

На правах рукописи



СТАРЧЕНКО Ирина Борисовна

**НЕЛИНЕЙНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН
В НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ:
СТАТИСТИКА И НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА**

Специальности:

01.04.06 – акустика

05.13.01 – системный анализ, управление и обработка информации

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Таганрог 2007

Работа выполнена в Технологическом институте Южного федерального университета в г. Таганроге на кафедре электрогидроакустической и медицинской техники.

Научные консультанты: доктор технических наук, профессор В.И. ТИМОШЕНКО (ТТИ ЮФУ, г. Таганрог); доктор технических наук, профессор В.Г. ЗАХАРЕВИЧ (ЮФУ, г. Ростов-на-Дону).

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор КОЛЕСНИКОВ А.А. (ТТИ ЮФУ, г. Таганрог); доктор технических наук, с.н.с. КУЗНЕЦОВ В.П. (ИО РАН, г. Москва); доктор технических наук, профессор МИТЬКО В.Б. (НИИ РЭС ПЧС «Прогноз», СПбГЭТУ, г. С.-Петербург).

Ведущая организация: Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДО РАН, г. Владивосток

Защита состоится « 7 » июня 2007 г. в 14²⁰ на заседании диссертационного совета Д 212.208.23 в Технологическом институте Южного федерального университета в г. Таганроге.
Адрес: 347928, Россия, г. Таганрог Ростовской области, ул. Шевченко, 2, ауд. Е-306.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан « 6 » марта 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.т.н., проф.



Чернов Н.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации



Рассмотрение работы параметрических антенн в составе гидроакустического комплекса для целей дистанционного зондирования водной среды необходимо проводить с учетом вероятностных характеристик гидроакустических сигналов. В этом случае особую важность приобретает моделирование процессов распространения звука, т.к. проведение экспериментов в натуральных условиях не всегда возможно и имеет определенные ограничения. В то же время кафедра электрогидроакустической и медицинской техники Технологического института Южного федерального университета в г. Таганроге неоднократно являлась участником различных океанских экспедиций, что дало возможность накопления огромного количества экспериментального материала, который может быть использован для проверки адекватности моделей.

Одним из методов, позволяющих внести уточнение в модель нелинейного взаимодействия акустических волн, является рассмотрение низкочастотного поля параметрической антенны, основанное на аддитивности процессов, оказывающих влияние на формирование акустического поля. Детальное рассмотрение «тонких» особенностей формирования поля параметрической антенны проводилось для наиболее распространенных задач, встречающихся в исследовательской практике:

- влияние гидродинамического потока, располагающегося в области нелинейного взаимодействия, на формирование акустического поля параметрической антенны (Блохинцев Д.И., Чернов Л.А., Хохлова В.А., Наугольных К.А., Назаров В.Е., Воронин В.А., Кириченко И.А. и др.);
- формирование акустического поля при рассеянии первичных сигналов на детерминированных неоднородностях сферической формы (Нигул У.К., Шендеров Е.Л., Заграй Н.П. и др.);
- исследование влияния вероятностного характера акустических сигналов и неоднородностей среды распространения на статистические характеристики акустического поля (Чернов Л.А., Татарский В.И., Рытов С.М., Ольшевский В.В., Зайцев В.Ю., Раевский М.А., Руденко О.В., Солюян С.И. и др.)

Повышение требований к гидроакустическим средствам приводит к проблеме поиска новых методов разработки аппаратуры, математических и физических моделей акустических полей в океане.

Нелинейные процессы, происходящие в воде при распространении волн конечной амплитуды, хорошо исследованы. Разработаны приборы, использующие нелинейные свойства воды – параметрические антенны. Для формирования параметрических антенн – разновидности гидроакустических средств, использующих для функционирования нелинейные свойства среды распространения, используется нелинейность водной среды. Такие антенны можно рассматривать, как нелинейную систему с числом степеней свободы больше 2. Для их описания используются нелинейные дифференциальные уравнения второго порядка в частных производных, например, уравнение Хохлова-Заболотской-Кузнецова (ХЗК). Процессы распространения и взаимодействия в воде волн

конечной амплитуды достаточно хорошо изучены и освещены в литературе (P.J. Westervelt, N. & S. Tjøtta, L. Bjorno, M.F. Hamilton, Остроумов Г.А., Зарембо Л.К., Хохлов Р.В., Новиков Б.И., Руденко О.В., Солюян С.И., Кузнецов В.П., Тимошенко В.И. и др.). Процессы формирования в воде направленного излучения с узкой диаграммой направленности в широкой полосе частот по ряду причин могут рассматриваться как нелинейная система, на которую оказывают влияние нелинейные свойства среды распространения акустических волн, а также диссипация, дифракция и искажения сигналов, как в электрическом, так и в акустическом трактах. Чтобы расширить представления о собственных свойствах системы следует перейти от линейной динамики к нелинейной. Нелинейная динамика или динамический хаос – это быстро развивающаяся область науки. Методы нелинейной динамики специально разработаны для анализа нелинейных систем, они дополняют классические методы (например, Фурье-анализ) и являются мощным инструментом исследования. Акустическое поле, создаваемое при распространении в нелинейной среде волн конечной амплитуды, можно считать комплексной нелинейной системой с широким частотным спектром и, следовательно, применить для его анализа методы нелинейной динамики. Такой новый подход предложен и реализован автором в данной работе.

Таким образом, можно выделить два основных направления исследований нелинейного взаимодействия акустических волн в неоднородных средах. С одной стороны – это представление в виде стохастического процесса, который можно характеризовать статистическими, вероятностными показателями. С другой стороны можно представить нелинейное взаимодействие акустических волн и, соответственно, параметрическую антенну, как динамическую систему, эволюционирующую во времени и пространстве, и предложить для ее описания методы нелинейной динамики.

Цели и задачи работы

Целью данной диссертационной работы является исследование детерминистских и статистических свойств поля параметрической антенны, формируемого в неоднородной среде.

Для реализации поставленной цели ставятся следующие *задачи диссертационной работы*:

1. Разработать обобщенную информационную модель параметрической гидролокации для ближнего и дальнего поля с учетом процессов нелинейного взаимодействия звуковых волн в статистически неоднородных средах.
2. Выполнить декомпозицию различных уровней обобщенной информационной модели параметрической гидролокации: семантическую, морфологическую, алгоритмическую, модульную.
3. Рассмотреть особенности детерминистского и вероятностного подхода к описанию поля параметрической антенны, выявить границы применимости и достоверности.

4. Разработать математическую модель поля параметрической антенны на основе уравнения ХЗК в среде, содержащей детерминированные неоднородности и выполнить расчеты.
5. Разработать математическую модель поля параметрической антенны на основе уравнения ХЗК в среде, содержащей статистические неоднородности и выполнить расчеты.
6. Провести экспериментальные исследования поля параметрической антенны в среде с моделями детерминированных и статистических неоднородностей, сравнить их с полученными теоретическими зависимостями.
7. Разработать алгоритм численного анализа уравнений Бюргерса и ХЗК для неоднородных сред на основе метода коллокации лифтинговых вейвлетов.
8. Исследовать распространение и нелинейное взаимодействие акустических волн методами нелинейной динамики. Оценить степень хаотичности сигналов.
9. Разработать принципы построения и алгоритмы аппаратно-программного комплекса для исследований стохастических и динамических процессов в гидроакустике.

Методика исследования

В работе использованы методы анализа характеристик параметрических антенн, основанные на решении уравнения Хохлова–Заболотской–Кузнецова для однородных и неоднородных сред; методы математического анализа. Основные выводы, положения и рекомендации сравниваются с известными результатами и теоретически обосновываются. Физические эксперименты проводились в лабораторных условиях. Математические модели сопоставлялись с физическими представлениями и моделями. Достоверность измерений обеспечивалась метрологической базой, соответствующей обработке результатов и сравнением с результатами, полученными другими методами и средствами.

Научная новизна диссертационной работы

Научная новизна проведенных исследований заключается в рассмотрении как теоретически, так и экспериментально, пространственных и вероятностных характеристик параметрической антенны в присутствии статистических и детерминированных неоднородностей, построении имитационных моделей гидролокации с использованием параметрических антенн, учитывающих статистические свойства неоднородной среды распространения акустических волн, а также анализе нелинейного распространения и взаимодействия акустических волн методами нелинейной динамики.

Основные научные результаты работы:

1. Разработана операторная модель параметрической гидролокации для ближнего и дальнего поля с учетом процессов нелинейного взаимодействия звуковых волн в статистически неоднородных средах.

2. Проведена декомпозиция операторной модели параметрической гидролокации. Рассмотрены семантический, морфологический, алгоритмический и модульный уровни декомпозиции.
3. Разработана математическая модель поля параметрической антенны на основе уравнения ХЗК в сферических координатах в среде, содержащей детерминированные неоднородности.
4. Разработана математическая модель статистических характеристик параметрической антенны на основе уравнения ХЗК в среде, содержащей статистические неоднородности.
5. Проведены экспериментальные исследования поля параметрической антенны в среде с моделями детерминированных и статистических неоднородностей, сравнение с полученными теоретическими зависимостями показало удовлетворительный уровень совпадения.
6. Разработан алгоритм численного анализа уравнений Бюргерса и ХЗК для неоднородных сред на основе метода коллокации лифтинговых вейвлетов, позволяющий снизить вычислительные затраты
7. Методы нелинейной динамики применены к исследованию распространения и нелинейного взаимодействия акустических волн. Показано, что эти процессы можно характеризовать как квазихаотические и в некоторых случаях – хаотические.
8. Разработаны алгоритм и структура аппаратно-программного комплекса для исследований стохастических и динамических процессов в гидроакустике.

Научная и практическая значимость работы

Разработаны имитационные операторные модели параметрической гидролокации, нелинейного взаимодействия, математическая модель поля параметрической антенны на основе уравнения ХЗК в сферических координатах в среде, содержащей детерминированные неоднородности, математическая модель статистических характеристик параметрической антенны на основе уравнения ХЗК в среде, содержащей статистические неоднородности, разработаны теоретические и численные методы их решения и выработаны рекомендации по разработке программно-аппаратного комплекса для исследований стохастических и динамических процессов в гидроакустике.

Разработанные математические модели позволяют получить новые решения задач описания и расчета полей акустических параметрических антенн и их характеристик в присутствии детерминированных и статистических неоднородностей.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований и их сопоставления использованы при разработке структуры программно-аппаратного комплекса с параметрическим излучающим трактом для лабораторных исследований водной среды.

Внедрение результатов работы

Разработанные в диссертации математические модели, методы их решения, алгоритмы, полученные результаты и выводы использованы при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по модернизации и унификации гидроакустической аппаратуры, проводимых в НИИ «Бриз» (г. Таганрог) и ОКБ «Ритм» (г. Таганрог), в проекте «Научно-образовательный эколого-аналитический центр системных исследований, математического моделирования и геоэкологической безопасности Юга России» (г. Таганрог) при построении и исследовании пространственно-трехмерных математических моделей мелководных протяженных водоемов, в НИПИ «Океангеофизика» (г. Геленджик), в Высокогорном институте РАН, г. Нальчик и используются в учебном процессе в Технологическом институте Южного федерального университета в г. Таганроге.

Апробация работы

Основные результаты работы обсуждались на следующих научно-технических конференциях:

1. VI–XVIII сессиях Российского акустического общества. Москва, 1997–2006 гг.
2. VII–X Школах-семинарах акад. Л.М. Бреховских «Акустика океана». Москва, 1998–2005 гг.
3. НТК «Экология – Море и человек». Таганрог, ТРТУ. 2000-2006 гг.
4. НТК «Медицинские информационные системы», Таганрог, ТРТУ. 1998–2004 гг.
5. НТК профессорско-преподавательского состава ТРТУ, Таганрог, 1997 – 2006 г.
6. 49 сессии Американского акустического общества (ASA), апрель, 2005.
7. 1-ой Международной конференции «Гидроакустические измерения: методики и результаты» (Underwater Acoustic Measurements: Technologies and Results), Ираклион, Греция, июнь 2005.
8. Международной конференции «Новые концепции защиты морских портов, прибрежная безопасность и подводная связь» (New Concepts for Harbour Protection, Littoral Security and Underwater Acoustic Communications), Стамбул, Турция, июль, 2005.
9. Форуме акустиков (Forum Acusticum 2005), Будапешт, Румыния, сентябрь 2005.
10. 8-ой Европейской конференции по гидроакустике (Eight European Conference on Underwater Acoustics), Португалия, июнь 2006.
11. 9-ой Западно-тихоокеанской акустической конференции (9th Western Pacific Acoustics Conference), Сеул, Корея, июнь 2006.
12. Международном конгрессе по ультразвуку (International Congress on Ultrasonics), Вена, Австрия, апрель, 2007.

