

Заметим, что эффекты синхронизации, аналогичные описанному, возможны в пьезополупроводниковых волноводах и других конфигураций, например в пластинах.

В заключение авторы благодарят А. А. Чабана за полезные советы и обсуждения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. White D. L. Amplification of ultrasonic waves in piezoelectric semiconductors. J. Appl. Phys., 1962, 33, 8, 2547—2554.
2. Kroger H. Electron-stimulated piezoelectric nonlinear acoustic effect in CdS. Appl. Phys. Lett., 1964, 4, 11, 190—192.
3. Tell B. Piezoelectric ultrasonics harmonic generation in cadmium sulfide. Phys. Rev., 1964, 136, 3A, A772—A775.
4. Kuzmanu H. Acoustoelectric interaction in semiconductors. Phys. Stat. Sol. (A), 1974, 25, 1, 9—67.
5. Лямшев Л. М., Шевяков Н. С. Рассеяние плоской аксиально-сдвиговой волны пьезополупроводниковым цилиндром. Акуст. ж., 1977, 23, 1, 96—105.
6. Колдрен Л., Шоу Г. Линии задержки на поверхностных акустических волнах с большим временем задержки. Тр. Ин-та инж. по электр. и радиоэл. (русск. пер.), 1976, 64, 5, 30—44.
7. Викторов И. А. Волны типа рэлеевских на цилиндрических поверхностях. Акуст. ж., 1958, 4, 2, 131—136.
8. Бреховских Л. М. О поверхностных волнах в твердом теле, удерживаемых кривизной границы. Акуст. ж., 1967, 13, 4, 541—555.
9. Малюжинец Г. Д. Математическая формулировка задачи о вынужденных гармонических колебаниях в произвольной области. Докл. АН СССР, 1951, 78, 3, 439—442.
10. Викторов И. А., Пятаков П. А. Возбуждение поперечных поверхностных волн в пьезоэлектрических цилиндрах. IX Всесоюз. акуст. конф. Доклады. Секция В, М., 1977, 47.
11. Реутов В. П. Применение усредненного вариационного принципа для описания многоволновых взаимодействий упругих поверхностных волн. Изв. вузов, Радиофизика, 1973, 16, 11, 1690—1702.

Акустический институт  
Академии наук СССР

Поступила  
31 марта 1978 г.  
После исправления  
3 июля 1978 г.

УДК 551.46.073:551.463.21

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КУРСОВОЙ СКОРОСТИ И БОРТОВОГО СНОСА СУДНА АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

**В. И. Вологов, В. В. Краснобородько, Ю. П. Лысанов, В. А. Сечкин**

В работах [1, 2] был предложен новый акустический способ определения абсолютной скорости движения судна, основанный на одновременном измерении коэффициентов авто- и взаимной корреляции флуктуаций огибающих отраженных от дна звуковых сигналов. Там же были представлены и результаты экспериментальной проверки метода для различных значений скорости и направления движения судна.

Однако ранее полученные результаты основывались на приближении Кирхгофа, что, естественно, накладывало определенные ограничения на условия применимости метода. В данной работе эти ограничения сняты. Кроме того, здесь дается способ определения как курсовой скорости, так и бортового сноса судна, а не только его абсолютной скорости.

Предположим, что излучатель и два одинаковых приемника, разнесенных на расстояние  $l$ , расположены в одной горизонтальной плоскости и движутся относительно дна со скоростью  $v$ . Пусть горизонтальный разнос приемников  $l$  много меньше глубины  $H$ .

