного. Для расчета УЭПР воспользуемся исходным выражением (1), принимая гауссово распределение высот пологих изотропных волн $h(x,y)$ и гауссов коэффициент пространственной корреляции $\rho_h(r) = \exp(-r^2/r_h^2)$ с интервалом r_h , тогда величина $\sigma_\theta^2 = \sigma_h^2/r_h^2$ есть «точечная» дисперсия уклонов волн. В результате такого приближения, из (1) можно получить среднюю интенсивность отраженного поля на площадке S для области вблизи зеркального направления

$$|\bar{E}|^2 = E_0^2 \left[\frac{|\Gamma(\gamma_0)|^2 S (p_x^2 + p_y^2 + p_z^2) \cos^2 \gamma_0}{8\pi\sigma_\theta^2 p_z^4 (R_{01} + R_{02})^2} \right] \exp\left(-\frac{p_x^2 + p_y^2}{2\sigma_\theta^2 p_z^2}\right), \quad (5)$$

Перепишем выражение (5), введя нормировку в строго-зеркальном направлении: $[\bar{E}|^2/E_0^2] = S / 4\pi(R_{01} + R_{02})^2$, тогда оно переходит в выражение для удельной эффективной поверхности рассеяния (УЭПР):

$$S^0 = \frac{\cos^2 \gamma_0 |\Gamma(\gamma_0)|^2}{2\sigma_\theta^2} \left[1 + \left(\frac{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2}{p_z^2} \right)^2 \right] \exp\left(-\frac{p_x^2 + p_y^2}{2\sigma_\theta^2 p_z^2}\right) \quad (6)$$

Диаграммы УЭПР для аэрокосмических вариантов двухпозиционного радара
Используя для расчетов полученное выражение для УЭПР (6), а также проекции волновых чисел (2–4), имеем возможность построить характеристики УЭПР $S^0(x, y)$ и по заданному минимальному уровню $(S^0)_{min}$ определить ширину «зоны подсвета». Возможны два варианта космического двухпозиционного квазизеркального радара: оба аппарата на равновысотных орбитах, разнесенных по широте и подсвечивающий аппарат на геостационарной орбите, а приемный – на обычной орбите (рис.2). При расчетах подобных характеристик необходимо учитывать такие факторы, как шарообразность Земли и конечную ширину «дорожки подсвета». Первый фактор приводит к тому, что углы визирования в выражении $p_y = k (\sin \gamma_1 - \sin \gamma_2)$ заменяются на более сложные выражения, куда входят высоты орбит аппаратов и радиус Земли, а второй фактор учитывается при построении трехмерных диаграмм рассеяния $S^0(m_x, m_y)$, где $m_x = x/H_2$. На рис.3 представлены расчетные трехмерные диаграммы квазизеркального рассеяния, соответствующие указанным вариантам визирования. Цветом выделены уровни УЭПР от +7 дБ до – 25дБ, что соответствует принятой модели рассеяния. Анализируя трехмерные характеристики УЭПР, видим следующее. При учете кривизны Земли в равновысотных случаях отношение длины блика к его ширине составляет 4 – 5. В космическом разновысотном варианте блик становится асимметричным, удлиняясь в сторону излучателя. В равновысотном варианте длина блика по уровню 0 дБ составляет $\sim 1,8H_2$, в разновысотном $\sim 2,9H_2$. Ширина блика в его центральной части по тому же уровню в равновысотном варианте составляет $\sim 0,4H_2$, в разновысотном $\sim 0,6H_2$.

