

УДК 621.371; 551.465

© С. В. Переслегин*, Д. Г. Левченко, И. О. Карпов

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

*E-mail: pereslegsv@yandex.ru

ВИБРАЦИОННАЯ ВОЛНА НА ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ: ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ И РАДИОЛОКАЦИОННОЕ НАБЛЮДЕНИЕ

Статья поступила в редакцию 20.07.2020, после доработки 07.12.2020

Задача о возбуждении волн на поверхности воды от неподвижного осциллирующего подводного источника рассматривается в связи с проблемой дистанционного обнаружения таких источников. Показано, что затухание импульса низкочастотного источника с глубиной может в значительной степени компенсироваться усилением параметрически возбуждаемой поверхностной волны гравитационно-капиллярного (ГК) диапазона, причём ширина области возбуждения возрастает при увеличении амплитуды вибрационной мембраны. Согласно имеющейся модели, учёт вязкости приводит к оценке порога возбуждения порядка $\xi_0 \sim 10^{-2}$ см по амплитуде поверхностной (возбуждающей) волны, и этот порог максимален в центре ГК области, при длине возбуждаемой ГК волны $\Lambda_0 = 1.74$ см. Сама же область возбуждения перемещается по спектру в соответствии с частотой вибратора, и наиболее эффективен случай удвоенной частоты вибратора по отношению к частоте возбуждаемой волны $F_0 = 13.5$ Гц. Полученные модельные результаты важны для задач, связанных с радиолокацией морской поверхности. Для их проверки создана лабораторная экспериментальная установка и проведены измерения рассеяния электромагнитных волн сантиметрового диапазона от области кольцевых бегущих волн, возбуждаемых вокруг пятна над вибрирующей мембраной, где возникают стоячие волны («рябь Фарадея»). Осциллограммы и спектры на выходе фазового детектора радара, работающего в режиме диффузно-резонансного (брэгговского) рассеяния, были получены и сравнивались для двух типов вибраторов — приповерхностного и донного, и эти исследования будут продолжены. Продемонстрированы перспективы использования изучаемого эффекта для обнаружения источников низкочастотных волн сейсмического происхождения и их радиолокационного мониторинга.

Ключевые слова: донный вибратор, гравитационно-капиллярные поверхностные волны, дисперсионное соотношение, параметрическое возбуждение, резонансное радиолокационное рассеяние, имитационная лабораторная установка.

© S.V. Pereslegin*, D.G. Levchenko, I.O. Karpov

Shirshov Institute of Oceanology of RAS, 117997, Nahimovsky Pr., 36, Moscow, Russia

*E-mail: pereslegsv@gmail.com

THE VIBRATION WAVE ON THE WATER SURFACE: PARAMETRIC EXCITATION AND RADAR OBSERVATION

Received 20.07.2020, in final form 07.12.2020

The problem of wave excitation on the water surface from a stationary oscillating underwater source is considered in connection with the problem of remote detection of such sources. It is shown that the attenuation of the pulse of the source with depth can be largely compensated by the waves parametric excitation of the gravitational-capillary range, that is important for radar sensing of sea surface. Threshold generating the amplitude of surface wave $\xi_0 \sim 10^{-2}$ cm, according to the model. The maximum amplitude is in the center of the gravitational-capillary region at the length of the generating gravitational-capillary wave $\Lambda_0 = 1.74$ cm. The generating region shifts when the frequency of the vibrator changes, and the most effective case is when the frequency of the vibrator is doubled in relation to the frequency of the excited wave $F_0 = 13.5$ Hz. The obtained model results are important for problems related to sea surface radar. A laboratory experimental installation has been created, the measurements of electromagnetic waves scattering from the area of circular waves around the vibrating membrane ("Faraday ripples") are conducted. Perspectives of these effects using for detect of low-frequency seismic sources, and its radar monitoring.

Key words: bottom vibrator, gravity-capillary surface waves, dispersion relation, parametric excitation, resonant radar scattering, simulation laboratory setup.

Ссылка для цитирования: 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

For citation: Pereslegin S.V., Levchenko D.G., Karpov I.O. The Vibration Wave on the Water Surface: Parametric Excitation and Radar Observation. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2021, 14, 2, 39–53. doi: 10.7868/S2073667321020040

1. Введение

Радиолокационный мониторинг волн, образованных на поверхности воды неподвижным осциллирующим подводным источником, необходим для решения различных задач, к примеру: проблема раннего обнаружения цунами; проблема передачи информации через морскую поверхность в присутствии помехи от ветровых волн. Возможность дистанционного обнаружения подводного звукового источника уже рассматривалась в отечественных работах [1, 2]. Также есть пример успешного эксперимента проведенного с участием корабля, на котором был установлен подводный звуковой генератор, и космического радиолокатора TerraSAR-X [3]. Используемый эффект определялся резонансным (брэгговским) рассеянием радиоволны на звуковой поверхностной волне, длина Λ которой составляла примерно половину длины радиоволны, а частота (c/Λ) составляла 10^5 Гц при длине радиоволны $\lambda = 3$ см. В последнее время появились работы по светолокации морской поверхности, где для «прослушивания» морской среды на низких частотах использовался лазерный интерферометр [4]. Известны работы [5–8] по физике радиолокационного рассеяния на шероховатой поверхности, по гидродинамике водной среды [9–14], где рассматривается взаимодействие со средой и поверхностью различных гидродинамических источников, вплоть до образующих волны цунами колебаний дна океана. Был изучен случай т.н. «параметрического резонанса» — возбуждения поверхностной волны подводным низкочастотным вибратором [12–14], а также теория т.н. «параметрона» — радиотехнического устройства с возбуждением колебательного контура путём модуляции входящей в контур ёмкости [15]. Подлинной аналогии здесь нет, ибо, как показывает эксперимент, при возбуждении водной поверхности колебательный контур как таковой отсутствует, поэтому понятие «параметрический резонанс» в данном случае несколько некорректно. Имеются модельные представления по формированию радиолокационных изображений гравитационной волны цунами, возникающей вследствие сильного землетрясения (подвижки дна) — по полю уровня океана, при использовании космического радиоинтерферометра с поперечной антенной базой [16]. В достаточной степени разработана технология радиолокации мелкомасштабных течений с авиакосмических носителей, основанная на измерении доплеровского сдвига в отраженном сигнале (радио-интерферометр с продольной базой [17, 18]). Кроме того, имеются работы, где рассматривается структура вибрационных и акустических возмущений, вызванных подводным источником [19–21], а также результаты измерений флуктуаций давления вблизи очагов подводных землетрясений [22].

Если поставить цель — регистрировать радиолокатором поверхностную волну, возбуждаемую подводным гармоническим вибратором, то возникает много вопросов. Во-первых, какую форму имеет эта волна, и, во-вторых, — как с ней взаимодействует электромагнитный сигнал, отражаемый водной поверхностью. Именно эти вопросы рассматриваются далее, опираясь на результаты проводимого лабораторного эксперимента. В эксперименте выясняются основные физические эффекты как при возбуждении поверхностной волны донным вибратором, так и при радиолокации возбуждаемой поверхностной волны. Рассматривается и возможность радиолокации вибрационной поверхностной волны в присутствии ветровых волн. Что же касается радиолокации подводных вибрационных источников в реальных морских условиях, то для этого необходим полноценный натурный эксперимент с использованием донного низкочастотного вибратора и когерентно-импульсного радара — берегового или судового.

2. Параметрическое возбуждение поверхностных гравитационно-капиллярных волн подводным вибратором

Рассматривая возбуждение гравитационно-капиллярных (ГК) волн в глубокой акватории в рамках линейной теории, предполагают, что амплитуда волны много меньше ее длины ($\xi \ll \Lambda$), и пренебрегают сжимаемостью жидкости во взволнованном слое. Такое допущение справедливо, поскольку толщина h взволнованного слоя меньше длины поверхностной волны, в нашем случае $\Lambda \sim 1$ см, а длина соответствующей вибрационной (акустической) волны составляет более 10^4 см.

