

УДК 621.371

ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ В РАДИОЛОКАТОРАХ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ СКОРОСТНЫХ ПОЛЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

С. В. Переслегин *, *З. А. Халиков*

Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, г. Москва, Россия

Рассматриваются принципы обработки сигналов при зондировании поверхности Земли радиолокаторами с синтезированной апертурой (РСА), в том числе интерференционными с продольной антенной базой (ИРСА). Обсуждаются особенности апертурного синтеза для решения двух задач: измерения скорости локальных отражателей и восстановления скоростного портрета шероховатой поверхности. Рассматриваются особенности этих задач и ограничения, связанные с процессом синтеза апертуры и другими факторами, в том числе ограниченной мощностью излучения космического радиолокатора. Делаются выводы о возможностях радиолокационного восстановления полей скорости поверхности как в случае локальных отражателей, так и для протяжённой поверхности (морские течения). Выполнены приближённые расчёты достижимых параметров регистрируемых полей в РСА, установленных на низкоорбитальных космических аппаратах.

ВВЕДЕНИЕ

Задачи дистанционного восстановления скоростных и уровневых полей поверхности Земли являются одними из самых актуальных для спутниковых систем дистанционного зондирования. Они решаются радиолокационными методами не только в силу их всепогодности и независимости от времени суток, но, главным образом, благодаря возможности измерения всех трёх координат отражающей площадки и скорости её перемещения. Радиолокаторы бокового обзора с синтезированной апертурой при когерентном накоплении сигнала от стационарной поверхности обеспечивают продольную разрешающую способность $r_x = D_x/2$, где D_x — продольный размер антенны. При этом $L_x/D_x \gg 1$, где L_x — размер синтезированной апертуры. Поперечное разрешение r_y обеспечивается шириной частотного спектра Δf излучаемого сигнала, $r_y = c/(2\Delta f \sin \gamma_n)$, где γ_n — вертикальный угол визирования площадки, c — скорость света. В современных радиолокаторах используется когерентное (внутриимпульсное) накопление сигнала, при котором произведение $\Delta f \tau_p \gg 1$, где τ_p — длительность импульса.

Физические особенности и принципы функционирования РСА при зондировании морской поверхности весьма подробно изложены в отечественных работах [1–4], а формирование яркостных (т. е. отображающих интенсивность отражённого сигнала) изображений океанической поверхности из космоса стало возможным при запусках аппаратов SeaSAT-A (1978 год, США) и «Алмаз» (1987 год, СССР). Быстрые темпы совершенствования космических РСА от этих дат и до настоящего времени хорошо прослеживаются в отечественных работах [5–7].

Задача формирования скоростных портретов морской поверхности из космоса при использовании смещения «центроида» доплеровского спектра сигнала от движущейся площадки по отношению к неподвижной площадке начала обосновываться в 1996 году применительно к измерению радиальной составляющей скорости океанических течений с аппарата «Алмаз-1» [8, 9]. Впоследствии для этой цели использовались РСА аппаратов ERS, полученные результаты изложены в работах [10–12]. Одним из важных результатов явилось подтверждение модели проявления на

* peresleg@ocean.ru

поверхности внутренних волн из-за деформации мелких волн в поле орбитальной скорости внутренней волны.

Следующим шагом стало применение для той же цели интерференционного РСА с продольной антенной базой (along-track InSAR), в котором используется разностно-фазовый метод, в принципе позволяющий определить радиальную скорость площадки малого размера с той же точностью, что и площадки большого размера. Физические аспекты этой задачи рассматривались в работах [13–17], а впечатляющий результат — формирование портрета течений в узких морских проливах — был получен при выполнении американо-европейской программы SRTM с использованием пилотируемого космического аппарата, и результаты радиолокационных измерений совпали с численной моделью скорости течений [18]. Наконец, запущенный недавно Германией беспилотный аппарат TerraSAR-X при формировании скоростных портретов использует тот же принцип, и полученные результаты радиолокационных измерений скорости кораблей почти точно совпали с их действительной скоростью [19, 20]. Тем не менее, при формировании скоростных портретов поверхности с близко расположенными локальными отражателями остаётся нерешённой проблема помехоустойчивости [21].

В данной работе обосновываются принципы обработки сигналов в РСА космического базирования применительно к задачам формирования скоростных портретов поверхности Земли. Затем, как и в работах [16, 17], мы попытались установить достижимые параметры диагностики скоростных полей с учётом возможностей современных радиолокационных технологий. При этом делался упор не столько на физическое описание процессов, сколько на их инженерную составляющую, т. е. на возможность использования полученных результатов при создании современных аэрокосмических РСА.

1. ФОРМИРОВАНИЕ ЯРКОСТНЫХ И СКОРОСТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОДИНОЧНОГО ОТРАЖАТЕЛЯ В ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОМ РСА

Рассмотрим задачу измерения скорости одиночного отражателя с помощью интерференционного радиолокатора с синтезированной апертурой, в котором продольная антенная база создаётся методом сравнения сигналов, полученных при двух последовательных положениях приёмно-передающей антенны. Геометрия визирования показана на рис. 1, на котором D_x , D_z — горизонтальный и вертикальный размеры антенны, L_x — размер области синтеза, L_y — размер зоны обзора (без учёта сканирования по углу места), θ — угол наклона плоскости антенны к вертикали, R_n и γ_n — наклонная дальность и угол места отражателя, H — высота орбиты. Размер d зондируемой симметричной площадки на поверхности обычно превышает размеры r_x и r_y разрешаемой площадки S_n , а радиальная и тангенциальная скорости отражателя V_y и V_x на порядки меньше скорости W_x антенны в условиях зондирования с маловысотного космического аппарата (высота орбиты $H = 500 \div 1\,000$ км). На рис. 1 показана также скорость вращения Земли W_E для случая строго меридиональной орбиты. Эта скорость известна, она изменяется по орбите, и её учёт не представляет трудности при скоростных измерениях [11, 12].

