

УДК 621.371; 551.465

© И. О. Карпов, С. В. Переслегин\*, 2022

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Нахимовский пр., д. 36, г. Москва, Россия

\*E-mail: pereslegsv@yandex.ru

## МОДЕЛЬ РАДИОЛОКАЦИОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ ВИБРАЦИОННЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН, ВОЗБУЖДАЕМЫХ ИСТОЧНИКОМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ (ДОННЫМ ВИБРАТОРОМ)

Статья поступила 27.05.2021, после доработки 18.10.2021, принята в печать 20.12.2021

### Аннотация

Продолжая исследования, опубликованные ранее [1], рассматривается модель радиолокационного мониторинга вибрационных волн, возникающих на морской поверхности вблизи очага донного землетрясения. Возбуждаемая параметрически вибрационная волна характеризуется ближней (гидродинамической) и дальней (звуковой) областями. Амплитуда ближней волны зависит от параметров донного вибратора и глубины дна, дальняя распространяется в волноводе, образованном водной поверхностью и плоским дном. Намечаемый натурный эксперимент предполагает установку вибратора на небольшой глубине (30 м) и применение современного самолётного радара, способного формировать как яркостные, так и скоростные радиолокационные изображения слабо отражающей морской поверхности при длине возбуждаемой вибрационной волны ~1,5 см, что соответствует частоте возбуждающей волны ~30 Гц и «резонансной» радиоволне длиной ~3 см (радиолокационный X-диапазон). Рассматривается возможность наблюдения вибрационных волн в радаре с синтезированной апертурой в L, P и УКВ-диапазонах. Приводятся также расчёты, относящиеся к необходимым параметрам самолётного радара с синтезированной апертурой, включая алгоритмы обработки исходного сигнала при формировании яркостных и скоростных радиолокационных изображений вибрационных волн.

**Ключевые слова:** донный вибратор, ближнее и дальнее поля давления, звуковой волновод, вибрационная волна на фоне ветровых волн, яркостное и скоростное радиолокационные изображения

© I. O. Karpov, S. V. Pereslegin\*, 2022

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 117997, Nahimovskiy prospekt, 36, Moscow, Russia

\*E-mail: pereslegsv@yandex.ru

## THE MODEL OF RADAR OBSERVATION OF THE SURFACE VIBRATION WAVES GENERATED BY EARTHQUAKE SOURCE (GROUND VIBRATOR)

Received 27.05.2021, revised 18.10.2021, accepted 20.12.2021

### Abstract

This research article is continuation case study based on a model of radar monitoring of vibration waves occurring on the sea surface near the source of a bottom earthquake. The vibration wave is generated parametrically, has near (hydrodynamic) and far (sound) components. The amplitude of the near (generating) wave depends on the bottom vibrator parameters and the depth of the bottom, the far wave propagates in the waveguide formed by the surface and the flat bottom. The vibrator will be installed at a shallow depth (30 m) and the modern aircraft radar will be used to create amplitude and velocity radar images during the experiment. The length of the generated vibration wave will be ~1.5 cm, which corresponds to the frequency of the generating wave ~30 Hz and the “resonant” wave of the radar with a length of ~3 cm (radar X-band). The possibility of monitoring vibration waves in the amplitude and velocity channels of the SAR (synthetic aperture radar) in L, P and UHF-bands is estimated. Also, the expected view of the SAR images is shown. Calculations of the necessary parameters of the aircraft radar are provided, including algorithms for processing the initial signal when creating amplitude and velocity radar images of vibration waves.

**Keywords:** bottom vibrator, near and far pressure fields, sound waveguide, vibration wave on the background of wind waves, amplitude and velocity radar images

---

Ссылка для цитирования: Карпов И.О., Переслегин С.В. Модель радиолокационного наблюдения вибрационных поверхностных волн, возбуждаемых источником землетрясений (донным вибратором) // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2022. Т. 15, № 1. С. 48–60. doi: 10.48612/fpg/naz1-x7da-r4gn

For citation: Karpov I.O., Pereslegin S.V. The Model of Radar Observation of the Surface Vibration Waves Generated by Earthquake Source (Ground Vibrator). *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022, 15, 1, 48–60. doi: 10.48612/fpg/naz1-x7da-r4gn

## 1. Введение

В нашей работе [1] рассматривался эффект параметрического возбуждения поверхностной волны гармоническим источником вибрации, установленном на дне неглубокого водоёма. Отмечалось, что в ближней от вибратора области можно не считаться со сжимаемостью жидкости, т.е. принимать гидродинамическое обоснование рассматриваемого эффекта. Лабораторный эксперимент, проведенный при глубине ванны  $H = 15$  см и частоте вибратора  $F_s = 30$  Гц показал, что на поверхности, в соответствии с теориями параметрического возбуждения [2, 3] — над вибратором, вокруг малого пятна стоячих волн (т.н. «ряби Фарадея») возникает кольцевая бегущая волна с частотой  $F_v = 15$  Гц и длиной  $\Lambda_v \sim 1,5$  см — в соответствии с дисперсионным соотношением для гравитационно-капиллярных волн. Эта волна отображалась как «резонансная» на выходе фазового детектора лабораторного радара, при наличии амплитудных флуктуаций с шириной спектра  $\delta F \sim 2$  Гц — что следует отнести к «параметрической неустойчивости» эффекта.

При переходе от лабораторного эксперимента к натурному, где глубина водоёма и расстояние от вибратора сравнимы с длиной звуковой волны (и во многих случаях — намного её превышают), необходимо исходить из представлений об акустическом поле, в частности о поле акустического давления в волноводе, образованном «жестким» дном и «мягкой» водной поверхностью. К сожалению, в недавно изданных отечественных работах [4, 5], посвящённых проблемам распространения звука — этот вопрос, на наш взгляд, удовлетворительно не рассмотрен, поэтому мы обратились к классической работе М.А. Исаковича [6], где приведены выражения для поля давления в жидкости — как в случае плоской волны в волноводе (§ 70), так и в случае интересующей нас цилиндрической волны (§ 80), ограниченной жесткой стенкой (дно) и мягкой стенкой (поверхность).

В намечаемом натурном эксперименте предстоит использовать искусственный источник вибрации, устанавливаемый на дне «морского полигона» типа полигона МГИ РАН (Кацивели, Крым). В этом случае глубина водоёма составляет  $H \sim 30$  м, а частоты вибрации должны соответствовать имеющимся длинам волн самолётного или космического радара. Расчёты, а также полученные скоростные изображения от зарубежного действующего самолётного радара [7] и космического радара (Tandem TerraSAR-X [8]) показывают, что подобный источник вибрации должен быть виден на фоне ветровых волн. Имеется и отечественный (четырёхдиапазонный) самолётный РЛ комплекс, предназначенный «для поверхностного и подповерхностного зондирования» [9]. Предлагаемый эксперимент должен послужить решению задачи радиолокационного (РЛ) мониторинга очагов землетрясений, где спектр частот вибрации широк и неоднократно измерялся посредством донных сейсмометров [10]. Наконец, следует определить параметры формируемых РЛ изображений и необходимые параметры РЛ аппаратуры, включая её энергетику.

Таким образом, данная работа является междисциплинарной, т.е. содержит расчёты, объединяющие известные работы по проблемам гидрофизики, гидроакустики и радиофизики (имеется в виду работы [11, 12] по формированию скоростных РЛ изображений). Целью же данной работы является обоснование намечаемого натурного эксперимента по РЛ наблюдению поверхностных вибрационных волн, возбуждаемых донным вибратором.

