

УДК 621.371; 551.465

© С. В. Переслегин¹, И. О. Карпов¹, З. А. Халиков¹, Р. В. Ермаков², Т. Г. Мусинянц²

¹Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, г. Москва, Россия

²Научно-исследовательский Институт точных приборов (НИИТП Роскосмоса), г. Москва, Россия
peresleg@ocean.ru

ФОРМИРОВАНИЕ СКОРОСТНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ СО СТАЦИОНАРНЫХ, АВИАЦИОННЫХ И КОСМИЧЕСКИХ НОСИТЕЛЕЙ

Статья поступила в редакцию 24.07.2018, после доработки 21.12.2018.

Рассматриваются принципы формирования радиолокационных изображений, непосредственно отображающих поле горизонтальной скорости морской поверхности. Основным параметром, характеризующим качество изображений, является флуктуационно-скоростная чувствительность на заданной площадке поверхности. Одновременно формируемые яркостные изображения характеризуются флуктуационно-яркостной чувствительностью. Принципы формирования и достижимые параметры изображений различны для стационарных, авиационных и космических платформ, поэтому они рассматриваются последовательно, с оценкой достижимых параметров. Корабельный радар кругового обзора, использующий широкополосный сигнал и разностно-фазовый алгоритм обработки, работая на небольшой дальности, способен обеспечить флуктуационно-скоростную чувствительность порядка ~ 10 см/с на симметричной площадке размером ~ 30 м. Самолётный ИРСА (интерференционный радар с синтезированной апертурой и продольной антенной базой) способен обеспечить лучшую чувствительность на значительной дальности и на гораздо меньшей площадке, что отвечает большинству океанологических задач. При этом целый ряд факторов заставляет вводить специальные алгоритмы обработки сигнала, использующие измеренную радиальную скорость для устранения азимутального сдвига движущейся площадки. При переходе на космический носитель та же технология требует существенного увеличения размера антенной базы и мощности излучения, что и достигается в действующей германской системе Tandem TerraSAR-X. Даются оценки применимости рассматриваемых методов и перспектив их развития.

Ключевые слова: радиолокационные изображения ветровых волн и течений; чувствительность РЛ-изображений; радар кругового обзора; радары бокового обзора с синтезированной апертурой; интерференционный РСА с продольной антенной базой; разностно-фазовый метод измерения скорости.

S. V. Pereslegin¹, I. O. Karpov¹, Z. A. Khalikov¹, R. V. Ermakov², T. G. Mussiniants²

¹P. P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Joint-Stock Company "Research Institute of Precision Instruments" (JSC "RI PI"), Moscow, Russia

THE FORMING OF SEA SURFACE VELOCITY IMAGES FROM STATIONARY, AIRBORNE AND SPACEBORNE PLATFORMS

Received 24.07.2018, in final form 21.12.2018.

The principles of radar image creation, which directly show surface velocity field, are considered. The main variable determined radar images quality is velocity fluctuation sensitivity defined for given an surface area. Intensity images determined by intensity fluctuation sensitivity of are created at once. The creating concept and achievable features of images are different for stationary, airborne and spaceborne platforms, consequently, were seen progressively with estimation of attainable parameters. For shipborne radar of around survey with wideband signal and different-phase processing, velocity fluctuation sensitivity may be about ~ 10 cm/s on the symmetry area about ~ 30 m with small range.

Ссылка для цитирования: Переслегин С. В., Карпов И. О., Халиков З. А., Ермаков Р. В., Мусинянц Т. Г. Формирование скоростных радиолокационных изображений морской поверхности со стационарных, авиационных и космических носителей // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2019. Т. 12, № 1. С. 21—29.

For citation: *Pereslegin S. V., Karpov I. O., Khalikov Z. A., Ermakov R. V., Mussiniants T. G. The forming of sea surface velocity images from stationary, airborne and spaceborne platforms. Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2019, 12, 1, 21—29.
doi: 10.7868/S2073667319010039

Airborne ATISAR (interference synthetic aperture radar with along-track antenna base) is capable to provide the better velocity sensitivity on the small areas and significant range, that's answer to many oceanology propositions. It notes that special algorithm is necessary for creating velocity images by the side-looking SAR without the azimuth shift of moving areas. Spaceborne ATISAR, with the same processing technology, needs the essential increase of antenna base dimension and radiation power – that's attained in Germany space system Tandem TerraSAR-X. Applicability and development perspectives of given methods are also considered.

