АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXIX 1983 Вып. 2

УДК 534.222

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ СЕЛЕКЦИЯ ЗВУКОВЫХ ЛУЧЕЙ В НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ

Донской Д. М., Зверев В. А., Калачев А. И.

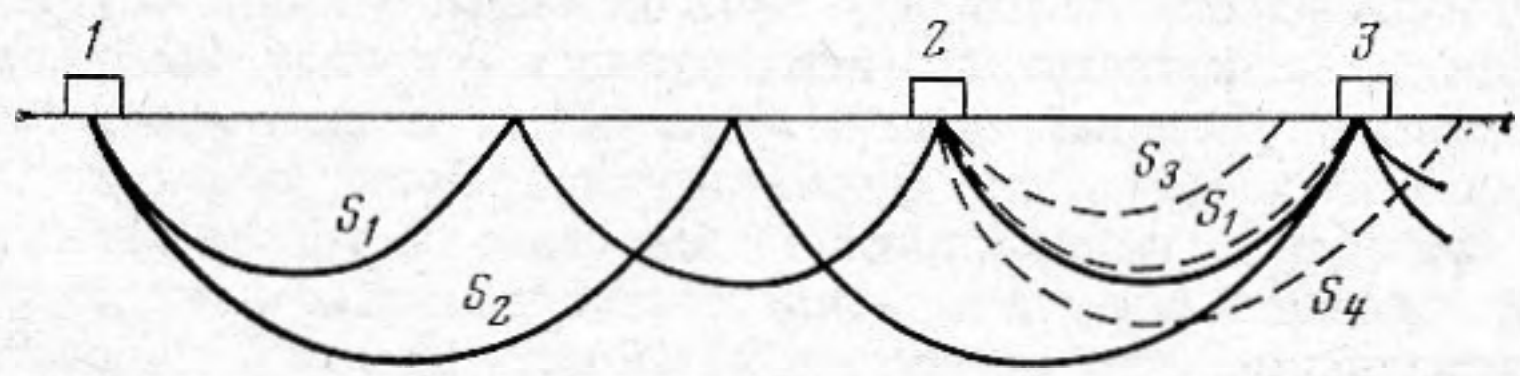
Рассмотрен способ селекции звуковых лучей в океане, основанный на нелинейном взаимодействии НЧ-сигнала и ВЧ-накачки вдоль выделенного луча накачки. Описаны результаты экспериментальной реализации способа в лабораторных условиях.

Известные методы выделения звуковых лучей основаны на временной селекции принятых сигналов и отличается лишь способами возбуждения звука [1—3]. Так, в работе [1] используется короткий звуковой импульс, а в работе [2] — сложный звуковой сигнал с широким спектром, который становится достаточно коротким после обработки. По времени прихода сигнала селектируется звуковой луч.

Однако эти методы имеют ряд недостатков. Самые существенные из них — невозможность селекции лучей с одинаковой длиной акустического пути, для которых время прихода одинаково, и сложность устойчивой идентификации лучей, имеющих разную длину акустического пути. Последнее связано с тем, что флуктуации времени прихода сигналов, вызванные мезомасштабными возмущениями океана (синоптические вихри, внутренние волны и т. п.), сравнимы и больше разности во временах прихода сигналов, распространяющихся вдоль разных лучей.

Рассматриваемый способ выделения лучей в стратифицированном океане свободен от указанных недостатков временной селекции. Способ основан на нелинейном взаимодействии зондирующего океан низкочастотного звукового сигнала с отдельно возбуждаемой мощной волной накачки более высокой частоты, т. е. используется принцип параметрического приема, впервые предложенного авторами работы [4].

В работе [5] рассматривалось взаимодействие НЧ- и ВЧ-волн в неоднородных средах и было показано, что взаимодействие имеет место в случае совпадения лучей высокочастотного и низкочастотного звука и практически отсутствует для звуковых колебаний, распространяющихся вдоль



Фиг. 1. Схема селекции звукового луча. *1* — излучатель низкочастотного сигнала, *2* — излучатель высокочастотного сигнала, *3* — селективный приемник