Вследствие существования неровностей дна и неоднородностей грунта при движении приемников и излучателя амплитуда отраженных сигналов испытывает случайные временные флуктуации [3, 4]. Обозначим отклонение амплитуды сигнала от ее средней величины на первом приемнике  $x_1(t)$ , а на втором —  $x_2(t)$ . Коэффициент взаимной корреляции при нулевом временном сдвиге между сигналами равен

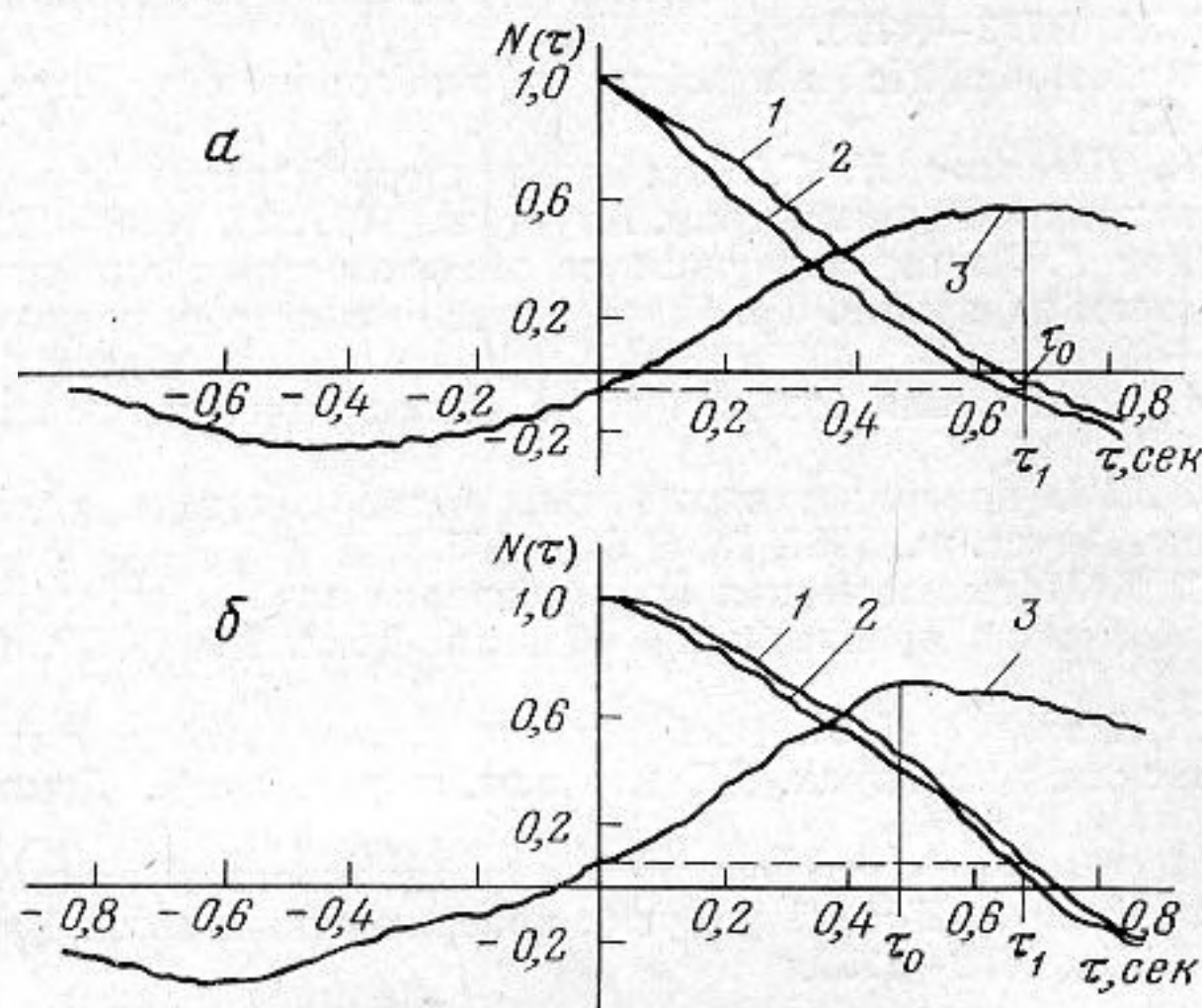
$$(1) \quad N_{12}(0) = \langle x_1(t) x_2(t) \rangle / \sigma^2,$$

где угловые скобки означают усреднение по времени  $t$  или по совокупности экземпляров,  $\sigma = \sqrt{\langle x_1^2(t) \rangle} = \sqrt{\langle x_2^2(t) \rangle}$  — дисперсия отраженных сигналов.