Равномерное поступательное движение локального отражателя на поверхности Земли учитывается введением радиальной и тангенциальной составляющих его скорости в функционал, описывающий поведение фазы принимаемого сигнала при одновременном перемещении отражателя и приёмно-передающей антенны. Сигнал на выходе антенны имеет вид

$$U(t) = U_0 \exp \left\{ j \left[\varphi_n + \frac{4\pi}{\lambda} R_n - 2\pi t f_{dy} + \frac{2\pi}{\lambda R_n} (W_x - V_x)^2 t^2 \right] \right\}, \quad (1)$$

где $f_{dy} = (2V_y/\lambda) \sin \gamma_n$ — доплеровский частотный сдвиг от движущегося в радиальном направле-

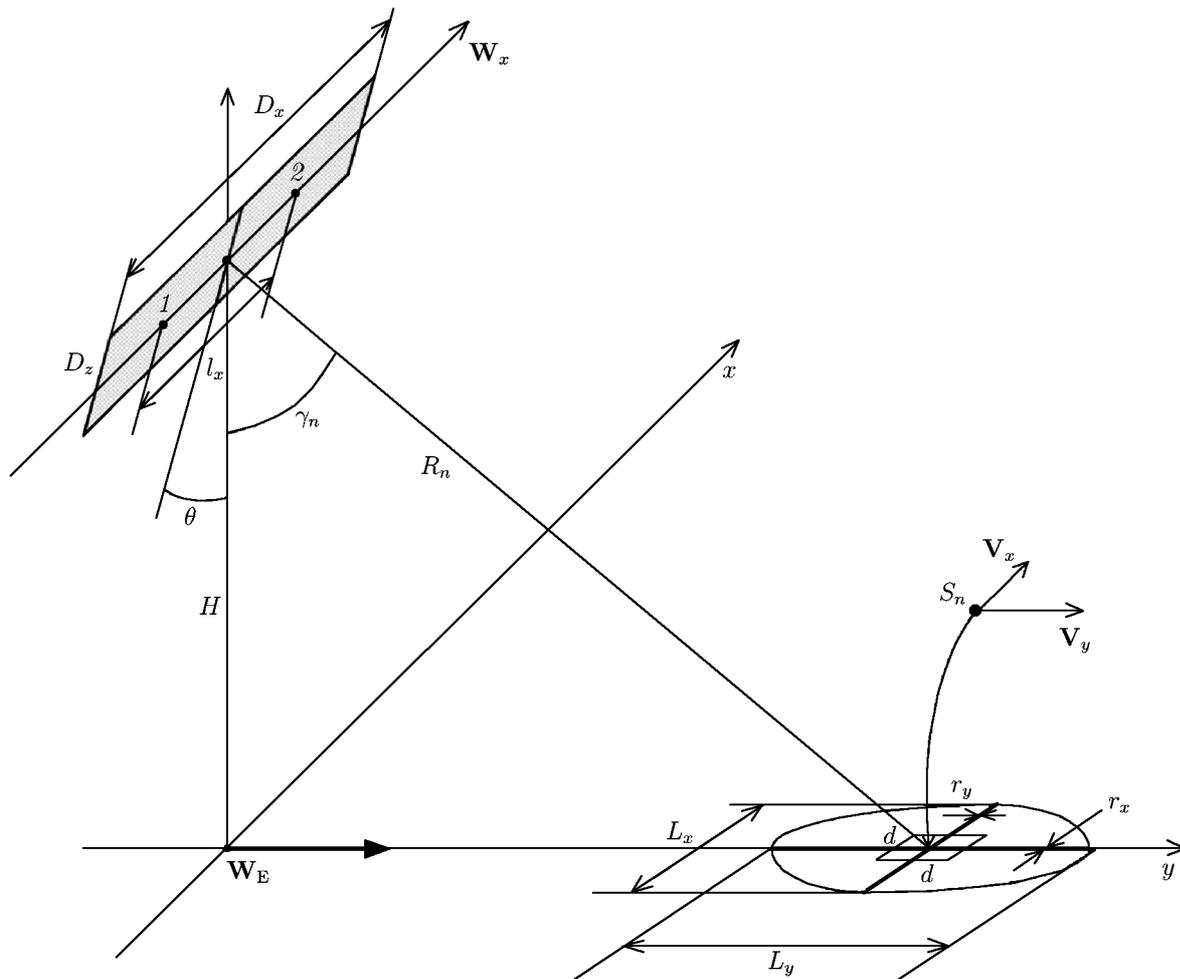


Рис. 1. Геометрия визирования в интерференционном РСА

нии отражателя; W_x — тангенциальная составляющая скорости антенны, φ_n — фаза отражателя, R_n и γ_n — наклонная дальность и угол визирования отражателя, λ — длина волны сигнала, t — время, отсчитываемое от момента положения фазового центра антенны на траверсе цели. Пренебрегая второстепенными эффектами, а также малой тангенциальной скоростью отражателя по сравнению со скоростью антенны и относя фазовый сдвиг $4\pi R_n/\lambda$ к начальному сдвигу φ_0 , для последовательности импульсов с периодом следования T_r запишем

$$U(k) = U_0 \exp \left[j \left(\varphi_0 - 2\pi f_{dy} T_r k + \frac{2\pi W_x^2}{\lambda R_n} T_r^2 k^2 \right) \right] = U_0 \exp \left\{ j \left[\varphi_0 + ak \left(k - \frac{2t_V}{T_r} \right) \right] \right\}, \quad (2)$$

где $a = 2\pi W_x^2 T_r^2 / (\lambda R_n)$, $t_V = V_y R_n \sin(\gamma_n) / W_x^2$ — временное смещение из-за ненулевой скорости отражателя, k — отсчёт номера принимаемого антенной импульса относительно точки траверса ($k = 0$).

Если за время прохода антенной своей длины D_x принимаются четыре отражённых импульса ($D_x = 4W_x T_r$), то смещение антенны на половину своей длины проходит за два импульса и «доплеровское» приращение фазы сигнала за это время составляет $4\pi f_{dy} T_r$. Положения фазового центра антенны относительно траверсной точки $x = 0$ при этом оказываются симметричными

и соответствуют $k = \pm 1$. Это означает, что дополнительный фазовый сдвиг, возникающий из-за движения антенны, в обоих её положениях относительно фазового центра одинаков и, в принципе, может быть скомпенсирован. При этом отражённый сигнал за время перемещения антенны не теряет когерентности как для точечной цели, так и для протяжённого фона местности, поскольку интервал корреляции фона $D_x/(2W_x)$ соответствует двум принимаемым импульсам [22].