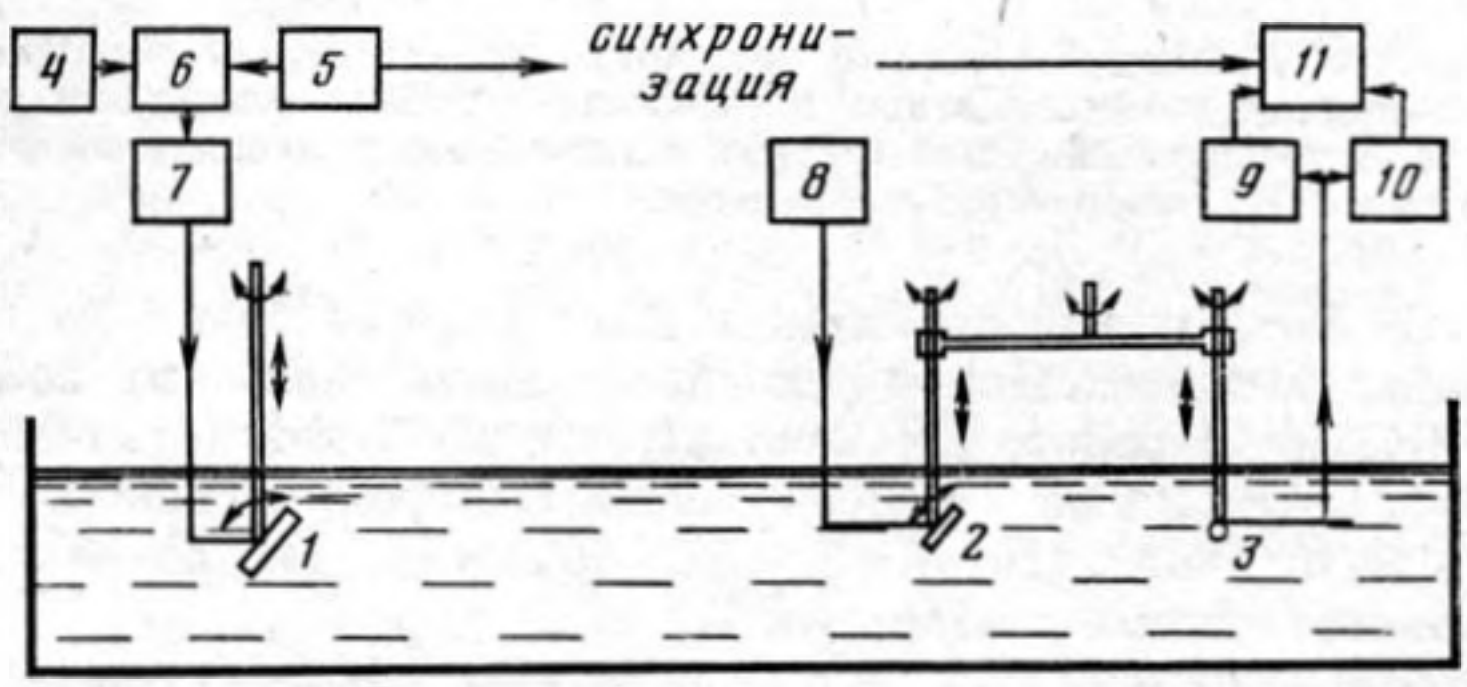
других лучей и приходящих в точку приема под углом к лучу накачки, большим, чем $\theta_s \simeq (\Lambda/L)^{1/2}$, где Λ — длина низкочастотной волны, L — длина пути взаимодействия вдоль луча накачки.

На фиг. 1 изображена схема реализации способа. Сплошными линиями изображены лучи S_1 и S_2, вдоль которых распространяется низкочастотный звук с частотой колебаний Ω от излучателя *1*, пунктирными — звуковые лучи S_1, S_3 и S_4, вдоль которых распространяется волна накачки с частотой колебаний $\omega \gg \Omega$ от излучателя *2* к приемнику *3*. С выхода приемника *3* сигнал поступает на селективный усилитель, который настраивается на

частоту $\omega+\Omega$ или $\omega-\Omega$. Излучатель *2* расположен на расстоянии одной зоны конвергенции от приемника. Взаимодействие имеет место вдоль луча S_1. В этом случае амплитуда давления P_s сигнала на комбинационной частоте $\omega\pm\Omega$ определяется формулой [5]

$$P_s=jGL^{-1}\int_0^1 P_2(l)\exp\{jk[\psi(L)-\psi(l)]\}dl, \qquad (1)$$

где $G=\varepsilon(\omega\pm\Omega)P_1(L)L/2\rho_0c_0^3$ — коэффициент параметрического преобразования; $\varepsilon=(\gamma+1)/2$ — параметр нелинейности среды; P_1 P_2 — амплитуды давления соответственно волн накачки и низкочастотного сигнала; ρ_0, c_0 —