Keywords: velocity images of sea surface currents; fluctuation-velocity sensibility of images; ships radar with round survey; airborne and spaceborne side-looking synthetic aperture radar (SAR); interferometry along-track SAR (ATISAR); through-period difference-phase method of velocity measurement.

Задачи формирования скоростных и уровенных полей морской поверхности являются одними из самых актуальных для авиационных и спутниковых систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Они решаются радиолокационными методами не только в силу их всепогодности и независимости от времени суток, но главным образом благодаря возможности трехмерного измерения координат отражающей площадки и скорости её перемещения. В задачах гидрофизики мелкомасштабное поле скорости морской поверхности включает собственно течение, орбитальную скорость крупной волны и ветровой дрейф. В зависимости от решаемой задачи, то или иное явление может быть отнесено либо к полезному (выделяемому) сигналу, либо к помехе, подлежащей фильтрации при вторичной обработке скоростных изображений.

Физические особенности и принципы функционирования радиолокаторов бокового обзора с синтезированной апертурой (РСА) при зондировании морской поверхности ранее описывались в отечественных работах [1, 2], а формирование яркостных (т. е. отображающих интенсивность отраженного сигнала) изображений океанской поверхности из космоса впервые стало возможным при запусках аппаратов SeaSAT-A (1978 г., США) и «Алмаз» (1987 г., СССР). Быстрые темпы непрерывного совершенствования космических РСА, от этих дат и до настоящего времени хорошо прослеживаются в работах [3—16].

Задача формирования скоростных изображений морской поверхности из космоса при использовании смещения «центроида» доплеровского спектра сигнала (от движущейся площадки по отношению к площадке неподвижной) начала обосновываться в 1996 г. применительно к измерению радиальной составляющей скорости океанских течений с аппарата «Алмаз-1» [5, 6]. Впоследствии для этой цели использовались РСА аппаратов ERS, полученные нами результаты содержатся в работах [7—9]. Одним из важных результатов этого плана явилось подтверждение модели деформации мелких волн в поле орбитальной скорости внутренней волны (рис. 1). На рисунке: сверху — амплитудное и скоростное изображения пакета внутренних волн в районе Гибралтарского пролива, направление дальности сверху вниз. Внизу — совмещенные амплитудный и скоростной калиброванные «разрезы» пакета внутренних волн. В амплитудном изображении и разрезе использовалось осреднение на площадке ~80 м, в скоростном — на площадке ~500 м. Измеренные контрасты амплитуды в среднем составили +6 дБ, контрасты скорости ± 10 см/с.

Следующим шагом явилось применение для той же цели интерференционного РСА (ИРСА) с продольной антенной базой (along-track InSAR). Использование разностно-фазового метода позволяет, в принципе, определить с той же точностью радиальную скорость площадки гораздо меньшего размера. Физические аспекты этой задачи рассматривались в работах [10—15], а впечатляющий результат — одновременное формирование яркостного и скоростного портретов ветровых волн и течений в морских проливах [16] был получен совсем недавно с помощью германской спутниковой системы Tandem TerraSAR-X. Примеры полученных изображений представлены на рис. 2, см. вклейку. Как в левом (яркостном) изображении, так и в правом (скоростном) видна мелко-масштабная структура ветровых волн и течений. Однако, в скоростном изображении эта структура проявляется непосредственно (для ветровых волн — через их орбитальные скорости), тогда как в амплитудном изображении она проявляется косвенным образом, через механизм модуляции мелких волн градиентным течением.

1. Стационарная антенна (корабль, морская платформа). На кораблях и морских платформах устанавливают радиолокаторы кругового обзора, они решают главным образом навигационные задачи (рис. 3). На рисунке обозначены: H — высота антенны над уровнем моря; D_x — горизонтальный размер антенны; ν — угловая скорость вращения антенны; γ — угол визирования поверхности; R —