## 2. Донный гармонический вибратор, ближнее и дальнее поле давления

Прежде чем обратиться к радиолокации донных землетрясений, рассмотрим имеющиеся представления об их источнике — донном вибраторе. Давление в среде над вибратором было рассчитано в предположении, что размер вибрирующей мембраны мал по сравнению с длиной звуковой волны:  $d / \Lambda_s \ll 1$ ,  $\Lambda_s = c / F_s$ ,  $F_s$  — частота вибрации,  $c$  — скорость звука в воде. В этом случае, при использовании гидродинамических представлений, диаграмма направленности источника представляет собой полусферу, где вертикальная составляющая амплитуды давления составляет:

$$p_m = \frac{\rho d^2 b_m \omega^2 \cos \theta}{32\pi H} = \frac{\pi \rho d^2 b_m F_s^2 \cos \theta}{8H}. \quad (1)$$

Здесь  $H$  — глубина водоёма,  $d$  — диаметр донной мембраны, вибрирующей с амплитудой  $b_m$ ,  $\theta = \arctg(x/H)$ ,  $x$  — горизонтальное расстояние от точки над вибратором [1].

Представления о распространении звуковой волны приводят к тому, что между «жестким» дном и «мягкой» водной поверхностью существует волновод, возбуждаемый донным вибратором при амплитуде давления (1). При этом, звуковая волна может распространяться вдоль волновода лишь при условии, что её частота выше «критической» частоты, определяемой как  $F_s^* = \frac{c}{4H}$ , т.е. при длине звуковой волны меньше

четверти глубины дна. При  $F_s > F_s^*$  имеется решение для звукового давления вдоль волновода, принимая обе стенки плоскими. Используются цилиндрические координаты  $(z, x)$  и вводятся горизонтальное и вертикальное волновые числа  $(\chi, \zeta)$ , отличающиеся от волнового числа в свободной среде  $k = 2\pi F_s/c$ , причём  $k^2 = \chi^2 + \zeta^2$ .

$$p(z, x) = p_m(x) \sin(\zeta z + \omega t) H_0^{(1)} \left( kx \sqrt{1 - \frac{\zeta^2}{k^2}} \right). \quad (2)$$

Величина  $p_m(x)$  определяется выражением (1), а  $H_0^{(1)}(k, x)$  — функция Ханкеля первого рода (нулевого порядка), определяющая убывающую с ростом горизонтальной координаты  $x$  амплитуду давления. Ось  $z$  направлена вниз. Принимаем  $z = H$ , и для звуковой волны, распространяющейся по волноводу вдоль оси  $x$ , вычисляем модуль функции (2) при  $\sin(\zeta z) = 1$ . Сигнал остаётся гармоническим, однако рассматриваем только его пространственные компоненты. Величина  $\zeta = \frac{\pi}{2H}(2n-1)$ ,  $n = 1, 2, \dots$  — вертикальное волновое число, которое принимаем наименьшим ( $n = 1$ ) [6]. При наличии квадратичного детектора, помещаемого у поверхности в различных точках на оси  $x$ , расчётное выражение для амплитуды давления получает вид:

$$p(x) = p_m(x) \left| H_0^{(1)}(x) \right| \times \left| \operatorname{Re} \left( H_0^{(1)}(x) \right) \right|, \quad (3)$$

$$\text{где } H_0^{(1)}(x) = H_0^{(1)} \left( \frac{2\pi F_s x}{c} \sqrt{1 - \left[ \frac{c}{4HF_s} \right]^2} \right). \quad (4)$$

Таким образом, принимается представление о ближней  $p_m(x)$  и дальней (звуковой) составляющих волны, распространяющихся вокруг донного вибратора. При частотах  $F_s < c/4H$  звуковая волна вдоль волновода не распространяется, а модуль функции Ханкеля (4) следует вычислять только для дальней области при  $F_s > c/4H$  и  $x > 4H/2\pi$ .

Далее необходимо согласовать полученные данные с условиями, типичными для современных методов РЛ зондирования морской поверхности. В данном случае имеется в виду радар бокового обзора с реальной или синтезированной апертурой (РРА или РСА), длина волны которого жестко связана с длиной образующейся на поверхности вибрационной волны. Будем считать угол РЛ визирования поверхности настильным ( $\gamma \geq 60^\circ$ ), тогда длина  $\Lambda_v$  вибрационной волны должна быть вдвое меньше длины  $\lambda$  «резонансной» радиоволны:  $\Lambda_v = \lambda/2$ . Частоту возбуждаемой поверхностной вибрационной волны, в свою очередь, примем вдвое меньшей частоты вибрации, что следует из проведенного эксперимента [1]:  $F_v = F_s/2$ . Эта частота связана

с длиной  $\Lambda_v$  возбуждаемой волны дисперсионным соотношением  $\omega_v = \left( gk_v + \sigma \frac{k_v^3}{\rho} \right)^{1/2}$ , где  $k_v = \frac{2\pi}{\Lambda_v} c^{-1}$ ,  $\sigma = 75 \text{ г} \cdot \text{с}^{-2}$  — поверхностное натяжение.

При частотах  $F_v \leq 10$  Гц следует пренебречь поверхностным натяжением, тогда получим простую взаимосвязь, где наблюдаемая радаром частота вибрирующей мембраны определяется длиной радиоволны радара:

$$F_s = 2 \sqrt{\frac{g}{\pi \lambda}}. \quad (5)$$

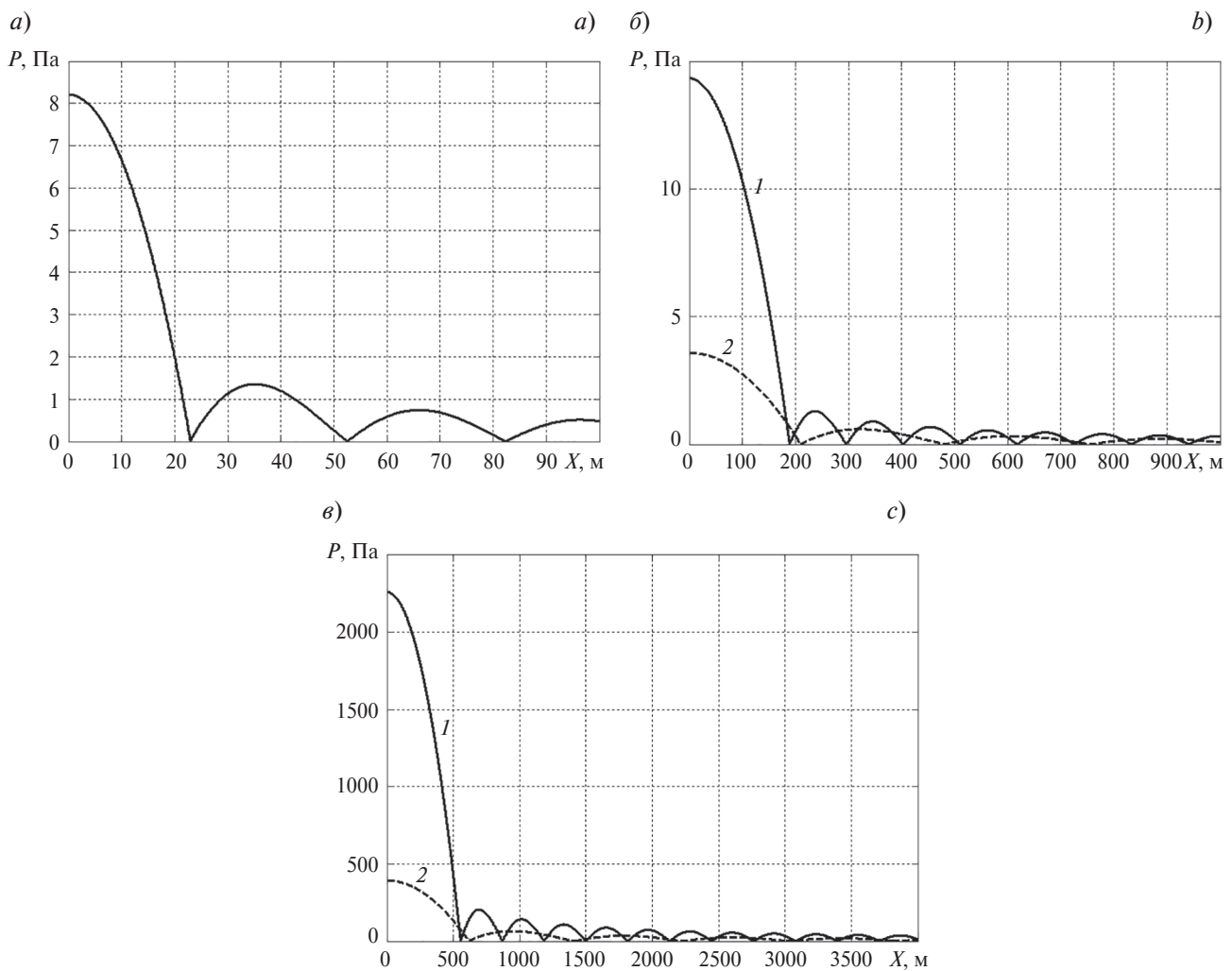
Ориентируясь на отечественный самолётный РЛ комплекс [9], из выражения (5) получаются следующие (необходимые) частоты вибрации:

