

Проблемы нелинейной акустической томографии третьего порядка на основе кодированных волн

Р. В. Крюков,* О. Д. Румянцева, П. А. Иванова

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра акустики
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

Рассматриваются способы томографии акустического нелинейного параметра третьего порядка в целях медицинской диагностики. Предпочтение отдается томографическим схемам с неколлинеарным взаимодействием трех кодированных волн, позволяющим получать количественные значения нелинейного параметра.

PACS: 43.25.Lj, 43.60.Pt, 43.60.Rw, 43.60.Kx

УДК: 534.2 : 534.222 : 534.7

Ключевые слова: нелинейная акустическая томография третьего порядка, акустические нелинейные параметры второго и третьего порядков, кодированные волны.

Развитие принципов нелинейной акустической томографии третьего порядка является важной задачей, поскольку конечным результатом томографического исследования является пространственное распределение как акустического нелинейного параметра второго порядка ε_2 (пропорционального второй производной давления по плотности), так и новой для медицинской диагностики величины — акустического нелинейного параметра третьего порядка ε_3 (пропорционального третьей производной давления по плотности). В то же время, существуют исследования, свидетельствующие, что относительное изменение значений нелинейных параметров в патологически измененной ткани, по сравнению со здоровой, существенно превышает одновременное изменение ее линейных характеристик [1].

Акустическое давление третьего порядка малости $p^{(III)} = p^{(3)} + p^{(2 \times 2)}$ образуется за счет двух конкурирующих процессов: взаимодействия «чисто» третьего порядка (порождает поле $p^{(3)}$) и двукратного взаимодействия второго порядка (порождает поле $p^{(2 \times 2)}$). При взаимодействии в среде трех волн, эти процессы ответственны за образование третьих гармоник и волн на комбинационных частотах. Тем самым, изучение эффектов третьего порядка предлагалось с помощью коллинеарных томографических схем [2] (на основе измерения третьей гармоники) и схем с неколлинеарным взаимодействием [3] (на основе сигналов на комбинационных частотах). Например, в работе [2] полный сигнал подразделяется на две составляющих, одна из которых изменяется с расстоянием линейно (эта составляющая формируется за счет $p^{(3)}$ и частично за счет $p^{(2 \times 2)}$), а другая квадратично (формируется только за счет $p^{(2 \times 2)}$). В [2] делаются выводы, что амплитуда составляющей акустического давления, линейно изменяющейся с расстоянием, и, тем самым, амплитуда сигнала $p^{(3)}$, зависит только от величины нелинейного параметра третьего порядка ε_3 и не зависит от нелинейного параметра второго порядка ε_2 . Разде-

лить вклады от составляющих, линейно и квадратично изменяющихся с расстоянием, и тем самым найти ε_3 в коллинеарной схеме, согласно [2], считается возможным. Однако в [4] показано, что в томографических схемах, основанных на коллинеарном взаимодействии волн, мешающий сигнал за счет двукратного взаимодействия второго порядка $p^{(2 \times 2)}$ уже на очень малых волновых расстояниях значительно превосходит полезный (информативный) сигнал $p^{(3)}$, несущий информацию о ε_3 . Тем самым, в [4] проиллюстрировано, что использование нелинейных эффектов третьего порядка в диагностических целях возможно только в схемах томографии, построенных на неколлинеарном взаимодействии волн.

В работе [3] рассматривается прототип томографической системы, предназначенный для восстановления изображения исследуемого объекта в виде пространственных распределений акустических нелинейных параметров ε_2 и ε_3 на основе эффекта нелинейного неколлинеарного взаимодействия трех первичных волн. Показано, что применение двух кодированных и одного монохроматического первичных сигналов с последующей корреляционной обработкой регистрируемого сигнала на комбинационных частотах позволяет восстановить полное изображение объекта в результате всего одного эксперимента. В эксперименте используется малое число преобразователей — три излучателя и один приемник. Для формирования сигнала сравнения $p_\delta(t)$, необходимого для корреляционной обработки, в [3] кодируются только два из трёх первичных сигнала $p_1(t)$ и $p_2(t)$. Они достигают пробный рассеиватель с малыми волновыми размерами и центром в точке \mathbf{r} с некоторыми временными задержками τ_1 и τ_2 , соответственно. Рассеянный сигнал, порождаемый в результате нелинейного взаимодействия первичных плоских волн в точке \mathbf{r} и достигающий приемника после дополнительной задержки τ_R , имеет структуру:

$$p_\delta(t) \sim p_1(t - \tau_1 - \tau_R)p_2(t - \tau_2 - \tau_R) = \\ = p_1(t - \tau_{\text{del}})p_2(t - \tau_{\text{del}} + \Delta\tau_{12}). \quad (1)$$