Процесс синтезирования диаграммы направленности антенны традиционно рассматривается в рамках модели, где единичный (точечный) отражатель на поверхности Земли за время синтеза не флуктуирует, окружающая его поверхность не отражает сигнал в сторону радиолокатора, а приёмный тракт радиолокатора идеален, т. е. в нём используются линейные элементы и он не вносит теплового шума.

Для синтеза диаграммы направленности применяют алгоритм свёртки с опорным сигналом, пропорциональным $\exp(-jan^2)$, n — отсчёт номера дискрета опорного сигнала с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) относительно точки $n = 0$. Частота модуляции такого сигнала изменяется линейно относительно точки $n = 0$ ($\partial\psi/\partial n = -2an$):

$$\begin{aligned} \langle U(k) \rangle &= \int_{-N/2}^{+N/2} [U(k-n) \exp(-jan^2)] \, dn = \\ &= U_0 \exp \left\{ j \left[\varphi_0 + ak \left(k - \frac{2t_V}{T_r} \right) \right] \right\} \int_{-N/2}^{+N/2} \exp \left[-2jan \left(k - \frac{t_V}{T_r} \right) \right] \, dn, \quad (3) \end{aligned}$$

где $N = L_x/(W_x T_r)$ — число накапливаемых импульсов. Максимальное число накапливаемых импульсов N_{\max} определяется реальной апертурой, в данном случае $N_{\max} = 4\lambda R_n/D_x^2$.

Пренебрегая изменением дальности R_n отражателя при перемещении антенны (эффект «миграции дальности» на самом деле подлежит компенсации), получаем синтезированный азимутальный отклик РСА:

$$\begin{aligned} \langle U(k) \rangle &= U_0 N \left| \frac{\sin[\beta(k)]}{\beta(k)} \right| \exp \left\{ j \left[\varphi_0 + ak \left(k - \frac{2t_V}{T_r} \right) \right] \right\} = \\ &= U_0 N \exp \left[-b \left(k - \frac{t_V}{T_r} \right)^2 \right] \exp \left\{ j \left[\varphi_0 + ak \left(k - \frac{2t_V}{T_r} \right) \right] \right\}, \quad (4) \end{aligned}$$

где

$$\beta(k) = \frac{2\pi W_x T_r L_x}{\lambda R_n} \left(k - \frac{t_V}{T_r} \right), \quad b = \frac{2\pi W_x^2 T_r^2 L_x^2}{\lambda^2 R_n^2},$$

а приближённая замена $|\sin(\beta)/\beta|$ на $\exp[-\beta^2/(2\pi)]$ даёт возможность записать амплитуду отклика в виде положительной функции без боковых лепестков, к чему и стремятся, разрабатывая оптимизированные алгоритмы синтеза. Для наглядности это же выражение можно записать, заменяя k на $x/(W_x T_r)$ и t_V на x_V/W_x . Если принять азимутальные разрешения реальной и синтезированной апертур равными $r_{x0} = \lambda R_n/D_x$ и $r_x = \lambda R_n/L_x$, то азимутальный отклик (4) приобретает вид

$$\langle U(x) \rangle = \frac{U_0 r_{x0}}{4r_x} \exp \left[-\frac{2\pi}{r_x^2} (x - x_V)^2 \right] \exp \left\{ j \left[\varphi_0 + \frac{2\pi x}{\lambda R_n} (x - 2x_V) \right] \right\}, \quad (5)$$

где $x_V = V_y R_n \sin(\gamma_n)/W_x$.

Выражения (4) и (5) с очевидностью показывают, что наличие азимутального сдвига x_V и непредсказуемой фазы φ_0 исключают возможность измерения скорости V_y по фазе отклика РСА в центре синтезированного амплитудного пика при $x = x_V$.

Измерение радиальной скорости отражателя по фазовому сдвигу, казалось бы, возможно при использовании двух положений антенны. Представляется, что, задерживая отклик (4) на два периода следования импульсов и сравнивая его с откликом смещённой антенны, можно измерить f_{dy} , скомпенсировав возникающий из-за движения антенны фазовый сдвиг. Такая компенсация возможна, если начало отсчёта принимаемых импульсов находится в точке, лежащей на расстоянии $\pm D_x/4$ от сдвинутого фазового центра антенны, т. е. при аргументах накопления $k + 1$ и $k - 1$. Действительно, разность фаз откликов на выходе антенны (2) при этом составит $\Delta\Psi = \Psi(k + 1) - \Psi(k - 1) = 4a(k - t_V/T_r)$, т. е. в точке $k = 0$ (на траверсе к фазовому центру антенны) мы получили бы ожидаемый сдвиг $\Delta\Psi = 4\pi T_r f_{dy}$, который можно измерить либо при помощи сопряжённого коррелятора, либо формируя модуль разности сигналов (что соответствует методу черезпериодного вычитания, применяемому в радарх с селекцией движущихся целей [23]). Для синтезированного отклика (4) при смещении антенны на $D_x/4$, т. е. на один период следования импульсов, имеем

$$\langle U(k + 1) \rangle = U_0 N \exp \left[-b \left(k + 1 - \frac{t_V}{T_r} \right)^2 \right] \exp \left\{ j \left[\varphi_0 + a(k + 1) \left(k + 1 - \frac{2t_V}{T_r} \right) \right] \right\}.$$

Используя корреляционный метод, получаем отклик на выходе коррелятора

$$\begin{aligned} U_{\text{cor}} &= [\langle U(k + 1) \rangle \langle U^*(k) \rangle]^{1/2} = \\ &= U_0 N \exp \left\{ -b \left[\left(k - \frac{t_V}{T_r} \right)^2 + k - \frac{t_V}{T_r} + \frac{1}{2} \right] \right\} \exp \left[ja \left(k - \frac{t_V}{T_r} + \frac{1}{2} \right) \right]. \end{aligned}$$

