

6. *Гринберг Я.З.* СКЭНАР: новые результаты, новые гипотезы // Известия ЮФУ. – 2008. – № 5(82). – С. 127–130.
7. *Гринберг Я.З., Унакафов М.А.* Способ электровоздействия на живой организм и устройство для его осуществления. Патент Российской Федерации № RU2325930.

Гринберг Яков Зальманович

Закрытое акционерное общество «ОКБ «РИТМ».

E-mail: Grin@scenar.com.ru.

347900, Ростовская область, г. Таганрог, ул. Петровская, 99, тел.: (8634)623179.

Генеральный директор.

Grinberg Jacov Zalmanovich

Ritm OKB ZAO.

E-mail: Grin@scenar.com.ru.

99, Petrovskaya, Taganrog, 347900, Russia, Phone: (8634)327929.

PhD.

Унакафов Михаил Анатольевич

Закрытое акционерное общество «ОКБ «РИТМ».

E-mail: mau@rista.ru.

347900, Ростовская область, г. Таганрог, ул. Петровская, 99, тел.: (8634)383963.

Зав. отделом.

Unakafov Mikhail Anatolievich

Ritm OKB ZAO.

E-mail: mau@rista.ru.

99, Petrovskaya, Taganrog, 347900, Russia, Phone: (8634)383963.

Chief of department.

УДК 534.222; 534.7

С.Н. Гурбатов, И.Ю. Демин, Н.В. Прончатов-Рубцов

**ЧИСЛЕННОЕ И ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
РАСПРОСТРАНЕНИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН
В МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ**

Приведены результаты численного и физического моделирования распространения нелинейных акустических волн в мягких биологических тканях. Показана эффективность использования биспектрального анализа для медицинской диагностики медико-биологических сред.

Нелинейная акустика; мягкие биологические ткани; численное моделирование.

S.N. Gurbatov, I.Yu. Demin, N.V. Pronchatov-Rubtsov

**NUMERICAL AND PHYSICAL ANALYSIS OF PROPAGATION OF LOW
FREQUENCY ACOUSTIC WAVES IN SOFT TISSUES**

Use of principles nonlinear acoustic tomography allows finding out connection of nonlinear parameters of soft biological tissues with their structural and functional characteristics. In our experiments agar phantom, pig tissue (pork) and myoma were used. The method of measurement of nonlinear propagation characteristics of low frequency vibration in the tissues by using bispectral analysis has been described.

Nonlinear acoustics; soft tissues; numerical analysis.

В последние годы в медицинской диагностике все большее значение приобретают вопросы определения не только линейных параметров мягких биологических тканей, но и изучение нелинейных характеристик биомедицинских сред [1-2]. Так в работе [3] на низких частотах (100-300 Гц) предложен способ определения нелинейного параметра мягких биологических тканей с использованием биспектрального анализа. Развитию данного метода с добавлением результатов численного моделирования посвящена настоящая статья.

При распространении интенсивного низкочастотного акустического сигнала в мягких биологических тканях происходит искажение (укручение) волнового фронта, а следовательно, и генерация новых гармоник, что обусловлено нелинейностью среды. Для определения степени искажения низкочастотной волны введем параметр

$$N = \frac{|A_3|}{|A_1|}, \quad (1)$$

определяемый как отношение амплитуды 3-й гармоники к амплитуде основной гармоники исходного сигнала. В работе [3] показано, что параметр нелинейности мягких биологических тканей Γ связан с параметром N определенным соотношением. Поэтому для того чтобы оценить нелинейность среды, необходимо точно и эффективно измерять параметр N .

При физическом моделировании распространения интенсивных низкочастотных волн исследовались разнообразные виды медико-биологических сред: агар-желатин с добавлением графита, свинина и миома (uterine leiomyoma). Функциональная схема акустической томографии нелинейных характеристик мягких биологических тканей приведена на рис. 1.