Фиг. 2. Блок-схема лабораторной установки. *1* – излучатель низкочастотного сигнала, *2* – излучатель высокочастотного сигнала, *3* – приемный гидрофон, *4–8* – генераторы синусоидальных колебаний, *5* – генератор видеоимпульсов, *6* – ключ, *7* – усилитель, *9*, *10* – селективные усилители, *11* – осциллограф

равновесная плотность среды и скорость звука; $k=\Omega/c_0$; l — лучевая координата; ψ — эйконал. Отношение сигнал/шум на входе приемника *3* в случае изотропного шума моря определяется соотношением [6].

$$E=S_s[(N_1/B_1)+(G^2N_2/B_2)]^{-1}, \qquad (2)$$

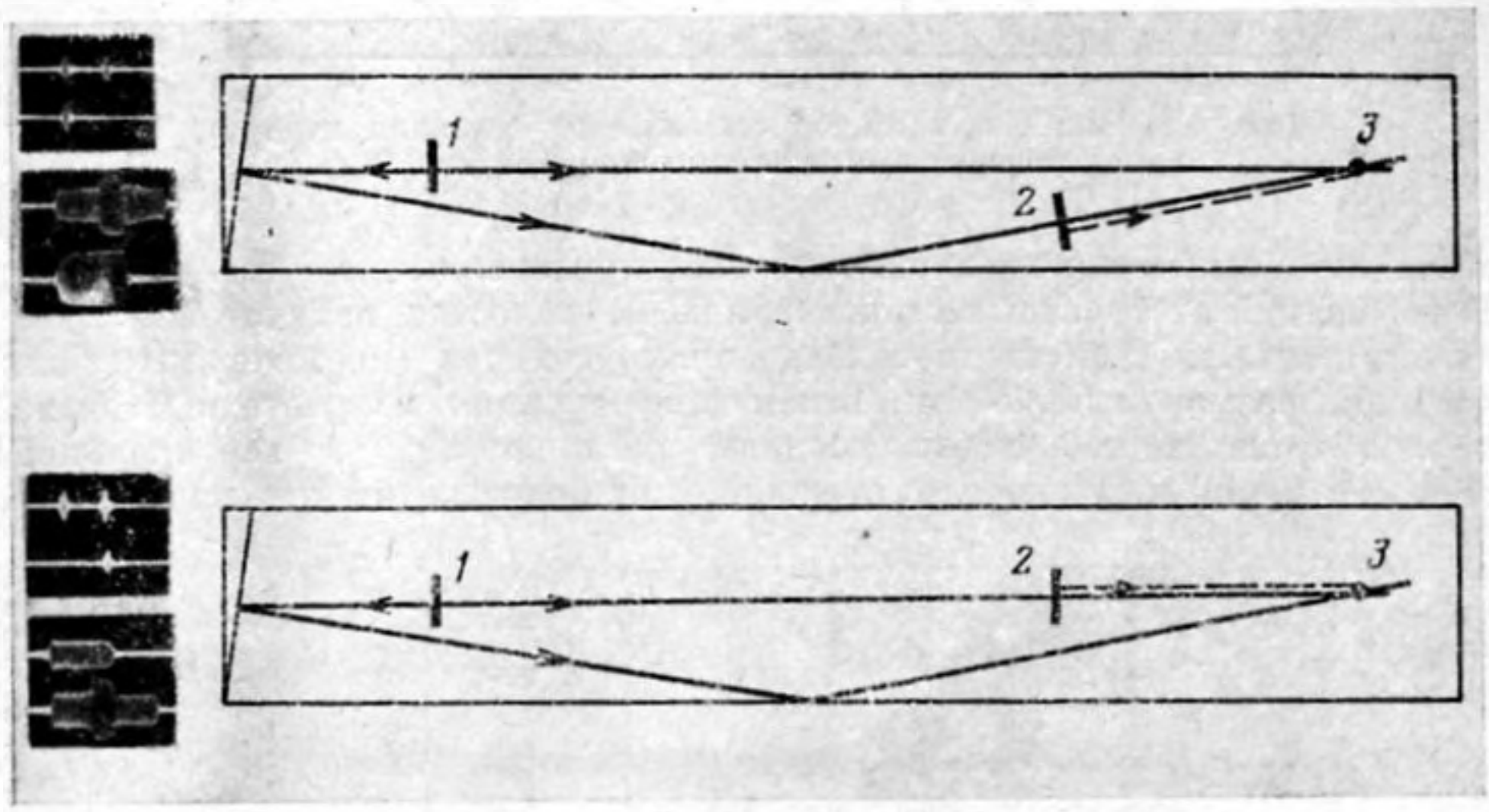
где S_s — мощность сигнала на комбинационной частоте; N_1, N_2 — мощности шума моря в полосе 1 Гц с центральными частотами соответственно $\omega\pm\Omega$ и Ω; B_1 — коэффициент концентрации приемного гидрофона *3*; $B_2\simeq 2L/\Lambda$ — коэффициент концентрации параметрического приемника.

