расстояния между излучающим и приемным преобразователями (размер L) вычислялся по задержке зондирующего сигнала. Излучатель накачки возбуждал в воде непрерывную волну накачки с частотой 20 кГц, которая формировалась в излучающем блоке. Принятый сигнал накачки по кабель-тросу подавался на приемный блок для обработки и выделения индекса фазовой модуляции сигнала накачки, полученного в результате нелинейного взаимодействия волны сигнала с волной накачки. Импульсные сигналы с частотами от 1000 до 3000 Гц, а также импульсный шумовой сигнал, излучались преобразователем, располагающимся у поверхности вблизи преобразователя накачки. Принятые сигналы записывались на магнитофон, а затем обрабатывались. База параметрической антенны изменялась дискретно путем заглубления погружаемого блока. На рис. 1 (кривая *2*) представлена экспериментально полученная зависимость выходного сигнала параметрической антенны (с выхода фазового детектора) от величины расстояния между излучающим и приемным преобразователями накачки $R_2 - R_1$ (база антенны). На графике по вертикальной оси отложены амплитуды спектральной составляющей сигнала на частоте сигнала 1 кГц, приведенная к уровню 1 В. Экспериментальная зависимость показывает, что с изменением базы антенны сигнал на выходе приемника меняется в соответствии с приведенной на рис. 1 зависимостью чувствительности от величины L. Зависимость имеет накапливающийся характер. Физически это означает, что максимальное взаимодействие сигналов происходит вначале базы антенны, а затем добавка за счет взаимодействия уменьшается вследствие затухания и дифракции как волн накачки, так и волн сигнала.

Проведенные исследования показывают, что параметрические антенны с большой базой реализуемы (однако увеличение длины базы с целью повышения чувствительности приемной параметрической антенны эффективно лишь в ограниченных масштабах). Параметрические приемные антенны могут применяться для направленного приема низкочастотных акустических сигналов в океане.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кузнецов В.П.* О параметрических явлениях в акустике океана. – В кн.: Акустические волны в океане. М.: Наука, 1987. С. 205–210.
2. *Goldsberry T., Reeves R., Rohde D.F.* Experimental with a large aperture Parray // Journ. Acoust. Soc. Amer. 1978. V. 64. Suppdy 1. P. 125–132.
3. *Mc. Donough R.N.* Long. aperture parametric receiving arrays // Journ. Acoust. Soc. Amer. 1975. V. 57. N 5. P. 1150–1155.
4. *Новиков Б.К., Руденко О.В., Тимошенко В.И.* Нелинейная гидроакустика. Л.: Судостроение, 1981. С. 264.
5. *Кузнецов В.П.* Уравнения нелинейной акустики // Акуст. журн. 1970. Т. 16. № 4. С. 548–553.

Таганрогский радиотехнический институт
им. В.Д. Калмыкова

Поступило в редакцию
04.07.91

УДК 534.44

© 1992 г. **В.А. Захаров, В.А. Лазарев, А.А. Салтыков, А.Д. Соколов, Л.И. Татаринов, Г.А. Шаронов**

ВАРИАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО КОЭФФИЦИЕНТА КОРРЕЛЯЦИИ АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ В НЕОДНОРОДНОМ НЕСТАЦИОНАРНОМ ВОЛНОВОДЕ

Исследования пространственно-временной изменчивости океанической среды при помощи акустического зондирования на стационарных трассах ранее проводились как в глубоком океане [1,2], так и в мелком море [3–5] в относительно однородных вдоль трассы распространения звука волноводах. Данная работа представляет результаты измерения временной зависимости функции пространственной корреляции акустического поля в проливной зоне со значительной временной и пространственной изменчивостью гидрофизических условий. Аналогичные условия проведения эксперимента имели место в работе [6], где рассмотрена однолучевая модель распространения звука. Свойства же среды в проливной зоне моделируют условия распространения в океанических волноводах большой протяженности с переменными в пространстве и во времени акустическими характеристиками.