Очевидно, что если бы приемники были расположены строго по направлению движения, то сигнал на втором (заднем) приемнике повторял бы сигнал на первом приемнике в момент времени  $t+l/2v$ , и, следовательно, выполнялось бы соотношение  $x_1(t) = x_2(t-l/2v)$ . Таким образом, для коэффициента взаимной корреляции  $N_{12}(0)$  в этом случае можно написать следующее выражение:

$$(2) \quad N_{12}(0) = \langle x_2(t-l/2v)x_2(t) \rangle / \sigma^2 = N_{22}(l/2v).$$

Если неровности и неоднородности дна изотропны, то коэффициент взаимной корреляции отраженного сигнала не будет зависеть от направления движения приемников. Изотропность корреляционных характеристик отраженных сигналов для ряда



Фиг. 1. Коэффициенты корреляции флуктуаций огнбающих отраженных звуковых сигналов, измеренные в дрейфе судна

глубоководных районов Мирового океана была установлена нами прямым экспериментом [5]. На основании изотропности корреляционных характеристик отраженных сигналов коэффициент взаимной корреляции  $N_{12}(0)$  равен коэффициенту автокорреляции  $N_{22}(\tau_1)$  при  $\tau_1 = l/2v$  и любом расположении приемников относительно движения судна. Следовательно, измерив  $N_{12}(0)$  и  $N_{22}(\tau)$  и найдя значение временного сдвига  $\tau = \tau_1$ , при котором  $N_{22}(\tau_1) = N_{12}(0)$ , можно определить абсолютную скорость судна как

$$(3) \quad v = l/2\tau_1.$$

Для определения абсолютной скорости по формуле (3) не требуется знания угла между направлением движения судна и направлением базы приемников. Если база ориентирована строго по направлению движения судна, то его скорость определяется по формуле (3) независимо от того, изотропны неровности или неоднородности грунта на дне или нет.

Дополнив данный метод измерением временной задержки  $\tau_0$ , соответствующей максимуму функции  $N_{12}(\tau)$ , можно получить не только абсолютную скорость движения судна, но и курсовую скорость и бортовой снос [6].

Согласно работе [7],

$$(4) \quad \tau_0 = l \cos \alpha / 2v,$$

где  $\alpha$  — угол между направлением движения судна и базой приемников.

Если приемники расположить вдоль продольной оси судна и измерять временные задержки  $\tau_0$  и  $\tau_1$ , то из формул (3) и (4) получаем курсовую скорость