Здесь $\Delta\tau_{12} = \tau_1 - \tau_2$ — взаимный временной сдвиг между сигналами p_1 и p_2 ; $\tau_{\text{del}} = \tau_1 + \tau_R$ — задерж-

*E-mail: burrov@phys.msu.ru

ка момента приема сигнала сравнения относительно момента излучения первого сигнала $p_1(t)$. Временной параметр $\Delta\tau_{12}$ будет одинаков для всех рассеивателей, принадлежащих так называемой линии одинакового кода, которая проходит через рассматриваемую точку \mathbf{r} и параллельна биссектрисе между направлениями излучения кодированных сигналов $p_1(t)$ и $p_2(t)$. В то же время, параметр τ_{del} будет различен для всех точек, принадлежащих фиксированной линии одинакового кода. Таким образом, две пространственные координаты двумерного рассеивателя, находящегося в точке \mathbf{r} , отображаются в два характерных временных параметра сигнала: код, определяемый $\Delta\tau_{12}$, и время прихода на приемник, определяемое τ_{del} . Эти рассуждения справедливы для взаимодействия чисто третьего порядка, при котором три первичных волны взаимодействуют одновременно в одной и той же точке, порождая сигнал $p^{(3)}$. Однако в процессе томографирования с помощью двух кодированных и одной монохроматической первичных волн возникает следующая проблема, связанная с комбинационным сигналом $p^{(2 \times 2)}$, который формируется в результате двукратного взаимодействия второго порядка. Взаимодействие такого типа является по своей природе нелокальным, т. е. первый и второй акты взаимодействия второго порядка происходят в разных точках области томографирования. При этом сигнал $p^{(2 \times 2)}$ может иметь такой же код (соответствующий фиксированной задержке $\Delta\tau_{12}$) и такой же момент прихода на приемник (соответствующий τ_{del}), что и сигнал $p^{(3)}$. Численным моделированием было показано, что областью взаимодействия одного из актов второго порядка является некоторая парабола.

Для сравнения амплитуд информативной и мешающей частей принимаемого сигнала в неколлинеарной томографической схеме было проведено численное моделирование нелинейного взаимодействия плоских монохроматических пучков. Учет того, что два из трех пучков должны быть в практических условиях кодированными, осуществлялся за счет рассмотрения указанных выше парабол в качестве областей взаимодействия при двукратном взаимодействии второго порядка. Первичные три монохроматических пучка имели частоты $f_1^0 = f_2^0 = 1.6$ МГц, $f_3^0 = 2.2$ МГц; пучки распространялись под углами $(180^\circ + 33^\circ)$, $(180^\circ - 104^\circ)$, $(180^\circ - 19^\circ)$ к оси X . Интенсивность первичных полей составляла $I_0 \cong 0.1$ Вт/см² = 1000 Вт/см². Поле давления $p_{+-}^{(\text{III})}$ на суммарно-разностной комбинационной частоте $f_{+-}^0 = f_1^0 + f_2^0 - f_3^0 = 1$ МГц регистрировалось на приемнике, расположенном под углом 0° к оси X . Амплитуды полей, возникающих в результате нелинейного неколлинеарного взаимодействия трех пучков в модельной биологической ткани, приведены на рис. 1а; плотность среды $\rho_0 = 1000$ кг/м³, скорость звука в среде $c_0 = 1500$ м/с, аппроксимация нелинейного параметра $\varepsilon_3 \cong (\varepsilon_2 - 1)^2$. Из рис. 1а видно, что амплитуда мешающего сигнала $|p_{+-}^{(2 \times 2)}|$ заметно превосходит

информативную часть сигнала $|p_{+-}^{(3)}|$. Следовательно, в общем случае, для томографирования объектов метод восстановления с использованием двух кодированных и одной монохроматической первичных волн не перспективен, так как в данных схемах невозможно разделить сигналы, порождаемые двумя конкурирующими механизмами взаимодействия. Поскольку именно это разделение смогло бы позволить определить количественные значения нелинейных параметров, то от использования в качестве третьей волны монохроматического сигнала приходится отказаться в пользу кодированного.