Содержание диссертационной работы докладывалось и обсуждалось на заседаниях кафедр:

электрогидроакустической и медицинской техники, физики, высшей математики, синергетики и процессов управления, автоматизированных систем научных исследований и эксперимента, радиоприемных устройств и телевидения ТТИ ЮФУ, Таганрог, 2004, 2005, и 2006 гг.

Публикации

По материалам диссертационной работы опубликовано 58 печатных работ, среди которых 3 монографии, 41 статья и 14 тезисов докладов. 19 работ опубликовано в журналах, входящих в «Перечень ведущих научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук».

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы, включающего 226 наименований, приложений. Содержание диссертационной работы изложено на 294 страницах, из них 243 стр. машинописного текста, 102 иллюстрации. В приложениях содержатся акты о внедрении результатов диссертационной работы

Научные положения, выносимые на защиту

1. Операторная модель параметрической гидролокации для статистически-неоднородной среды.
2. Декомпозиция имитационной модели параметрической гидролокации.
3. Теоретическая модель поля параметрической антенны в средах, содержащих детерминированные неоднородности, на основе уравнения ХЗК для движущейся среды в сферических координатах.
4. Теоретическая модель стохастических характеристик параметрической антенны в статистически-неоднородных средах на основе уравнения ХЗК.
5. Экспериментальные лабораторные исследования нелинейного взаимодействия звуковых волн в средах с моделями детерминированных и случайных неоднородностей.
6. Моделирование нелинейного взаимодействия в неоднородных средах во временной области на основе численного решения уравнения ХЗК.
7. Реконструированные аттракторы процессов распространения и взаимодействия акустических волн и основные нелинейные показатели, указывающие на присутствие динамического хаоса в системе.
8. Принципы и алгоритмы построения аппаратно-программного комплекса для лабораторных исследований стохастических и динамических нелинейных процессов в гидроакустике.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, кратко изложено содержание диссертации и основные научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассматриваются системные вопросы моделирования работы параметрических антенн в условиях реальной океанской среды. Рассмотрены общие принципы построения имитационных акустических моделей. Разработаны операторные модели параметрической гидролокации для случая расположения объекта локации в ближней и дальней зонах. Проведена декомпозиция (детализация) разработанных моделей.

Гидролокационная система представляет собой совокупность средств гидролокации и среды распространения звука. В линейном случае среда учитывается искажениями, вносимыми в сигнал, реверберационной помехой и др. В случае параметрической гидролокации на среду накладывается дополнительная важная функция формирования самой параметрической антенны. Схему параметрической гидролокации можно изобразить в виде, показанном на рис. 1.

Здесь $c_1(t, \rho) = A c_0(t)$ – сигнал, излученный в среду; I – оператор излучателя; $c_2(t)$ – электрический сигнал, подаваемый на гидроакустический преобразователь; $\rho = \rho(x, y, z)$ – переменная плотность.

Пусть P_A – оператор, учитывающий нелинейное взаимодействие. Тогда

$$P_A = [c_1(t, \rho) c_2^*(t, \rho)] = c_{-}(t, \rho)$$

– модель двухчастотного взаимодействия; $c_{-}(t, \rho)$ – сигнал разностной частоты.

С учетом искажений сигналов по пути распространения

$$P_A [M_1 c_1(t, \rho) M_2 c_2^*(t, \rho)] = M_{-} c_{-}(t, \rho) = c_{-}^M(t, \rho),$$

где M_1 , M_2 , M_{-} – операторы, учитывающие искажение сигналов по пути распространения.

Объект локации вызывает отражение и рассеяние сигнала $c_{-}^M(t, \rho)$, так что эхо-сигнал $s^M(t, \rho)$ вблизи объекта

$$s^{M,T}(t, \rho) = T c_{-}^M(t, \rho),$$

где T – оператор свойств объекта.

Принимаемый сигнал $s_{-}(t, \rho)$ с учетом искажений по мере обратного распространения будет определяться как

$$s_{-}(t, \rho) = M' s^{M,T}(t, \rho) = M' T c_{-}^M(t, \rho) = M' T M_{-} c_{-}(t, \rho).$$

Для упрощения можно в ряде случаев считать, что $M' = M_{-}$. Однако, для дальней локации необходимо учитывать пространственно-временную изменчивость среды. Поэтому в общем случае $M' \neq M_{-}$.

Схема значительно усложняется, когда объект локации располагается в ближней зоне, т.е. эхо-сигнал складывается из суммы отраженных первичных сигналов, отраженного сигнала разностной частоты и результата взаимодействия отраженных первичных сигналов (рис. 2).

При локации в ближней зоне на объект T попадают сигналы как разностной $c_{-}^M(t, \rho)$, так и исходных частот $c_1^M(t, \rho)$ и $c_2^M(t, \rho)$, которые можно записать как

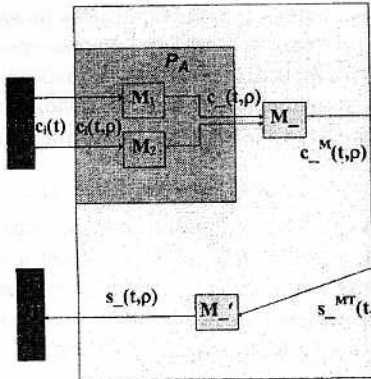


Рис. 1. Общая схема параметрической гидролокации

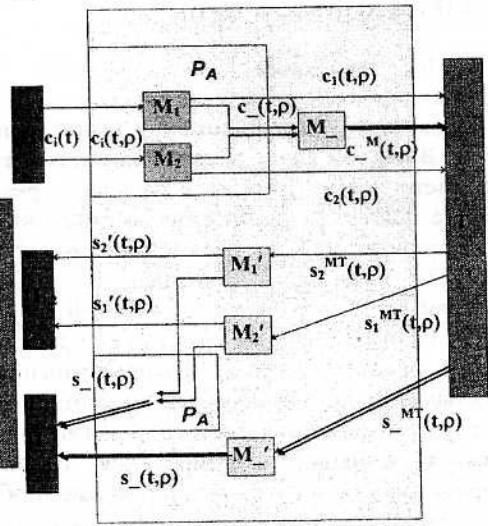


Рис. 2. Детализированная схема параметрической гидролокации

$$c_1^M(t, \rho) = M_1 c_1(t, \rho);$$

$$c_2^M(t, \rho) = M_2 c_2(t, \rho).$$

Вблизи объекта T после отражения и рассеяния будет существовать набор сигналов: эхо-сигнал разностной частоты $s_-^M(t, \rho)$ и эхо-сигналы частот накачки, которые определяются как

$$s_1^{MT}(t, \rho) = T c_1^M(t, \rho);$$

$$s_2^{MT}(t, \rho) = T c_2^M(t, \rho).$$

Сигналы частот накачки $s_1^{MT}(t, \rho)$ и $s_2^{MT}(t, \rho)$, взаимодействуя друг с другом, образуют сигнал разностной частоты $s_-'(t, \rho)$. С учетом искажений сигналов M_1' и M_2' , а также оператора нелинейного взаимодействия P_A , можно последовательно записать

$$s_1(t, \rho) = M_1 s_1^{MT}(t, \rho) = M_1 T c_1^M(t, \rho) = M_1 T M_1 c_1(t, \rho);$$

$$s_2(t, \rho) = M_2 s_2^{MT}(t, \rho) = M_2 T c_2^M(t, \rho) = M_2 T M_2 c_2(t, \rho);$$

$$s_-'(t, \rho) = P_A[s_1(t, \rho) s_2^*(t, \rho)] = P_A[M_1 T M_1 c_1(t, \rho) M_2 T M_2 c_2^*(t, \rho)] = T^2 M_- M_- c_-^M(t, \rho) = T^2 M_- c_-^M(t, \rho),$$

где $s_1(t, \rho)$ и $s_2(t, \rho)$ – эхо-сигналы исходных частот с учетом искажений; $s_-'(t, \rho)$ – результат взаимодействия сигналов $s_1(t, \rho)$ и $s_2(t, \rho)$.

Суммарный сигнал разностной частоты на приемнике Π_- определится как

$$s_{\Sigma}(t, \rho) = s_-(t, \rho) + s_-'(t, \rho) = T M_- c_-^M(t, \rho) + T^2 M_- c_-^M(t, \rho) = T M_- c_-^M(t, \rho) [1 + T] = s_-(t, \rho) [1 + T].$$

Главные методические концепции декомпозиции применительно к построению акустической модели океана соответствуют ее расчленению на подсистемы и такому последующему формальному их описанию, которое позволяет вычислить (на основе задания критериев, ограничений, априорной

информации об акустических условиях гидролокации и соответствующих гипотез) характеристики имитационной модели, которые существенны в решаемой научной или прикладной задаче. Рассмотрим разновидности иерархических подсистем, которые возникают в процессе декомпозиции при построении акустической модели применительно к общей модели параметрической гидролокации.

Акустическая сложная система описывается моделью, для которой можно предложить иерархию подсистем, состоящую из четырех уровней. Здесь информационная операторная модель гидролокации адаптирована и преобразована для случая параметрической гидролокации, т.е. в качестве гидроакустических средств используются параметрические излучатели, нашедшие широкое применение в ряде гидроакустических задач благодаря своим уникальным свойствам.

Семантические подсистемы – первый уровень декомпозиции. Подсистемы этого типа представляют собой такие части акустической системы, которые соответствуют наиболее укрупненному информационному, гидрофизическому и системному содержанию общей модели параметрической гидролокации как исходной сложной системы. С информационной точки зрения семантические подсистемы описываются с помощью векторных функций векторных аргументов и соответствующими векторными операторами преобразования этих функций. Адекватное описание акустической модели может быть дано с помощью вероятностных характеристик. Пусть

$$\Xi_n(\bar{l}/\bar{\varepsilon}) = \left\langle \eta_n \left[\bar{H}(\bar{\lambda}); \bar{l}/\bar{\varepsilon} \right] \right\rangle - \quad (1)$$

некоторая вероятностная характеристика Ξ_n вектор-функции $\bar{H}(\bar{\lambda})$.

Здесь угловые скобки $\langle \rangle$ означают усреднение по ансамблю реализаций вектор-функции, η_n – оператор преобразования, лежащий в основе формирования вероятностной характеристики; \bar{l} – аргументы, от которых зависит рассматриваемая характеристика; $\bar{\varepsilon}$ – некоторая совокупность условий, в пределах которых акустико-океанологические условия можно считать статистически однородными. Характеристикой типа Ξ_n может быть распределение вероятности, тогда $\Xi_n = P_r$; корреляционная функция $\Xi_n = B$; энергетический спектр $\Xi_n = G$ и т.д. Аргументами \bar{l} могут быть значения \bar{H} , пространственно-временные координаты $(\bar{\rho}, t)$ частота ω и т.д.

На рис. 3 представлена информационно-операторная схема первого уровня декомпозиции, соответствующая семантическим подсистемам. Семантические подсистемы сосредоточены в шести группах, каждая подсистема описывается вектор-функцией определенного типа.

На рис. 3 приняты следующие обозначения: вектор-функции размещены в прямоугульниках; однократные операторы \bar{Q}_{AB} – в одиночных окружностях, а двукратные \bar{Q}_{AB}^C – в двойных окружностях; стрелками обозначены входные данные, которые должны поступать из соответствующих баз данных $B_{(A)(B)}^{(0)(1)}$.