- а) X-диапазон,  $\lambda = 3,1$  см,  $F_s = 28$  Гц (с учётом поверхностного натяжения);
- б) L-диапазон,  $\lambda = 23$  см,  $F_s = 7,4$  Гц;
- в) P-диапазон,  $\lambda = 90$  см,  $F_s = 3,7$  Гц;
- г) УКВ-диапазон,  $\lambda = 220$  см,  $F_s = 2,4$  Гц.

На рис. 1 приведены зависимости (3) для указанных частот вибрации при различных глубинах морского водоёма. Глубина  $H = 30$  м (рис. 1, а) соответствует намечаемому эксперименту на полигоне МГИ РАН, в этом случае радиолокация звуковой волны возможна лишь в X-диапазоне при  $F_s = 28$  Гц. Диаметр расположенной на дне мембраны здесь выбран  $d = 20$  см, амплитуда её вибрации принята  $b_m = 2$  см. При глубине  $H = 150$  м (рис. 1, б) используются частоты вибрации  $F_s = 7,4$  Гц и  $3,7$  Гц (возможность радиолокации в L- и P-диапазонах), приняты  $d = 1$  м,  $b_m = 10$  см. Глубина  $H = 1000$  м (рис. 1, в) соответствует известному

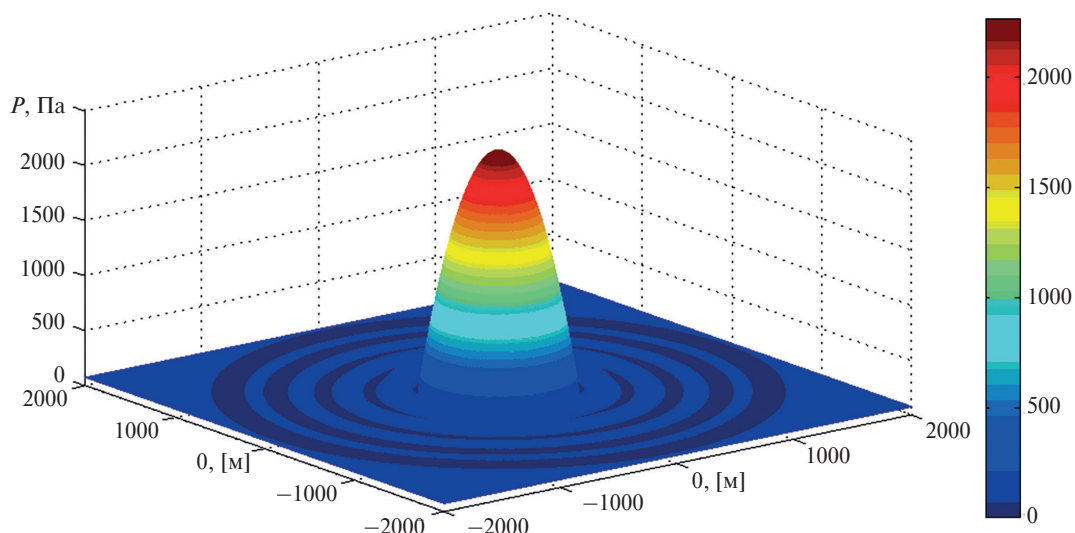
японскому сейсмологическому эксперименту при реальном землетрясении магнитудой 5,8 с измерением спектра звукового давления непосредственно на дне водоёма [10]. Исходя из необходимости захватить хотя бы часть вибрационного спектра, здесь используются частоты  $F_s = 2,4$  Гц и  $F_s = 1$  Гц (что соответствует УКВ и КВ-диапазонам), а в качестве «параметров мембраны» взяты  $d = 100$  м и  $b_m = 0,1$  м. Для этого случая на рис. 2 построены трехмерные изображения амплитуды давления в соответствии с двумерным графиком на рис. 1, в при  $F_s = 2,4$  Гц.

Из рис. 1 видно, что максимальная амплитуда давления в «ближней» области (вблизи  $x = 0$ ) при выбранных параметрах мембраны и глубины дна чрезвычайно сильно зависит от частоты вибрации, ширина этой области составляет  $\sim 0,3 H$ . Первый максимум, образующийся в волноводе при наименьшей длине звуковой волны  $\Lambda_s \sim 4H$  (частота  $F_s = c/4H$ ) имеет порядок 0,15 от главного максимума, и с увеличением частоты резко падает. Реальное землетрясение характеризуется широким спектром частот: например, в работе [10] измеренный спектр давлений почти плоский в области частот  $F_s = (0,1-3)$  Гц, при продолжительности измерений  $\sim 10$  мин. Важно следующее: для РЛ наблюдения очага землетрясения при его глубине



**Рис. 1.** Ожидаемые зависимости амплитуды давления возбуждающей низкочастотной волны в условиях морского полигона с использованием малоразмерного донного вибратора (вертикальный разрез),  $x$  — расстояние от точки поверхности над вибратором. *a* — глубина  $H = 30$  м. Частота вибратора  $F_s = 28$  Гц. Звук с частотой  $F_s = 7,4$  Гц через волновод не проходит; *б* — глубина  $H = 150$  м. *1* — частота вибратора  $F_s = 7,4$  Гц, *2* — частота  $F_s = 3,7$  Гц; *в* — глубина  $H = 1000$  м. *1* — частота вибратора  $F_s = 2,4$  Гц, *2* — частота  $F_s = 1,0$  Гц

**Fig. 1.** Expected dependence of the pressure amplitude of the created low-frequency vibration wave in the conditions of the marine polygon with the use of a small-sized bottom vibrator (a vertical cut),  $x$  — the distance from the point of surface above the vibrator. *a* — depth  $H = 30$  m. Frequency of the vibrator  $F_s = 28$  Hz. The sound with frequency  $F_s = 7.4$  Hz does not pass through the waveguide; *b* — depth  $H = 150$  m. *1* — frequency of the vibrator  $F_s = 7.4$  Hz, *2* — frequency  $F_s = 3.7$  Hz; *c* — Depth  $H = 1000$  m. *1* — frequency of the vibrator  $F_s = 2.4$  Hz; *2* — frequency  $F_s = 1.0$  Hz



**Рис. 2.** Трёхмерное изображение амплитуды давления вокруг малоразмерного очага землетрясения при глубине водоёма  $H = 1000$  м, при частоте  $F_s = 2,4$  Гц (соответствует наблюдению в радиолокационном УКВ-диапазоне)

**Fig. 2.** Three-dimensional image of pressure amplitude around a small-scale earthquake focus at depth  $H = 1000$  m, at a frequency  $F_s = 2.4$  Hz (observing in UHV-range)

$H = 1000$  м, для прохождения звука по волноводу «поверхность — дно», необходимо регистрировать частоты  $F_s > c/4H \sim 0,4$  Гц, что включает все упомянутые РЛ каналы. Однако, в отличие от полигонных измерений, где частота имитационного вибратора определяется длиной волны радара, при радиолокации очагов землетрясений следует, наоборот, выбирать длину волны радара в соответствии с определённой областью спектра давлений. Для захвата правой части спектра в данном случае следует использовать УКВ-диапазон с «резонансной» частотой  $F_s = 2,4$  Гц. Из рис. 2 видно, что в этом случае ожидаемые величины давлений при наблюдении очага землетрясения (500–2000) Па — при выбранных параметрах вибратора на два порядка превышают давления, получаемые при полигонных измерениях.

