

ПИСЬМО В РЕДАКЦИЮ

УДК 534.231.1

ДОПЛЕРОВСКАЯ ТОМОГРАФИЯ В АКУСТИКЕ ОКЕАНА

Бурлакова И. Б., Голубев В. П., Жаров А. И.,
Нечаев А. Г., Петухов Ю. В., Славинский М. М.

К отличающемуся от [1] типу томографических систем, основанных во многом на работах автора [2], принадлежит система, сочетающая принципы реконструктивной томографии с доплеровскими эффектами [3]. Разработанный в [3] метод доплеровской томографии, известный в настоящее время как метод синтезируемой радиолокационной апертуры, впервые был применен для получения карт отражательной способности Луны (см. [3]), а затем в ультразвуковой технике [4].

В данном же сообщении экспериментально показана возможность использования метода доплеровской томографии в акустических исследованиях океанических волноводов.

С целью иллюстрации основных положений этого метода в океане рассмотрим простейший глубоководный волновод, представляющий собой однородный слой жидкости глубины H со скоростью звука в ней c_0 . Тогда при движении на глубине z_s со скоростью v точечного тонального источника с частотой излучения f_0 в точку приема на глубине z_r и расстоянии $r=v \cdot t$ ($t \geq 0$) будет приходить пара «чисто» вод-

ных сигналов с доплеровскими смещениями частоты $\Delta f_{0i} = -f_0 \frac{v}{c_0} \frac{r}{R_{0i}}$ ($i=1, 2$),

и четверки сигналов донных отражений различной кратности $m=1, 2, \dots$ с соответствующими доплеровскими смещениями частоты $\Delta f_j = -f_0 \frac{v}{c_0} \frac{r}{R_j}$ ($j=[1, 4]$),

отвечающими различным углам выхода лучей из источника; здесь $R_{0i} = \sqrt{r^2 + z_i^2}$, $R_j = \sqrt{r^2 + z_j^2}$,

$$z_j = 2mH + z_j, \quad z_1 = z_s - z_r,$$

$$z_2 = z_s + z_r, \quad z_3 = -z_1, \quad z_4 = -z_2.$$

Простые выводы о возможных эффектах нетрудно сделать уже из наглядных приближенных зависимостей:

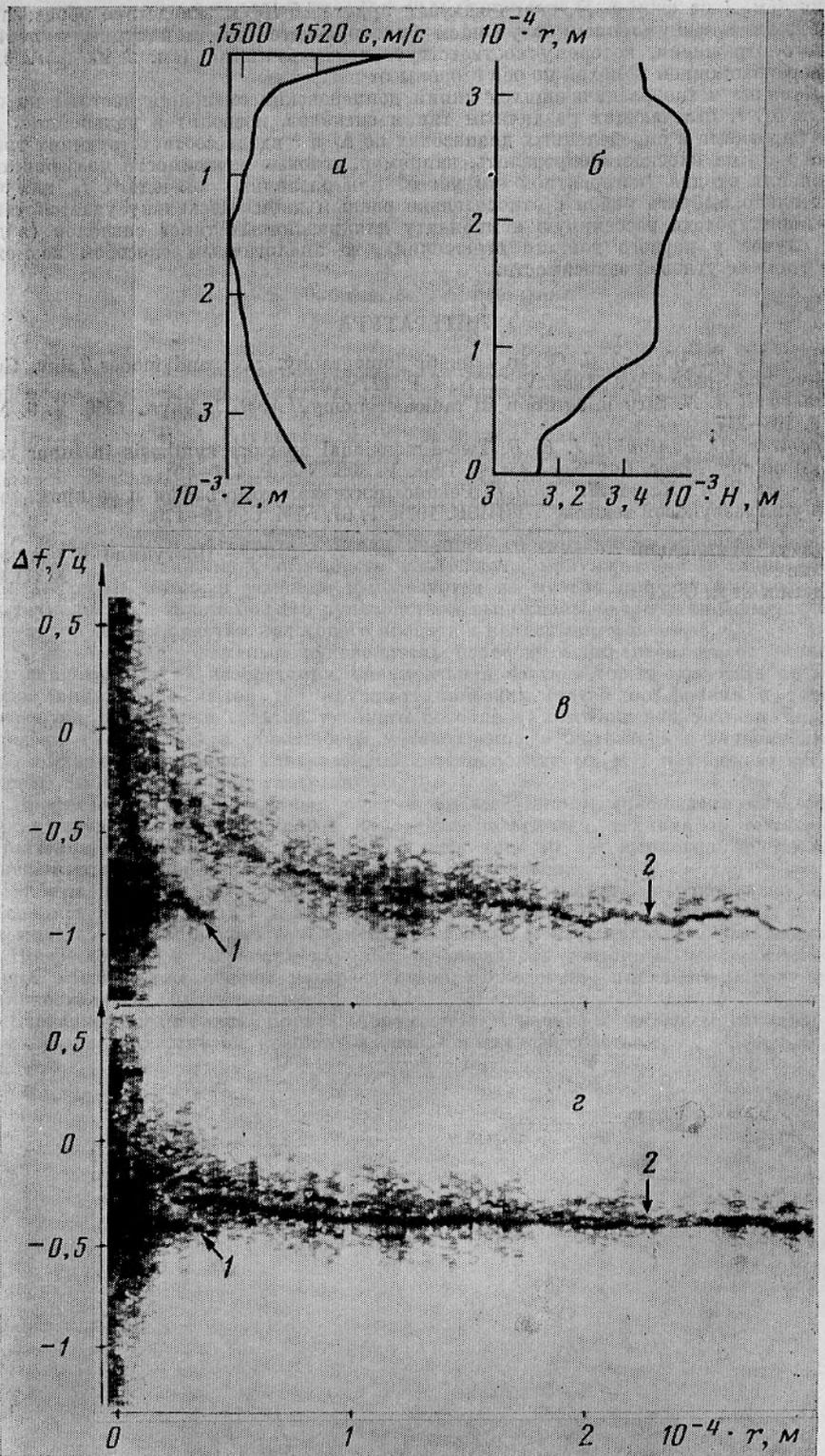
$$\Delta f_{0i} \approx -f_0 \frac{v}{c_0} \begin{cases} \frac{r}{|z_i|}, & \left(\frac{z_i}{r}\right)^2 \gg 1 \\ 1 - \frac{1}{2} \frac{z_i^2}{r^2}, & \left(\frac{z_i}{r}\right)^2 \ll 1 \end{cases} \quad \Delta f_j \approx -f_0 \frac{v}{c_0} \begin{cases} \frac{r}{x_j}, & \left(\frac{x_j}{r}\right)^2 \gg 1 \\ 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{x_j}{r}\right)^2, & \left(\frac{x_j}{r}\right)^2 \ll 1 \end{cases}$$