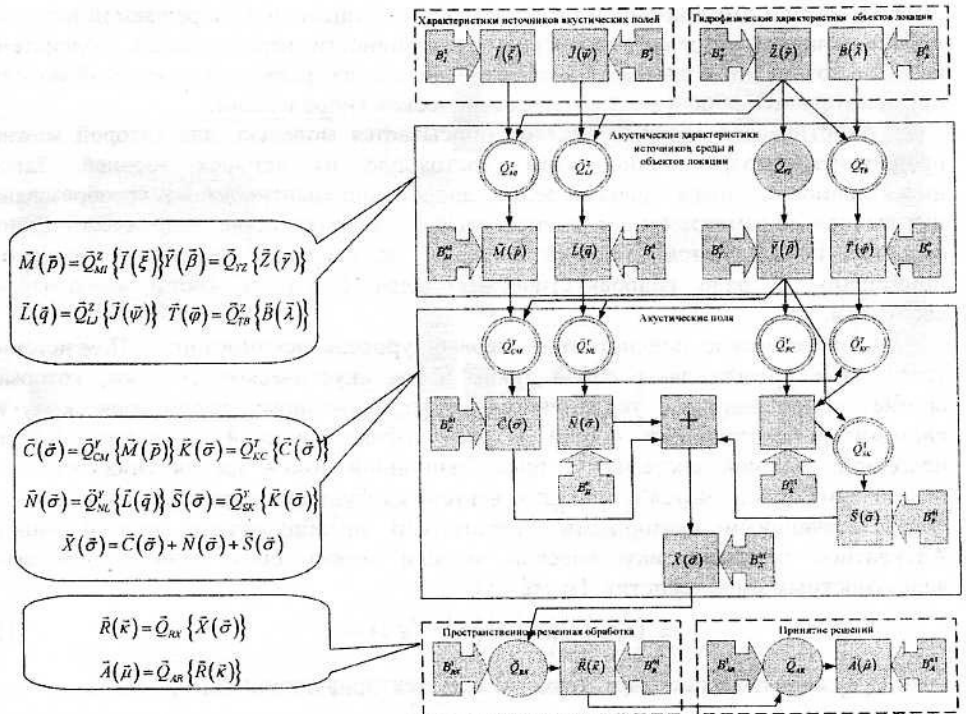


Рис. 3. Здесь вектор-функции: $\vec{I}(\vec{\xi})$ – управляемые источники акустических полей, $\vec{J}(\vec{\psi})$ – характеристики естественных источников акустических шумов, $\vec{Z}(\vec{\gamma})$ – гидрофизические характеристики и $\vec{B}(\vec{\lambda})$ – физические характеристики объектов локации; $\vec{M}(\vec{p})$, $\vec{L}(\vec{q})$, $\vec{Y}(\vec{\beta})$, $\vec{T}(\vec{\varphi})$ – их акустические характеристики, соответственно; акустические поля: прямые $\vec{C}(\vec{\sigma})$, подводных шумов $\vec{N}(\vec{\sigma})$, эхосигнала вблизи объекта локации $\vec{K}(\vec{\sigma})$, эхо-сигнала в произвольной области приема $\vec{S}(\vec{\sigma})$, результирующее поле $\vec{X}(\vec{\sigma})$; $\vec{R}(\vec{\kappa})$ – пространственно-частотно-временной обработки, $\vec{A}(\vec{\mu})$ – принятия решений.

Второй уровень декомпозиции – морфологические подсистемы образуют семантическую подсистему, придавая последней более конкретное содержание, а также определяя внутренние связи, соответствующие принятому уровню формального описания и структуре. Морфологическую декомпозицию семантической подсистемы выполняют путем разложения вектор-функций, описывающих выход этой подсистемы. На рис. 4 показан алгоритм формирования морфологической подсистемы для примера семантической подсистемы управляемых источников акустических полей $\vec{I}(\vec{\xi})$. На рис. 5 и 6, соответственно, приведены морфологический и алгоритмический алгоритмы декомпозиции для подсистемы, показанной на рис. 4.



Рис. 4



Рис. 5



Рис. 6

Во второй главе составлена классификация неоднородностей, возникающих в среде распространения, и типов флуктуаций звукового поля. Схематично представлены задачи, решаемые в данной главе (рис. 7).

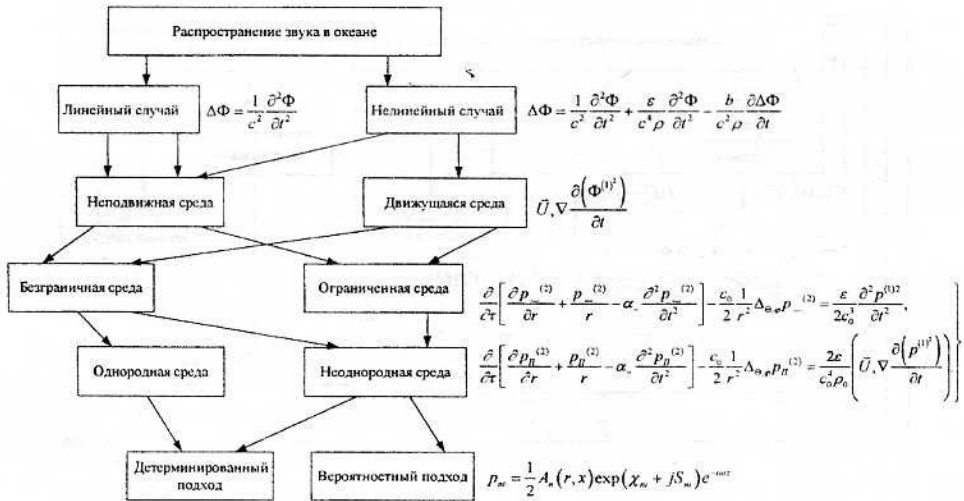


Рис. 7

Проведено теоретическое рассмотрение пространственных характеристик поля параметрической антенны в условиях детерминированных неоднородностей. Неоднородности среды будем считать регулярными, мелкомасштабными, т.е. их волновые размеры меньше или сравнимы с длинами волн исследуемого звукового поля. В качестве моделей неоднородностей рассматриваются акустически жесткая сфера и гидродинамический поток, причем сфера располагается в границах существования потока. Поток движущейся жидкости направлен перпендикулярно оси z , соответственно цилиндрической геометрии задачи. Сфера должна находиться в области нелинейного взаимодействия, чтобы выполнялось условие существования первичных волн, которые, отражаясь от сферического объекта, сформируют вторичную разностную. При этом условии объект можно рассматривать как вторичный параметрический излучатель. Геометрия задачи будет выглядеть следующим образом (рис. 8).

Рассеянное поле можно записать как

$$P_{\Sigma} = r_s P_{отр}^{nl} + r_s^2 P_{нов}^{cf} \quad (2)$$

где $P_{отр}^{nl}$ – уровень звукового давления волны разностной частоты, отраженной от сферической неоднородности; $P_{нов}^{cf}$ – уровень звукового давления волны разностной частоты, вновь сформированной отраженными от сферического объекта волнами накачки; r_s – коэффициент рассеяния, в общем случае частотно-зависимый. Здесь неоднородность можно рассматривать как источник вторичного параметрического излучения. Основное допущение для данного метода состоит в том, что при отражении от сферического объекта образуется сферически расходящийся волновой фронт, что не согласуется с положением, использовавшимся при выводе уравнения ХЗК, об узости и коллинеарности звуковых пучков. Однако заметим, что уравнением ХЗК можно пользоваться не только для описания слабо расходящихся пучков. Даже если пучок дифрагирует

сильно, то уравнение можно использовать для описания приосевой области, в которой «лучи» наклонены под малыми углами к оси z .

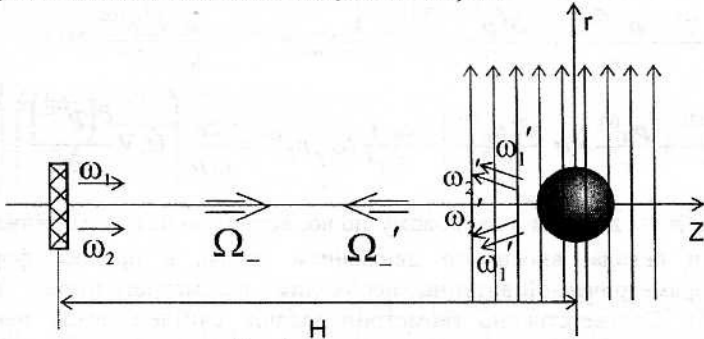


Рис. 8. Геометрия задачи

Решение задачи об излучении сферическим источником двух частот ω_1 и ω_2 с последующим нелинейным взаимодействием проводится на основе уравнения ХЗК, записанного в сферических координатах, соответственно геометрии задачи.

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \left[\frac{\partial p'}{\partial z} - \frac{\varepsilon}{c_0^2} p' \frac{\partial p'}{\partial \tau} + \frac{1}{z} p' - \frac{b}{2c_0^3 \rho_0} \frac{\partial^2 p'}{\partial \tau^2} \right] = \frac{c_0}{2} \Delta_{\perp} p', \quad (3)$$

где p' – уровень звукового давления, ε – параметр нелинейности, b – диссипативный коэффициент, c_0, ρ – скорость звука и плотность среды, τ – время в сопровождающей системе координат, z – координата распространения, $\Delta_{\perp} = \Delta_{\Theta, \varphi}$ – поперечная часть оператора Лапласа, записанная в сферических координатах.

Решение уравнения (3) проводится методом последовательных приближений и во втором приближении для Фурье-компоненты разностной частоты имеет вид

$$p_{-} = \sum_{q=0}^{\infty} \exp \left[- \left(\alpha_{-} \Omega^2 r + \frac{ic_0}{\Omega} \frac{1}{r^3} q(q+1) \right) \right] / r \times \\ \times \int_{r_0}^r Q_q(x) x \cdot \exp \left[\alpha_{-} \Omega^2 x + \frac{ic_0}{\Omega} \frac{1}{x^3} q(q+1) \right] dx \cdot Y_q^{(n)}. \quad (4)$$

Здесь α_{-} – коэффициент затухания по разностной частоте, Ω – разностная частота, r – радиальная координата, $r_0 = a$ – радиус сферы, $Q_q(x)$ – функция источников, $Y_m^{(n)}(\Theta, \varphi) = P_m^{(n)}(\cos \Theta) \sin n\varphi$. Выражение (4) является общим для расчета поля волны разностной частоты, создаваемого сферическим преобразователем первичных волн.

Уравнение второго приближения с учетом добавки за счет конвективной производной в нашем случае имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \left[\frac{\partial p^{(2)}}{\partial r} + \frac{p^{(2)}}{r} - \alpha_{-} \frac{\partial^2 p^{(2)}}{\partial \tau^2} \right] - \frac{c_0}{2} \frac{1}{r^2} \Delta_{\Theta, \varphi} p^{(2)} = \frac{\varepsilon}{2c_0^3} \frac{\partial^2 p^{(1)2}}{\partial \tau^2} + \frac{2\varepsilon}{c_0^4 \rho_0} \left(\bar{U} \cdot \nabla \frac{\partial (p^{(1)})^2}{\partial \tau} \right). \quad (5)$$

Здесь \vec{U} – вектор скорости потока. В силу аддитивности процессов уравнение (5) можно представить в виде суммы двух уравнений

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\partial p_{-}^{(2)}}{\partial r} + \frac{p_{-}^{(2)}}{r} - \alpha_{-} \frac{\partial^2 p_{-}^{(2)}}{\partial t^2} \right] - \frac{c_0}{2} \frac{1}{r^2} \Delta_{\Theta, \varphi} p_{-}^{(2)} &= \frac{\varepsilon}{2c_0^3} \frac{\partial^2 p^{(1)2}}{\partial t^2}, \\ \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\partial p_{\Pi}^{(2)}}{\partial r} + \frac{p_{\Pi}^{(2)}}{r} - \alpha_{-} \frac{\partial^2 p_{\Pi}^{(2)}}{\partial t^2} \right] - \frac{c_0}{2} \frac{1}{r^2} \Delta_{\Theta, \varphi} p_{\Pi}^{(2)} &= \frac{2\varepsilon}{c_0^4 \rho_0} \left(\vec{U}, \nabla \frac{\partial (p^{(1)2})}{\partial t} \right). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Здесь p_{Π} – добавка к звуковому полю, возникающая из-за движения среды. Для оценки вклада, вносимого движением среды, в процесс формирования сигналов параметрической антенны, необходимо рассмотреть второе уравнение из системы (6). Соответственно геометрии задачи, считаем поток направленным перпендикулярно оси z (относительно излучающей антенны), т.е. в направлении $(r, \varphi=0^\circ, \Theta=90^\circ)$.