Пространственно-временная изменчивость условий акустического распространения контролировалась по структуре вертикальных профилей скорости звука вдоль трассы и их временным флуктуациям, в частности, флуктуациям глубины с постоянными значениями скорости звука, которые регистрировались в области установки излучателя. Существенная неоднородность волновода создавалась переменной по трассе глубиной района, а наличие течений приводило к временной неста-

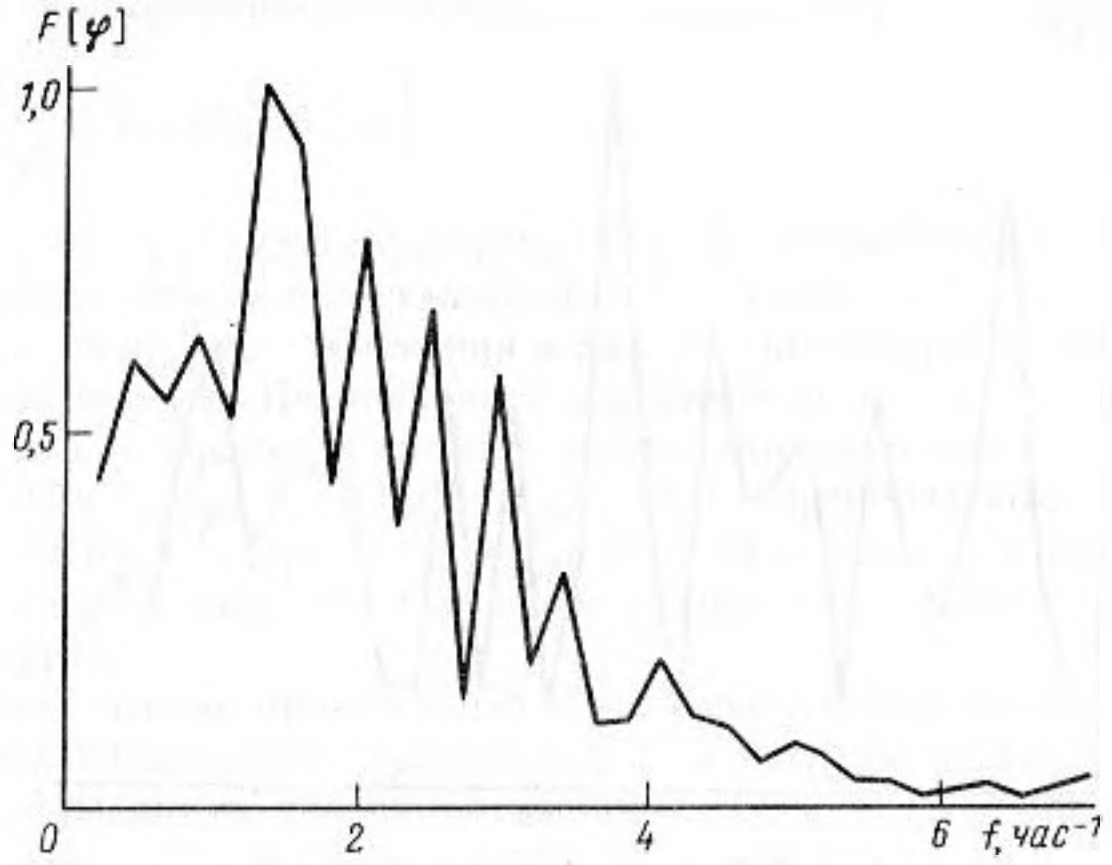

Рис. 1. Спектр флуктуаций курсового угла излучающего судна

бильности волновода. Толщина водного слоя вдоль трассы изменялась от 10^2 до 10^3 м, а флуктуации глубины с постоянным значением скорости звука составляли около 40 м с характерными трехчасовыми и более масштабами изменений.

Пространственно-временная изменчивость гидрологических условий может, в частности, характеризоваться изменением положения оси подводного звукового канала, которая колебалась по глубине в пределах от 90 до 250 м вдоль трассы и в пределах от 65 до 90 м за время измерения в окрестности точки излучения.

В качестве источника акустических волн использовался пневматический излучатель с общим объемом цилиндров 3 л и с рабочим давлением 120 атм. Источник опускался на глубину 12 м с заякоренного в мелководной части волновода судна. Импульсное излучение производилось с периодом 60 с в течение нескольких часов. Дрейф излучателя контролировался по изменениям курсового угла $\varphi(t_k)$ заякоренного судна, где k – номер импульсного сигнала, а t_k – время начала посылки.

