

УДК 534.8 + 620.179

ПРИМЕНЕНИЕ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ В ЦИФРОВОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ГОЛОГРАФИИ

Бадалян В. Г., Базулин Е. Г.

Продемонстрирована возможность использования сложных сигналов для получения изображений методами многочастотной акустической голографии. Приведены результаты восстановления неоднородностей по экспериментально полученным голограммам.

В настоящее время широко используются и исследуются системы визуализации неоднородностей, основанные на методах цифровой акустической голографии. Они предполагают регистрацию амплитуды и фазы рассеянного неоднородностями поля в пределах некоторой пространственной апертуры. Затем с помощью различных алгоритмов реконструкций голограмм, представляющих собой варианты цифровой фокусировки, получают изображения рассеивателей [1]. Важнейшие параметры систем получения изображения — разрешающая способность и отношение сигнал/шум. Для получения высококачественного изображения необходимо регистрировать рассеянное поле на как можно большей пространственной апертуре, что обеспечивает высокое поперечное разрешение R_x , и использовать как можно более широкий диапазон частот ΔF , что дает высокое продольное разрешение R_z . Однако применение акустических широкополосных преобразователей с расходящимся пучком приводит к уменьшению чувствительности и помехозащищенности систем визуализации неоднородностей из-за уменьшения плотности энергии эхосигнала P_c . Увеличение интенсивности излученного сигнала ограничивается электрическим напряжением пробоя активного элемента преобразователя, а увеличение ее за счет увеличения длительности излученного импульса на резонансной частоте преобразователя приводит к низкому продольному разрешению восстановленного изображения. Обойти эту трудность позволяет применение сложных сигналов [2], имеющих широкий спектр ΔF и большую длительность τ . Сжатие таких сигналов увеличивает отношение сигнал/шум в B раз, где $B = 2\Delta F\tau$. Сложные сигналы с этой целью широко используются в радиолокации и гидролокации. В ряде работ [3—5] были продемонстрированы возможности применения сложных сигналов в системах акустической визуализации.

В настоящей работе рассмотрены алгоритмы обработки данных в голографических системах визуализации, использующих сложные сигналы, применение которых обеспечивает высокую помехоустойчивость и высокое разрешение, и приведены результаты экспериментальных исследований, реализующие эти алгоритмы. В экспериментах применялся метод синтезированной апертуры с перемещающимся акустическим излучателем-приемником, в котором рассеянное поле регистрировалось в заданном временном интервале для каждой точки приемной апертуры [6].

Для простоты рассмотрим случай цилиндрической симметрии, когда регистрация эхосигналов $S(x, t)$ происходит на линейной апертуре. Если сигналом $S_i(t)$, возбуждать преобразователь, то в точке приемной апертуры на выходе приемного усилителя при наличии одного точечного рассеивателя в точке r_s появится сигнал [4]

$$S_o(x, t) = U \int_0^{\infty} g(r_s, x, \tau) S_i(t - \tau) d\tau + n(t), \quad (1)$$

где U — амплитудное значение напряжения на преобразователе, $n(t)$ — шумовой сигнал, $g(r_s, x, \tau)$ — импульсный отклик акустического такта в случае одного точечного рассеивателя. Функция $g(r_s, x, \tau)$ учитывает электромеханические свойства преобразователя, особенности работы электронных схем генератора импульсов $s_i(t)$ и приемных цепей, а также свойства среды распространения акустических волн.

Если рассеиватели расположены в области R , то принятый сигнал без учета многократного рассеяния можно записать в виде

$$S(x, t) = U \int_R \int_0^\infty g(r_s, x, \tau) S_i(t - \tau) d\tau dr_s + n(t). \quad (2)$$

Применив к выражениям (1), (2) прямое преобразование Фурье, получим

$$h_o(x, \omega) = UG(r_s, x, \omega) S_i(\omega) + N(\omega), \quad (3)$$

$$h(x, \omega) = S_i(\omega) U \int_R G(r_s, x, \omega) dr_s + N(\omega), \quad (4)$$