Запишем уравнение непрерывности для плоского случая потенциального волнения (координаты x, z):

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0, \quad (1)$$

где φ — потенциал скорости частиц. Решение уравнения (1) имеет вид

$$\varphi = \xi c \exp(kz) \cos(kx - \omega t),$$

где ξ — амплитуда волны, c — фазовая скорость, $k = \omega/c$ — волновое число, ω — частота. Координаты скорости частиц:

$$v_x = \frac{\partial \varphi}{\partial x} = -\xi c k \exp(kz) \sin(kx - \omega t), \quad v_z = \frac{\partial \varphi}{\partial z} = \xi c k \exp(kz) \cos(kx - \omega t) = k\varphi. \quad (2)$$

Граничное условие при $z = 0$ для КГВ имеет вид:

$$\left(g + \frac{\sigma}{\rho} k^2\right) \frac{\partial \varphi}{\partial z} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = 0, \quad (3)$$

где $\sigma = 73 \times 10^{-3} \text{ Н/м}$ — поверхностное натяжение, ρ — плотность жидкости. Подставляем (2) в (3) и приводим уравнение к стандартной форме $\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} + \left(g + \frac{\sigma}{\rho} k^2\right) \varphi = 0$. Выражение в скобках показывает ускорение поверхности под действием тяготения и поверхностного натяжения, которые считаем постоянными. Однако в нашем случае верхний слой жидкости колеблется в вертикальном направлении под воздействием вибрации, поэтому коэффициент при φ является переменным. Получается линейное дифференциальное уравнение с переменным коэффициентом. Оно не имеет общего решения — однако, поскольку вибрационные колебания принимаем периодическими и малыми, уравнение приводится к уравнению Матье, решения которого известны.

Примем амплитуду вибрационного поля на поверхности, имеющего частоту ω : $\xi(t) = \xi_0 \cos \omega t$. Суммарное вертикальное ускорение будет равно $g + \frac{\sigma}{\rho} k^2 + \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$, и тогда получаем уравнение $\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} + k \left(g + \frac{\sigma}{\rho} k^2 + \xi \omega^2 \cos \omega t\right) \varphi = 0$, или

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} + \omega_0^2 (1 + \mu \cos \omega t) \varphi = 0, \quad (4)$$

$$\text{где } \omega_0 = \left(g k_v + \sigma \frac{k_v^3}{\rho}\right)^{1/2} \quad (5)$$

— дисперсионное соотношение, ω_0 — собственная частота системы, $\mu = \xi_0 k \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \ll 1$ — малый безразмерный параметр, k_v — волновое число образующейся поверхностной (вибрационной) волны. Выражение (4) равносильно уравнению Матье [12]. Решение уравнения (4) имеет вид:

$$\varphi(t) = C_1 e^{\alpha t} \cos \omega_0 t + C_2 e^{-\alpha t} \sin \omega_0 t, \quad (6)$$

где C_1, C_2 — постоянные, α — инкремент усиления. Это решение получается при кратных значениях частот ω_0 и ω : $\omega_0 = n\omega/2$ ($n = 1, 2, \dots$), однако определить амплитуду возникающей стоячей волны не представляется возможным [11].

Дальнейшее рассмотрение показывает, что с учётом глубины H водоёма частота поверхностной волны определяется соотношением: $\omega_0^2 = \left(k_v g + \frac{\sigma}{\rho} k_v^3\right) th(kH) = \left(\frac{n\omega}{2}\right)^2$, однако в интересующей нас ГК области, даже в лабораторных условиях при $H = 10$ см, $th(kH) = 1$.

Инкремент усиления равен [12]

$$\alpha = \frac{\xi_0 \omega^3}{8 \left(g + \frac{\sigma k_v^2}{\rho}\right)}. \quad (7)$$

Значение (6) растёт со временем при любом α , кроме $\alpha = 0$. Наиболее быстрый рост происходит при $n = 1$ и на более высоких частотах. Усиление возможно в некоторой области частот вблизи ω_0 , и эта область расширяется с увеличением амплитуды накачки:

$$-\frac{\xi_0 k_v}{2} \left(\frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right) < \frac{\Delta \omega}{\omega_0} < \frac{\xi_0 k_v}{2} \left(\frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right). \quad (8)$$

Для учёта потерь в среде вводится декремент затухания, который вычитается из инкремента. Потери из-за вязкости воды определяются декрементом [13]

$$\chi = 2\eta k_v^2, \quad (9)$$

где $\eta = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ — кинематическая вязкость. Приравнявая значения инкремента и декремента, можно найти минимальное значение (порог) амплитуды возбуждения, при котором возможно усиление

$$\xi_0 > 16\eta \sqrt{\frac{k_v}{g + \frac{\sigma}{\rho} k_v^2}}, \quad (10)$$

откуда видно, что порог ξ_0 максимален в центре ГК области $k_{v0} = \sqrt{\frac{\rho g}{\sigma}}$, $\xi_0 > 16\eta \sqrt{\frac{\pi}{\Lambda_0 g}}$, $\Lambda_0 = 2\pi \sqrt{\frac{\sigma}{\rho g}} = 1.74$ см,

$F_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{4\rho g^3}{\sigma}} = 13.5$ Гц, и при частоте вибратора $2F_0 = 27$ Гц получается $\xi_0 > 10^{-5}$ м. Фазовая скорость при

этом минимальна и составляет $c_0 = 4\sqrt{\frac{4\sigma g}{\rho}} = 23.5$ см/с. Из выражения (8), при $\xi_0 = 10^{-4}$ м, $\omega = 2\omega_0$, получаем

относительную ширину полосы усиления $\frac{\Delta\omega}{\omega_0} = 4\xi_0 \sqrt{\frac{\rho g}{\sigma}} = 0.15$. Из выражения (8) видно, что «область усиления» $\Delta\omega$ перемещается по спектру волн при изменении частоты вибратора. Параметр μ в уравнении (4) остаётся малым вплоть до величины ξ_0 порядка 10^{-3} м. При дальнейшем увеличении ξ_0 приведенное (линейное) приближение уже не работает, а затем возникает самовозбуждение.

В приводимом далее лабораторном эксперименте используется малоразмерный донный вибратор. Эксперимент показывает, что при определённом значении амплитуды накачки, непосредственно над вибратором возникает стоячая волна, описываемая выражением (6) — т.н. «рябь Фарадея», а вокруг этой области возникает кольцевая бегущая волна, длина которой в точности соответствует соотношению (5) при частоте волны, вдвое меньшей частоты вибратора. Амплитуда волны определяется диаграммой направленности вибратора и возникающим усилением. С точки зрения радиолокации, наибольший интерес представляют волны, длина которых лежит именно в ГК области.

3. Взаимосвязь параметров донного вибратора с параметрами поверхностной вибрационной волны

Воспользуемся приближенными представлениями для акустического поля, возникающего вокруг гармонического источника, расположенного на дне водоёма (акустический монополю, твёрдое плоское дно).

Создаваемое им давление в среде представляется в виде $p = j\rho\omega \frac{V}{4\pi r} \exp j(kr - \omega t)$, где V — объёмная скорость вибрационной мембраны, r — расстояние от источника. При малых отношениях диаметра вибрирующей мембраны к длине возбуждаемой в среде волны ($d/\lambda < 0.1$) диаграмма направленности является полусферой (рис. 1).

Возбуждающая вибрационная волна с амплитудой ξ_0 является практически плоской. Для низких звуковых частот и малых расстояний ($kr \ll 1$) можно представить давление в среде как

$$p = j\rho\omega \frac{V}{4\pi r} \left(1 + jkr - \frac{(kr)^2}{2} - j\frac{(kr)^3}{6} + \dots \right) \exp(j\omega t). \text{ Пренебрегая малыми членами, имеем тогда две со-}$$

ставляющие: $p_1 = j\rho\omega \frac{V}{4\pi r}$ и $p_2 = -\rho\omega \frac{Vk}{4\pi} = -\rho V \frac{\omega^2}{4\pi c}$, где c — скорость звука в среде. Первая составляющая

зависит от частоты вибрации и расстояния, а вторая составляющая (собственно звук) в данном приближении от расстояния не зависит. Принято считать первую (мнимую) составляющую «гидродинамической», т.е. возникающей в условиях несжимаемой жидкости. Вторая же составляющая настолько мала, что обычный гидрофон, находясь вблизи источника, её не чувствует. Таким образом, амплитуда давления у поверхности от низкочастотного источника, расположенного на дне неглубокого водоёма, выражается соотношением $p_m = \frac{\rho\omega V_m}{2\pi H} \cos\theta$, где θ — угол радиуса-вектора $\vec{r}$ относительно вертикали, H — глубина водоёма.