Из этой формулы видно, что в точке $k = t_V/T_r$ фаза вовсе не содержит информации о скорости отражателя. То же самое получается и при вычитании откликов:

$$\begin{aligned} \langle U(k) \rangle - \langle U(k + 1) \rangle &= U_0 N \exp \left[-b \left(k - \frac{t_V}{T_r} \right)^2 \right] \exp \left\{ j \left[\varphi_0 + ak \left(k - \frac{2t_V}{T_r} \right) \right] \right\} \times \\ &\times \left\{ 1 - \exp \left[-2b \left(k - \frac{t_V}{T_r} + \frac{1}{2} \right)^2 \right] \exp \left[j 2a \left(k - \frac{t_V}{T_r} + \frac{1}{2} \right) \right] \right\}, \end{aligned}$$

т. е. в точке $k = t_V/T_r$ модуль разности также не содержит необходимой информации.

Можно ли устранить этот недостаток, сохранив возможность синтеза? Оказывается, что можно — путём секционирования антенны, т. е. использования двух разнесённых фазовых центров с расстоянием между ними $l_x = D_x/2$ (рис. 1). Задача решается, если сравнение откликов происходит при излучении и приёме из фазовых центров разнесённых секций. Конечно, при этом из-за уменьшения горизонтального размера излучающей антенны страдает энергетика РСА. При отсчёте k от фазовых центров левой и правой секций в положениях A и B (рис. 2) на входах синтезаторов формируются сигналы

$$\begin{aligned} U_{1B}(k) &= U_0 \exp \left\{ j\varphi_0 + ja \left[k^2 - \frac{2t_V}{T_r} (k - 1) \right] \right\}, \\ U_{2A}(k) &= U_0 \exp \left\{ j\varphi_0 + ja \left[k^2 - \frac{2t_V}{T_r} (k + 1) \right] \right\}, \end{aligned} \quad (6)$$

а на выходах синтезаторов — усреднённые отклики

$$\begin{aligned} \langle U_{1B}(k) \rangle &= U_0 N \exp \left[-b \left(k - \frac{t_V}{T_r} \right)^2 \right] \times \\ &\times \exp \left\{ j \left[\varphi_0 + a \left(k^2 - \frac{2t_V}{T_r} (k-1) \right) \right] \right\}, \\ \langle U_{2A}(k) \rangle &= U_0 N \exp \left[-b \left(k - \frac{t_V}{T_r} \right)^2 \right] \times \\ &\times \exp \left\{ j \left[\varphi_0 + a \left(k^2 - \frac{2t_V}{T_r} (k+1) \right) \right] \right\}. \end{aligned} \quad (7)$$

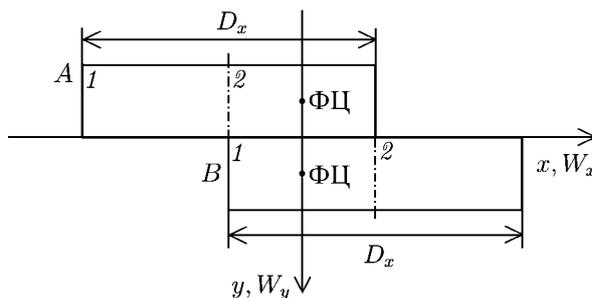


Рис. 2. Положения А и В фазовых центров левой (1) и правой (2) секций антенны при измерениях скорости в ИРСА, ФЦ — фазовый центр

При подаче на коррелятор или гибридную (суммо-разностную) схему этих откликов (от левой антенны с задержкой на $2T_r$) на выходе коррелятора имеем

$$U_{\text{cor}} = [\langle U_{1B}(k) \rangle \langle U_{2A}^*(k) \rangle]^{1/2} = U_0 N \exp \left[-b \left(k - \frac{t_V}{T_r} \right)^2 \right] \exp \left(-j 2a \frac{t_V}{T_r} \right), \quad (8)$$

а на выходе гибридной схемы —

$$\begin{aligned} U_{\text{hyb}} = \langle U_{1B}(k) \rangle \pm \langle U_{2A}(k) \rangle &= U_0 N \exp \left[-b \left(k - \frac{t_V}{T_r} \right)^2 \right] \exp \left\{ j \left[\varphi_0 + a k \left(k - \frac{2t_V}{T_r} \right) \right] \right\} \times \\ &\times \left[\exp \left(-2aj \frac{t_V}{T_r} \right) \pm \exp \left(2aj \frac{t_V}{T_r} \right) \right], \end{aligned} \quad (9)$$

т. е. модули суммарного и разностного откликов (9) соответствуют квадратурным составляющим отклика (8).

Таким образом, подтверждается возможность формирования двух измерительных каналов для РСА — яркостного и скоростного, использующих составляющие откликов в двух вариантах обработки — сопряжённого коррелятора или гибридной схемы. Канал яркости (т. е. интенсивности отражённого сигнала) характеризуется выражением

$$U_{\text{int}} = U_0 N \exp \left[-b \left(k - \frac{t_V}{T_r} \right)^2 \right] = U_0 N \exp \left[-\frac{2\pi}{r_x^2} (x - x_V)^2 \right]. \quad (10)$$

Канал скорости характеризуется произведением интенсивности (10) на величину, в первом случае являющуюся аргументом реактивной составляющей (8), а во втором — аргументом отношения модуля разности к модулю суммы откликов (9). При измерении из космоса скоростей $V_y < 10$ м/с для расчётов можно пользоваться выражением

$$U_{\text{vel}} = -U_0 N \exp \left[-b \left(k - \frac{t_V}{T_r} \right)^2 \right] \sin \left(\frac{2at_V}{T_r} \right) = -U_0 N \exp \left[-\frac{2\pi}{r_x^2} (x - x_V)^2 \right] \sin(2\pi f_{dy} T_r), \quad (11)$$

где

$$N = \frac{L_x}{W_x T_r}, \quad b = \frac{2\pi W_x^2 T_r^2}{r_x^2}, \quad a = \frac{2\pi W_x^2 T_r^2}{\lambda R_n}, \quad t_V = \frac{V_y R_n \sin \gamma_n}{W_x^2} = \frac{x_V}{W_x},$$