где $S_i(\omega)$ — спектр зондирующего сигнала на входе преобразователя, $G(r_s, x, \omega)$ — спектр функции $g(r_s, x, \tau)$, $N(\omega)$ — спектр шумового сигнала. Функция $G(r_s, x, \omega)$ в случае «точечного» преобразователя с равномерной и бесконечной полосой пропускания имеет вид $G(r_s, x, \omega) = \varepsilon(r_s) [H_0^{(2)}(kr_s)]^2$, где $H_0^{(2)}$ — функция Ханкеля второго рода нулевого порядка, $\varepsilon(r_s)$ — коэффициент перерасеяния точечной неоднородности, $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число, λ — длина волны в среде со скоростью звука c на частоте ω . При возбуждении преобразователя простым сигналом ($B = 1$) с огибающей $w(t)$ и несущей частотой ω_0 его спектр имеет вид $S_i(\omega) = W(\omega - \omega_0)$, где $W(\omega)$ — спектр огибающей. Для большинства ограниченных во времени сигналов $w(t)$ скорость изменения фазы спектра равна нулю [7]. Поэтому функцию $h(x, \omega_i)$ можно рассматривать как голограмму, полученную на пространственной апертуре A_x в виде квадратурных (Re и Im части) составляющих рассеянного поля при частоте излучения ω_i . Диапазон изменения частоты $\Delta\omega$ определяется видом функции $G(r_s, x, \omega)$ и зависит от резонансных свойств преобразователя. Для получения изображения рассеивателей с высоким продольным и поперечным разрешением по набору из m голограмм $h(x, \omega_i)$, $i = 1, \dots, m$, можно воспользоваться методами фокусировки в области пространственных частот $k_x k_z$, разработанными в многочастотной голографии. Альтернативным вариантом получения изображения является метод фокусированной синтезированной апертуры (ФСА) [8], осуществляющий фокусировку во временной области и использующий для этого информацию в виде набора отсчетов $S(x, t)$.

При использовании сложных сигналов условие постоянства фазовой составляющей спектра не выполняется, и для получения голограммы $h(x, \omega)$ уже недостаточно выполнить фурье-преобразование отсчетов $S(x, t)$. Обойти эту трудность можно либо путем сжатия во времени эхоимпульсов $S(x, t)$ для каждой точки приемной апертуры, либо путем обработки каждой голограммы на заданной частоте по алгоритму эталонной голограммы.

Рассмотрим сначала первый алгоритм. Сжатие можно осуществить с помощью согласованной или инверсной фильтрации сигнала $S(x, t)$ с эталонным сигналом $S_o(t)$:

$$S_c(x, t) = \int_{\Delta\omega} S_o^*(\omega) h(x, \omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (5)$$

— для согласованной фильтрации

$$S_n(x, t) = \int_{\Delta\omega} \frac{h(x, \omega)}{S_o(\omega)} e^{i\omega t} d\omega \quad (6)$$

— для инверсной фильтрации. Здесь $\Delta\omega$ — полоса пропускания акустического преобразователя, $S_o(\omega)$ — спектр эталонного эхоимпульса. От-