### 3. Амплитуда возбуждаемой вибрационной волны и сравнение с амплитудой, достаточной для РЛ наблюдения вибрационной волны на фоне ветровых волн

Проведенные расчёты [1] позволили связать амплитуду возбуждающей волны (в точке над вибратором) с параметрами донного вибратора. Получается, что амплитуда возбуждения составляет

$$\xi_m = \frac{\pi F_s d}{H} \sqrt{\frac{b_m^3}{2\pi g}}, \quad (6)$$

и пространственные зависимости для давления (3), показанные на рис. 1 и рис. 2, эквивалентны зависимостям амплитуды возбуждающей волны от горизонтального расстояния (относительно точки над вибратором), глубины водоёма и частоты вибрации  $\xi_m(x, H, F_s)$ , при заданных диаметре мембраны ( $d$ ) и амплитуде её вибрации ( $b_m$ ).

Для ожидаемых полигонных измерений примем  $H = 30$  м,  $d = 20$  см,  $b_m = 2$  см. Если не учитывать параметрический «механизм усиления» поверхностной виброволны, то для указанной частоты вибрации  $F_s = 28$  Гц из (6) в точке над вибратором получается возбуждающая амплитуда  $\xi_m \sim 0,02$  см. Обозначив величину параметрического усиления  $Q$ , получим амплитуду  $h_m = Q\xi_m$  возбуждаемой на поверхности вибрационной волны.

При радиолокации морской поверхности уровень отражённого сигнала принято оценивать величиной УЭПР (удельной эффективной поверхности рассеяния), не зависящей от параметров аппаратуры и дальности. Волновое число поверхностной волны (основой дифракционный резонанс) составляет  $K_{res} = \frac{4\pi \sin \gamma}{\lambda}$ ,  $\lambda$  — длина радиоволны,  $\gamma$  — угол визирования поверхности. Спектральная плотность поверхностной вибра-

ционной волны при её амплитуде  $h_m$  составляет  $\Psi_h = \frac{h_m^2}{2K_{res}^2} = \frac{h_m^2}{8k_r^2 \sin^2 \gamma}$ , и УЭПР принимает вид:  
 $(S^0)_{vibr} = \frac{\pi}{2} k_r^2 h_m^2 |q|^2 \cos^2 \gamma \cdot \text{ctg}^2 \gamma$ ,  $k_r = 2\pi/\lambda$ .

Спектральная плотность мелких ветровых волн составляет  $(S^0)_{wind} = \frac{\pi}{4} k_r^4 |q|^2 \text{ctg}^4 \gamma \Psi_h(K_{res})$ , где  
 $\Psi_h(K_{res}) = \frac{a_0}{2\pi} K_{res}^{-4}$ ,  $a_0 = 6,5 \times 10^{-3}$ . В гравитационно-капиллярной (ГК) области величина  $a_0$  слабо зависит от скорости ветра, здесь мы этой зависимостью пренебрегаем (см. подборку работ этого плана в [13]). Имеем тогда  $(S^0)_{wind} = \frac{a_0 |q|^2}{64} \cos^4 \gamma$ , и соотношение УЭПР оказывается следующим:

$$A = \frac{(S^0)_{vibr}}{(S^0)_{wind}} = \frac{2 \cdot 10^4 \xi_m^2 Q^2}{\lambda^2 \cdot \sin^2 \gamma} \quad (7)$$

где  $Q = h_m/\xi_m$  — величина «параметрического усиления» исходной виброволны. К сожалению, эта величина не может быть определена аналитически, и измерена (весьма грубо) лишь в лабораторном эксперименте [1]. Из (7) получается, что трёхкратное превышение УЭПР виброволны над УЭПР мелкой ветровой волны обеспечивается при  $\xi_m \geq 2 \cdot 10^{-2} \frac{\lambda}{Q}$ , т.е. для точки над вибратором (рис. 1, а) в X-диапазоне ( $\lambda = 3$  см) необходимо параметрическое усиление  $Q > 10$ , а для дальних («волноводных») точек необходимо  $Q > 10^2$  — если не говорить о возможности ещё усилить возбуждающую волну, изменив конструкцию вибратора. Вопрос о влиянии крупных волн здесь не поднимаем, отсылая к работе [14], где рассматривается возможность фильтрации регулярной (и, в значительной степени, случайной) составляющих крупных волн с использованием прямого и обратного Фурье-преобразований от получаемых РЛ изображений с заранее известным пространственным спектром полезного сигнала. Во всяком случае, если исключить сугубо штормовые условия, то для распознавания искомого «портрета» подводного вибратора, по-видимому, достаточно рассмотренного здесь превышения УЭПР виброволны над УЭПР «резонансной» ветровой волны.

#### 4. Ожидаемый вид РЛ изображений поверхностных вибрационных волн

В аэрокосмических радарх бокового обзора, работающих в режиме селекции движущихся целей (интерферометрия с продольной антенной базой, см. [7–9, 11, 12]), имеется возможность выделять по-отдельности амплитуду сигнала (модуль комплексной величины) и фазу сигнала как арктангенс отношения его квадратурных составляющих. В «ближней» (гидродинамической) области, как следует из эксперимента [1], при достаточно малой амплитуде  $\xi_m$  (порядка 0,1 см) возбуждающей поверхностной низкочастотной виброволны, непосредственно над источником вибрации возникает узкое пятно стоячих волн, усиленных параметрическим эффектом — т.н. «рябь Фарадея». Частота наблюдаемых волн в 2 раза ниже частоты  $F_s$  вибратора, а их длина  $\Lambda_v$ , определяемая известным дисперсионным соотношением, на несколько порядков меньше длины звуковой виброволны:  $\Lambda_v = \frac{2g}{\pi F_s^2}$  (здесь пренебрегаем поверхностным натяжением). Например, при  $F_s = 10$  Гц (что соответствует длине звуковой волны  $\Lambda_s = 150$  м) имеем  $\Lambda_v = 6,2$  см. Таким образом, в яркостном канале ИРСА (интерференционного радара с синтезированной апертурой) непосредственно над вибратором образуется яркое пятно, и вокруг этого пятна образуются, согласно проведенному эксперименту, кольцевые бегущие волны малой длины. Их затуханием вдоль оси  $x$  нельзя пренебречь. Декремент вязкого затухания составляет  $\chi = 2\eta k_v^2$ , где  $\eta = 10^{-6} \text{м}^2/\text{с}$  — кинематическая вязкость воды. В гравитационном интервале поверхностных волн  $k_v^2 = \omega_v^4 / g^2$ , и декремент затухания для вибрационных волн составляет  $\chi = 32\pi^4 \cdot 10^{-6} \frac{F_v^4}{g^2} \text{с}^{-1}$ . Это означает, что амплитуда бегущей волны уменьшается в  $e$  раз на отрезке

$$\Delta l = \frac{2\pi F_v}{2\eta k_v^3} = \frac{g^3}{(2\pi)^5 \cdot 2\eta F_v^5} \text{ м} \quad (8)$$

и в нашем случае ( $F_v = 10$  Гц),  $\Delta l \approx 5$  м. Таким образом, в скоростном канале ИРСА вибрационная волна должна проявляться как течение вокруг центрального пятна со скоростью, равной её радиальной фазовой скорости (само же центральное пятно в скоростном канале не видно). Такая картина существенно отличается от течения на ветровой волне, где фазы отраженного сигнала в формируемых участках мелкоструктурной морской поверхности (порядка 1 м) являются случайными.

