

**II. РЕЗУЛЬТАТЫ,
ПРЕДСТАВЛЯЕМЫЕ В ОТЧЕТ РАН
ПО РАЗДЕЛУ
«ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ
В ОБЛАСТИ ЕСТЕСТВЕННЫХ, ТЕХНИЧЕСКИХ,
ГУМАНИТАРНЫХ И ОБЩЕСТВЕННЫХ НАУК»**

1. Отделение физики плазмы и электроники больших мощностей

1.1. Разработана CVD технология выращивания комбинированных пластин большой площади (диаметром до 76 мм), содержащих более 100 монокристаллов CVD алмаза, вращенных в поликристаллическую алмазную основу. Разработанная технология включает соединение поли- и монокристаллических областей в процессе CVD роста, снятие механических напряжений между областями путем высокотемпературного отжига и выращивание на монокристаллических областях комбинированных пластин эпитаксиальных слоев CVD алмаза, легированных бором. Применение технологии позволяет получать комбинированные пластины пригодные для создания электронных приборов на основе полупроводникового CVD алмаза в существующих технологических линиях.

Авторы: А.Б. Мучников, А.Л. Вихарев, Д.Б. Радищев, В.А. Исаев, О.А. Иванов, А.М. Горбачев

Аннотация. Алмаз является перспективным материалом, обладающим совокупностью исключительных свойств, благодаря которым он рассматривается как высокотехнологичный материал для широкого круга научных и промышленных применений. Технология газофазного синтеза алмазных пленок (CVD – chemical vapor deposition – осаждение из газовой фазы) активно развивается в последнее время в основном с использованием микроволновой плазмы. CVD реакторы с микроволновой плазмой позволяют выращивать поликристаллические алмазные пленки и пластины высокого качества (с низким содержанием не алмазной фазы), которые применяются в электронике больших мощностей, оптике, микроэлектронике. Поликристаллический CVD алмаз в настоящее время доступен в виде пластин диаметром до 150 мм, и вполне пригоден для промышленного применения. Однако область применения поликристаллического алмаза ограничивается наличием в нем дефектов в виде границ кристаллов. Поэтому привлекательным является использование монокристаллического CVD алмаза, который относится к широкозонным полупроводникам и обладает: рекордной подвижностью основных носителей, самой высокой теплопроводностью, прозрачностью в широком диапазоне длин волн.

К сожалению, на сегодняшний день распространенные размеры монокристаллических пластин CVD алмаза находятся в диапазоне от 3x3 до 5x5 мм². Технология производства пластин монокристаллического CVD алмаза большей площади еще находится в стадии разработки, а рекордный размер пластины CVD алмаза (сращенного из нескольких CVD пластин-«клонов») составляет 40x60 мм.

Для применения алмаза в приборостроении альтернативой сращиванию нескольких монокристаллов CVD алмаза в одну пластину может являться получение комбинированной пластины поли- и монокристаллического CVD алмаза, то есть пластины поликристаллического алмаза со вращенными в нее включениями из монокристаллического алмаза. Использование комбинированного поли- и монокристаллического CVD алмаза позволит значительно расширить применение монокристаллических пластин небольших размеров. Так, например, для создания электронных приборов на комбинированных пластинах большого диаметра (75 мм и более) могут быть использованы технологические линии, уже разработанные для кремниевой технологии. Активную часть прибора можно изготавливать на участке монокристаллического алмаза, а «матрица» из поликристаллического алмаза, будет являться держателем, обладающим высокой теплопроводностью.

Рост поликристаллических алмазных подложек (поликристаллической матрицы), а также комбинированных пластин, осуществлялся в плазмохимическом CVD реакторе на основе СВЧ резонатора, возбуждаемого на частоте 2.45 ГГц, рисунок 1(а). Полученные

пластины комбинированного CVD алмаза были использованы для эпитаксиального выращивания на них беспримесных, а также легированных бором слоев CVD алмаза.

Фотография комбинированной пластины после процесса роста приведена на рисунке 1(б). Одной из важных задач, возникающих в процессе получения комбинированного CVD алмаза, является минимизация механических напряжений, которые возникают в процессе сращивания моно- и поликристаллического алмаза. Поэтому после процесса роста проводились дальнейшие эксперименты по минимизации напряжения в комбинированной пластине, используя термический отжиг. Для измерения механических напряжений, возникающих в монокристаллических участках комбинированных алмазных пластин, были сняты рамановские спектры с пространственным разрешением, см. рисунок 2.

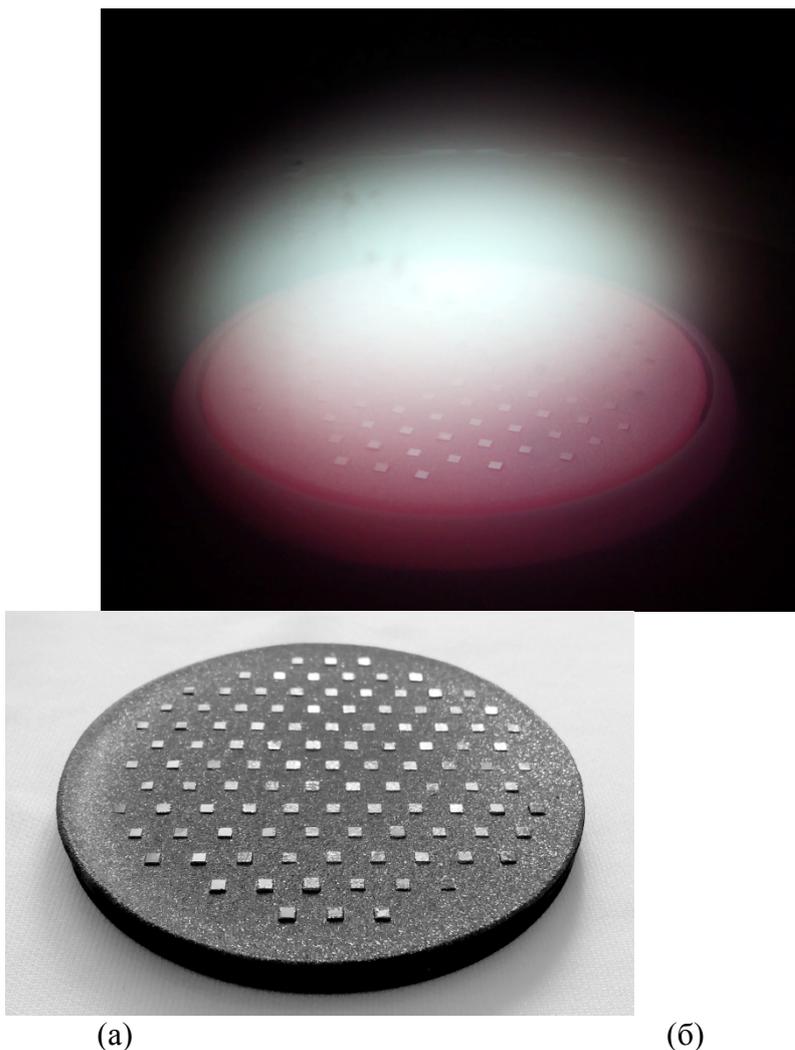
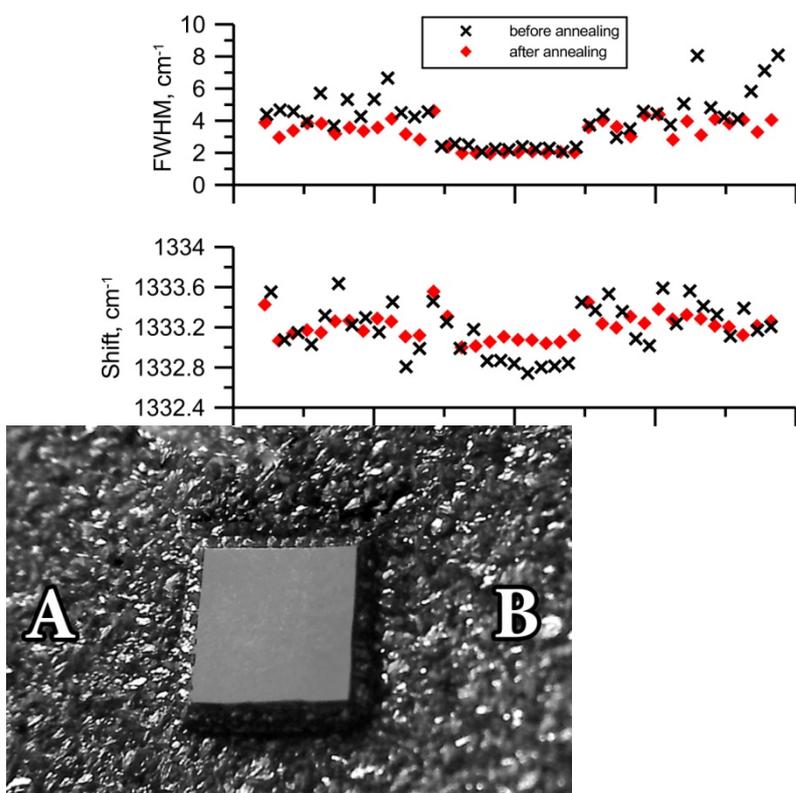


Рисунок 1. Фотография комбинированной пластины моно- и поликристаллического CVD алмаза: (а) в реакторе в процессе сращивания поликристаллических и монокристаллических областей и (б) после процесса роста.

Рамановский спектр природного алмаза имеет чёткую линию первого порядка с волновым числом около 1332 см^{-1} . Внутренние напряжения в алмазной плёнке приводят к изменению положения алмазного пика в спектре: сжатие приводит к смещению пика в сторону больших волновых чисел, растяжение - в сторону меньших, с коэффициентом пропорциональности, по разным источникам, от 0.3 до 0.6 ГПа/см^{-1} . Из рисунка 2 следует, что после отжига значения напряжений в моно- и поликристаллических участках комбинированной пластины уменьшились, и практически сравнялись между собой.

Таким образом, разработана CVD технология выращивания комбинированных пластин большой площади (диаметром до 76 мм), содержащих более 100 монокристаллов CVD алмаза, вращенных в поликристаллическую алмазную основу. Разработанная технология включает соединение поли- и монокристаллических областей в процессе CVD роста, снятие механических напряжений между областями путем высокотемпературного отжига и выращивание на монокристаллических областях комбинированных пластин эпитаксиальных слоев CVD алмаза, легированных бором. Применение технологии позволяет получать комбинированные пластины пригодные для создания электронных приборов на основе полупроводникового CVD алмаза в существующих технологических линиях.



(a) (б)
 Рисунок 2. Рамановская пространственная характеристика (а) вдоль линии АВ одной из комбинированных пластин: монокристалл №16 и около него (б). Черными символами показаны значения, снятые после процесса роста, красным – после процесса термической обработки (отжига на железе при температуре 1140С в атмосфере азота в течение 6 часов).

Публикации:

1. A.B. Muchnikov, A.L. Vikharev, D.B. Radishev, V.A. Isaev, O.A. Ivanov, A.M. Gorbachev, A wafer of combined single-crystalline and polycrystalline CVD diamond, *Materials Letters*, 2015, 139, pp.1-3; <http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2014.10.022>

1.2. Создан автоматизированный комплекс для спектроскопии и диагностики различных сред с рекордной мощностью микроволнового излучения. Источником излучения является непрерывный гиротрон, использующий криомагнит с охлаждением газообразным гелием, и генерирующий мощность до 1 кВт на частоте 263 ГГц. Изменение температуры хладагента в контуре охлаждения резонатора и рабочего напряжения позволяет осуществлять плавную перестройку частоты излучения в полосе 0.2 ГГц. Требуемая для ряда приложений мощность на уровне 10 Вт получена при низких рабочих

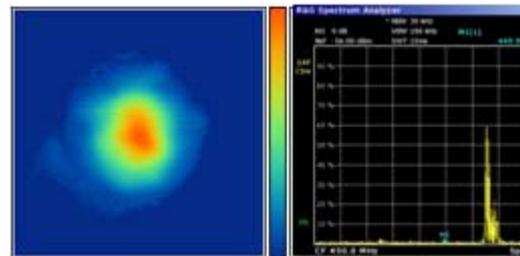
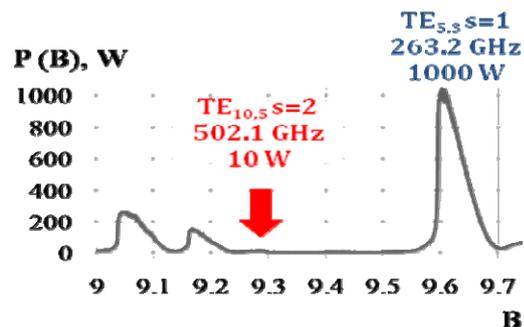
токах (0.02 А) и напряжениях (14 кВ), что позволяет работать с относительно простыми и компактными высоковольтными источниками питания.

Авторы: Денисов Г.Г., Глявин М.Ю., Соколов Е.В., Тай Е.М., Солуянова Е.А., Чирков А.В., Куфтин А.Н., Лучинин А.Г., Морозкин М.В., Запевалов В.Е., Еремеев А.Г., Малыгин В.И., Седов А.С., Цветков А.И., Плотников А.И., Холопцев В.В., Манулов В.Н., совместно с ЗАО НПП Гиком

Аннотация. Разработка компактных, относительно простых и доступных источников мощного терагерцового (ТГц) излучения важна для многочисленных приложений, включающих диагностику плазмы, спектроскопию, обнаружение и визуализацию взрывчатых веществ и оружия, новые медицинские технологии, атмосферный контроль, производство материалов высокой чистоты и т.д. Наиболее активно сегодня развивается ЯМР/ДПЯ спектроскопия высокого разрешения. Разработка источников излучения для этих целей ведется в США (CPI-Bruker Biospin), Японии (FIR FU), Европе, Китае. В непрерывном режиме генерации мощности на уровне десятков и сотен ватт на частотах выше 250 ГГц могут быть получены только при использовании гиротронов – электровакуумных приборов, основанных на стимулированном циклотронном излучении электронов, движущихся в магнитном поле.

В ИПФ РАН уже был реализован гиротрон мощностью до 400 Вт на частоте 258 ГГц с прямым выводом излучения в виде рабочей моды. В экспериментах с этим гиротроном продемонстрирована возможность в 80 раз увеличить чувствительность спектрометра. Настоящая работа была направлена на совершенствование гиротрона и создание автоматизированной системы управления режимами генерации. В качестве основного элемента магнитной системы в новом варианте использован криомагнит с охлаждением газообразным гелием по замкнутому циклу. Получена генерация на частотах 263 ГГц на основном циклотронном резонансе и 502 ГГц на второй гармонике гирочастоты. На частоте 263 ГГц получена мощность до 1 кВт, излучение рабочей моды преобразуется встроенным квазиоптическим преобразователем в узконаправленный пучок с содержанием гауссовой компоненты 93%. Для спектроскопических приложений, требующих мощностей порядка 10 Вт, реализованы режимы генерации при низком рабочем токе 20 мА и напряжении 14 кВ, что позволяет использовать компактные и относительно простые источники питания. Ширина линии излучения составила $df/f \sim 2 \cdot 10^{-6}$. Изменение температуры хладагента резонатора и рабочего напряжения позволяет осуществлять плавную перестройку частоты в полосе 0.2 ГГц. Экспериментальные данные свидетельствуют о правильности использованных технологических решений и позволяют рассчитывать в дальнейшем на успешное освоение подобными гиротронами частотного диапазона вплоть до 1 ТГц.

Для управления режимами генерации гиротрона создана автоматизированная система защиты, управления, сбора и обработки данных на основе АЦП ADAM и персонального компьютера.



Общий вид микроволнового комплекса: приборная стойка и криомагнит с гиротроном (слева), зависимость выходной мощности от магнитного поля (справа сверху), распределение микроволновой мощности на расстоянии 250 мм от окна гиротрона и спектр излучения

Публикации:

1. Глявин М.Ю., Денисов Г.Г., Запевалов В.Е., Куфтин А.Н., Лучинин А.Г., Мануилов В.Н., Морозкин М.В., Седов А.С., Чирков А.В. Терагерцовые гиротроны: состояние и перспективы, Радиотехника и электроника, 59, 8, 745-751 (2014)
2. M.Glyavin, G.Denisov, E.Tai, V.Zapevalov 16-th International Conference Laser Optics, Seminar on Terahertz Photonics St.-Peterburg, Russia, June 30 - July 4, 2014, MoSm2-04 (invited)
3. Glyavin M.Yu., Chirkov A.V., Denisov G.G., Kuftin A.N., Luchinin A.G., Sedov A.S., Zapevalov V.E., Manuilov V.N., Tai E.M 10th International Vacuum Electron Sources Conference Saint-Petersburg, Russia, 2014, Th0407 S9

1.3. Показана принципиальная возможность захвата колебаний мегаваттного гиротрона внешним сигналом. Ввод сигнала осуществляется новой квазиоптической системой, обеспечивающей оптимальную связь внешнего источника с резонатором гиротрона. Первый эксперимент выполнен с импульсным гиротроном на частоте 35 ГГц. Измеренные полоса и время захвата колебаний находятся в согласии с расчетом. Использование режима захваченных колебаний позволяет обеспечить работу генератора на очень высоких модах, стабилизировать частоту при нестабильных параметрах высоковольтных источников, повысить КПД, обеспечить когерентность нескольких гиротронов мегаваттного уровня мощности.

Авторы: В.Л.Бакунин, Ю.Гузнов, Г.Г.Денисов, Н.И.Зайцев, А.Н.Куфтин, С.А.Запевалов, С.Ю.Корнишин, Ю.В.Новожилова, А.В.Чирков, А.Шевченко

Аннотация. Для мощных гиротронов (например, 170 ГГц, 2МВт) численно исследован захват внешним монохроматическим сигналом частоты и фазы колебаний очень высокой высокой рабочей моды (TE_{28.12}). Показано, что в широкой области значений магнитного поля и напряжения даже при относительно малой мощности

внешнего сигнала происходит установление одномодовой генерации с высоким КПД на частоте внешнего сигнала. Наиболее мощные гиротроны разрабатываются для использования в системах электронно-циклотронного нагрева будущих плазменных установок УТС. Использование режима захваченных колебаний позволяет обеспечить работу генератора на очень высоких модах, стабилизировать частоту при нестабильных параметрах высоковольтных источников, повысить КПД. Стабилизация фазы излучения генератора внешним сигналом представляется перспективной также для создания большого числа когерентных источников излучения - синхронизации (сложения мощностей) нескольких мощных гиротронов.

Разработан и изготовлен макет гиротрона с квазиоптическим преобразователем, обеспечивающим трансформацию в гауссов волновой пучок рабочих мод гиротрона ($TE_{\pm 28,12}$, 170 ГГц) обоих направлений вращения. Пучки, соответствующие волнам противоположных вращений выходят через вакуумное окно прибора под углами ± 10 градусов. Гиротрон испытан в режиме импульсной (100 мкс) генерации с мощностью до 2 МВт. Смена направления вращения рабочей моды осуществлялась небольшим – около 0.2 мм - изменением радиуса электронного пучка в резонаторе полем катодной катушки. На модах обоих направлений вращения в эксперименте показан КПД более 30%. Разработанная квазиоптическая схема используется для эффективного ввода внешнего сигнала в резонатор мегаваттного гиротрона для реализации режима стабилизации частоты и фазы излучения. При этом внешний сигнал вводится в гиротрон квазиоптическим пучком, соответствующим моде одного вращения, а выводится пучком, соответствующим моде противоположного вращения.

Первый эксперимент выполнен с импульсным гиротроном на частоте 35 ГГц. Относительно низкая частота для этого эксперимента выбрана по причине доступности источника внешнего сигнала - магнетрона с мощностью до 25 кВт. При выходной мощности гиротрона 0.9 МВт измеренные полоса (11 МГц) и время захвата (100-200 нс) колебаний находятся в согласии с численными расчетами.

Публикации

1. V. Bakunin, G. Denisov, Y. Novozhilova. Zones of Locked Oscillations in a MW-Power Gyrotron Driven by External Microwave Signal. Proceedings of 38 Int. Conf. on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2013, Mainz, Germany, USA.
2. A.G.Litvak, G.G.Denisov, V.L.Bakunin, A.V.Chirkov, A.N.Kuftin, et al. New Results and New Trends in Development of Gyrotrons for Fusion. Proceedings of 39 Int. Conf. on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2014, Tucson, USA.
3. Бакунин В.Л., Денисов Г.Г., Новожилова Ю.В. Стабилизация частоты и фазы многомодового гиротрона мегаваттного уровня мощности внешним сигналом. ПЖТФ, 2014, том 40, выпуск 9, 41-47.
4. V.L. Bakunin, G.G. Denisov, Yu.V. Novozhilova. Synchronization of MW-level power gyrotron by external signal and zones of stable single-frequency generation. Journal on Infrared, Millimeter and THz Waves, 2014.
5. G.G.Denisov. Recent results and new trends in development of gyrotrons for fusion. Proceedings of SMSA, Nizhny Novgorod, Russia, 2014.
6. G.G. Denisov, S.V. Samsonov, S.V. Mishakin, I.G. Gachev. Microwave system for feeding and extracting power to and from a gyrotron traveling-wave tube through one window. IEEE Electron Device Letters. Volume: 35, Issue 7, 789 - 791.
7. A.V.Chirkov, G.G.Denisov, and A.N.Kuftin. Perspective gyrotrons with mode converter for co- and counter-rotation operating modes. Направлена в Applied Physics Letters.

1.4. При использовании синтезированного квазиоптического преобразователя, обеспечивающего высокоэффективный вывод излучения мод различных вращений,

показана возможность электронного переключения направления выходного волнового пучка мегаваттного гиротрона

Авторы: А.В.Чирков, Г.Г. Денисов, А.Н.Куфтин

Аннотация. Мощные квазинепрерывные гиротроны коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн используются в качестве источников СВЧ излучения для нагрева плазмы в условиях электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР) в установках управляемого термоядерного синтеза (УТС). В настоящее время выходная мощность разрабатываемых для этих целей гиротронов, работающих на частотах до 170 ГГц, составляет порядка 1 МВт при длительности импульсов генерации до нескольких сотен секунд. Для СВЧ комплексов крупных современных и строящихся токамаков (Asdex-Upgrade, D-III-D, JT-60, JT-60SA, ITER, DEMO) и стеллараторов (LHD, W-7X) требуются десятки таких генераторов с соответствующим комплектом оборудования.

В рамках научно-исследовательской работы, выполняемой ИПФ РАН, разработан, изготовлен и успешно испытан прототип 170 ГГц гиротрона с выходной мощностью до 1.5-2 МВт с возможностью электронного переключения направления выходного волнового пучка. Переключение направления осуществляется изменением вращения рабочей моды на противоположное посредством небольших изменений тока дополнительной катодной катушки. Гиротрон был спроектирован для использования рабочей моды $TE_{28,12}$ при ускоряющем напряжении до 95-100 кВ, токе пучка до 60 А и структуре магнитного поля, соответствующей штатному криомагниту 170 ГГц/1 МВт гиротрона ЭЦР комплекса ITER. Разработанный встроенный синтезированный квазиоптический преобразователь обеспечивает высокоэффективный вывод излучения мод различных вращений в гауссовы волновые пучки под углом $\pm 10^\circ$ к нормали выходного окна гиротрона.

Экспериментальный макет гиротрона был испытан при длительности импульсов генерации 100 мкс и частоте повторения 5-10 Гц. Выходная мощность достигала 2 МВт при КПД 34 % (без рекуперации остаточной энергии). Для всех мод измеренные дифракционные потери в квазиоптическом преобразователе имеют приемлемый уровень $\leq 2\%$, а содержание гауссовой компоненты в выходных пучках составляет $\geq 98\%$. Полученные параметры дают возможность использовать разработанный высокоэффективный синтезированный квазиоптический преобразователь в непрерывном мегаваттном приборе. Результаты испытаний короткоимпульсного макета 170 ГГц гиротрона находятся в хорошем соответствии с расчетными данными. Все элементы гиротрона рассчитаны на освоение непрерывного режима работы.

Предложенная новая схема гиротрона с разработанным синтезированным квазиоптическим преобразователем мод противоположного вращения принципиально расширяет параметры прибора - возможность электронного переключения направления выходного волнового пучка мегаваттного гиротрона, и возможность использования эффективной входной схемы захвата частоты/фазы генерации гиротрона внешним сигналом (синхронизация гиротронов, компенсация нестабильности высоковольтных источников питания, увеличение эффективности одномодовой генерации, стабилизация частоты и фазы, подавление паразитных мод).

Публикации

1. A.G.Litvak, G.G.Denisov, V.L.Bakunin, A.V.Chirkov, A.N.Kuftin, et al. New results and new trends in development of gyrotrons for fusion. Proceedings of 39 Int. Conf. on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2014, Tucson, USA.