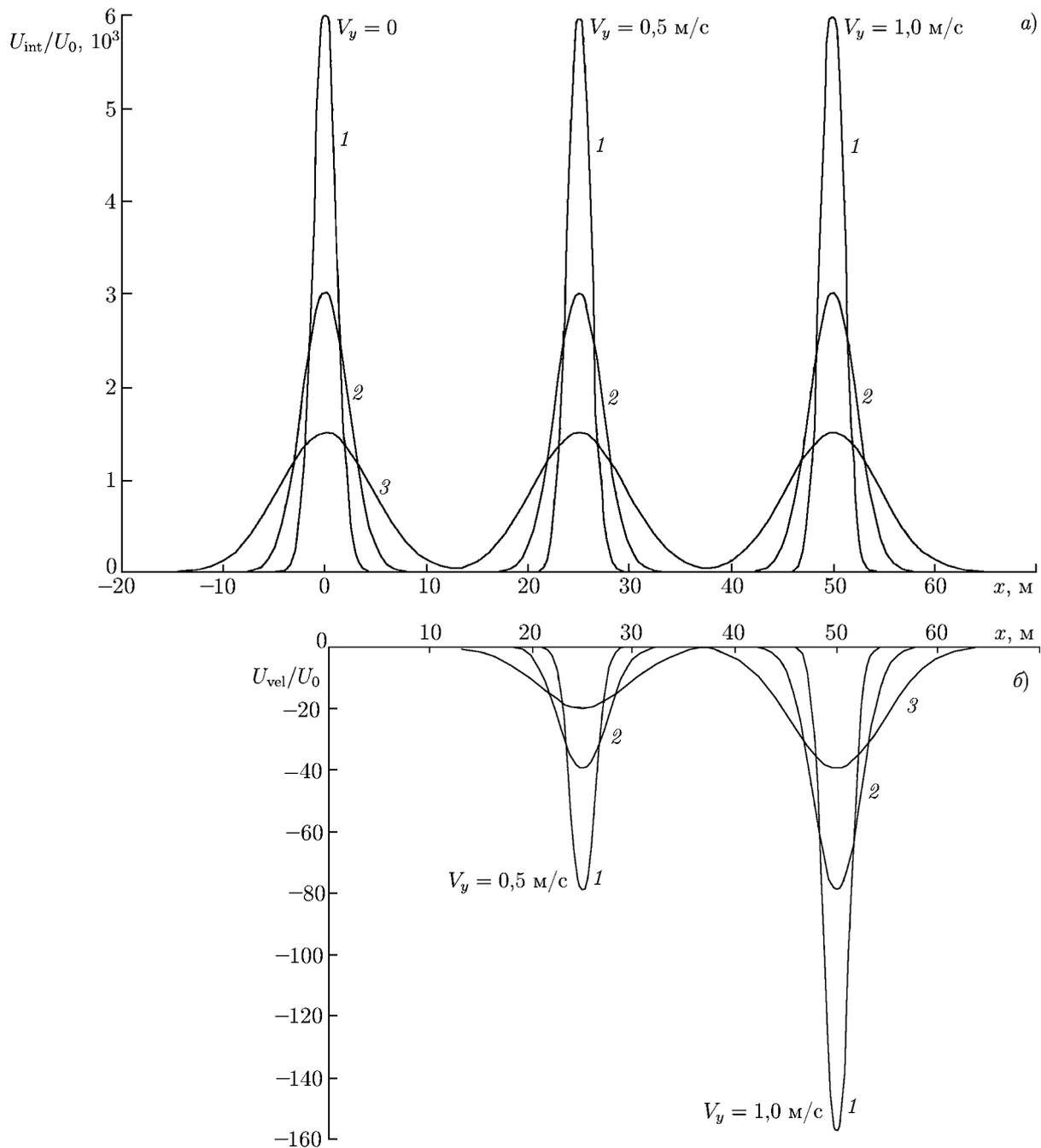


Рис. 3. Нормированные азимутальные отклики в каналах интенсивности (а) и скорости (б) для неподвижного и движущегося одиночных отражателей при использовании традиционного алгоритма синтеза в космическом ИРСА. Размеры синтезированной апертуры: кривые 1 – 6 км, 2 – 3 км, 3 – 1,5 км

$$r_x = \frac{\lambda R_n}{L_x}, \quad f_{dy} = \frac{2V_y \sin \gamma_n}{\lambda}, \quad R_n = \frac{H}{\cos \gamma_n}.$$

Пользуясь выражениями (10) и (11), построим графики для азимутальных откликов в каналах интенсивности и скорости (рис. 3), заменив аргумент k (номер импульса) расстоянием $x = kW_x T_r$,

отсчитываемым от фазового центра приёмной антенны. Здесь и далее примем следующие расчётные параметры, характерные для космического интерференционного радиолокатора с синтезированной апертурой (эти параметры примерно соответствуют аппарату TerraSAR-X, см. [19, 20]): $W_x = 8 \cdot 10^3$ м/с, $H = 6,5 \cdot 10^5$ м, $\gamma_n = 30^\circ$, $\lambda = 3 \cdot 10^{-2}$ м, $D_x = 4$ м, $T_r = D_x / (4W_x) = 0,125 \times 10^{-3}$ с. Расчёты проводились для неподвижного и движущегося отражателей (т. е. с $V_y = 0$; 0,5 и 1 м/с) и при трёх размерах синтезированной апертуры ($L_x = 6$; 3 и 1,5 км), что соответствует азимутальным разрешениям $r_x = 2$; 4 и 8 м.

