

08:09

## Радиолокационное зондирование гидроакустических возмущений морской поверхности

© И.Е. Ушаков, И.Ф. Шишкин

Северо-западный заочный политехнический институт, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 12 мая 1999 г.

Приведены результаты экспериментального исследования взаимодействия гидроакустического и электромагнитного полей на границе раздела "вода-воздух" в лабораторных условиях. Показана возможность использования этого явления в природных условиях для передачи информации с погруженного источника на приемный пункт, расположенный в воздушном пространстве.

Для контроля состояния Мирового океана одной из актуальных задач является передача информации от подводных источников на приемные пункты, расположенные в воздушном пространстве. Оптимальным носителем информации в плотных проводящих средах, к которым относится морская вода, является акустическая волна. Однако акустическое поле плохо проникает в воздушную среду и сравнительно быстро затухает там, поэтому непосредственная регистрация акустических сигналов на больших расстояниях от поверхности раздела невозможна. Дистанционное считывание акустического сигнала можно производить с помощью электромагнитного излучения СВЧ диапазона, используя резонансное объемное рассеяние на акустической волне в воздухе вблизи границы раздела сред либо фазовую модуляцию отражений от границы раздела, совершающей колебания при воздействии на нее гидроакустических сигналов. Особенности первого метода считывания исследованы в [1-3], принципиальная возможность реализации второго метода показана в [4-6]. С целью оценки возможности практического использования второго метода в природных условиях было проведено экспериментальное исследование, результаты которого приведены в данной работе.

Экспериментальное исследование метода дистанционной регистрации гидроакустического сигнала по фазовой модуляции СВЧ отражений от границы раздела "вода-воздух" было проведено в бассейне НПО

”ВНИИМ им. Д.И. Менделеева”. Условия проведения эксперимента и схема установки соответствовали приведенным в [3].

Частота гидроакустических колебаний составляла 3.3 кГц. Приемно-передающая аппаратура СВЧ (длина волны 3.2 см) размещалась в кабине, перемещаемой с помощью кран-балки в пространстве над бассейном. После фазового детектора сигнал подавался на селективный усилитель, настроенный на частоту звуковых колебаний. Сигнал с выхода селективного усилителя регистрировался самописцем уровня.

Амплитуда вибрации водной поверхности связана с плотностью  $P_S$  потока акустической мощности у границы раздела соотношением

$$A = (2P_S/\rho\nu)^{1/2}/(2\pi f), \quad (1)$$

где  $f$  — частота колебаний,  $\rho$  — плотность жидкости,  $\nu$  — скорость звука в воде.

Значение  $P_S$  связано с мощностью  $P_a$  гидроакустического источника и глубиной  $H$  его погружения формулой

$$P_S = GP_a/(4\pi H^2), \quad (2)$$

где  $G$  — коэффициент направленного действия (КНД) излучателя.

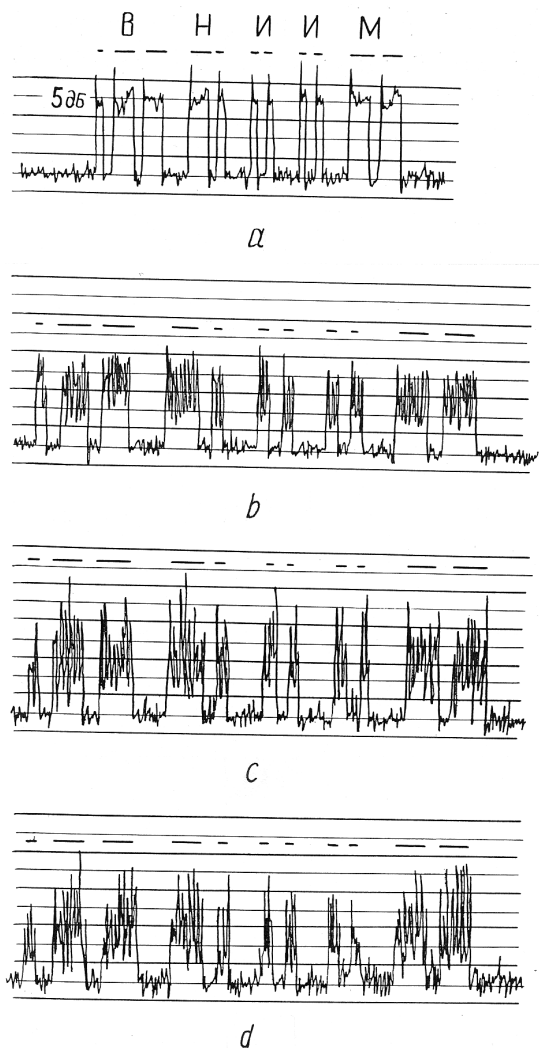
Из соотношения (1) с учетом (2), подставляя значения для воды  $\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3$  и  $\nu = 1.5 \cdot 10^3 \text{ m/s}$ , получаем