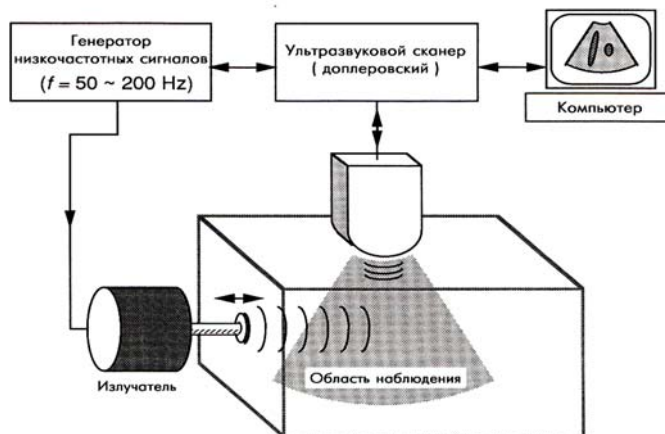


Рис. 1. Функциональная схема акустической томографии нелинейного параметра мягких биологических тканей

Генератор низкочастотных сигналов подавал на механический излучатель сигналы с частотами 75–200 Гц и амплитудами 60–150 мкм. Доплеровский ультразвуковой сканер использовал центральную частоту для пробных волн 3,5 МГц.

Особенностью метода томографии параметра нелинейности и пространственной реконструкции распределения линейных и нелинейных параметров био-

акустических сред является использование эффекта когерентного обратного рассеяния. Для увеличения отношения сигнал/шум на выходе устройства к Доплеровскому ультразвуковому методу томографии был приспособлен биспектральный анализ. В отличие от обычной спектральной обработки применение биспектров позволяет разнести вклады различных нелинейных взаимодействий на плоскости частот, что приводит к возможности их идентификации.

Измерения проводились для различных видов функционального состояния объекта (мягкий и жесткий), а также сроков хранения образца, смена направления распространения волны и т.д. В табл. 1. приведены экспериментальные данные по измерению линейных и нелинейных характеристик биоакустических сред. Полученные экспериментальные и численные результаты являются свидетельством структурной чувствительности нелинейных характеристик мягких биологических тканей, что позволяет сделать вывод об их ценности для биомедицинской диагностики.

Таблица 1

Исследуемый объект	Условия	Эластичность μ (Н/м ²)	Нелинейность Γ
Агар (желатин)	Мягкий	16700	1,45
	Жесткий	155000	11,3
Свинина	Мягкая	22000	2,1
	Жесткая	25000	2,6
Миома	Мягкая	21000	2,2
	Жесткая	56600	8,84

Для сопоставления результатов физического и численного экспериментов по распространению интенсивных акустических волн в мягких биологических тканях в математической среде программирования MATLAB проведено сравнение спектрального и биспектрального способов определения нелинейного параметра N . Для моделирования эволюции нелинейных акустических волн на стадии до образования разрывов в решении уравнения Бюргерса было предложено использовать амплитуды первых трех гармоник акустического сигнала с аддитивным добавлением гауссова шума (с нулевым средним и единичной дисперсией) с определенным весовым коэффициентом (вид реализации такого сигнала приведен на рис. 2):

$$x(t, Z) = \sum_{n=1}^3 A_n \sin(2\pi n f_0 t) + \eta n(t), \quad (2)$$

где $A_n = 2J_n(nZ)/nZ$ – n -я гармоника, выражается через функции Бесселя n -го порядка 1-го рода. Безразмерный параметр $Z = z/z_p$ определяется отношением расстояния до образования разрыва z к расстоянию z_p , на котором происходит разрыв. Это расстояние определяется свойствами среды: модулем Юнга E , плотностью ρ , параметром Γ , который характеризует нелинейность среды, а также частотой и амплитудой начального возмущения f_0 и A_0 .

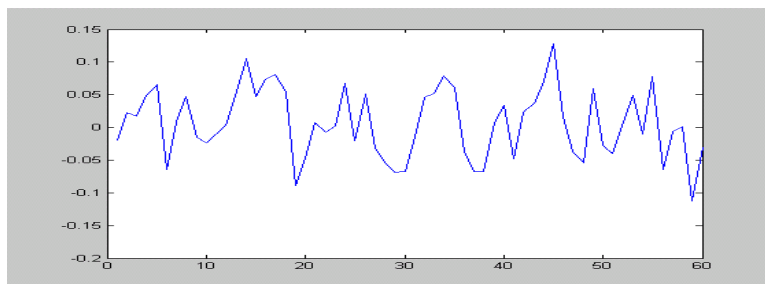


Рис. 2. Форма моделированного сигнала

Проведем сравнение двух способов измерения нелинейного параметра N: спектрального и биспектрального. Для сигнала $x(t)$, заданного корреляционными функциями $R_{xx}(\tau)$ и $R_{xx}(\tau_1, \tau_2)$, определим спектр мощности и биспектр следующим образом, соответственно,

$$P(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{xx}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \tag{3}$$

$$B(f_1, f_2) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} R_{xx}(\tau_1, \tau_2) e^{-j2\pi(f_1\tau_1 + f_2\tau_2)} d\tau_1 d\tau_2$$