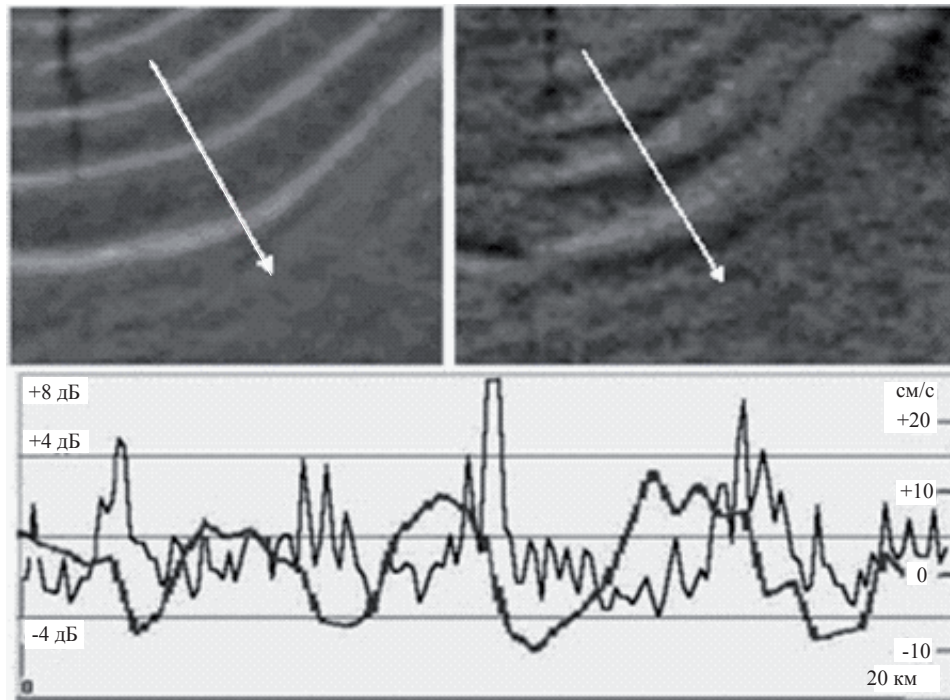


Рис. 1. Яркостное и скоростное изображения пакета внутренних волн в районе Гибралтарского пролива. ERS-1, поляризация VV , длина волны 5.6 см, 01.01.1993. [9].

Fig. 1. Brightness and velocity images of internal waves train. Hybraltar Strait, ERS-1 mission, VV -polarisation, 5.6 cm wave length, January 1, 1993 [9].

наклонная дальность разрешаемой площадки; L_y — ширина зоны обзора; r_x , r_y — размеры разрешаемой площадки, V_y — радиальная скорость площадки, W_x — линейная скорость перемещения разрешаемой площадки при вращении антенны. При сравнительно небольшой высоте антенны над уровнем моря, максимальная дальность так или иначе ограничивается видимым горизонтом. При $H = 20$ м, $R_{\max} \sim \sqrt{R_E H} \sim 12$ км (R_E — радиус Земли). Если же ограничить угол визирования поверхности (например, величиной $\gamma_{\max} \sim 88^\circ$), то максимальная дальность не достигает и километра. Тем не менее, подобный радар с успехом используется для измерений параметров ветровых волн и течений.

Нас интересует задача одновременного формирования «яркостного» и «скоростного» изображений поверхности. В яркостно-контрастном радиолокационном изображении отображается интенсивность мелких ветровых волн, образующих (на малой площадке поверхности) «резонансную» дифракционную решетку. При этом длина радиоволны (λ) жестко связана с длиной морской волны (Λ): $\lambda = 2\Lambda \sin \gamma$, γ — угол падения радиоволны. В скоростном радиолокационном изображении отображается доплеровский сдвиг частоты отраженного сигнала (f_d), возникающий при радиальной (по отношению к локатору) скорости движения площадки (V_y): $f_{dy} = 2V_y(\sin \gamma)/\lambda$. Таким образом, яркостное и скоростное изображения по своей природе независимы и формируются с использованием различных алгоритмов обработки отраженного сигнала.

При круговом обзоре и фиксированном направлении скорости площадки максимальный эффект достигается в двух ($\pm\pi$) азимутальных направлениях луча антенны. Далее, при азимутальном (разрешаемом) размере площадки $r_x = \frac{\lambda R}{D_x}$ и вращении антенны со скоростью ν (об/с), время визирования площадки составит $t_x = \frac{\lambda}{2\pi\nu D_x}$, а число отраженных импульсов при периоде их следования T_r составит $n = t_x/T_r$. Потребуем, чтобы при вращении антенны обеспечивалось $n > 4$, тогда допустимая скорость вращения $\nu \leq \frac{\lambda}{8\pi D_x T_r}$. При $\lambda = 3 \cdot 10^{-2}$ м, $D_x = 1$ м, $T_r = 10^{-3}$ с получим $\nu \leq 1$ об/с.