Пусть все три первичные волны, зондирующие исследуемый объект, являются кодированными. Тогда сигнал сравнения на приемнике имеет структуру: $p_\delta(t) \sim p_1(t - \tau_1 - \tau_R)p_2(t - \tau_2 - \tau_R)p_3(t - \tau_3 - \tau_R) = p_1(t - \tau_{\text{del}})p_2(t - \tau_{\text{del}} + \Delta\tau_{12})p_3(t - \tau_{\text{del}} + \Delta\tau_{13})$. По сравнению со случаем двух кодированных волн (1), в данном случае каждый из двух временных параметров $\Delta\tau_{12}$ и $\Delta\tau_{13} = \tau_1 - \tau_3$ (взаимный временной сдвиг между сигналами p_1 и p_3) будет выделять свою линию одинакового кода. Пересечение двух линий одинакового кода однозначно определяет точку \mathbf{r} области рассеяния, из которой пришел данный сигнал сравнения $p_\delta(t)$. Код сигнала $p_\delta(t)$, порожденного в точке \mathbf{r} , зависит от кодов всех трех первичных сигналов. Такой код будет индивидуален для каждой точки \mathbf{r} . Тогда временной параметр τ_{del} уже не является независимым, так как его значение однозначно диктуется точкой \mathbf{r} , определяемой из пересечения двух линий одинакового кода. В этом случае каждый пространственный элемент разрешения, характерный для данной томографической системы, будет обладать своим четко определенным значением кода. При этом мешающий сигнал с заданным кодом будет формироваться за счет нелинейного взаимодействия, которое происходит только в пределах данного элемента разрешения, т. е. становится, фактически, квазилокальным. Тем самым, в случае трех кодированных первичных волн, двукратное взаимодействие второго порядка, порождающее сигнал с индивидуальным для точки \mathbf{r} кодом, становится подобным взаимодействию чисто третьего порядка. Это обстоятельство позволяет рассматривать полный сигнал $p^{(\text{III})} = p^{(3)} + p^{(2 \times 2)}$ как информативный.

Численное моделирование взаимодействия трех монохроматических пучков в элементе разрешения показало (рис. 1б), что в общем случае амплитуда сигнала $|p_{+-}^{(3)}|$ может остаться соизмеримой с амплитудой сигнала $|p_{+-}^{(2 \times 2)}|$, как и в случае взаимодействия двух кодированных и одной монохроматической волн (рис. 1а). Однако за счет того, что в случае трех первичных кодированных волн двукратное взаимодействие второго порядка становится квазилокальным, появляется возможность отдельного восстановления количественных значений нелинейных параметров второго $\varepsilon_2(\mathbf{r})$ и тре-