Регистрируя сигнал на комбинационной частоте, выделяем конкретный звуковой луч (луч S_1), так как при направленном излучении высокочастотной волны накачки излучатель *2* и приемник *3* связывает лишь один звуковой луч (при расстоянии между ними не более одной зоны конвергенции). Если в низкочастотном зондирующем сигнале была временная метка (например, фазовый сдвиг), то эта метка появится и в сигнале на комбинационной частоте и по флуктуациям времени ее прихода можно судить о «погодных» циркуляциях водных масс на трассе селектируемого луча. Причем селекция луча и определение временных флуктуаций производятся независимо, что позволяет устойчиво идентифицировать звуковой луч.

Используя выражения (1), (2) и данные поглощения и шумов моря, оценим эффективность нелинейного взаимодействия при селекции звуковых лучей для $\omega/2\pi=10$ кГц, $\Omega/2\pi=50$ кГц, $L\sim 50$ км — характерная длина зоны конвергенции. Поскольку L много меньше длины всей трассы распространения низкочастотного сигнала, для оценок можно считать, что $P_2(l)$ постоянно на длине L. Положим значение P_2, равное 85 дБ относительно 1 мкПа (максимальное значение шумового поля в море на частоте 50 Гц). Для давления в волне накачки можно положить значение P_1 равное 240 дБ относительно 1 мкПа, приведенное к 1 м [7]. Тогда давление $P_1(L)$ в этой волне в точке приема с учетом поглощения 1 дБ/км и сферического расхождения будет равно 96 дБ относительно 1 мкПа. Спектральный уровень шума моря с центральной частотой 10 кГц при

слабом волнении имеет значение ~30 дБ по отношению к 1 мкПа. Учитывая, что для воды $\varepsilon \simeq 3{,}5$, получим значение $G \sim 10^{-4}$. Для направленной приемной антенны с показателем направленности 30 дБ на частоте накачки отношение сигнал/шум составит 5 дБ. При этом $\theta_s \simeq 1{,}4°$.

На фиг. 2 приведена блок-схема лабораторной установки, с помощью которой были выполнены опыты по экспериментальной проверке рассматриваемого способа селекции лучей. В установке использовалась заполненная водой ванна длиной 3, шириной 0,2 и глубиной 0,24 м, в которой располагались: *1* — излучатель низкочастотного сигнала, *2* — излучатель высокочастотного сигнала и приемный гидрофон *3*. Излучатели *1* и *2* — круглые пьезокерамические пластины диаметром 50 и 20 мм соответственно.



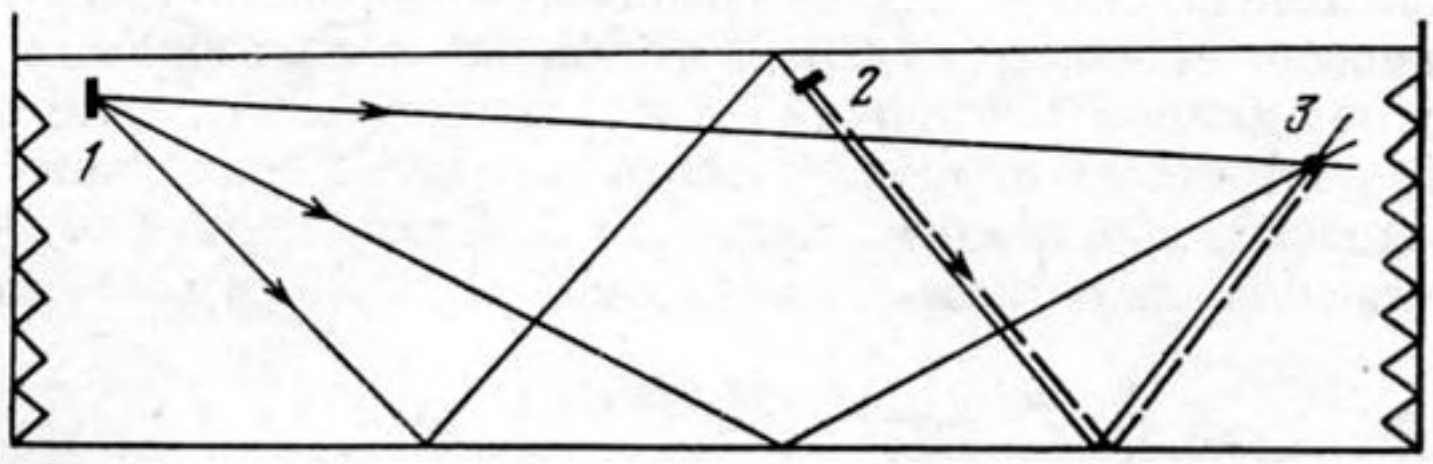
Фиг. 3. Схема опыта по сравнению временной и параметрической селекции и осциллограммы принятых сигналов