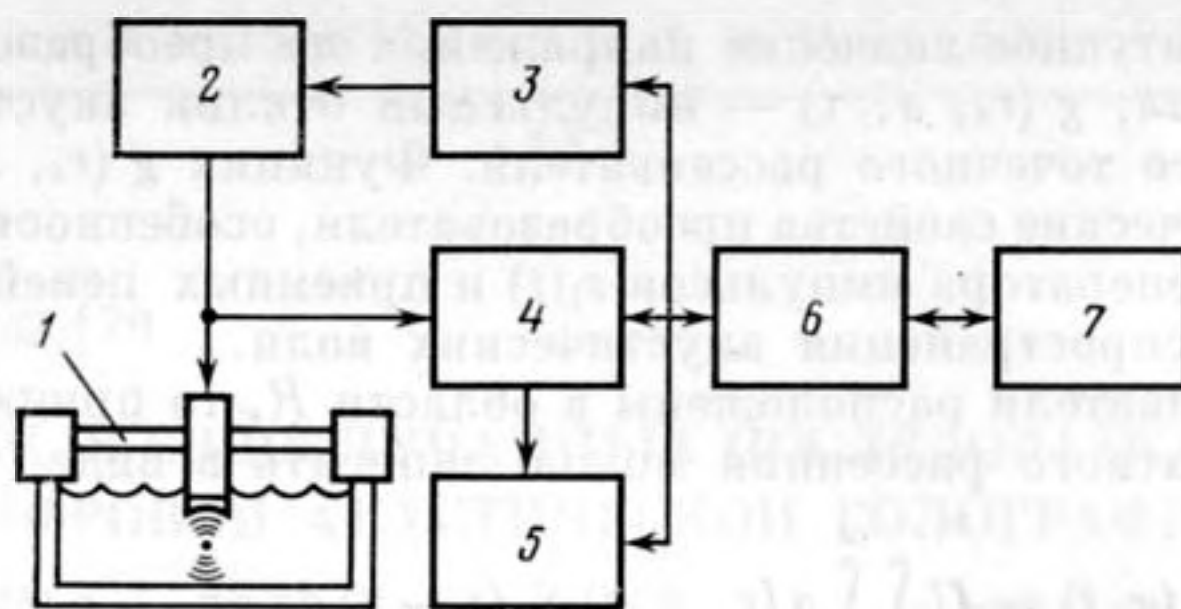


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки: 1 — система сканирования, 2 — усилитель мощности, 3 — генератор ПСП, 4 — усилитель-ограничитель, 5 — стробоскопический блок, 6 — ЭВМ управления экспериментом, 7 — обрабатывающая ЭВМ

метим, что согласованная фильтрация (5) обеспечивает в сжатом сигнале $S_c(x, t)$ максимальное отношение сигнал/шум [2], тогда как инверсная фильтрация (6) позволяет учесть уменьшение по модулю функции $G(r_s, x, \omega)$ при удалении от центральной частоты ω_0 и путем компенсации этого уменьшения увеличить продольное разрешение R_z изображения. Однако помехоустойчивость при этом ухудшается [9]. В том случае, когда спектр сигнала сильно изрезан, его сжатие целесообразно осуществлять, корректируя только фазу $h(x, \omega)$, без изменения его амплитуды:

$$S_\Phi(x, t) = \int_{\Delta\omega} \frac{S_\Phi^*(\omega)}{|S_\Phi(\omega)|} h(x, \omega) e^{i\omega t} d\omega. \quad (7)$$

Второй алгоритм обработки $S(x, t)$ состоит в использовании эталонного сигнала $S_\Phi(x, t)$, измеренного на всей приемной апертуре. Многочастотные голограммы $h(x, \omega_i)$ рассеивателей можно получить согласно (4), после чего можно вычислить временное преобразование Фурье $S(x, t)$ в каждой точке апертуры. Многочастотные эталонные голограммы $h_\Phi(x, \omega_i)$ можно получить, обработав аналогично $S_\Phi(x, t)$. Фазовые соотношения между голограммами на разных частотах ω_i нарушены, так как фаза $S(\omega)$ зависит от ω . Устранить эти нарушения можно в том случае, если спектры голограмм $H(k_x, \omega_i)$ и $H_\Phi(k_x, \omega_i)$ на каждой частоте ω_i обработать в соответствии с алгоритмом эталонной голограммы [10]:

$$H'(k_x, \omega_i) = \frac{H(k_x, \omega_i)}{H_\Phi(k_x, \omega_i) \exp(-ix_\Phi k_x - iz_\Phi \sqrt{k_i^2 - k_x^2})}, \quad (8)$$

$$|k_x| \leq k_i \sin \alpha_m,$$

где x_Φ, z_Φ — координаты эталонного рассеивателя, α_m — половина угла раскрытия преобразователя, $k_i = 2\omega_i/c$ — удвоенное волновое число. Такая обработка позволяет исключить сложную зависимость от ω фазы спектра $S_i(\omega)$ зондирующего сигнала и неявно сжать сигнал. Кроме того, она позволяет учесть неравномерность характеристики направленности и полосы пропускания преобразователя [11], что дополнительно улучшает соответственно поперечное и продольное разрешение.