2. G.G.Denisov. Recent results and new trends in development of gyrotrons for fusion. Proceedings of SMSA, p.158 (2014).

3. A.V.Chirkov, G.G.Denisov, and A.N.Kuftin. Perspective gyrotrons with mode converter for co- and counter-rotation operating modes. Направлена в Applied Physics Letters.

1.5. Предложена новая схема электронно-циклотронного нагрева для крупномасштабных прямых магнитных ловушек, основанная на эффекте захвата излучения в трехмернонеоднородной гиротропной плазме. Схема реализована в системе дополнительного ЭЦ нагрева плазмы на установке ГДЛ (ИЯФ им. Будкера, Новосибирск), что позволило поднять температуру электронов до рекордного для этого класса установок значения 650 эВ. Эксперименты на установке ГДЛ подтвердили высокую эффективность ЭЦ нагрева в узком диапазоне углов ввода излучения в полном соответствии с предсказаниями теории.

Авторы: Е.Д. Господчиков, Г.Г.Денисов, В.И. Малыгин, О.Б. Смолякова, А.Г. Шалашов (ИПФ РАН), M.Thumm, А.Л. Соломахин, П.А. Багрянский, Д.В.Яковлев (ИЯФ им. Будкера СО РАН)

Аннотация. Поглощение электромагнитных волн в условиях электронно-циклотронного (ЭЦ) резонанса широко используется для нагрева высокотемпературной плазмы в крупномасштабных тороидальных магнитных ловушках. Однако применение этого метода в открытых магнитных ловушках до недавнего времени было ограничено либо относительно компактными лабораторными установками, либо задачами стабилизации плазмы достаточно низкой плотности. Эффективный ЭЦ нагрев плотной плазмы в большой открытой ловушке был продемонстрирован лишь в конце 2013 года на установке ГДЛ (газодинамическая ловушка) в Институте ядерной физики им. Г.И.Будкера. Практическая реализация такого нагрева очень нетривиальна, поскольку для эффективного поглощения коротковолновое излучение гиротрона должно распространяться вдоль магнитного поля, однако ввод излучения с торцов ловушки физически невозможно из-за эффекта «отсечки» излучения плазмой. Применяемые в тороидальных ловушках схемы нагрева с вводом излучения поперек магнитного поля тоже неэффективны из-за относительно низкой температуры электронов и компактности прямой ловушки по сравнению с токамаком. Тем не менее, удалось найти новую схему нагрева, решающую все основные проблемы: позволяющую обойти сильную рефракцию при вводе излучения в плазму из вакуума и обеспечивающую квазипродольное распространение излучения в области поглощения. Это возможно, если волновой пучок вводится через боковую поверхность плазменного столба со стороны сильного магнитного поля под специально подобранным углом к магнитному полю так, что пучок захватывается за счет рефракции в трехмерно неоднородной гиротропной плазме и подходит к поверхности ЭЦ резонанса под углом, обеспечивающим хорошее поглощение. Результат состоит в том, что эта довольно нетривиальная схема подтвердилась в эксперименте.

Публикации

[1] A. G. Shalashov, E. D. Gospodchikov, O. B. Smolyakova, P.A. Bagryansky, V. I. Malygin, M. Thumm. Auxiliary ECR heating system for the gas dynamic trap // PHYSICS OF PLASMAS 19, 052503 (2012)

[2] A. G. Shalashov, E. D. Gospodchikov, O. B. Smolyakova, P.A. Bagryansky, V. I. Malygin, M. Thumm Auxiliary ECR heating system for the gas dynamic trap // Problems of Atomic Science and Technology, Series: Plasma Physics. Vol 6, p. 49 (2012)

[3] P.A. Bagryansky, S.P. Demin, E.D. Gospodchikov, Yu.V. Kovalenko, V. I. Malygin, S.V. Murakhtin, V.Ya. Savkin, A.G. Shalashov, O.B. Smolyakov, A.L. Solomakhin, M. Thumm, D.V. Yakovlev. ECR heating system for the gas dynamic trap // Fusion Science and Technology. Vol. 63 (1T), p. 40 (2013)

[4] P.A. Bagryansky, E.D. Gospodchikov, Yu.V. Kovalenko, A.A. Lizunov, V.V. Maximov, S.V. Murakhtin, E.I. Pinzhenin, V.V. Prikhodko, V.Ya. Savkin, A.G. Shalashov, E.I. Soldatkina, A.L. Solovakhin, D.V. Yakovlev First results of auxiliary ECR heating experiments in GDT magnetic trap // Proceedings of 9th International Workshop Strong Microwaves and terahertz waves: sources and applications Nizhniy Novgorod- Perm – Nizhniy Novgorod 24-30.07.2014, p. 127 (2014)

[5] P.A. Bagryansky, E.D. Gospodchikov, Yu.V. Kovalenko, A.A. Lizunov, V.V. Maximov, S.V. Murakhtin, E.I. Pinzhenin, V.V. Prikhodko, V.Ya. Savkin, A.G. Shalashov, E.I. Soldatkina, A.L. Solomakhin, D.V. Yakovlev. Achievement of a record electron temperature for a magnetic mirror device. Submitted to Phys. Rev. Lett. (2014)

1.6. Исследовано взаимное влияние оптических и терагерцовых импульсов при их совместном распространении в электрооптических кристаллах. Показано, что в процессе взаимодействия происходят изменения энергии и спектра оптического импульса, определяемые амплитудой и фазой терагерцового поля. Использование частотной фильтрации при регистрации спектральных изменений оптического излучения позволяет реализовать новый метод когерентного детектирования терагерцового излучения. Для предложенного метода предсказана и продемонстрирована чувствительность, более чем на порядок превышающая чувствительность стандартного метода электрооптического стробирования.

Авторы: Ахмеджанов Р.А., Иляков И.Е., Шишкин Б.В. (ИПФ РАН), Китаева Г.Х. (МГУ)

Аннотация. Теоретически и экспериментально исследовано взаимодействие оптических и терагерцовых импульсов при совместном распространении в электрооптических кристаллах. Показано, что их взаимодействие приводит к изменениям энергии и спектра лазерного импульса, величина которых пропорциональна первой производной по времени от напряженности терагерцового поля. Найдена количественная связь между изменением параметров лазерного и терагерцового импульсов. Результаты теоретического анализа находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными. Исследована возможность реализации новой схемы когерентного детектирования терагерцового излучения, основанная на измерении прошедшей через спектральный фильтр энергии оптического импульса. Экспериментально продемонстрировано, что чувствительность предложенной схемы при использовании оптического фильтра с резким наклоном спектрального пропускания более чем на порядок превышает чувствительность стандартной схемы.

Публикации

1. I. E. Ilyakov, G. Kh. Kitaeva, B. V. Shishkin and R. A. Akhmedzhanov Laser pulse amplitude changes induced by terahertz waves under linear electro-optic effect. Appl.Phys.Lett. **104**, 151107 (2014)

2. I. E. Ilyakov, G. Kh. Kitaeva, B. V. Shishkin and R. A. Akhmedzhanov. Electro-optic sampling based on optical-terahertz energy exchange. Proceedings of Inter. Conf. "Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications", July 24-30, 2014, P.

1.7. Разработан способ получения высокоплотной (плотность порядка 99 % от теоретической) оксидной керамики с субмикронным размером зерна за время порядка нескольких минут при микроволновом нагреве. При скоростях нагрева 100 ... 3000 °С/мин и отсутствии изотермической выдержки характерное время процесса сокращается в 10...100 раз по сравнению со значениями, типичными для спекания с использованием традиционных методов нагрева.

Авторы: Ю.В. Быков, С.В. Егоров, А.Г. Еремеев, И.В. Плотников, К.И. Рыбаков, А.А. Сорокин

Аннотация. Уникальная возможность получения керамики с близкой к теоретической плотностью при нулевом времени выдержки при температуре спекания объясняется спецификой поведения материала в интенсивном микроволновом поле. Снижение температуры плавления приграничных областей зерен вследствие присутствия в них повышенных концентраций дефектов и примесных атомов, и преимущественное поглощение в этих областях микроволновой энергии, приводит к их переходу в квазижидкое состояние при среднемассовой температуре образца существенно ниже температуры плавления спекаемого материала. Условием этого является нагрев спекаемого керамического изделия на участке от начала уплотнения до температуры, обеспечивающей достижение максимальной плотности керамики, микроволновым излучением такой интенсивности, что в материале изделия происходит расплавление приграничных областей зерен. Возникающие вследствие объемного поглощения микроволнового излучения термоупругие напряжения существенно превосходят капиллярные напряжения. Высокие скорости диффузионного массопереноса в жидкой фазе обеспечивают сверхбыстрое уплотнение материала. В результате время спекания не превышает нескольких единиц минут.

Авторами продемонстрировано высокоскоростное спекание керамических материалов составов 5 ат.% Yb:(La_{0.1}Y_{0.9})₂O₃, Al₂O₃ и MgAl₂O₄. Микроволновый нагрев осуществлялся на гиротронном комплексе с регулируемой мощностью излучения до 5 кВт на частоте 24 ГГц, разработанном в Институте прикладной физики РАН. Компьютерная система управления комплекса позволяет реализовывать процессы нагрева в наперед заданных режимах со скоростью увеличения температуры до 3000 °С/мин. В результате получены образцы керамики с плотностью не менее 99 % от теоретического значения. В частности, удалось получить образцы беспористой лазерной керамики с прозрачностью более 60 % во всем оптическом диапазоне. Исследование микроструктуры полученных образцов показало наличие следов квазижидкой фазы в межзеренных границах и деформацию краевых областей зерен, вызванную термическими напряжениями. Размер зерна в керамических материалах, спеченных в высокоскоростных режимах, примерно на порядок меньше, чем размер зерна в аналогичных материалах при традиционном спекании.

Публикации

1. Yu. Bykov, A. Eremeev, S. Egorov, K. Rybakov, A. Sorokin. Ultra-rapid microwave sintering of oxide ceramics // Proc. Intern. Conf. on SINTERING 2014, 24 – 28 Aug. 2014, Dresden, Germany, pp. 200-201.

2. K. I. Rybakov, Yu. V. Bykov, A. G. Eremeev, S. V. Egorov, V. V. Kholoptsev, A. A. Sorokin, V. E. Semenov. Microwave ultra-rapid sintering of oxide ceramics // Ceramic Transactions, 2014, принято к опубликованию.

1.8. Теоретически показана возможность амплитудной модуляции интенсивного непрерывного СВЧ-излучения на основе эффекта нелинейного просветления, возникающего при резонансном взаимодействии со встречным потоком невозбужденных циклотронных осцилляторов. Найдена область параметров, в которой начальный стационарный сигнал разбивается на последовательность коротких (субнаносекундных) импульсов, каждый из которых представляет собой солитон. Исследуемый эффект предлагается использовать для амплитудной модуляции излучения коротковолновых гиротронов.

Авторы: Н.С.Гинзбург, И.В.Зотова, А.С.Сергеев, В.Ю.Заславский, Е.Р.Кочаровская, И.В.Железнов

Аннотация. Расширение круга приложений мощных источников электромагнитного излучения, включая диагностику плазмы, системы локации, спектроскопию и т.д., обуславливает актуальность исследований по трансформации излучения миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов в когерентную последовательность коротких (наносекундных) импульсов. Для решения указанной задачи предложено использовать эффект модуляции стационарного излучения при резонансном взаимодействии со встречным потоком невозбужденных циклотронных осцилляторов. В такой системе существует определенная область параметров, в которой начальный стационарный сигнал разбивается на последовательность коротких импульсов, каждый из которых представляет собой солитон со стабильными параметрами. Описанный эффект возникает исключительно вследствие неизохронности, которая в данном случае обусловлена релятивистской зависимостью гирочастоты от энергии частиц. Подобно мазерам на циклотронном резонансе (МЦР) эта зависимость оказывается существенной уже при кинетической энергии электронов много меньше их энергии покоя. Однако, если в МЦР частицы обладают начальной скоростью движения по круговой орбите, и электронный поток является аналогом возбужденной активной среды, то в рассматриваемом случае первоначально прямолинейный электронный поток, формирует резонансную пассивную среду. Несмотря на предельную простоту исследуемой системы (прямолинейный электронный поток резонансно взаимодействует со встречной электромагнитной волной) как с точки зрения практической реализации, так и теоретического описания, нелинейность, обусловленная неизохронностью движения электронов в магнитном поле, в совокупности с эффектами запаздывания приводит к достаточно нетривиальной картине стационарных и нестационарных динамических режимов. Экспериментальная реализация последних может быть весьма продуктивной для использования субмм гиротронов в спектроскопии.

Публикации

I.V. Zotova, N.S. Ginzburg, A.S. Sergeev, E.R. Kocharovskaya, V.Yu. Zaslavsky
Conversion of electromagnetic wave into a periodic train of solitons under cyclotron resonance interaction with backward beam of unexcited oscillators. Phys.Rev.Lett. 113, 143901 (2014)

1.9. Показано, что приближенное описание электронных траекторий с помощью прямых, перпендикулярных поверхности электродов, позволяет с хорошей точностью оценить пороги мультипакторного разряда, возникающего между металлическими электродами, поверхности которых не параллельны между собой. Корректность метода подтверждена прямым численным моделированием разряда, возникающего между электродами спиральной антенны. Полученные результаты можно использовать для повышения электрической прочности систем спутниковой связи.

Авторы: В.Е. Семенов, Е.И. Ракова (ИПФ РАН), J. Rasch (Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden), J. F. Johansson (RUAG Space AB, Gothenburg, Sweden)

Аннотация. Мультипакторный разряд, возникающий на поверхности твердых тел в вакууме, создает в настоящее время серьезные проблемы для развития систем спутниковой связи. Поэтому во многих научных центрах во всем мире ведется активный поиск эффективных методов подавления этого разряда. Существенной помехой для такого поиска является отсутствие простых аналитических моделей, описывающих зависимость порогов возникновения разряда от геометрической формы системы. Такая модель существовала только для простейшей плоско-параллельной геометрии системы. В отсутствие такой более общей модели поиск возможностей подавления разряда приходится вести наугад, перебирая большое число разнообразных параметров. Такой поиск велся в течение многих лет и в ИПФ РАН, где создавались пакеты программ и проводилось численное моделирование мультипакторного разряда в самых разнообразных радиотехнических системах. В ходе этих исследований были установлены достаточно общие закономерности движения для тех электронов, которые дают основной вклад в развитие разряда. В частности, траектории движения таких электронов можно с достаточной точностью аппроксимировать прямыми линиями, перпендикулярными поверхности металлических электродов. Используя такую аппроксимацию, удалось предложить простой способ расчета эффектов, связанных с фокусировкой и дефокусировкой пучков электронных траекторий между электродами, поверхности которых не параллельны или являются искривленными. Расчет этих эффектов позволил дать простую оценку влияния геометрической формы электродов на пороги возникновения разрядов. В частности, было показано, что пороги возникновения разряда могут быть весьма существенно повышены в результате нарушения параллельности поверхностей противоположных электродов. Справедливость данной оценки была подтверждена для ряда радиотехнических систем прямым численным моделированием разряда. Использование предложенного метода анализа порогов мультипакторного разряда открывает большие возможности для повышения электрической прочности систем спутниковой связи.

Публикации

1. J.Rasch, D.Anderson, J.Johansson, M.Lisak, J.Puech, E.Rakova, V.Semenov. Microwave multipactor breakdown between two cylinders. IEEE Trans. Plasma Science, Vol. 38, NO. 8, pp. 1997-2005 (2010),

2. J. Rasch, V. E. Semenov, E. Rakova, D. Anderson, J. F. Johansson, M. Lisak and J. Puech. Simulations of multipactor breakdown between two cylinders. IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 39, Issue 9, pp. 1786-1794 (2011).

3. V. E. Semenov, J. Rasch, E. Rakova, and J. F. Johansson. General study of multipactor between curved metal surfaces. IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, VOL. 42, NO. 3, pp. 721-728 (2014).

1.10. Предложен авторезонансный механизм формирования инвертированных распределений по уровням Ландау для дираковских электронов в графене и топологических изоляторах. Показано, что для минимальных на сегодняшний день констант релаксации $\hbar\gamma \approx 0.1-1 meV$ при помощи существующих каскадных лазеров может быть сформирован энергетический спектр с «разрывом» в несколько уровней Ландау.

Авторы: М.Д. Токман, М.А. Ерухимова (ИПФ РАН), А. Белянин (Texas A&M University)

Аннотация. В последние годы проявляется значительный интерес к исследованиям нелинейно-оптических свойств сред с безмассовыми дираковскими носителями заряда в графене и топологических изоляторах типа Bi_2Se_3 . В частности, интенсивно исследуется циклотронный резонанс электромагнитного излучения с дираковскими электронами.

Авторами исследовано циклотронное ускорение дираковских частиц в случае произвольного возмущения импульса. Использован метод анализа квазиклассических траекторий на фазовой плоскости с учетом релаксационных процессов. Показано, что известные для классических заряженных частиц механизмы ускорения в режиме фазового захвата (авторезонанса) могут быть реализованы и для безмассовых дираковских носителей заряда. На основе режима авторезонанса предложен метод формирования энергетического спектра электронов с «разрывом», величина которого управляется магнитным полем.

Такие инвертированные распределения могут оказаться полезными как в задачах исследования свойств графена и топологических изоляторов, так и в задачах создания новых источников терагерцового и инфракрасного диапазонов. Показано, что для минимальных на сегодняшний день констант релаксации $\hbar\gamma \approx 0.1-1 \text{ meV}$, достижимых в топологических изоляторах, энергетический спектр с «разрывом» в 4-5 уровней Ландау может быть сформирован при помощи существующих каскадных лазеров ($\lambda \approx 0.1 \text{ mm}$, $P \geq 1 \text{ W}$).

Публикации

М.Д. Токман, М.А. Ерухимова, А. Белянин, Нелинейное циклотронное ускорение безмассовых дираковских носителей заряда в графене и топологических изоляторах // Письма в ЖЭТФ, т. 100, вып. 6, стр. 434-441 (2014)

1.11. Построена теория сверхизлучательной релаксации циклотронного возбуждения двумерного электронного газа. Теория объясняет экспериментальные зависимости времени релаксации такого возбуждения от поверхностной плотности электронов и величины магнитного поля для системы квантовых ям на поверхности GaAs, возбуждаемых терагерцовым видеоимпульсом. Использован предложенный авторами новый метод описания релаксации, адекватный рассматриваемой квантовой системе. Результаты теории подтверждаются данными эксперимента.

Авторы: М.Д. Токман, М.А. Ерухимова (ИПФ РАН), А. Белянин (Texas A&M University)

Аннотация Исследование релаксационных процессов в возбужденных многочастичных системах представляет фундаментальный интерес для различных областей квантовой науки и техники. Квантованный в магнитном поле двумерный электронный газ представляет собой уникальную по своим возможностям перестраиваемую систему для исследования динамики квантового ансамбля.

Построена теория релаксационной динамики квантованного в магнитном поле двумерного электронного газа в системе квантовых ям на поверхности GaAs, возбуждаемого терагерцовым импульсом. Теория основана на предложенном авторами методе описания релаксации, который позволяет получить корректные уравнения для макропараметров системы в области, в которой стандартные модели релаксации неприменимы (непригодны в условиях взаимодействия квантовой системы с

широкополосным излучением и не удовлетворяют калибровочной инвариантности решения).

Теория предсказывает сверхизлучательный механизм релаксации циклотронного возбуждения в рассматриваемой системе и объясняет экспериментальные зависимости времени релаксации от поверхностной плотности электронов и величины магнитного поля.

Публикации

1. Qi Zhang, Takashi Arikawa, Eiji Kato, John L. Reno, Wei Pan, John D. Watson, Michael J. Manfra, Michael A. Zudov, Mikhail Tokman, Maria Erukhimova, Alexey Belyanin, and Junichiro Kono. Superradiant Decay of Cyclotron Resonance of Two-Dimensional Electron Gases // *Phys. Rev. Letters* 113, 047601 (2014)

2. M. Tokman, M. Erukhimova, Corrections to the phenomenological relaxation models for open quantum systems, *J. Lumin.* 137 (2013), 148

3. M.D. Tokman, Gauge invariance of phenomenological models of the interaction of quantum dissipative systems with electromagnetic fields, *Phys. Rev. A* 79 (2009) 053415

1.12. Показано, что в фотосфере вырожденной звезды — одиночного белого карлика — резко уменьшается столкновительное поглощение излучения, поляризованного поперёк сильного внешнего магнитного поля на частотах ниже электронной циклотронной частоты. В результате электромагнитные волны с необыкновенной поляризацией могут выходить из более глубоких и горячих слоёв фотосферы, чем обыкновенные волны, и таким образом могут определять линейную поляризацию наблюдаемого излучения в инфракрасном континууме магнитного белого карлика.

Авторы: С. А. Корягин

Аннотация. Известно, что в плазме без магнитного поля столкновительное поглощение излучения достаточно резко возрастает с увеличением длины волны — обратно пропорционально квадрату длины волны. Мы показали, что в специфических условиях фотосферы магнитного белого карлика поглощение, напротив, уменьшается с увеличением длины волны для электромагнитных волн с выделенной поляризацией. Обнаруженное просветление происходит в фотосферной плазме белого карлика с низкой температурой порядка одного электрон-вольта и сильным магнитным полем больше десяти мегагаусс. В этом случае движение электрона становится практически одномерным не только вдали от рассеивающего центра, но и непосредственно в столкновении: частица совершает много циклотронных оборотов за время пролёта около рассеивающего центра. Тогда поперечная к магнитному полю компонента кулоновской силы рассеивающего центра вызывает лишь медленный электрический дрейф электрона поперёк магнитных силовых линий. В результате в столкновениях резко уменьшается мощность тормозного излучения волн, поляризованных поперёк магнитного поля, по сравнению со случаем немагнитной плазмы. Снижение мощности настолько велико, что, согласно закону Кирхгофа, столкновительное поглощение таких волн уменьшается с увеличением длины волны, а не увеличивается, как в немагнитной плазме. Холодная сильно разреженная замагнитненная плазма подобна одноосному кристаллу для излучения с частотами ниже электронной циклотронной частоты, поэтому в ней как раз распространяются необыкновенные волны с сохранением необходимой линейной поляризацией поперёк магнитного поля. Соответственно необыкновенные волны могут выходить к наблюдателю из более глубоких и горячих слоёв звёздной фотосферы, чем обыкновенные волны, и тем самым способны порождать наблюдаемую линейную поляризацию излучения одиночных магнитных белых карликов в инфракрасном диапазоне.

Публикации

Корягин С. А. Тормозное излучение волн, линейно поляризованных поперёк сильного внешнего магнитного поля, в низкоэнергичных электрон-ядерных столкновениях // Известия вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 10. С. 739–753.

Бубукина И. И., Корягин С. А. Тормозное излучение при столкновениях низкоэнергичных электронов с положительными ионами в магнитном поле // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2009. Т. 135, № 6. С. 1056–1067.

Koryagin S. A. High transparency of photosphere plasma for electromagnetic waves polarized across strong magnetic field on white dwarfs // 19th European White Dwarf Workshop — 40 years of European White Dwarf Workshops (1974–2014), August 11–15, 2014, Montreal, Canada. P. 23–24.

Корягин С. А. Дихроизм плазмы по столкновительному поглощению в условиях фотосферы белого карлика с сильным магнитным полем // Всероссийская астрофизическая конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра (HEA-2013)», 23–26 декабря 2013 г. М.: Институт космических исследований РАН, 2013. С. 51.

Корягин С. А. Высокая линейная поляризация тормозного излучения в фотосфере белого карлика с сильным магнитным полем // Всероссийская астрономическая конференция «Многоликая Вселенная» — ВАК-2013, 23–27 сентября 2013 года, Санкт-Петербург: Тезисы докладов. С. 151–152.

Bubukina I. I., Koryagin S. A. Strong linear polarization of bremsstrahlung emissivity in photospheres of magnetic white dwarfs // Journal of Physics: Conference Series. 2009. V. 172. 16th European White Dwarfs Workshop, 30 June–04 July 2008, Barcelona, Spain. Art. id. 012052 (4 pages).

1.13. Решена проблема происхождения поляризации солнечного радиоизлучения с тонкой структурой спектра типа зебра. Эта структура в виде квазигармонических параллельно дрейфующих полос повышенного излучения обязана своим происхождением плазменному механизму генерации на уровнях двойного резонанса, где плазменная частота близка к гармоникам гирочастоты электронов. Показано, что заметная поляризация наблюдаемого на Земле радиоизлучения может возникнуть, только если оно является результатом рассеяния (в том числе, индуцированного) плазменных волн ионами или слияния этих волн с низкочастотными волнами в электромагнитное излучение на частоте основного тона. В этих условиях обыкновенная волна свободно выходит из источника генерации, а необыкновенная волна оказывается в зоне непрозрачности и не покидает источник. Указаны возможные причины деполяризации радиоизлучения с зебра-структурой, которое выходит из источника полностью поляризованным со знаком обыкновенной волны.

