

Взаимодействие и самовоздействие интенсивных акустических пучков. Теория и эксперимент

С. Н. Гурбатов^{1,*}, М. С. Дерябин^{1,2,†}, Д. А. Касьянов^{2,‡}, В. В. Курин^{1,§}

¹Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
Россия, 600950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23

²Институт прикладной физики РАН, Россия, 603950,
Нижний Новгород. БОКС-120, ул. Ульянова, 46

(Статья поступила 06.12.2017; Подписана в печать 08.12.2017)

Описана серия экспериментов по взаимодействию и самовоздействию интенсивных акустических волновых пучков. Используемая экспериментальная техника позволяет исследовать распространение пучков при больших акустических числах Рейнольдса с высоким пространственным и частотным разрешением. Рассмотрено вырожденное параметрическое взаимодействие интенсивных акустических пучков, рассмотрено нелинейное усиление слабого сигнала на субгармонике и исследована эволюция шумовых квазимонохроматических пучков при больших числах Рейнольдса.

PACS: 43.25.+y

УДК: 534.2

Ключевые слова: нелинейность, акустика, звуковые пучки, ударная волна, спектр, эксперимент.

ВВЕДЕНИЕ

Для плоских акустических волн можно пренебречь дисперсией в достаточно широком частотном диапазоне и поэтому в одномерном случае условия синхронизма выполнены для любой тройки нелинейно взаимодействующих гармоник. Это приводит к лавинообразному росту числа взаимодействующих гармоник и, как следствие, к образованию разрывов в первоначально непрерывной волне [1]. Для акустических пучков возникает пространственная дисперсия волновых компонент распространяющихся под разными углами, но тем не менее для достаточно интенсивных полей нелинейное взаимодействие приводит к возникновению ударных фронтов. В настоящей работе приведены результаты цикла работ по аналитическому и экспериментальному исследованию эволюции интенсивных волновых пучков, имеющих на входе сложную временную структуру. Экспериментальное исследование эффектов, проявляющихся в акустическом поле большой интенсивности, где нелинейные взаимодействия приводят к появлению узких волновых фронтов и существенному уширению спектра требует аппаратуры с высоким частотно-временным разрешением [2, 3]. Результаты, приведенные в данной работе, получены на экспериментальной установке кафедры акустики ННГУ, созданной на базе измерительного комплекса фирмы Precision Acoustics (Ultrasound Measurement System Control Centre), и позволяющей проводить измерения как с высоким пространственным разрешением, так и в широком частотном диапазоне (вплоть до сотой гармоники исходного сигнала).

1. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ И САМОВОЗДЕЙСТВИЕ ИНТЕНСИВНЫХ ВОЛНОВЫХ ПУЧКОВ

Наиболее полное, на настоящий момент, описание распространения интенсивного акустического пучка в параксиальном приближении можно получить в рамках уравнения ХЗК [1, 4–6]. Однако решение уравнения ХЗК, особенно при сложном распределении поля на начальной апертуре приходится находить численными методами, что часто приводит к потере наглядности в результатах. Для качественного рассмотрения особенностей эволюции сложных сигналов в работе использовалось одномерное уравнение Бюргерса записанное в безразмерных переменных:

$$\frac{\partial V}{\partial z} - V \frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial^2 V}{\partial t^2}, \quad (1)$$

$$V = \frac{p}{p_0}, \quad z = \frac{x}{l_{SH}},$$

где p — акустическое давление, p_0 — акустическое давление на апертуре излучателя, z — координата вдоль акустической оси, t — время в системе координат, движущейся вместе с волной со скоростью звука, Γ — обратное акустическое число Рейнольдса (число Гольдберга), l_{SH} — расстояние, на котором образуется разрыв в плоской гармонической на входе волне. При исчезающе малой вязкости ($\Gamma \rightarrow 0$) решение уравнения Бюргерса имеет вид [5–7]:

$$V(t, z) = -\frac{t - \tau_*(t, z)}{z}, \quad (2)$$

где τ_* — координата абсолютного максимума следующей функции по переменной τ :

$$G(\tau, t, z) = S_0(\tau) - \frac{(\tau - t)^2}{2z}, \quad S_0(t) = \int_t^t V(t') dt'. \quad (3)$$