«Вибрационные пятна», сформированные в полигонных условиях ( $H = 30$  м,  $F_s = 30$  Гц,  $F_v = 15$  Гц рис. 1, а) в яркостном РЛ изображении и отображающие УЭПР стоячих вибрационных волн непосредственно над вибратором, должны иметь диаметр порядка 10 м, а окружающий ореол бегущих волн очень узок (порядка 1 м). Если позволяет энергетика радара, то яркие кольца стоячих волн должны наблюдаться и на некоторых расстояниях (от точки над вибратором). Из рис. 1, а видно, что кольца «волноводной» природы должны отстоять от точки над вибратором на расстояниях  $x = (40, 70, 100)$  м. В условиях глубокого водоёма ( $H = 1000$  м) при использовании РЛ УКВ-диапазона эти расстояния значительно увеличиваются — см. рис. 1, в и рис. 2. Однако рисовать здесь ожидаемые в полигонных условиях РЛ изображения вибрационных поверхностных волн — на сегодня нам представляется преждевременным.

### 5. Необходимые параметры и особенности РСА, выполняющего мониторинг морской сейсмообстановки

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. Подробное изложение способа обработки сигнала в ИРСА с продольной антенной базой имеется в [11], здесь приходится вкратце повторить основные положения, важные для случая мониторинга вибрационных морских (подводных) источников.

Сигнал на выходе антенны имеет вид:

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

где  $f_{dy} = \frac{2V_y}{\lambda} \sin \gamma_n$  — доплеровский частотный сдвиг от радиально-движущегося отражателя;  $W_x$  — тангенциальная скорость антенны;  $\varphi_n$  — фаза отражателя;  $R_n, \gamma_n$  — наклонная дальность и угол визирования отражателя;  $\lambda$  — длина волны сигнала,  $t$  — время, отсчитываемое от заданного положения фазового центра (ФЦ) антенны. Пренебрегая малой тангенциальной скоростью отражателя по сравнению со скоростью антенны и относя фазовый сдвиг  $4\pi R_n/\lambda$  к начальному  $\varphi_0$ , для последовательности  $k$  импульсов с периодом следования  $T_r$  запишем сигнал в виде

$$\dot{U}(k) = U_0 \exp j \left( \varphi_0 - 2\pi f_{dy} T_r k + \frac{2\pi W_x^2}{\lambda R_n} T_r^2 k^2 \right) = U_0 \exp j \left[ \varphi_0 + ak \left( k - \frac{2t_V}{T_r} \right) \right], \quad (9)$$

где  $a = \frac{2\pi W_x^2}{\lambda R_n} T_r^2$ ,  $t_V = \frac{V_y R_n \sin \gamma_n}{W_x^2}$  — сдвиг оси времени из-за скорости отражателя.

Если за время прохода антенной своей длины  $D_x$  принимаются четыре отраженных импульса ( $D_x = 4W_x T_r$ ), то смещение антенны на половину своей длины происходит за два импульса, и «доплеровское» приращение фазы сигнала за это время составит  $4\pi f_{dy} T_r$ . Положения ФЦ антенны относительно траверса при этом соответствуют  $k = \pm 1$ . Это означает, что дополнительный фазовый сдвиг, возникающий из-за движения антенны в обоих её положениях относительно ФЦ одинаков, и может быть скомпенсирован. Действительно, из выражения (9) следует, что разность фаз сигналов в этом случае составляет  $\Delta\varphi = -4a \left( k - \frac{t_V}{T_r} \right)$ , и в точке траверса ( $k = 0$ )  $\Delta\varphi = 4a \frac{t_V}{T_r} = 4\pi f_{dy} T_r$ , т.е. при использовании реальной апертуры (РРА) задача решается просто.

Для получения необходимого азимутального разрешения (особенно из космоса) применяют синтез азимутальной диаграммы направленности — алгоритм свёртки принимаемого сигнала (9) с опорным сигналом вида  $\exp(-jan^2)$ , частота модуляции которого изменяется линейно относительно точки траверса  $n = 0$ ,  $\frac{\partial \Psi}{\partial n} = -2an$ :

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

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

Пренебрегая изменением дальности  $R_n$  отражателя при перемещении антенны на размер элемента  $r_{x0} = \lambda R_n/D_x$ , получаем синтезированный азимутальный отклик ПСА:

$$\langle \dot{U}(k) \rangle = U_0 N \left| \frac{\sin \beta(k)}{\beta(k)} \right| \exp \left\{ j \left[ \varphi_0 + ak \left( k - \frac{2t_V}{T_r} \right) \right] \right\} \approx U_0 N \exp \left[ -b \left( k - \frac{t_V}{T_r} \right)^2 \right] \exp \left\{ j \left[ \varphi_0 + ak \left( k - \frac{2t_V}{T_r} \right) \right] \right\}, \quad (10)$$

где  $\beta(k) = \frac{2\pi W_x T_r L_x}{\lambda R_n} \left( k - \frac{t_V}{T_r} \right)$ ,  $b = \frac{2\pi W_x^2 T_r^2 L_x^2}{\lambda^2 R_n^2}$ , а аппроксимация  $\left| \frac{\sin \beta}{\beta} \right| \rightarrow \exp \left( -\frac{\beta^2}{2\pi} \right)$  даёт возможность записать амплитуду отклика в виде положительной функции без боковых лепестков, к чему и стремятся, разрабатывая оптимизированные алгоритмы синтеза.

Сравнивая выражения (9) и (10), мы видим, что фазовый множитель остался тем же, что и без синтеза, однако точка максимальной амплитуды оказалась сдвинутой от траверса ( $k_0 = t_V/T_r$ ). Расчёт показывает, что в самолётных условиях измерение черезпериодной разности фаз вокруг этой точки ( $k_0 - 1, k_0 + 1$ ) даёт  $\Delta\varphi = 0$  уже при радиальной скорости отражателя  $V_y > 1$  см/с. Следовательно, наличие азимутального сдвига  $x_v$  в данном случае исключает возможность измерения скорости  $V_y$  по фазе отклика ПСА в центре синтезированного амплитудного пика.

Показано [11], что задача измерения радиальной скорости отражателя в ПСА решается путём секционирования антенны, т.е. использования двух разнесённых фазовых центров с расстоянием между ними  $l_x = D_x/2$  (рис. 3).