$$(5) \quad v_k = l\tau_0/2\tau_1^2$$

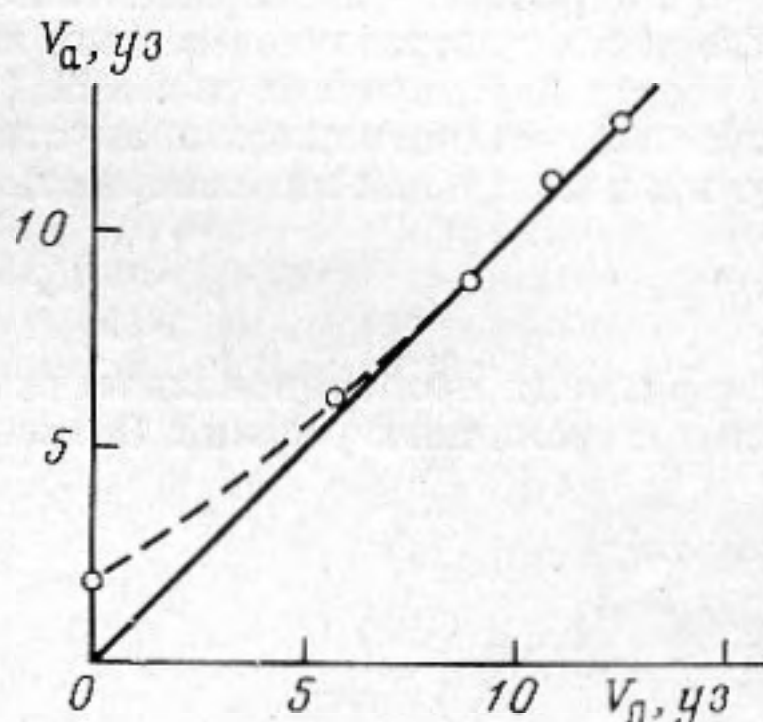
и бортовой снос

$$(6) \quad v_c = \sqrt{v^2 - v_k^2} = l[1 - (\tau_0/\tau_1)^2]^{1/2}/2\tau_1.$$

На фиг. 1, а представлены результаты одного из экспериментов при глубине около 3800 м. Опыт проводился, когда база приемников совпадала с направлением движения судна. Кривые 1 и 2 соответствуют коэффициентам автокорреляции сигналов, принятых разными приемниками, кривая 3 — коэффициенту взаимной корреляции для случаев положительной и отрицательной задержки времени. Положительной считалась задержка, при которой сигнал с первого приемника по ходу движения задерживался относительно второго. На кривой 3 при  $\tau_0=0,67$  сек наблюдается максимум, и практически при этой же задержке коэффициент автокорреляции (кривые 1 и 2) спадает до значения взаимной корреляции, т. е.  $\tau_1=\tau_0$ . В этом случае значение скорости, рассчитанное обоими методами, одинаково и составляет около 1,4 узла.

Когда направление приемной базы не совпадает с направлением движения судна, могут быть получены составляющие скорости в направлении базы приемников и в перпендикулярном ему. На фиг. 1, б представлены результаты, полученные в том же районе, но при другом направлении движения ( $\alpha=45^\circ$ ). Для этого случая абсолютная скорость равна по-прежнему 1,4 узла, а составляющая в направлении базы — около 1 узла.

Результаты сопоставления измерений абсолютной скорости движения судна акустическим методом ( $V_a$ ) и штатным судовым гидродинамическим лагом ( $V_n$ ) представлены на фиг. 2. Сплошной линией обозначены показания гидродинамического лага, а кружками — акустического. Как видно, при малых скоростях движения гидродинамический лаг дает заниженные значения скорости, так как он измеряет ее относительно воды без учета дрейфа. При увеличении скорости движения судна относительная ошибка в показаниях гидродинамического лага из-за дрейфа уменьшается и результаты измерений обоими методами совпадают. Возможность акустическим лагом измерять малые скорости движения относительно дна является большим достоинством метода.



Фиг. 2. Сравнение показаний акустического и гидродинамического лагов

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Воловов В. И., Краснобородько В. В., Лысанов Ю. П., Сечкин В. А. Новый акустический способ определения скорости судна. Океанология, 1977, 17, 1, 158—163.
2. Воловов В. И., Краснобородько В. В., Лысанов Ю. П. Способ определения скорости движения судна относительно дна. Авт. свид. № 537315. Бюл. изобр. № 44, 1976.
3. Лысанов Ю. П., Воловов В. И. Исследование флуктуаций звуковых сигналов при рассеянии их на дне океана. Морское приборостроение. Серия Акустика, 1972, 2, 25—43.
4. Воловов В. И., Житковский Ю. Ю. Отражение и рассеяние звука дном океана. Акустика океана, под ред. Л. М. Бреховских. М., «Наука», 1974, 395—490.
5. Воловов В. И., Краснобородько В. В., Лысанов Ю. П., Сечкин В. А. Об изотропности корреляционных характеристик сигналов, отраженных от дна океана. Акуст. ж., 1978, 24, 6, 850—853.
6. Воловов В. И., Краснобородько В. В., Лысанов Ю. П., Сечкин В. А. Способ определения скорости движения судна относительно дна. Авт. свид. № 640209. Бюлл. изобр. № 48, 1978.
7. Marine log system based on acoustic correlation. Marine Week, 1975, 2, № 13.

Акустический институт  
Академии наук СССР

Поступила  
25 сентября 1978 г.