Прием сигналов осуществлялся автономными донными станциями, оснащенными системой единого точного времени, при помощи которой синхронизировались и моменты излучения t_k. Станции были установлены на дно на расстоянии d = 1,5 км друг от друга и $R = 25 \pm 0{,}1$ км от звукового источника. Приемные гидрофоны находились вблизи дна, на глубине 585 м. Принятые гидрофонами сигналы в полосе частот 10–500 Гц записывались на магнитную ленту синхронно с сигналами системы единого точного времени, стабильность которой за время измерений была не хуже 10^{-8}.

Взаимная обработка записей сигналов $g_{jk}(t) \approx \int_0^\infty \delta(t' - t_k)\, h_{jk}(t' - t)\, dt'$, принятых и зарегистрированных автономными донными станциями с номерами $j = 1$ и $j = 2$, была направлена на получение оценки нормированной функции поперечной пространственной корреляции акустического поля

$$B_{12}(\tau, t_k) = \int_{t_k}^{t_k+T} g_{1k}(t)\, g_{2k}(t-\tau)\, dt \Big/ \left[\int_{t_k}^{t_k+T} g_{1k}^2(t)\, dt \int_{t_k}^{t_k+T} g_{2k}^2(t)\, dt\right]^{1/2}, \qquad (1)$$

где $h_{jk}(t)$ – импульсная передаточная характеристика среды, T – длительность реализации принятого сигнала, τ – относительная задержка. Вычислительная часть процедуры (1) обычно основывается на применении теоремы Винера–Хинчина и, поскольку спектр реально излучаемого импульса отличается от спектра δ-функции, то измеряемая частотная передаточная характеристика оказывается промодулированной спектром излучаемого сигнала. Данная погрешность измерений устранима путем нормирования спектров принимаемых сигналов на спектры излучения.

Функция (1) представляет собой, вообще говоря, случайное двумерное распределение величины B_{12} в координатах $\tau; t_k$.

Рассмотрим вариации двух характеристик принятых сигналов, содержащихся в матрице (1): $\tau_0(t_k)$ – координаты максимума взаимно-корреляционной функции $B_{12}(\tau, t_k)$, определяемой углом прихода акустической волны или направлением на источник сигналов в момент времени t_k и $B_0(t_k)$ – величины максимума функции $B_{12}(\tau, t_k)$, которая определяет при достаточно высоком отношении сигнал/помеха (в эксперименте – 20 дБ) степень статистической связи передаточных характеристик $h_{1k}(t)$ и $h_{2k}(t)$ и является по существу пространственным коэффициентом корреляции акустического поля.

По результатам измерений $\tau_0(t_k)$ колебалась около среднего значения $\bar{\tau}_0 = 0{,}53$ с в пределах от 0,524 до 0,536 с, что соответствует начальному углу $\varphi_0 = 148°$ визирования источника и амплитуде