Амплитуда объёмной скорости составляет $V_m = \frac{d^2 b_m \omega}{8}$ м³с⁻¹; d — диаметр мембраны; b_m , ω — амплитуда и частота вибрации. Амплитуда давления у поверхности над источником вибрации тогда составит

$$p_m = \frac{\rho d^2 b_m \omega^2}{32\pi H}. \quad (11)$$

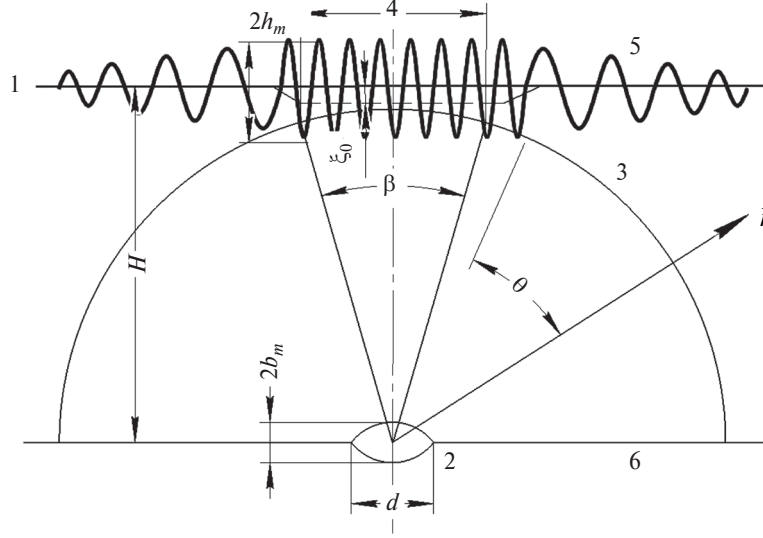


Рис. 1. Донный вибратор: 1 — водная (мягкая) поверхность, 2 — вибрирующая мембрана, 3 — диаграмма направленности вибратора, 4 — область вынужденных (стоячих) волн, 5 — область свободных (бегущих) кольцевых волн, 6 — дно ванны (жесткая поверхность), ξ_0 — амплитуда возбуждающей (плоской) вибрационной волны, $h_m = Q\xi_0$ — амплитуда возбуждаемой (кольцевой) бегущей ГК волны, Q — коэффициент усиления.

Fig. 1. Bottom vibrator: 1 — water (soft) surface, 2 — vibrating membrane, 3 — vibrator directional pattern, 4 — area of forced (standing) waves, 5 — area of free (running) ring waves, 6 — bath bottom (hard surface), ξ_0 — amplitude of exciting (flat) vibration wave, $h_m = Q\xi_0$ — amplitude of excited (circular) travelling HC wave, Q — amplification factor.

Свяжем параметры возбуждающей поверхностной волны с параметрами вибратора. Энергия вибратора записывается как $E_1 = \frac{b_m^2}{4} \rho V_m \omega = \frac{b_m^3}{16} \rho d^2 \omega^2$. Энергия поверхностной волны на единицу площади составляет $E^0 = \frac{\rho \xi_0^2}{8} \left(g + \frac{\sigma}{\rho} k^2 \right)$. Для интересующего нас центра ГК области, обе составляющие (гравитация и натяжение) одинаковы. Пусть облучаемое пятно занимает площадь $S = H^2 \beta^2$, где $\beta \sim \pi/6$. При сделанных допущениях энергия возникающей в пятне поверхностной волны составит $E_2 = E^0 S = \frac{\pi^2}{144} \xi_0^2 \rho g H^2$. Однако для раскочки поверхности используется не вся энергия вибратора E_1 , а только её часть, определяемая отношением поверхности пятна S к поверхности полусферы: $\eta = \frac{S}{2\pi H^2} = \frac{\pi}{72}$. Приравнивая величины энергий вибрационной волны и вибратора $E_1 \eta = E_2$, получаем желаемую связь

$$\xi_0 = \frac{\omega d}{2H} \sqrt{\frac{b_m^3}{2\pi g}}. \quad (12)$$

Таким образом, имеющиеся представления позволили, не касаясь проблемы параметрического возбуждения и зная параметры вибратора — грубо оценить величину давления у поверхности (11) и амплитуду возбуждающей вибрационной поверхностной волны (12). Используя эти соотношения, имеем (в данном грубом приближении) взаимосвязь амплитуд возбуждающего давления p_m и возбуждаемой ГК волны h_m с учётом её усиления $h_m = Q\xi_0$.

$$p_m = 0.03 \rho^3 \sqrt{\frac{d^4 \omega^4 h_m^2 g}{Q^2 H}}. \quad (13)$$

4. Радиолокация поверхностных волн, возбуждаемых донным вибратором

При отражении СВЧ сигнала от водной поверхности необходимо учитывать физические параметры скин-слоя, толщина которого δh зависит от длины волны λ и составляющих комплексной диэлектрической проницаемости водной среды $\varepsilon = \varepsilon_p + j\varepsilon_i$, $\delta h = \frac{\lambda}{4\sqrt{|\varepsilon| - \varepsilon_r}}$. В СВЧ-диапазоне (от $\lambda = 10^{-3}$ м до $\lambda = 1$ м) толщи-

на скин-слоя крайне мала, — $\delta h \ll \lambda$, что объясняется «проводимостью смещения» в коротковолновой СВЧ-области и ионной проводимостью (солёностью воды) в длинноволновой. Будем считать, что вибрирует именно скин-слой. При радиолокационном (обратном) резонансном рассеянии бегущая КГ волна при её фазовом синхронизме с проекцией «неподвижной» радиоволны вызывает модуляцию отраженного сигнала, и на выходе фазового детектора возникает сигнал

$$U = \frac{2\pi}{\lambda} h_m \cos^2 \gamma \sqrt{P_2 \eta R^*} \cos(\omega_0 t + \varphi), \quad (14)$$

амплитуда которого U_m определяется мощностью сигнала P_2 на выходе антенны и амплитудой h_m поверхностной ГК волны. Обозначены: γ — угол визирования поверхности; η , R^* — коэффициент передачи и волновое сопротивление смесителя (фазового детектора), ω_0 — частота поверхностной ГК волны.

При радиолокации морской поверхности, уровень отражённого сигнала принято оценивать величиной УЭПР (удельной эффективной поверхности рассеяния), не зависящей от параметров аппаратуры и дальности. В приближении метода малых возмущений (ММВ) получается УЭПР $S_0 = 4\pi k_r^4 \cos^2 \gamma_1 \cos^2 \gamma_2 |q|^2 \Psi(k_x, k_y)$, где $\Psi(k_x, k_y)$ — спектральная плотность поверхностной волны, а её волновые числа k_x, k_y приравняются к горизонтальным проекциям радиоволновых чисел: $p_x = k_r(\sin \gamma_2 \sin \varphi_2 - \sin \gamma_1 \sin \varphi_1)$, $p_y = k_r(\sin \gamma_2 \cos \varphi_2 - \sin \gamma_1 \cos \varphi_1)$, $k_r = \frac{2\pi}{\lambda}$, γ_1, γ_2 — вертикальные, φ_1, φ_2 — азимутальные углы визирования поверхности излучающей и приёмной антеннами. Комплексная безразмерная величина q зависит от диэлектрических параметров водной среды, углов визирования и поляризации антенн [6].