*E-mail: gurb@rf.unn.ru

†E-mail: mmm1984@inbox.ru

‡E-mail: da_kasyanov@ipfran.ru

§E-mail: kurin@rf.unn.ru

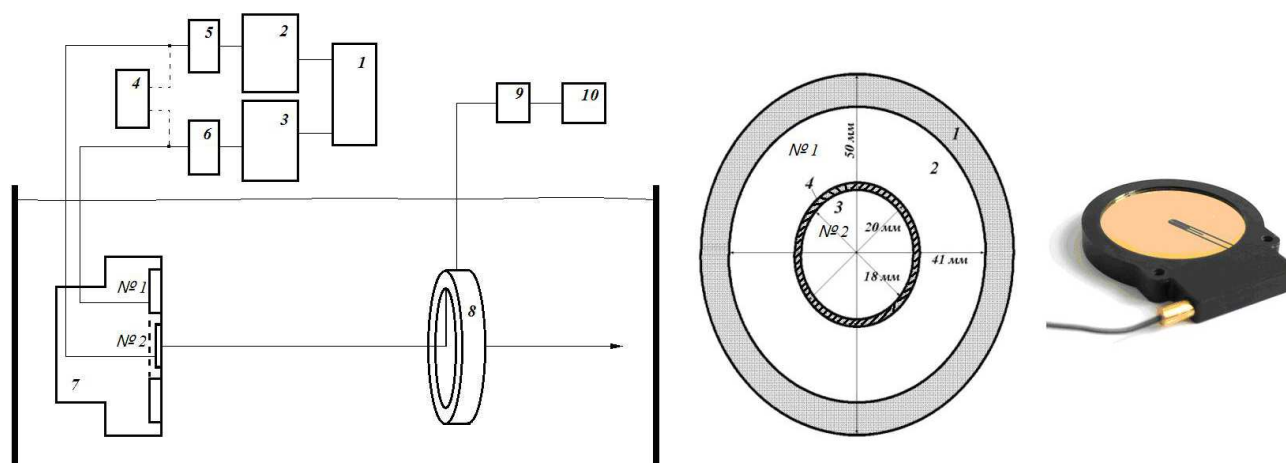


Рис. 1: Блок-схема экспериментальной установки

Именно на основе этого решения были получены основные аналитические результаты, которые были подтверждены экспериментально. В частности, было показано, что несмотря на наличие пространственной дисперсии в волновых пучках, имеется хорошее качественное, а иногда и количественное совпадение результатов аналитической теории с экспериментами по распространению интенсивных волновых пучков. В работе приводятся результаты трех серий экспериментов.

А) Вырожденное параметрическое взаимодействие волновых пучков. В работе [8] на основе решения (2), (3) рассматривалась обратная задача нелинейной акустики, и в частности, было показано, что для периодического сигнала на больших расстояниях от входа происходит полная потеря информации о тонкой структуре входного поля. Спектр при этом также имеет универсальный закон спада, где амплитуды гармоник поля уменьшаются обратно пропорционально своему номеру. В экспериментах исследовалось вырожденное параметрическое взаимодействие пучков с частотами $f_0 = 1.2$ МГц, $2f_0 = 2.4$ МГц, с разными фазовыми соотношениями между гармониками. Было показано возникновение универсального профиля волны и исследована зависимость характерного расстояния установления автомодельного режима распространения в зависимости от начальных фаз входных гармоник [9].

Б) Нелинейное усиление сигнала на субгармонике. Подобное вырожденное параметрическое взаимодействие для акустических волн, по всей видимости, впервые было изучено в работе [10]. Для акустических волн взаимодействие волны накачки со слабым сигналом на субгармонике приводит лишь к его незначительному усилению и в идеальной среде максимальный коэффициент усиления субгармоники равен $4/\pi \approx 1.27$ [11]. В тоже время перекачка энергии вверх по спектру и использование высших нечетных субгармоник позволяет существенно повысить эффективность выделения слабого сигнала [12]. Здесь будут приведены результаты экспериментов по нелиней-

ному усилению сигнала на субгармонике при взаимодействии параксиальных пучков [13].

В) Эволюция шумовых акустических пучков. Описание распространения интенсивного шума обычно строится на решении уравнения Бюргерса, которое было предложено Бюргерсом как модельное уравнение гидродинамической турбулентности. Одним из важнейших приложений статистической нелинейной акустики является исследование интенсивных авиационных шумов [14, 15]. Случайные поля, удовлетворяющие этому уравнению, принято называть турбулентностью Бюргерса и или в приложении к эволюции интенсивных акустических шумов — акустической турбулентностью. Исследованию статистических характеристик интенсивных акустических шумов и турбулентности Бюргерса посвящено большое число работ (например, библиография в монографиях и обзорах [1, 5, 6, 15–18]). В настоящей работе приведены результаты экспериментов по эволюции параксиальных узкополосных шумовых пучков. Как и для плоской волны [18], на стадии развитых разрывов спектр первоначально квазимонохроматической волны представляет собой сумму гармоник ширина которых растет с номером гармоники и на достаточно больших частотах трансформируется в универсальный степенной спектр.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Исследования проводились на установке, блок-схема которой в общем виде представлена на рис. 1.