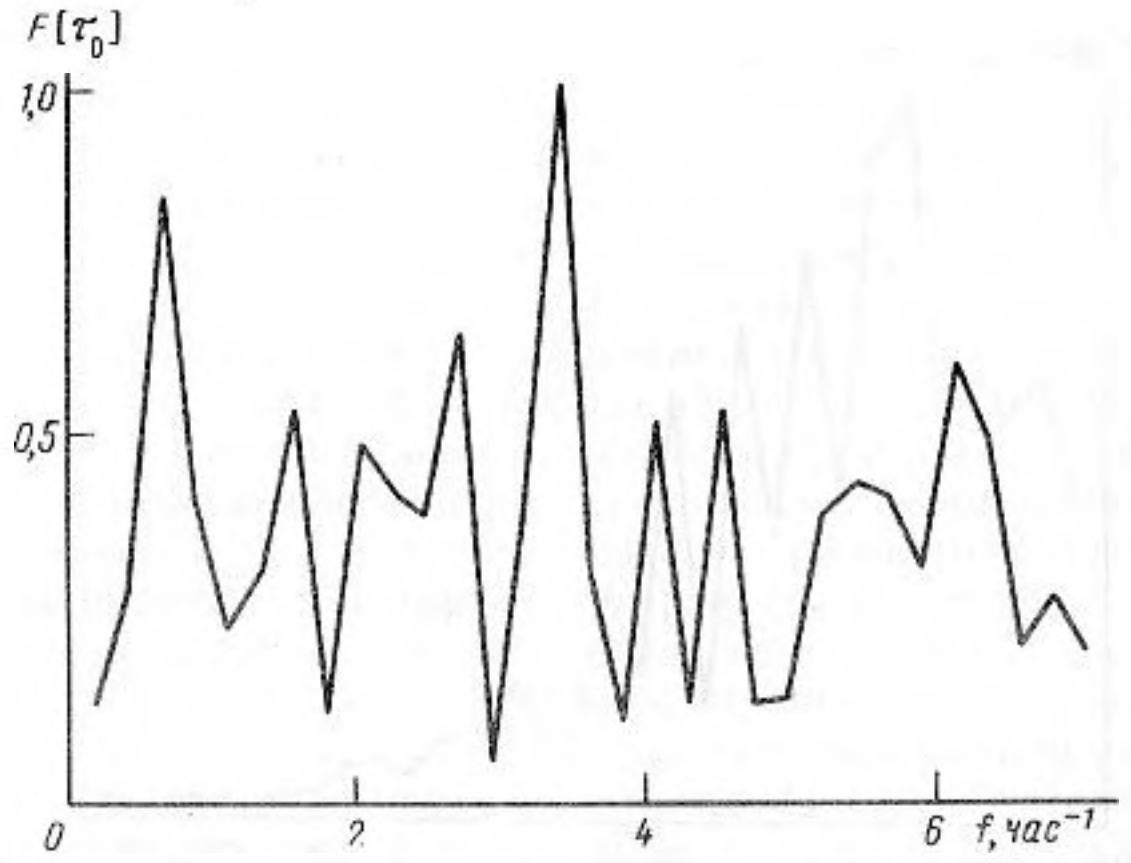

Рис. 2. Спектр флуктуаций координаты максимума корреляционной функции

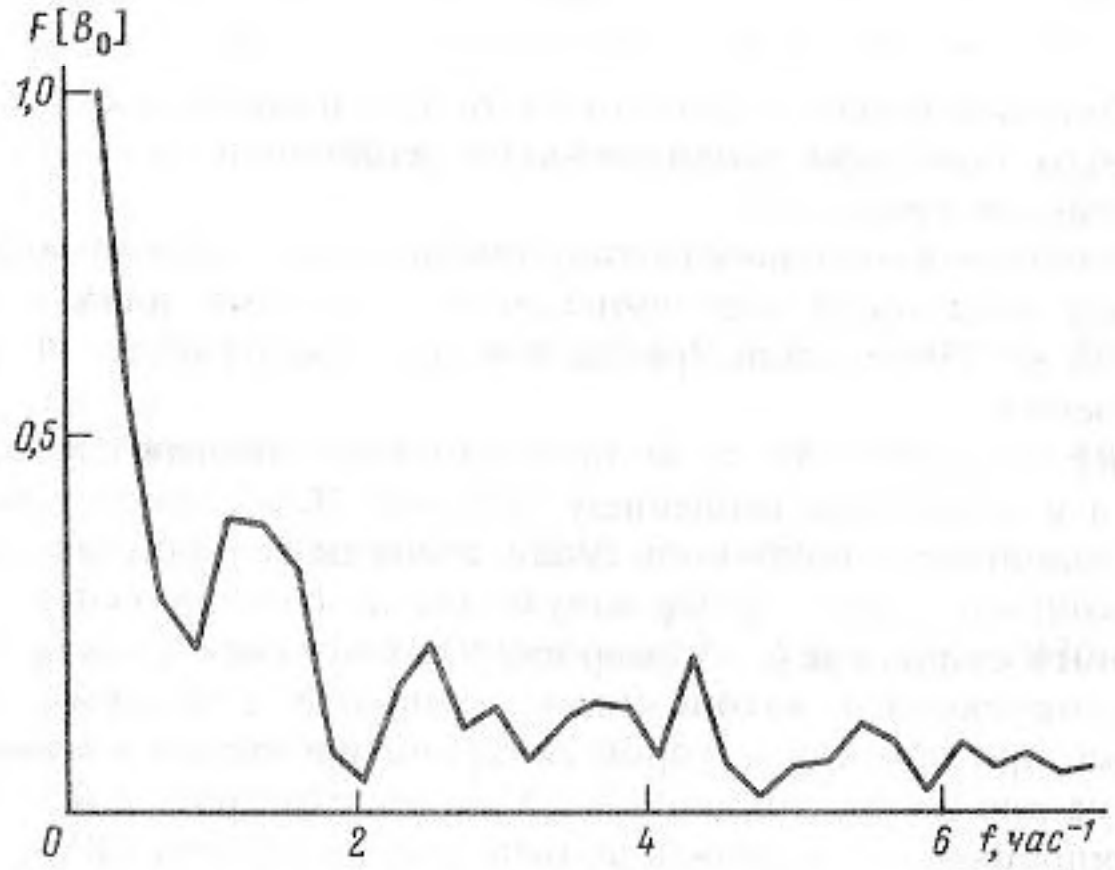

Рис. 3. Спектр флуктуаций коэффициента корреляции

угловых колебаний $\Delta\varphi_0 = 0{,}2°$. Направление φ_0 на источник визировалось из точки, делящей пополам прямую, соединяющую звуковые приемники. Значения $B_0(t_k)$ изменялись от 0,65 до 0,25.

Будем считать, что на характер флуктуаций величин $\tau_0(t_k)$ и $B_0(t_k)$ могут оказывать влияние два основных фактора: во-первых, флуктуации координат излучателя, обусловленные перемещением судна, и, во-вторых, флуктуации показателя преломления среды. Фактор многолучевости принятых сигналов обычно приводит к более высокочастотным по сравнению с рассматриваемым ниже диапазоном частот флуктуациям измеренных нами параметров.

В измеренном спектре $F[\varphi(t_k)]$ флуктуаций курсового угла $\varphi(t_k)$ заякоренного судна, с кормы которого был опущен излучатель, где $F[x] = \frac{1}{t_K} \int_0^{t_K} x \exp(-i2\pi f t_k)\, dt_k$, K – число наблюдаемых реализаций, основная гармоника (см. рис. 1) соответствует частоте $f_{\varphi_0} = 1{,}41$ ч$^{-1}$. Спектральная обработка выполнялась при $K = 256$, т.е. $t_K = 4{,}3$ ч.