Большое число сохраняющих когерентность отраженных импульсов позволяет использовать известный через-периодный метод измерения скорости. На выходе антенны имеем сигнал

Здесь $q_0 > 1$ — пороговый коэффициент, и значительная величина N может быть обеспечена только широкополосным спектром сигнала. Для симметричной площадки размером r_x , где $r_y = \frac{c}{2\Delta f \sin \gamma} = \frac{r_x}{N}$, имеем $N = \frac{2\lambda R \Delta f \sin \gamma}{c D_x}$. Современные технологии способны обеспечить ширину спектра $\Delta f = 10^9$ Гц на несущей 10^{10} Гц ($\lambda = 3 \cdot 10^{-2}$ м). В этом случае, при горизонтальном размере антенны $D_x = 1$ м и дальности $R = 10^3$ м получается $N = 200$ на симметричной площадке размером 30 м. Крутизна разностно-фазовой характеристики составляет $\frac{\partial(\Delta\varphi)}{\partial(V_y)} = \frac{8\pi T_r \sin \gamma}{\lambda}$, и при $T_r = 10^{-3}$ с оказывается равной приблизительно одному радиану на 1 м/с. Следовательно, флуктуационно-скоростная чувствительность (2) при $q_0 = 3$ составит $(V_y)_{thr} \sim 0.2$ м/с.

Флуктуационно-яркостная чувствительность определяется тем же числом N и оценивается в децибелах:

$$K_{thr} = 10 \lg \left(1 + \frac{q_0}{\sqrt{N_\Sigma}} \right),$$

так что в рассматриваемом случае $K_{thr} \sim 1$ дБ. Разумеется, всё сказанное предполагает значительное превышение уровня фонового сигнала над уровнем собственного (теплового) шума приёмника.

2. Авиационный и космический носители. На самолётах и вертолётах (а в последнее время и на беспилотных аппаратах) устанавливают радиолокаторы бокового обзора, где формирование изображений обеспечивается перемещением самолёта, а широкая зона обзора, как и в описанном выше случае, обеспечивается малым раскрытием антенны в вертикальной плоскости. Поступательное движение антенны при этом позволяет осуществить азимутальный синтез апертуры. Для когерентного накопления фоновых импульсов (сигналов, отраженных мелкоструктурными морскими волнами) при этом должно соблюдаться следующее условие: за время перемещения антенны на свою длину, должны быть приняты по крайней мере два отраженных импульса: $T_r \leq \frac{D_x}{2W_x}$, W_x — скорость носителя. Иными словами, период следования T_r определяется интервалом корреляции фонового сигнала.

С целью формирования скоростных изображений в режиме азимутального синтеза применяют двухантенный интерферометр, где каждая из двух апертур синтезируется независимо, а череспериодное сравнение фаз на выходах синтезаторов происходит с учётом относительного положения антенн. Именно такой метод использован в германской космической системе TerraSAR-X [10, 11], а также в отечественном самолётном комплексе «ЭРЛК» [15].

На рис. 4 показана геометрия визирования с авиационного (или космического) носителя, где обозначены: D_x — горизонтальный размер антенны, L_x — размер области синтеза; L_y — размер зоны обзора; θ — угол наклона плоскости антенны к вертикали, R_n и γ_n — наклонная дальность и угол места отражателя; H — высота полёта; l_x — размер антенной базы интерферометра. Размер d зондируемой симметричной площадки S_n на поверхности превышает разрешаемые размеры r_x, r_y , а радиальная и тангенциальная скорости отражателя (V_y, V_x) на порядки меньше тангенциальной скорости W_x антенны в условиях зондирования с любых аппаратов. Для космического носителя при формировании скоростного изображения необходимо учитывать скорость вращения Земли W_E , которая изменяется по широте.

Сигнал на выходе антенны для последовательности k импульсов с периодом следования T_r имеет вид (без учёта малозначущих факторов):

$$\dot{U}(k) = U_0 \exp j \left(\varphi_0 - 2\pi f_{\varphi} T_r k + \frac{2\pi W_x^2}{\lambda R_n} T_r^2 k^2 \right) = U_0 \exp j \left[\varphi_0 + ak \left(k - 2 \frac{t_r}{T_r} \right) \right], \quad (3)$$

где $a = \frac{2\pi W_x^2}{\lambda R_n} T_r^2$, $t_r = \frac{V_y R_n \sin \gamma_n}{W_x^2}$ — сдвиг оси времени из-за радиальной скорости отражателя. Для синтеза диаграммы направленности применяют алгоритм свёртки с опорным сигналом вида $\exp(-jan^2)$,