Вклад в звуковое давление поля волн разностной частоты сферического параметрического излучателя, помещенного в движущуюся жидкость, определится следующим выражением (как сумма радиальной p_r и угловой p_{Θ} составляющих уровня звукового давления)

$$\begin{aligned} p_{\Pi}(r) &= p_r(r) + p_{\Theta}(r) = \\ &= -\frac{\varepsilon \Omega}{2c_0^3 \rho_0} \frac{r_0^2 e^{(-\alpha - \Omega^2 r + 2\alpha \omega^2 r_0)}}{r} \left(U_r(-\alpha \omega^2 - 1) - U_{\Theta} \right) \left\{ \left(\frac{e^{r_0 a}}{r_0} - \frac{e^{r a}}{r} \right) + a [Ei(ar) - Ei(ar_0)] \right\}. \end{aligned} \quad (7)$$

Решение (4), описывающее поле давления волны разностной частоты в неподвижной среде, для случая $m=0$ (нулевая мода колебаний – осциллирующий вторичный источник) преобразуется к виду:

$$p_{-}(r) = -\frac{\varepsilon \Omega}{2c_0^3 \rho_0} \frac{r_0^2 e^{(-\alpha - \Omega^2 r + 2\alpha \omega^2 r_0)}}{r} [Ei(ar) - Ei(ar_0)]. \quad (8)$$

Т.о. общее суммарное звуковое давление волны разностной частоты, создаваемое параметрической антенной со сферическим преобразователем накачки, находящемся в потоке движущейся жидкости, в нулевом приближении описывается выражением

$$\begin{aligned} p_{сф}(r) &= p_{-}(r) + p_{\Pi}(r) = -\frac{\varepsilon \Omega}{2c_0^3 \rho_0} \frac{r_0^2 e^{(-\alpha - \Omega^2 r + 2\alpha \omega^2 r_0)}}{r} \times \\ &\times \left\{ \left(U_r(-\alpha \omega^2 - 1) - U_{\Theta} \right) \left\{ \left(\frac{e^{r_0 a}}{r_0} - \frac{e^{r a}}{r} \right) + a [Ei(ar) - Ei(ar_0)] \right\} \right\} + [Ei(ar) - Ei(ar_0)]. \end{aligned} \quad (9)$$

Тогда общее выражение в соответствии с (2) можно записать как

$$\begin{aligned}
 P_{\Sigma}(r) = & r_s(\Omega) i \frac{\varepsilon \Omega^2 a^2 (p_0)^2 H/l_3}{8c_0^4 \rho_0} \int_0^{H/l_3} \frac{\exp \left[-y - \frac{r_w^2 (1 + iB_1 y)}{d + i(y - H/l_3) + H/l_3 y B_1} \right]}{d + i(y - H/l_3) + H/l_3 y B_1} dy + \\
 & + r_s^2 \left(-\frac{\varepsilon \Omega}{2c_0^3 \rho_0} \right) \frac{e^{(-\alpha - \Omega^2 r + 2\alpha \omega^2 r_0)}}{r} \times \\
 & \times \left\{ r_0^2 [U_r(-\alpha \omega^2 - 1) - U_e] \left\{ \left(\frac{e^{r_0 a}}{r_0} - \frac{e^{ra}}{r} \right) + a [Ei(ar) - Ei(ar_0)] \right\} + [Ei(ar) - Ei(ar_0)] \right\}.
 \end{aligned} \tag{10}$$

На рис. 9 показаны зависимости уровня звукового давления волны разностной частоты сигнала параметрической антенны, рассеянного на сферической неоднородности, помещенной в гидродинамический поток, в радиальном направлении. Сплошная кривая соответствует суммарной характеристике, точечная кривая – рассеянной разностной волне, пунктир – вновь сформированной разностной рассеянными от сферической неоднородности волнами накачки.

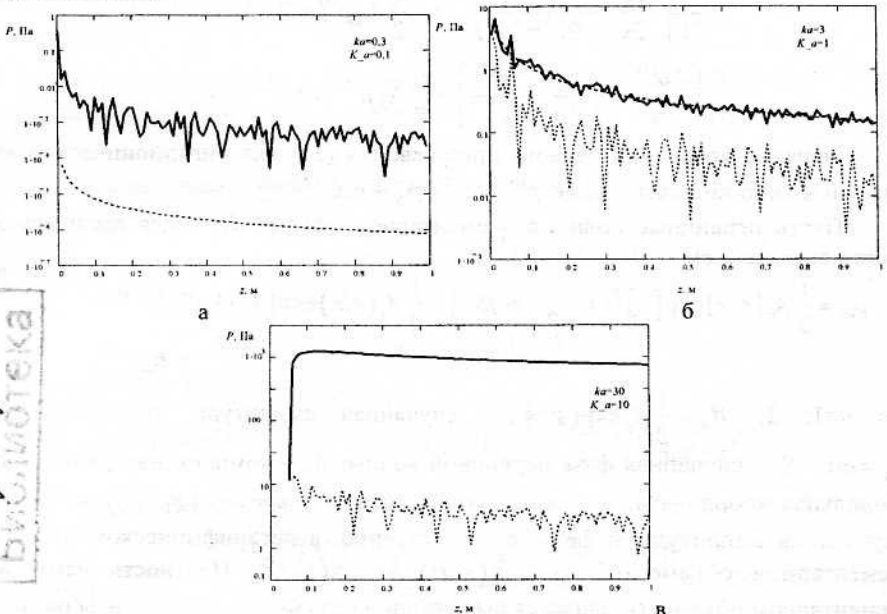


Рис. 9

На рис. 9 явно видна зависимость формы и уровня отраженного сигнала от волновых размеров объекта. Когда сферическая неоднородность относительно мала (рис. 9, а), то амплитуда отраженного сигнала определяется отраженным разностным сигналом. Это можно объяснить малой эффективностью генерации

новой разностной и достаточно большим уровнем отраженной. Отраженная разностная волна флуктуирует в силу особенностей расчета коэффициента рассеяния. С увеличением волновых размеров объекта по частотам накачки (рис. 9,б) вклады отраженной и вновь образованной составляющих имеют практически одинаковый уровень. Дальнейшее увеличение волновых размеров приводит к тому, что эффективность генерации новой разностной растет, и она вносит решающий вклад в суммарный сигнал (рис. 9, в).

Поведение параметрической антенны в воде, содержащей случайные меняющиеся во времени неоднородности, представляет практический интерес. Они возникают вследствие таких факторов, как локальная турбулентность и температурная микроструктура. В параметрической антенне две взаимодействующие высокочастотные волны при распространении испытывают флуктуации по амплитуде и фазе. Следовательно, эти флуктуации переносятся и на объемную плотность источников разностной частоты. Кроме того, при распространении волны разностной частоты от параметрической антенны, на эту волну также накладываются флуктуации за счет среды распространения.

Уравнения ХЗК первого и второго приближений имеют вид

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \left(\frac{\partial p^{(1)}}{\partial x} - \frac{b}{2c_0^3 \rho_0} \frac{\partial^2 p^{(1)}}{\partial \tau^2} \right) - \frac{c_0}{2} \Delta_{\perp} p^{(1)} = 0, \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \left(\frac{\partial p^{(2)}}{\partial x} - \frac{b}{2c_0^3 \rho_0} \frac{\partial^2 p^{(2)}}{\partial \tau^2} \right) - \frac{c_0}{2} \Delta_{\perp} p^{(2)} = q_1 p^{(1)2}. \quad (12)$$

Решение уравнения первого приближения (11) для бигармонической волны накачки можно записать в виде $p^{(1)} = p_{1i} + p_{2i} + \text{к.с.}$

Пусть первичные волны в элементарном объеме dV_i задаются следующим общим выражением

$$p_n = \frac{1}{2} A_n(r, x) \exp[-j\omega_n \tau + \chi_{ni} + jS_{ni}] = \frac{1}{2} A_n(r, x) \exp(\chi_{ni} + jS_{ni}) e^{-j\omega_n \tau} = B_n e^{-j\varphi_{ni}}, \quad (13)$$

где $n=1, 2$; $B_n = \frac{1}{2} A_n \exp(\chi_{ni})$ – случайная амплитуда первичной волны, $\varphi_{ni} = \omega_n \tau - S_{ni}$ – случайная фаза первичной волны; A_n – комплексная амплитуда, x – продольная координата, ω – круговая частота, τ – время, (χ_{1i}, χ_{2i}) и (S_{1i}, S_{2i}) – флуктуации амплитуды и фазы, соответственно, в логарифмическом масштабе в элементарном объеме dV_i , $\chi_{ni} = \chi(x', r')$, $S_{ni} = S(x', r')$. Плотность источника в элементарном объеме dV_i задается выражением (для Фурье-компоненты разностной частоты)

$$q_1 = -\frac{\varepsilon \Omega^2}{4c_0^3 \rho_0} B_{1i} B_{2i} e^{-j(\Omega \tau - S_{1i} + S_{2i})}. \quad (14)$$

Для осевых флуктуаций геометрия рассеивания для параметрического сигнала в неоднородной среде показана на рис. 10.

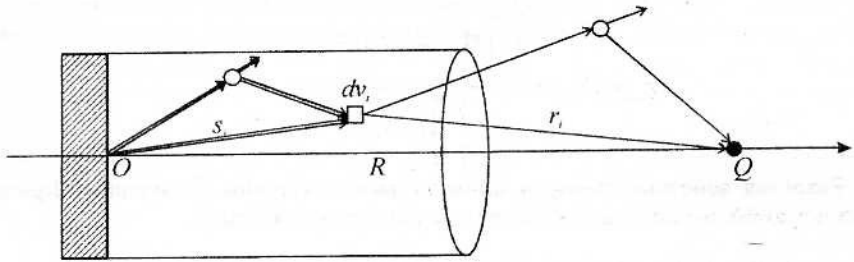


Рис.10. Геометрия задачи рассеяния: \circ – рассеиватель, \square – элементарный объем взаимодействия,
 ———— – первичные лучи, - - - - - сигнал ВРЧ

Решая уравнение (12), получим выражение для расчета амплитуды давления волны разностной частоты (ВРЧ) в статистически неоднородной среде

$$P_{-}(r, x) = -\frac{\varepsilon K^2}{8c_0^2 \rho_0} \int_0^x \frac{e^{-ax'}}{x-x'} dx' \int_0^{\infty} A_1(x', r') A_2^*(x', r') \exp(\chi_{1i}(x', r') + \chi_{2i}(x', r')) \times \\ \times \exp \left\{ -j \left(\frac{K}{2} \frac{r^2 + r'^2}{x-x'} - S_{1i}(x', r') + S_{2i}(x', r') \right) \right\} J_0 \left(\frac{K r r'}{x-x'} \right) r' dr' \quad (15)$$

С другой стороны в (15) амплитудные и фазовые флуктуации волны разностной частоты определяются выражением

$$P_{-} = P_{0-} \exp(\chi_{-} + jS_{-}), \quad (16)$$

где P_{0-} – звуковое давление ВРЧ в среде, свободной от рассеивателей.