Для тех же K отсчетов сравнение $F[\tau_0(t_k)]$ – спектра вариаций задержек (рис. 2) и $F[B_0(t_k)]$ – спектра флуктуаций коэффициента корреляции (рис. 3) со спектром $F[\varphi(t_k)]$ (рис. 1) позволило сделать следующие выводы. Величина B_0, во-первых, более чувствительна к флуктуациям показателя преломления среды, чем к флуктуациям координат излучателя, так как отсутствующая в спектре $F[\varphi(t_k)]$ низкочастотная составляющая с периодом 4,3 ч (частота $f \approx 0{,}23$ ч$^{-1}$) содержит большую часть энергии в спектре $F[B_0(t_k)]$, во-вторых, значения максимума коэффициента корреляции более чувствительны к флуктуациям преломляющих свойств среды по сравнению с величиной τ_0, так как в спектре $F[\tau_0(t_k)]$ отсутствуют составляющие с частотами $f < 0{,}46$ ч$^{-1}$.

Более детальный анализ спектров изменения задержки $F[\tau_0(t_k)]$ и $F[\varphi(t_k)]$ позволяет утверждать, что связь величин τ_0 и φ хорошо описывается приближенным выражением, полученным для

однолучевой модели распространения звука и приведенным в [6]:

$$\tau_0(t_k) \approx \frac{d}{c} \sin\left\{\varphi_0 \frac{r}{R} \cos\left[\varphi(t_k) - \varphi_0\right]\right\}, \quad (2)$$