Экспериментальная установка создана на базе измерительного комплекса фирмы Precision Acoustics (Ultrasound Measurement System Control Centre). Акустические измерения проводились в ванне с размерами $1 \times 1 \times 1$ м. Абсолютная точность перемещения с помощью манипулятора составляет 6 мкм. В ванну заливалась особо чистая дегазированная и деионизированная вода с удельным сопротивлением не менее 18 МОм·см,

произведенная установкой на базе мембранного дистиллятора ДМ-4Б (Россия). Температура в воде при проведении экспериментов составляла $22 \pm 0.1^\circ\text{C}$.

Излучающая часть установки, состоит из задающего двухканального генератора 1 Tektronix AFG3022, двух усилителей мощности 2, 3 Amplifier Research 800A100A, контрольного цифрового двухканального осциллографа 4 Tektronix TDS3032B, двух согласователей импедансов 5, 6 IT2001 Amplifier Research и двухэлементного излучателя 7. Для регистрации профиля интенсивных акустических волн в экспериментах использовался мембранный PVDF гидрофон (DH0902) 8 фирмы Precision Acoustics. Данный гидрофон имеет размер чувствительного элемента 0.2 мм (толщина PVDF плёнки 9 мкм) и позволяют корректно проводить абсолютные измерения в диапазоне частот вплоть до 100 МГц. При этом заявленная производителем неравномерность характеристики чувствительности в данном диапазоне частот не превышает 20%. Принятый сигнал с гидрофона 8, подавался на предусилитель Power Supply фирмы Precision Acoustics 9, предварительно анализировался осциллографом Agilent DSO-X 3034 10, а затем записывался на компьютер.

3. ВЫРОЖДЕННОЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ПУЧКОВ

Рассмотрим некоторые результаты эксперимента по исследованию процесса формирования ударного фронта волны в пучке с двухчастотной «сфазированной» накачкой (задержка между каналами накачки отсутствовала). Для экспериментов был изготовлен двухэлементный пьезокерамический излучатель. Два пьезокерамических элемента объединены в один корпус (корпус изготовлен из полипропилена). Внешний диаметр корпуса составляет 50 мм. Пьезокерамическая пластина №1 была изготовлена в виде кольца с внешним диаметром 41 мм, и внутренним 20 мм. Внутренняя пластина №2 имела диаметр 18 мм. Такой излучатель позволял контролировать разность фаз между излучаемыми гармониками. На кольцевой источник сигнала субгармоники подавался сигнал возбуждения в виде радиоимпульса с частотой заполнения $f_0 = 1.2$ МГц. На поршневой источник накачки подавался радиоимпульс с частотой заполнения $2f_0 = 2.4$ МГц.

На рис. 2 приведена эволюция профиля волны и спектра на разных расстояниях от излучателя. Четные и нечетные гармоники в спектре показаны, для наглядности, разными символами. Из этого рисунка видно, что после слияния разрывов формируется универсальная высокочастотная зависимость вида « $1/N$ », где N — номер гармоники.

Отличия эволюции волновых пучков от плоской волны связаны в первую очередь с тем, что для пучков формирование полей на разных частотах имеет немонотонный характер. Это приводит также к более слож-

ному закону дистанции формирования автомодельного режима о разности фаз взаимодействующих волн [9].

4. НЕЛИНЕЙНОЕ УСИЛЕНИЕ СУБГАРМОНИКИ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ВОЛНОВЫХ ПУЧКОВ

Как уже отмечалось, суммарная энергия нечетных субгармоник может существенно превышать энергию сигнальной волны, что и позволяет говорить о «нелинейном усилении» сигнальной волны. Для выделения полезного сигнала из смеси «сигнал — накачка» необходимо поставить гребенчатый фильтр, убирающий из спектра поля гармоник волны накачки $\omega = 2nf_0$. Простейшей реализацией такого фильтра является разделение сигнала на два канала, задержка в одном из каналов на период волны накачки с последующим вычитанием сигналов.