Для моделированного сигнала, представленного на рис. 2, соответствующие спектр мощности и биспектр проиллюстрированы на рис. 3,а и 3,б соответственно.

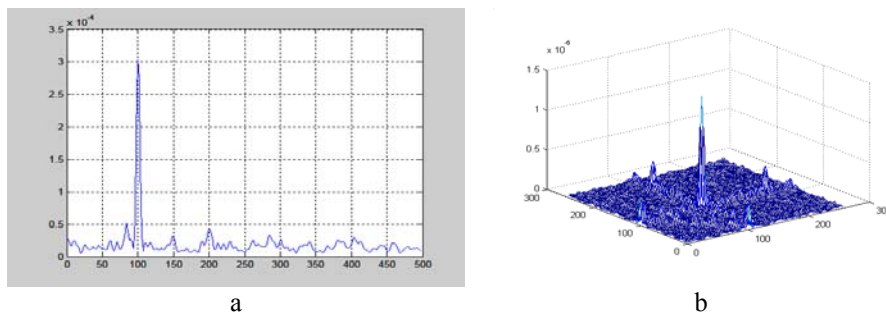


Рис. 3. Спектр (а) и биспектр (б) сигнала

С учетом выражений (3) введем параметр спектра мощности N_p и параметр биспектра N_b и сравним их с параметром N (1) в случае регулярного сигнала $x(t)$:

Для регулярных диагностических сигналов параметр N можно измерять, используя как спектральный, так и биспектральный анализ. Однако реальные медико-биологические среды существенно неоднородны, поэтому в диагностическом сигнале, наряду с регулярными компонентами, будут присутствовать и шумовые $n(t)$. Наличие дополнительных флуктуаций приведет к погрешностям в определении параметра N . Возникает вопрос об эффективности спектрального или биспектрального способов измерения N . Теоретические расчеты показывают, что если $n(t)$ – дельта-коррелированный гауссовый шум, то соотношение между параметрами N , N_b , N_p будет следующее: $N_b \neq N$, $N_p = N$. Следовательно, биспектральный способ измерения N оказывается эффективнее.

Для подтверждения эффективности использования биспектрального анализа для диагностики мягких биологических тканей на рис. 4,а и рис. 4,б приведены результаты численного эксперимента по моделированию измерения параметра N спектральным и биспектральным способами при различном уровне шума для двух реальных медико-биологических сред с заданными параметрами на различных расстояниях z.