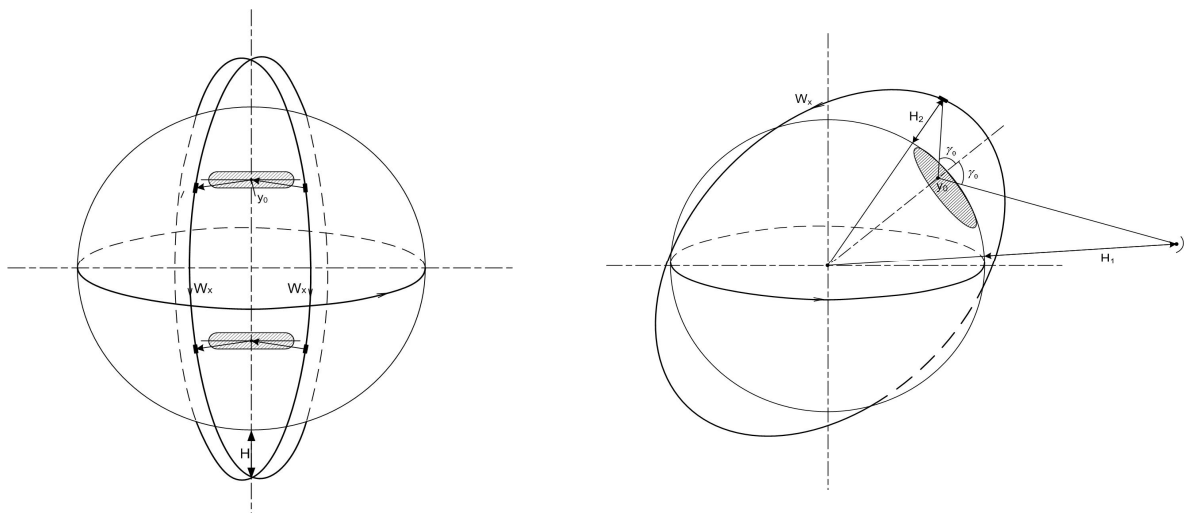


Рис. 2. Два варианта космических двухпозиционных квазизеркальных радаров. Слева: на равновысотных орбитах. Справа: с подсветом от геостационара

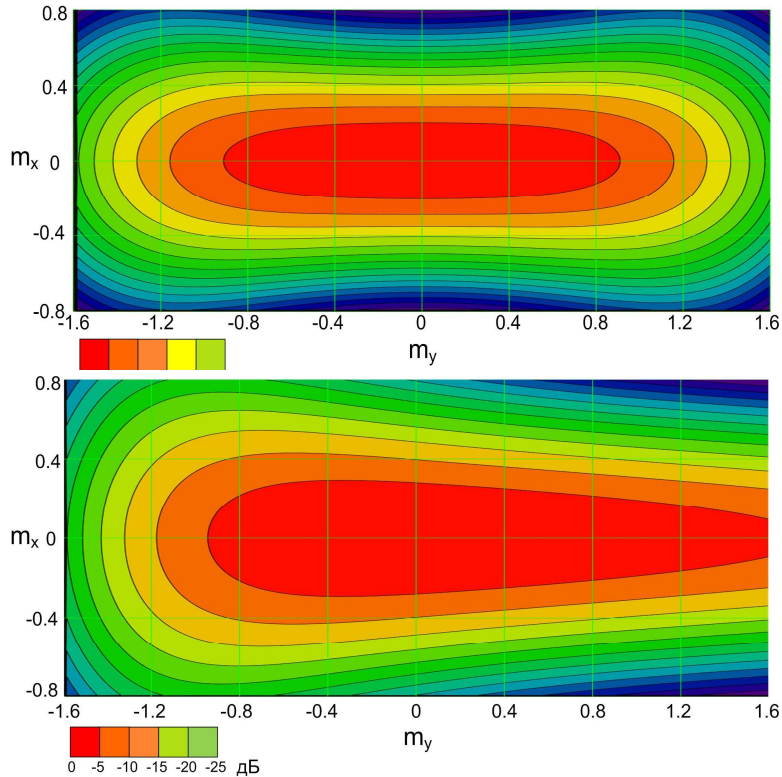


Рис. 3. Диаграммы «квазизеркального» рассеяния при центральном угле визирования $\gamma_0=65^\circ$ и скорости ветра 10 м/с. Вверху – для равновысотных аппаратов, внизу – при подсвете с геостационара. Значения УЭПР, отвечающие принятой модели, лежат в пределах от +7 до -25 дБ. $m_y=l_y/H_2$, $m_x=l_x/H_2$

Основные особенности двухпозиционного радара, зондирующего морскую поверхность в квазизеркальной области

Перейдем к оценке особенностей двухпозиционного квазизеркального зондирования поверхности, вытекающих из свойств горизонтальной проекции волнового вектора (3) и отличающих данный способ зондирования от традиционного (однопозиционного). Упростим задачу, принимая высоты одинаковыми ($H_1=H_2=H$), угол $\gamma_0 \sim 65^\circ$ (рис. 1) и коэффициент $m = \frac{y-y_0}{H} \leq 2$. Представление функции (3) в виде

степенного ряда $f(m) = \sum_{k=0}^4 \frac{m^k}{k!} f^{(k)}(0)$ дает удовлетворительное приближение

$$\frac{P_y}{k}(m) = 2m \cos^3 \gamma_0 (1 + 2m^2 \sin^2 \gamma_0 \cos^2 \gamma_0), \quad (7)$$

позволяющее наглядно оценить особенности двухпозиционного радара данного типа.