Эксперименты выполнялись при использовании одного из типов сложных сигналов — псевдослучайных последовательностей (ПСП). Были выбраны ПСП, представляющие собой M -последовательности, периодическая функция корреляции которых имеет вид [2]

$$R(t) = \begin{cases} [MT_c - (M+1)|t|]U^2, & |t| \leq T_c, \\ -T_c U^2, & |t| > T_c, \end{cases}$$

где T_c — период тактового сигнала, U — амплитуда электрического напряжения на преобразователе. В экспериментах использовалась непериодическая M -последовательность при $M = 127$. В этом случае база сигнала $B = 127$, а функция корреляции имеет боковые лепестки, не превышающие

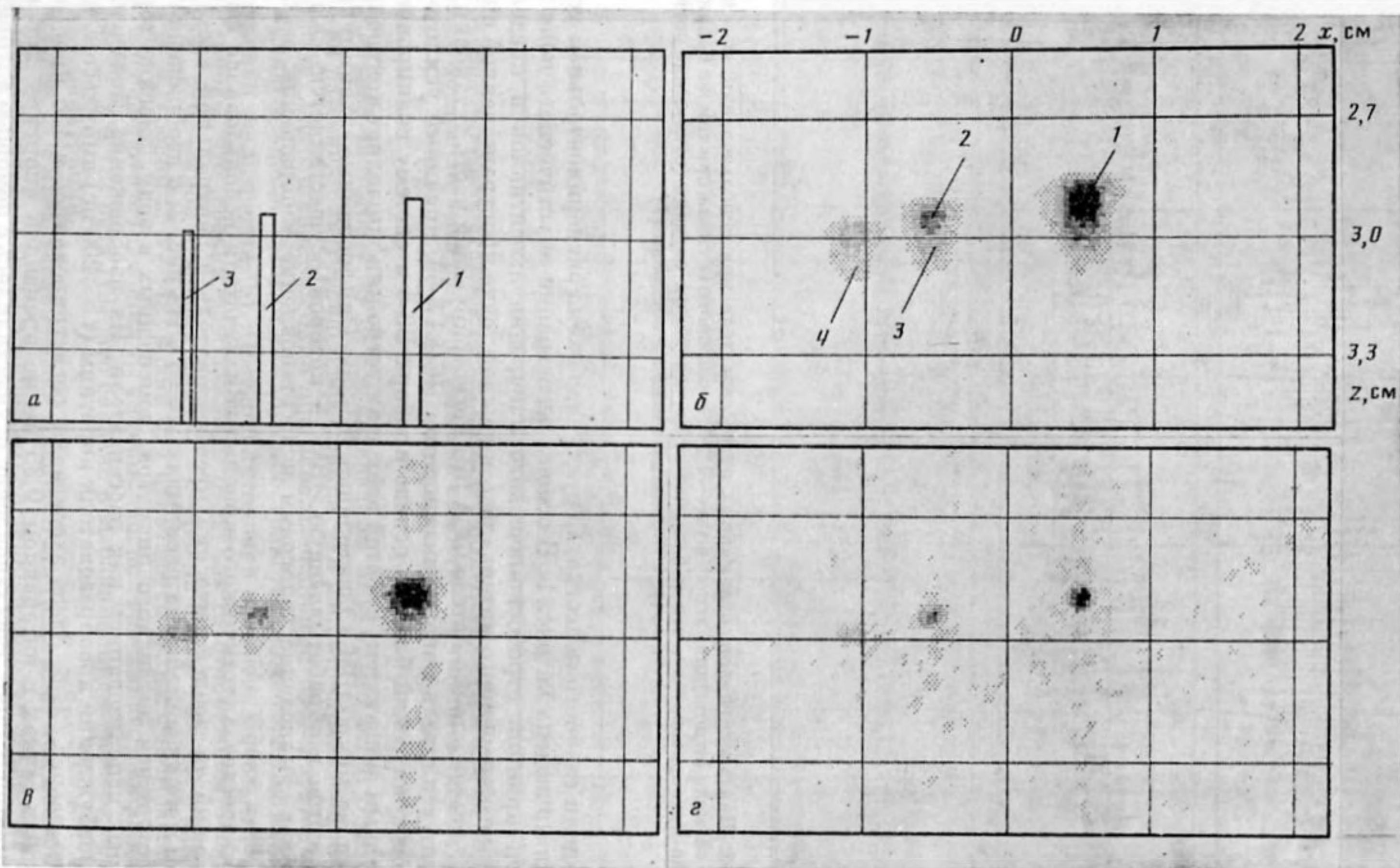


Рис. 2. Вид тест-объекта (а), состоящего из стержней диаметром 1 мм (1), 0,75 (2) и 0,5 мм (3). Результат его восстановления при использовании простого сигнала (б), сложного сигнала в случае сжатия эхоимпульсов с помощью инверсной фильтрации (в), и в случае использования эталонной голограммы (г)