Авторы: Е.Я.Злотник, В.В.Зайцев (Институт прикладной физики РАН), А.Т.Алтынцева (Институт солнечно-земной физики СО РАН)

Аннотация. Зебра-структура представляет собой самую интересную разновидность тонкой структуры на динамических спектрах радиоизлучения Солнца. Она выглядит, как квазигармонические параллельно дрейфующие полосы повышенной интенсивности, которые наблюдаются на фоне континуума IV типа, и присутствует во всем диапазоне наблюдаемых радиоволн – от сантиметровых до декаметровых волн. Наблюдаемые свойства зебра-структуры объясняются в рамках теории, основанной на эффекте двойного плазменного резонанса, который реализуется в неоднородной магнитной ловушке, заполненной слабоанизотропной равновесной плазмой с небольшой примесью неравновесных по поперечным относительно магнитного поля скоростям.

Эффект двойного плазменного резонанса состоит в том, что инкремент неустойчивости, вызванной такими электронами, сильно возрастает в тех областях, где частота верхнего гибридного резонанса $f_{UH} = \sqrt{f_p^2 + f_B^2}$ (или плазменная частота в слабоанизотропной корональной плазме) совпадает с гармониками электронной гирочастоты: $f_p = s f_B$.

Именно такие уровни и являются источниками разрешенных полос повышенной яркости.

Согласно имеющимся в мировой литературе данным, радиоизлучение в зебра-полосах сильно поляризовано, и знак поляризации, вероятнее всего, соответствует обыкновенной волне. В рамках плазменного механизма генерации поляризация радиоизлучения, принимаемого на Земле, обусловлена разной интенсивностью трансформации плазменных волн в обыкновенные или необыкновенные волны или разными условиями выхода этих волн из источника. В слабоанизотропной плазме, которая является источником зебра-структуры с достаточно высокими номерами гармоник s , степень поляризации радиоизлучения на удвоенной плазменной частоте, возникшего в результате комбинационного рассеяния плазменных волн, пропорциональна малому фактору - отношению электронной гирочастоты к плазменной частоте, и не может быть значительной. Заметная поляризация может возникнуть только в случае, если наблюдаемое радиоизлучение есть результат рассеяния плазменных волн на ионах (в том числе, индуцированного) или слияния их с низкочастотными волнами. В этом случае обыкновенная волна свободно выходит из источника генерации, а необыкновенная волна попадает в зону затухания и не покидает источник. В результате выходящее радиоизлучение оказывается полностью поляризованным со знаком обыкновенной волны. Выяснены также возможные причины деполяризации радиоизлучения с зебра-структурой.

Публикации

E.Ya.Zlotnik, V.V.Zaitsev, A.T.Alyntsev, On polarization of the Zebra Pattern in Solar Radio Emission, *Solar Physics*, 2014, v. 289, pp. 233–249

1.14. Теоретически обоснован и экспериментально продемонстрирован новый метод самокомпрессии релятивистски сильных лазерных импульсов до нескольких колебаний поля при возбуждении кильватерной плазменной волны. Развита теория нестационарного самовоздействия широких (в масштабе длины плазменной волны) пространственно-ограниченных сверхкоротких лазерных импульсов. Самосжатие волнового поля, длительностью меньше периода плазменных колебаний, связана с самосогласованным вытеснением электронов в задней части импульса. Для мультипетаваттных лазерных импульсов насыщение релятивистской нелинейности приводит к квазиодномерному режиму самосжатия лазерного импульса. При этом характерная длина формирования сжатого импульса зависит от интенсивности поля по степенному закону. При релятивистски слабых интенсивностях самокомпрессия волнового пакета протекает в условиях нестационарной самофокусировки излучения; в этом случае характерная длина компрессии зависит от интенсивности экспоненциально. Экспериментально продемонстрировано самосжатие суб-петаваттных лазерных импульсов с длительностью 30 фс до 10 фс в газовой струе в квазиодномерном режиме.

Авторы: А.А. Балакин, А.В. Ким, А.Г. Литвак, В.А. Миронов, С.А. Скобелев (ИПФ РАН), О. Вилли (Университет Генриха Гейне, Дюссельдорф, Германия)

Аннотация. Выполнен цикл работ по исследованию самовоздействия релятивистски сильных лазерных импульсов в плазме в условиях возбуждения кильватерной плазменной волны. Предложен новый перспективный метод

самокомпрессии лазерных импульсов петаваттного уровня мощность вплоть до одного колебания поля. Самосжатие волнового пакета связана с тем, что в условиях возбуждения кильватерной волны в задней части волнового пакета происходит вытеснение электронов, а в передней части импульса наоборот концентрация электронов увеличивается. Следовательно задняя часть импульса догоняет переднюю часть, так как групповая скорость волнового пакета в плазме увеличивается с уменьшением концентрации электронов. Как показали результаты аналитических и численных исследований темп укорочения лазерного импульса протекает по разному в зависимости от величины амплитуды векторного потенциала. В случае, когда амплитуда векторного потенциала мала по сравнению с релятивистским значением лазерный импульс будет испытывать самофокусировку, что приведет к дополнительному усилению поля. Как показал качественный анализ в этом случае характерная длина экспоненциально уменьшается с увеличением мощности в лазерном импульсе. В другом предельном случае, когда из-за насыщения нелинейности подавляется самофокусировка (реализуется квазиодномерная ситуация) темп укорочения ниже и зависимость длины компрессии волнового пакета степенная от амплитуды лазерного импульса.

Проведено детальное теоретическое исследование шланговой неустойчивости распространяющихся в плазме релятивистски сильных лазерных импульсов с длительностью менее периода кильватерной плазменной волны. Получено аналитическое выражение для смещения центра масс волнового пучка и проанализировано влияние этой неустойчивости на процесс модификации спектра лазерного излучения для широкой области начальных параметров. Показано, что развитие неустойчивости характеризуется степенной (не экспоненциальной) зависимостью от времени на трассе распространения и не приводит к ухудшению режима самокомпрессии лазерных импульсов.

Наряду с теоретическим анализом был проведен также эксперимент. В эксперименте, было продемонстрировано сжатие релятивистски сильного лазерного импульса с мощностью 100 ТВт с 30 фс до 10 фс в газовой струе длиной 2 мм с концентрацией газа $1.1 \cdot 10^{19}$ Вт/см². Анализ экспериментальных спектров показал, что можно было рассчитывать и на более сильное укорочение лазерного импульса, но с данным SPIDER нельзя достоверно измерить более короткие волновые пакеты.

Публикации

1. А.А. Балакин, А.Г. Литвак, В.А. Миронов, С.А. Скобелев, "О самофокусировке сверхкороткого релятивистски сильного лазерного импульса в плазме", **ЖЭТФ**, т. 139, стр. 579-586 (2011).
2. A. A. Balakin, A. G. Litvak, V. A. Mironov, S. A. Skobelev, "Self-compression of relativistically strong femtosecond laser pulses during the excitation of a plasma wake wave", **EPL** v.100, 34002 (2012).
3. A. A. Balakin, A. G. Litvak, V. A. Mironov, S. A. Skobelev, "Compression of femtosecond petawatt laser pulses in a wake-wave excitation plasma under the conditions", **Phys. Rev. A**, v. 88, 023836 (2013).
4. A. Pipahl, E.A. Anashkina, M. Toncian, T. Toncian, S.A. Skobelev, A.V. Bashinov, A.A. Gonoskov, O. Willi, A.V. Kim, "High-intensity few-cycle laser-pulse generation by the plasma-wakefield self-compression effect", **Phys. Rev. E**, v. 87, 033104 (2013).
5. A. V. Kim, A. G. Litvak, V. A. Mironov, and S. A. Skobelev, "Optimization of the regime of shortening of relativistically strong laser pulses in the process of excitation of a plasma wake wave", **Phys. Rev. A**, v. 90, 043843 (2014).
6. A. Pipahl, E.A. Anashkina, M. Toncian, T. Toncian, S.A. Skobelev, A.V. Bashinov, A.A. Gonoskov, O. Willi, A.V. Kim, "Towards high intensity few-cycle pulses using plasma wakefield self-compression effect", **Journal of Physics: Conference Series**, v. 414, 012011 (2013).

1.15. Создан и реализован метод измерения параметров оптических дипольных ловушек для ультрахолодных газов. Метод основан на насыщении ввода энергии при параметрическом возбуждении.

Авторы: Т. В. Бармашова, К. А. Мартьянов, В. Б. Махалов, А. В. Турлапов

Аннотация. Оптическая дипольная ловушка – наиболее популярное средство удержания ультрахолодных атомных и молекулярных газов. Ловушка создаётся в максимуме интенсивности электромагнитного поля, частота которого сдвинута вниз относительно электродипольных переходов в атоме. Из-за действия дипольной силы атомы притягиваются в максимум интенсивности, как показано например на рис. 1, а большая отстройка поля от резонанса делает ловушку почти консервативной.

В прецизионных измерениях над ультрахолодными газами встаёт вопрос о точности измерения параметров ловушки. Её форма повторяет распределение интенсивности поля, близкое к гауссовому в поперечных направлениях (рис. 2). Вблизи дна потенциал близок к гармоническому. Ранее известные методы измерения частот и глубины потенциала основаны на параметрическом вводе энергии в газ, удерживаемый потенциалом, или на наблюдении за колебательными модами газа. Эти методы подвержены систематическим погрешностям, связанным с ангармонизмом.

Впервые разработан метод, который не имеет систематических ошибок, протекающих из ангармонизма. Более того, ангармонизм выступает неотъемлемой частью метода. Для измерения параметров ловушки мощность лазера, создающего ловушку, модулируется на частоте близкой к удвоенной частоте ловушки. При этом в ловушке находится газ невзаимодействующих атомов. Из-за ангармонизма параметрический ввод энергии быстро насыщается, что не даёт газу достигнуть краёв ловушки, где ангармонизм особенно силён. Насыщение происходит, как в квантовом случае, где возбуждение возможно лишь с нижнего энергетического уровня на следующий чётный (рис. 2), так и в случае классического движения. Зависимость введённой энергии от частоты параметрической накачки сравнивается с точной моделью. Это сравнение позволяет найти параметры ловушки. Построение точной модели оказалось возможным благодаря использованию в эксперименте газа невзаимодействующих частиц.

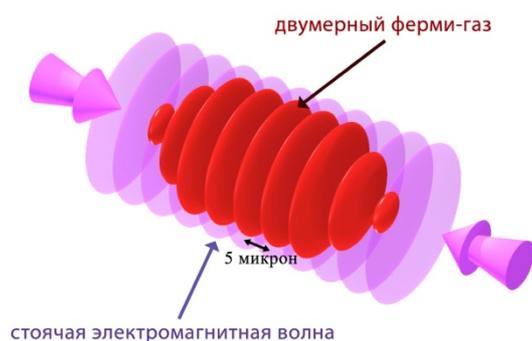


Рис. 1. Облака газа ферми-атомов, удерживаемые в пучностях стоячей электромагнитной волны. Облака показаны красным, интенсивность электромагнитного поля – фиолетовым.

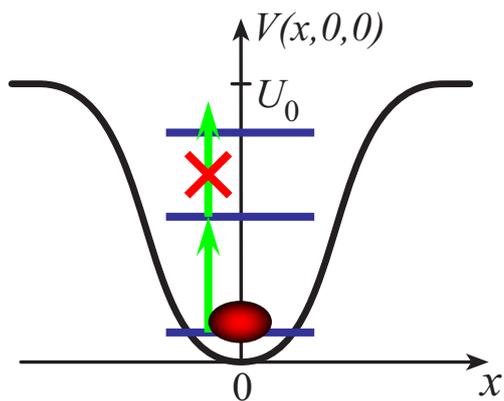


Рис. 2. Возбуждение атомного газа с основного уровня на следующий чётный под действием параметрической накачки. Дальнейшее возбуждение невозможно из-за неэквидистантности уровней.

Публикации

1. *Makhalov V., Martiyanov K., Turlapov A.* Ground-state pressure of quasi-2D Fermi and Bose gases // *Physical Review Letters* — 2014. Vol. 112, no. 4. P. 045301.
2. *V. Makhalov, K. Martiyanov, T. Barmashova, A. Turlapov* Precision measurement of a trapping potential for an ultracold gas// *Physics Letters A* — 2014. Published online 29 Nov, <http://dx.doi.org/10.1016/j.physleta.2014.10.049>.

2. Отделение геофизических исследований, Центр гидроакустики

2.1. Разработана аналитическая модель лидарного изображения уединенной нелинейной внутренней волны (ВВ) в предположении, что поле ВВ описывается решением уравнения Кортевега-де Вриза. Модель описывает изменения лидарного эхо-сигнала, обусловленные воздействием ВВ на пространственное распределение показателя обратного рассеяния воды и энергетические потери на трассе распространения сигнала. Установлены закономерности изменения толщины слоев мутности под воздействием нелинейных ВВ. Показано, что наряду со сжатием слоя, наблюдавшимся в натуральных экспериментах, может происходить его уширение в зависимости от полярности солитона и положения слоя мутности относительно пикноклина. Мутный слой расширяется, если он смещается к пикноклину и сжимается при удалении от него. Показано, что сдвиговое течение, изменяя полярность солитона, может приводить к существенному увеличению амплитуды эхо-сигнала, образующего изображение ВВ, и изменять его структуру. Выполнен расчет и проанализированы особенности лидарных изображений нелинейных внутренних волн с использованием реальных профилей гидрооптических и гидрологических характеристик в Баренцевом море.

Авторы: Долин Л.С., Долина И.С.

Аннотация. Внутренние волны (ВВ) обнаруживаются лидаром благодаря тому, что под влиянием ВВ вертикальные неоднородности первичных гидрооптических характеристик (ПГХ) трансформируются в горизонтальные, что приводит в свою очередь к изменению мощности эхо-сигнала, приходящего с заданной глубины. Наиболее контрастно ВВ проявляются в искажениях формы подповерхностных светорассеивающих слоев (слоев мутности), которые удается наблюдать как корабельными, так и самолетными лидарами. В последние годы были получены экспериментальные данные (*Churnside J.H. et al.*), которые указывают на определенное различие в характере воздействия линейных и нелинейных ВВ на светорассеивающий слой: в первом случае ВВ вызывает волнообразное изменение глубины слоя при сохранении его толщины, а во втором – изгиб слоя с резким уменьшением его толщины.

Математическая модель лидарных изображений линейных внутренних волн была разработана нами ранее с использованием предположения о малости амплитуды волны по сравнению с вертикальным масштабом неоднородности поля ВВ (это предположение позволяло упростить формулы для определения возмущений профилей ПГХ в поле ВВ). Модель изображения нелинейной ВВ построена без использования указанного предположения.

Модели лидарных изображений линейных и нелинейных ВВ во многом подобны друг другу. В обеих моделях использованы эмпирические корреляционные связи между различными ПГХ, позволяющие выразить показатели рассеяния и поглощения воды через показатель ослабления. Изображение нелинейной ВВ, как и линейной, условно разделяется на две части - отражательное изображение, которое несет информацию об изменениях пространственного распределения показателя обратного рассеяния воды в поле ВВ, и просветное (теневое) изображение, возникающее в результате модуляции внутренней волной коэффициента ослабления сигнала на трассе его распространения.

Разработанная модель была применена для установления механизма воздействия нелинейных ВВ на толщину слоев мутности. Оказалось, что основным фактором, влияющим на толщину мутного слоя, является сдвиг слоя относительно функции, описывающей вертикальную структуру поля нелинейной ВВ. При этом наряду со сжатием слоя, наблюдавшимся экспериментально, может происходить его растяжение в зависимости от полярности солитона и положения слоя мутности относительно оси пикноклина.

Исследовано влияние сдвигового течения на лидарный сигнал. Рассмотрена двухслойная модель плотностной стратификации с фоновым горизонтальным течением в верхнем слое и трехслойная с фоновым горизонтальным течением в среднем слое. Выполнен расчет и проанализированы особенности лидарных изображений нелинейных внутренних волн с использованием реальных профилей гидрооптических и гидрологических характеристик в Баренцевом море. Показано, что течение может существенно влиять на структуру отражательного изображения и контраст просветного изображения ВВ (в том числе, изменять знак контраста).

Полученные результаты могут быть использованы для решения задач дистанционной диагностики внутренних волн и сдвиговых течений.

Публикации

1. *Долин Л.С., Долина И.С.* Модель лидарных изображений нелинейных внутренних волн // Известия РАН, ФАО. 2014. Т. 50, № 2. С. 224-231.
2. *Долина И.С., Долин Л.С.* Влияние сдвиговых течений на структуру лидарных изображений нелинейных внутренних волн // Фундаментальная и прикладная гидрофизика, 2014, т. 7, № 4.
3. *Dolina I.S., Dolin L.S.* The effect of shear flow on the structure of lidar images of nonlinear internal waves // Proc. VII Int. Conf. "Current Problems in Optics of Natural Waters" (ONW'2013). St.-Petersburg, 2013. P. 12-15.
4. *Долин Л.С., Долина И.С.* Лидарные изображения нелинейных внутренних волн в океане, стратифицированном по плотности, течению и оптическим свойствам. Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики (ГА-2014). Тр. 12-й всеросс. конф. С-Пб.: Наука, 2014, с. 199-202.
5. *Долин Л.С., Долина И.С.* Модель лидарных изображений нелинейных внутренних волн // Труды 11 всероссийской конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». С-Пб.: Наука, 2012, с.12-16.
6. *Dolina I.S., Dolin L.S.* Model of lidar images of nonlinear internal waves // Proc. VI Int. Conf. "Current Problems in Optics of Natural Waters" (ONW'2011). St.-Petersburg, 2011. P. 158-163.

2.2. В ходе натуральных экспериментов по радиолокационному (РЛ) зондированию морской поверхности в X-диапазоне показано, что усредненные доплеровские сдвиги мгновенного спектра РЛ сигнала оказываются близкими к описываемым Брэгговской моделью рассеяния даже в условиях обрушающихся ветровых волн, тогда как в интенсивность рассеяния существенный вклад дает небрэгговская компонента. Эффект связан с тем, что интенсивность небрэгговской компоненты может на порядок и более превышать брэгговскую компоненту в коротких всплесках сигнала в областях обрушений, при этом по энергии обе компоненты сравнимы; мгновенный доплеровский сдвиг в области обрушений лишь в 2-3 раза превышает брэгговский и не дает существенного вклада в среднее значение доплеровского сдвига.

Полученный результат важен для корректных оценок скоростей течений по данным измерений доплеровских сдвигов, в частности, радиолокаторами спутникового базирования.

Авторы: С.А. Ермаков, И.А. Сергиевская, И.А. Капустин, О.В. Шомина (ИПФ РАН) В.Н. Кудрявцев, Б. Шапрон (РГГМУ), Ю.Ю. Юровский (МГИ)

Аннотация. В натуральных условиях исследованы характеристики радиолокационного сигнала X-диапазона при зондировании ветрового поверхностного волнения в условиях умеренного и сильного ветра, получены зависимости интенсивность,

доплеровских сдвиги частоты и радиолокационной модуляционной передаточной функции от угла падения, азимутального угла, скорости ветра, а также при различных поляризациях зондирующего радиосигнала. Показано, что небрэгговское рассеяние обусловленное микро и сильными обрушениями поверхностных волн дает существенный вклад в радиолокационное сечение рассеяния, о чем свидетельствуют меньшие величины измеренного поляризационного отношения по сравнению с расчетами по модели брэгговского рассеяния. Величины усредненных сдвигов мгновенного спектра растут с ростом угла падения, относительно слабо зависят от скорости и направления ветра и достаточно близки для ВВ и ГГ поляризаций. Величины этих доплеровских сдвигов удовлетворительно согласуются с оценками по брэгговской модели рассеяния даже в присутствии сильно нелинейных (обрушивающихся) волн.

Исследована модуляционная передаточная функция (МПФ) радиолокационного сигнала получено, что МПФ удовлетворительно согласуется с Брэгговской моделью, при этом согласие лучше на вертикальной (ВВ) поляризации, чем на горизонтальной (ГГ) поляризации.

Показано, что доплеровские сдвиги среднего спектра превышают мгновенные сдвиг и различны для ВВ и ГГ поляризаций, а также при зондировании против ветра и по ветру. Разница доплеровских сдвигов среднего и мгновенного спектров удовлетворительно объясняются модуляцией интенсивности РЛ сигнала в поле длинных ветровых волн.

Полученные результаты важны для корректных оценок скоростей течений по данным измерений доплеровских сдвигов, в частности, радиолокаторами спутникового базирования.

Публикации

1. Ермаков С.А., Капустин И.А., Кудрявцев В.Н., Сергиевская И.А., Шомина О.В., Шапрон Б., Юровский Ю.Ю. О доплеровских сдвигах частоты радиолокационного сигнала при рассеянии на морской поверхности // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2014. Т. 57. № 04. С. 267-280.

2. Ермаков С.А., Капустин И.А., Сергиевская И.А., Шомина О.В., Кудрявцев В.Н., Коллард Ф., Шапрон Б. Доплеровские сдвиги радиолокационного сигнала рассеянного морской поверхностью. Результаты натурных экспериментов. // Сборник тезисов XI Всероссийской открытой конференции современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. С. 219.

2.3. Разработан эмпирический подход к созданию моделей климатической динамики, в основе которого лежит построение низкоразмерной стохастической модели оператора эволюции путем прямого анализа пространственно распределенных временных рядов. На серии модельных примеров показана способность таких моделей описывать ключевые динамические свойства системы, ответственные за наблюдаемые режимы поведения. Продемонстрированы предсказательные свойства моделей применительно как к прогнозу критических переходов – резких качественных изменений поведения – в динамике климатических моделей различной сложности, так и к прогнозу климатических индексов по данным климатического мониторинга. Выведен байесов критерий оптимальности модели, позволяющий выбрать модель, сложность которой наиболее адекватна анализируемой выборке данных. Ключевым шагом разработанного подхода является конструирование низкоразмерного базиса фазовых переменных модели по временным рядам, определенным на пространственной сетке. Для этой цели предложены новые методы разложения данных, основанные на выделении пространственно-временных и/или нелинейных мод, вносящих принципиальный вклад в наблюдаемую динамику.

Авторы: Д.Н. Мухин, А.С. Гаврилов, Е.М. Лоскутов, А.М. Фейгин

Аннотация. Разработан эмпирический подход к созданию моделей климатической динамики, в основе которого лежит построение низкоразмерной стохастической модели оператора эволюции путем прямого анализа пространственно распределенных временных рядов. На серии модельных примеров показана способность таких моделей описывать ключевые динамические свойства системы, ответственные за наблюдаемые режимы поведения. Продемонстрированы предсказательные свойства моделей применительно как к прогнозу критических переходов – резких качественных изменений поведения – в динамике климатических моделей различной сложности, так и к прогнозу климатических индексов по данным мониторинга поверхностной температуры океана (ПТО). Выведен байесов критерий оптимальности модели, позволяющий выбрать модель, сложность которой наиболее адекватна анализируемой выборке данных. Ключевым шагом разработанного подхода является конструирование низкоразмерного базиса фазовых переменных модели по временным рядам, определенным на пространственной сетке. Для этой цели предложены новые методы разложения данных, основанные на извлечении из данных пространственно-временных и/или нелинейных мод, вносящих принципиальный вклад в наблюдаемую динамику. На модельном примере показано преимущество таких методов для построения проекции фазового пространства системы, наиболее репрезентативной с точки зрения прогноза эволюции наблюдаемого поведения, по сравнению с традиционно используемыми разложениями, основанными на эмпирических ортогональных функциях (ЭОФ). Анализ временных рядов ПТО на сетке, покрывающей Земной шар, показал, что главные моды, полученные таким методом, описывают значительную часть наблюдаемой изменчивости, в несколько раз большую, чем главные компоненты ЭОФ-разложения. В частности, показано, что первая (по вкладу в общую вариацию данных) нелинейная мода эффективно захватывает сезонный цикл, позволяя практически полностью отделить его от других мод, что не достижимо существующими линейными методами разложения данных. Кроме того, всего один скалярный временной ряд второй моды соответствует пяти-шести компонентам ЭОФ-разложения, описывающих динамику Южного колебания Эль-Ниньо; тем самым, найдена фазовая переменная, полностью описывающая данное явление.

Публикации:

1. Y. I. Molkov, E. M. Loskutov, D. N. Mukhin, and A. M. Feigin, Random dynamical models from time series, *Physical Review E*, 85, 036216, 2012
2. D. Mukhin, E. Loskutov, A. Mukhina, A. Feigin, M. Chekroun, I. Zaliapin and M. Ghil, Predicting critical transitions in ENSO models I: Methodology and simple models with memory. *Journal of Climate*, accepted, 2014
3. D. Mukhin, D. Kondrashov, E. Loskutov, A. Gavrilov, A. Feigin and M. Ghil, Predicting critical transitions in ENSO models II: Spatially dependent models. *Journal of Climate*, accepted, 2014
4. A. Gavrilov, E. Loskutov and D. Mukhin, Optimal structure of empirical ANN-based model of evolution operator. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, under review, 2014.