Обозначив диапазон наклонных дальностей, измеряемых радаром относительно зеркальной точки, через ΔR , запишем $\Delta R(m) = 2H \int_0^m \frac{P_y}{k}(m) dm$. 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 (7), получим разрешение

$$r_y = \frac{c\tau_p}{4|m| \cos^3 \gamma_0 (1 + 2m^2 \sin^2 \gamma_0 \cos^2 \gamma_0)} \quad (8)$$

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

$$r_{y0} = 2r_y = \sqrt{\frac{Hc\tau_p}{2\cos^3\gamma_0}}, \quad (9)$$

которое в точности соответствует горизонтальному разрешению радиоальтиметра при $\gamma_0=0$, а в далеких от зеркальной точках $|m| \gg \frac{r_y}{H}$ разрешение не зависит от H . В частности, при $m=1,5$ (т.е. на внешнем краю ожидаемой зоны обзора), при $\gamma_0=65^\circ$ получим $r_y \sim 1,5c\tau_p$.

Примем за внутренний (т.е. ближайший к зеркальной точке) край зоны обзора величину $m=0,5$, где $r_y \sim 6c\tau_p$ и рассчитаем коэффициент растяжения масштаба горизонтальной дальности:

$$K(m) = \frac{y - y_0}{\Delta R} = \frac{m}{2 \int_0^m \frac{p_y}{k}(m) dm} = \frac{1}{2m \cos^3 \gamma_0 (1 + \frac{4}{3} m^2 \sin^2 \gamma_0 \cos^2 \gamma_0)} \quad (10)$$

В точках $m_{min}=0,5$ и $m_{max}=1,5$ имеем тогда $K_{max} \sim 12$ и $K_{min} \sim 3,5$. Это означает, что равномасштабное изображение местности требует нелинейной развертки по оси Y .

Важным параметром радара при формировании любых изображений является число независимых отсчетов сигнала N на заданной «площадке осреднения». При размере симметричной площадки $r_s \gg r_x, r_y$, если $N > 20$ и спекл-шум нормализуется, можно говорить об удельном (на единицу площади поверхности) числе отсчетов N_0 , тогда $N = r_s^2 N_0$. В однопозиционном РСА, при полном использовании реальной апертуры (независимо от степени фокусировки) имеем $N_0 = \frac{4\Delta f \sin \gamma}{cD_x}$, где $\Delta f = 1/\tau_p$ –

ширина спектра сигнала, D_x – горизонтальный размер антенны. В двухпозиционном РСА данного типа, исходя из выражения (16), получим удельное число отсчетов

$$N_0 = \frac{2}{D_{x2} r_y} = \frac{8\Delta f}{cD_{x2}} \left[|m| \cos^3 \gamma_0 (1 + 2m^2 \sin^2 \gamma_0 \cos^2 \gamma_0) \right] \quad (11)$$

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 $\Omega_d = \frac{d(\Delta \varphi_y)}{dt} = -H p_y(m) \frac{dm}{dt} = -V_y p_y(m)$. Следовательно, из того же выражения (7) имеем:

$$F_d = -\frac{V_y}{\lambda} \frac{p_y}{k}(m) = -\frac{V_y}{\lambda} 2m \cos^3 \gamma_0 (1 + 2m^2 \sin^2 \gamma_0 \cos^2 \gamma_0) \quad (12)$$

откуда в точках $m_{min}=0,5$ и $m_{max}=1,5$ получим, соответственно, частотные сдвиги $|F_d| \sim 0,08 V_y / \lambda$ и $|F_d| \sim 0,35 V_y / \lambda$ – т.е., во столько же раз меньшие сдвиги по сравнению с обычным радаром ($\sim 2V_y / \lambda$), во сколько раз хуже по сравнению с ним же ($\sim c\tau_p/2$) получается разрешение.

Приведенные расчеты показывают, что коррекция угла сноса летательного аппарата при синтезировании диаграммы направленности приемной антенны должна проводиться с учетом выражения (12), где $V_y = W_x \sin \gamma \sin \psi$ – 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 – эффективно разделяются в частотной области, ибо частотный сдвиг (12), 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:

$$\psi \geq \frac{\lambda}{2D_x m_{\min} \sin \gamma_0 \cos^3 \gamma_0} \quad (13)$$

что в приведенных условиях ($\gamma_0=65^\circ$, $m_{\min}=0,5$) дает угол $\psi \geq 13\lambda/D_x$.

В результате, при введении дополнительного (гетеродинного) частотного сдвига F_0 в схему формирования опорных сигналов для одновременного синтеза диаграмм направленности в левой и правой зонах обзора, получается «частотная» диаграмма зон обзора, приведенная на рис.4. На рис.4. 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.