На рис. 3,а приведен график зависимости амплитуды выделенного полезного («усиленного») сигнала A' , от амплитуды сигнала субгармоники $P'a$. Экспериментальные данные изображены кругами, сплошной линией на графике амплитуды и интенсивности (рис. 3) показаны теоретические зависимости, построенные с помощью теоретических моделей для плоской волны [12]. Таким образом, в экспериментах по взаимодействию волновых пучков (слабого сигнала на субгармонике и интенсивной волны накачки) было показано, что теория, построенная на основе решения уравнения Бюргерса достаточно хорошо описывает зависимость амплитуды и энергии усиленной волны как при больших, так и малых числах Рейнольдса сигнальной волны [13].

5. ЭВОЛЮЦИЯ ШУМОВЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ПУЧКОВ

В настоящей работе приведены результаты экспериментов по эволюции параксиальных узкополосных шумовых пучков. Узкополосный шум можно представить как квазимонохроматический сигнал со случайной амплитудной и фазовой (частотной) модуляцией. Из решения (2) следует, что квазимонохроматическая волна трансформируется в последовательность пилообразных треугольных импульсов с одинаковым наклоном $1/zf$, и со случайным положением и амплитудой ударного фронта. При этом спектр пилообразной волны сохраняет свою форму, которая определяется частотными флуктуациями исходной волны, а его амплитуда монотонно уменьшается с расстоянием [18].

Для исследования спектральных характеристик шумового сигнала в каждой рассматриваемой координате пространства записывалось 1000 осциллограмм длительностью 20 мкс. От каждой осциллограммы брался спектр. Затем вычислялся усредненный спектр шумового сигнала в рассматриваемой точке пространства по всем реализациям.