При обратном рассеянии на двумерной поверхностной волне имеем $\gamma_1 = \gamma_2$, $\varphi_1 = 0$, $\varphi_2 = \pi$, $p_x = 0$, $p_y = k_y = 2k_r \sin \gamma$, и длина «резонансной» поверхностной волны составляет $\Lambda_{res} = \frac{m\lambda}{2\sin \gamma}$, где числа $m = 1, 2, \dots$ соответствуют модам дифракционного резонанса. Волновое число поверхностной волны (основой дифракционный резонанс, $m = 1$) составляет $K_{res} = \frac{4\pi \sin \gamma}{\lambda}$. В этом случае, спектральная плотность поверхностной

вибрационной волны $\Psi_h = \frac{h_m^2}{2K_{res}^2} = \frac{h_m^2}{8k^2 \sin^2 \gamma}$, и УЭПР принимает вид:

$$(S^0)_{vibr} = \frac{\pi}{2} k_r^2 h_m^2 |q|^2 \cos^2 \gamma \cdot \text{ctg}^2 \gamma. \quad (15)$$

Пусть наименьшая (пороговая) УЭПР радара при соосно-вертикальной поляризации антенн составляет $(S_{VV}^0)_{\min}$, тогда соответствующая ей амплитуда поверхностной ГК волны

$$(h_m)_{\min} = \sqrt{\frac{(S_{VV}^0)_{\min}}{2\pi^3}} \frac{\lambda \sin \gamma}{|q_{VV}| \cos^2 \gamma}. \quad (16)$$

Описываемая далее лабораторная установка обладает следующими параметрами: $\lambda = (2.0-2.5)$ см, $\gamma = 60^\circ$, $|q_{VV}| = 4.6$. Ожидаемая минимальная УЭПР составляет $(S_{VV}^0)_{\min} = 10^{-3}$, тогда из (16) получаем $(h_m)_{\min} = 70$ мкм. Потребуем, чтобы амплитуда вибрационной поверхностной ГК волны была не менее 100 мкм (10^{-2} см), и найдём из выражения (12) необходимую амплитуду вибратора: $b_m = 2\pi^3 \sqrt{\frac{h_m^2 g H^2}{Q^2 \omega^2 d^2}}$. При частоте

накачки $\omega = 2\pi \cdot 30$ Гц, диаметре вибратора $d = 2$ см и его глубине $H = 10$ см, получаем $b_m \approx 0.1$ см при усилении $Q = 10$. Таким образом, применительно к лабораторным условиям эксперимента, приведенный (весьма грубый) расчёт даёт вполне объяснимое соотношение между амплитудой вибратора b_m , амплитудой давления у поверхности p_m (11) и амплитудой возбуждаемой поверхностной ГК волны: $h_m \approx b_m \approx 0.1$ см при $p_m \approx 0.7$ Па.

5. Лабораторный эксперимент

Цель эксперимента состояла в подтверждении, по возможности, изложенных представлений о параметрическом возбуждении поверхностных волн ГК-диапазона подводным низкочастотным вибратором, получении количественных данных и их сравнения с модельными, и главное — подтверждения возможности радиолокационного наблюдения достаточно слабых поверхностных волн вибрационного происхождения. Простейший вибратор — это электродинамический генератор поверхностной волны (обыкновенный динамик), снабженный опущенной в воду пластинкой. Более сложная задача — использование донного вибратора, отвечающего лабораторным условиям (ограниченные размеры ванны, подавление отражений от её стенок и вибрации самой ванны). Что же касается радара, то возможно применение несложного лабораторного устройства с непрерывным излучением и когерентным приёмом отраженного сигнала.

Функциональная схема лабораторной установки приведена на рис. 2. Сигнал от СВЧ генератора (1) поступает на волноводный Т-мост (2). Гетеродинный сигнал с выхода Т-моста поступает на квадратурный смеситель (13) через аттенюатор (7), фазовращатель (8) и щелевой мост (9). Излучаемый сигнал с выхода Т-моста поступает в антенну (6) через эталонный аттенюатор (3) и ферритовый циркулятор (5). Отраженный сигнал через тот же циркулятор поступает на щелевой мост (9) смесителя. Ферритовые вентили (10, 11) защищают волноводный тракт от нежелательных отражений (от диодного смесителя), ту же функцию выполняет согласованная нагрузка Т-моста (12). Разнополярные диоды смесителя (13) снабжены омическими нагрузками (14) и микроамперметрами — измерителями токов диодного смесителя. Амплитудная калибровка приёмника осуществляется посредством эталонного аттенюатора (3), фазовая калибровка — посредством звуковой мембраны (15) или плунжера (16), отраженный сигнал от которых при необходимости поступает через вспомогательный циркулятор (4). Мембрана калибратора возбуждается от звукового генератора (17) с частотой (1–3) кГц. На дне ванны с водой (18) помещён специальный «подводный вибратор» (19), питаемый от генератора (20) с частотой (20–100) Гц. На краях ванны установлены пластмассовые волногасители (21). С выхода смесителя (13) сигналы поступают на двухканальный осциллограф (22), с подключением анализатора спектра (23).

Первая задача состояла в экспериментальной проверке известного эффекта резонансного радиолокационного рассеяния на поверхностной волне, возбуждаемой вибратором, находящимся непосредственно в приповерхностном слое воды. Методика этого эксперимента заключалась в размещении вибратора на краю ванны (на рис. 2 не показан), зондировании поверхности радиолокатором и получении ожидаемого эффекта, т.е. резонансного (брэгговского) рассеяния СВЧ-сигнала на бегущей поверхностной волне,

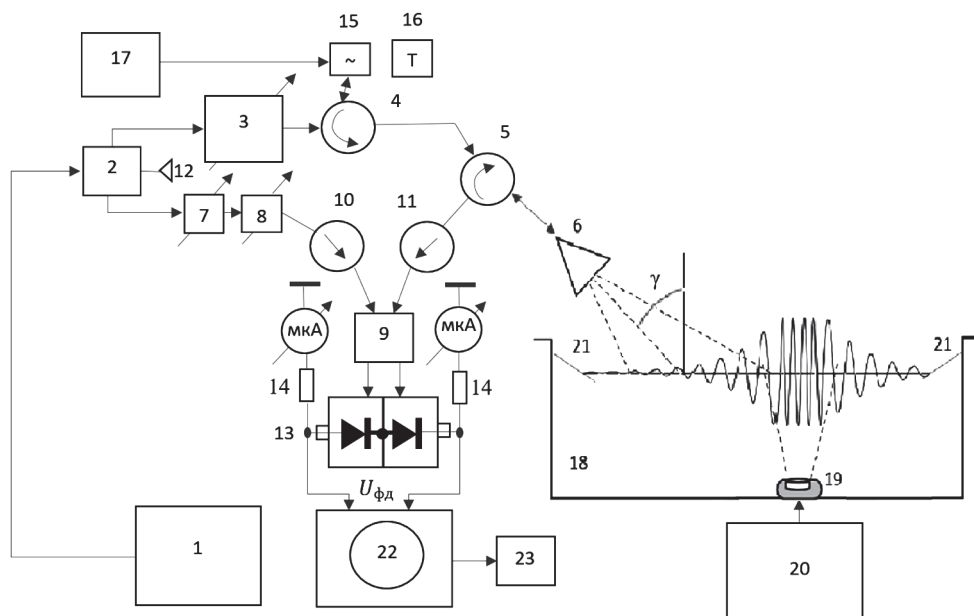


Рис. 2. Функциональная схема лабораторной установки.

Fig. 2. Laboratory plant functional diagram.

возбуждаемой вибратором. Эффект удалось наблюдать после отладки всей установки, включая подавление помех, возникающих из-за «паразитной» вибрации волноводного тракта и других причин. Резонансное (брэгговское) рассеяние имеет основной максимум на длине поверхностной волны $\Lambda = \lambda / 2 \sin \gamma \cos \varphi$, где γ — вертикальный угол визирования антенны, φ — горизонтальный угол перемещения плоской поверхностной волны относительно направления луча антенны. Учитывая это соотношение, при $\varphi = 0$ оказалось необходимым установить длину волны СВЧ-генератора $\lambda = 2.3$ см, что в данных условиях примерно соответствовало горизонтально-радиальной проекции длины радиоволны 2.7 см и резонансной длине поверхностной волны $\Lambda \sim 1.5$ см при её частоте $F \sim 17$ Гц.

На рис. 3 показан «теневого» фотоснимок возбуждаемой бегущей волны на частоте 17 Гц (длина волны измерялась визуально, под дном ванны помещена масштабная сетка). Проверка зависимости длины волны от частоты вибратора показала, что эта зависимость точно следует дисперсионному соотношению (5). На рис. 4 показаны осциллограмма и спектр сигнала на выходе фазового детектора радара, а на рис. 5, а — зависимость амплитуды сигнала на выходе фазового детектора от частоты вибрации. Видно, что кроме основного резонанса с шириной полосы от 12 до 18 Гц, имеется второй резонанс с полосой от 24 до 36 Гц, как и следует из теории — благодаря резонансному рассеянию на вдвое более короткой поверхностной волне.

Основная задача состояла в изучении параметрического возбуждения поверхностной волны подводным вибратором. Методика эксперимента такова. Пространственная картина «ряби Фарадея» (непосредственно над вибратором) и кольцевой бегущей волны (в прилежащей области) многократно фотографировалась, при последовательном возрастании частоты вибратора. Был установлен главный факт: вокруг «пятна засветки» образуется кольцевая бегущая волна, длина которой зависит от частоты вибратора и опять-таки точно следует дисперсионному соотношению (5) — если удвоить частоту вибратора.