Приравняем (15) и (16)

$$P_{0-} \exp(\chi_{-} + jS_{-}) = -\frac{\varepsilon K^2}{8c_0^2 \rho_0} \int_0^x \int_0^{\infty} \frac{e^{-ax'}}{x-x'} A_1 A_2^* \exp \left\{ -j \left(\frac{K}{2} \frac{r^2 + r'^2}{x-x'} \right) \right\} J_0 \left(\frac{K r r'}{x-x'} \right) \times \\ \times \exp[\chi_{1i} + \chi_{2i} + j(S_{1i} - S_{2i})] r' dr' dx' \quad (17)$$

Вводя обозначение

$$I(x', r') = A_1(x', r') A_2^*(x', r') \frac{e^{-ax'}}{x-x'} \exp \left\{ -j \left(\frac{K}{2} \frac{r^2 + r'^2}{x-x'} \right) \right\} J_0 \left(\frac{K r r'}{x-x'} \right) r',$$

перепишем (17) в виде

$$\exp(\chi_{-} + jS_{-}) = \frac{\int_0^x \int_0^{\infty} I(x', r') \exp[\chi_{1i} + \chi_{2i} + j(S_{1i} - S_{2i})] dr' dx'}{\int_0^x \int_0^{\infty} I(x', r') dr' dx'} \quad (18)$$

Знаменатель в (18) известен – это давление ВРЧ в однородной среде. Разделив в (18) действительную и мнимую части. В предположении малости флуктуаций $|\chi| \ll 1$, $|S| \ll 1$, разложим \exp в ряд, ограничимся первыми двумя членами. Тогда с точностью до постоянного множителя (18) запишется в виде

$$\chi_- + jS_- = \frac{\int_0^x \int_0^\infty I(\chi_i + jS_i) dr' dx'}{\int_0^x \int_0^\infty I dr' dx'} \quad (19)$$

Разделяя действительную и мнимую части, получим следующие выражения для флуктуаций амплитуды и фазы волны разностной частоты.

$$\chi_- = \frac{\int_0^x \int_0^\infty [\operatorname{Re}(I)\chi_i - \operatorname{Im}(I)S_i] dr' dx'}{\int_0^x \int_0^\infty I dr' dx'}, S_- = \frac{\int_0^x \int_0^\infty [\operatorname{Re}(I)S_i + \operatorname{Im}(I)\chi_i] dr' dx'}{\int_0^x \int_0^\infty I dr' dx'} \quad (20)$$

Для среднеквадратичных флуктуаций амплитуды и фазы ВРЧ получим

$$\langle \chi_-^2 \rangle = \frac{1}{\left(\int_0^x \int_0^\infty I dr' dx' \right)^2} \int_0^x \int_0^\infty \left[\operatorname{Re}(I_i)\operatorname{Re}(I_j)\langle \chi_i\chi_j \rangle + \operatorname{Im}(I_i)\operatorname{Im}(I_j)\langle S_iS_j \rangle - \right. \\ \left. - \operatorname{Re}(I_i)\operatorname{Im}(I_j)(\langle \chi_iS_j \rangle + \langle \chi_jS_i \rangle) \right] dr'_i dx'_i dr'_j dx'_j, \quad (21)$$

$$\langle S_-^2 \rangle = \frac{1}{\left(\int_0^x \int_0^\infty I dr' dx' \right)^2} \int_0^x \int_0^\infty \left[\operatorname{Re}(I_i)\operatorname{Re}(I_j)\langle S_iS_j \rangle + \operatorname{Im}(I_i)\operatorname{Im}(I_j)\langle \chi_i\chi_j \rangle + \right. \\ \left. + \operatorname{Re}(I_i)\operatorname{Im}(I_j)(\langle S_i\chi_j \rangle + \langle S_j\chi_i \rangle) \right] dr'_i dx'_i dr'_j dx'_j, \quad (22)$$

Уравнения (21), (22) дают среднеквадратичные значения амплитуды и фазы волны разностной частоты в терминах различных корреляционных функций. Исследуемые корреляционные функции имеют вид $\langle \chi_i\chi_j \rangle$, $\langle S_iS_j \rangle$ и $\langle \chi_iS_j \rangle$. Здесь $\langle \chi_i\chi_j \rangle$ и $\langle S_iS_j \rangle$ представляют собой пространственные корреляционные функции для флуктуаций амплитуды и фазы, соответственно. Индексы i и j относятся к различным выборкам. $\langle \chi_iS_j \rangle$ представляет собой функцию пространственной кросс-корреляции амплитудных и фазовых флуктуаций в элементарных объемах V_i и V_j . Для расчета корреляционных функций первичных волн параметрической антенны воспользуемся выражениями, полученными для линейного моночастотного сигнала:

Результаты расчетов среднеквадратичных флуктуаций амплитуды и фазы ВРЧ показаны на рис. 11. Видно, что флуктуации разностной частоты в дальней зоне сравнимы с флуктуациями линейного сигнала.

Далее описаны результаты экспериментальных исследований формирования поля параметрической антенны в неоднородных средах. В качестве физической модели детерминированных неоднородностей использовалась отражающая одиночная акустически жесткая сфера, помещенная в гидродинамический поток.

Для моделирования стохастических неоднородностей была использована пелена газовых пузырьков с переменными размерами. Схемы лабораторных установок показаны на рис. 12, 13.

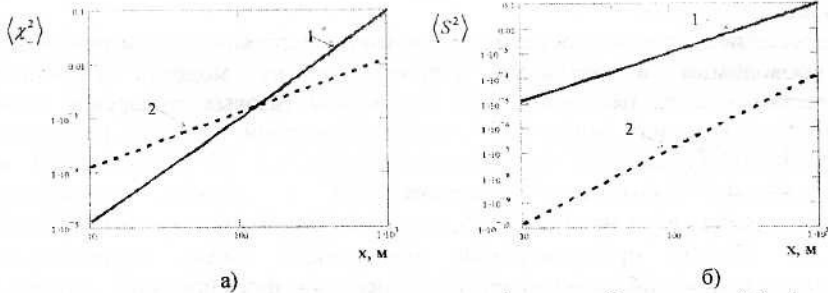


Рис. 11. Расчетные значения среднеквадратичных флуктуаций амплитуды (а) и фазы (б) волны разностной частоты параметрической антенны ($f_0=150$ кГц, $F_- = 10$ кГц, $P_0=250$ кПа, диаметр антенны 30 см, $\langle \mu^2 \rangle = 8 \cdot 10^{-8}$, $\alpha=5$ м).

1— разностный сигнал параметрической антенны, 2— линейный сигнал с частотой эквивалентной разностному сигналу.

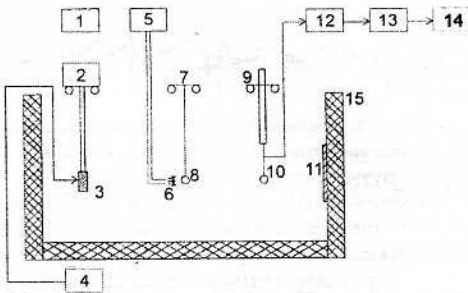


Рис. 12. Схема измерительной установки для исследования детерминированных неоднородностей

1 — пульт управления, 2 — поворачивающе-выдвижное устройство, 3 — параметрический излучатель, 4 — параметрический гидроакустический комплекс, 5 — центробежный насос, 6 — гидродинамический поток, 7, 9 — координатные устройства, 8 — стальная сфера, 10 — гидрофон, 11 — стальной лист, 12 — предварительный усилитель, 13 — фильтр нижних частот, 14 — осциллограф, 15 — гидроакустический бассейн.

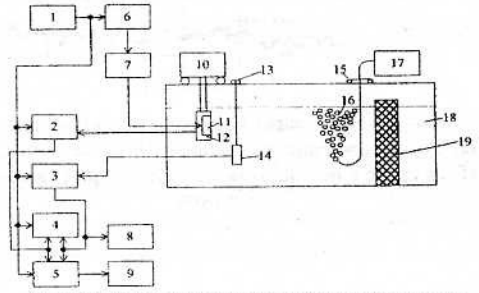


Рис. 13. Схема измерительной установки для исследования статистических неоднородностей

1 — синхронизирующее устройство; 2 — приемно-усилительный тракт (канал 2); 3 — приемно-усилительный тракт (канал 1); 4 — осциллограф; 5 — двухканальный АЦП; 6 — формирователь сигналов накачки; 7 — усилитель мощности; 8 — самописец; 9 — ПЭВМ; 10 — поворачивающе-выдвижное устройство; 11 — преобразователь накачки; 12 — приемный преобразователь (канал 2); 13, 15 — координатные устройства; 14 — приемный преобразователь (канал 1); 16 — пелена воздушных пузырьков; 17 — компрессор; 18 — гидроакустический бассейн; 19 — рассеивающий слой.

В процессе подготовки к исследованиям и при измерениях амплитудных характеристик поля звукового давления волны разностной частоты и обработке результатов экспериментов учитывались правила и методики, используемые в линейной акустике, радиоизмерениях и особенности измерения звукового давления волны разностной частоты.

В процессе исследований обратного объемного рассеяния волны разностной частоты, проводимых в реальных условиях и на моделях случайных неоднородностей в виде нестационарной структуры газовых пузырьков также наблюдаются флуктуации амплитуды волны разностной частоты рассеянной неоднородностями. Временная зависимость амплитуды ВРЧ рассеянной на структуре газовых пузырьков, расположенной в области нелинейного взаимодействия, показанная на рис. 14, 15, содержит флуктуации уровня звукового давления ± 3 дБ. В представленной зависимости видна периодическая закономерность изменений, связанная, с процессами формирования объемной области газовых пузырьков в среде, изменением радиусов пузырьков внутри области их существования, циклом жизни пузырька и нестационарностью границ создаваемой области.

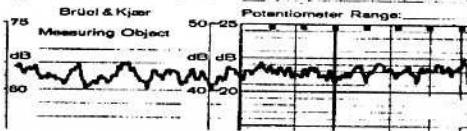


Рис. 14. Временная зависимость амплитуды звукового давления рассеянной ВРЧ с частотой 22 кГц в среде с нестационарной структурой газовых пузырьков

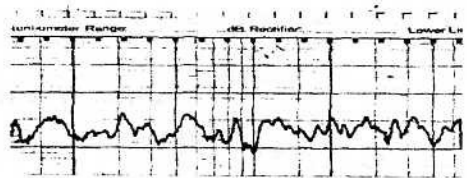


Рис. 15. Временная зависимость изменения во времени амплитуды рассеянной на пузырьковом слое волны разностной частоты 27 кГц. Длительности излучаемого импульса составляла 1 мс, период следования импульсов 30 мс, скорость протяжки ленты самописца 3 мм/с.

На рис. 16 показаны поперечные распределения амплитуды ВРЧ, измеренные на расстоянии 3 м от антенны в среде с нестационарной структурой газовых пузырьков в области нелинейного взаимодействия. Измерительный гидрофон в этом случае располагался за пределами статистически неоднородного слоя газовых пузырьков, что позволило исключить влияние процессов формирования и схлопывания пузырьков.

Полученные поперечные распределения представляют собой результат влияния нескольких механизмов на процесс формирования ВРЧ: нерезонансного рассеяния ВРЧ на слое, поглощения акустической энергии ВРЧ и исходных волн накачки, затухания, изменения скорости распространения акустических волн в слое воздушных пузырьков и параметра нелинейности водной среды в слое. Видно, что ВРЧ, прошедшая через слой газовых пузырьков, ослаблена по сравнению с однородной средой на 8–10 дБ. Такое ослабление вызвано, очевидно, описанными

выше механизмами, которые оказывают также влияние и на поперечное распределение исходных волн накачки, показанное на рис. 16.

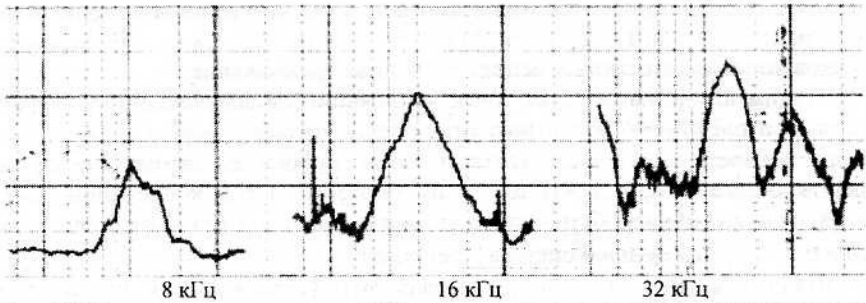


Рис. 16. Поперечные распределения ВРЧ в среде с нестационарной структурой газовых пузырьков

Для стохастических неоднородностей актуальна задача определения корреляции флуктуаций уровня звукового давления ВРЧ. При теоретическом рассмотрении этой задачи важнейшим параметром является определение аналитического выражения для временного интервала корреляции τ_0 , который определяется по спаду функции корреляции $b(\tau)$ в e раз. Пространственный радиус корреляции ρ в этом случае определяется как

$$\rho = \tau_0 v = 1/\sqrt{2}\omega_0 \operatorname{tg} \delta. \quad (23)$$

В результате обработки экспериментальных данных были определены значения временного интервала корреляции τ_0 и пространственного радиуса корреляции ρ . Значение ρ составило 5,1 м, что позволяет сделать вывод о том, что пространственный радиус корреляции ρ много больше длин волн, участвующих в процессе нелинейного взаимодействия, и добавка к суммарному полю ВРЧ за счет неоднородности среды когерентна.