Здесь $\Psi_0(k) = a \left(k^2 + 1 - 2k \frac{t_v}{T_r} \right)$, $\Phi(k) = 2a \left(k - \frac{t_v}{T_r} \right)$. При огромном количестве импульсов внутри синтезированной диаграммы направленности, амплитудные множители практически одинаковы, и интересующая нас разность фаз $2\Phi(k)$ находится через вышеописанную операцию (1). Появляется возможность сформировать отклик, используя произведение амплитуды отклика (4) на разностно-фазовый множитель:

$$\langle \dot{U}(k) \rangle = U_0 N \frac{\sin b \left(k - \frac{t_v}{T_r} \right)}{b \left(k - \frac{t_v}{T_r} \right)} \exp \left[j 4a \left(k - \frac{t_v}{T_r} \right) \right].$$

Если бы амплитудный пик не был сдвинут на величину t_v/T_r , то в точке траверса ($k = 0$) мы имели бы $2\Phi = -4a \frac{t_v}{T_r} = -8\pi f_{dv} T_r$. Однако при наличии азимутального сдвига в обоих множителях, измерить разность фаз в точке $k = t_v/T_r$ не представляется возможным. В то же время, при наличии двух антенн, фазовые центры которых разнесены по линии полёта на $2W_x T_r$ (рис. 4), и соответствующей обработке [14] — получается отклик, где сдвинут только амплитудный пик:

$$\langle \dot{U}(k) \rangle = U_0 N \frac{\sin b \left(k - \frac{t_v}{T_r} \right)}{b \left(k - \frac{t_v}{T_r} \right)} \exp \left[-j 2a \frac{t_v}{T_r} \right].$$

Именно такой способ задействован в самолётном комплексе «ЭРЛК» и в германской системе TerraSAR-X. В этом случае оба синтезированных изображения (амплитудное и скоростное) формируются с азимутальным сдвигом. Одновременно здесь появляется возможность устранить азимутальный сдвиг программным способом, используя измеренную величину t_v/T_r . Именно таким способом сформированы изображения движущихся кораблей, морских волн и течений (рис. 2), а также движущихся наземных объектов в TerraSAR-X.

Если же работать вообще без синтеза, то с учётом диаграммы направленности (т. е. реальной апертуры) на выходе антенны имеем сигнал:

$$\dot{U}(k) = U_0 \frac{\sin(b_0 k)}{b_0 k} \exp j \left[\varphi_0 + a k \left(k - \frac{2t_v}{T_r} \right) \right], \quad \text{где } b_0 = \frac{2\pi W_x T_r}{r_{x0}}, \quad r_{x0} = \frac{\lambda R_n}{2D_x} \quad \text{— азимутальное разрешение.}$$

Череспериодная обработка типа (1) позволяет получить отклик

$$\dot{U} = U_0 \frac{\sin b_0 k}{b_0 k} \exp \left[j 4a \left(k - \frac{t_v}{T_r} \right) \right],$$

где азимутальный сдвиг амплитуды отсутствует, а искомый фазовый сдвиг измеряется в точке траверса ($k = 0$). Поскольку этот сдвиг присутствует во всей апертуре (т. е. во всей области $\pm k$), то при осреднении по апертуре он, в первом приближении, останется тем же самым. Следовательно, и при отсутствии второй антенны имеется возможность получать одновременно амплитудные и скоростные изображения, но без азимутального синтеза. Такой способ, естественно, непригоден для использования в космосе.

Остаётся оценить величину пороговой флуктуационной чувствительности при использовании авиационных и космических РСА. При боковом обзоре поверхности и соответствующей обработке, удельное (на 1 м² площадки) число независимых отсчётов сигнала составляет

$$N_0 = \frac{4\Delta f \sin \gamma_n}{cD_x}$$

и при надлежащей обработке не зависит от степени фокусировки апертуры. Для пороговой чувствительности примем коэффициент $q_0 > 1$, тогда в децибелах

$$K_{thr} = 10 \lg \left(1 + \frac{q_0}{\sqrt{N_\Sigma}} \right),$$

где $N_{\Sigma} = d_x d_y N_0$; d_x и d_y — азимутальный и радиальный (по наклонной дальности) размеры площадки. Отечественный авиационный РСА «Компакт» имеет $\Delta f = 3 \cdot 10^8$ Гц, $\gamma_n = 70^\circ$, $D_x = 0.75$ м, $N_0 \sim 5$ м⁻². При наклонной дальности порядка 3 км, на симметричной площадке с размерами $d_x = d_y = 100$ м, при $q_0 = 3$ получается пороговая чувствительность $K_{thr} \sim 0.15$ дБ. Германский космический комплекс TerraSAR-X имеет $\Delta f = 6 \cdot 10^8$ Гц, $\gamma_n = 30^\circ$, $D_x = 4$ м, $N_0 \sim 1$ м⁻², и на такой же площадке получается $K_{thr} \sim 0.3$ дБ.