Мы видим, что азимутальная отметка одиночного движущегося отражателя неизбежно сдвигается в обоих измерительных каналах. Можно было бы построить графики, иллюстрирующие формирование изображения многих отражателей (подвижных и неподвижных), находящихся в той же строке дальности и в пределах области синтеза. Тем не менее и без подобных построений ясно, что если в канале интенсивности фокусированное изображение формируется с разрешением r_x при $x_V \gg r_x$, то сдвиг положения одиночного отражателя не препятствует измерению его скорости по фазовому сдвигу внутри амплитудного пика. Более того, сдвиг x_V сам по себе можно использовать для скоростных измерений, если положение на местности неподвижного отражателя заранее известно (так, например, измеряется радиальная скорость корабля, отметка которого смещается по азимуту относительно точки начала кильватерного следа). Имея в распоряжении оба канала измерений (т. е. пространственный и фазовый сдвиги, определяемые радиальной скоростью отражателя), в определённых случаях можно измерить и вектор его скорости. Однако при наличии в пределах области синтеза L_x и на той же дальности R_n нескольких малоразмерных отражателей измерение скорости каждого из них по фазовому сдвигу становится невозможным, поскольку все скорости окажутся усреднёнными.

При выборе алгоритма обработки возникающих в ИРСА откликов, следует представить реальную ситуацию при формировании скоростных изображений местности. В ситуации, когда несколько малоразмерных движущихся отражателей находятся в одной и той же области синтеза L_x , но в различных строках дальности, а сильные неподвижные отражатели в этой области отсутствуют, коррелятор себя оправдывает. Однако при наличии сильных неподвижных отражателей на выходе коррелятора из-за перемножения сигналов друг с другом будут возникать ложные отметки. Поэтому суммо-разностный алгоритм, использующий линейные операции, с этой точки зрения представляется лучшим. В то же время в экспериментах на TerraSAR-X, где применялся подобный алгоритм обработки, в скоростном канале наблюдались сильные помехи от находящихся вблизи неподвижных отражателей. Авторы работы [21] полагают, что это объясняется неидентичностью характеристик приёмных каналов.

2. ВОЗМОЖНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ВЕКТОРА СКОРОСТИ ОТРАЖАТЕЛЯ

Для измерения обеих составляющих вектора скорости одиночного отражателя можно использовать азимутальный разворот плоскости излучения на небольшой угол ($\delta \approx 15^\circ$), т. е. искусственный угол сноса. Возможное решение заключается в одновременном либо последовательном формировании (при помощи автоматизированной фазированной антенной решётки) двух лучей (рис. 4).

Используя компенсацию скорости вращения Земли W_E и скорости аппарата W_x путём введения в опорные сигналы априорных частотных сдвигов, на выходах двух скоростных каналов получим фазовые сдвиги

$$\psi_{n1} = \frac{8\pi T_r}{\lambda} (V_y \cos \delta + V_x \sin \delta) \sin \gamma_n,$$

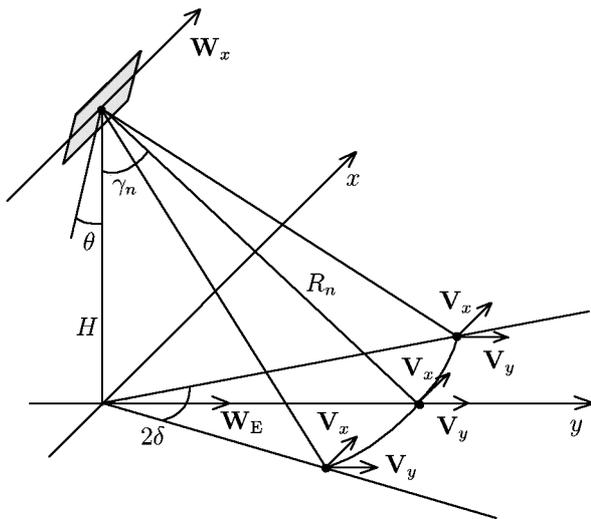


Рис. 4. Двухлучевый метод измерения вектора скорости площадки на поверхности Земли

$$\psi_{n2} = \frac{8\pi T_r}{\lambda} (V_y \cos \delta - V_x \sin \delta) \sin \gamma_n. \quad (12)$$

Складывая и вычитая эти сдвиги с определённой задержкой, можно получить обе составляющие скорости для каждой площадки с достижимой точностью при заданном разрешении. Задержка во времени между измерениями в двух лучах составляет $\Delta t = (2H/W_x) \operatorname{tg}(\delta) \operatorname{tg}(\gamma_n)$, что в рассмотренных условиях отвечает примерно 30 с, т. е. на два порядка превышает время синтеза.

По-видимому, данный способ пригоден для формирования скоростных портретов как для быстро движущихся локальных отражателей (если траектории их движения за время измерения остаются неизменными), так и для медленно движущихся протяжённых образований типа морских течений.

3. ЭНЕРГЕТИКА РСА И ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЯРКОСТНЫХ И СКОРОСТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ

Перейдём к рассмотрению формирования в РСА изображений фоновой поверхности с находящимися на ней одиночными движущимися отражателями. Например, морская поверхность характеризуется широким спектром относительно пологих шероховатостей, и при её наклонном радиолокационном зондировании на длинах волн $\lambda = 1 \div 10$ см принято пользоваться двухмасштабной моделью, в которой отражённый сигнал формируется мелкими морскими волнами (диффузно рассеивающей рябью) с резонансной длиной волны $\Lambda = \lambda / (2 \sin \gamma_n)$, а крупные (энергонесущие) волны лишь модулируют сигнал по фазе и амплитуде.

Сначала рассмотрим соотношения для контрастной флуктуационной чувствительности и энергетики РСА при формировании яркостного изображения мелкошероховатой (диффузно отражающей) неподвижной поверхности. Пусть фоновый сигнал на элементе разрешения накапливается когерентно, а собственный шум — некогерентно. Тогда при большом числе N_0 накапливаемых (и приходящихся на 1 элемент) импульсов пороговое соотношение выглядит следующим образом:

$$\frac{\Delta U_0^2}{\bar{U}_{\text{ш}}^2} = \frac{q_0}{\sqrt{N_0}},$$

где $\bar{U}_{\text{ш}}$ — среднеквадратическое отклонение амплитуды шума от нулевого значения, q_0 — пороговый коэффициент. Введя сигнал U_0^2 , получаем соотношение, где в левой части имеем рабочее отношение сигнал/шум q^2 , а в знаменателе правой части — требуемый пороговый контраст интенсивности сигнала $\Delta U_0^2 / U_0^2$:

$$q^2 = \frac{U_0^2}{\bar{U}_{\text{ш}}^2} = \frac{q_0}{(\Delta U_0^2 / U_0^2) \sqrt{N_0}}. \quad (13)$$

Обычно принимают, что $10 \lg(1 + K_{\text{пор}}) = 1$ дБ, $K_{\text{пор}} = \Delta U_0^2 / U_0^2 = 0,26$. Если площадка неподвижна, то число накапливаемых некогерентно реализаций шума $N_0 \approx L_x / D_x$.