В третьей главе представлен метод численного расчета уравнений нелинейной акустики, использующий вейвлет-функции для сокращения вычислительного времени. Метод адаптирован для неоднородных сред и используется в дальнейшем для моделирования во временной области.

Многие физические системы характеризуются присутствием широкого диапазона пространственных и временных масштабов. Особенный интерес вызывают решения задач с ограниченными структурами или резкими переходами, которые могут происходить периодически или менять свое местоположение и масштабы в пространстве и времени. Примером таких задач в акустике могут служить краевые задачи дифракции и рассеяния, волновые уравнения с различными граничными условиями, уравнения нелинейной акустики: Бюргерса, Хохлова – Заболотской – Кузнецова и др. Численное решение таких задач на однородных сетках непрактично, так как вычисления с высоким разрешением требуются только в областях, где происходят резкие переходы. Для решения этих

задач эффективным способом в вычислительном отношении, вычислительная сетка должна адаптироваться динамически во времени, чтобы отразить локальные изменения в решении. Существуют несколько адаптивных методов формирования сетки, здесь описан один класс таких методов, а именно вейвлет-методы. Вейвлет-методы используют тот факт, что функции с ограниченными областями резких переходов хорошо сжимаются, используя вейвлет-разложение.

С таким алгоритмом сетка точек коллокации динамически адаптируется во времени и отслеживает локальные структуры, которые появляются в решении. Опуская вейвлеты с коэффициентами ниже порога ε , автоматически можно управлять ошибкой приближения. Таким образом, метод коллокации вейвлетов имеет другую важную особенность: активное управление точностью решения. Чем меньше порог ε , тем меньше ошибка в решении.

Относительный порог ошибки ε может быть установлен так, чтобы разделить решение P^J на две области: одна с коэффициентами выше установленного порога и другая – ниже. Это можно выразить как

$$P^J(\sigma, \tau, \rho) = P^J_{|r| \geq \varepsilon}(\sigma, \tau, \rho) + P^J_{|r| < \varepsilon}(\sigma, \tau, \rho).$$

Установление порога удаляет существенное количество точек коллокации из сетки, потому что они содержат тривиальные детали и результаты в последующих вычислениях. Это обеспечивает простой способ управления фактором сжатия вычислительной сетки и ошибкой аппроксимации решения. Выбор значения порога легко определяется установкой процента энергии сигнала, которая будет сохранена после пороговой обработки. Затем локально применяются схемы конечных разностей и квадратур на каждом уровне, где нет коэффициентов γ на более точных масштабах. Этот способ динамического распределения точек коллокации на каждом уровне позволяет вычислительной сетке динамически приспосабливаться к локальным изменениям, так как в решении уравнений появляются гармоники из-за нелинейного члена. Рассмотренный метод и разработанные алгоритмы будут применены в следующей главе для нелинейного анализа распространения и взаимодействия акустических волн.

В четвертой главе предлагается новый подход к исследованию нелинейного взаимодействия волн – методы нелинейной динамики применены для обработки экспериментальных данных, что позволяет проследить эволюцию системы во времени и пространстве.

Для визуального анализа динамики системы особенно подходят аттракторы. Для реконструкции фазовых портретов (или аттракторов) многомерной системы в многомерном фазовом пространстве из одномерных временных рядов (теорема Такенса) наиболее известным методом является метод временных задержек. Он позволяет сформировать матрицу векторов $\mathbf{x}(n)$, полученных в дискретные моменты времени

$$\mathbf{x}(n) = (x_n, x_{n-p}, x_{n-2p}, \dots, x_{n-(m-1)p}), \quad (24)$$

где $p=1, 2, 3, \dots$ – целое число, определяющее временную задержку через число отсчетов (соответствующее время задержки может быть вычислено как $\tau = p t_d$, t_d – интервал дискретизации), m – внедренная размерность. Выбирая n , получим дискретный набор точек в m -мерном фазовом пространстве. Полагая, что устойчивые осцилляции имеют место в диссипативной системе, то получим, так называемый, псевдо-портрет.

Необходимыми параметрами для корректного построения фазового портрета из временных рядов являются внедренная размерность m и время задержки τ . Величина внедренной размерности m может быть оценена с помощью теоремы Мане $m \geq 2D2 + 1$, где $D2$ – корреляционная размерность. Корреляционная размерность $D2$ вычисляется с помощью корреляционного интеграла Грассбергера-Прокачиа

$$C^m(r) = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1, i \neq j}^N \theta \left(r - \left\| \hat{x}_i - \hat{x}_j \right\| \right), \quad (25)$$

где r – длина грани куба в m -мерном фазовом пространстве, окружающего точку \hat{x}_i , N – число отсчетов сигнала, θ – функция Хевисайда.

Правильный выбор задержки влияет на информативность и внешний вид аттрактора. Золотой серединой является выбор времени задержки, связанный с временным масштабом исследуемого процесса. Это может быть первый ноль автокорреляционной функции или первый минимум функции взаимной информации.

Оценка спектра Ляпунова (множества экспонент Ляпунова) также является одним из свидетельств присутствия хаотической динамики в системе. Положительная максимальная экспонента Ляпунова является критерием хаоса. С помощью временных рядов экспонента Ляпунова может быть вычислена как

$$\lambda = \sum_{k=0}^{K-1} \ln(\varepsilon'_k / \varepsilon_k) / \sum_{k=1}^K T_k, \quad (26)$$

где $\varepsilon_k = \left\| x'_k - x_k \right\|$ – расстояние между двумя точками близкими в пространстве, но не во времени, $\varepsilon'_k = \left\| x'_{k+1} - x_{k+1} \right\|$ – расстояние между двумя точками через промежуток времени T_k , K – количество шагов алгоритма. С одной стороны фазовые портреты (аттракторы) являются хорошим наглядным инструментом для анализа динамики системы, с другой стороны – количественной мерой хаотичности системы являются экспоненты Ляпунова, особенно максимальная.

Параметры экспериментальной установки следующие: диаметр преобразователя – 18 мм, центральная частота накачки – 1254 кГц, разностная частота 50 кГц, напряжение на входе преобразователя – 50 В, диапазон расстояний 10–100 см с шагом 10 см. В эксперименте использовались два вида сигналов: синусоидальный монохроматический частотой 1254 кГц и биения двух частот 1229 кГц и 1279 кГц, формирующие в воде разностную частоту 50 кГц.

Запись сигналов осуществлялась на цифровой осциллограф DSO 2100. Он выполнен в виде внешней приставки к компьютеру, подключаемой через LPT порт. Частота дискретизации осциллографа составила 10 МГц для разностного сигнала и 50 МГц для синусоидального сигнала первичных волн. Сигнал записывался в двух

форматах: в виде графического файла (*.bmp) и текстового файла в формате ASCII. Затем данные обрабатывались с использованием как стандартного, так и специального программного обеспечения (ПО).

Представлены результаты обработки экспериментальных данных с помощью специализированного ПО. На рис. 17, 18 показаны результаты для распространения синусоидального сигнала конечной амплитуды и на рис. 19, 20 – для биений двух частот, где (а) осциллограмма сигнала, (b) фазовый портрет, (c) взаимная информация, (d) автокорреляционная функция, (e) корреляционный интеграл и вычисленное значение корреляционной размерности $D2$, (f) спектр мощности.

Спектр мощности на рис. 17 (f) и 18 (f) подтверждает то, что первоначальный сигнал искажается, в результате чего с увеличением расстояния от преобразователя в нем появляются гармоники. Спектр, соответствующий расстоянию 100 см от преобразователя накачки, имеет более сложную структуру, чем спектр на расстоянии 10 см от преобразователя накачки.

Очевидно, что фазовые портреты имеют вид аттракторов – ограниченных множеств в фазовом пространстве. На рис. 17 (b) форма аттрактора близка к окружности – идеальный случай для синусоидального сигнала. Аттрактор на рис. 19 (b) имеет более сложную структуру, так как помимо двух частот также присутствует огибающая разностной частоты (50 кГц в нашем случае). Аттракторы на рис. 18 (b), 20 (b) имеют искаженную структуру. К сожалению ограниченные возможности лабораторного оборудования, а именно частота дискретизации цифрового осциллографа, не позволили выявить тонкие структуры в форме сигнала.

Значения корреляционных размерностей записаны в верхних левых углах графиков на рис. (e). Для синусоидального сигнала $D2=1,28$ и $1,6$ для 10 и 100 см от преобразователя, соответственно. По теореме Мане внедренную размерность можно оценить как $m=[2D2+1]$, следовательно, получим $m=3$ и $m=4$ для 10 и 100 см от преобразователя, соответственно. Для двухчастотного сигнала получим $D2=1,79$ и $2,31$ и, следовательно, $m=5$ и $m=6$ для 10 и 100 см от преобразователя, соответственно. Видно, что с расстоянием растет сложность сигнала и поэтому увеличивается число степеней свободы (размерность). Для более сложного сигнала (биения по сравнению с синусоидальным) число степеней свободы больше на единицу.

Аттракторы можно анализировать визуально, но они не дают численных оценок того, как траектории расходятся в фазовом пространстве. Поэтому был вычислен спектр Ляпунова для синусоидального сигнала и биений. Результаты представлены в таблице 1.

Табл. 1

Спектр экспонент Ляпунова и размерность Каплана-Йорке

	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	Размерность Каплана-Йорке
Sin 10 см	0,085	-0,013	-0,193	-0,542	2,37
Sin 100 см	0,191	-0,034	-0,194	-0,678	2,80
биения 10 см	0,085	-0,009	-0,092	-0,559	2,82
биения 100 см	0,169	0,018	-0,088	-0,366	3,27

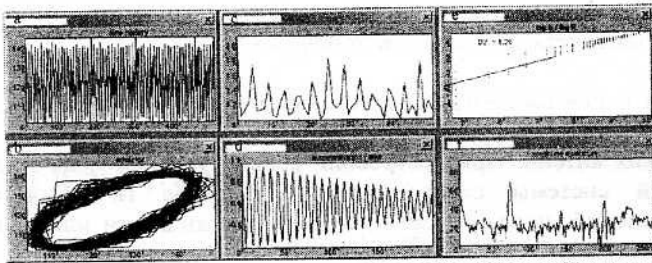


Рис. 17. Нелинейный анализ синусоидального сигнала на расстоянии 10 см от преобразователя

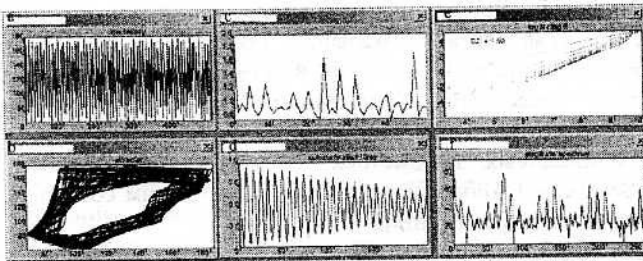


Рис. 18. Нелинейный анализ синусоидального сигнала на расстоянии 100 см от преобразователя

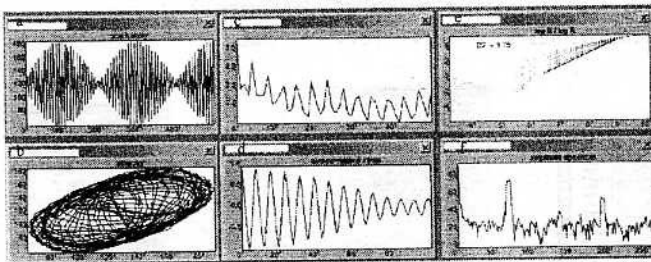


Рис. 19. Нелинейный анализ биений двух частот на расстоянии 10 см от преобразователя

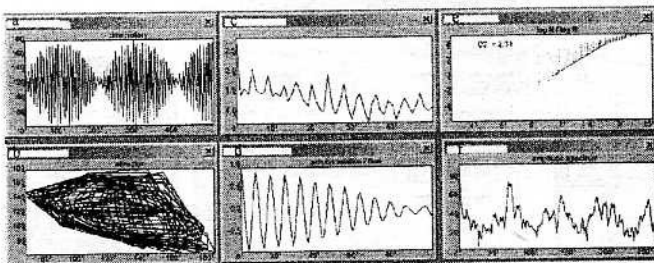


Рис. 20. Нелинейный анализ биений двух частот на расстоянии 100 см от преобразователя

Первая экспонента Ляпунова во всех случаях положительна, что указывает на присутствие хаоса в исследуемом сигнале. Также были исследованы и промежуточные расстояния между 10 и 100 см. Они иллюстрируют динамику зарождения хаоса во время нелинейного распространения и взаимодействия. Эти

процессы можно рассматривать как каскад локальных нестабильностей, которые выливаются в хаотическое поведение отдельных траекторий.