Гидрофон представлял собой пьезокерамическую сферу диаметром 4 мм. С усилителя *7* на излучатель *1* подавался радиоимпульс с частотой заполнения 750 кГц, излучатель *2* возбуждался от генератора *8* непрерывным гармоническим сигналом с частотой колебаний 6,3 МГц. Направленность излучателей обеспечила отсутствие отражений от боковых стенок ванны. Прием акустических колебаний осуществлялся ненаправленным гидрофоном *3*, сигналы с которого одновременно поступали на вход двух селективных усилителей, один из которых был настроен на частоту Ω, второй — на комбинационную частоту $\omega - \Omega$. С выхода селективных усилителей сигналы поступали на верхнюю и нижнюю развертки двухлучевого осциллографа. Ниже приводятся результаты экспериментов.

Вначале был проведен эксперимент по сравнению временной и параметрической селекции двух лучей. Для создания необходимой для временного разделения импульсов разницы в длинах соответствующих лучей была реализована следующая схема эксперимента (фиг. 3, вид на ванну сверху). Зондирующий акустический импульс низкой частоты излучался в обе стороны от излучателя *1*. Один из импульсов отражался от задней стенки ванны и так же, как и прямой импульс, принимался гидрофоном *3*. На фиг. 3 изображены лучи, соответствующие направленным пучкам, генерируемым излучателем *1*. Разница в их длине позволяла осуществлять временное разделение импульсов (верхняя развертка на первой и третьей сверху осциллограммах на фиг. 3). С увеличением длительности излучения оба импульса сливались и их временная селекция становилась невозможной (верхние развертки на второй и четвертой сверху осциллограммах фиг. 3). Одновременно осуществлялся узконаправленный параметрический прием (с шириной диаграммы направленности $\theta_s \simeq 6°$) излученных импульсов, позволяющий селектировать их (нижняя развертка на осцил-

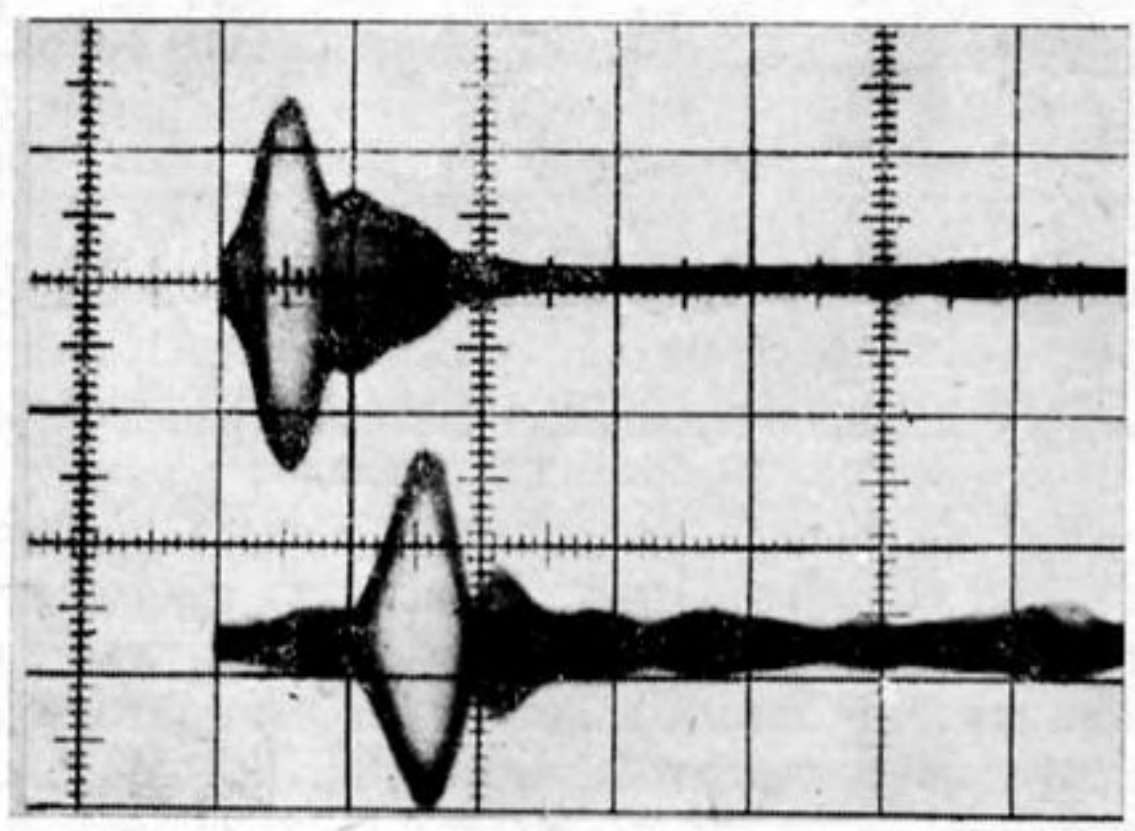
лограммах фиг. 3), а по ним и лучи независимо от длительности импульсов. При этом упрощается и идентификация селектируемого луча.