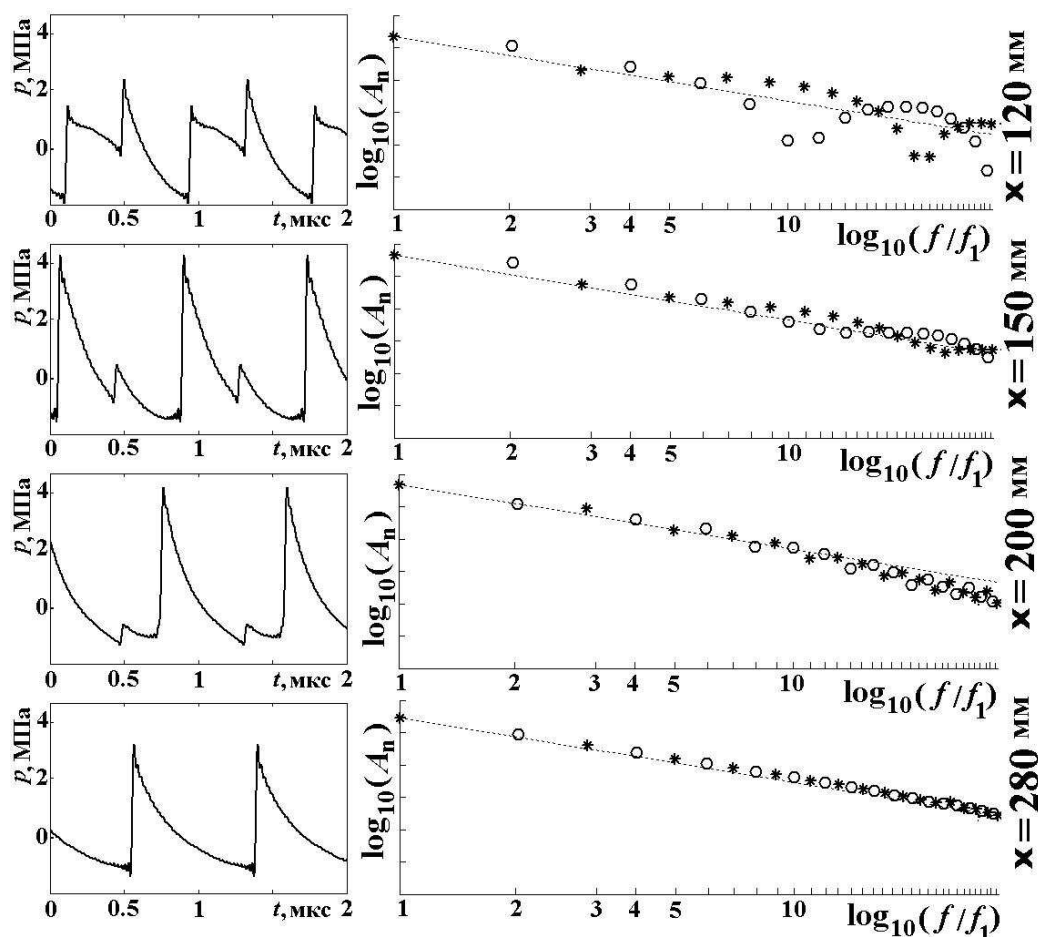


Рис. 2: Профили акустической волны и их спектры в двойном логарифмическом масштабе, зарегистрированные при различных расстояниях от апертуры излучателя

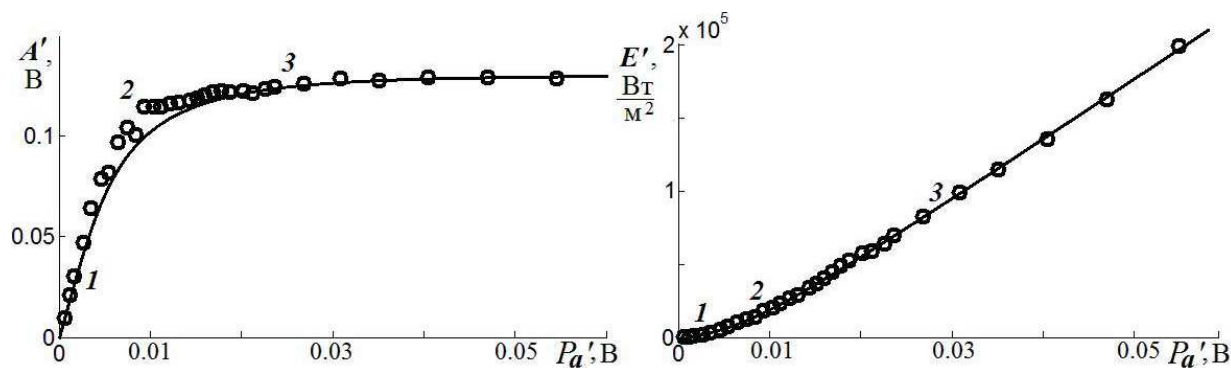


Рис. 3: а — График зависимости амплитуды обработанного сигнала A' , от амплитуды сигнала субгармоники P_a' . б — Зависимость интенсивности обработанного сигнала, от амплитуды субгармоники P_a'

На рис. 4 приведены амплитудные спектры зарегистрированного шумового сигнала и для сравнения амплитуд гармоник тонального сигнала (2 МГц, $P_0 = 1$ МПа) на расстояниях от излучателя $x = 5$ см, $x = 20$ см и $x = 50$ см. В графиках на рис. 4 амплитудный спектр для наглядности помножен на частоту

f . Эксперимент показал, что форма спектра сигнала по мере распространения шумового импульса трансформируется к универсальной структуре. Спектр при этом, имеет зависимость амплитуды спектральной компоненты от частоты с законом спада на высоких частотах как частота в степени минус единица.

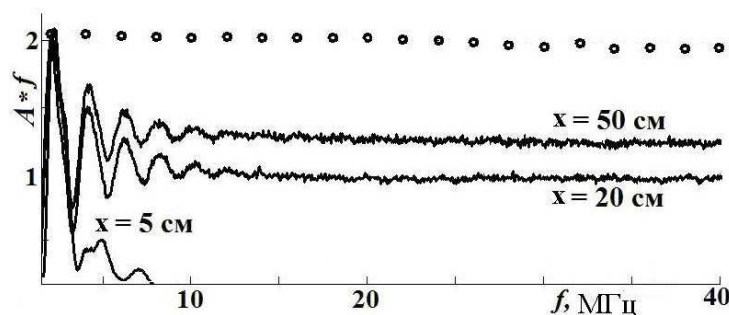


Рис. 4: Амплитудные спектры, помноженные на частоту и амплитуды гармоник тонального сигнала на расстояниях от излучателя $x = 5$ см, $x = 20$ см и $x = 50$ см

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом серия экспериментов по распространению интенсивных волновых пучков показала, что многие эффекты нелинейного взаимодействия могут быть качественно, а иногда и количественно описаны на ос-

нове одномерного уравнения Бюргерса. При этом общим свойством всех нелинейных явлений является возникновение универсального поведения поля во временной и в частотной областях.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 14-12-00882.