2.4. Впервые выполнено экспериментальное исследование процессов электризации вертолетов в полете. Разработаны вибрационные электрические датчики, с помощью которых измерена напряженность статического электрического поля на поверхности земли, создаваемого зарядами на фюзеляже вертолета. Установлено, что фюзеляж вертолета заряжается положительно, а выхлопная струя выносит отрицательный заряд, то есть механизм электризации – двигательный. Предложена модель двигательной

электризации, заключающаяся в зарядке сажевых частиц в слабоионизированной плазме камеры сгорания газотурбинного двигателя с их последующим выносом с потоком выхлопных газов.

Авторы: М.Е. Гушин, С.В. Коробков, А.В. Костров, С.Э. Привер, А.В. Стриковский

Аннотация. Известно, что электризация летательных аппаратов (ЛА) в полете может приводить к развитию пробойных явлений и, как следствие, к генерации радиопомех в различных частотных диапазонах. Проблема электризации ЛА стала особенно актуальной в последнее время в связи с активным использованием в авиационной отрасли полимерных и композитных материалов, обладающих низкой электропроводностью и, в результате, не обеспечивающих полную металлизацию ЛА. Борьба с помехами, обусловленными накоплением статического заряда на фюзеляже и иных элементах конструкции ЛА, является приоритетной задачей, решение которой необходимо для повышения качества и обеспечения требуемой дальности радиосвязи, а также для защиты бортовых электронных систем.

В ходе работы проведены экспериментальные исследования эффектов электризации ЛА (вертолетов), и возникающих радиопомех, максимум интенсивности которых приходится на дециметровый диапазон. Выполнены полевые измерения электрических полей, создаваемых статическими зарядами на фюзеляже ЛА, а также полей пространственного заряда в струях выхлопных газов газотурбинных двигателей; оценены значения накапливаемого статического потенциала на фюзеляже ЛА. Обсуждается модель двигательной электризации вертолета, основанная на зарядке частиц сажи в плазме камеры сгорания двигателя и их выносе в атмосферу с потоком выхлопных газов. В части исследования возникающих радиопомех проведены радиочастотные измерения в трактах антенных устройств, а также выполнен анализ шумов в аудиоканалах аппаратуры связи; на основании полученных результатов выявлены наиболее опасные с точки зрения развития электростатического разряда узлы. Сформулированы рекомендации к обеспечению помехозащиты бортовой аппаратуры ЛА и предупреждению развития пробойных явлений.

Публикации

1. A.V. Varfolomeev, M.E. Gushchin, S.V. Korobkov, A.V. Kostrov, D.A. Odzerikho, Yu.P. Palochkin, S.E. Priver, A.V. Strikovskiy. The study of engine-driven electrostatic charging effects on the aircrafts and their influence on radio communication quality. Abstracts of 12th International Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics, Moscow, Russia, March 26-28, 2013, p.90-91

2. А.А. Варфоломеев, М.Е. Гушин, С.В. Коробков, А.В. Костров, Ю.П. Палочкин, С.Э. Привер, Д.А. Одзериho, А.В. Стриковский. Двигательная электризация летательных аппаратов как источник радиопомех. Письма в ЖТФ, 2015, т.41, №1, с.28-35

2.5. Предложен и экспериментально реализован метод адаптивного синтеза апертуры с помощью приемной бортовой антенны разработанной для корабельных гидроакустических комплексов. В натуральных условиях продемонстрирована возможность создания для низкочастотного диапазона виртуальной апертуры приемной системы в десять раз превышающей продольный размер корпуса корабля. В ходе испытаний изготовленной аппаратуры в режиме шумопеленгации выполнено обнаружение и определение координат (дальности и пеленга) малозумной цели на дистанции, большей, чем достижимая с помощью существующих гидроакустических средств.

Авторы: Иваненков А.С., Коротин П.И., Родионов А.А., Турчин В.И.

Аннотация. Идея пассивного апертурного синтеза (АС), как метода повышения пространственного разрешения приемной системы за счет её движения впервые была выдвинута М.Райлом в 50-х годах прошлого столетия для радиоастрономии. Метод состоит в использовании пары пространственно разнесенных и связанных между собой радиотелескопов, которые, за счет вращения Земли, синтезируют заполненную апертуру равную расстоянию ними. Разновидностью АС является синтез на основе движения одиночных элементов или антенн со сформированными диаграммами направленности, нашедший широкое применение в активных режимах локации, как для радио, так и гидролокаторов. Для шумопеленгации данный метод непосредственно не применим в связи с априорной неизвестностью характеристик пеленгуемого источника: даже в простейшем случае тонального источника прямолинейно движущийся одиночный приемник не в состоянии определить его частоту и пеленг. Данную проблему частично решает не так давно предложенный метод ЕТАМ, основанный на экстраполяции фазовых изменений сигнала по текущей совокупности отсчетов движущейся антенной решетки. Однако его недостатки – полное отсутствие помехозащищенности, ограничение прямолинейным движением решетки вдоль её оси и статистическая неоптимальность делают его неприменимым для задач обнаружения в корабельной гидроакустике для бортовых конформных антенн, которые работают в тяжелой помеховой ситуации.

Предложен метод адаптивного частично-когерентного апертурного синтеза работоспособный в присутствии помех от корабельных механизмов для произвольных траекторий движения антенной решетки. Адаптивная обработка подавляет помехи от механизмов, находящихся в ближней зоне бортовой антенны, физическая апертура которой может достигать всей длины корпуса корабля.

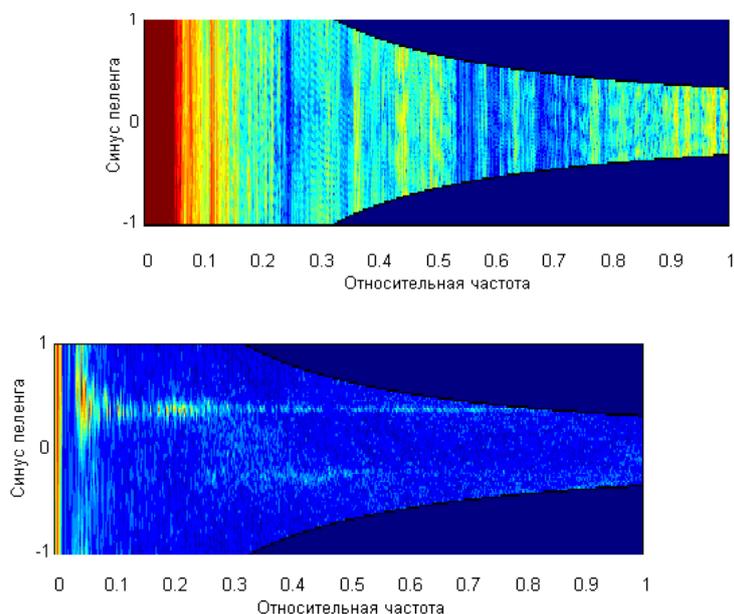


Рис. 1. Эффект от адаптивной обработки сигнала на физической апертуре: сравнение пеленгационных характеристик для традиционной (слева) и адаптивной (справа) антенной обработки: выделение двух целей в диапазоне до 1 кГц в широкой полосе частот.

Независимость реализации метода от типа сигнала пеленгуемого источника и траектории движения приемной системы делает возможным его применение к задаче обнаружения. Даже в предельном случае шумового сигнала от цели, когда движение приемной системы не приводит к увеличению углового разрешения, дополнительный выигрыш заключается в возможности определения дальности до цели, так как размер

виртуальной синтезируемой апертуры практически не ограничен и лимитируется только допустимой задержкой в выдаче результата.

Выполнен теоретический анализ потенциальных возможностей метода на основе границы Крамера-Рао по определению совокупности параметров цели: дальности, пеленга и вектора скорости движения. Для частного случая движения приемной системы по круговой траектории (траектория циркуляции корабля становится виртуальной апертурой приемной системы) получены аналитические выражения достижимых дисперсий оценок данных параметров.

Первоначально теоретические выводы и отладка алгоритмов, технических и программных средств проведена на испытаниях масштабных моделей кораблей на полигоне Ладожского озера. В 2012 году была изготовлена экспериментальная бортовая измерительная система (БИС-1) на основе кабельной гидроакустической антенны. Задачей БИС-1 являлось измерение корабельных помех работе конформных антенн и отработка технологии установки кабельных антенн на корпус корабля. В 2013 году антенна (длина 80 метров при 120-ти цифровых гидрофонах) установлена на корабль. В ходе испытаний в 2014 году по малозумной цели предложенный метод был реализован.

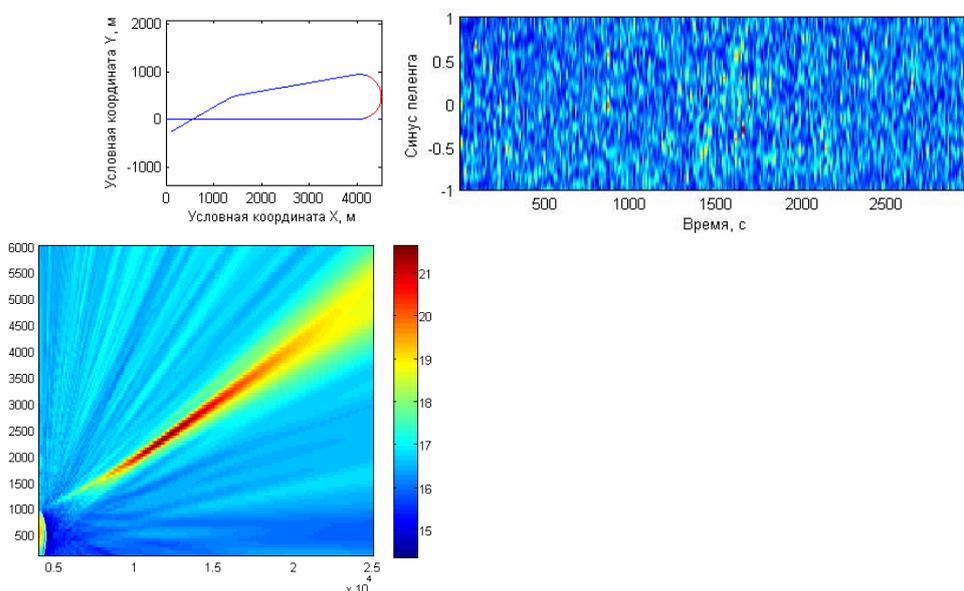


Рис. 2. Эффект от адаптивного синтеза апертуры для малозумной цели: слева – траектория движения корабля с приемной бортовой антенной, в центре – пеленгационная характеристика с плохо заметной отметкой цели после адаптивной обработки физической апертуры в узкой полосе частот и справа - четкая отметка цели в декартовых координатах после синтеза апертуры.

Метод определяет удаление и пеленг цели. Физическая апертура бортовой антенны - 80 метров, синтезированная апертура (показана красным цветом) ~ 1000 метров. Скорость корабля ~ 6 узлов, длительность синтеза ~ 350 секунд (от 1300 до 1650 секунды). Показанная дальность обнаружения при синтезе виртуальной апертуры на циркуляции диаметром 1000 метров превысила, для данной ситуации и параметрах цели, дальность, полученную штатной гидроакустической станцией.

Публикации

1. А.С. Иваненков, П.И. Коротин, Д.А. Орлов, А.А. Родионов, В.И. Турчин. Синтез апертуры за счет движения одиночного приемника при пеленгации источников узкополосного шума // Изв. вузов. Радиофизика, 2014, т.57, №2, с.166-177.

2. В.И. Турчин Максимально правдоподобная оценка координат широкополосных источников шума при неизвестных спектральных плотностях сигнала и помехи // Изв. вузов Радиофизика, 2013, Т.56, №4, с. 277–286.

3. Ivanenkov A.S., Korotin P.I., Orlov D. A., Rodionov A.A., Turchin V.I. Investigation of the potential accuracy of source localization using a moving horizontal array // 19th International Congress on Sound and Vibration, Vilnius, Lithuania, 2012

4. Ivanenkov A.S., Korotin P.I., Orlov D. A., Rodionov A.A., Turchin V.I. Cramer–Rao lower bound for localization of a source with partial temporal coherence using passive synthetic aperture // Proceedings of the 12th European Conference on Underwater Acoustics, Edinburgh, United Kingdom, 2012, p 564 - 571

5. Иваненков А.С., Коротин П.И., Орлов Д.А., Родионов А.А., Турчин В.И. Синтез апертуры за счёт движения одиночного приемника при пеленгации источников узкополосного шума // Сборник трудов Научной конференции «Сессия Научного совета РАН по акустике и XXV сессия Российского акустического общества». Т.II. - М.: ГЕОС, 2012, с 343-347.

6. Доклад на конференции «ВОКОР-2014» г.С.-Петербург

2.6 Разработан гидрофон устойчивый к вибрационной помехе. За счет конструктивных особенностей, дополнительных чувствительных элементов и вибрационных калибровок балансировка выходного сигнала обеспечивает понижение чувствительности к вибрациям на величину до 20 дБ в диапазоне до 1 кГц по трем степеням свободы. Выход акустического давления датчика унифицирован, при этом с помощью встроенного микропроцессора могут быть реализованы режимы векторного приемника и измерителя ускорений. Изделие не требует дополнительных мер по виброизоляции при использовании на кабельных антенных, буюх и вибрирующих конструкциях. Достигнутые показатели подавления вибрационной чувствительности превосходят соответствующие характеристики известных импортных и отечественных изделий.

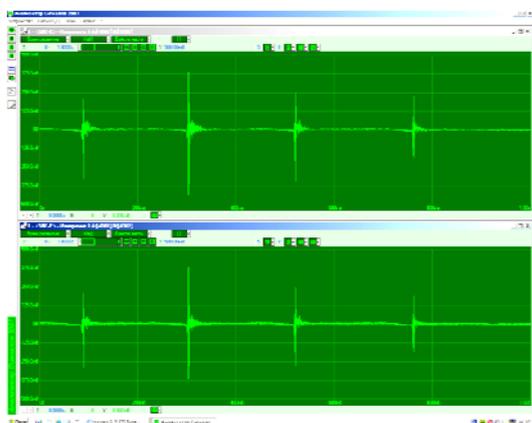
Авторы: Кияшко Б.В., Чащин А.С., Емельянов М.Б.

Аннотация. При использовании гидрофонов в буюх, кабельных антеннах и установке на вибрирующую поверхность приходится принимать специальные меры по виброзащите, так как основная помеха будет заключаться в вибрационной наводке на чувствительный элемент. Для распределенных приемных систем подавить вибрационную наводку можно пространственной фильтрацией сигналов на приемной апертуре при когерентной обработке сигналов. Для одиночного гидрофона приходится применять специальные меры виброзащиты, которые имеют свои недостатки не только в габаритах, но и наличии собственных частот подвески, что усложняет калибровку приемника в месте установки.

Разработана новая модель приемника звука включающая в себя 8 независимых измерителей сигналов (цилиндрическая керамика составлена из восьми секторов по образующей), которая при помощи балансировки – измерения всех выходных сигналов на вибростенде при трех координатах возбуждения – и последующего расчета на строенном микропроцессоре минимизирует выходной сигнал пропорциональный вибрациям. На рис.1 показаны осциллограммы цифрового гидроакустического приемника ЦГП-4 (средство измерения утвержденного типа) и новой разработки – ЦГП-5 для ударного и звукового импульсного возбуждения.

Выход в цифровом виде (протокол Ethernet) приемников – унифицирован. Подавление реализуется в диапазоне частот до примерно 1 кГц, что вполне достаточно для эксплуатационных требований.

Данная разработка дает выигрыш до 20 дБ, что превосходит возможности виброизолирующих конструкций и по характеристике виброчувствительности превосходит протестированные импортные образцы (табл.1). Изделия данного типа (со встроенными микропроцессорами для подавления помех и предварительной обработки) не могут импортироваться в РФ по таможенным ограничениям, что не дает возможности сопоставить данную разработку с лучшими мировыми образцами.



ЦГП-5



ЦГП-4

Рис. 1. Сравнение откликов гидрофонов на вибрационное воздействие (удар) вверху и звук (щелчок) внизу.

Таблица 1. Сравнение характеристик гидрофонов ИПФ РАН и фирмы Брюль и Кьер.

	ЦГ П-4	В& К 8103	ЦГ П-5
Поперечная вибрационная чувствительность/ акустическая чувствительность	0,93 ~	1,06 ~	0,04 ~
Продольная вибрационная чувствительность/ акустическая чувствительность	0,74 ~	0,57 ~	0,06 ~

Изделию присваивается тип средства измерения акустического давления. Кроме этого, встроенный в ЦГП-5 процессор может обеспечивать приемнику функции векторного, измеряющего поток акустической мощности, и определять величины ускорений в трех координатах.

Рабочая конструкторская документация на цифровой гидроакустический приемник ЦГП-5.

Материалы утверждения типа средства измерения.

2.7. Впервые показано единство природы гистерезиса и медленной релаксации в структурно-неоднородных средах. Предложенная модель контактов с немонотонной функцией потенциала поверхностных сил описывает пороговый переход от ангармонизма к нелинейному гистерезису и появление медленной релаксации в гетерогенных материалах. Анализ экспериментальных данных подтвердил справедливость модели. Оценки пространственного масштаба, связанного с релаксацией, указывают на роль сил

Ван-дер-Ваальса. Результаты могут быть использованы для диагностики метастабильных состояний и развития оригинальных методов неразрушающего контроля.

Авторы: В.С. Авербах, В.В. Бредихин, А.В. Лебедев, А.П. Марышев, С.А. Манаков, Л.А. Островский, В.И. Таланов.

Аннотация. Рассматривается контакт зерен с адгезией. При этом принимается во внимание сжимаемость материала зерен (модель JKR). В этом случае наличие или отсутствие гистерезиса адгезии зависит от отношения коэффициентов жесткости контакта зерен и шва адгезии (параметр μ). Поэтому нет необходимости в задании специальных функций распределения РМ-элементов (Guyer, Johnson; 2009) для описания перехода от ангармонизма к гистерезису. Выполненные оценки приводят к согласующимся с экспериментальными данными значениям линейных модулей упругости, коэффициентов квадратичной нелинейности и порогов перехода к гистерезису.

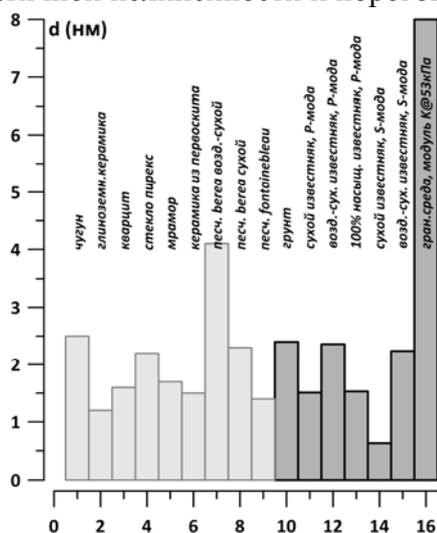


Рис. 1 – Пространственные масштабы, связанные с медленной релаксацией.

связано, предположительно, с локальной переупаковкой зерен.

В работе (TenCate et al; 2000) введен спектр энергий барьеров и рассматривалась скорость просачивания через барьер (аналогия с туннельным эффектом). Оценка характерной величины барьера $2 \cdot 10^{-19}$ Дж. Эта величина в рамках предложенной модели отвечает характерному радиусу кривизны 50 нм или $\mu \sim 1$. Высота барьера намного превышает кинетическую энергию теплового движения (кТ). Таким образом, *выяснена природа барьеров в работе* (TenCate et al; 2000).

На рис. 1 показаны результаты вычисления пространственного масштаба, связанного с медленной релаксацией. Вычисления проведены для набора экспериментальных данных, полученных в LANL (светло-серые столбики) и группой ИПФ РАН (темно-серые столбики).

Масштаб для консолидированных материалов имеет порядок масштаба действия сил Ван-дер-Ваальса. Т.е. согласуется с исходными предположениями, лежащими в основе предложенной модели. Последние четыре столбика на рис. 2 отвечают медленной релаксации в сыпучих средах [12]. Величины масштабов для сыпучих сред значительно превышают величины для консолидированных структурно-неоднородных материалов, где присутствуют силы адгезии. Существование метастабильных состояний в случае сыпучих сред

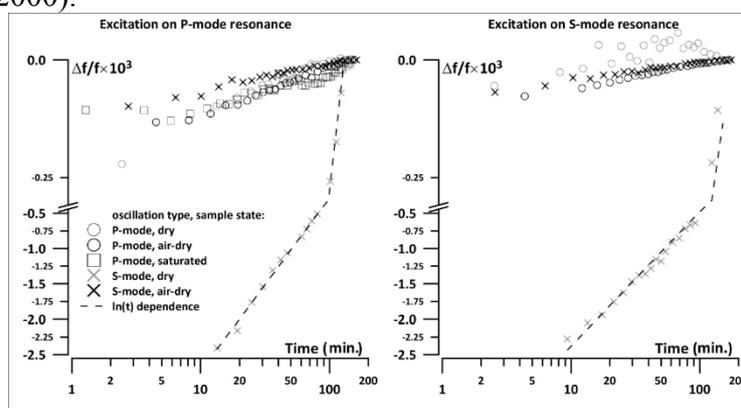
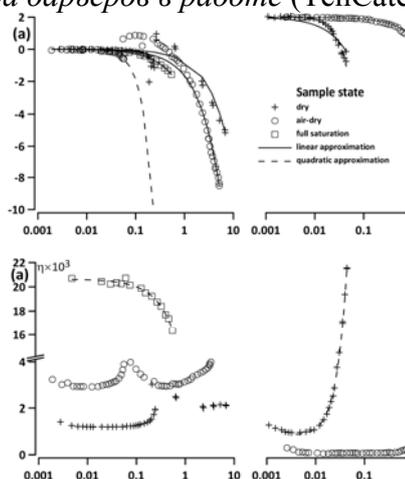


Рис. 3 – Медленная релаксация в карбонатной горной породе. Иллюстрация из [14].

Рис. 2 – Амплитудные зависимости резонансных частот объемных (слева) и крутильных (справа) деформаций. По осям абсцисс отложена деформация, умноженная на 10^6 . Иллюстрация из [14].

На рис. 2 показаны полученные впервые результаты измерений амплитудных зависимостей резонансных частот объемных и крутильных мод (зависимостей модулей объемной жесткости и сдвига) [11, 14]. Важно отметить качественное отличие между объемными и сдвиговыми деформациями – наличие ступенчатого перехода от классической нелинейности к гистерезису. При этом по мере увеличения содержания жидкости пороговое значение уменьшается, как и следовало ожидать в рамках модели [13]. Появление скачков связано с проявлением диссипативных процессов при отрыве поверхностей, связанных силами Ван-дер-Ваальса (имеется четкая корреляция положения скачков с максимумами коэффициентов потерь). Сами пороговые величины согласуются с предсказаниями модели [13] и с данными других исследователей (группа Джонсона из LANL). На рис. 3

показаны результаты экспериментов по наблюдению медленной релаксации в карбонатной породе для различной насыщенности. Впервые проведен эксперимент по релаксации на сдвиге при накачке на сдвиговых и объемных деформациях материала. За исключением особого случая (релаксация модуля сдвига в экстремально сухом материале) наклоны практически одинаковы, а масштаб, связанный с релаксацией, отвечает масштабу действия сил Ван-дер-Ваальса. Особый случай представляет отдельный интерес для дальнейших исследований, поскольку, предположительно, связан не с отрывом контактов неровностей/зерен на микроскопическом уровне, а с сухим трением двух шероховатых поверхностей.

Публикации

1. *Авербах В.С., Лебедев А.В., Марышев А.П., Таланов В.И.*, Акустическая диагностика физических свойств неконсолидированных сред в натуральных условиях / Препринт №714 ИПФ РАН, Нижний Новгород, 2006.
2. *Авербах В.С., Лебедев А.В., Марышев А.П., Таланов В.И.*, Наблюдение эффектов медленной динамики в неконсолидированных средах в натуральных условиях / Препринт №743, ИПФ РАН, Нижний Новгород, 2007.
3. *Авербах В.С., Лебедев А.В., Марышев А.П., Таланов В.И.*, Акустическая диагностика физических свойств неконсолидированных сред в натуральных условиях / Сб. тр. 19-й сессии РАО, Нижний Новгород 2007, 328–331.
4. *Авербах В.С., Лебедев А.В., Марышев А.П., Таланов В.И.*, Наблюдение эффектов медленной динамики в неконсолидированных средах в натуральных условиях / Сб. тр. 19-й сессии РАО, Нижний Новгород 2007, 331–335.
5. *Авербах В.С., Лебедев А.В., Марышев А.П., Таланов В.И.*, Акустические методы исследования физических свойств неконсолидированных сред в натуральных условиях / Сб. трудов семинара научной школы проф. С.А. Рыбака, Троицк: Тривант, 2007. Т. 8. С. 38–61.
6. *Авербах В.С., Лебедев А.В., Марышев А.П., Таланов В.И.*, Диагностика акустических свойств неконсолидированных сред в натуральных условиях // Акустический Журнал. 2008. Т. 54(4). С. 607–620.