$$A = 0.5 \cdot 10^{-11} (GP_a)^{1/2}/(fH). \quad (3)$$

Напряжение на выходе селективного усилителя пропорционально амплитуде вибрации [4], следовательно, можно записать

$$u \sim (GP_a)^{1/2}/(fH). \quad (4)$$

На рис. 1 показаны примеры записей на ленте самописца при передаче кодом Морзе аббревиатуры ”ВНИИМ”. Гидроакустический излучатель находился на глубине 0.9 м, а кабина с приемно-передающей системой считывания информации с водной поверхности располагалась на высоте 4.0 м от поверхности воды. Анализ приведенных записей показывает, что во всех случаях передача информации осуществляется без искажения.



**Рис. 1.** Примеры записей на самописце ( $H = 0.9$  м,  $h = 4.0$  м): *a* — при спокойной воде и неподвижной кабине, *b* — при спокойной воде и качании кабины, *c* — при волнении и неподвижной кабине, *d* — при волнении и качании кабины.

Для получения экспериментальных зависимостей для каждой реализации продолжительностью 45–60 с определялись значения контраста  $K = \bar{u}_c / \bar{u}_{ш}$ , где  $\bar{u}_c$ ,  $\bar{u}_{ш}$  — средние значения напряжения на выходе селективного усилителя соответственно при включенном и выключенном источнике звука. Зависимости контраста от различных условий измерений приведены на рис. 2.

На рис. 2, а показаны значения контраста (вертикальная линия характеризует диапазон результатов отдельных реализаций) при высоте расположения РЛС над штилевым уровнем воды — 3.0 м и различной глубине погружения гидроакустического источника. Тут же показана теоретическая зависимость согласно [4]. Отличие экспериментальных и теоретических значений при  $H = 0.5$  м объясняется следующим. Если вибрирует только часть  $S_2$  облучаемой антенной РЛС поверхности  $S_1$ , то контраст

$$K = K_{\max}(S_2/S_1)^{1/2}, \quad (5)$$

где  $K_{\max}$  — контраст, который получился бы при вибрации всей поверхности  $S_1$ . Вследствие сферичности гидроакустического поля на водной поверхности образуются зоны Френеля, на границах которых звуковые колебания происходят в противофазе. Радиус участка, в пределах которого фаза колебаний отличается не более чем на  $\pi/2$  (область квазисинфазных вибраций):

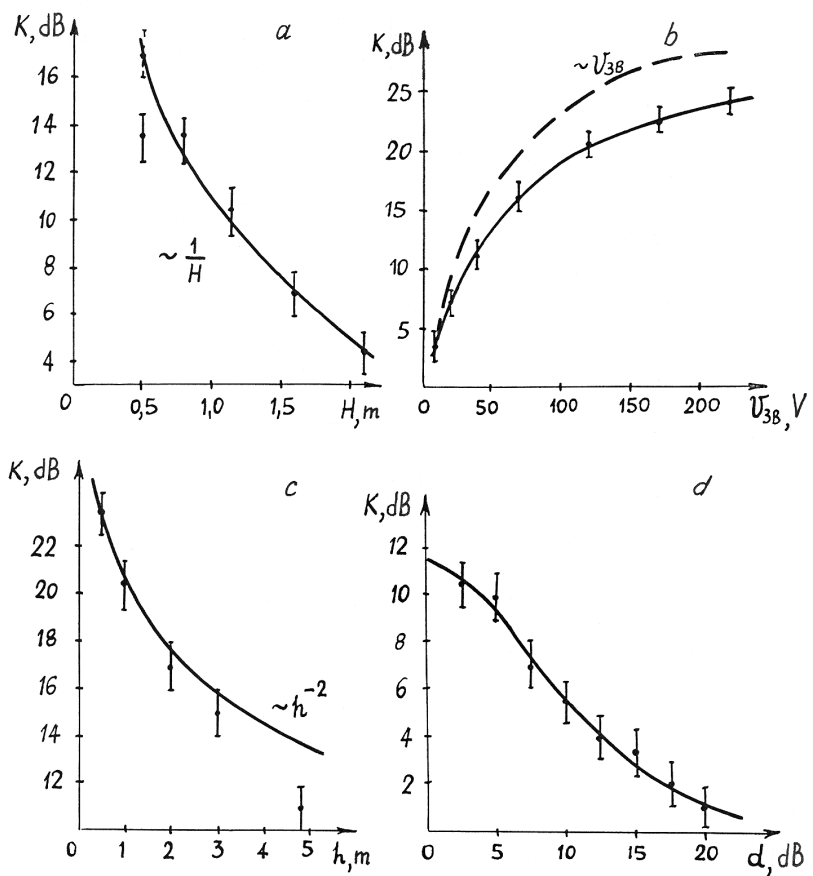
$$r = [\lambda_a(H - \lambda_a/8)/2]^{1/2}, \quad (6)$$

