

# Анализ спектрального состава упругих волн в волноводе из полистирола на основе их цифровых голограмм

А. А. Жихорева, А. В. Белашов, Я. М. Бельтюков, И. В. Семенова

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

В докладе представлен новый подход к анализу картин упругих волн в прозрачном материале, полученных методом цифровой голографии. Анализ спектральных составляющих продольных волн деформации был выполнен в нескольких областях волновода в процессе распространения исходной ударной волны по волноводу и ее эволюции в нелинейную уединенную волну деформации. Полученные данные позволили оценить затухание относительно коротковолновых и длинноволновых составляющих и продемонстрировать гораздо более быстрое затухание высокочастотных компонент по сравнению с длиной уединенной волной. Была проанализирована зависимость спектрального состава упругой волны от энергии исходной ударной волны и показано увеличение относительного вклада длинноволновых составляющих с ее ростом.

*Ключевые слова:* Цифровая голография, Нелинейная уединенная волна деформации, Спектральный состав.

*Цитирование:* Жихорева, А. А. Анализ спектрального состава упругих волн в волноводе из полистирола на основе их цифровых голограмм / А. А. Жихорева, А. В. Белашов, Я. М. Бельтюков, И. В. Семенова // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 386–389.

В нашей недавней работе [1] мы исследовали процесс трансформации ударной волны в нелинейную уединенную волну (солитон) деформации в стержне из нелинейно-упругого материала (полистирола). С помощью численного моделирования была исследована зависимость коэффициента затухания от частоты компонентов волны, и было показано, что высокочастотные компоненты затухают значительно быстрее низкочастотных, а также, что они в значительно меньшей степени подвержены влиянию нелинейных эффектов. В настоящей работе мы провели анализ спектрального состава экспериментально зарегистрированных волновых картин в процессе распространения ударной волны в бруске из полистирола.

Исходная ударная волна генерировалась в кювете с водой при взрывном лазерном испарении металлизированной пленки, помещенной вблизи входного торца бруска из полистирола. Взрывное испарение металлического слоя осуществлялось импульсным Nd:YAG лазером Spitlight 600 (Innolas, Германия) с длительностью импульса 7 нс и максимальной энергией в импульсе ~0,5 Дж на длине волны 532 нм. Ударная волна входила в волновод из прозрачного полистирола сечением  $10 \times 10$  мм<sup>2</sup>, длиной 600 мм. Регистрация волновых картин в волноводе осуществлялась методом внеосевой цифровой голографии с помощью быстродействующей камеры Nanogate 24 (Nanoscan, Россия) с экспозицией 100 нс. Синхронизация импульса лазера и затвора камеры осуществлялась генератором импульсов

AM300 Dual Arbitrary Generator (Rohde&Schwarz). Для записи голограмм использовался непрерывный лазер DPSS, излучающий на длине волны 532 нм. Размер поля зрения составлял 65 мм, регистрация волновых картин производилась в пяти последовательных областях волновода: (I) 0-50 мм, (II) 50-100 мм, (III) 100-150 мм, (IV) 150-200 мм и (V) 200-250 мм. Восстановление двух голограмм, соответствующих отсутствию и наличию упругой волны в поле зрения, позволяло рассчитать распределение интегрального по толщине волновода фазового набега, вызванного упругой волной. Восстановление голограмм проводилось с использованием least-square minimization algorithm [2].

Для анализа спектрального состава зарегистрированной упругой волны была использована следующая процедура численной обработки. На первом этапе была выполнена процедура восстановления голограммы и развертки фазы. Затем для каждого ряда полученного фазового распределения были взяты Фурье-преобразования и усреднены абсолютные значения, соответствующие всем анализируемым рядам. Поскольку нас интересовал спектральный состав продольных упругих волн, Фурье-преобразование рассчитывалось только вдоль оси X, соответствующей направлению распространения волны.