7. *Авербах В.С., Лебедев А.В., Марышев А.П., Таланов В.И.*, Наблюдение эффектов медленной динамики в неконсолидированных средах в натуральных условиях // Акустический Журнал. 2009. Т. 55(2). С. 208–215.
8. *V.S. Averbakh, A.V. Lebedev, A.P. Maryshev, V.I. Talanov*, Field acoustic characterization of soil properties // in Proc. of SAPEM-2008, published in February 2009: <http://www.brad.ac.uk/events/cpd/sapem/proceedings/>.
9. *L.A. Ostrovsky and A.V. Lebedev*, Nonlinear dynamical processes in media with relaxation// Proceedings of Meetings on Acoustics (POMA) Vol. 13, 2011, 15pp.
10. *Ostrovsky L.A., Lebedev A.V.*, Nonlinear dynamical processes in media with relaxation / Proceedings of the 19th International Symposium on Nonlinear Acoustics, Waseda Univ., Tokyo, Japan, 2012.
11. *Авербах В.С., Бредихин В.В., Лебедев А.В., Манаков С.А.*, Нелинейная акустическая спектроскопия консолидированной горной породы и модельной гранулированной среды // Акустика неоднородных сред. Ежегодник Российского акустического общества. Сб. трудов семинара научной школы проф. С.А. Рыбака. Вып. 13. М. ГЕОС. 2012. 94–110. По материалам доклада на семинаре в феврале 2013 года. Работа подготовлена для отправки в Акустический Журнал.
12. *Авербах В.С., Лебедев А.В., Манаков С.А., Бредихин В.В.*, Новый метод акустических исследований сыпучих материалов. Предварительные результаты // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2013. Т. 56. № 3. С. 149–172.
13. *Lebedev A.V., Ostrovsky L.A.*, A unified model of hysteresis and long-time relaxation in heterogeneous materials // Acoustical Physics. 2014. 60. № 5. P. 555–561.
14. *Averbakh V.S., Bredikhin V.V., Lebedev A.V., Manakov S.A.*, Nonlinear acoustic spectroscopy of a rock sample and a granular medium / The book of abstracts of Forum Acusticum, Krakow, Poland, 7-12 September 2014, ISBN987-83-61402-28-2.

2.8. Сформулированы принципы построения «идеальных» систем видения в воде и через взволнованную границу раздела воздух/вода, минимизирующие влияние поверхностного волнения и рассеяния в воде на качество изображения подводных объектов. Разработана модель системы, основанной на применении сложно модулированных пучков подсветки и пространственно-временной согласованной обработки сигналов, формирующих изображение. Показано, что 3D разрешение такой системы видения существенно превышает возможности систем видения на стационарных и импульсных пучках подсветки и практически не зависит от расстояния до наблюдаемого объекта.

Авторы: Л.С. Долин, А.Г. Лучинин

Аннотация. Предложена идеология построения систем наблюдения, сводящая к минимуму искажения изображения подводных объектов, наблюдаемых из атмосферы через взволнованную границу раздела воздух/вода и слой воды. Случайное преломление света на взволнованной поверхности приводит к неконтролируемому смещению положения элементов изображения в формируемом кадре, а многократное рассеяние света в воде к размытию изображения (уширению функции рассеяния точки). Рассматривается система наблюдения, в которой изображение формируется за счет сканирования пучка подсветки в пределах поля зрения. Для устранения первого из этих факторов предлагается способ определения угла случайного преломления пучка подсветки за счет измерения углового положения центра тяжести сигнала обратного рассеяния от подповерхностного слоя воды. После того как этот угол определен, становится возможной соответствующая перестановка элементов изображения. Определена оптимальная глубина используемого для этого слоя воды, при которой ошибка в определении угла преломления минимальна. Показано, что дисперсия неконтролируемого углового разброса

пучка подсветки может быть уменьшена на два порядка. Для реализации такого способа определения угла необходим импульсный режим работы со стробированием по дальности при приеме сигнала. Негативное влияние многократного рассеяния света в воде в значительной степени может быть скомпенсировано применением высокочастотной амплитудной модуляции зондирующего пучка и формирование изображения на высокочастотной огибающей сигнала от объекта, выделяемой при приеме. Функция рассеяния точки, сформированная высокочастотной огибающей существенно уже, чем по постоянной составляющей, однако содержит в себе фазовые искажения. Эти искажения могут быть устранены за счет применения аналога голографической обработки – свертки сформированного изображения с функцией рассеяния точки, синтезированной в системе обработки сигнала.

Для устранения искажений, вызванных случайным преломлением пучка подсветки на взволнованной поверхности, требуется подсветка коротким импульсом, а для устранения фактора рассеяния в воде необходима высокочастотная модуляция пучка подсветки. Эти два требования совмещаются при использовании импульсного излучения, с внутриимпульсной модуляцией мощности высокочастотным сложным сигналом и последующей согласованной фильтрацией принимаемого сигнала во времени.

Важной особенностью предлагаемой системы наблюдения является слабая зависимость оптической передаточной функции и функции рассеяния точки от глубины наблюдения. Этот эффект обусловлен подавлением диффузионного расширения пучка при многократном рассеянии за счет расфазировки по огибающей компонент различной кратности рассеяния.

Публикации

1. L.S. Dolin, A.G. Luchinin. Water-scattered signal to compensate for the rough sea surface effect on bottom lidar imaging, *Applied Optics*. 2008. V. 47. No 36. P. 6871-6878

2. А.Г. Лучинин. О системах подводного видения со сложно модулированными пучками подсветки. *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. Т. 5. №4. 2012. С. 5-17.

3. А.Г. Лучинин, Л.С. Долин. Применение сложно модулированных волн фотонной плотности для инструментального видения в мутных средах. *Доклады Академии наук. Физика*. 2014. Т. 455. №6. С. 643-646.

4. А.Г. Лучинин, Л.С. Долин. Модель системы подводного видения со сложно модулированным пучком подсветки. *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. Т. 50. №4. 2014. С. 468-476.

5. А.Г. Лучинин. Принципы построения «идеальной» системы видения через взволнованную поверхность. *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. Т. 50. №4. 2014. С. 468-476.

6. A.G. Luchinin. Complex modulation of airborne lidar light pulse: the effects of rough sea surface and multiple scattering. *Proceedings of SPIE*. Vol. 8532 (SPIE, Bellingham, WA 2012). DOI 10.1117/12.973736.

7. A.G. Luchinin, L.S. Dolin. Complex modulated waves of photon density in underwater imaging. *Proceedings of VII International conference "Current problems in optics of natural waters"*. S.-P. Nauka. 2013. P. 24-27

2.9. Впервые в ИК диапазоне были получены изображения разрядов, генерируемых внутри искусственного заряженного аэрозольного облака. Наряду с типичными стримерными и лидерными разрядами, наблюдаемыми в лабораторных экспериментах с искровыми разрядами, внутри заряженного облака обнаружено множество разрядов с отличными от обычных разрядов характеристиками. Эти разряды, названные «сталкерами», образуют новый класс разрядных явлений внутри электризованной облачной среды. Проведены классификация и анализ многообразия сталкеров.

Авторы: Н.А. Богатов, Е.А. Мареев, В.А. Раков (Институт прикладной физики РАН), М.Г.Андреев, Л.М.Макальский, Д.И.Сухаревский, В.С.Сысоев (Всероссийский электротехнический институт), А.Ю. Костинский (Высшая школа экономики).

Аннотация. Основным методом исследования молнии на протяжении долгой истории ее изучения являлась и является в настоящее время регистрация генерируемого ею электромагнитного излучения в разных диапазонах частот. Для той части молнии, которая находится вне грозового облака, наиболее информативным является видимый диапазон. Облачная среда для оптического излучения в видимом диапазоне непрозрачна, поэтому структура и динамика внутриоблачных разрядов долгое время были недоступны для исследования. Лишь в последние два десятилетия развивается метод регистрации внутриоблачных разрядов, основанный на локализации источников излучения, находящихся внутри грозового облака, по одновременной регистрации радиосигналов дециметрового диапазона в нескольких, разнесенных в пространстве, точках. Для лабораторного моделирования условий внутриоблачных разрядов было использовано искусственное заряженное облако водного аэрозоля, способное генерировать разряды как внутри облака, так и в промежутке облако-земля (высоковольтный стенд ФГУП ВЭИ в г. Истра). Благоприятное отличие среды искусственного облака от естественного состоит в том, что средний размер капель в нем довольно мал – меньше или порядка 1 мкм, и в диапазоне чувствительности ($\lambda \approx 3-5$ мкм) использованной в экспериментах ИК камеры искусственное облако оказалось достаточно прозрачным, чтобы наблюдать ИК излучение разрядов и зарегистрировать структуру внутриоблачных разрядов.

Оказалось, что внутри облака могут наблюдаться обычные стримерные и лидерные разряды, подобные тем, что мы регистрировали с помощью ИК камеры вне облака. Обычный положительный лидерный разряд на ИК фотографии представляет собой яркий канал, сильно извилистый и ветвящийся, с частой (через 1-2 см) последовательностью пучков стримеров, отходящих от узлов на канале лидера, отражающей его скачкообразное движение. Обычный отрицательный лидер - это тоже яркий канал, но менее извилистый и ветвящийся, и более гладкий - не испытывающий частых скачков (большие скачки отрицательного лидера, свойственные молниевым разрядам, мы в экспериментах с искусственным облаком не наблюдали, по-видимому вследствие недостаточной для этого длины газоразрядных промежутков). Стримеры в обычных наблюдавшихся нами разрядах - лидерных разрядах и стримерных вспышках - фиксировались ИК камерой в виде слабосветящихся пучков множества каналов, исходивших от электрода в случае стримерной вспышки или от лидерной головки в случае лидерного разряда. Никаких существенных отличий обычных разрядов внутри искусственного облака от тех, что происходят вне облака, мы не обнаружили. Но наряду с обычными разрядами внутри облака всегда регистрируются необычные разряды, которые были названы нами "сталкерами". Отличия сталкеров от обычных стримеров заключаются прежде всего в большей яркости свечения в ИК диапазоне, что свидетельствует о высокой температуре газа в их каналах (свечение сталкеров часто регистрируется и в последующих кадрах ИК камеры, через 7÷8 мс, когда и разрядная плазма и неравновесное возбуждение газа полностью релаксировали). Отличия сталкеров от лидеров состоят: в гладкости каналов; в особенностях ветвления; в широком диапазоне яркостей свечения; в отсутствии резкой границы между ярко светящейся и слабо светящейся частью канала (в отличие от границы между головкой лидера и его стримерной зоной). Кроме того, наблюдаются слабо вытянутые сталкеры, которые нельзя характеризовать, как каналы. Они похожи на стемы - наблюдаемые в молниевом и искровом разрядах и до сих пор слабо изученные плазменные образования, оторванные от плазменных каналов. Сильные (ярко светящиеся) сталкеры имеют стримерные короны, которыми они могут взаимодействовать с землей, лидерами и другими сталкерами. Сталкеры могут рождают лидерные разряды -

зафиксированы ситуации, когда с концов сталкера стартуют два разнополярных лидера. В работе проведен анализ возможной природы сталкеров и предложены гипотезы, объясняющие наблюдаемые особенности сталкеров.

Публикации

1. A.Yu. Kostinskiy, V.S. Syssoev, N.A. Bogatov, E.A. Mareev, M.G. Andreev, L.M. Makal'skiy, D.I. Sukharevski. Expected and unexpected cloud discharges. *Nature*, 2014 (submitted).

2. В.С. Сысоев, А.Ю. Костинский, Л.М. Макальский, В.А. Раков, М.Г. Андреев, М.У. Булатов, Д.И. Сухаревский, М.Ю. Наумова, Исследование параметров встречного лидера и его влияния на молниезащищенность объектов на основе лабораторного крупномасштабного моделирования, *Изв.ВУЗов. Радиофизика*, 2013, Т. LVI, №11-12, с. 931 — 938.

3. M.G. Andreev, N.A. Bogatov, A.Yu. Kostinsky, E.A. Mareev, D.I. Sukharevsky, V.S. Syssoev, First Detailed Observations of Discharges within the Artificial Charged Aerosol Cloud, 15th International Conference on Atmospheric Electricity (ICAE 2014), 15-20 June 2014, Norman, Oklahoma, USA.

4. N.A. Bogatov, V. Syssoev, D. Suharevsky, M. Bulatov, M. Andreev, A. Kostinsky, E. Mareev, V. Rakov, Microwave Diagnostics for Investigation of Long Spark and Artificial Charged Aerosol Cloud, 15th International Conference on Atmospheric Electricity (ICAE 2014), 15-20 June 2014, Norman, Oklahoma, USA.

2.10. Разработана и реализована в Нижегородской области региональная система наукастинга опасных быстроразвивающихся метеорологических явлений, которая включает многопунктовую систему грозопеленгации, датчики квазистатического электрического поля, инфраструктуру и алгоритмы сбора и обработки данных. Функционирование системы обеспечивается сверхоперативным прогнозом с помощью мезомасштабной модели высокого разрешения WRF и анализом радиолокационных данных в режиме реального времени. Система позволяет исследовать статистические характеристики электрических полей и климатологию грозовых разрядов в среднеширотной атмосфере.

Авторы: А.А. Булатов, С.О. Дементьева, Н.В. Ильин, В.В. Клименко, Ф.А. Кутерин, Е.А. Мареев, М.В. Шаталина, Ю.В. Шлюгаев (ИПФ РАН), В.В. Соколов (Департамент Росгидромета по Приволжскому федеральному округу).

Аннотация. Разработана и реализована в Нижегородской области региональная система наукастинга опасных быстроразвивающихся метеорологических явлений, которая включает многопунктовую систему грозопеленгации, датчики квазистатического электрического поля, инфраструктуру и алгоритмы сбора и обработки данных. Развернуто 3 пункта грозопеленгации на основе приборов Voltek Stormtracker. Разработана и настроена инфраструктура сбора и обработки данных, алгоритмы работы и необходимое программное обеспечение для пунктов грозопеленгации и для центрального сервера грозопеленгационной сети. Производится исследование и совершенствование алгоритмов определения положения разряда с использованием данных, собранных пунктами грозопеленгации за сезон. Используется анализ радиолокационных данных в режиме реального времени. В качестве индикатора атмосферной турбулентности на временных масштабах от одной секунды до нескольких часов используются измерения флуктуаций яркостной температуры атмосферы на длине волны 8 мм.

Функционирование системы обеспечивается сверхоперативным прогнозом с помощью мезомасштабной модели высокого разрешения WRF. Расчет производится на

вложенных сетках (крупная сетка с шагом 25 км охватывает европейскую часть России, средняя сетка с шагом 5 км охватывает область 500 на 500 км, и самая мелкая сетка с шагом 1 км непосредственно на территории Нижегородской области). В качестве начальных и граничных условий используются данные о состоянии атмосферы по результатам прогноза глобальной модели GFS (0.5 градуса).

В качестве алгоритма прогноза молниевой активности используется способ расчета электрического потенциала внутри облака, основанный на модели, в которой основными носителями заряда в предлагаемой модели являются льдинки и снежная крупа.

Система позволяет исследовать статистические характеристики электрических полей и климатологию грозовых разрядов в среднеширотной атмосфере. С помощью разнесенных на расстояние около 5 км электростатических флюксометров исследованы характеристики флуктуаций атмосферного электрического поля за временной интервал около одного года. Полученные статистические характеристики для поля (спектральная плотность и временная структурная функция) сопоставлены с соответствующими характеристиками атмосферной турбулентности, включая составляющие, связанные с крупномасштабными пространственно-временными метеорологическими образованиями (характерные времена более суток).

Публикации

1. В.В. Клименко, Е.А. Мареев, М.В. Шаталина, Ю.В.Шлюгаев, В.В. Соколов, А.А. Булатов, В.П. Денисов. О статистических характеристиках электрических полей грозовых разрядов в атмосфере, Изв.ВУЗов. Радиофизика, 2013, Т. LVI, №11-12, с. 864 — 874.

2. С.О. Дементьева, Н.В. Ильин, Е.А. Мареев. Расчет электрического поля и индекса молниевой активности в моделях прогноза погоды, Изв. РАН – ФАО, 2015, Т. 51, № 1, с. 1-9 (принята).

3. Yu.V. Shlyugaev, E.A. Mareev, F.A. Kuterin, A.A. Bulatov, Comprehensive study of regional thunderstorm activity in the wide frequency range, 32nd International Conference on Lightning Protection, Oct. 13-17, 2014, Shanghai, China (invited).

4. Yu. V. Shlyugaev, E.A. Mareev, F.A. Kuterin, A.A. Bulatov, Spaced observations of lightning discharges over a wide frequency range, 15th International Conference on Atmospheric Electricity (ICAE 2014), 15-20 June 2014, Norman, Oklahoma, USA.

5. Ю.В.Шлюгаев, Е.А. Мареев, В.В.Соколов. Развитие региональной системы наукастинга опасных быстроразвивающихся явлений в атмосфере. Приглашенный доклад на Всероссийском метеорол. съезде, Санкт-Петербург, 7-9 июля 2014 г.

2.11. Разработана и изготовлена бортовая измерительная система (БИС) для оценки потенциала конформных гидроакустических антенн, определения характеристик и построения модели акустических помех работе бортовых приемных систем. Впервые в отечественной практике в результате натурных испытаний корабля с помощью БИС получены данные о величинах и характере поведения корабельных, гидродинамических и фоновых помех. Для анализа результатов измерений подготовлена теоретическая база в виде совокупности алгоритмов адаптивной и оптимальной обработки сигналов с антенных приемных систем.

Авторы: Артельный П.В., Балалаев А.Я., Иваненков А.С., Кибардин Г.А., Коротин П.И., Наседкин А.В., Потапов О.А., Турчин В.И., Цибереv А.В., Чащин А.С.

Аннотация. Потенциал любой антенны в основном определяется волновыми размерами и уровнем помех. Для корабельной гидроакустики размер антенны ограничен размерами корпуса корабля, а помехи представляют собой совокупность различного типа

мешающих факторов: аппаратурных, корабельных от шума механизмов, гидродинамических от обтекания корпуса набегающим потоком жидкости, от соседнего акустического оборудования. Конформные бортовые антенны, распределенные по корпусу, имеют максимальную апертуру, но и наибольший уровень помех. Создание конформных антенн и даже формирование технического задания на их разработку невозможно без исследования количественных и качественных характеристик помех, анализа различных составляющих фонового шума и зависимости их от режимов движения корабля. Выполненная разработка технических средств и методов анализа обеспечивает измерения распределения акустического давления по длине корпуса и его спектрально-корреляционных характеристик при полной метрологической поддержке процесса испытаний.

В качестве приемной системы использованы кабельные гидроакустические антенны на базе цифровых гидроакустических приемников ЦГП-4 с низким собственным шумом (менее 30 дБ/третьоктаве отн.20 мкПа) и широким динамическим диапазоном (не менее 110 дБ). Была разработана технология установки кабельных антенн на борт корабля. Бортовая измерительная система (БИС) состояла из двух антенных линий по бортам с апертурой каждой – 80 метров и количеством гидрофонов в линии – 120 штук.

Испытания БИС показали её работоспособность на различных режимах движения корабля и устойчивость к влияющим факторам внешней среды. Далее приведены несколько примеров результатов записей сигналов и обработки.

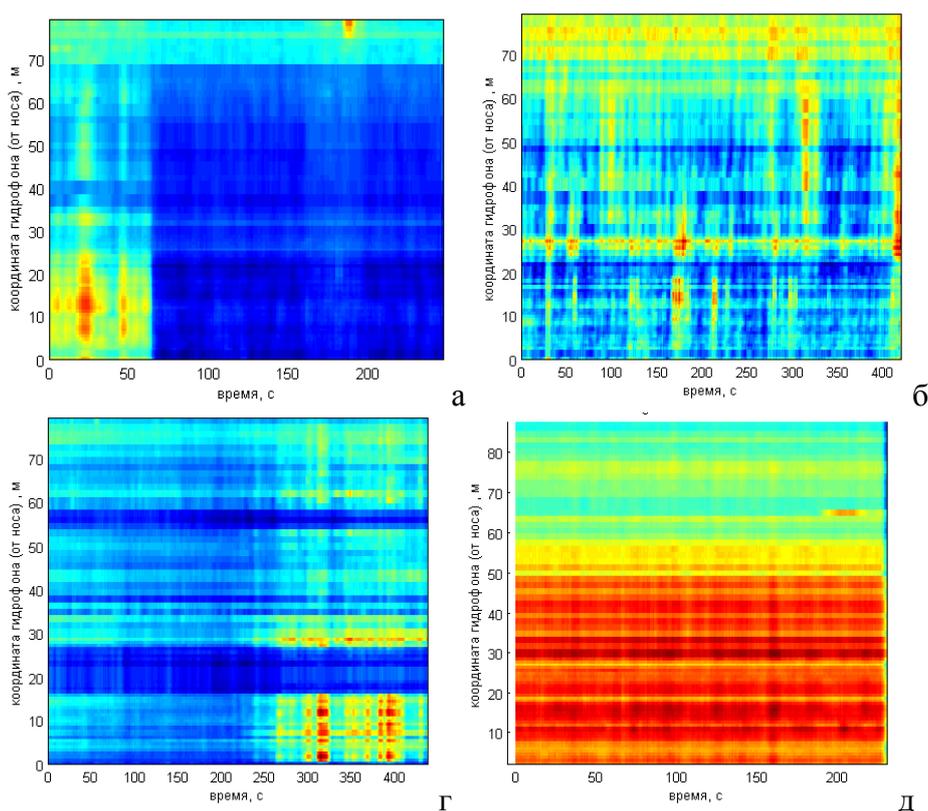


Рис. 1. Распределения амплитуды по длине корпуса в зависимости от времени: «а» - измерения при неподвижном положении (до 65 секунды работает отдельный механизм), «б» - на ходу при состоянии поверхности моря – 3 балла, «в» - у пирса (ведется монтаж оборудования), «г» - на стапеле на воздухе (ведутся строительные работы).

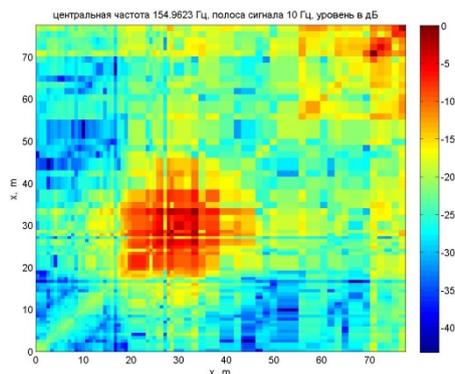


Рис. 2. Корреляционная матрица пространственного распределения акустического поля.

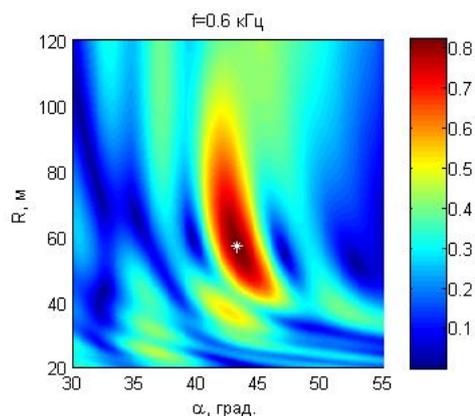


Рис. 3. Результат фокусировки антенны в процессе её калибровки на месте установки на борту на источник в ближнем поле.

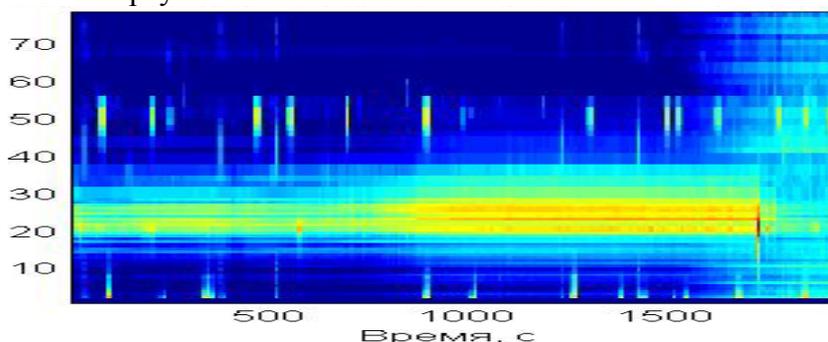


Рис. 4. Гистограмма зависимости распределения амплитуды поля по длине корпуса от скорости движения при разгоне корабля.