где  $\lambda_a$  — длина акустической волны в воде. Откорректированные с учетом этого экспериментальные результаты, показанные на рис. 3, а пунктиром, хорошо согласуются с теоретическими значениями.

Следует отметить, что при выборе рабочей частоты гидроакустического излучателя необходимо учитывать влияние несинфазности вибраций на различных участках поверхностных волн. Для того чтобы отличия в фазе вибраций на вершине и во впадине морских волн не превышали  $\pi/2$ , необходимо выполнить условие

$$\lambda_a \geq 4h_{\max}, \quad (7)$$

где  $h_{\max}$  — максимальная высота морских волн. Таким образом, при усилении волнения необходимо работать на более низких звуковых частотах. Однако эти частоты должны лежать выше спектра доплеровских частот отраженного сигнала, обусловленных волнением морской



**Рис. 2.** Зависимости значений контраста: *a* — от глубины погружения источника звука ( $h = 3.0$  m); *b* — от напряжения звуковой частоты ( $H = 0.5$  m,  $h = 1.0$  m); *c* — от высоты расположения РЛС ( $H = 0.65$  m); *d* — от ослабления принятого сигнала ( $H = 2.2$  m,  $h = 3.0$  m).

поверхности. Следовательно, частоту РЛС в этом случае необходимо уменьшать. С другой стороны, уменьшение частоты РЛС приводит к уменьшению чувствительности системы, поскольку уменьшается глубина фазовой модуляции. Приведенные соображения показывают возможность применения адаптивного выбора частоты гидроакустических и электромагнитных колебаний.

Зависимость контраста от напряжения  $U_{зв}$ , подаваемого на электроакустический преобразователь (рис. 2, *b*), близка к линейной  $K \sim U_{зв}$ . Увеличение разности значений контрастов при возрастании  $U_{зв}$  обусловлено нелинейной зависимостью акустической мощности от подаваемого на преобразователь напряжения.