Амплитуда возбуждаемой кольцевой волны существенно превосходит «начальную» амплитуду, определяемую диаграммой направленности донного вибратора. К сожалению, в данном эксперименте не удалось получить чёткую количественную связь амплитуды поверхностной кольцевой волны с амплитудой мембраны вибратора. Тем не менее, грубые измерения высоты бегущей поверхностной волны были проведены при помощи радиолокатора. На рис. 6 показан фотоснимок поверхности при частоте накачки 49 Гц, длина кольцевой бегущей волны составила 1.2 см.

На рис. 7 показаны полученные в эксперименте зависимости длин волн от частоты вибраторов. Показаны также дисперсионные соотношения: исходное (5) и его экстраполяция для донного вибратора при $n = 1$. По-видимому, конструкция используемого донного вибратора не позволяет ему эффективно работать на низких частотах (менее 20 Гц).

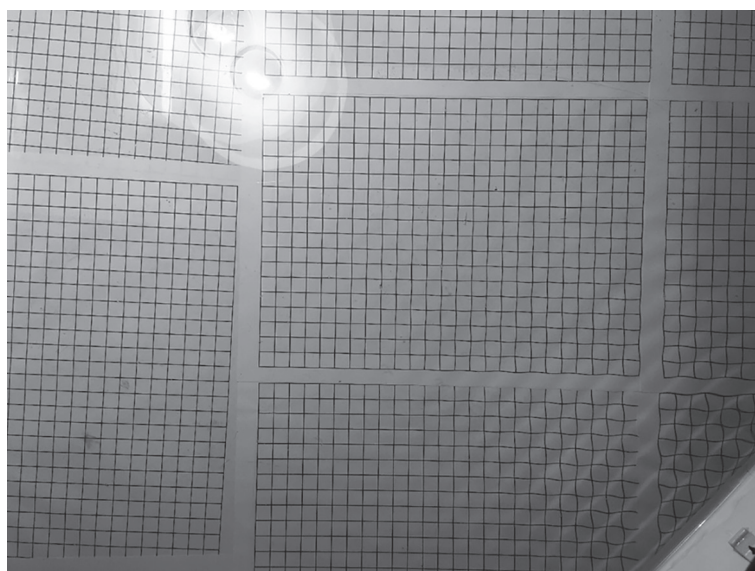


Рис. 3. Бегущая плоская волна длиной 1.5 см, возбуждаемая приповерхностным вибратором на частоте 17 Гц. Масштабная сетка с размером ячейки 1 см.

Fig. 3. A 1.5 cm running flat wave excited by a near-surface vibrator at a frequency of 17 Hz. A scale grid with a cell size of 1 cm.

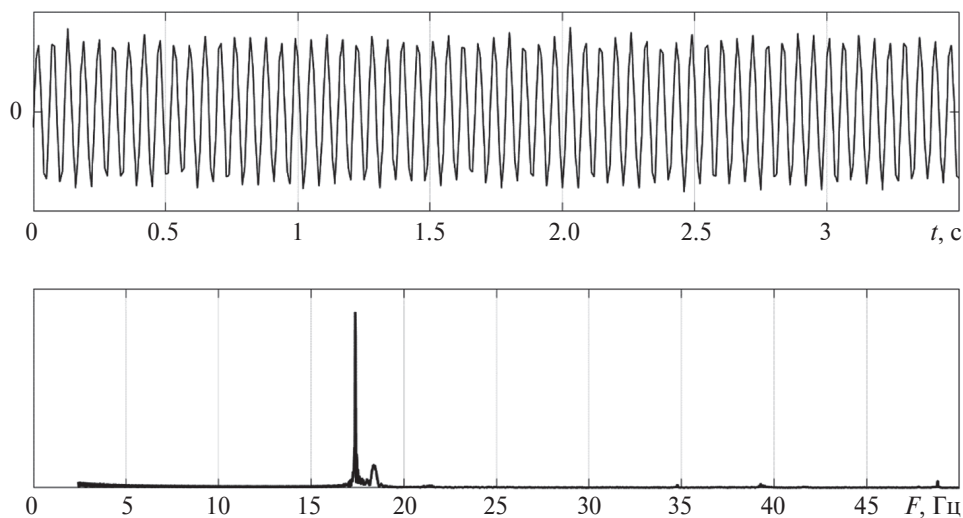


Рис. 4. Приповерхностный вибратор. Осциллограмма и спектр на выходе фазового детектора радара, частота вибратора 17 Гц, длина поверхностной волны ~ 1.5 см.

Fig. 4. Near-surface vibrator. Oscillogram and spectrum at the output of the phase detector of the radar, frequency of the vibrator 17 Hz, surface wave length ~ 1.5 cm.

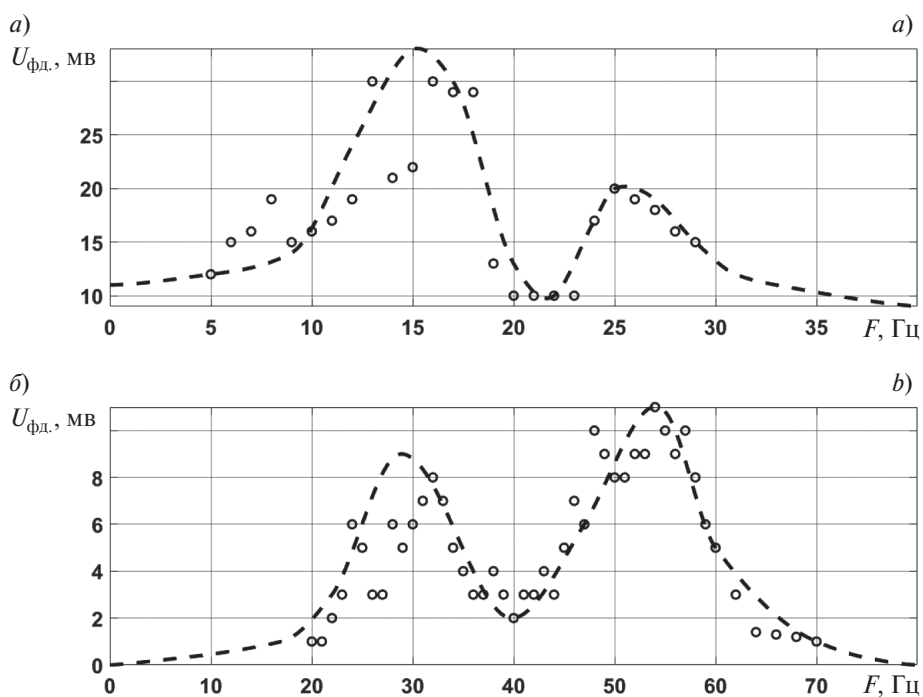


Рис. 5. Приповерхностный (а) и донный (б) вибраторы. Зависимость амплитуды сигнала на выходе фазового детектора радара от частоты вибрации. Максимумы соответствуют модам дифракционного (брэгговского) резонанса ($m = 1$ и $m = 2$). Кружки — экспериментальные значения; пунктирная линия — аппроксимация экспериментальных данных.

Fig. 5. Near-surface (a) and bottom (b) vibrators. The amplitude of the signal at the output of the phase detector of the radar depends on the frequency of vibration. Maxima correspond to diffraction (Bragg) resonance modes ($m = 1$ and $m = 2$). Circles — experimental values; Dashed line — approximation of experimental data.