Для фазовых центров левой и правой секций, на входах двух синтезаторов в положениях А и Б антенных секций образуются сигналы:

$$\dot{U}_{1B}(k) = U(k) \exp j \left\{ \varphi_0 + a \left[ k^2 - \frac{2t_V}{T_r} (k-1) \right] \right\} \text{ и } \dot{U}_{2A}(k) = U(k) \exp j \left\{ \varphi_0 + a \left[ k^2 - \frac{2t_V}{T_r} (k+1) \right] \right\},$$

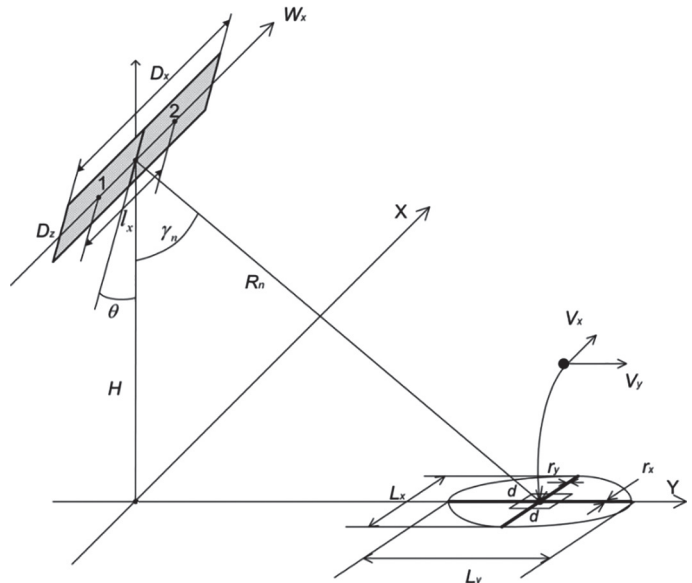
где  $U(k)$  отображает реальную ДНА. На выходах синтезаторов образуются отклики:

$$\langle \dot{U}_{1A}(k) \rangle = U(k) N_x \exp \left[ -b \left( k - \frac{t_V}{T_r} \right)^2 \right] \exp \left\{ j \left[ \varphi_0 + a \left( k^2 - 2 \frac{t_V}{T_r} (k-1) \right) \right] \right\} \quad (11)$$

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

**Рис. 3.** Геометрия визирования поверхности в интерференционном ПСА. 1, 2 — секции интерферометра;  $D_x, D_z$  — продольный и поперечный размеры антенны;  $L_x, L_y$  — размеры пятна реальной апертуры;  $r_x$  — разрешение по азимуту (продольное);  $r_y$  — разрешение по горизонтальной дальности (поперечное);  $d$  — симметричная осредняющая площадка;  $V_x, V_y$  — составляющие скорости площадки

**Fig. 3.** Surface vision geometry in interference SAR. 1, 2 — sections of interferometer;  $D_x, D_z$  — longitudinal and transverse dimensions of the antenna;  $L_x, L_y$  — the sizes of the spotted real aperture;  $r_x$  — azimuth resolution (longitudinal);  $r_y$  — resolution of horizontal distance (transverse);  $d$  — symmetrical averaging site;  $V_x, V_y$  — the components of the site velocity





При подаче на гибридную (суммо-разностную) схему этих откликов (от передней антенны — с задержкой на  $2T_r$ ), на выходе гибридной схемы имеем:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{hyb} &= \langle \dot{U}_{1B}(k) \rangle \pm \langle \dot{U}_{2A}(k) \rangle = \\ &= U(k) N_x \exp \left[ -b \left( k - \frac{t_V}{T_r} \right)^2 \right] \exp \left\{ j \left[ \varphi_0 + ak \left( k - 2 \frac{t_V}{T_r} \right) \right] \right\} \times \left[ \exp \left( -2aj \frac{t_V}{T_r} \right) \pm \exp \left( 2aj \frac{t_V}{T_r} \right) \right], \end{aligned} \quad (12)$$

т. е. модули суммарного и разностного откликов (12) в точке максимальной амплитуды являются искомыми квадратурными составляющими сигнала. Их сумма  $(U_{\cos}^2 + U_{\sin}^2)^{1/2}$  используется для формирования яр-

костного РЛ изображения, а величина  $\Delta\varphi = \arctg \frac{U_{\sin}}{U_{\cos}} = 2a \frac{t_V}{T_r} = 2\pi f_{dy} T_r$  — для формирования скоростного РЛ изображения.

В нашем случае  $f_{dy} = \frac{2V_y}{\lambda} \sin \gamma_n$ ,  $V_y$  — фазовая скорость вибрационной волны.

Следует отметить, что получаемая таким образом информация о значении азимутального сдвига  $t_V$  даёт возможность его исключить на обоих изображениях (ярком и скоростном), тем самым осуществляя формирование неискаженных РЛ изображений вибрационных волн в РСА, подобных приведенным на рис. 2. Функциональная схема, поясняющая последовательность операций, приведена на рис. 4, на ней не показаны устройства, обеспечивающие синтез (сжатие) сигнала по наклонной дальности. Обозначены: 1, 2 — секции антенны РСА; 3 — генератор опорного сигнала; 4 — азимутальные синтезаторы; 5 — задержка на два периода следования импульсов; 6 — гибридная (суммо-разностная) схема; 7 — вычислитель амплитуды; 8 — вычислитель разности фаз; 9 — вычислитель-корректор параметров опорного сигнала (скорость и высота аппарата, траверсные координаты); 10 — вычислитель-корректор азимутальной координаты движущегося объекта; 11 — формирование скоростного (разностно-фазового) изображения; 12 — формирование яркостного (амплитудного) изображения. Алгоритм подобного рода применяется в германском космическом РСА TerraSAR-X при формировании изображений наземных и морских движущихся объектов [12].

Теперь рассмотрим соотношения для флуктуационной чувствительности и энергетике РСА при формировании яркостного и скоростного изображений морской поверхности. Фоновый сигнал на элементе разрешения накапливается когерентно, а собственный шум — некогерентно, тогда для яркостного изображения, при большом числе ( $N > 20$ ) накапливаемых (приходящихся на элемент разрешения) импульсов, пороговое соотношение выглядит следующим образом:

$\frac{\Delta U_0^2}{\bar{U}_{ш}^2} = \frac{q_0}{\sqrt{N}}$ , где  $\bar{U}_{ш}$  — средне-квадратическое

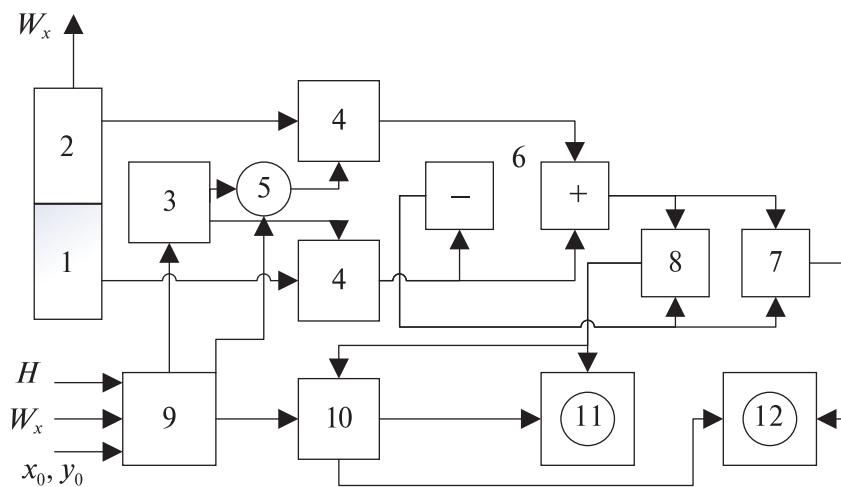


Рис. 4. Функциональная схема, поясняющая способ формирования в РСА яркостного и скоростного изображений с компенсацией (исключением) азимутального сдвига движущегося объекта

Fig. 4. Functional scheme that explains the method of generating amplitude and velocity images in the ISAR with compensation (exclusion) of the azimuthal shift of a moving object

отклонение амплитуды шума,  $q_0$  — пороговый коэффициент. Введя сюда сигнал  $U_0^2$ , получаем соотношение, где в левой части имеем рабочее отношение сигнал/шум  $q^2$ , а в знаменателе правой части — требуемая пороговая величина контраста интенсивности сигнала  $\Delta U_0^2 / U_0^2$ :

$$q^2 = \frac{U_0^2}{\bar{U}_{ш}^2} = \frac{q_0}{\frac{\Delta U_0^2}{U_0^2} \sqrt{N}}. \quad \text{Обычно при-}$$

нимают  $10 \lg(1 + K_{\text{пор}}) = 1$  дБ,  $K_{\text{пор}} = \Delta U_0^2 / U_0^2 = 0,26$ . Число накапливаемых некогерентно реализаций шума определяется отношением синтезированного и реального размеров антенн:  $N \approx \frac{L_x}{D_x}$ ,  $L_x \gg D_x$ . Следо-

вательно, при заданном пороге  $q_0 = 3$  и  $K_{\text{пор}} = 1$  дБ, в РСА получаем  $q^2 \approx 10 \sqrt{\frac{D_x}{L_x}}$ . Таким образом, благодаря когерентному накоплению импульсов на малой площадке возможно сформировать яркостное РЛ изображение слабо-отражающей поверхности с хорошим разрешением. Получается, что в условиях авиационного РСА, при  $D_x = 1$  м,  $L_x = 100$  м — по фону можно работать в режиме полной фокусировки при рабочем отношении фон/шум порядка единицы.