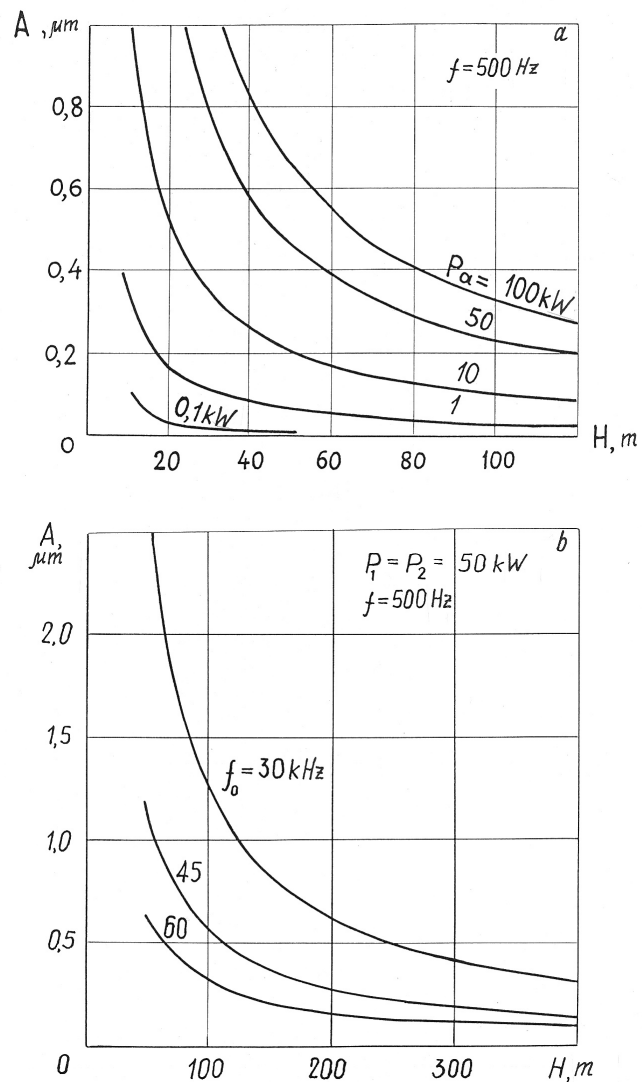
Зависимость контраста от высоты РЛС над поверхностью воды приведена на рис. 2, *c*. Отличие экспериментальных результатов от теоретической зависимости  $K \sim h^{-2}$  при увеличении высоты обусловлено тем, что облучаемая РЛС площадка становится больше области квазисинфазных вибраций.

Зависимость контраста от ослабления отраженного сигнала (рис. 2, *d*) позволяет сделать вывод, что используемая РЛС может обеспечить регистрацию возмущений водной поверхности, вызываемых применявшимся источником звука с высоты 30 м, обеспечивая при этом контраст не менее 1 дВ. На расстоянии 1 м от излучателя давление составляло 6300 Па, что при оценке амплитуды вибрации водной поверхности дает  $A = 0.13 \mu\text{m}$ .

На основании полученных экспериментальных результатов оценим предельные значения глубины погружения гидроакустического источника и высоты подъема РЛС.

На рис. 3, *a* приведена рассчитанная по формуле (3) зависимость амплитуды вибрации от глубины погружения ненаправленного ( $G = 1$ ) источника звука. Из рисунка видно, что даже при большой мощности гидроакустического излучения амплитуда вибрации водной поверхности уменьшается до  $0.2 \mu\text{m}$  при глубине погружения источника порядка 120 м.

Одним из перспективных направлений формирования узкой диаграммы направленности излучателей на низких частотах является использование параметрических акустических антенн [7,8].



**Рис. 3.** Зависимость амплитуды вибрации от глубины погружения ненаправленного (а) и параметрического (б) излучателя.

В этом случае мощность, излучаемая на рабочей частоте  $f = f_1 - f_2$ , определяется выражением [7]

$$P_a = 3.4 \cdot 10^{-15} P_0^2 f^2 / (2\Theta)_0^2, \quad (8)$$

где  $P_0 = P_1 + P_2$  — сумма мощностей излучаемых сигналов, W;  $f_1, f_2$  — частоты исходных колебаний, Hz;  $(2\Theta)_0$  — выраженная в градусах ширина диаграммы направленности параметрического излучателя на уровне 3 дВ, определяемая формулой

$$2\Theta = 4 [(\alpha_1 + \alpha_2 - \alpha) / (k_1 - k_2)]^{1/2}, \quad (9)$$

в которой  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha$  — значения коэффициента поглощения акустических колебаний морской водой на первичных частотах и на разностной частоте соответственно;  $k_1, k_2$  — волновые числа исходных колебаний. Поскольку рабочая частота гораздо меньше исходных, а последние близки друг к другу, можно записать

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 \approx \alpha_2 \approx \alpha_0, \\ \alpha_1 + \alpha_2 \gg \alpha, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где  $\alpha_0$  — коэффициент поглощения на частоте  $f_0 = (f_1 + f_2)/2$ . Из выражения (9) с учетом (10) и равенства  $k_1 - k_2 = 2\pi f/\nu$  получаем

$$2\Theta \approx 4 \cdot [\alpha_0 \nu / (2\pi f)]^{1/2}. \quad (11)$$

Площадь возбуждаемого гидроакустической энергией участка морской поверхности

$$S = \pi H^2 \operatorname{tg}^2 \Theta \approx \pi H^2 \Theta^2. \quad (12)$$

С учетом соотношений (8), (11) и (12) плотность потока акустической мощности у границы раздела "вода-воздух" выражается формулой

$$P_S = P_a / S \approx 2.62 \cdot 10^{-20} \left[ \pi^{3/2} P_0 f^2 / (\alpha_0 \nu H) \right]^2. \quad (13)$$