Анализ записей, выполненный по теоретическим разработкам алгоритмов антенной обработки, показал возможность получения следующих данных:

- определения уровня фоновых шумов моря при превышении их корабельной помехой на величину до 50 дБ;
- разделения корабельных и гидродинамических шумов на различных режимах движения;
- поиск зон повышенного шумоизлучения по длине корпуса;
- локализация координат и измерения уровня источника звука в ближней зоне антенны;
- оценки шумоизлучения корабля;
- характеристики нестационарных помех;
- информации для построения модели гидродинамического шума;
- требований по размещению антенн на корпусе, выбору их частотного диапазона и оценке потенциала в режиме шумопеленгации и гидролокации.

Публикации

1. А.С. Иваненков, А.А. Родионов, В.И. Турчин Оценка уровня фонового шума с помощью горизонтальной антенной решетки на фоне пространственно некоррелированной и структурной помех // Акустический журнал, 2013, Т.59, № 2. С. 202–210.
2. М.Б. Емельянов, Б.М. Салин, М.Б. Салин, А.В. Цибереv. Восстановление временной зависимости и параметров сигнала широкополосных протяженных акустических источников в дальней зоне. Часть 1. Методы восстановления и технические средства // Акустический журнал, 2014, Т.60,
2. Турчин В.И. Максимально правдоподобная оценка координат широкополосных источников шума при неизвестных спектральных плотностях сигнала и помехи. Изв. вузов Радиофизика, 2013, Т.56, №4, С.277-286
3. Rodionov A.A., Turchin V.I. "Array Signal Processing Based on Interference Model with Incomplete Correlation Matrix", Proc. IXth Int. Conf. Ant. Theory and Technique, Odessa, Ukraine, Sept. 16–20, pp. 249-251, 2013.

2.12. Выполнена реконструкция инструментально измеренных (запись смещения поверхности в точке) событий аномально высоких волн («волн-убийц») с использованием численного расчета уравнений огибающей для эволюции в пространстве. Впервые продемонстрирована адекватность такой реконструкции (до времен менее или порядка 10 мин) посредством расчета исходных уравнений гидродинамики, где начальные условия (до момента экстремального события) заданы по результатам реконструкции. Для примера "волны-убийцы" в Северном море результат моделирования воспроизводит инструментальную запись с удовлетворительной точностью.

Авторы: Е.Н. Пелиновский, А.В. Сергеева, А.В. Слюняев, Т.Г. Талипова (ИПФ РАН), С. Guedes Soares (Technical University of Lisbon, Portugal), D.-J. Doong (National Taiwan Ocean University, Taiwan)

Аннотация. Временные записи последовательностей смещения водной поверхности, содержащие «волны-убийцы», являются уникальным материалом, который, одновременно, и существенно неполный; он не даёт достаточной информации для *однозначной* интерпретации события. Для того чтобы, тем не менее, восстановить правдоподобную картину динамики волн в окрестности точки измерения, требуется сделать 2 шага:(1) восстановить поле скоростей в точке измерения по известной записи смещения; (2) рассчитать эволюцию волн против направления их движения. Первое предположение, которое делается для решения этих проблем, заключается в предположении об однонаправленности волн (в большей части ситуаций прямой информации об угловом спектре волн не имеется вовсе). Для решения проблемы (1) используются различные методы, основывающиеся на теоретическом описании волн с привлечением дополнительных предположений (на малость амплитуды и/или узость спектра). Для решения проблемы (2) удобны асимптотические модели (где приближением первого порядка является уравнение переноса, связывающее эволюцию по времени и по координате), позволяющие записать уравнение для эволюции по координате. В частности, нами использовались слабо нелинейные уравнения огибающей с учетом нелинейной дисперсии и полной линейной дисперсии (модель Диста). Поскольку в процедуре реконструкции используются предположения на слабость нелинейности и дисперсии, которые плохо соотносятся с "волнами-убийцами", то открытым оставался вопрос о легитимности процедур регистрации и адекватности результатов реконструкции. (Нужно отметить другой – "инженерный" – способ реконструкции "волн-убийц", успешно примененный группой Г. Клаусса (G. Clauss) в волновом лотке Берлинского университета:

в нем сигнал на волнопродукторе подбирался итерационным способом, оптимизируя близость профиля максимальной волны к измеренному.) Нами выполнена верификация использованного нами ранее подхода для реконструкции событий аномальных волн по записи смещения поверхности $\eta(x=0, t)$, $0 < t < T$. Верификация выполнена на основе расчета полных уравнений гидродинамики (оставаясь в рамках предположения об однонаправленности волн). Для реконструкции события в некоторой области $-L < x < 0$ (предыстория) использовались приближенные уравнения Диста для эволюции в пространстве (Рис. 1, красные профили). Далее реконструированные поля в момент $t = 0$ для $-L < x < 0$ использовались как начальные условия для расчета во времени уравнений Диста и исходных уравнений гидродинамики (код HOSM). Последние использовались в качестве «эталонной» модели, заменяющей реальность. Расчет во времени позволял получить новую запись в точке измерения $\eta^*(x=0, t)$, которая сравнивалась с исходной записью $\eta(x=0, t)$. Чем совпадение лучше, тем аккуратнее выполненная реконструкция. В качестве первого теста была использована временная запись последовательности солитонов огибающей большой интенсивности (Рис. 2). Видно, что реконструкция (черная линия) довольно хорошо соответствует исходной записи (особенно для малых времен реконструкции). На Рис. 3 приведен пример успешной реконструкции события, измеренного в Северном море. Исходная запись представлена синей линией (и зеленой – после ВЧ фильтрации записи, необходимой для численного моделирования). Красный пунктир и черная линия представляют результат реконструкции с использованием, соответственно, только уравнений Диста и в рамках полных уравнений гидродинамики. Видно, что черная линия (расчет реконструированных полей в рамках исходных уравнений) удовлетворительно совпадает с инструментальной регистрацией как по амплитуде волны, так и по фазе. Однако имеет место занижение амплитуды «волны-убийцы». Полученный результат демонстрирует потенциальную возможность реконструкции событий аномально высоких волн на интервалах времен около 10 мин по данным регистрации полей смещения в точке и подтверждает адекватность примененной нами процедуры реконструкции (оставаясь в рамках предположения об однонаправленном распространении волн). Желательным является усовершенствование модели огибающей с более точным описанием сильно нелинейных эффектов. С помощью описанного подхода выполнена реконструкция событий «волн-убийц» на основе регистраций в Северном море и у побережья о. Тайвань.

Публикации

1. A. Slunyaev, E. Pelinovsky, and C. Guedes Soares, Modeling freak waves from the North Sea. *Applied Ocean Research* 27, 12-22 (2005).
2. A. Slunyaev, Nonlinear analysis and simulations of measured freak wave time series. *European J. of Mechanics B / Fluids* 25, 621-635 (2006).
3. A. Slunyaev, E. Pelinovsky, C. Guedes Soares, Reconstruction of extreme events through numerical simulations. Proc. 30th Int. Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Eng. (OMAE-2011), OMAE2011-50314, 1-9 (2011).
4. A.V. Slunyaev, A.V. Sergeeva, E.N. Pelinovsky, Modelling of deep-water rogue waves: different frameworks. In: C. Guedes Soares et al. (Ed.) CENTEC Anniversary Book. Marine Technology and Engineering. Taylor & Francis Group, London, 199-216 (2012).
5. A. Slunyaev, E. Pelinovsky, C. Guedes Soares, Reconstruction of extreme events through numerical simulations. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. 136(1), 011302 (2014).
6. A. Sergeeva, A. Slunyaev, E. Pelinovsky, T. Talipova, and D.-J. Doong, Numerical modeling of rogue waves in coastal waters. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 14, 861–870 (2014).

7. A. Slunyaev, Modelling of rogue wave events in the sea. Book of abstracts of Int. Conf. Advanced problems in Mechanics-2011, 87, (2011).

8. A. Sergeeva, T. Talipova, D.-J. Doong, A. Slunyaev, and E. Pelinovsky, Numerical simulations of in-situ freak waves in variable depth conditions. Geophysical Research Abstracts, V. 15, EGU2013-893 (2013).

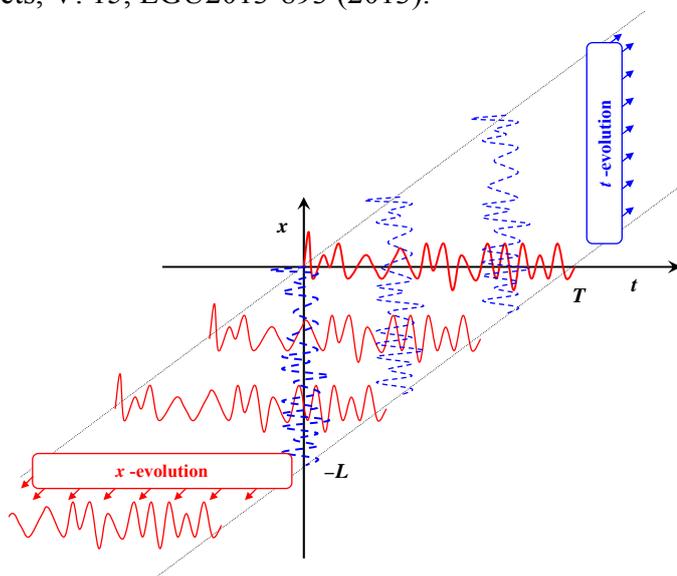


Рис. 1. Принципиальная схема верификации расчета предыстории (эволюции в пространстве в рамках модели Диста, – красным) с последующим расчетом эволюции в рамках исходных уравнений (синим).

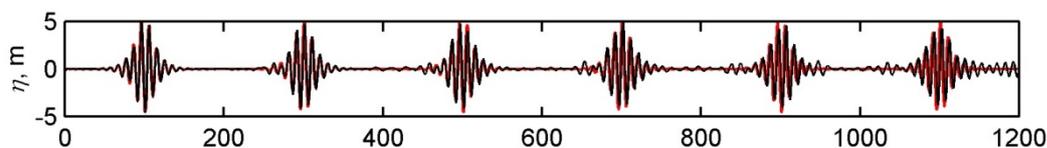


Рис. 2. Пример реконструкции последовательности солитонов огибающей крутизны $ka = 0.2$: исходная временная запись (красным) и реконструкция (черным). Горизонтальная ось соответствует времени реконструкции (в секундах).

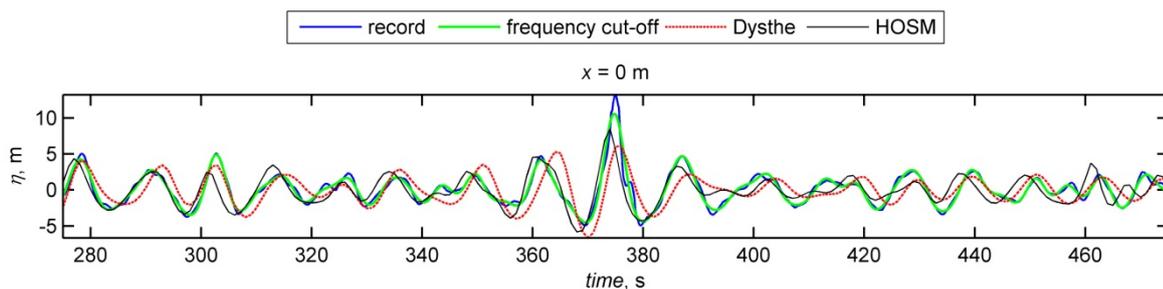


Рис. 3. Сопоставление исходной записи NA199711200151 (синим, после отсечки ВЧ компоненты спектра – зеленым), и результатов реконструкции в рамках модели Диста (красный пунктир) и исходных уравнений гидродинамики (черным). Показана только часть записи, соответствующая «волне-убийце».

2.13. Выполненное численное моделирование рассеяния звука на поверхностном волнении со спектром Пирсона-Московица показало, что наличие крупномасштабных поверхностных волн со значением параметра Рэля не превосходящим 1.5 не нарушает справедливость оценки спектра обратного, брэгговского рассеяния звука, сделанной только по короткопериодной компоненте поверхностных волн с малым параметром Рэля.

Авторы: М. Б. Салин, А. С. Досаев, А. И. Коньков, Б. М. Салин

Аннотация. Задача определения спектра звуковых сигналов, рассеянных на морском волнении, возникла при оценке дальности действия низкочастотных доплеровских гидролокаторов. Брэгговское рассеяние гидроакустических сигналов на поверхностных волнах, частота которых на несколько октав превышает низкочастотную компоненту волнения, имеет ряд особенностей. В первую очередь это связано: 1) с большим индексом фазовой модуляции сигнала и 2) с разбросом фазовых скоростей рассеивающих звук коротких поверхностных волн в поле течений длинных волн, что в конечном виде приводит к трансформации и уширению спектра рассеянного сигнала. Теоретическое описание уширения первого типа потребовало достаточно точного решения задачи акустического рассеяния, а второго типа - более корректного измерения спектра волнения.

Выполненное исследование показало, что влияние первого фактора на уширение спектра не наблюдается вплоть до состояния волнения, характеризуемого значением параметра Релея 1.5. При этом значении параметра колебания поверхности оказываются плавными и не оказывают влияния на сигнал обратного рассеяния, формируемый короткими волнами. Соответственно, до указанного предела можно пользоваться разработанной ранее схемой расчета уровней рассеяния, основанной на методе малых возмущений.

Исследование выполнялось путем численного моделирования, при котором генерация профиля взволнованной поверхности производилась путем численного решения уравнения Эйлера методом Дьяченко при заданном конечном виде энергетического спектра волнения (спектр Пирсона-Московица). Расчет акустического рассеяния проводился на основе метода Кирхгоффа и метода граничных элементов. Результаты расчетов сопоставлялись с прогнозными оценками рассеяния, которые базировались только на амплитуде волнения на брэгговской длине волны.

Публикации

1. Салин Б.М., Салин М.Б. Методы и схемы расчета основных параметров реверберации, обусловленных рассеянием низкочастотных акустических волн на ветровом волнении с известными пространственно-временными характеристиками // Акуст. журн. 2011. Т.57. № 6. С. 818–827

2. Салин Б. М., Салин М. Б., Spindel R.C. Расчет спектра реверберационной помехи для доплеровской схемы локации.// Акуст. журн. 2012, Т.58. №2. С 258-266.

3. Досаев А. С., Коньков А. И., Салин Б. М. Салин М. Б., Численное моделирование брэгговского рассеяния звука на поверхностном волнении при различных значениях параметра Рэля // Акуст. журн. 2014. Т. 60. №4. С.413-425

2.14. Построен робастный алгоритм локализации узкополосного акустического источника в случайно-неоднородном мелководном канале. Процедура оценивания использует квадратичный метод обработки частично-когерентного сигнала вертикальной антенной решеткой, осуществляющий согласованную (со средой распространения) матричную фильтрацию вектора наблюдения. В условиях неполной априорной информации о канале формируемый пространственный фильтр рассчитан на наихудший сценарий приема и обладает повышенной устойчивостью к статистическому рассогласованию, обусловленному несоответствием между истинной корреляционной матрицей сигнального поля и ее расчетной моделью.

Приведена апробация предложенного способа решения обратной задачи с использованием экспериментальных данных, полученных на стационарной трассе в Баренцевом море. Показано, что в реальных условиях указанный алгоритм является

достаточно эффективным и обеспечивает удовлетворительное качество восстановления источника, удаленного на расстояния порядка 15 км от антенной решетки.

Авторы: Сазонтов А.Г., Смирнов И.П., Матвеев А.Л.

Аннотация. Проблема локализации источника в подводном звуковом канале является одним из важных аспектов общей теории обнаружения и оценивания параметров сигналов на фоне помех с использованием адаптивных антенных решеток (АР). Однако ее решение, основанное на методе согласованного поля, сталкивается с трудностями принципиального характера. Так, одной из главных причин, не позволяющих получить корректное решение этой задачи в сложных (и всегда недостаточно известных) условиях морской среды, является несоответствие между принятым звуковым полем и его расчетной моделью.

При наличии случайных неоднородностей волноводного канала предположение о заданной регулярной пространственной структуре полезного сигнала в принципе не выполняется и когерентные алгоритмы не в состоянии обеспечить согласование модели с реальными данными. Такой более общий сценарий приема приводит, как известно, к необходимости использования более сложных (квадратичных) алгоритмов, способных обеспечить согласование со средой в статистическом смысле — на уровне не отдельных случайных реализаций сигнала на входе АР, а их вторых моментов.

Однако на практике рассчитанная сигнальная матрица всегда отличается от истинной на величину некоторой случайной ошибки, обусловленной тем или иным механизмом статистического рассогласования. Построение робастных алгоритмов пространственной обработки в таких условиях предполагает ограниченность по норме соответствующей матрицы ошибок, при этом адаптация к априори неизвестным условиям приема заключается в нахождении устойчивой процедуры оценивания, позволяющей частично скомпенсировать эффекты статистического несоответствия.

На основе критерия максимума отношения сигнал/помеха авторами разработан согласованный со средой спектральный метод определения координат источника в случайно-неоднородном океаническом волноводе и проведена его верификация на имеющихся экспериментальных данных. Показано, что в реальных условиях Баренцева моря соответствующий алгоритм является работоспособным и обеспечивает удовлетворительное качество восстановления источника, удаленного на расстояние ~15 км от антенной решетки.

Публикации

1. Сазонтов А.Г., Смирнов И.П., Матвеев А.Л. Локализация источника в мелководном канале со взволнованной поверхностью // Акуст. журн. 2015. Т. 61. № 1. С. 114–122 (принята к печати).

2.15. На основе модели видимости взволнованной поверхности моря под скользящими углами наблюдения разработан и апробирован метод восстановления пространственного распределения скорости приповерхностного ветра по пространственно – временным изображениям поверхности. Для экспериментальной апробации метода разработан макет многоканального оптического комплекса для регистрации пространственно – временных изображений морской поверхности. Проведены натурные эксперименты по исследованию распределения ветра с помощью данного комплекса, в частности, получены уникальные данные по структуре кататического ветра над морем на расстояниях до десяти километров.

Авторы: Баханов В.В., Ермаков С.А., Зуйкова Э.М., Лучинин А.Г., Сергиевская И.А., Титов В.И.

Аннотация. Разработан оптический метод восстановления скорости приповерхностного ветра при освещении рассеянным светом неба. Метод состоит из двух этапов: сначала определяется дисперсия уклонов волн по изображению морской поверхности с учетом затенения волн, а затем восстанавливается скорость ветра по модельной зависимости дисперсии уклонов волн от скорости ветра. Для апробации метода разработан макет многоканального оптического комплекса, состоящего из нескольких синхронизированных оптических приемников на основе линеек фотоприемников для формирования ДВИ изображений поверхности моря (изображения в координатах дальность – время – интенсивность света) с различной поляризацией света, в различном спектральном диапазоне и с разным направлением наблюдения. Разработаны методы создания ДВИ изображений поверхности шириной от десятков метров до десятков километров в зависимости от требуемого пространственного разрешения. Проведены наблюдения приповерхностных ветровых потоков на реках, во внутренних водохранилищах и в прибрежных зонах морей с помощью оптического комплекса. Исследована структура вихрей, ветровых фронтов, кататических потоков ветра на расстояниях от сотен метров до десятков километров.

Публикации

1. В.И. Титов, А.Ю. Артамонов, В.В. Баханов, С.А. Ермаков, А.Г. Лучинин, И.А.Репина, И.А. Сергиевская. Мониторинг поверхности моря с помощью оптических методов. Исследования Земли из Космоса, № 5, с.3-14, 2014

2. Victor Titov, Victor Bakhanov, Stanislav Ermakov, Aleksandr Luchinin, Irina Repina & Irina Sergievskaya. Remote sensing technique for near surface wind by optical images of rough water surface. (ID: 948223 DOI:10.1080/01431161.2014.948223). International Journal of Remote Sensing, Volume: 35, Issue: 15, pages 5946 – 5957 (2014).

2.16. Предложен и апробирован в натурном эксперименте метод оценки координат источника звука на шельфе с помощью согласованной со средой обработки сигналов. Метод развит для ситуации, когда сигналы регистрируются вертикальной антенной решеткой, установленной около берега на малой глубине. Показано, что на коротких трассах обратная задача может быть решена даже в отсутствие информации о параметрах грунта, необходимой для построения полной математической модели волновода. Решение базируется на расчете компонент сигналов, пришедших вдоль лучевых траекторий, не отразившихся от дна.

Авторы: А.Л. Вировлянский, А.Ю. Казарова, О.В. Колодиев, П.И. Коротин, Л.Я. Любавин, Д.А. Орлов, О.А. Потапов, В.И. Турчин (ИПФ РАН), Г. В. Кенигсбергер, В. И. Моисеенков (Гидрофизический институт Академии наук Абхазии)

Аннотация. Фактором, существенно ограничивающим возможности согласованной со средой обработки гидроакустических сигналов, является неточность математической модели подводного волновода. Особенно остро эта проблема стоит в шельфовых областях, где для построения точной модели, как правило, не хватает надежной информации о рельефе дна и параметрах грунта. В принципе, однако, даже в такой ситуации обработка, согласованная со средой, может быть реализована для не слишком больших дистанций, если при формировании математической модели сигнала учитываются только его компоненты, формируемые волнами, пришедшими на приемную антенну без отражений от дна.

Для демонстрации такой возможности сотрудниками Института прикладной физики РАН и Гидрофизического института Академии наук Абхазии в октябре 2013 был проведен совместный эксперимент в Сухумской бухте. Его задачей был анализ возможностей согласованной со средой обработки сигналов в условиях сложного (и к тому же плохо известного) рельефа дна и практически неизвестных параметров грунта. Координаты источника восстанавливались по данным акустических измерений с помощью вертикальной антенной решетки.

В данном эксперименте было продемонстрировано, что подход, базирующийся на использовании только тех компонент сигнала, которые приходят вдоль лучевых траекторий, не отражающихся от дна, позволяет с хорошей точностью оценивать расстояние до источника и его глубину на относительно коротких дистанциях. При размещении приемной антенны вблизи берега (глубина места составляла 13 м) удавалось восстанавливать координаты источника на дистанциях порядка 300 м.

Публикации

1. А.Л. Вировлянский, А.Ю. Казарова, Г.В. Кенигсбергер, О.В. Колодиев, П.И. Коротин, Л.Я. Любавин, В.И. Моисеенков, Д.А. Орлов, О. А. Потапов, В. И. Турчин. Эксперимент по оценке координат источника звука на шельфе Черного моря. Акуст. журн. (в печати)

2. А.Л. Вировлянский, А.Ю. Казарова, Г.В. Кенигсбергер, О.В. Колодиев, П.И. Коротин, Л.Я. Любавин, В.И. Моисеенков, Д.А. Орлов, О.А. Потапов. Анализ лучевой структуры поля широкополосного источника звука на шельфе Черного моря. Сборник трудов 1-ой Всероссийской акустической конференции, Секция - Акустика океана. 2014. С. 3-9.

2.17. Разработана высокочувствительная нелинейно-акустическая методика наблюдения макроскопических проявлений наномасштабных медленных спонтанных процессов в гранулированной среде. Выявленные эффекты объяснены бистабильностью находящихся на поверхностях гранул микроконтактов, для переключения которых между положениями равновесия достаточно энергии тепловых флуктуаций. Предложенная физическая модель таких контактов с адгезией описывает их бистабильность как механический гистерезис, где роль «мягкого» элемента играет нелинейная упругость самого растягиваемого контакта, которая уравнивает его притяжение к другой поверхности. Предсказываемое моделью существование неровностей радиусом ~ 100 нм подтверждено атомно-силовым зондированием поверхности гранул. Проведенное Монте-Карло моделирование коллективной динамики таких бистабильных элементов хорошо воспроизводит особенности медленных релаксаций в различных режимах, включая эффекты «старения» отклика и накопление поврежденности от повторяющихся слабых воздействий с подведением к порогу разрушения материала.

Авторы: В.Ю. Зайцев (ИПФ РАН), В.Э Гусев, В. Турна (Университет Дю Мэн, Франция), П. Ришар (Университет Ренн-1, Франция)

Аннотация. Выполнен цикл экспериментальных исследований, а также теоретический анализ и численное моделирование медленных спонтанных процессов в гранулированной среде. Макроскопические проявления наномасштабных медленных релаксационных процессов наблюдались с помощью предложенной нелинейно-акустической методики, обладающей беспрецедентно высокой селективной чувствительностью к состоянию именно наиболее слабых, легко нарушаемых/восстанавливаемых связей в гранулированном материале.