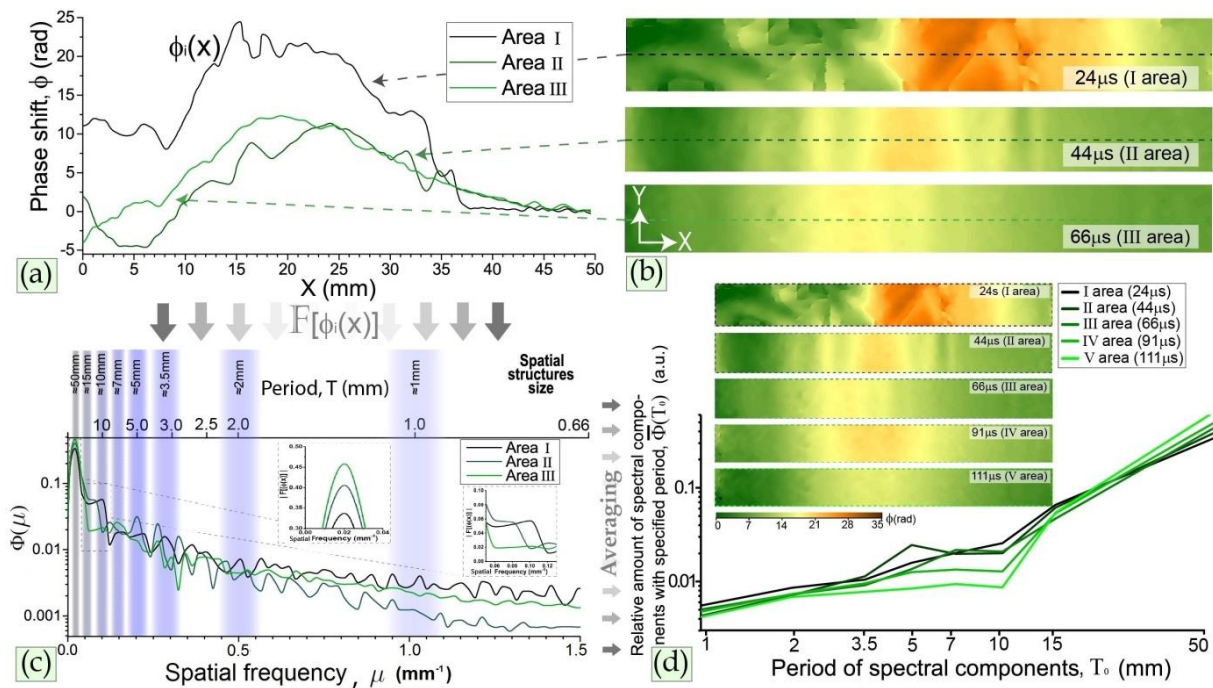
На рис. 1 (a, b) приведены типичные фазовые распределения (b) и определенные по ним профили упругих волн (a) в горизонтальных сечениях волновода, в трех последовательных областях бруска из полистирола. Для каждой области был рассчитан пространственный Фурье-спектр  $F(\mu) = \int_{-\infty}^{\infty} (\varphi(x) - \langle \varphi \rangle) e^{i2\pi\mu x} dx$  в зависимости от пространственной частоты  $\mu$ , где  $\varphi(x)$  -- профиль фазового набега, вызванного продольной упругой волной и  $\langle \varphi \rangle$  - средний фазовый набег. Поскольку нас интересовали относительные вклады спектральных компонент, был рассчитан нормализованный Фурье-спектр  $\Phi(\mu) = |F(\mu)| / \int |F(\mu')| d\mu'$ . Результаты, полученные для первых трех областей волновода, приведены на рис. 1 (c).

Как видно из рис. 1 (c), при распространении упругой волны по волноводу происходит постепенное перераспределение вкладов спектральных компонент. Как видно на вставках, по мере продвижения волны растет вклад компонент с меньшей частотой (более длинным периодом  $T=1/\mu$ ) и уменьшается вклад компонент со средним периодом  $\sim 10-15$  мм).

Из-за существенного уровня шума на полученных спектрах было проведено дополнительное усреднение по диапазонам пространственных частот  $\mu$ :

$$\bar{\Phi}(\mu_0) = \frac{1}{\delta\mu} \int_{\mu_0 - \delta\mu/2}^{\mu_0 + \delta\mu/2} \Phi(\mu) d\mu.$$

Диапазоны частот, в которых проводилось усреднение, показаны на рис. 1(c) полупрозрачной подсветкой серо-голубого цвета. В результате усреднения были рассчитаны амплитуды, соответствующие пространственным периодам компонент  $T_0 = 1/\mu_0 = 1, 2, 3.5, 5, 7, 10, 15, 50$  мм и соответствующие ширины полосы  $\delta\mu = 0.3, 0.16, 0.12, 0.09, 0.07, 0.04, 0.035, 0.03$  мм<sup>-1</sup>. Полученные графики значений  $\bar{\Phi}(\mu_0)$  для пяти областей волновода приведены на рис. 1(d). Соответствующие фазовые распределения показаны на вставке.