Флуктуационная ошибка при измерении разностно-фазового приращения зависит от крутизны фазо-скоростной характеристики  $\partial \psi_n / \partial V_y$ , числа  $N$  некогерентно накапливаемых шумовых отсчетов, а также от модуля  $|\rho_n|$  коэффициента корреляции накапливаемого сигнала по отношению к помехе:

$$\sigma_V = \sqrt{\frac{1}{|\rho_n|^2} - 1} \frac{\partial \psi_n}{\partial V_y} \sqrt{N}. \quad (13)$$

При отношении сигнал/шум  $q \gg 1$  (т.е. пренебрегая фоном) можно считать  $|\rho_n| = \frac{q^2}{1 + q^2}$ ,  $\frac{\partial \psi_n}{\partial V_y} = \frac{8\pi T_r \sin \gamma_n}{\lambda}$ , тогда из соотношения (10) получается флуктуационно-скоростная чувствительность, отвечающая фокусированному разрешению «точечного» отражателя:

$$\sigma_{V0} = \frac{\lambda}{2\pi T_r q \sqrt{2N_0} \sin \gamma_n}. \quad (14)$$

В авиационном РСА ( $\lambda = 3$  см,  $T_r = 10^{-3}$  с,  $\gamma = 60^\circ$ ,  $N \sim 10^2$ ) при  $q = 10$  мы получили бы таким образом скоростную чувствительность  $\sigma_{V0} \sim 2$  см/с, при разрешении  $\sim 1$  м по обеим осям.

В случае фонового отражателя (морские течения) картина существенно изменяется. Число независимых фоновых отсчетов на симметричной площадке размером  $d \gg r_x, r_y$  составляет  $N = \frac{2d^2}{D_x r_y}$ , а коэффициент  $q$  представляет отношение фон/собственный шум, тогда

$$\sigma_V = \frac{\lambda \sqrt{D_x r_y}}{8\pi T_r d \sin \gamma_n}. \quad (15)$$

Это означает, что при заданных параметрах авиационного РСА, скоростную чувствительность  $\sigma_V \sim 2$  см/с можно получить лишь при высоком отношении фон/шум ( $q = 10$ ) и на площадках размером не менее  $d \sim 10$  м по обеим осям.

Энергетика РСА рассчитывается стандартным способом, на основе известного соотношения  $P_2 = P_1 \frac{G_{a1} G_{a2} \lambda^2 S_t}{(4\pi)^3 R_n^4} \geq q^2 k T_{ш} \Delta f$ , где  $P_1, P_2$  — мощности излучаемого и принимаемого коротких импульсов (без учета коэффициента сжатия по дальности),  $S_t$  — ЭПР «точечного» отражателя,  $\Delta f$  — ширина спектра сигнала,  $G_{a1} = \frac{4\pi D_x D_z}{\lambda^2}$  — усиление антенны на передачу,  $G_{a2} = \frac{4\pi L_x D_z}{\lambda^2}$  — усиление синтезированной антенны на приём,  $D_z$  — вертикальный размер антенны,  $T_{ш}$  — эквивалентная шумовая температура приемника,  $k = 1,37 \cdot 10^{-23}$  Дж/К — постоянная Больцмана. Ширина зоны обзора  $L_y$  соответствует угломестной ширине

диаграммы направленности антенны (определяемой размером  $D_z$ ), азимутальная ширина  $L_x$  определяется размером  $D_x$ , и угол наклона антенной плоскости  $\theta$  согласован со средним углом визирования  $\gamma_n$ ,  $\gamma_n = (\pi/2) - \theta$  (рис. 3).

В этом случае, импульсная мощность  $P_1 \geq \frac{4\pi q^2 k T_\theta R_n^4 \lambda^2 \Delta f}{D_z^2 D_x L_x S_l}$ . Средняя мощность обратно пропорцио-

нальна коэффициенту сжатия  $B = \Delta f \tau_p$  и скважности  $Q = \frac{T_r}{\tau_p}$ , а наибольший период следования  $T_r$  определяется необходимостью сохранения когерентности фона, т.е. приёмом двух импульсов за время пролёта размера антенны  $D_x$ :  $T_r \leq \frac{D_x}{2W_x}$ ,  $W_x$  — скорость носителя. В результате средняя излучаемая мощность

$\bar{P}_1 = \frac{P_1}{BQ} \geq \frac{8\pi q^2 k T_\theta R_n^4 \lambda^2 W_x}{D_z^2 D_x^2 L_x S_l}$ . Заменим точечный отражатель фоновым, тогда с учётом размеров разрешае-

мой площадки при полной фокусировке имеем  $S_l = S^0 r_x r_y = S^0 \frac{c \lambda R_n}{2 \Delta f L_x \sin \gamma_n}$ , где  $S^0$  — УЭПР поверхности.

Введём  $H$  — высоту полёта, тогда

$$\bar{P}_1 \geq \frac{16\pi q^2 k T_\theta \Delta f H^3 \lambda W_x \sin \gamma_n}{D_z^2 D_x^2 S^0 c \cos^3 \gamma_n}. \quad (16)$$

Для формирования РЛ изображений морской поверхности с самолёта примем  $q = 10$ ,  $\Delta f = 3 \times 10^8$  Гц,  $\gamma_n > 60^\circ$ , тогда при  $k T_\theta \Delta f = 10^{-20}$  Вт и длине волны  $\lambda = 3 \times 10^{-2}$  м, а также соосно-вертикальной поляризации антенны (на передачу и приём), следует принять величину УЭПР  $S^0 = 10^{-3}$ . При  $H = 10^4$  м,  $W_x = 10^2$  м/с,  $D_x = 2$  м,  $D_z = 0,2$  м, средняя мощность  $\bar{P}_1 \geq 6$  Вт, и при скважности  $Q \sim 10^2$  необходимая импульсная мощность (ЛЧМ-импульса) составит  $P_p \sim 600$  Вт.

Таким образом, выявились основные параметры самолётного РСА: разрешение по обеим осям порядка 1 м при контрастно-яркостной флуктуационной чувствительности РЛ изображений лучше 1 дБ, скоростной флуктуационной чувствительности  $\sigma_V \sim 2$  см/с на площадке размером  $d \sim 10$  м и импульсной мощности порядка 1 кВт. Ширина зоны обзора составит  $L_y \sim 3H$ , т.е. не менее 30 км. Следует отметить, что полученная величина  $\sigma_V \sim 2$  см/с для скоростной флуктуационной чувствительности означает, что пороговая фазовая скорость вибрационной волны составляет не менее  $\sim 6$  см/с. В намечаемом натурном эксперименте с частотами вибратора  $F_s \sim 30$  Гц и вибрационной волны  $F_v \sim 15$  Гц — её фазовая скорость составляет  $\sim 25$  см/с, т.е. в скоростном РЛ изображении, как и в амплитудном, вибрационная волна должна быть хорошо видна на фоне ветровых волн.