Если площадка движется и при скоростях V_x и V_y перемещается на элемент продольного или поперечного разрешения, то при большей скорости число импульсов N_0 уменьшается. В условиях визирования морской поверхности, где скорости течений не превышают 1 м/с, не приходится говорить об уменьшении числа N_0 . Следовательно, для требуемого отношения сигнал/шум при $q_0 = 3$ и $K_{\text{пор}} = 1$ дБ получаем $q < 1$. Таким образом, благодаря когерентному накоплению возможно сформировать яркостное радиолокационное изображение слабоотражающей морской поверхности с приемлемым разрешением.

Энергетика РСА рассчитывается стандартным способом на основе известного соотношения

$$P_2 = P_1 \frac{G_{a1} G_{a2} \lambda^2 S_t}{(4\pi)^3 R_n^4} \geq q^2 k_B T_{\text{ш}} \Delta f,$$

где P_1 и P_2 — мощности излучаемого и принимаемого коротких импульсов (без учёта коэффициента сжатия по дальности), S_t — эффективная поверхность рассеяния (ЭПР) «точечного» отражателя, Δf — ширина спектра сигнала, $G_{a1} = 4\pi D_x D_z / \lambda^2$ — усиление антенны на передачу, $G_{a2} = 4\pi L_x D_z / \lambda^2$ — усиление синтезированной антенны на приём, D_z — вертикальный размер антенны, $T_{\text{ш}}$ — эквивалентная шумовая температура приёмника, $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана. Будем считать, что ширина зоны обзора в точности соответствует диапазону наклонных дальностей ΔR_n и что угол наклона антенной плоскости θ согласован со средним углом визирования $\gamma_0 = \pi/2 - \theta$ (рис. 1). В результате для средней мощности излучения с учётом фокусировки антенны и некогерентного накопления N_0 реализаций шума получается простое соотношение

$$\bar{P}_1 \geq \frac{2\pi q^2 k_B T_{\text{ш}} c R_n^2}{D_z S_t} \sqrt{\frac{D_x}{L_x}}. \quad (14)$$

Из формулы (14) следует, что для обнаружения «точечного» объекта с ЭПР $S_t = 1$ м² в космических условиях ($R_n \approx 10^6$ м, $T_{\text{ш}} \approx 10^3$ К, $D_z \approx 1$ м, $D_x = 4$ м, $L_x = 4$ км) при отношении сигнал/шум 10 дБ ($q \approx 3$) достаточно $\bar{P}_1 > 10$ Вт. Для фонового яркостного изображения в тех же условиях необходима мощность не менее 300 Вт, соответствующая ЭПР $S_t = S_0 r_x r_y$ при $r_x = 6$ м и $r_y = 2$ м (параметры TerraSAR-X) и минимальной удельной эффективной поверхности рассеяния морской поверхности $S_0 = 10^{-3}$. Если необходимо работать при $q = 10$ (20 дБ по мощности) при такой же располагаемой мощности излучения, то площадь разрешаемой площадки должна быть увеличена примерно до 100 м².

Перейдём теперь к рассмотрению формирования скоростных изображений и проанализируем, как и при рассмотрении формирования амплитудных изображений, взаимосвязь скоростной чувствительности, пространственного разрешения и необходимой мощности излучения РСА. Используем данные работы [16], где флуктуационная ошибка при измерении приращения разности фаз зависит от крутизны фазо-скоростной характеристики $\partial\psi_n/\partial V_y$, числа N некогерентно накапливаемых шумовых отсчётов, а также от модуля коэффициента корреляции накапливаемого сигнала $|\rho_n|$ по отношению к помехе

$$\sigma_V = \sqrt{|\rho_n|^{-2} - 1} / (\sqrt{N} \partial\psi_n/\partial V_y). \quad (15)$$

В случае точечного отражателя при отношении сигнал/шум q и в пренебрежении фоном можно считать, что $|\rho_n| = q^2/(1 + q^2)$, $\partial\psi_n/\partial V_y = 8\pi T_r \sin(\gamma_n)/\lambda$. Тогда из соотношения (15) получается предельная флуктуационная чувствительность

$$\sigma_{V0} = \frac{\lambda}{2\pi T_r q \sqrt{2N_0} \sin \gamma_n}. \quad (16)$$

В космическом РСА ($\lambda = 3$ см, $T_r = 0,125$ мс, $\gamma = 30^\circ$, $N_0 \approx 10^3$) при $q = 10$ мы получили бы таким образом предельную чувствительность $\sigma_{V0} \approx 0,15$ м/с при мощности излучения порядка 100 Вт для отражателя с эффективной площадью рассеяния $S_t = 1$ м².

В случае протяжённого фонового отражателя (морские течения) картина существенно изменяется, т. к. усреднение по фону происходит независимо от степени фокусировки. Число независимых фоновых отсчётов на симметричной площадке с размером $d \gg r_x, r_y$ составляет $N = 2d^2/(D_x r_y)$, а коэффициент q представляет собой отношение фон/собственный шум. Тогда

$$\sigma_{Vph} = \frac{\lambda \sqrt{D_x r_y}}{8\pi q T_r d \sin \gamma_n}. \quad (17)$$

Это означает, что при $q = 10$ и принятых выше параметрах космического РСА требуемую чувствительность порядка 1 см/с можно получить лишь на площадках с размером не менее 300 м. Расчёт показывает, что необходимость работать с морской поверхностью при минимальной удельной эффективной площади рассеяния $S_0 \approx 10^{-3}$ в этом случае требует мощности излучения порядка 1 кВт.