Выявленные особенности медленных релаксаций объяснены бистабильностью находящихся на поверхностях гранул микроконтактов, для переключения которых между положениями равновесия достаточно энергии тепловых флуктуаций, роль которых для макроскопически наблюдаемой динамики гранулированных сред обычно считается пренебрежимой. Для описания таких индивидуальных микроконтактов с адгезией предложена физическая модель, описывающая их бистабильность, по аналогии с острием атомно-силового микроскопа (АСМ), как механический гистерезис, где, однако, роль «мягкого» элемента-кантилевера играет сама нелинейная упругая сила растягиваемого контакта, уравнивающая его притяжение к другой поверхности. Предсказываемое моделью существование неровностей радиусом ~ 100 нм подтверждено АСМ-зондированием поверхности гранул.

Выполненное по методу Монте-Карло моделирование коллективной динамики таких бистабильных элементов с реалистичным спектром энергетических барьеров хорошо воспроизводит наблюдаемую почти-логарифмическую/степенную релаксацию в различных режимах. В частности, воспроизводится реакция среды на сравнительно слабые повторяющиеся возмущения с накоплением поврежденности и так называемые эффекты старения, характерные для эволюции больших ансамблей бистабильных элементов. Такие эффекты обсуждаются для широкого класса систем различной физической природы, в том числе в контексте понимания механизмов динамического инициирования землетрясений и постепенного накопления эффекта и долговременного последствия волновых методов стимуляции нефтеотдачи.

Публикации

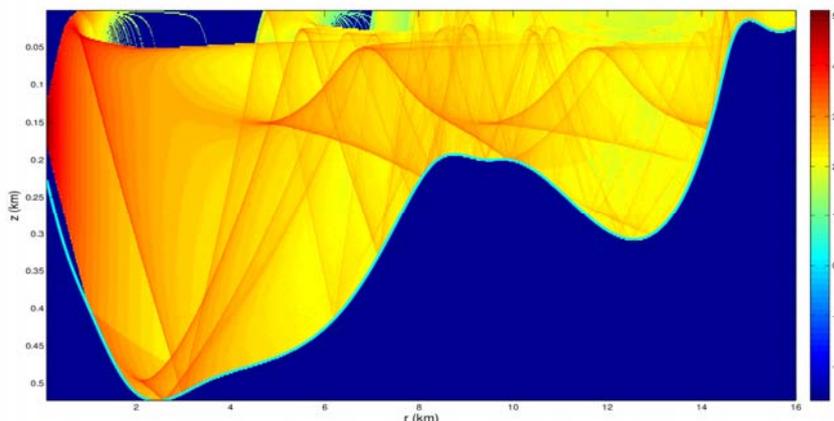
1. V. Y. Zaitsev, V. E. Gusev, V. Tournat and P. Richard, Slow relaxation and aging phenomena at the nano-scale in granular materials, *Phys. Review Letters*, 2014, V.112, 108302(1-5)
2. V.Yu. Zaitsev, V.E. Gusev, V. Tournat, P. Richard, Slow relaxation and aging phenomena at the nanoscale in granular materials: observations and mechanisms, *Proc. 5th International Conf. "Frontiers of Nonlinear Physics"*, Nizhny Novgorod – Yelabuga-Nizhny Novgorod (July 28 – August 2, 2013), p.38-39.
3. M. Duranteau, R. Delannay, V. Tournat, V. Zaitsev, and P. Richard, Acoustic probing of elasticity in the bulk of tilted granular layers - precursors of avalanches, *Proc. of ACOUSTICS2013 – NEW DELHI*, New Delhi, India, November 10-15, 2013 (6 pages)
4. V.Yu. Zaitsev, V. Tournat, V. Gusev "Application of nonlinear acoustics to study relaxation processes in granular materials" *AIP Proc. International Congress on Ultrasonics 2011*, 5 — 8 September 2011 Gdansk, Poland, 4 pp.
5. S. Kiesgen de Richter, V. Y. Zaitsev, P. Richard, R. Delannay, G. Le Caër, and V. Tournat, "Experimental evidence of ageing and slow restoration of the weak-contact configuration in tilted 3D granular packings," *J. Stat. Mech.: Theory&Exper.*, 2010, No 11, article No P11023(1-22).

2.18. В приближении геометрической акустики впервые получены аналитические выражения для матриц, определяющих трансформацию волнового поля при отражении от гладких криволинейных импедансных границ в двумерной рефракционной среде. На их основе разработан новый лучевой метод расчета звуковых полей в неоднородном по трассе океаническом волноводе с криволинейным дном и взволнованной поверхностью, позволивший исключить процедуру численного дифференцирования и тем самым обеспечить регуляризацию расчетов при одновременном сокращении объема вычислений.

Авторы: И.П. Смирнов, А.И. Хилько

Аннотация. При создании пространственно распределенных (мультистатических) систем подводного акустического наблюдения в мелком море необходимо путем численного моделирования оценить их эффективность в зависимости от взаимного расположения излучающих и приемных элементов, строения гидроакустического волновода, ветра, течений и шумов и помех. С этой целью разрабатываются модели распространения и дифракции звука на телах (объектах локации) и на случайно распределенных неоднородностях в горизонтально-неоднородных рефракционных волноводах океанического типа. В каналах мелкого моря акустическое поле многократно отражается от неровного дна и взволнованной поверхности, поэтому достоверность расчетов волнового поля быстро падает из-за неточностей процедуры численного дифференцирования (обычно применяемой в таких расчетах). В итоге, корректный анализ эффективности систем подводного наблюдения, особенно на важных, с практической точки зрения, больших дистанциях, в мелком море становится невозможен.

Разработанный метод расчета требует меньшего числа операций и свободен от недостатков (быстрого роста ошибки с увеличением числа актов отражения от границ канала) метода численного дифференцирования. В основе метода лежат аналитические выражения для матрицы трансформации лучевой трубки при отражении от криволинейной границы с произвольным радиусом кривизны, которые получены впервые. Их использование и позволило исключить процедуру численного дифференцирования, что является важным достоинством метода в целом. Метод также был использован для оценки анализа силы цели при рассеянии высокочастотных (в рамках лучевого приближения) полей на гладких криволинейных телах, помещенных в горизонтально-неоднородные волноводы.



Пример расчета интенсивности поля в рефракционном волноводе с сильно-неравномерным профилем дна

Публикации

1. Smirnov I.P. Boundary conditions for matrix of variations in refractive waveguides with rough bottom / ArXiv: 1212.6068v1[math-ph] 25 Dec 2012.
2. Смирнов И.П. Расчет производных лучевых траекторий по начальным параметрам в неоднородных двумерных средах // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56. № 2. С. 85-95.
3. Смирнов И.П., Хилько А.И. Лучевое приближение в задаче рассеяния волн криволинейной поверхностью в неоднородной среде // Акустический журнал. 1995. Т. 41. № 1. С. 139-145.
4. Хилько А.И., Смирнов И.П., Машошин А.И., Шафранюк А.В., Хилько А.А. Мультистатическая сила цели в океанических волноводах // Акустический журнал. 2015. Т. 61. №2 (в печати).

5. Смирнов И.П., Смирнова И.Р., Хилько А.И. Граничные условия для матрицы устойчивости при расчете акустических полей в океанических волноводах // Труды XII Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» 2014. СПб: Нестор-История. С. 341-344.

6. А.И. Машошин, И.П. Смирнов, А.И. Хилько, А.В. Шафранюк. Методический аппарат для расчета бистатической силы цели // Труды XII Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». 2014. СПб: Нестор-История. С. 418-421.

7. Хилько А.И., Смирнов И.П., Машошин А.И. и др. Структура бистатической силы цели в океанических волноводах // Труды I Всероссийской акустической конференции. Секция «Акустика океана». – М. 2014. С. 32-36.

2.19. Экспериментально и теоретически исследовано электрическое состояние среднеширотного атмосферного пограничного слоя, невозмущенного облачностью, осадками, туманом, промышленными аэрозолями. Установлены закономерности вертикального переноса заряда в пограничном слое атмосферы; в экспериментах с использованием привязной аэростатной системы подтверждено формирование аэроэлектрических структур. Развита теория электродного эффекта с учетом аэрозольных частиц. Разработана модель, позволяющая оценивать электрическое состояние устойчивого, нейтрального и конвективного атмосферных пограничных слоев.

Авторы: С.В. Анисимов, К.В. Афиногенов, С.В. Галиченко, Э.М. Дмитриев, Н.М. Шихова (Институт физики Земли РАН), А.А. Булатов, Ф.А. Кутерин, Е.А. Мареев, П.А. Микрюков, М.В. Шаталина, Ю.В. Шлюгаев, Д.В. Янин (ИПФ РАН), А.В. Калинин, С.С. Зилитинкевич (ННГУ).

Аннотация. Экспериментально и теоретически исследовано электрическое состояние среднеширотного атмосферного пограничного слоя, невозмущенного облачностью, осадками, туманом, промышленными аэрозолями. Проведены натурные эксперименты по исследованию характеристик атмосферной турбулентности с помощью мобильного комплекса, включающего: гелиевый аэростат объемом 18 куб.м, профилемер SCITECH, электрические флюксометры, датчики электрической проводимости, метеодатчики, систему передачи информации на землю. Исследованы флуктуации электрического поля и проводимости в пограничном слое на высотах до 150 м. Установлены закономерности вертикального переноса заряда в слое атмосферы; в экспериментах с использованием привязной аэростатной системы подтверждено формирование аэроэлектрических структур. Развита теория электродного эффекта с учетом аэрозольных частиц. Найдены новые аналитические выражения для интегралов системы уравнений электродного эффекта. Разработана модель, позволяющая оценивать электрическое состояние устойчивого, нейтрального и конвективного атмосферных пограничных слоев. Для параметризации модели использованы данные натурных наблюдений и лабораторных экспериментов. Исследованы вертикальный перенос объемного заряда, динамика высотных аэроэлектрических профилей в эволюционирующем пограничном слое с возрастающей конвективной активностью. Моделирование показало, что в условиях развитой конвекции максимальный градиент плотности объемного заряда формируется вблизи поверхности, уменьшаясь с высотой, если вертикальное распределение аэрозольных фракций однородно. Проведена оценка скорости генерации положительного заряда в приземном слое в условиях перехода от устойчивого к конвективному режиму атмосферного пограничного слоя.

Публикации

1. S.V. Anisimov, E.A. Mareev, N.M. Shikhova, M.V. Shatalina, S.V. Galichenko, S.S. Zilitinkevich. Aeroelectric structures and turbulence in the atmospheric boundary layer, *Nonlin. Proc. Geophys.*, 20, 819–824, 2013.
2. S.V. Anisimov, N.M. Shikhova. Intermittency of turbulent aeroelectric field, *Atmospheric Research*, 2014, V. 135-136, p. 255-262.
3. S.V. Anisimov, S.V. Galichenko, N.M. Shikhova. Space charge and aeroelectric flows in the exchange layer: An experimental and numerical study, *Atmospheric Research*, 2014, V. 135-136, p. 244-254.
4. Анисимов С.В., Галиченко С.В., Шихова Н.М., Афиногенов К.В. Электричество конвективного атмосферного пограничного слоя: натурные наблюдения и численное моделирование, *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, 2014, Т. 50, № 4, С. 1-9.
5. А.В. Калинин, Е.Е. Григорьев, А.А. Жидков, А.М. Терентьев. Классификация и свойства решений системы уравнений теории классического электродного эффекта, *Изв.ВУЗов. Радиофизика*, 2013, Т.LVI, №11-12, с. 829-852.
6. А.В. Калинин, А.М. Терентьев. Интегрирование некоторых систем теории классического электродного эффекта в присутствии аэрозолей (направлена в *Изв.ВУЗов. Радиофизика*).
7. S. Anisimov, S. Galichenko, N. Shikhova. Lagrangian approach to modeling of electrical properties of the growing convective boundary layer, 15th International Conference on Atmospheric Electricity (ICAE 2014), 15-20 June 2014, Norman, Oklahoma, USA.
8. S. Anisimov, S. Galichenko, N. Shikhova. Lagrangian approach to modeling of electrical properties of the growing convective boundary layer // XV International Conference on Atmospheric Electricity. Norman, Oklahoma, USA, 15-20 June, 2014.

2.20. С помощью сферической и упрощённой электротехнической моделей глобальной электрической цепи получены оценки влияния возмущений проводимости и плотности стороннего тока на ионосферный потенциал. Показано, что при учёте понижения проводимости внутри облаков ионосферный потенциал наиболее чувствителен к возмущениям стороннего тока, а также проводимости вне источников. При этом наблюдаемое влияние радиоактивности на динамику ионосферного потенциала не может быть объяснено повышением проводимости в средней атмосфере.

Авторы: А.В. Калинин, Е.А. Мареев, Н.Н. Слюняев, А.А. Жидков, А.А. Евтушенко, Н.В. Ильин, Ф.А. Кутерин, С.С.

Аннотация. Исследована задача о влиянии на ионосферный потенциал различных неоднородностей и возмущений проводимости и плотности стороннего тока. В наиболее общей постановке проведены оценки чувствительности ионосферного потенциала к таким возмущениям в различных частях глобальной цепи на основе упрощённой электротехнической модели глобальной цепи, применимость которой для качественного анализа данной задачи была обоснована путём сравнения с результатами расчётов в рамках трёхмерной сферической распределённой модели глобальной электрической цепи ряда модельных задач. Установлены основные тенденции воздействия на ионосферный потенциал возмущений проводимости плотности стороннего тока, получены количественные оценки, разработаны подходы к более точному анализу конкретных прикладных задач. В частности, установлено, что при задании модельного экспоненциального профиля проводимости для всей земной атмосферы ионосферный потенциал оказывается наиболее чувствительным к возмущениям плотности стороннего тока и возмущений проводимости внутри грозных облаков — источников глобальной

цепи, в то время как при учёте понижения проводимости в облаках (как грозových, так и негрозových) наибольшее влияние на ионосферный потенциал оказывают возмущения плотности стороннего тока, а из возмущений проводимости он наиболее чувствителен к неоднородностям в безоблачной части областей хорошей погоды.

Также рассмотрена задача о повышении ионосферного потенциала в 1960-е годы вследствие испытаний ядерного оружия в атмосфере. Показано, что локальное или глобальное повышение проводимости в верхней атмосфере само по себе не может объяснить наблюдавшуюся корреляцию и дать возмущение ионосферного потенциала нужной величины. В качестве других возможных механизмов влияния радиоактивности на глобальную цепь можно предложить изменение параметров источников и возмущения проводимости более сложной структуры.

3. Отделение нелинейной динамики и оптики

3.1. Предложен новый метод формирования двухцветных оптически синхронизированных импульсов высокого качества с помощью разработанной полностью волоконной лазерной системы, состоящей из эрбиевого задающего источника, нелинейно-оптического конвертора длины волны и тулиевого усилителя. Продемонстрированы импульсы, один из которых имеет центральную длину волны 2,0 мкм и реализован с энергией микроджоульного уровня, а другой плавно перестроен в диапазоне 2,0...2,3 мкм непосредственно в тулиевом активном волокне. Двухцветные импульсы востребованы в экспериментах типа «накачка-зондирование», а также при разработке мощных твердотельных лазерных усилителей на кристаллах Cr:ZnSe и Cr:ZnS в качестве затравки с синхронной накачкой. При использовании германатных волокон после тулиевого усилителя импульсы могут быть перестроены вплоть до 3 мкм. С помощью FROG-измерений экспериментально продемонстрированы спектрально ограниченные импульсы с sech-формой длительностью 125, 145 и 160 фс на 2, 2,25 и 2,7 мкм, соответственно.

Авторы: Анашкина Е.А., Андрианов А.В., Коптев М.Ю., Муравьев С.В., Ким А.В.

Аннотация. Значительный интерес к лазерным источникам фемтосекундных импульсов в диапазоне длин волн свыше 2 мкм обусловлен их важным значением, как для научных, так и прикладных задач, включающих экологический мониторинг, спектроскопию, медицинскую хирургию и офтальмологию, инвазивную и неинвазивную диагностику различных заболеваний, а также обработку материалов и др. В настоящее время для освоения указанного диапазона представляется весьма перспективным путь, связанный с нелинейно-оптическим преобразованием излучения и генерацией суперконтинуума в специальных световодах.

В данной работе предложен новый метод формирования двухцветных оптически синхронизированных импульсов высокого качества с помощью разработанной полностью волоконной лазерной системы, один из которых имеет центральную длину волны 2.0 мкм и реализован с энергией микроджоульного уровня, а другой плавно перестраивается в диапазоне 2.0-2.3 мкм непосредственно в тулиевом активном волокне. Данные импульсы могут быть использованы в экспериментах типа «накачка-зондирование», а также при разработке мощных твердотельных лазерных усилителей на кристаллах Cr:ZnSe и Cr:ZnS в качестве затравки с синхронной накачкой. Также предлагается использование эффекта рамановской перестройки несущей частоты оптического солитона в германо-силикатных световодах, накачиваемых излучением с выхода тулиевого усилителя, для получения излучения вплоть до 3 мкм.

Лазерная система состоит из фемтосекундного эрбиевого задающего генератора на центральной длине волны около полутора микрон, эрбиевого усилителя, нелинейно-оптического преобразователя сигнала в двухмикронный диапазон, тулиевого усилителя, а также нелинейного германатного световода. Излучение фемтосекундного эрбиевого волоконного лазера с кольцевым резонатором, пассивная синхронизация мод в котором осуществляется при использовании нелинейного вращения эллипса поляризации ультракороткого импульса на основе оптического эффекта Керра, усиливается в эрбиевых активных световодах до средней мощности 20 мВт, что соответствует энергии в импульсе 4 нДж при частоте повторения 5 МГц. Далее импульсы преобразовывались в двухмикронный диапазон так, чтобы попасть в полосу усиления активных световодов, легированных ионами тулия. Их энергия составила 0.5 нДж при длительности 70 фс. Для этой цели использовался эффект вынужденного рамановского самосмещения частоты оптических солитонов в нелинейном кварцевом волокне с переменной по длине волокна аномальной дисперсией. Затем использовался стретчер с нормальной дисперсией и активный световод с аномальной дисперсией, в котором был осуществлен нелинейный

режим усиления. По мере распространения сигнала по усилителю происходило сжатие за счет компенсации chirpa с последующим образованием солитона и его рамановским смещения из полосы усиления до 2.3 мкм включительно. Оставшийся после формирования солитона сигнал на длине волне 2 мкм вновь усиливался и образовывался солитонный импульс.

С помощью измерений методом оптического стробирования со спектральным разрешением (FROG) были продемонстрированы спектрально ограниченные импульсы с sech-формой с длительностью 125 фс с энергией 5 нДж на длине волны 2 мкм и длительностью 145 фс с энергией 3 нДж на 2.25 мкм.

В режиме усиления растянутых импульсов были получены сигналы на 2 мкм с энергией микроджоульного уровня энергии при 35 пс длительности.

Для продвижения в более длинноволновый диапазон после тулиевого усилителя использовался отрезок германатного световода с нулем дисперсии около 1.9 мкм. При распространении в нем импульсов происходила многосолитонная компрессия, сопровождаемая уширением спектра, с последующим распадом на солитоны в области аномальной дисперсии и их рамановским смещением. В частности, методом FROG были измерены спектрально-ограниченные сигналы на длинах волн 2.5 и 2.7 мкм с длительностями 110 и 160 фс соответственно. Получен суперконтинуум с красной границей 3 мкм.

Все экспериментальные измерения подтверждены математическим моделированием.

Публикации

1. M.Yu. Koptev, E.A. Anashkina, A.V. Andrianov, S.V. Muravyev, and A.V. Kim, "Two-color optically synchronized ultrashort pulses from a Tm/Yb-co-doped fiber amplifier," *Optics Letters*, Vol. 39, No 7, pp. 2008-2011 (2014).

2. E.A. Anashkina, A.V. Andrianov, M.Yu. Koptev, S.V. Muravyev, and A.V. Kim, "Generating femtosecond optical pulses tunable from 2 to 3 μm with a silica-based all-fiber laser system," *Optics Letters*, Vol. 39, No 10, pp. 2963-2966 (2014).

3. E.A. Anashkina, A.V. Andrianov, M.Yu. Koptev, S.V. Muravyev, and A.V. Kim, "Towards Mid-Infrared Supercontinuum Generation with Germano-Silicate Fibers," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 20, No. 5, 643-650 (2014).

3.2. Показано, что когда напряженность лазерного поля превышает определенный порог, взаимодействие такого поля с твердотельными мишенями происходит в радиационно-доминантном режиме, сопровождаемым новыми эффектами: радиационном захвате электронов лазерным импульсом и эффективной генерацией гамма-квантов. Выше порога: (i) доля лазерной энергии, конвертируемой в энергию гамма-квантов, превышает долю лазерной энергии, передаваемой электронам, (ii) пондеромоторная сила со стороны лазерного импульса на электроны сильно подавлена силой реакции излучения, в результате часть электронов мишени захватываются внутрь импульса. Найден режим взаимодействия, когда при высокой степени конверсии лазерной энергии в энергию гамма-квантов диаграмма направленности гамма-излучения становится узкой, что может быть использовано для создания гамма-источников, превосходящих по яркости существующие источники.

Авторы: Е.Н. Неруш, И.Ю. Костюков, L.L. Ji, A. Pukhov, B.F. Shen, K.U. Alki (ИПФ РАН, ННГУ, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Ohio State University, Columbus).

Аннотация. В настоящее время в мире проектируются лазерные системы (например, ELI в Европе <http://www.extreme-light-infrastructure.eu>, ЦИЭС в России <http://www.xcels.iapras.ru/>), где интенсивность излучения превысит 10^{24} Вт/см². При такой интенсивности взаимодействие лазерного излучения с веществом может происходить в новом радиационно-доминантном режиме. Электроны плазмы, возникающей при ионизации вещества излучением, в лазерном поле совершают колебания с высокой энергией. В результате таких колебаний электроны эффективно излучают сверхвысокие гармоники в рентгеновском и гамма диапазоне. Таким образом, электроны становятся эффективными конверторами лазерного излучения в жесткое электромагнитное излучение. При этом динамика электронов в значительной степени определяется силой реакции излучения (отдачей на электрон при испускании им фотона).

В наших работах [1] с помощью оригинальной численной модели, позволяющей исследовать взаимодействие сверхсильных электромагнитных полей с веществом с учетом радиационных и квантовых эффектов, найдена пороговая интенсивность лазерного излучения, при которой происходит переход к новому режиму взаимодействия - радиационно-доминантному режиму. В этом режиме доля лазерной энергии, конвертируемой в энергию гамма-излучения, превышает долю лазерной энергии, передаваемой электронам. В широком диапазоне лазерных интенсивностей и плотностей вещества найдены доли лазерной энергии, передаваемой электронам, ионам и гамма-квантам [2]. Рассмотрены случаи циркулярной и линейной поляризации лазерного излучения. Построена аналитическая модель, позволяющая оценивать мощность гамма-излучения [3]. Найдены параметры лазерного излучения, которые уже доступны для существующих лазерных систем и для которых яркость лазерно-плазменного источника гамма-излучения превышает яркость существующих источников гамма-излучения. Для радиационно-доминантного режима обнаружен новый эффект – захват электронов плазмы внутри лазерного импульса [4]. В обычном режиме, характерном для лазерного излучения с интенсивностью ниже порогового значения, сила реакции излучения пренебрежимо мала и плазменные электроны выталкиваются пондеромоторной силой из лазерного импульса. В радиационно-доминантном режиме пондеромоторная сила подавлена силой реакции излучения, и часть электронов может находиться внутри импульса значительное время.

Публикации

1. Ji L.L., Pukhov A., Kostyukov I.Yu., Shen B.F., Akli K.U. Radiation-reaction trapping of electrons in extreme laser fields // *Physical Review Letters*. 2014. V. 112. P. 145003-1-4.
2. Nerush E.N., Kostyukov I.Yu., Ji L., Pukhov A. Gamma-ray generation in ultrahigh-intensity laser-foil interactions // *Physics of Plasmas*. 2014. V. 21. P. 013109-1-8.
3. Ji L.L., Pukhov A., Nerush E.N., Kostyukov I.Yu., Shen B.F., Akli K.U. Energy partition, γ -ray emission, and radiation reaction in the near-quantum electrodynamic regime of laser-plasma interaction // *Physics of Plasmas*. 2014. V. 21. P. 023109-1-8
4. Ji L.L., Pukhov A., Nerush E.N., Kostyukov I.Yu., Akli K.U., Shen B.F. Near QED regime of laser interaction with overdense plasmas // *European Physical Journal Special Topics*. 2014. V. 223, No. 6. P. 1069–1082.

3.3. Впервые показано, что в широком диапазоне плотностей мощности лазерного излучения (от $2 \cdot 10^2$ до $1.6 \cdot 10^6$ Вт/см²) наблюдается дозовый механизм фотовыгорания в опухолевых сфероидов флуоресцентного белка KillerRed (ИБХ РАН), фототоксическое действие которого основано на генерации им активных форм кислорода. Обнаружено, что при импульсном режиме воздействия гибель клеток наступает вследствие апоптоза, в отличие от непрерывного режима лазерного воздействия, которое активирует некроз.