В соответствии с выражением (1) для амплитуды вибрации, используя соотношения (13), получаем

$$A \approx 1.14 \cdot 10^{-10} \pi^{1/2} P_0 f / (\alpha_0 \nu^{3/2} \rho^{1/2} H). \quad (14)$$



Коэффициент поглощения можно определить по формуле [7]

$$\alpha_0 = 16 \cdot 10^3 \pi^2 \mu_s (1 + 0.75 \mu_v / \mu_s) f_0^2 / (3 \rho v^3), \quad (15)$$

где  $\mu_s$ ,  $\mu_v$  — соответственно коэффициенты сдвиговой и объемной вязкости жидкости.

Исходя из выражения (14), с учетом соотношения (15), подставляя значения для воды  $\mu_s = 0.001 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ,  $\mu_v / \mu_s = 2.81$ ,  $v = 1500 \text{ m/s}$ ,  $\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3$ , получаем

$$A \approx 2.24 \cdot 10^{-3} P_0 f / (f_0^2 H). \quad (16)$$

Рассчитанная по формуле (16) зависимость  $A(H)$  приведена на рис. 3, *b*, из которого видно, что при использовании параметрического излучателя можно возбудить вибрации границы раздела "вода-воздух" с амплитудой более  $0.2 \mu\text{m}$  при глубине погружения акустического источника более 400 м.

С учетом характеристик использованных при проведении эксперимента средств предельная высота подъема РЛС для обнаружения вибрации водной поверхности с амплитудой порядка  $0.13 \mu\text{m}$  при условии, что контраст должен быть не менее 1 dB, может быть оценена из соотношения

$$h_{\text{пр}} \approx 1.7 \cdot (G_1 G_2 P), \quad (17)$$

где  $G_1$ ,  $G_2$  — КНД соответственно для передающей и приемной антенн системы считывания информации,  $P$  — излучаемая мощность СВЧ сигнала. Расчет по формуле (17) показывает, что высота подъема РЛС может составлять несколько километров при сравнительно небольших значениях излучаемой мощности (десятки ватт) и КНД антенн (порядка 1000). Предельная высота может быть увеличена при использовании специальных методов выделения сигнала из шумов (корреляционная обработка, накопление и т.д.).

Таким образом, результаты экспериментального исследования показали возможность использования в натуральных условиях метода дистанционной регистрации гидроакустического сигнала по фазовой модуляции СВЧ отражений 3-сантиметрового диапазона от границы раздела "вода-воздух" для передачи информации от погруженного источника на приемный пункт, расположенный в воздушном пространстве.

## Список литературы

- [1] *Ассман В.А., Бункин Ф.В., Виноградов Е.А., Голованов В.И., Ляхов Г.А., Суязов Н.В., Шипилов К.Ф.* // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. В. 5. С. 72–76.
- [2] *Ассман В.А., Бункин Ф.В., Виноградов Е.А., Голованов В.И., Ляхов Г.А., Суязов Н.В., Шипилов К.Ф.* Резонансное отражение электромагнитного излучения от бегущей решетки в двухслойной среде. Препринт ИОФ АН СССР № 113. М., 1990. 29 с.
- [3] *Ляхов Г.А., Суязов Н.В., Ушаков И.Е., Шишкин И.Ф.* // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. В. 16. С. 44–48.
- [4] *Сырвачев В.А., Шишкин И.Ф., Ушаков И.Е.* // Метрология. 1979. № 2. С. 38–42.
- [5] *Ушаков И.Е., Шишкин И.Ф.* // Вопросы формирования и обработки сигналов в радиотехнических системах. Таганрог: Таганрогский радиотехнический институт, 1980. В. 4. С. 55–62.
- [6] *Ушаков И.Е., Шишкин И.Ф.* Радиолокационное зондирование морской поверхности. М.: РИЦ "Гатянин день", 1997. 264 с.
- [7] *Подводная акустика* / Пер. с англ. М.: Мир, 1970. С. 325–346.
- [8] *Урик Р.Д.* Основы гидроакустики / Пер. с англ. Л.: Судостроение, 1978. 445 с.