Флуктуационно-скоростная пороговая чувствительность при использовании разностно-фазового алгоритма измерения радиальной скорости V_y определяется крутизной характеристики $\frac{\partial(\Delta\varphi)}{\partial(V_y)}$ (4) и тем же самым числом независимых отсчётов N_{Σ} . Учитывая, что $\Delta\varphi = \frac{8\pi T_r V_y \sin \gamma}{\lambda}$,

$N_{\Sigma} = N_0 d_x d_y = \frac{4\Delta f \sin \gamma_n}{c D_x} d_x d_y$, для пороговой скоростной чувствительности получим выражение:

$$(V_y)_{thr} = \frac{q_0 \lambda}{16\pi T_r} \sqrt{\frac{c D_x}{d_x d_y \Delta f}} \frac{1}{(\sin \gamma_n)^{3/2}}. \quad (5)$$

Самолётный РСА «Компакт» на сравнительно малых дальностях позволяет работать без азимутального синтеза при размерах площадки $d_x = d_y = 100$ м. Примем его параметры: $q_0 = 3$, $\lambda = 3 \cdot 10^{-2}$ м, $T_r = 1.5 \cdot 10^{-3}$ с, $D_x = 0.75$ м, $\Delta f = 3 \cdot 10^8$ Гц, $\gamma_n = 70^\circ$. Из выражения (5) получаем $(V_y)_{thr} \sim 2$ см/с. Примерно такой же скоростной чувствительностью (для площадки того же размера) должен обладать самолётный ИРСА «ЭРЛК». Однако, при наличии крупных ветровых волн для их наблюдений (или же, наоборот, для их фильтрации) необходимо соответствующее азимутальное разрешение, что достижимо только при азимутальном синтезе. Следовательно, задача формирования скоростного поля морских волн и в самолётном ИРСА должна решаться при наличии азимутального синтеза апертуры.

Для космического ИРСА TerraSAR-X при $\Delta f = 6 \cdot 10^8$ Гц, $T_r = 10^{-4}$ с, $\gamma_n = 30^\circ$, $D_x = 4$ м, на той же площадке из выражения (5) получаем $(V_y)_{thr} \sim 50$ см/с. Огромная разница в скоростной чувствительности объясняется, главным образом, высокой скоростью космического аппарата, что приводит к резкому уменьшению периода следования T_r (по сравнению с самолётным РСА). Однако и здесь задача решается путём значительного увеличения размера антенной базы: при использовании двух аппаратов в системе Tandem TerraSAR величину эквивалентного интервала T_r можно увеличить на два порядка. Что же касается флуктуационно-яркостной чувствительности, то её значения (с самолёта или из космоса) примерно одинаковы. Повторяем, всё сказанное предполагает достаточно высокое отношение фон/собственный шум — не менее 15—20 дБ для всех вариантов ИРСА.

3. Основные выводы. Сравнение достижимой флуктуационно-скоростной чувствительности радиолокационных изображений, формируемых в стационарном, самолётном и спутниковом радаре, показывает следующее. Корабельный радар кругового обзора, использующий широкополосный сигнал и разностно-фазовый алгоритм обработки, работая на дальности не более 1 км — способен обеспечить флуктуационно-скоростную чувствительность ~ 20 см/с на симметричной площадке размером 30 м. Флуктуационно-яркостная чувствительность при этом составит ~ 1 дБ.

Самолётный радар бокового обзора, работая без апертурного синтеза при той же ширине спектра сигнала, при значительном горизонтальном размере антенны $D_x > 2$ м — способен обеспечить на такой же площадке флуктуационно-скоростную чувствительность ~ 2 см/с. Флуктуационно-яркостная чувствительность при этом составит ~ 0.2 дБ. Введение апертурного синтеза (режим РСА) позволяет, конечно, улучшить азимутальное разрешение (до требуемых ~ 10 м при работе по морской поверхности) и уменьшить горизонтальный размер антенны. Однако измерению скорости в центре амплитудного пика препятствует азимутальный сдвиг этого пика, что преодолевается введением второй антенны (режим ИРСА с продольной антенной базой). В режиме ИРСА, самолётный радар типа отечественного «ЭРЛК» способен обеспечить указанную чувствительность, что отвечает большинству океанологических задач. Однако целый ряд факторов заставляет вводить специальный алгоритм обработки изображений

(скоростных и яркостных), использующий измеренную радиальную скорость для устранения азимутального сдвига — как это делается в космической системе TerraSAR-X.