где c – скорость звука, r – радиус окружности, по которой перемещатеся излучатель. Выражение (2) справедливо для малых значений аргумента функции $\arcsin\left\{R^{-1} r \cos\left[\varphi(t_k) - \varphi_0\right]\right\}$, когда можно ограничиться первым членом ее разложения в ряд, что вполне допустимо в случае $r/R < 4 \cdot 10^{-3}$, имевшем место в эксперименте. Нелинейность зависимости $\tau_0(t_k)$ от $\varphi(t_k)$, определяемой (2), приводит к тому, что набор гармоник спектра флуктуаций курсового угла $F[\varphi(t_k)]$ с частотами $f_{\varphi_0} = 1{,}41$ ч$^{-1}$; $f_{\varphi 1} = 2{,}07$ ч$^{-1}$; $f_{\varphi 2} = 2{,}53$ ч$^{-1}$; $f_{\varphi 3}$ 2,99 ч$^{-1}$ преобразуются в набор гармоник с частотами $f_{\tau -} = f_{\varphi 1} - f_{\varphi 0} = 0{,}66$ ч$^{-1}$; $f_{\tau +} = f_{\varphi 1} + f_{\varphi 0} = 3{,}48$ ч$^{-1}$ и т.д. в спектре вариаций задержек $F[\tau_0(t_k)]$, соответствующих разностным и суммарным комбинациям спектральных компонент флуктуаций курсового угла.

В заключение заметим, что количественный анализ флуктуаций коэффициента B_0, обусловленных изменениями передаточных характеристик $h_{jk}(t)$ вследствие влияния различных меняющихся параметров морской среды, таких как скорость звука $c(x, y, z, t)$, толщина водного слоя $H(x, y)$, волнение поверхности $\eta(x, y, t)$, поле скоростей течения $\mathbf{u}(x, y, z, t)$ и т.д., в настоящее время не может быть выполнен лишь численными методами, так как для этих целей требуется полный набор гидрологических данных о параметрах среды и их изменениях во времени. Однако из приведенных результатов эксперимента следует, что при изучении изменчивости характеристик морской среды низкочастотным акустическим зондированием можно снизить требования на стационарность трассы, если пользоваться измерениями коэффициента пространственной корреляции при разнесенном приеме, а не относительными задержками сигналов, как выполнялось в [5,6], поскольку различие передаточных характеристик каналов распространения представляет интегральную характеристику флуктуаций показателя преломления вдоль трасс распространения, менее подверженную влиянию смещений точек излучения и приема.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распространение звука во флуктуирующем океане / Под ред. Флатте С. М.: Мир, 1982. С. 336.
2. Акустика океана /Под ред. Санто Дж. М.: Мир, 1982. С. 318.
3. *Weston D.E., Stevens K.J., Revie J., Pengelly M.* Multiple frequency stadies of sound fluctuations in shallow water // J. Sound and Vibr. 1971. V. 18. № 4. P. 487–497.
4. *Essen H.H., Schirmer F., Siebert J.* Propagation ranges of acoustics continuous wave (CW) signals in the fladenground area of the North Sea // Acoustica. 1980. V. 47. № 1. P. 10–15.
5. *Бункин Ф.В., Вавилин А.В., Журавлев В.А., Кравцов Ю.А., Любченко А.Ю., Омельченко Н.Н., Петников В.Г., Худиев Л.Т., Шмелев А.Ю.* Предварительные результаты исследования пространственно-временной изменчивости мелкого моря на стационарной акустической трассе // Акуст. журн. 1984. Т. 30. № 5. С. 594–598.
6. *Аксенов В.А., Воробьев В.И., Маслакова Н.А.* Фазовые интерферометрические измерения в проливной зоне со значительной временной изменчивостью гидрофизических условий // Акуст. журн. 1990. Т. 36. № 5. С. 931–932.

Институт прикладной физики
Российской Академии наук

Поступило в редакцию
22.04.91

УДК 534.222.2

© 1992 г. А.А. Карабутов, М.П. Матросов, Н.Б. Подымова

ШИРОКОПОЛОСНАЯ УЛЬТРАЗВУКОВАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЛАЗЕРНОГО ГЕНЕРАТОРА ЗВУКА

Ультразвуковые исследования гетерогенных сред, и в частности керамик, требуют наряду с высокой интенсивностью также достаточную широкополосность звука ввиду сильной дисперсии коэффициента затухания и скорости звука. При использовании традиционных пьезопреобразователей для расширения полосы частот необходимы различные технические ухищрения в механической и электрической частях преобразователя [1]. В последнее время в качестве альтернативы все чаще используют оптико-акустическое преобразование энергии лазерных импульсов через энергию теплового расширения поглощающей поверхности в энергию коротких акустических видеоимпульсов, спектр которых связан со спектром огибающей интенсивности света через передаточную функ-