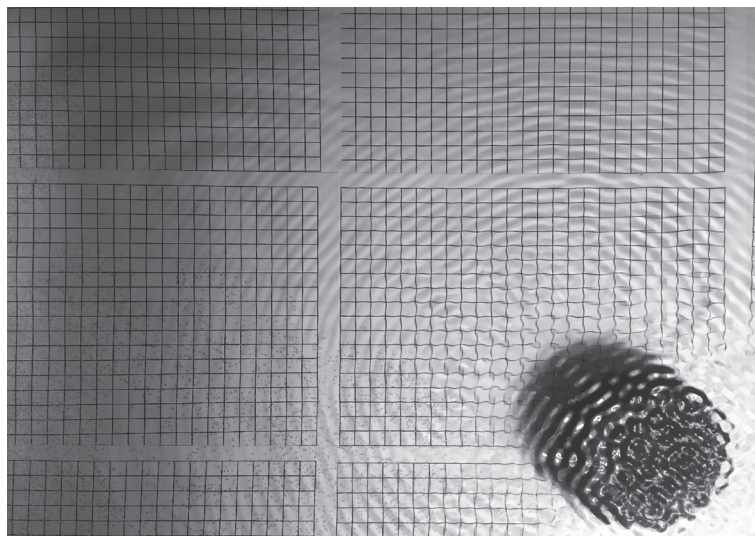


Рис. 6. «Рябь Фарадея» над донным вибратором и кольцевая бегущая волна длиной 1.2 см при частоте вибратора 49 Гц. Масштабная сетка с размером ячейки 1 см.

Fig. 6. “Faraday ripples” above the bottom vibrator and an annular running wave with a length of 1.2 cm at a vibrator frequency of 49 Hz. A scale grid with a cell size of 1 cm.

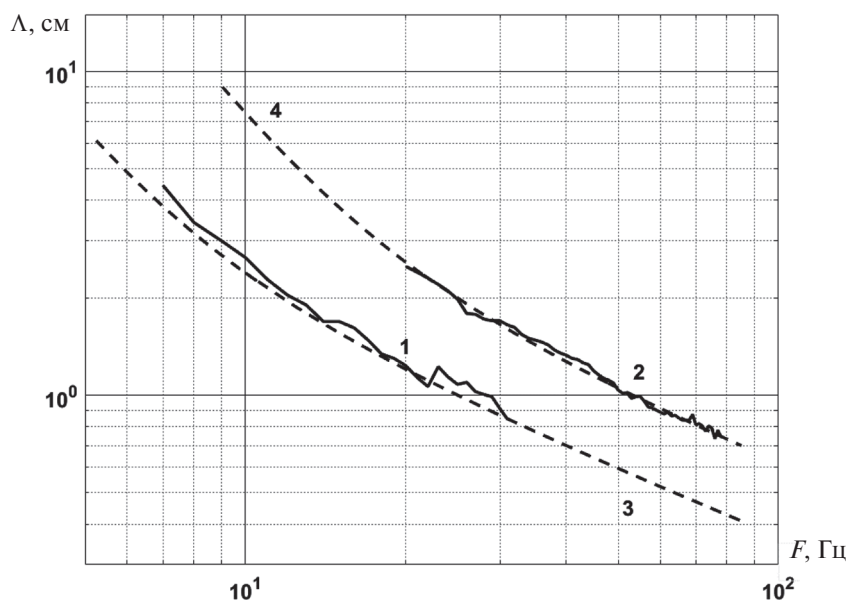


Рис. 7. Зависимости длины бегущей кольцевой волны от частоты вибратора: 1 — приповерхностный вибратор; 2 — донный вибратор; 3 — исходное дисперсионное соотношение; 4 — дисперсионное соотношение для донного вибратора при $n = 1$.

Fig. 7. Travelling ring wave length versus vibrator frequency: 1 — near-surface vibrator; 2 — bottom vibrator; 3 — the initial dispersion ratio; 4 — a dispersion ratio for the bottom vibrator at $n = 1$.

Затем был проведен завершающий эксперимент — уже с участием радиолокатора, луч которого освещает область кольцевой волны, недалёкую от «пятна засветки» поверхности донным вибратором. Представлялось, что форма вибрационной (бегущей) волны, наблюдаемой на выходе фазового детек-

тора, в этом случае не будет отличаться от формы волны, создаваемой приповерхностным вибратором. Однако оказалось, что для донного вибратора, кроме «быстрой» фазовой модуляции вибрационной волной, имеется ещё и «медленная» амплитудная модуляция сигнала — узкополосный шум, объясняемый, по-видимому, неустойчивостью равновесия между процессами параметрического возбуждения и затухания, что вызывает вариации усиления. На рис. 8, *a* и *b* показаны осциллограмма и спектр этого сигнала при частоте вибратора $F = 32$ Гц. Видно, что частота возбуждаемой волны осталась та же, $F_0 \sim 17$ Гц. Видно также, что гармонический сигнал флуктуирует по амплитуде с шириной спектра флуктуаций порядка 3 Гц.

На рис. 5, *b* представлена зависимость амплитуды сигнала на выходе фазового детектора радара от частоты донного вибратора. Амплитуда отсчитывалась по её максимальной величине за несколько периодов флуктуаций. Условия таковы: глубина ванны $H = 10$ см при диаметре мембраны $d = 2$ см; амплитуда вибрации мембраны $b_m \sim 0.1$ см; длина волны радара $\lambda = 2.3$ см; диапазон частот вибрации $f = (20-80)$ Гц.

При сравнении зависимостей $U_m(f)$, полученных от приповерхностного и донного вибраторов на выходе радара (рис. 5, *a* и рис. 5, *b*), мы прежде всего видим оба «брегговских» максимума. Затем мы видим, что второй максимум, будучи меньшим по сравнению с первым для приповерхностного вибратора, для донного вибратора, наоборот, — стал больше первого. Чем это объяснить? По-видимому, изменяющимися по диапазону частот условиями возбуждения поверхностной вибрационной волны: при частоте вибратора 57 Гц порог возбуждения уменьшается, и усиление возрастает. Далее, измеренные максимальные амплитуды U_m дают возможность (весьма грубо) определить амплитуду h_m поверхностной вибрационной ГК волны — см. соотношение (14): $U_m = \frac{2\pi}{\lambda} h_m \cos^2 \gamma \sqrt{P_2 \eta R^*}$. Из этого соотношения, при $\lambda = 2.3$ см, $\gamma = 60^\circ$, $P_2 = 10^{-6}$ Вт, $\eta = 0.1$, $R^* = 400$ Ом, в первом дифракционном резонансе ($m = 1$) получается $h_m = 0.15$ см — что вполне соответствует наблюдаемой амплитуде кольцевой вибрационной волны недалеке от «пятна засветки». Таким образом, мы видим, что в данных условиях амплитуда поверхностной вибрационной волны имеет тот же порядок величины, что и амплитуда самого вибратора. Это означает, что действительно имеет место значительное усиление, определяемое эффектом параметрического возбуждения: иными словами, потери при рассеянии сигнала от донного вибратора компенсируются эффектом усиления поверхностной вибрационной волны при её параметрическом возбуждении.

Общий вид лабораторной установки (ванна с поверхностным и донным вибраторами, элементы приёмо-передающего радарного устройства) приведен на рис. 9.

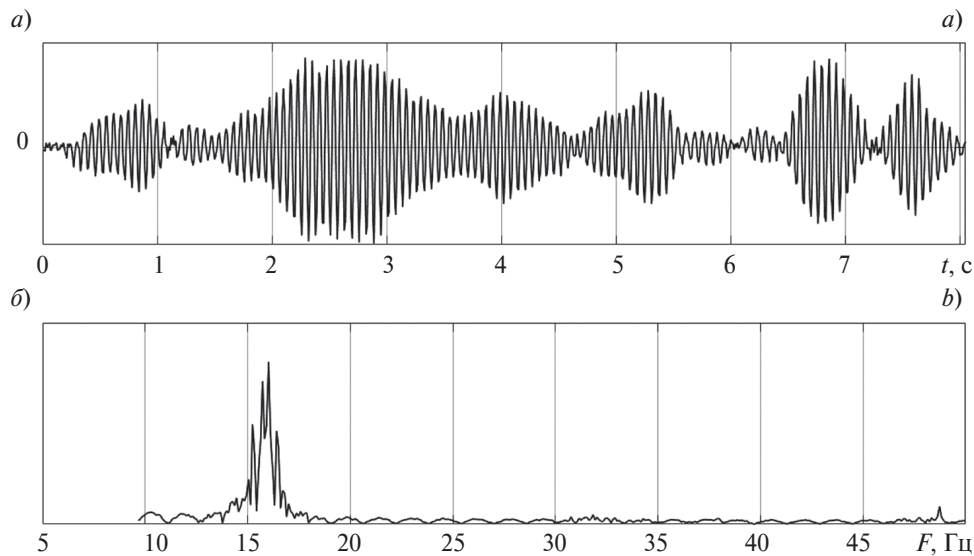


Рис. 8. Сигнал на выходе фазового детектора радара при частоте донного вибратора 32 Гц: *a* — осциллограмма сигнала; *b* — спектр сигнала.