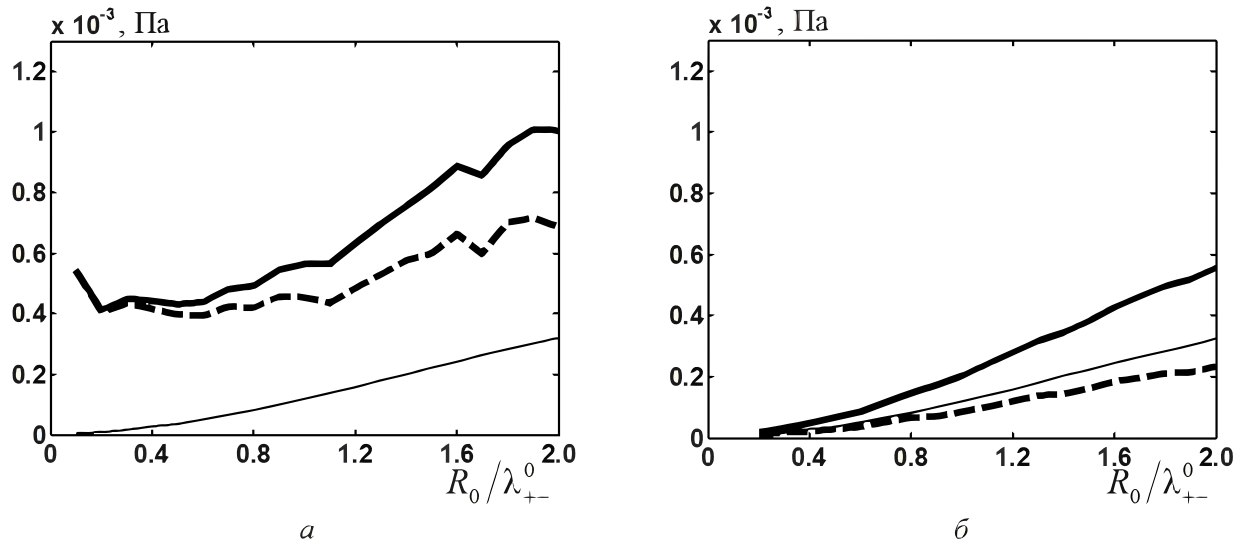


Рис. 1: Амплитуды давления на приемнике, порождаемого различными группами нелинейных вторичных источников в модельной биологической среде ($\varepsilon_2 = 6$, $\varepsilon_3 = 25$) в зависимости от радиуса R_0 элемента разрешения, отнесенного к длине волны регистрируемого комбинационного сигнала λ_{+-}^0 : общее поле от источников чисто третьего порядка ($|p_{+-}^{(3)}|$, тонкая сплошная линия); поле от двукратного взаимодействия второго порядка ($|p_{+-}^{(2 \times 2)}|$, пунктир); итоговое поле ($|p_{+-}^{(III)}| \equiv |p_{+-}^{(3)} + p_{+-}^{(2 \times 2)}|$, толстая сплошная линия) в случае взаимодействия двух кодированных волн и одной монохроматической (а) и в случае трех кодированных волн (б).

тьего $\varepsilon_3(\mathbf{r})$ порядков. В общем случае, оценка нелинейного параметра $\hat{\varepsilon}^{III}(\mathbf{r})$, полученная после корреляционной обработки принятого сигнала $p^{(III)}$ с помощью сигнала сравнения p_δ , представляет собой линейную комбинацию оценок параметров $\hat{\varepsilon}_2(\mathbf{r})$ и $\hat{\varepsilon}_3(\mathbf{r})$ с некоторыми скалярными $M_1(\mathbf{r})$, $M_2(\mathbf{r})$, $M_3(\mathbf{r})$ и векторным $\mathbf{M}_\nabla(\mathbf{r})$ коэффициентами, которые могут быть предварительно вычислены:

$$\hat{\varepsilon}^{III}(\mathbf{r}) = \hat{\varepsilon}'_3(\mathbf{r}) + M_1(\mathbf{r})(\hat{\varepsilon}_2(\mathbf{r}) - 1) + M_2(\mathbf{r})(\hat{\varepsilon}_2(\mathbf{r}) - 1)^2 + \mathbf{M}_\nabla(\mathbf{r})\nabla(\hat{\varepsilon}_2(\mathbf{r}) - 1) + M_3(\mathbf{r}), \quad (2)$$

где $\hat{\varepsilon}'_3(\mathbf{r}) \equiv 2(\varepsilon_2(\mathbf{r}) - 1)^2 - \varepsilon_3(\mathbf{r})$.

Если вначале пренебречь векторным неизвестным $\nabla(\hat{\varepsilon}_2(\mathbf{r}) - 1)$, то в уравнении (2) в каждой точке \mathbf{r} нужно оценить три неизвестных $\hat{\varepsilon}'_3(\mathbf{r})$, $(\hat{\varepsilon}_2(\mathbf{r}) - 1)$ и $(\hat{\varepsilon}_2(\mathbf{r}) - 1)^2$ за счет трёх независимых соотношений типа (2), получающихся из трёх различных экспериментов. Оценку векторного неизвестного можно затем уточнять итерационно на основе найденных значений $(\hat{\varepsilon}_2(\mathbf{r}) - 1)$.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-22-00042).

- [1] Duck F.A. Physical Properties of Tissue. (London: Academic Press, 1990).
 [2] Gong X., Liu X., Zhang D. Proceedings of 18th ISNA. P. 444. (New York: American Institute of Physics, 2008).

- [3] Буров В.А., Шмелев А.А., Зотов Д.И. Акуст. журн. **59**, № 1. С. 31. (2013).
 [4] Буров В.А. и др. Акуст. журн. **58**, № 1. С. 57. (2012).

Problems of third-order nonlinear acoustical tomography based on coded waves

R. V. Kryukov^a, O. D. Rumyantseva, P. A. Ivanova

Department of acoustics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia
 E-mail: ^aburov@phys.msu.ru

Methods of acoustical tomography of the third-order nonlinear parameter for the purpose of medical diagnostics are considered. Tomographic schemes based on noncollinear interaction of three coded waves, allowing to obtain numerical values of nonlinear parameter, are preferred.

PACS: 43.25.Lj, 43.60.Pt, 43.60.Rw, 43.60.Kx

Keywords: third-order nonlinear acoustical tomography, second- and third-order nonlinear acoustical parameters, coded waves.

Received 27.07.2015.

Сведения об авторах

1. Крюков Роман Вячеславович — аспирант; тел.: (495) 939-30-81, e-mail: burov@phys.msu.ru.
2. Румянцева Ольга Дмитриевна — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (495) 939-30-81, e-mail: burov@phys.msu.ru.
3. Иванова Полина Андреевна — студент; тел.: (495) 939-30-81, e-mail: burov@phys.msu.ru.