В другом опыте осуществлялась селекция лучей при волноводном распространении звука. Звукопоглощающее покрытие на торцевых стенках ванны и большое затухание взаимодействующих волн на длине ванны



Фиг. 4. Схема опыта по параметрической селекции луча при волноводном распространении звука

позволили обеспечить в эксперименте многолучевое распространение звука без отражений от торцевых стенок ванны. В качестве излучателя звука низкой частоты Ω использовалась прямоугольная пьезокерамическая пластинка размером 50×5 мм². Такая конфигурация излучателя *1* была выбрана для того, чтобы создать расходящийся в вертикальной плоскости пучок и исключить отражения от боковых стенок ванны. На



Фиг. 5. Осциллограммы сигналов низкой частоты Ω (верхняя развертка) и комбинационной частоты $\omega-\Omega$ (нижняя развертка) при селекции по схеме фиг. 4

фиг. 4 сплошными линиями изображены лучи, соединяющие такой излучатель с приемным гидрофоном *3* (вид на ванну сбоку). Пунктирной линией обозначен луч, соответствующий пучку накачки. На фиг. 5 приведены осциллограммы принятых в этом случае сигналов на частотах Ω и $\omega-\Omega$ (соответственно верхняя и нижняя развертки). Как видно из осциллограмм, в этом опыте нельзя осуществить временную селекцию лучей (длительность импульса здесь была выбрана минимально возможной и определялась полосой приема 10 кГц), в то же время параметрическая селекция позволяет легко выделять и идентифицировать луч.

Таким образом, оценки и проведенный лабораторный эксперимент подтверждают возможность параметрической селекции лучей и демонстрируют указанные выше преимущества этого способа.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Jobst W., Dominijanni L.* Measurements of the temporal, spatial and frequence stability of an underwater acoustic channel.— J. Acoust. Soc. Amer., 1979, v. 65, N 1, p. 62–69.

2. *Clark J. G., Kronegold M.* Long-period fluctuations of SW signals in deep and shallow water.– J. Acoust. Soc. Amer., 1974, v. 56, N 4, p. 1071–1083.
3. *Munk W., Wunsch C.* Ocean acoustic tomography: a scheme for large scale monitoring.– Deep Sea Res., 1979, v. 26, N 2A, p. 123–161.
4. *Зверев В. А., Калачев А. И.* Устройство для приема инфразвуковых колебаний. Авт. свид. № 422197.– Бюлл. изобр., 1982, № 8, с. 271.
5. *Донской Д. М., Сутин А. М.* Параметрический прием акустических сигналов в неоднородных средах.– Акуст. ж., 1981, т. 27, № 6, с. 876–881.
6. *McDonough R. N.* Long-saperture parametric receiving arrays.– J. Acoust. Soc. Amer., 1975, v. 57, N 5, p. 1150–1155.
7. *Урик Р. Дж.* Основы гидроакустики. Л.: Судостроение, 1978.

Институт прикладной физики
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
16.VIII.1982