## 6. Краткие выводы

1. Принятые допущения о параметрах плоского дна, о малости размеров донного вибратора по сравнению с длиной излучаемой им звуковой волны и о глубине водоёма, сравнимом с длиной звуковой волны, приводят к определённой картине для возбуждаемых параметрически поверхностных вибрационных волн малой длины. В ближней области (вблизи от точки над вибратором) амплитуда вибрационной волны максимальна, в дальней же области амплитуда может быть значительной на определённых расстояниях (волноводное распространение звука).

2. При небольшой глубине водоёма (20–40 м) представляется выполнимым имитационный натурный эксперимент с участием донного вибратора и самолётного радара, использующего интерферометр с продольной антенной базой, при необходимой привязке длины волны радара (X-диапазон) к частоте вибрации (30 Гц).

3. Вибрационный спектр реального очага землетрясения, измеренный на глубине 1000 м, имел плоскую форму в пределах (0,1–3 Гц). Радиолокация подобного очага возможна при длине волны радара более 1 м (УКВ- и КВ-диапазоны).

4. Радиолокационные изображения вибрационных волн, сформированные в яркостном и скоростном каналах современных РСА, должны иметь различную форму и, по сделанным расчётам, вибрационная волна должна хорошо выделяться на фоне ветровых волн.

## 7. Благодарности

Авторы глубоко благодарны рецензентам, чьи замечания позволили не только улучшить текст статьи (в особенности рисунки), но и устранить имеющуюся в первоначальном тексте принципиальную ошибку.

## 8. Финансирование

Работа выполнена в ИО РАН в рамках государственного задания по теме № 0128–2021–0003.

## Литература

1. *Переслегин С.В., Левченко Д.Г., Карпов И.О.* Вибрационная волна на поверхности воды: параметрическое возбуждение и радиолокационное наблюдение // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2021. Т. 14, № 2. С. 39–53. doi: 10.7868/S2073667321020040
2. *Рабинович М.И., Трубецков Д.И.* Введение в теорию колебаний и волн. М.: Наука, 1984. 560 с.
3. *Левин Б.В., Носов М.А.* Физика цунами и родственных явлений в океане. М.: Янус-К, 2005. 360 с.
4. *Шендеров Е.Л.* Излучение и рассеяние звука. Л.: Судостроение, 1989. 301 с.
5. *Разин А.В., Собисевич А.Л.* Геоакустика слоистых сред. М.: ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН, 2012. 210 с.
6. *Исакович М.А.* Общая акустика. М.: Наука, 1973. 436 с.
7. *Toporkov J.V., Perkovic D., Farquhanson G., Sletten M.A., Frasier S.J.* Sea surface velocity vector retrieval using dual-beam interferometry: first demonstration // *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, Nov. 2005. Vol. 43, No 11. P. 2494–2502. doi: 10.1109/TGRS.2005.848603
8. *Romeiser R.* The future of SAR-based oceanography: High-resolution current measurements by along-track interferometry // *Oceanography*. 2013. Vol. 26, No 2. P. 92–99. doi: 10.5670/oceanog.2013.37
9. *Верб В.С., Плющев В.А., Манакон В.Ю.* Применение авиационного РСА комплекса, работающего в широком диапазоне частот, для поверхностного и подповерхностного зондирования // *Труды НТО РЭС им. А.С. Попова «Сверхширокополосные сигналы и сверхкороткие импульсы в радиолокации, связи и акустике»*. Суздаль — Москва, 2005. С. 89–94.
10. *Hiuoyuki Matsumoto, Toshinory Kimura, Shuhei Nishida, Yuya Machida.* Experimental evidence characterizing pressure fluctuations on the sea floor-water interfaced induced by an earthquake // *Scientific Reports*. 2018. Vol. 8, No 10. doi: 10.1038/s41598-018-34578-2
11. *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.
12. *Cassola M.R., Iraola P.P., De Zan F., Scheiber R., Reigber A., Geudtner D., Alberto Moreira.* Doppler-related distortions in TOPS SAR images // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2015. Vol. 53, No 1. doi: 10.1109/TGRS.2014.2313068
13. *Переслегин С.В., Карпов И.О., Халиков З.А.* Двухпозиционная квазизеркальная радиолокация морской поверхности: механизмы СВЧ-рассеяния и возможности решения океанологических задач из космоса // *Океанология*. 2017. Т. 57, № 5. С. 710–719. doi: 10.7868/S0030157417050057
14. *Переслегин С.В., Халиков З.А., Карпов И.О.* Модель формирования полей ветровых и внутренних волн в ИРСА с продольной антенной базой // *Труды XXIX Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред»*. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2019.

## References

1. *Pereslegin S.V., Levchenko D.G., Karpov I.O.* The vibration wave on the water surface: parametric excitation and radar observation. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2021, 14, 2, 39–53 (in Russian). doi: 10.7868/S2073667321020040
2. *Rabinovich M.I., Trubetskov D.I.* Introduction to the theory of vibrations and waves. *Moscow, Nauka*, 1984, 560 p. (in Russian).
3. *Levin B.V., Nosov M.A.* Physics of tsunamis and related phenomena in the ocean. *Moscow, Yanus-K*, 2005, 360 p. (in Russian).
4. *Shenderov E.L.* *Sound emission and scattering. Leningrad. Sudostroyeniye*. 1989, 301 p. (in Russian).
5. *Razin A.V., Sobisevich A.L.* Geoacoustics of layered medium. *Moscow, IFZ by O. Yu. Shmidt RAS*. 2012, 210 p. (in Russian).
6. *Isakovich M.A.* General acoustics. *Moscow, Nauka*, 1973, 436 p. (in Russian).
7. *Toporkov J.V., Perkovic D., Farquhanson G., Sletten M.A., Frasier S.J.* Sea surface velocity vector retrieval using dual-beam interferometry: first demonstration. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*. 2005, 43, 11, 2494–2502. doi: 10.1109/TGRS.2005.848603

8. Romeiser R. The future of SAR-based oceanography: High-resolution current measurements by along-track interferometry. *Oceanography*. 2013, 26, 2, 92–99. doi: 10.5670/oceanog.2013.37
9. Verba V.S., Plushev V.A., Manakov V. Yu. The use of an aviation SAR system operating at low frequencies for excitation and subsurface sounding. *Proceedings of NTO RES n.a. A.S. Popov “Ultrawideband signals and ultrashort pulses in radar, communications and acoustics”*. Suzdal — Moscow, 2005. P. 89–94 (in Russian).
10. Hiroyuki Matsumoto, Toshinory Kimura, Shuhei Nishida, Yuya Machida. Experimental evidence characterizing pressure fluctuations on the sea floor-water interfaced induced by an earthquake. *Scientific Reports*. 2018, 8, 10. doi: 10.1038/s41598-018-34578-2
11. Pereslegin S.V., Khalikov Z.A. Signal processing in synthetic-aperture radars during the formation of the Earth-surface velocity fields. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2015, 57, 700–710. doi: 10.1007/s11141-015-9556-7
12. Cassola M.R., Iraola P.P., De Zan F., Scheiber R., Reigber A., Geudtner D., Alberto Moreira. Doppler-related distortions in TOPS SAR images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2015, 53, 1. doi: 10.1109/TGRS.2014.2313068
13. Pereslegin S.V., Karpov I.O., Khalikov Z.A. Two-position quasi-mirror radar of the sea surface: Principles of microwave scattering and possibilities of solving Oceanology problems from space. *Oceanology*. 2017, 57, 639–647. doi: 10.1134/S0001437017050149
14. Pereslegin S.V., Khalikov Z.A., Karpov I.O. Model of formation of fields of wind and internal waves in IRSA with a longitudinal antenna base. *Proceedings of XXIX All-Russian Symposium “Radiolokatsionnoye issledovaniye prirodnikh sred”*. St. Petersburg, A.F. Mozhaysky VKA, 2019.