В пятой главе рассмотрены принципы построения концептуальной модели имитационной моделирующей системы распространения сигналов параметрических антенн. При построении концептуальной модели имитационной моделирующей системы распространения сигналов ПА был отобран ряд физических явлений: поле скорости звука, поток жидкости или движение среды распространения волн; звукорассеивающие слои, нелинейное взаимодействие акустических волн и др. Некоторые из явлений можно разложить на ряд аддитивных процессов. При этом часть процессов могут оказаться зависимыми друг от друга, а другая часть не оказывает такого влияния на другие процессы. Каждое из перечисленных выше явлений или процессов возможно описать одним или несколькими известными уравнениями (моделями). В ходе анализа и систематизации этих моделей, сравнения результатов расчетов для различных моделей при одинаковых параметрах, проверки адекватности теоретических решений практическим (экспериментальным) результатам создана концептуальная модель для программной реализации.

Разработан обобщенный алгоритм работы аппаратно-программного гидроакустического комплекса, предназначенного для исследований нелинейного взаимодействия акустических волн в условиях гидроакустического бассейна. Подробно рассматривается интерфейс и работа подпрограммы нелинейного анализа данных (рис. 21).

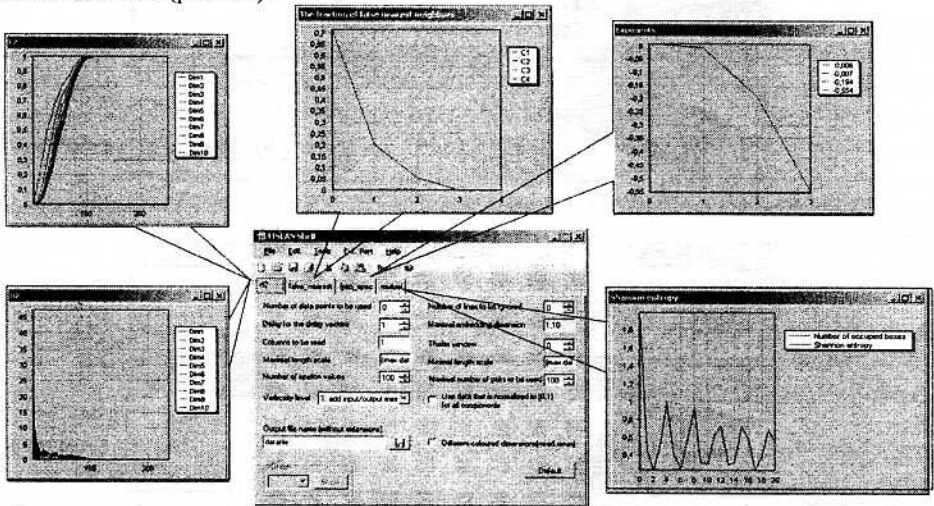


Рис. 21

Для написания программы использовался объектно-ориентированный язык C# и современная библиотека классов Windows Forms, которая входит в состав Microsoft .NET Framework-платформы. Классы, определенные в .NET Framework,

нейтральны по отношению к языку. Таким образом, .NET потенциально независима от аппаратной платформы, что определило выбор программного обеспечения.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Подводя общие итоги диссертационной работы, можно сделать следующие общие **выводы и заключения**:

- Разработанная с учетом процессов нелинейного взаимодействия звуковых волн в статистически неоднородных средах операторная модель параметрической гидролокации декомпозирована до 4-х уровней: семантического, морфологического, алгоритмического и модульного, что позволило детально и комплексно исследовать систему.
- Расчеты пространственных и статистических характеристик акустического поля, выполненные с использованием разработанных на основе уравнения ХЗК математических моделей поля параметрической антенны в средах, содержащих детерминированные и статистические неоднородности, показали, что детерминированные неоднородности оказывают влияние на рассеянное поле ПА при их больших волновых размерах. Статистические неоднородности оказывают влияние на дальнее поле ПА, где флуктуации разностного сигнала сравнимы с флуктуациями линейного сигнала эквивалентной частоты.
- Для малых волновых размеров сферической неоднородности амплитуда рассеянного сигнала практически равна амплитуде отраженного разностного сигнала, что объясняется малой эффективностью генерации новой разностной и достаточно большим уровнем отраженной. С увеличением волновых размеров сферической неоднородности вклады в звуковое поле отраженной и вновь образованной составляющих имеют практически одинаковый уровень. Для больших волновых размеров эффективность генерации новой разностной растет, и суммарный сигнал определяется уровнем звукового давления волны вновь образованной разностной частоты.
- Расчетные значения продольных среднеквадратичных флуктуаций амплитуды и фазы находятся в диапазоне 10^{-5} -0,1 и 10^{-10} -0,1, соответственно, и показали, что флуктуации разностной частоты в дальней зоне сравнимы с флуктуациями линейного сигнала.
- Проведенные экспериментальные исследования поля параметрической антенны в среде с моделями детерминированных и статистических неоднородностей, их сравнение с полученными теоретическими зависимостями показали удовлетворительный уровень совпадения. Флуктуации уровня звукового давления находятся в пределах ± 3 дБ.
- Исследование распространения и нелинейного взаимодействия акустических

волн аппаратом нелинейной динамики, показало, что эти процессы можно характеризовать как квазихаотические и в некоторых случаях – хаотические. Получены значения корреляционной размерности в диапазоне 1,3–1,6 для синусоидального сигнала и 1,7–2,6 для биений. Значения первой экспоненты Ляпунова положительны и составили $\sim 0,17$ и $\sim 0,19$ для синусоидального сигнала и биений, соответственно. С увеличением расстояния растет сложность сигнала и поэтому число степеней свободы (размерностей) также увеличивается.

- Разработанный аппаратно-программный комплекс позволяет проводить исследования нелинейного взаимодействия акустических волн в лабораторных условиях с использованием методов нелинейной динамики в реальном времени.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

МОНОГРАФИИ

1. Старченко, И.Б. Гидроакустическая энциклопедия [Текст] / И.Б. Старченко [и др.] / Под общ. ред. Тимошенко В.И. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1999. – 788 с. – (вклад автора – 1;33 п.л.); 2000. – 2 изд. исправленное и доп. – 854 с.– (вклад автора – 0,66 п.л.) – ISBN 5–8327–0031–7.
2. Старченко, И.Б. Динамический хаос в гидроакустике [Текст] / И.Б. Старченко. – М.: Изд-во ЛКИ, 2007. – 296 с. – ISBN 978–5–382–00057–2.
3. Старченко, И.Б. Стохастические и динамические модели в акустике и биомедицине [Текст] / И.Б. Старченко, В.И.Тимошенко. – Ростов н/Д: РостИздат, 2007. – 320 с. – ISBN 5–7509–1234–5.

ПУБЛИКАЦИИ В ВАК- И РЕФЕРИРУЕМЫХ ЖУРНАЛАХ

4. Старченко, И.Б. Экспериментальное исследование поля параметрической антенны при наличии плоского отражателя в области нелинейного взаимодействия [Текст] / И.Б. Старченко, И.А. Кириченко // Известия ТРТУ. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1997. – № 1. – С. 123.
5. Старченко, И.Б. Применение высших гармоник сигналов параметрических антенн к исследованию движущихся гетерогенных жидкостей [Текст] / И.Б. Старченко, Д.В. Бурьков // Известия ТРТУ. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1998. – № 4(10). – С. 171–172.
6. Старченко, И.Б. Имитационное моделирование распространения сигналов параметрических антенн в биологических средах [Текст] / И.Б. Старченко, В.В. Салов // Известия ТРТУ. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1998. – № 4(10). – С. 173.
7. Старченко, И.Б. Статистическое моделирование параметрической антенны, формируемой в биосредах [Текст] / И.Б. Старченко // Известия ТРТУ. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – № 4(18). – С. 156–159.
8. Старченко, И.Б. Учет влияния движения биосреды на процесс формирования параметрической излучающей антенны [Текст] / И.Б. Старченко, В.И. Тимошенко,

- Д.В. Бурьков // Известия ТРТУ. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – № 4(18). – С. 159–162.
9. Старченко, И.Б. Модельный подход к исследованию акустических сигналов в биологических объектах [Текст] / И.Б. Старченко, В.В. Салов // Известия ТРТУ. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – № 4(18). – С. 163–164.
10. Старченко, И.Б. Информационная система мониторинга экологического состояния водной биосреды [Текст] / И.Б. Старченко, В.Ю. Вишневецкий // Известия ТРТУ. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – № 4(18). – С. 164–165.
11. Старченко, И.Б. Моделирование работы параметрических антенн в условиях статистически-неоднородной водной экосистемы [Текст] / И.Б. Старченко // Известия ТРТУ. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – №5(28). – С. 133–136.
12. Старченко, И.Б. Особенности формирования параметрических антенн в потоке движущейся жидкости [Текст] / И.Б. Старченко, В.И. Тимошенко, Д.В. Бурьков // Известия ТРТУ. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – №5(28). – С. 137–141.
13. Старченко, И.Б. Программный комплекс для экологического мониторинга водной среды [Текст] / И.Б. Старченко, В.В. Салов // Известия ТРТУ. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – №5(28). – С. 161–163.
14. Старченко, И.Б. Некоторые аспекты экологического мониторинга природных сред [Текст] / И.Б. Старченко, В.Ю. Вишневецкий, Ю.М. Вишневецкий // Известия ТРТУ. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – №5(28). – С. 171–173.
15. Старченко, И.Б. Модельный подход к изучению характеристик параметрической антенны в (статистически) неоднородных средах [Текст] / И.Б. Старченко, И.А. Кириченко, В.В. Салов // Известия ТРТУ. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – №5(28). – С. 151–153.
16. Старченко, И.Б. Теоретическое исследование статистических характеристик параметрической антенны [Текст] / И.Б. Старченко // Известия ТРТУ. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2005. – №9(53). – С. 108–112.
17. Старченко, И.Б. Модель параметрической гидролокации для случая статистически неоднородной среды [Текст] / И.Б. Старченко, В.И. Тимошенко // Известия ТРТУ. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2005. – №2 (46). – С. 134–138.
18. Starchenko, I. Decomposition method in constructing simulation models of parametric location for statistically irregular mediums (Метод декомпозиции в построении имитационных моделей параметрической локации для статистически неоднородных сред) [Текст] / I. Starchenko // J. Acoust. Soc. Am. – April, 2005. – Vol. 117, №. 4. – P. 2576.
19. Starchenko, I. Nonlinear scattering of acoustical waves on sphere after passing the obstacle (Нелинейное рассеяние акустических волн на сфере после прохождения препятствия) [Текст] / I. Starchenko, N. Zagrai, A. Zagrai // J. Acoust. Soc. Am. – April, 2005. – Vol. 117, №. 4. – P. 2612.
20. Старченко, И.Б. Экспериментально определяемый динамический хаос при распространении акустических волн в жидкостях [Текст] / И.Б. Старченко // Известия ТРТУ. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2006. – №9 (64). – С. 126–127.
21. Старченко, И.Б. Динамика формирования аттрактора при нелинейном распространении волн в жидкостях [Текст] / И.Б. Старченко // Известия ТРТУ. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2006. – № 12(67). – С. 69–73.