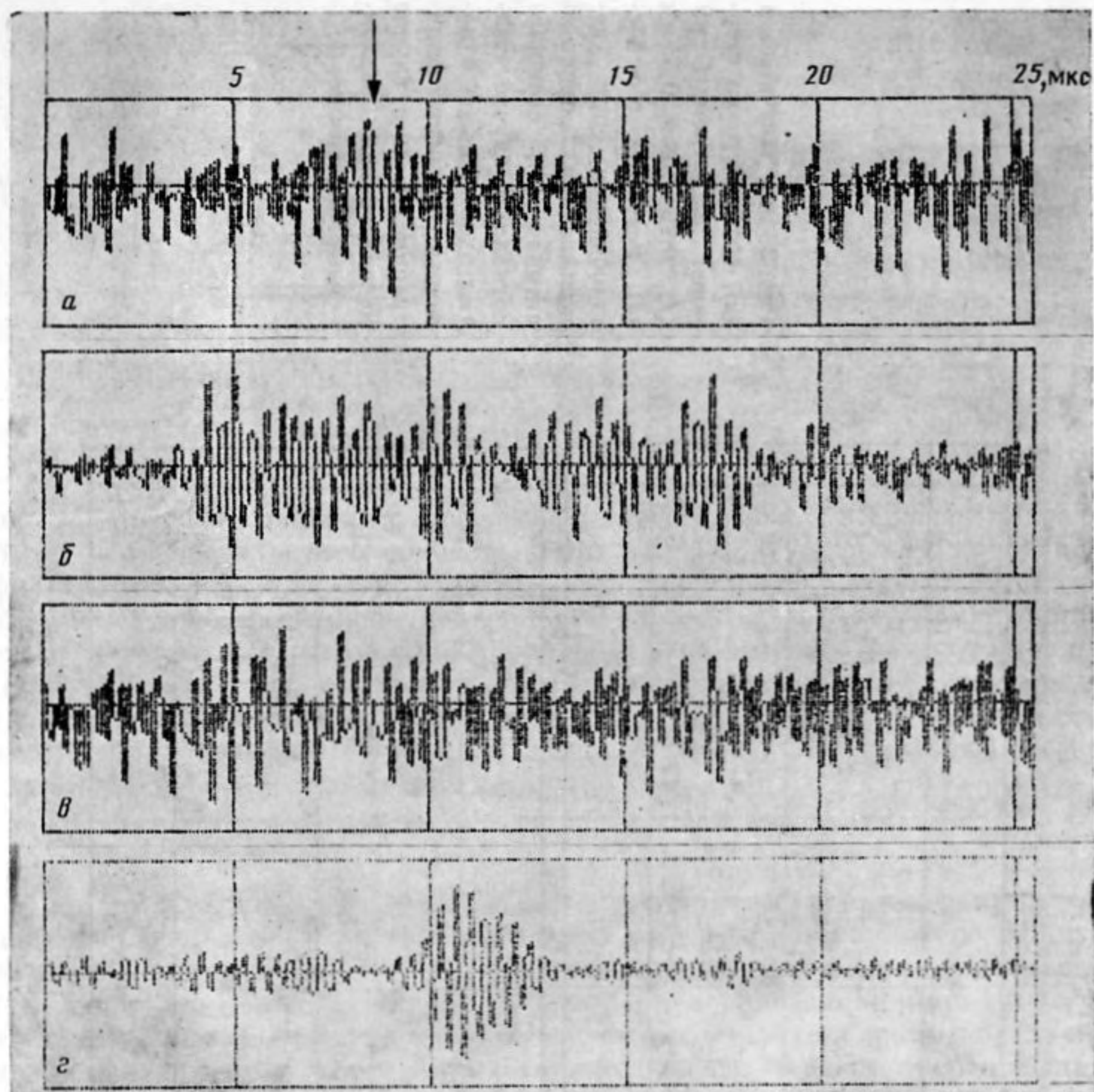


Рис. 3. Вид эхосигналов, отраженных от рассеивателя при использовании: *a* — простого сигнала (отношение сигнал/шум ~ 1), *б* — сложного сигнала при том же напряжении на преобразователе, что и в случае *a*, *в* — сложного сигнала (отношение сигнал/шум ~ 1), *г* — сжатый сигнал *в* согласно (7)

\sqrt{M} доли главного лепестка. Структурная схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. В основу регистрации акустического поля положен принцип стробоскопического измерения эхосигналов в пределах заданного временного интервала t_b в каждой точке пространственной апертуры, так же как и в методе ФСА [6]. Регистрирующая часть установки содержит усилитель мощности, генератор ПСП Г5-69, приемный усилитель, стробоскопический блок на основе прибора В9-5 и систему сканирования с шаговым двигателем. Работой всех этих устройств управляет контроллер на основе микроЭВМ «Электроника ДЗ-28». Оцифрованные эхоимпульсы передаются в обрабатывающую ЭВМ, в которой осуществляется сжатие сигналов, вычисление голограмм и восстановление изображения рассеивателей.

В качестве акустического приемника-излучателя использовался фокусирующий пьезоэлектрический преобразователь с центральной частотой 2,5 МГц и половиной угла раскрытия $\alpha_m = 7^\circ$. На рис. 2, *a* изображена система стержней различного диаметра, помещенных в воду, плоские торцы которых использовались как рассеиватели. Их изображение, полученное при возбуждении преобразователя коротким ($\tau = 200$ нс) импульсом, приведено на рис. 2, *б*. Здесь эхосигналы регистрировались в 128 пространственных точках с интервалом 0,35 мм на временной апертуре 25,6 мкс с дискретом 0,1 мкс. Восстановление осуществлялось с помощью алгоритма проекции в спектральном пространстве [12]. Использовалось 26 голограмм