**Рис. 1.** (a) - профили упругой волны, полученные из фазовых распределений, зарегистрированных на I, II и III участках волновода; (b) - типичные фазовые распределения на этих участках; (c) - пространственный Фурье-спектр упругих волн на этих участках, увеличенные фрагменты, показывающие компоненты с низкой и средней частотой приведены на вставках. Диапазоны частот, из которых собирались данные для последующего анализа, показаны серо-голубым цветом. Площади под кривыми были нормализованы для облегчения сравнения спектров. (d) - усредненные относительные количества спектральных компонент в упругой волне на I-V участках волновода. Соответствующие фазовые распределения приведены на вставке.

Анализ данных на рис. 1(d) показывает, что в начале волновода в упругой волне преобладает вклад высокочастотных компонент. При распространении волны по волноводу вклад этих компонент уменьшается, в то время как вклад низкочастотных компонент увеличивается и становится преобладающим. Этот результат находится в хорошем согласии с нашими предыдущими исследованиями, основанными на численном моделировании эволюции ударной волны в нелинейно-упругом стержне [1], а также с нашими предыдущими экспериментами [3], которые позволили оценить коэффициенты затухания высокочастотных компонент как  $\alpha \approx 0,25 \text{ мм}^{-1}$  и низкочастотных как  $\alpha \approx 0,012 \text{ мм}^{-1}$ . Такая значительная разница в коэффициентах затухания упругих волн разной частоты способствует формированию объемных нелинейных уединенных волн деформации в волноводах из полистирола.

На следующем этапе анализа изменений спектрального состава упругой волны были исследованы относительные вклады высоко- и низкочастотных компонент при разных энергиях исходной ударной волны. Изменение энергии ударной волны осуществлялось изменением энергии лазерного импульса. Было показано, что вклады коротко- и длинноволновых компонент упругой волны существенно различаются при разных энергиях исходной ударной волны. При низких энергиях наблюдаются значительные вариации

вкладов этих компонент, в то время как при бóльших энергиях относительные вклады этих компонент с изменением энергии не меняются. Эти наблюдения согласуются с нашими предыдущими данными о наличии некоторого порогового значения энергии ударной волны, необходимого для формирования уединенной волны деформации в волноводах из полистирола и ПММА.

Таким образом, мы показали, что проведенный нами анализ цифровых голограмм картин упругих волн в волноводе из полистирола позволил выделить спектральные компоненты упругой волны в ходе ее распространения по волноводу, определить их коэффициенты затухания, а также оценить энергию исходной ударной волны, необходимую для формирования из нее солитона деформации.

### Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 22-72-10083).

### Список источников

- [1] **Garbuzov, F.E.** Shock wave evolution into strain solitary wave in nonlinearly elastic solid bar/ F.E. Garbuzov, A.V. Belashov, A.A. Zhikhoreva, Y.M. Beltukov, I.V. Semenova// Wave Motion. — 2022. — Vol 141. — P. 103022.
- [2] **Liebling M.** Complex-wave retrieval from a single off-axis hologram / M. Liebling, T. Blu, M. Unser // JOSA A. — 2004. — Vol 21. — № 3. — P. 367–377.
- [3] **Samsonov, A.M.** Direct determination of bulk strain soliton parameters in solid polymeric waveguides / A.M. Samsonov, I.V. Semenova, A.V. Belashov. // Wave Motion. — 2017. — Vol 71. — P. 120-126.

## Holographic recording and analysis of spectral composition of elastic wave patterns in polystyrene waveguides

*A. A. Zhikhoreva, A. V. Belashov, Y. M. Beltukov, I. V. Semenova*  
Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia

We present an approach for analysis of strain wave patterns in transparent materials recorded using digital holography. Analysis of spectral components of longitudinal strain waves was performed at several locations in the waveguide in the course of propagation of the initial shock wave and its evolution into a nonlinear strain solitary wave. The data obtained allowed us to evaluate attenuation of relatively short- and long-wave components and to demonstrate much faster decay of high-frequency wavelets in comparison with the long solitary wave. The dependence of spectral composition of the strain wave on the initial shock wave energy has been analyzed as well, which showed an increase in the relative contribution of long-wave components with shock wave energy.

*Keywords:* Digital holography, Nonlinear strain solitary wave, Spectral composition