Флуктуационно-скоростная чувствительность для космического ИРКА TerraSAR-X оказывается гораздо худшей, её расчётное значение составляет ~50 см/с на площадке того же размера. Это объясняется огромной скоростью КА. Что же касается флуктуационно-яркостной чувствительности, то её значения примерно одинаковы для самолётного и космического радаров. В работе [14] показано, что при использовании разностно-фазового алгоритма обработки, энергетика должна обеспечивать отношение фон/собственный шум не менее 15—20 дБ.

Из сказанного можно заключить, что самолётный ИРКА (интерференционный РСА с продольной антенной базой), для решения задач океанологического плана должен обладать скоростной и яркостной чувствительностью, близкими к приведенным здесь расчётным значениям (2 см/с и 0.2 дБ на площадке размером 100×100 м). В то же время с целью выделения поля ветровых волн при «вторичной» обработке полученных изображений (или, наоборот, фильтрации этого поля) необходимо «первичное» пространственное разрешение порядка 10×10 м. Необходимо также обеспечить компенсацию азимутального сдвига движущейся фоновой площадки. При использовании современных технологий (включая обработку сигналов и полученных изображений) это представляется возможным в самое ближайшее время. Что же касается космического ИРКА, то достижение указанных параметров при работе по морской поверхности представляется возможным при использовании продольной антенной базы порядка сотни метров и существенном увеличении мощности — до нескольких кВт в излучаемом импульсе.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 14-50-00095.

Литература

1. Иванов А. В. Особенности изображения морских волн в РСА // Изв. ВУЗов. 1980. Т. XX III, № 8. С. 923—933.
2. Каневский М. Б. Теория формирования радиолокационного изображения поверхности океана. Н. Новгород: ИПФ РАН, 2004.
3. Дикинис А. В., Иванов А. Ю., Карлин Л. Н., Мальцева И. Г., Маров М. Н., Неронский Л. Б., Рамм Н. С., Фукс В. Р., Авенариус И. Г., Березин Н. П., Дудкин С. Ю., Зайцев В. В., Леонтьева Е. В., Рынская А. К., Степанов П. В., Федосеева Н. В. Атлас аннотированных радиолокационных изображений морской поверхности, полученных космическим аппаратом «АЛМАЗ-1». М.: ГЕОС, 1999.
4. Верба В. С., Неронский Л. Б., Осипов И. Г., Турук В. Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. М.: Радиотехника, 2010.
5. Переслегин С. В., Королёв А. М., Маров М. Н. Доплеровский радиолокационный метод измерения поля океанских течений с орбитального аппарата // Иссл. Земли из космоса. 1994. № 2. С. 84—93.
6. Переслегин С. В., Королёв А. М., Маров М. Н., Мишин С. А., Шулика К. М., Иванов А. Ю., Зайцев В. В. Радиолокационные измерения мезомасштабных полей течений океана по данным РСА КА «Алмаз-1» // Иссл. Земли из космоса. 1994. № 5. С. 28—38.
7. Neronsky L. B., Dostovalov M. Ju., Pereslegin S. V. The Extended Algorithms for Doppler Centroid Estimation // Proc. of EUSAR-2004, Ulm, Germany, May 2004. V. 2. P. 709—712.
8. 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.
9. Переслегин С. В., Достовалов М. Ю., Манаков В. Ю., Неронский Л. Б., Плющев В. А. Формирование яркостных и скоростных изображений морской поверхности в радиолокаторах с синтезированной апертурой // Проявление глубинных процессов на морской поверхности. ИПФ РАН. Н. Новгород, 2004. С. 79—101.
10. Romeiser R., Thompson D. Numerical study on the along-track interferometric radar imaging mechanism of oceanic surface currents // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 2000. V. 38. P. 446—458.
11. Romeiser R. Theoretical evaluation of several possible along-track InSAR modes of TerraSAR-X for ocean current measurements // IEEE Trans. of Geos. Remote Sens. 2007. V. 45, N 1. P. 21—35.
12. Переслегин С. В., Сеницын Ю. П. Интерференционные радиолокаторы с синтезированной апертурой для оперативного мониторинга океанских явлений // Известия ВУЗов. Радиофизика. 2011. Т. LIV, № 6. С. 415—430.
13. Каневский М. Б. Оценка возможностей интерференционного РСА с продольной базой в задаче измерения скорости течений на поверхности океана // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2012. Т. LV, № 4. С. 294—298.
14. Переслегин С. В., Халиков З. А. Обработка сигналов в радиолокаторах с синтезированной апертурой при формировании скоростных полей поверхности Земли // Известия ВУЗов. Радиофизика. 2014. Т. LVII, № 10. С. 784—796.
15. Переслегин С. В., Халиков З. А., Ермаков Р. В., Достовалов М. Ю., Мусиянц Т. Г. Экспериментальный радиолокационный комплекс авиационного базирования и его возможности при формировании яркостных и скоростных портретов морской поверхности // XXX Симпозиум по радиолокационному исследованию природных сред. ВКА им. А.Ф. Можайского, апрель 2017.
16. Romeiser R., Runge H., Flament P. High Resolution Current Measurements by Along-Track Interferometry // Oceanography. June 2013. V. 26, N 2. P. 92—99.