из которых следует, что, во-первых, с увеличением расстояния величина $\frac{d}{dr}(\Delta f)$

изменяется быстрее при малых r ; во-вторых, отличия в доплеровских смещениях частоты в водных и донных сигналах различной кратности должны быть заметнее при излучении и приеме вблизи свободной поверхности или дна; в-третьих, изменения Δf_j с ростом m заметнее выражены при $r/x_j \approx 1$, аналогично как между водными и донными сигналами.

Следовательно, при спектральном анализе зависимости возмущения давления от времени t (или r) при определенных условиях возможно разделение на плоскости $\Delta f, r$ линий максимальных значений спектра мощности, отвечающих различным типам сигналов.

Результаты экспериментальных исследований, выполненных в глубоководной акватории океана с характерной зависимостью скорости звука $c(z)$ от глубины z (см. фиг. а) и неровным рельефом дна (см. фиг. б) при $v \approx 3,5 + 4$ м/с, $z_s \approx 75 + 80$ м и $z_r \approx 10^2$ м, в основном подтверждают сказанное выше, как это следует из приведенных на фиг. в, г зависимостей $\Delta f(r)$ для $f_0 \approx 4 \cdot 10^2$ Гц и $f_0 \approx 1,5 \cdot 10^2$ Гц соответственно. При получении экспериментальных зависимостей принимаемый сигнал, за-



писанный параллельно с опорным, гетеродинировался на промежуточную частоту $f_n=1$ Гц и фильтровался в полосе $\Delta f_\phi=2$ Гц. Частота дискретизации при вводе в ЭВМ составляла $f_s=5$ Гц; спектральный анализ проводился без весовой обработки при длительности каждой реализации $T=10^2$ с с шагом по времени $\Delta T=25$ с. И даже несмотря на значительные флуктуации скорости судна по величине и направлению, а также существенно неровный рельеф дна (см. фиг. б) (эксперимент ставился не специально для проверки данного метода), на плоскости $\Delta f, \tau$ заметно разделены доплеровские смещения частоты водного сигнала, которому соответствует нижняя

линия (см. 1 на фиг. в, г), оканчивающая при $r \approx 4,5 \cdot 10^3$ м вследствие образования зоны тени и зашумленная излучением буксирующего источника судна, и первого донного отражения, которому соответствует верхняя линия (см. 2 на фиг. в, г) с реверберационной помехой по обе стороны от нее.

Наличие четко различающихся линий доплеровских смещений частоты на плоскости Δf , r , отвечающих различным типам сигналов, позволит в дальнейшем при интегрировании в определенных диапазонах по Δf и r вдоль соответствующих траекторий на этой плоскости определить, например, угловые зависимости коэффициента отражения от дна (когерентной его части) при различных значениях f_0 , для чего желательно выбрать район с относительно ровным дном. Поскольку удастся также идентифицировать рассеянную компоненту для различных типов сигналов (в данном случае у первого донного отражения), то аналогичным способом возможно получение ее угловой зависимости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Munk W. H., Wunsch C. Ocean acoustic tomography: rays and modes // Rev. Geophys. and Space Phys., 1983. V. 21. N. 4. P. 777-793.
2. Bracewell R. N. Strip integration in radioastronomy // Aust. J. Phys., 1956. V. 9. N. 1. P. 198-217.
3. Thomson H., Ponsonby J. E. B. Two-dimensional aperture synthesis in lunar radar astronomy // Proc. Roy. Soc., ser. A, 1968. V. 303. N 3. P. 477-491.
4. Мюллер Р. К., Кавец М., Уэйд Г. Реконструктивная томография и ее применение в ультразвуковой технике // ТИИЭР. 1979. Т. 67. № 4. С. 146-170.

Институт прикладной
физики
Академии наук СССР

Поступило в редакцию
22.III.1988