Fig. 8. Signal at the output of the phase detector of the radar at the frequency of the bottom vibrator 32 Hz: *a* — signal oscillogram; *b* — signal spectrum.

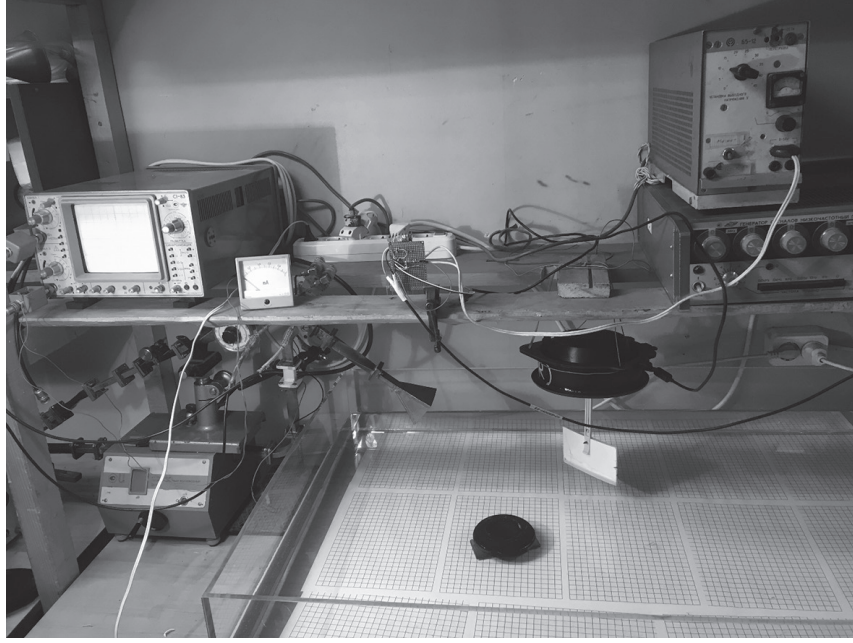


Рис. 9. Лабораторная установка. Видны ванна, рупорная антенна лоатора, лопатка приповерхностного вибратора и донный вибратор.

Fig. 9. Laboratory unit. The bath, horn antenna of the locator are visible, near-surface vibrator blade and bottom vibrator blade.

6. Ожидаемые результаты натурного эксперимента

Очевидно, что при радиолокационном наблюдении рассмотренных вибрационных волн в реальных морских условиях мы столкнёмся с помехами, определяемыми всем спектром ветровых волн. Рассмотрение этой проблемы требует, безусловно, самостоятельного исследования. В то же время, полученные выше данные позволяют, по крайней мере, сравнить УЭПР вибрационных и мелких ветровых волн, без учёта модулирующих факторов, обусловленных крупными волнами.

При радиолокационном зондировании реальной морской поверхности, УЭПР определяется спектральной плотностью ветровых волн $(S^0)_{wind} = \frac{\pi}{4} k_r^4 |q|^2 \text{ctg}^4 \gamma \Psi_h(K)$, где $\Psi_h(K) = \frac{a_0}{2\pi} K^{-4} \eta \left(\frac{K}{K^*} \right)$, $a_0 = 6.5 \times 10^{-3}$, и $\eta \left(\frac{K}{K^*} \right) \approx 2.3$ в выбранном диапазоне «резонансных» ГК волн, для которых $K = \frac{4\pi}{\lambda} \sin \gamma$. Имеем

тогда (без учёта эффекта модуляции мелких волн крупными): $(S^0)_{wind} = \frac{a_0 |q|^2 \eta}{64} \cos^4 \gamma$. УЭПР вибрационной волны имела вид $(S^0)_{vibr} = \frac{\pi}{2} k_r^2 h_m^2 |q|^2 \cos^2 \gamma \cdot \text{ctg}^2 \gamma$ (14).

Без учёта дополнительного усиления вибрационной волны, соотношение УЭПР оказывается следующим:

$$\frac{(S^0)_{vibr}}{(S^0)_{wind}} \approx 10^4 k_r^2 h_m^2. \quad (17)$$

Из (17) получается, что при $\lambda = 2.5$ см, $k_r = 2.7$ см⁻¹, $h_m = 10^{-2}$ см — **УЭПР вибрационных волн оказывается на порядок выше УЭПР мелких ветровых волн** даже без учёта усиления, несмотря на столь малую амплитуду вибрационной волны.

Далее, необходимо учитывать возможность частотной селекции вибрационной волны, что соответствует устройству радиолокаторов с селекцией движущихся целей (СДЦ), формирующих разностно-фазовые изображения. Представляется, что наилучшим вариантом является радар с синтезированной апертурой, использующий продольную антенную базу [17, 18].

7. Краткие выводы

Полученные результаты позволяют заключить, что:

1. Ожидаемый эффект резонансного радиолокационного рассеяния воспроизведён в лабораторных условиях. При помещении вибратора, установленного у поверхности, наблюдаются два дифракционных максимума ($m = 1$ и $m = 2$), а зависимость длины возбуждаемой ГК волны от частоты вибратора точно следует известному дисперсионному соотношению.

2. Основной эксперимент (без участия радара) выявил главные особенности параметрического возбуждения ГК волн: при помещении вибратора на дно водоёма, длина возбуждаемой (кольцевой) бегущей волны следует дисперсионному соотношению — но при вдвое большей частоте вибратора. Возникающая непосредственно над вибратором «рябь Фарадея» представляет собой структуру стоячих волн, переходящую на периферии в кольцевую бегущую волну. Сравнительно медленная амплитудная модуляция, по-видимому, здесь происходит вследствие неустойчивого равновесия между параметрическим возбуждением и затуханием (в данных условиях ширина спектра модуляции составляла (1–3) Гц).

3. Когерентный радиолокатор, используя режим резонансного (брэгговского) рассеяния, способен выделить участок кольцевой бегущей волны, возбуждаемой подводным источником вибрации. При этом, как следует из эксперимента, в имеющихся условиях возможна индикация вибрационной ГК волны в диапазонах частот вибратора (25–35) Гц и (45–60) Гц.

4. Полученные данные позволяют грубо оценить амплитуду «начальной» поверхностной волны, определяемой донным вибратором и её величину при ожидаемом параметрическом усилении. В условиях данного эксперимента, при глубине ванны 10 см, диаметре мембраны 2 см и амплитуде её вибрации ~0.1 см при частоте ~35 Гц — амплитуда вибрационной поверхностной кольцевой волны составляла также ~0.1 см при её частоте ~17 Гц, что говорит о наличии значительного усиления.

5. Имеющийся (приведенный выше) математический аппарат недостаточен для выяснения всех параметров возникающей на поверхности бегущей кольцевой ГК волны при её параметрическом возбуждении.

6. Дальнейшие исследования должны включать, прежде всего, определение природы амплитудных флуктуаций, возникающих в наблюдаемой вокруг донного вибратора кольцевой поверхностной волне. Разумеется, в дальнейшем необходимо переходить от лабораторного эксперимента к натурному, где первая задача — это радиолокационный мониторинг поля вибрационной поверхностной ГК волны, создаваемой искусственным низкочастотным (донным) источником. Этот метод, по-видимому, позволит получить новую информацию о состоянии водной среды, особенно в прибрежных акваториях. Вторая задача — это радиолокационный мониторинг сейсмо-обстановки из космоса, включая очаги землетрясений. Для определения возможности её решения необходимо иметь данные о частотных спектрах давления у поверхности моря, непосредственно над очагом землетрясения.

8. Благодарности

Авторы выражают благодарность С.И. Бадулину и К.К. Ляпину, замечания которых (письменные и устные) помогли многое прояснить и значительно улучшить текст статьи.

9. Финансирование

Работа выполнена в ИО РАН в рамках государственного задания по теме № 128-2021-0003.