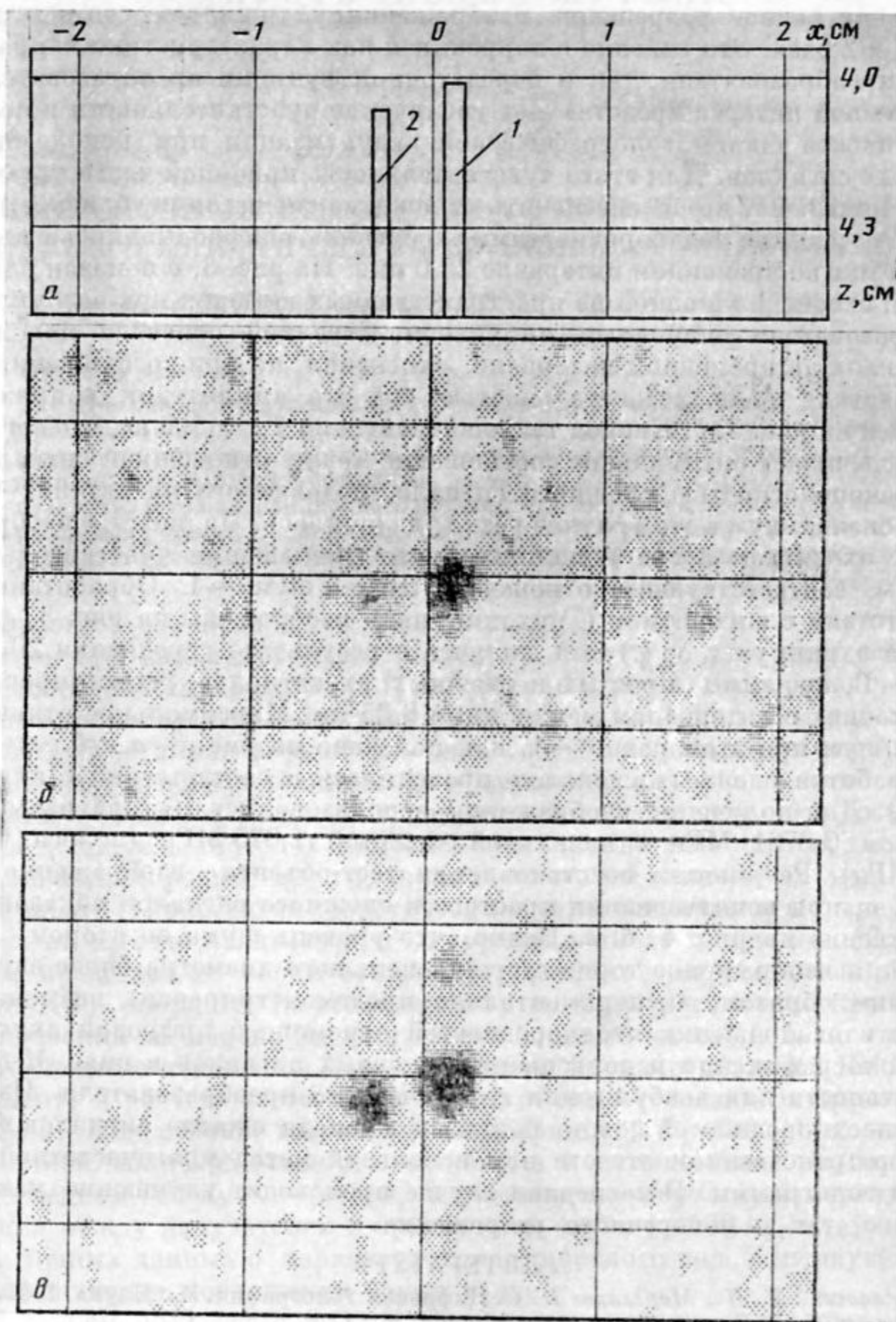


Рис. 4. Вид тест-объекта, состоящего из стержней диаметра 1 мм (1) и 0,75 мм (2). Изображение торцов стержней при использовании простого (б) и сложного сигнала (в) для отношения сигнал/шум ~ 1

с начальной частотой 1,56 МГц и интервалом $\Delta f = 0,0781$ МГц. Видно, что все три рассеивателя хорошо разрешаются. На рис. 2, в приведено изображение тех же рассеивателей, но при использовании M -последовательности ($T_c = 200$ нс) после сжатия каждого пространственного отсчета с помощью инверсной фильтрации (б). Псевдополутонная кодировка всех изображений такова, что уровни изображения от 11 до 16 отображены псевдояркостью, отмеченной цифрой 1 (рис. 2, б), уровни с 7 по 10 — 2, уровни с 4 по 6 — 3, уровни 2; 3 — 4, уровни 0; 1 отмечаются белым фоном. Продольное разрешение изображения R_z улучшилось по сравнению с изображением на рис. 2 б в 1,6 раза [13], что связано с выравниванием спектра сигнала за счет фильтрации.

На рис. 2, г представлено изображение теста (рис. 2, а) при использовании M -последовательности и с обработкой данных методом эталонной голограммы. Эталонная голограмма регистрировалась от плоского торца стержня диаметром 0,5 мм. Из сопоставления рис. 2, б и 2, г видно, что продоль-

ное и поперечное разрешение изображения улучшилось соответственно в 2,5 и в 2 раза. Это связано с коррекцией как характеристики направленности преобразователя, так и передаточной функции преобразователя.