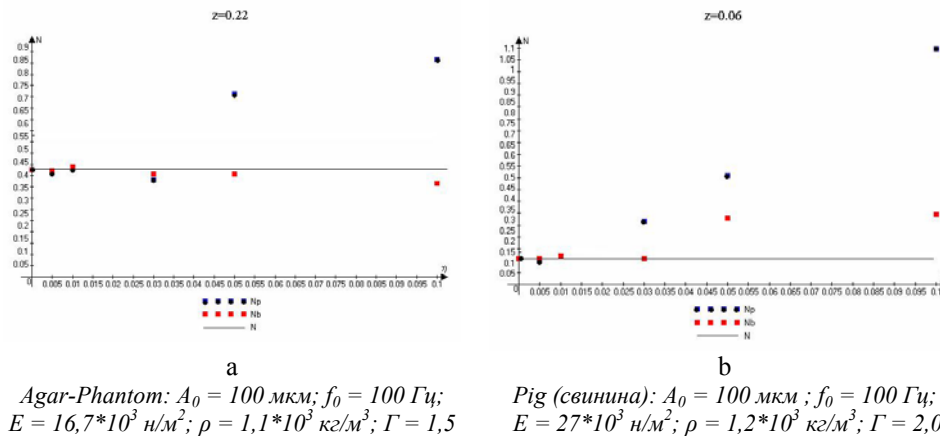


Рис. 4. Результаты численного эксперимента

Зависимость приведена для разных значений "веса шума" η . Пунктиром на этих рисунках показано реальное значение N. Из этих графиков видно, что спектральный способ оценки нелинейного параметра N при малом уровне шумового сигнала ничем не уступает биспектральному. Однако при большом искажении полезного сигнала при спектральном анализе нельзя точно выявить гармоники, присутствующие в сигнале, а, следовательно, невозможно оценить параметр N с достаточной высокой точностью. Биспектральный же анализ при сравнительно большом уровне шума дает результаты измерения, близкие к реальным.

Результаты физического эксперимента так же, как и результаты численного эксперимента, подтверждают эффективность использования биспектрального анализа для диагностики линейных и нелинейных характеристик мягких биологических тканей. Процедура биспектрального анализа позволяет более надежно проводить томографию медико-биологических сред, которые неоднородны по своей структуре, а значит и диагностические сигналы имеют сильное зашумление.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ – 08-02-00631, 09-02-97074 и ведущей научной школы НШ – 1055.2008.2.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Применение ультразвука в медицине: Физические основы: Пер. с англ. / Под ред. К. Хилла. – М.: Мир, 1989. – 568с.
2. Руденко О.В. Нелинейные волны: некоторые биомедицинские приложения // Успехи физических наук. 2007, Т. 177. №4. – С. 374-383.
3. Kameyama K., Inoue T., Demin I.Yu., Kobayashi K., Sato T. Acoustical tissue nonlinearity characterization using bispectral analysis // Signal Processing, 1996. – V. 53. – P. 117-131.
4. Гурбатов С.Н., Малахов А.Н., Саичев А.И. Нелинейные случайные волны в средах без дисперсии. – М.: Наука, 1990.

Гурбатов Сергей Николаевич

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского.

E-mail: gyrb@rf.unn.ru.

603950, г. Н. Новгород, пр. Гагарина, 23, тел.: (831)4656305.

Профессор, д.ф.-м.н.

Gurbatov Sergey Nikolaevich

Nizhniy Novgorod State University.

E-mail: gyrb@rf.unn.ru.

23, Gagarin's avenue, N. Novgorod, 603950, Russia, Phone: (831)4656305.

Professor, Doctor of Sc.

Демин Игорь Юрьевич

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского.

E-mail: demin@rf.unn.ru.

603950, г. Н. Новгород, пр. Гагарина, 23, тел.: (831)4656305.

Доцент, к.ф.-м.н.

Demin Igor Yurievich

Nizhniy Novgorod State University.

E-mail: demin@rf.unn.ru.

23, Gagarin's avenue, N. Novgorod, 603950, Russia, Phone: (831)4656305.

Assistant professor, Cand. of Sc.

Прончатов-Рубцов Николай Васильевич

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского.

E-mail: nikvas@rf.unn.ru.

603950, г. Н. Новгород, пр. Гагарина, 23, тел.: (831)4656305.

Доцент, к.ф.-м.н.

Pronchatov-Rubtsov Nikolay Vasilievich

Nizhniy Novgorod State University.

E-mail: nikvas@rf.unn.ru.

23, Gagarin's avenue, N. Novgorod, 603950, Russia, Phone: (831)4656305.

Assistant professor, Cand. of Sc.

УДК 577.354

А.В. Зимин, А.А. Родионов, Н.Е. Покровская**ОСОБЕННОСТИ ВОСПРИЯТИЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ РАЗЛИЧНЫМИ ВИДАМИ
ГИДРОБИОНТОВ**

Исследовались особенности восприятия гидробионтами (длиннопалыми раками, карповыми рыбами) вариаций электромагнитных полей на частотах от 0,01 до 100 Гц. Установлены частотные характеристики электро- и магниточувствительности у исследованных гидробионтов. Подтверждается гипотеза о предчувствии принципиально различными видами организмов приближения опасных явлений погоды посредством восприятия электромагнитных полей, распространяющихся на частотах 7-8 Гц.

Крайне низкочастотные электромагнитные поля; гидробионты; экологический фактор; предупреждения об опасных явлениях погоды.