Литература

1. Дьяков Ю.П., Есипов И.Б., Ляпин К.К., Наугольных К.А., Поздняков Н.И., Соколов В.И. Когерентное комбинационное отражение электромагнитных волн от взволнованной границы раздела двух сред при воздействии на неё акустического излучения // Акустический журнал. 1986. Т. XXXII, вып. 3. С. 334–339.
2. Ушаков И.Е., Шишкин И.Ф. Радиолокационное зондирование морской поверхности. М.: Татьяна день, 1997. 263 с.
3. Чернсайд Дж.Х., Браво Х.Е., Наугольных К.А., Фукс И.М. Воздействие подводного звука и поверхностного волнения на рассеяние лазерного излучения // Акустический журнал. 2008. Т. 54, № 2. С. 244–250.
4. Soloviev A., Gilman M., Young K., Brusch S., Lehner S. Sonar measurements in ship wakes simultaneous with TerraSAR-X overpasses // IEEE Trans. on GRS. 2010. V. 48, № 2. P. 841–851. doi: 10.1109/TGRS.2009.2032053
5. Басс Ф.Г., Фукс И.М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М.: Наука, 1972. 424 с.

6. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Часть II. Многократное рассеяние, турбулентность, шероховатые поверхности и дистанционное зондирование. М.: Мир, 1981. 317 с.
7. Китайгородский С.А. Физика взаимодействия атмосферы и океана. Л.: ГМИ, 1970. 284 с.
8. Переслегин С.В. Связь СВЧ рассеяния от морской поверхности с пространственно-временными характеристиками развитого волнения // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1975. Т. 11, № 5. С. 481–490.
9. Ричардсон Э. Динамика реальных жидкостей. М.: МИР, 1965. 328 с.
10. Исакович М.А. Общая акустика. М.: Наука, 1973. 495 с.
11. Пелиновский Е.Н. Гидродинамика волн цунами. Н-Новгород: ИПФ РАН, 1996. 276 с.
12. Рабинович М.И., Трубецков Д.И. Введение в теорию колебаний и волн. М.: Наука, 1984. 560 с.
13. Левин Б.В., Носов М.А. Физика цунами и родственных явлений в океане. М.: Янус-К, 2005. 360 с.
14. Калиниченко В.А., Нестеров С.В., Секерж-Зенькович С.Я., Чайковский А.А. Экспериментальное исследование поверхностных волн при резонансе Фарадея // Изв. РАН, Механика жидкости и газа. 1995. № 1. С. 122–129.
15. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. Москва: Радио и связь, 1977, 512 с.
16. Халиков З.А., Переслегин С.В., Куликов Е.А. Модель космического панорамного радиовысотомера: отображение поля развивающейся волны цунами в двухпозиционном квазизеркальном радаре // XXX Симпозиум по радиолокационному зондированию природных сред. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2017. 9 с.
17. Переслегин С.В., Карпов И.О., Халиков З.А., Ермаков Р.В., Мусиняц 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. doi: 10.7868/S2073667319010039
18. Переслегин С.В., Халиков З.А., Карпов И.О. Модель формирования полей ветровых и внутренних волн в ИРСА с продольной антенной базой // XXXI Симпозиум по РЛ зондированию природных сред. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2019. 10 с.
19. Shi-Jian Zhu, Xue Weng, Hong-Liang Dai, Vi-Ming Fu, Yi-Qi Mao. Acoustic and Vibration Control for an Underwater Structure under Mechanical Excitation // Shock and Vibration. 2014. V. 2014. Article ID385264. 17 p. doi: 10.1155/2014/385264
20. Merz S., Kinns R., Kessissoglou N. Structural and Acoustic Responses of a Submarine Hull due to Propeller Forces // Journal of Sound and Vibration. 2009. V. 325, N1–2. P. 266–286. doi: 10.1016/j.jsv.2009.03.011
21. Caresta M., Kessissoglou N.J. Acoustic signature of a submarine hull under harmonic excitation // Applied Acoustics. 2010. V. 71, N1. P. 17–31. doi: 10.1016/j.apacoust.2009.07.008
22. Matsumoto H., Kimura T., Nishida S., Machida Y., Araki E. Experimental evidence characterizing pressure fluctuations at the seafloor-water interface induced by an earthquake // Sci Rep. 2018. Nov 6;8(1):16406. doi: 10.1038/s41598-018-34578-2.

References

1. Dyakov Yu.P., Esipov I.B., Lyapin K.K., Naugolny K.A., Pozdnyakov N.I., Sokolov V.I. Coherent Raman reflection of electromagnetic waves from the excited interface of two environment when exposed to acoustic radiation. *Soviet Physics, Acoustics*. 1986, 3, 334–339.
2. Ushakov I.E., Shishkin I.F. Radar sensing of the sea surface *M., Tatyana Day*, 1997. 263 p. (in Russian).
3. Chuenside J.H., Bravo H.E., Naugolnykh K.A., Fuks I.M. Effects of Underwater Sound and Surface Ripples on Scattered Laser Light. *Acoustical Physics*. 2008, 54, 2, 204–209.
4. Soloviev A., Gilman M., Young K., Brush S., Lehner S. Sonar Measures in Ship Wakes Simultaneous with TerraSAR-X Overpasses. *IEEE Trans. OH GRS*. b.48, No. 2, Febr. 2010.
5. Bass F.G., Fuchs I.M. Scattered wave on statistical soil/Ed. *M., Nauka*, 1972. 424 p. (in Russian).
6. Ishimar A. Distribution and scattering of wave in slutain-non-daily environments. Part II. Multiple viewing, turbulence, roughness and remote sensing/Ed. *M., Mir*, 1981. 317 p. (in Russian)
7. Kitaigorodsky S.A. Physical ocean-atmosphere interaction. *L., GMI*, 1970. 284 p. (in Russian).
8. Pereslegin S.V. The microwave connection is scattered from the sea surface with the common-time characteristics of the branched wave. *Izvestia Academy of Sciences of the USSR, Atmospheric and Oceanic Physics*. 1975, 11(5), 481–490.
9. Richardson E. Dynamics of real fluids. *M., MIR*, 1965. 328 p. (in Russian).
10. Isakovich M.A. General Acoustics. *M., Nauka*, 1973. 495 p. (in Russian).
11. Pelinovsky E.N. Tsunami waves hydrodynamics. *Nizhniy Novgorod, IPF RAN*, 1996. 276 p. (in Russian).
12. Rabinovich M.I., Trubetskov D.I. Introduction to the theory of oscillation and waves. *M., Nauka*, 1984. 560 p. (in Russian).
13. Levin B.V., Nosov M.A. Physical tsunami and related phenomena in the ocean. *M., Yanus-K*, 2005. 360 p. (in Russian).
14. Kalinichenko V.A., Nesterov S.V., Sekerz-Zen'kovich S.Y. et al. Experimental study of surface waves with Faraday resonance excitation. *Fluid Dyn*. 1995, 30, 101–106. doi: 10.1007/BF02029933

15. *Gonorovsky I.S.* Radio engineering circuits and signals. Moscow, *Radio and Svyaz*, 1977. 512 p. (in Russian).
16. *Khalikov Z.A., Pereslegin S.V., Kulikov E.A.* Model of a space panoramic radio camera: an armored field developing tsunami waves in a bivalve quasi-mirror radar. *XXX Symposium on radar sensing of prerogative means*. SPb., A.F. Mozhaysky, 2017.
17. *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
18. *Pereslegin S.V., Khalikov Z.A., Karpov I.O.* Model for the formation of wind and internal wave fields in IRSA with a longitudinal antenna base. *XXXI Symposium on Radar Sensing of Natural Media*. 2019, St. Petersburg, AAGB named after A.F. Mozhaisky, p. 10.
19. *Shi-Jian Zhu, Xue Weng, Hong-Liang Dai, Vi-Ming Fu, Yi-Qi Mao.* Acoustic and Vibration Control for an Underwater Structure under Mechanical Excitation. *Shock and Vibration*. 2014, Article ID385264, 17 p. doi: 10.1155/2014/385264
20. *Merz S., Kinns R., Kessissoglou N.* Structural and acoustic responses of a submarine hull due to propeller forces. *Journal of Sound and Vibration*. 2009, 325, 1–2, 266–286. doi: 10.1016/j.jsv.2009.03.011
21. *Caresta M., Kessissoglou N.J.* Acoustic signature of a submarine hull under harmonic excitation. *Applied Acoustics*. 2010, 71, 1, 17–31. doi: 10.1016/j.apacoust.2009.07.008
22. *Matsumoto H., Kimura T., Nishida S., Machida Y., Araki E.* Experimental evidence characterizing pressure fluctuations at the seafloor-water interface induced by an earthquake. *Sci Rep*. 2018, Nov 6; 8(1):16406. doi: 10.1038/s41598-018-34578-2