Большой интерес представляет увеличение чувствительности и помехоустойчивости систем голографической визуализации при использовании сложных сигналов. Для этого чувствительность приемной части установки была уменьшена, чтобы обеспечить отношение сигнал/шум, близкое к единице. Рассеянные неоднородностями эхосигналы оцифровывались с дискретом 0,1 мкс во временном интервале 25,6 мкс. На рис. 3, а показан оцифрованный эхосигнал в одной из пространственных выборок при возбуждении преобразователя одиночным импульсом. Стрелкой отмечено положение эхосигнала на временном интервале. Эхосигнал, но при возбуждении преобразователя M -последовательностью той же амплитудой напряжения приведен на рис. 3, б. Период тактового сигнала $T_c = 166$ нс, что согласно [4] обеспечивает оптимальное соотношение между отношением сигнал/шум и широкополосностью сложного сигнала, подаваемого на датчик. Отношение сигнал/шум в этом случае резко увеличилось. На рис. 3, в изображен тот же эхосигнал после дополнительного уменьшения чувствительности системы, соответствующее отношение сигнал/шум ~ 1 . Обработанные в соответствии с алгоритмом (7) эхоимпульсы изображены на рис. 3, г. Эталонный эхоимпульс $S_0(t)$ был получен в результате усреднения 20 измерений. Голограммы простых и сложных эхосигналов регистрировались в 128 точках с интервалом между ними 0,35 мм. Максимальное отношение сигнал/шум при этом равно ~ 1 , как показано на рис. 3, а и б.

Обработка сложных сигналов проводилась в соответствии с алгоритмом (7). Для получения изображения использовались 16 голограмм с интервалом 0,0781 МГц с начальной частотой 1,875 МГц (полоса частот 1,25 МГц). Результаты восстановления тест-объекта, изображенного на рис. 4, а, при использовании простого и сложного сигналов показаны соответственно на рис. 4, б, в. Видно, что уровень шума во втором случае меньше, а изображение торца стержня меньшего диаметра более заметно.

Таким образом, экспериментально продемонстрирована возможность получать изображения неоднородностей с помощью цифровой акустической голографии при использовании сложных сигналов в виде M -последовательности для возбуждения акустического преобразователя. Изображение неоднородностей можно получать, проводя сжатие сигналов в каждом пространственном отсчете или используя метод многочастотной эталонной голограммы. В последнем случае происходит улучшение как продольного, так и поперечного разрешения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ярославский Л. П., Мерзляков Н. С. Цифровая голография. М.: Наука, 1982. 320 с.
2. Варакин Л. Е. Теория сложных сигналов. М.: Сов. радио, 1970. 376 с.
3. Nakamoto D., Kak A. C. Ultrasonic echo imaging with pseudo-random and pulse source: a comparative study // *Ultrason. Imaging*. 1981. V. 3. P. 1—36.
4. Kim W. K., Park S. B., Johnson S. A. Signal-to-noise ratio and bandwidth for code in an ultrasonic imaging system // *Ultrason. Imaging*. 1984. V. 6. P. 313—323.
5. Yamamoto T., Fujii S., Aoki Y. Holographic imaging system using wideband chirped ultrasound // *Acoust. Imaging*. 1984. V. 13. P. 435—445.
6. Seydel J. Synthetic-aperture focusing techniques in NDT // *Nondestructive testing*. 1984. V. 7. P. 1—47.
7. Скучик Е. Основы акустики. М.: Мир, 1976.
8. Doctor S. R., Hall T. E., Reid L. D. SAFT—the evaluation of a signal processing technology for ultrasonic testing // *NDT Int.* 1981. V. 17. № 3. P. 163—167.
9. Василенко Г. Н. Теория восстановления сигналов. М.: Сов. радио, 1979. 269 с.
10. Бадалян В. Г., Базулин Е. Г. О численном восстановлении в акустической голографии // *Акуст. журн.* 1983. Т. 29. № 3. С. 403—404.
11. Бадалян В. Г., Базулин Е. Г. Улучшение качества изображения дефектов при восстановлении акустических голограмм // *Дефектоскопия*. 1987. № 11. С. 76.
12. Бадалян В. Г., Базулин Е. Г. Цифровое восстановление изображения рассеивателей методом проекции в спектральном пространстве // *Акуст. журн.* 1988. Т. 34. № 2. С. 222—231.
13. Prokoph G., Ermert H., Kroning M. A broadband-holography imaging system for nondestructive evaluation // *Acoust. Imaging*. 1986. V. 15. P. 547—557.