22. Старченко, И.Б. Решение уравнений нелинейной акустики во временной области методом адаптивных сеток с использованием лифтинговых вейвлетов [Текст] / И.Б. Старченко, В.И. Тимошенко // Известия ТРТУ. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2006. – № 12(67). – С. 76–80.
23. Старченко, И.Б. Нелинейная динамика процессов распространения акустических волн в неоднородных средах [Электронный ресурс] // МИТС-НАУКА: международный научный вестник: сетевое электронное научное издание. – Ростов-на-Дону: РГУ, 2006. – № 4. – Иден. номер 0420600032/0096. – Режим доступа: <http://www.roseis.ru> – 0,19 п.л.
24. Старченко, И.Б. Методы теории детерминированного хаоса применительно к нелинейным процессам взаимодействия акустических волн [Текст] / И.Б. Старченко // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – 2007. – № 2. – С. 49–53.
25. Старченко, И.Б. Параметрическая антенна в гидроакустике как нелинейная динамическая система [Текст] / И.Б. Старченко // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – 2007. – № 3. – С. 24–27.

СТАТЬИ

26. Старченко, И.Б. Модель параметрической антенны с учетом нелинейного взаимодействия первичных волн в гидродинамическом потоке жидкости [Текст] / И.Б. Старченко, В.И. Тимошенко, И.А. Кириченко // Сб. трудов VI сессии РАО / Школа-семинар «Акустика на пороге 21 века» – М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 1997. – С. 67–70.
27. Старченко, И.Б. Анализ акустического тракта параметрического профилографа при вертикальном зондировании системы придонных слоев [Текст] / И.Б. Старченко, В.И. Тимошенко, И.А. Кириченко, А.В. Бросалин // Сб. трудов VI сессии РАО / Школа-семинар «Акустика на пороге 21 века» – М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 1997. С. 217–220.
28. Старченко, И.Б. Рассеяние сигналов параметрической антенны сферическими неоднородностями / И.Б. Старченко, Д.В. Бурьков, В.И. Тимошенко // Труды IV международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения». – Новосибирск, 1998. – Т. 10. – С. 59–60.
29. Старченко, И.Б. Исследование пространственных характеристик параметрических антенн в средах с неоднородностями [Текст] / И.Б. Старченко, В.И. Тимошенко, И.А. Кириченко // Сб. трудов VII сессии РАО / Школа-семинар «Акустика океана». – М.: ГЕОС, 1998. – С. 64–67.
30. Старченко, И.Б. Влияние слоистой структуры дна на характеристики поля параметрической антенны [Текст] / И.Б. Старченко, И.А. Кириченко, А.В. Бросалин // Сб. трудов VII сессии РАО / Школа-семинар «Акустика океана». – М.: ГЕОС, 1998. – С. 166–169.
31. Старченко, И.Б., Влияние компактного гидродинамического потока на поперечное распределение поля параметрической антенны [Текст] / И.Б. Старченко, И.А. Кириченко, В.А. Воронин // Сб. трудов VII сессии РАО / Школа-семинар «Акустика океана». – М.: ГЕОС, 1998. – С. 194–197.

32. Старченко, И.Б. К вопросу об учете влияния движения среды на процесс формирования параметрической излучающей антенны [Текст] / И.Б. Старченко, В.И. Тимошенко, Д.В. Бурьков // Сб. трудов X сессии Российского акустического общества. – М.: ГЕОС, 2000. – Т. 1. – С. 149–153.
33. Старченко, И.Б. Модель параметрической гидролокации для случая статистически неоднородной среды [Текст] / И.Б. Старченко // Сб. трудов VIII школы-семинара акад. Л. М. Бреховских «Акустика океана». – М.: ГЕОС, 2000. – С. 121–124.
34. Старченко, И.Б. Теоретическое исследование формирования параметрической антенны в среде со случайно-изменяющимися параметрами на основе уравнения Хохлова-Заболотской-Кузнецова [Текст] / И.Б. Старченко // IX научная школа-семинар академика Л.М. Бреховских «Акустика океана». – М.: ГЕОС, 2002. – С. 175–179.
35. Старченко, И.Б. Экспериментальные исследования рассеяния волны разностной частоты в статистически неоднородной среде [Текст] / И.Б. Старченко, И.А. Кириченко, Д.В. Бурьков // IX научная школа-семинар академика Л.М. Бреховских «Акустика океана». – М.: ГЕОС, 2002. – С. 289–293.
36. Старченко, И.Б. Теоретическое исследование корреляции волновых компонент поля параметрической антенны [Текст] / И.Б. Старченко // X научная школа-семинар академика Л.М. Бреховских «Акустика океана». – М.: ГЕОС, 2004. – С. 165–168.
37. Старченко, И.Б. Исследование флуктуаций поля волны разностной частоты параметрической антенны в условиях нестационарности среды [Текст] / И.Б. Старченко, И.А. Кириченко // X научная школа-семинар академика Л.М. Бреховских «Акустика океана». – М.: ГЕОС, 2004. – С. 110–113.
38. Старченко, И.Б. Теоретическое исследование статистических характеристик параметрической антенны [Текст] / И.Б. Старченко // Труды XVI сессии Российского акустического общества. – М.: ГЕОС, 2005. – С. 178–182.
39. Старченко, И.Б. Операторная модель гидроакустической локации (связи) в статистически неоднородных условиях с использованием параметрических антенн [Текст] / И.Б. Старченко // Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы: материалы шестого научно-практического семинара. – Донецк, ДонНТУ, 2005. – С. 400–404.
40. Starchenko, I. Propagation and interaction of finite amplitude sound waves from the viewpoint of nonlinear dynamics (Распространение и взаимодействие звуковых волн конечной амплитуды с точки зрения нелинейной динамики) [Текст] / I. Starchenko // Proc. of the Eight European Conference on Underwater Acoustics, 8th ECUA, edited by S.M. Jesus and O.C. Rodríguez. – Carvoeiro, Portugal, 12-15 June, 2006. – V.1. – P. 138–143.
41. Старченко, И.Б. Распространение и взаимодействие волн конечной амплитуды: взгляд с точки зрения нелинейной динамики [Текст] / И.Б. Старченко // Нелинейная гидроакустика: труды конференции, Таганрог, декабрь 2005. – Ростов-н/Д: Ростиздат, 2006. – С. 66–74.
42. Старченко, И.Б. Динамический хаос при распространении волн конечной амплитуды в воде [Электронный ресурс] / И.Б. Старченко // Техническая акустика.

– СПб. – 2006. – №12. – 8 с. – Режим доступа: <http://www.ejta.org/ru/2006>, свободный.

43. Старченко, И.Б. Распространение и взаимодействие волн конечной амплитуды с точки зрения нелинейной динамики [Текст] / И.Б. Старченко // Сборник трудов XVIII сессии Российского акустического общества. – М.: ГЕОС, 2006. – Т. 1. – С. 164–168.

44. Старченко, И.Б. Диагностика неоднородностей водной среды методами гидроакустики и нелинейной динамики [Текст] / И.Б. Старченко // Современная техника и технологии в медицине, биологии и экологии: Материалы VII науч.-практ. конф., г. Новочеркасск. / Юж.-Рос. гос. тех. ун-т (НПИ). – Новочеркасск: ООО НПО «Темп», 2006. – С. 43–47.

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ НА КОНФЕРЕНЦИЯХ

45. Старченко, И.Б. К вопросу об исследовании сферического параметрического излучателя в однородном потоке жидкости [Текст] / И.Б. Старченко, Д.В. Бурьков, И.А. Кириченко // Радиозлектроника. Микроэлектроника. Системы связи и управления: материалы ВНКС и А. – Таганрог, 1997. – С. 242.

46. Старченко, И.Б. Феноменологическая модель параметрической антенны для экологического мониторинга водной среды [Текст] / И.Б. Старченко, Д.В. Бурьков, И.А. Кириченко, В.В. Салов // Биотехнические, медицинские системы и комплексы: сб. науч. тр. ВНТК. – Рязань: Изд-во РГРТА, 1997. – С. 93–94.

47. Старченко, И.Б. Диагностика водных бассейнов по рассеянному полю параметрической антенны [Текст] / И.Б. Старченко // Проблемы охраны производственной и окружающей среды: материалы международной НТК. – Волгоград: Изд-во ВолгГАСА, 1997. – С. 117–118.

48. Старченко, И.Б. Экспериментальная установка для измерения параметров поля параметрического излучателя, рассеянного сферическими неоднородностями [Текст] / И.Б. Старченко, Д.В. Бурьков, И.А. Кириченко // 2-й Научный форум «Радиозлектроника и молодежь в 21 веке», Украина. – Харьков, 1998. – С. 20.

49. Старченко, И.Б. Программный комплекс для имитационного моделирования акустических полей параметрических антенн [Текст] / И.Б. Старченко, В.В. Салов // Труды НТК. – Н. Новгород, 2000. – С. 68.

50. Starchenko, I. Some Aspects of Acoustic Measurements with Parametric Arrays in Inhomogeneous Mediums (Некоторые аспекты акустических измерений с использованием параметрических антенн в неоднородных средах) [Текст] / I. Starchenko, I. Kirichenko // Book of Abstracts / 1st International Conference on Underwater Acoustic Measurements: Technologies and Results. IACM/FORTH. – Heraklion, Crete, 2005. – P. 103.

51. Starchenko, I. Principles of Parametric Array Performance in Moving Water (Принципы работы параметрических антенн в движущейся среде) [Текст] / I. Starchenko // Book of Abstracts / 1st International Conference on Underwater Acoustic Measurements: Technologies and Results. IACM/FORTH. – Heraklion, Crete, 2005. – P. 102.

52. Starchenko, I. Chaotic Underwater Communication System Using Parametric Array (Хаотическая система звукоподводной связи с использованием параметрических антенн) [Текст] / I. Starchenko // Book of Abstracts / 1st International Conference on Underwater Acoustic Measurements: Technologies and Results. IACM/FORTH. – Heraklion, Crete, 2005. – P. 151.
53. Starchenko, I. Application of parametric arrays for detecting of bottom and subbottom subjects (theory and practice) (Применение параметрических антенн для обнаружения придонных и донных объектов – теория и практика) [Электронный ресурс] / I. Starchenko, I. Kirichenko // New Concepts for Harbour Protection, Littoral Security and Underwater Acoustic Communications: Proc. of the Turkish International Conference on Acoustics. – Istanbul, Turkey, 2005. – №2. – Режим доступа: <http://www.tica05.org/papers.asp>. – 8 p.
54. Starchenko, I. Possibility of underwater chaotic communications with parametric transmitting arrays (Возможность подводных хаотических коммуникаций с использованием параметрических антенн) [Электронный ресурс] / I. Starchenko // New Concepts for Harbour Protection, Littoral Security and Underwater Acoustic Communications: Proc. of the Turkish International Conference on Acoustics 2005. – Istanbul, Turkey, 2005. – №6. – Режим доступа: <http://www.tica05.org/papers.asp>. – 8 p.
55. Starchenko, I. Theoretical investigation of parametric array in random medium (Теоретическое исследование параметрической антенны в случайной среде) [Электронный ресурс] / I. Starchenko // Forum Acusticum. – Budapest, 2005. – №1208-1. – Режим доступа: <http://www.eaa-fenestra.org/Products/Documenta/Publications/FA2005/> – 4 p.
56. Starchenko I., Investigation of fluctuations of difference frequency wave sound field of parametric array in non-stationary medium (Исследование флуктуаций звукового поля волны разностной частоты параметрической антенны в нестационарной среде) [Электронный ресурс] / I. Starchenko, I. Kirichenko // Forum Acusticum. – Budapest, 2005. – №1208-2. – Режим доступа: <http://www.eaa-fenestra.org/Products/Documenta/Publications/FA2005/> – 6 p.
57. Starchenko I. Nonlinear dynamics of nonlinear processes in water (Нелинейная динамика нелинейных процессов в воде) [Электронный ресурс] / I. Starchenko // Proc. of 9th Western Pacific Acoustics Conference (WESPAC IX 2006). – Seoul, Korea, 2006. – №. 110. – 8 p. – ISBN 89-952189-9-1 98060 (CD-ROM).
58. Starchenko, I. Simulation of nonlinear dynamics of finite amplitude acoustical waves using Burgers equation (Моделирование нелинейной динамики акустических волн конечной амплитуды с использованием уравнения Бюргерса) [Электронный ресурс] / I. Starchenko, V. Timoshenko // Proc. of International Congress on Ultrasonics (2007 ICU). – Vienna, Austria, 2007. – №1244. – Режим доступа: – http://info.tuwien.ac.at/ecasia05/icu2007/abstracts/XML/HTMLhp_sessionR31.html.