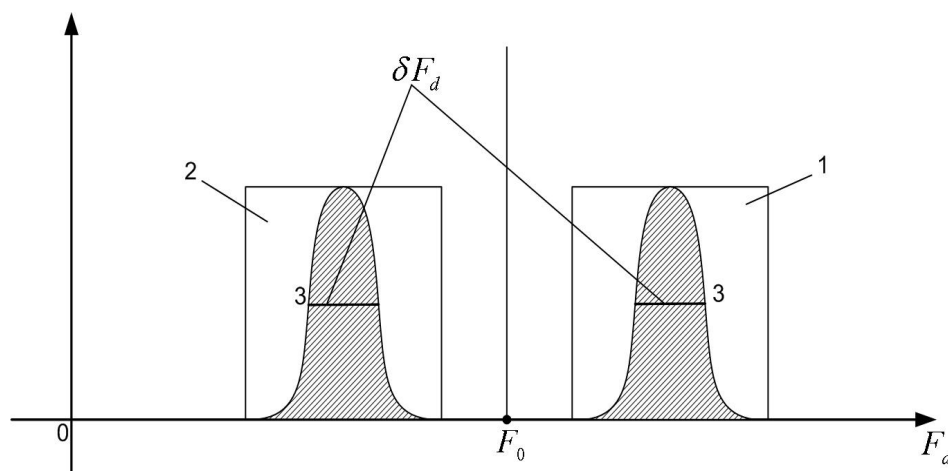


Рис. 4. Доплеровские спектры сигналов в двухпозиционном квазизеркальном РСА

К особенностям двухпозиционного радара данного типа следует отнести и способ защиты приемника от прямого излучения. Для этого 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 $\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2H}{c} \left(\frac{1}{\cos \gamma_0} - \operatorname{tg} \gamma_0 \right)$. На самом

деле длительность строба должна быть в 3 – 4 раза больше, чтобы вырезать область $m < 0,5$ около зеркальной точки, а также получить некоторый запас, исключающий неточную установку t_0 .

Краткие выводы

Рассмотрены особенности фазовых характеристик отраженного сигнала при двухпозиционном радиолокационном зондировании поверхности вблизи и вдали от зеркальной точки. Выявлены закономерности, приводящие к ухудшению разрешающей способности и растяжению масштаба горизонтальной дальности вблизи зеркальной точки, а также к смене знака радиального доплеровского сдвига для движущегося элемента поверхности. Формирование двух независимых зон обзора в двухпозиционном РСА возможно при их частотной (доплеровской) селекции, со стробированием (во времени) небольшой области, примыкающей к зеркальной точке. Рассмотрены трехмерные характеристики УЭПР морской квазизеркальной поверхности, геометрия которых определяется не только упомянутыми фазовыми характеристиками, но и дисперсией уклонов поверхности, зависящей от длины волны радара и скорости ветра.

Литература

1. Рытов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику/ М., Наука, 1978, часть 2, 495с.
2. Bass F.G., Fuks I.M., Kalmykov A.I., Ostrovsky I.E., Rosenberg A.D. Very high frequency radio wave scattering by a disturbed sea surface (pt I. Scattering from a slightly disturbed boundary) //Transactions IEEE, 1968, AP-16, No 5, p.554 – 559.
3. Bass F.G., Fuks I.M., Kalmykov A.I., Ostrovsky I.E., Rosenberg A.D. Very high frequency radio wave scattering by a disturbed sea surface (pt II. Scattering from a actual sea) //Transactions IEEE, 1968. AP-16, No 5, p.560 – 568.
4. Басс Ф.Г., Фукс И.М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности / М., Наука, 1972, 424с.
5. Переслегин С.В. Связь СВЧ рассеяния от морской поверхности с пространственно-временными характеристиками развитого волнения // Известия АН СССР, Физика атмосферы и океана, 1975, т.11, № 5, с. 481- 490.
6. Переслегин С.В. Статистические характеристики СВЧ рассеяния от морской поверхности с учетом конечного разрешения и фактора деполяризации // Известия АН СССР, Физика атмосферы и океана, 1975, т.11, № 6, с. 610 - 619.
7. 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.
8. Cox C., Munk W.H. Measurements of the roughness of the sea surface from photographs of the sun glitter // J. Opt. Soc. America, 1954, v.44, No 11, pp. 838 – 850.
9. 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.
10. Дикинис А.В., Иванов А.Ю., Карлин Л.Н. и др. Атлас аннотированных радиолокационных изображений морской поверхности, полученных космическим аппаратом «Алмаз-1». М.: ГЕОС, 1999, 118 с.
11. Достовалов М.Ю., Неронский Л.Б., Переслегин С.В. Исследование поля скорости океанских течений по фазометрическим данным, полученным РСА космического аппарата ERS // Океанология, 2003, т. 43, № 3, с. 473-480.
12. Pereslegin S.V., Khalikov Z.A. Bistatic interferometric SAR (BiSAR) for operational monitoring of ocean phenomena // Report on the «Ocean SAR-2009» Workshop, Herrshing, Germany, Sept. 2009.