ВЫВОДЫ

Изложенный материал позволяет заключить, что радиолокационная диагностика скоростных портретов поверхности Земли из космоса в принципе возможна. Что же касается конкретных решений этой задачи, то на этот счёт можно сформулировать следующие рекомендации.

1) Задача формирования калиброванных радиолокационных изображений векторного поля скорости поверхности из космоса требует применения современных технологий (секционированная автоматизированная фазированная антенная решётка, быстродействующая обработка сигналов, внешнее навигационное обеспечение, многомерная визуализация).

2) Необходимо одновременно формируемое яркостное изображение поверхности при калибровке с точностью порядка 1 дБ в целях географической привязки скоростных изображений к координатам местности.

3) Расчёты энергетики космического интерференционного радиолокатора с синтезированной апертурой показывают, что при реальных размерах антенны и средней мощности излучения порядка 100 Вт возможно измерять скорости слабых локальных отражателей с площадкой усреднения с размером не менее 10 м по обеим осям при флуктуационной чувствительности порядка 0,3 м/с.

4) Пространственная структура поля скорости мезомасштабных морских течений может быть диагностирована при усреднении на площадках с размером не менее 300 м с флуктуационной чувствительностью порядка 1 см/с при минимальной удельной эффективной поверхности рассеяния $S_0 \approx 10^{-3}$ (слабый ветер) и средней мощности излучения порядка 1 кВт. Измерение скорости течений при сильном ветре (удельная эффективная площадь рассеяния порядка 10^{-1}), по-видимому, возможно только на километровых площадках из-за помех от крупных ветровых волн.

5) Наличие азимутального сдвига отметок движущихся локальных отражателей позволяет измерять их скорости при условии, что в области азимутального синтеза L_x на дальности R_n находится лишь один отражатель. Это обстоятельство приводит к невозможности сформировать, например, скоростной портрет морских волн.

6) Германский опыт создания и использования ИРСА на космическом аппарате TerraSAR-X в основном подтверждает наши расчёты. По имеющимся у нас данным, при создании этого комплекса не ставилась задача формирования скоростных изображений местности при наличии

многих близко расположенных (движущихся и неподвижных) отражателей. Эта задача — оценка помехоустойчивости ИРСА при формировании скоростных портретов поверхности — требует отдельного анализа.

Работа выполнена при поддержке гранта Правительства РФ по проведению исследований под руководством ведущих учёных (договор 11.G34.31/0078).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов А. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1980. Т. 23, № 8. С. 923.
2. Иванов А. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1983. Т. 26, № 5. С. 540.
3. Иванов А. В., Мошков А. В. // Исслед. Земли из космоса. 1984. № 6. С. 91.
4. Каневский М. Б. Теория формирования радиолокационного изображения поверхности океана. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2004. 124 с.
5. 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.
6. Объекты радиолокации. Обнаружение и распознавание / Под ред. А. В. Соколова. М.: Радиотехника, 2007. 175 с.
7. Верба В. С., Неронский Л. Б., Осипов И. Г., Турук В. Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. М.: Радиотехника, 2010. 670 с.
8. Переслегин С. В., Королёв А. М., Маров М. Н. // Исслед. Земли из космоса. 1994. № 2. С. 84.
9. Переслегин С. В., Королёв А. М., Маров М. Н. и др. // Исслед. Земли из космоса. 1994. № 5. С. 28.
10. Neronsky L. B., Dostovalov M. Ju., Pereslegin S. V. // Proc. EUSAR-2004, Ulm, Germany, May 2004. V. 2. P. 709.
11. Достовалов М. Ю., Неронский Л. Б., Переслегин С. В. // Океанология. 2003. Т. 43, № 3. С. 473.
12. Переслегин С. В., Достовалов М. Ю., Манаков В. Ю. и др. // Проявление глубинных процессов на морской поверхности. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2004. С. 79.
13. Иванов А. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1988. Т. 31, № 3. С. 263.
14. Romeiser R., Thompson D. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 2000. V. 38. P. 446.
15. Romeiser R. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2007. V. 45, No. 1. P. 21.
16. Переслегин С. В., Сеницын Ю. П. // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54, № 6. С. 415.
17. Каневский М. Б. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 4. С. 294.
18. Romeiser R., Runge H., Flament P. // Proc. Conf. "Oceans—2003", September 2003. V. 3. P. 1524.
19. Gabele M., Younis M. // Proc. 39th European Microwave Conf. IEEE, 2009. P. 966.
20. Gabele M., Brautigan B., Shulze D., et al. // Proc. IGARSS-2009. IEEE, 2009. V. 3. P. 725.
21. Romeiser R., Suchand S., Hartmut R., et al. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 2010. V. 48, No. 2. P. 820.
22. Фельдман Ю. И., Мандуровский И. А. Теория флуктуаций локационных сигналов, отражённых распределёнными целями. М.: Радио и связь, 1988. 271 с.
23. Верба В. С. Авиационные комплексы радиолокационного дозора и наведения. Состояние и тенденции развития. М.: Радиотехника, 2008. 432 с.

Поступила в редакцию 15 августа 2013 г.; принята в печать 17 октября 2014 г.

**SIGNAL PROCESSING IN RADARS WITH SYNTHESIZED APERTURE DURING
FORMATION OF THE EARTH-SURFACE VELOCITY FIELDS***S. V. Pereslegin and Z. A. Khalikov*

The signal-processing principles during the Earth-surface sounding by the synthesized-aperture radars (SAR) including the interference radars with the longitudinal antenna base (IRLAB) are discussed. The aperture-synthesis features for solving two problems are discussed, namely, the measurements of the local-reflector velocity and reconstruction of the velocity pattern of the rough surface. The peculiarities of these problems and restrictions related to the aperture-synthesis process and other factors including the limited radiation power of a space radar are considered. Conclusions on the possibilities of the radar reconstruction of the surface velocity fields for both the local reflectors and the extended surface (sea currents) are made. The approximate calculations of the available parameters of the recorded fields in the SARs mounted onboard the low-orbit space vehicles are performed.