К статье *Переслегин С. В. и др. Формирование скоростных радиолокационных изображений...*

Pereslegin S. V. et al. The Forming of Sea surface Velocity Images...

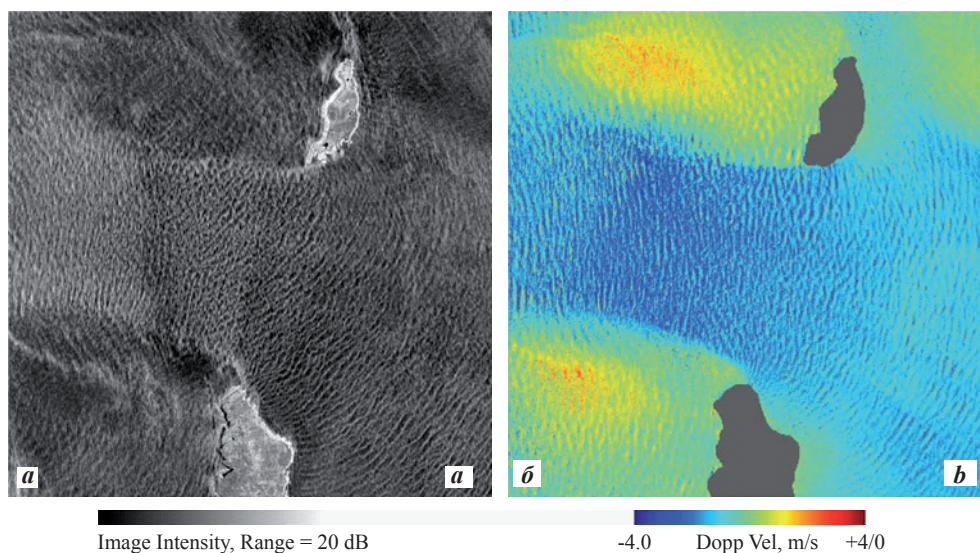


Рис. 2. Яркостное (*слева*) и скоростное (*справа*) изображения, полученные Tandem TerraSAR-X [16].
Острова Пентланд-Фирт (Шотландия), 22.02.2012, размер кадра 10×10 км, разрешение ~10 м.
Направление дальности — слева направо.

Fig. 2. Brightness (*left*) and velocity (*right*) images, that's obtained on the Tandem TerraSAR-X mission [16].
Pentland-Firt islands (Scotland), February 22, 2012. Images dimention 10×10 km, resolution ~10 m.
Range direction is from left to right.

К статье *Копытенко Ю. А., Петрова А. А.* Компоненты морских линейных...

Kopytenko Yu. A., Petrova A. A. Components of Marine Linear...

К статье *Копытенко Ю. А., Петрова А. А.* Компоненты морских линейных...

Kopytenko Yu. A., Petrova A. A. Components of Marine Linear...

К статье *Копытенко Ю. А., Петрова А. А.* Компоненты морских линейных...

Kopytenko Yu. A., Petrova A. A. Components of Marine Linear...

К статье *Копытенко Ю. А., Петрова А. А.* Компоненты морских линейных...

Kopytenko Yu. A., Petrova A. A. Components of Marine Linear...

К статье *Шевченко Г. В., Кириллов К. В.* Регистрация инфрагравитационных волн...

Shevchenko G. V., Kirillov K. V. Infragravity waves...

К статье *Владимирова О. М.* и др. Моделирование растворенного органического вещества...

Vladimirova O. M. at al. Modelling dissolved organic nutrients...