- [1] Руденко О. В., Солуян С. И. Теоретические основы нелинейной акустики. М.: Наука, 1975.
- [2] Sapozhnikov O., Khokhlova V., Cathinot D. J. Acoust. Soc. Am. 2004. **115**(5). Pt. 1, P. 1982.
- [3] Дерябин М. С., Касьянов Д. А., Курин В. В., Гарасев М. А. Изв. вузов. Радиофизика. 2015. **58**, № 12. С. 1052.
- [4] Rudenko O. V. Acoust. Phys. 2010. **56**, N 4. P. 457.
- [5] Гурбатов С. Н., Руденко О. В., Саичев А. И. Волны и структуры в нелинейных средах без дисперсии. Приложения к нелинейной акустике. М.: Физматлит, 2008.
- [6] Gurbatov S. N., Rudenko O. V., Saichev A. I. Waves and Structures in Nonlinear Nondispersive Media: General Theory and Applications to Nonlinear Acoustics. Springer-Verlag Berlin And Heidelberg GmbH & Co. Kg (Germany) 2011.
- [7] Руденко О. В., Гурбатов С. Н., Хедберг К. М. Нелинейная акустика в задачах и примерах. М.: Физматлит, 2007.
- [8] Гурбатов С. Н., Руденко О. В. Изв. вузов. Радиофизика. 2015. **15**, № 7. С. 515.
- [9] Гурбатов С. Н., Дерябин М. С., Касьянов Д. А., Курин В. В. Изв. вузов. Радиофизика. 2016. **59**, № 10. С. 1052.
- [10] Руденко О. В. Акуст. журн. 1974. **20**, № 1. С. 108.
- [11] Новиков Б. К., Руденко О. В. Акуст. журн. 1976. **22**, № 3. С. 461.
- [12] Гурбатов С. Н., Малахов А. Н. Акуст. журн. 1979. **25**. С. 54.
- [13] Гурбатов С. Н., М. С. Дерябин, Д. А. Касьянов, В. В. Курин Акуст. журн. 2017. **63**, № 3.
- [14] Morfey C. L., Howell G. P. AIAA J. 1981. **19**. P. 986.
- [15] Gee K. L., Sparrow V. W., James M. M., Downing C. M., Hobbs J. M., Gabrielson T. B., Atchley A. A. J. Acoust. Soc. Am. 2008. **123**, N 6. P. 4082.
- [16] Woyczynski W. A. Burgers-KPZ Turbulence. Gottingen Lectures, Berlin, Springer-Verlag, 1998.
- [17] Bec J., Khanin K. Phys. Rep. 2007. **447**. P. 1.
- [18] Gurbatov S. N., Shepelevich L. G. Radiophys Quantum Electron. 1978. **21**(11). P. 1131.

The interaction and self-action intense acoustic beams. Theory and experiment

S. N. Gurbatov^{1,a}, M. S. Deryabin^{1,2,b}, D. A. Kasyanov^{2,c}, V. V. Kurin^{1,d}

¹Nizhny Novgorod State University, Nizhny Novgorod, 600950, Russia

²Institute of Applied Physics, Nizhny Novgorod, 603950, Russia

E-mail: ^aagurb@rf.unn.ru, ^bmmm1984@inbox.ru, ^cda_kasyanov@ipfran.ru, ^dkurin@rf.unn.ru

A series of experiments in the interaction and self-action of intense acoustic wave beams is described. The experimental technique used makes it possible to investigate the propagation of beams at large acoustic Reynolds numbers with high spatial and frequency resolution. The degenerate parametric interaction of intense acoustic beams is considered, the nonlinear amplification of a weak signal on a subharmonic is considered, and the evolution of noise quasimonochromatic beams at large Reynolds numbers is studied.

PACS: 43.25.+y

Keywords: nonlinearity, acoustics, sound beams, shock wave, spectrum, experiment.

Received 06 December 2017.

Сведения об авторах

1. Гурбатов Сергей Николаевич — докт. физ.-мат. наук, зав. кафедрой, профессор; e-mail: gurb@rf.unn.ru.
 2. Дерябин Михаил Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, зав. сектором; e-mail: mmm1984@inbox.ru.
 3. Касьянов Дмитрий Альбертович — докт. физ.-мат. наук, зав. отделом, доцент; e-mail: da_kasyanov@ipfran.ru.
 4. Курин Василий Викторович — ст. преподаватель; e-mail: kurin@rf.unn.ru.
-