Сравнение непрерывного и импульсного режимов воздействия на опухоли животных, экспрессирующих белок KillerRed, показало наличие выраженных патоморфологических изменений в случае импульсного лазерного воздействия, указывающих на терапевтический эффект.

Авторы: В.А. Каменский, И.В. Турчин, П.В. Субочев, В.В. Дуденкова (ИПФ РАН), Д.С. Кузнецова, М.В. Ширманова, Е.В. Загайнова (НижГМА), С.А. Лукьянов (ИБХ РАН)

Аннотация. В 2006 г. в лаборатории С.А. Лукьянова (ИБХ РАН, Россия) был создан GFP-подобный белок с фототоксичными свойствами, названный KillerRed (KR). Он представляет собой красный флуоресцентный белок. В отличие от других GFP-подобных белков, KillerRed имеет ряд особенностей, отвечающих за фототоксичность. Было показано, что в ответ на облучение светом белок KillerRed производит активные формы кислорода по первому типу реакции фотосенсибилизации. Как предполагается, KillerRed способен существовать в двух формах – протонированной (красная форма) и депротонированной (зеленая нефлуоресцентная форма). Не смотря на имеющиеся данные, эффективность фотохимической реакции с KillerRed остается мало изученной

Впервые проведено изучение степени выгорания флуоресцентного белка KillerRed (ИБХ РАН), в основе фототоксического действия которого лежит генерация им активных форм кислорода, в опухолевых сфероидов в зависимости от световой дозы при использовании непрерывного и импульсного режимов облучения. Показано что в широком диапазоне плотностей мощности (от $2 \cdot 10^{-2}$ до $1.6 \cdot 10^6$ Вт/см²) наблюдается дозовый механизм фотовыгорания белка. Было обнаружено, что при различных режимах воздействия светом происходит активация разных путей гибели клеток. При облучении непрерывным лазером гибель клеток наступала вследствие активации некроза. При импульсном режиме воздействия мы наблюдали активацию апоптоза Рис 1. Проведенное исследование на опухолях с белком, привитых на экспериментальных животных показало замедление роста опухоли и различную динамику для импульсного и непрерывного режима облучения.

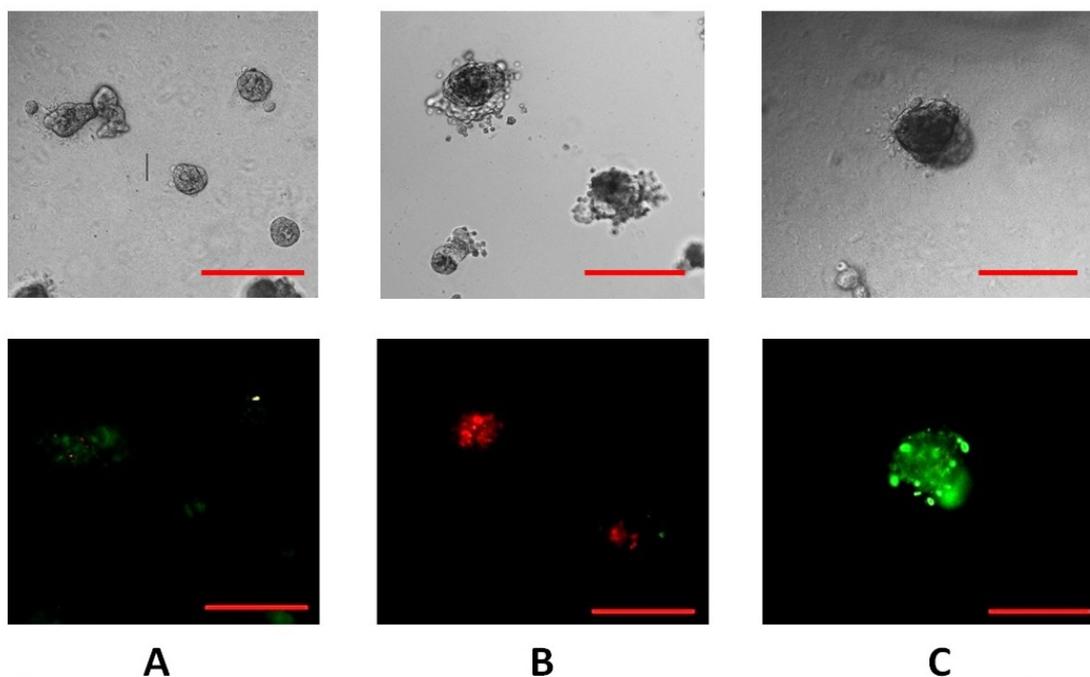


Рис1. Анализ клеточной гибели сфероидов, получивших дозу облучения 140 Дж/см²; А – контроль (необлученные сфероиды), В – непрерывный лазер, С – импульсный лазер

Покрашены специальным маркером красный –некроз, зеленый - апоптоз

В объяснении причины активации различных механизмов клеточной гибели при различных режимах лазерного воздействия можно провести аналогию с другими GFP-подобными белками. Импульсный режим для KillerRed может являться более щадящим, вызывающим апоптоз, за счет отсутствия получения дополнительной энергии в виде квантов света в период нахождения Killer Red в депротонированной зеленой форме, неспособной поглощать свет. Данная добавочная энергия во время неактивного состояния фотосенсибилизатора при непрерывном лазерном воздействии может вызывать каскад фотохимических реакций, тепловых колебаний и квантовых переходов, что в итоге заканчивается некрозом клеток.

Публикации

1. Shirmanova M.V., Serebrovskaya E.O., Lukyanov K.A., Snopova L.B., Sirotkina M.A., Prodanetz N.N., Bugrova M.L., Minakova E.A., Turchin I.V., Kamensky V.A., Lukyanov S.A., Zagaynova E.V. «Phototoxic effects of fluorescent protein KillerRed on tumor cells in mice, J. Biophotonics v.6 #3, pp.283-290, 2013.

2. Daria S. Kuznetzova, Marina V. Shirmanova, Pavel V. Subochev, Varvara V. Dudenkova, Иля V. Turchin, Elena V. Zagaynova Vladislav A. Kamensky, and Sergey A. Lukyanov “Phototoxic effects of KillerRed in tumor spheroids induced by continuous wave and pulsed laser illumination», send to J. Biophotonics (2014)

3.4. В методе спектральной оптической когерентной томографии разработан новый подход к объемной визуализации микрососудистой сети в биоткани (ангиографии) с разделением сосудов по скоростям движений. Движущиеся рассеиватели выделяются по амплитудно-фазовым изменениям в спеклах за счет фильтрации пространственного спектра двухкоординатных изображений, формирующих трехкоординатный массив данных. Высокая плотность и скорость получения элементов изображения позволяют эффективно компенсировать крупномасштабные движения живой ткани, что, в отличие от известных доплеровского и корреляционного подходов, обеспечивает повышенную робастность и чувствительность предложенного метода.

Авторы: Л.А. Матвеев, В.Ю. Зайцев, Г.В. Геликонов, А.Л. Матвеев, А.А. Моисеев С.Ю. Ксенофонтов, В.М. Геликонов (ИПФ РАН), В.В. Демидов, А. Виткин (Университет Торонто, Канада)

Аннотация. Для повышения информативности и специфичности обследования биотканей методами оптической когерентной томографии (ОКТ) предложен и апробирован новый подход к решению проблемы картирования микрососудистой сети (ангиографии). Трехмерное ангиографическое изображение строится из набора вертикальных двумерных комплексных ОКТ сканов (В-сканов), на которых новым способом выделяются только сечения сосудов. В отличие от известных подходов, при этом не используются очень чувствительные к движениям живой ткани процедуры выделения доплеровских компонент оптического сигнала и не требуется многократное повторное получение двумерных сканов в одной плоскости для выделения наиболее изменчивых областей. Хотя и в новом методе контраст обеспечивает движение рассеивающих частиц крови, для их обнаружения используется новая безопорная обработка индивидуальных плотных В-сканов, в которых отдельные «линии» (А-сканы), имеющие ширину оптического пучка, многократно перекрываются. За время этого перекрытия, спеклы, соответствующие движущимся рассеивателям в сосудах, испытывают выраженные амплитудно-фазовые изменения, а изображения частиц

окружающей ткани многократно более стабильны и имеют вид многократно более вытянутых в горизонтальном направлении спеклов в В-скане. Фильтрация горизонтального пространственного спектра таких уплотненных изображений позволяет выделить только сечения сосудов с движущимися рассеивателями без снижения исходного разрешения изображения. При этом объемные движения ткани (связанные с дыханием, сердцебиением и другими естественными причинами) оказывается возможным эффективно компенсировать, используя сравнение средних фаз соседних А-сканов, на которых сечения сосудов занимают лишь небольшую долю.

К достоинствам нового метода относятся:

(1) Повышенная чувствительность за счет использования как фазовых, так и амплитудных вариаций поля, что объединяет достоинства как известных доплеровских методов, так и методов, использующих изменчивость интенсивности спеклов от движущихся рассеивателей, и обеспечивает повышенную робастность и чувствительность нового подхода.

(2) Использование в новом методе изменчивости спеклов за счет и осевых, и латеральных движений рассеивателей, обусловленных как потоковым (коллективным), так и броуновским движением рассеивателей.

(4) Повышенная робастность метода по отношению к маскирующим объемным движениям ткани со скоростями до нескольких см/с. Эти движения удается эффективно отслеживать и компенсировать за счет многократно более высокой частоты получения сравниваемых одномерных А-сканов по сравнению с обычно сравниваемыми двумерными В-сканами, требующими гораздо более высокой стабилизации обследуемой ткани.

(5) Сохранение на ангиографическом изображении максимального разрешения, соответствующего исходному разрешению системы, в отличие от корреляционных методов, где разрешение определяется размером корреляционного окна.

(6) Возможность градации визуализируемых сосудов по скоростям изменчивости за счет изменения пороговой частоты при выполнении фильтрации исходных В-сканов.

При реализации нового метода не требуется введения дополнительных контрастных агентов в кровь, что при использовании практически неизменных аппаратных средств открывает возможности создания ОКТ сканеров для многофункционального биомедицинского обследования, включая микроангиографическое.

Публикации

1. В. Ю. Зайцев, И. А. Виткин, Л. А. Матвеев, В. М. Геликонов, А. Л. Матвеев, Г. В. Геликонов, Современные тенденции в многофункциональной оптической когерентной томографии. II. Метод корреляционной стабильности в ОКТ-эластографии и методы визуализации кровотока, Изв. ВУЗов Радиофизика т.57, с.231, 2014.

2. V.Y. Zaitsev, L.A. Matveev, A.L. Matveyev, G.V. Gelikonov, and V.M. Gelikonov, A model for simulating speckle-pattern evolution based on close to reality procedures used in spectral-domain OCT, Laser Phys. Lett. v.11, 105601, 2014.

3. L.A. Matveev, V.Yu. Zaitsev, G.V. Gelikonov, A.L. Matveyev, A.A. Moiseev, S.Yu. Ksenofontov, V.M. Gelikonov, V. Demidov and A. Vitkin, Scan-pattern and signal processing for microvascular visualization with complex SD-OCT: tissue-motion artifacts, robustness, and decorrelation time - blood vessel characteristics, Abstracts of 4. 4. Saratov Fall Meeting-2014, Section Biophysics, <http://sfm.eventry.org/report/1059>

L.A. Matveev, V.Yu. Zaitsev, G.V. Gelikonov, A.L. Matveyev, A.A. Moiseev, S.Y. Ksenofontov, V.M. Gelikonov, V. Demidov, A. Vitkin, Novel OCT-based approach to microvasculature visualization using reference-free processing of complex-valued B-scans, Opt.Lett. (submitted).

3.5. Разработан квантрон на композитном элементе Yb:YAG/YAG, изготовленном при помощи метода термодиффузионной сварки кристаллов граната, позволяющего создавать композитные элементы высокой механической прочности без рассеяния излучения на контактах. За счет ослабления влияния усиленного спонтанного излучения и нелинейного тепловыделения при непрерывной накачке достигнута запасенная энергия 400 мДж и усиление по слабому сигналу 1,25. На основе квантрона создан высокоэффективный дисковый лазер мощностью 300 Вт и КПД 30%.

Авторы: Кузнецов И.И., Мухин И.Б., Перевезенцев Е.А., Вадимова О.Л., Палашов О.В.

Аннотация Важнейшей проблемой, ограничивающей масштабирование дисковых Yb:YAG лазеров является паразитный эффект усиленного спонтанного излучения (УСИ), связанный с большим коэффициентом усиления в диске вдоль радиальной координаты. Как известно, влияние УСИ существенно возрастает из-за «запирания» излучения люминесценции в лазерном кристалле, связанного с эффектом полного внутреннего отражения от торцов кристалла, что приводит к уменьшению усиления в активном элементе (АЭ) и ограничению увеличения запасенной энергии путем увеличения диаметра накачки. Эффективным способом существенно ослабить влияние УСИ является создание композитного АЭ Yb:YAG/YAG, состоящего из тонкого диска из Yb:YAG и толстого диска из недопированного YAG. В таком АЭ отсутствует полное внутреннее отражение на одном из торцов кристалла Yb:YAG и люминесценция свободно покидает допированную область. Крепление двух дисков Yb:YAG и YAG торцевыми сторонами осуществляется при помощи оригинальной технологии термодиффузионной сварки, включающей химическую обработку поверхностей кристаллов и нагрев композита до температуры близкой к температуре плавления. Показано, что в композитном АЭ также существенно ослабляется эффект нелинейного тепловыделения, появляющийся в тонких Yb:YAG дисках при высокой плотности инвертированных состояний. Высказано предположение о том, что причиной нелинейного тепловыделения является поглощение УСИ. Применение композитной геометрии позволит ослаблять нагрев АЭ при использовании кристаллов Yb:YAG с более высоким уровнем допирования.

На основе изготовленных композитных АЭ разработан дисковый лазерный квантрон, включающий высокоэффективную систему водяного охлаждения АЭ и оптическую многопроходную схему заведения накачки. За счет ослабления влияния эффектов усиленного спонтанного излучения и нелинейного тепловыделения достигнуто высокое усиление по слабому сигналу (1.25) при высокой запасенной энергии (400 мДж). В тонких Yb:YAG дисках при такой запасенной энергии усиление не превышает величину 1.15. На базе разработанного лазерного квантрона создан высокоэффективный непрерывный дисковый лазер мощностью 300 Вт и КПД 30%.

Публикации

1. Mukhin I.B, Perevezentsev E.A., Palashov O.V., “Fabrication of composite laser elements by a new thermal diffusion bonding method”, Optical Materials Express, Vol. 4, Issue 2, pp. 266-271 (2014), DOI:10.1364/OME.4.000266.
2. Kuznetsov I.I., Mukhin I.B., Silin D.E.; Vyatkin A.G.; Vadimova O.L.; Palashov O.V., “Thermal Effects in end-pumped Yb:YAG thin-disk and Yb:YAG/YAG composite active element”, IEEE J. of Quantum Electronics, Vol. 50, Issue 3, pp. 133–140 (2014), DOI: 10.1109/JQE.2013.2297743.
3. Кузнецов и др., «Высокоэффективный дисковый лазер на основе композитного Yb:YAG/YAG активного элемента», отправлено в «Квантовую электронику».

4. Kuznetsov, I. B. Mukhin, O. L. Vadimova, O. V. Palashov “Thin-disk multipass amplifier with composite Yb:YAG/YAG active element”, ASSL-2014, Shanghai, AM5A.38.

3.6. Предложено использовать керамику в качестве магнитоактивного элемента в изоляторах Фарадея. Показано, что керамики по термооптическим характеристикам сопоставимы с монокристаллом тербий-галлиевого граната и значительно превосходят магнитооптические стекла, что позволяет создавать на их основе широкоапертурные устройства, для которых нет кристаллических элементов необходимого размера. Разработаны различные виды изоляторов из керамик тербий-галлиевого граната и тербий-алюминиевого граната. Устройства обеспечивают степень изоляции 30 дБ при киловаттном уровне мощности лазерного излучения.

Авторы: А.В. Старобор, И.Л. Снетков, Д. С. Железнов, О.В. Палашов (ИПФ РАН), R. Yasuhara (National Institutes of Natural Sciences, National Institute for Fusion Science, Japan), Shengming Zhou (Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, China).

Аннотация. Увеличение мощности лазерных установок приводит к росту требований к характеристикам оптических элементов. В частности требуется увеличение диаметров элементов и снижение негативных эффектов связанных с тепловым самовоздействием лазерного излучения. Оптическая керамика сочетает преимущества стекол (практически неограниченный размер) и монокристаллов (высокая теплопроводность и др). Изолятор Фарадея (ИФ) это устройство предназначенное для того чтобы пропускать линейно поляризованный свет в одном направлении и не пропускать в обратном. Тем самым могут быть экранированы мощные усилители, что предупреждает их самовозбуждение, потери запасенной энергии и т.д. Однако, ИФ подвержены негативным тепловым эффектам возникающим из-за теплового самовоздействия мощного излучения в их магнитооптических элементах. В результате этих эффектов снижается степень изоляции устройства и ухудшаются характеристики проходящего излучения.

На сегодняшний день для мощных ИФ кристаллы тербий-галлиевого граната (TGG) являются практически безальтернативными, однако их апертура ограничена 30-40 мм, что делает невозможным создание широкоапертурных устройств. Нами было предложено создание ИФ на основе магнитоактивных керамик и проведено исследование керамики TGG, производства Коношима (Япония) и допированного церием тербий-алюминиевого граната (Ce:TAG), производства SIOM (Китай). Измерена постоянная Верде сред в диапазоне температур 300-80К, показано, что у керамики TGG она равна постоянной Верде кристалла TGG, у TAG и у Ce:TAG больше при комнатной температуре на 20% и 40% соответственно и на 36% и 65% при азотной. Исследованы термооптические характеристики материалов: тепловая линза, термонаведенная деполяризация в зависимости от мощности лазерного излучения и температуры. Показано, что по термонаведенной деполяризации и оптической силе термонаведенной линзы керамика TGG не уступает монокристаллу TGG. Керамики Ce:TAG и TAG выигрывают по термодеполяризации у кристалла TGG в 2.1 раза и 3.5 раза соответственно, но уступают в возникающей тепловой линзе в 2.5 и 1.2 раза соответственно.

Разработаны различные виды изоляторов Фарадея. Устройство, выполненное по схеме компенсации деполяризации на TGG керамике показало степень изоляции 35 дБ при 740 Вт лазерной мощности, что по оценкам соответствует 30дБ при мощности 1.8 кВт. Аналогичное устройство на Ce:TAG керамике показало степень изоляции 40 дБ при 300 Вт лазерной мощности, что по оценкам соответствует 30дБ при мощности 2.2 кВт. Таким образом, можно констатировать, что изготовленные керамики по термооптическим характеристикам сопоставимы с монокристаллом TGG и значительно превосходят магнитооптические стекла, что позволяет создавать на их основе широкоапертурные устройства, в которых невозможно использование кристаллических элементов.

Публикации

1. Dmitry Zheleznov, Aleksey Starobor, Oleg Palashov, Chong Chen, and Shengming Zhou, «High-power Faraday isolators based on TAG ceramics», *Optics Express*, Vol. 22, Issue 3, pp. 2578-2583 (2014).
2. Snetkov, I. L., Yasuhara, R., Starobor, A. V., & Palashov, O. V., «TGG ceramics based Faraday isolator with external compensation of thermally induced depolarization». *Optics Express*, 22(4), 4144 (2014), doi:10.1364/OE.22.004144
3. Zheleznov, D., Starobor, A., Palashov, O., Lin, H., & Zhou, S. Improving characteristics of Faraday isolators based on TAG ceramics by cerium doping. *Optics Letters*, 39(7), 2183–6 (2014).
4. Starobor Alexey, Yasuhara Ryo, Zheleznov Dmitry, Palashov Oleg, Khazanov Efim. “Cryogenic Faraday Isolator Based of TGG ceramics” // *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Volume: 50 , Issue: 9, pp 748 – 754 (2014).
5. A. Starobor, D. Zheleznov, O. Palashov, C. Chen, S. Zhou, and R. Yasuhara, "Study of the properties and prospects of Ce:TAG and TGG magneto-optical ceramics for optical isolators for lasers with high average power," *Opt. Mater. Express* 4, 2127-2132 (2014).

3.7. Разработаны объективные критерии для автоматического распознавания патологических состояний биотканей различных локализаций на диагностических изображениях оптической когерентной томографии (ОКТ), основанные на статистическом анализе спекл-структуры. Предложенный подход показал высокую эффективность для дифференциации нормальных и патологических состояний слизистых оболочек, полученных при ОКТ-лапароскопии. Для дифференциации изображений, полученных методом кросс-поляризационной ОКТ был дополнительно предложен новый параметр – интегральный фактор деполяризации, характеризующий, в частности, наличие упорядоченных коллагеновых структур в исследуемых биотканях.

Авторы: Кириллин М.Ю., Сергеева Е.А., Шахова Н.М., Гладкова Н.Д., Виткин А. (ИПФ РАН, НижГМА)

Аннотация. В последнее десятилетие метод оптической когерентной томографии (ОКТ) начал активно применяться в клинической практике. Наиболее широко метод ОКТ применяется в офтальмологии, что обусловлено относительно слабым рассеянием тканей глаза, и диагностическое ОКТ-изображение отражает морфологическую структуру глаза. Однако, при применении ОКТ для диагностики других биотканей, таких как кожа и слизистые оболочки, при интерпретации получаемых ОКТ-изображений необходимо учитывать многократное рассеяние зондирующего излучения в биотканях, что в конечном счете влияет на ОКТ-изображения. Другой проблемой остается субъективизм при оценке полученного ОКТ-изображения клиницистом.

В связи с указанными обстоятельствами актуальным является развитие алгоритмов объективизации диагностических ОКТ-изображений, к которым можно отнести и алгоритмы распознавания патологий, основанные на численной обработке изображений. При разработке таких алгоритмов важным является учет особенностей формирования ОКТ-изображения, что может, в частности, быть реализовано путем анализа ОКТ-изображений, полученных путем численного моделирования для объектов с заданными физическими и оптическими характеристиками.

В рамках настоящей работы были разработаны алгоритмы для распознавания патологий на основании диагностических ОКТ-изображений биотканей, полученных как с помощью традиционной, так и с помощью кросс-поляризационной модификаций метода ОКТ. Алгоритм для традиционной модификации ОКТ основан на анализе гистограммы ОКТ-изображения или его участка. На примере экспериментальных и смоделированных

методом Монте-Карло ОКТ-изображений калиброванных фантомов (суспензий полистереновых микросфер) было показано, аппроксимация гистограммы участка изображения функцией гамма-распределения является чувствительной к оптическим характеристикам образца. Это открывает возможности использования параметров аппроксимирующей функции гамма-распределения для характеристики ОКТ-изображения. Анализ гистограмм также использован для разработки критериев распознавания патологий (фиброза и отека) на диагностических ОКТ-изображениях маточных труб. Применение разработанного алгоритма позволило повысить диагностическую точность метода с 88% до 96%.

Применительно к методу кросс-поляризационной ОКТ был предложен новый параметр для характеристики ОКТ-изображения – интегральный фактор деполяризации, характеризующий, в частности, наличие упорядоченных коллагеновых структур в исследуемых биотканях. Вычисление параметра основано на усреднении отношения сигналов в ортогональной и прямой поляризациях на усредненных по поперечной координате А-сканах ОКТ. Было показано, что предложенный параметр чувствителен к патологиям, сопровождающимся изменениями в содержании и структуре пучков коллагеновых волокон в биотканях. В частности, была показана его эффективность при диагностике атеросклеротической бляшки, фиброза и неоплазии мочевого пузыря (диагностическая точность – 79 и 75% соответственно), а также диагностике рецидива рака на постоперационном рубце мочевого пузыря (диагностическая точность – 97%).

Публикации

1. M.Yu. Kirillin, G. Farhat, E.A. Sergeeva, M.C. Kolios, and A. Vitkin “Speckle statistics in OCT images: Monte Carlo simulations and experimental studies”, *Optics Letters*, 39(12), 3472-3475 (2014)
2. Е.В. Губарькова, М.Ю. Кириллин, Е.А. Сергеева, Киселева Е.Б., Снопина Л. Б., Проданец Н.Н., Шарабрин Е.Г., Шахов Е.Б., Немирова С.В., Гладкова Н.Д., “Кросс-поляризационная оптическая когерентная томография в оценке структуры атеросклеротической бляшки”, *Современные технологии в медицине*, 5(4), 24-34 (2013)
3. Пантелеева О.Г., Зиновьев А.Н., Юнусова К.Э., Кириллин М.Ю. и Шахова Н.М. “Диагностические возможности оптической интроскопии в выявлении причин нарушения репродуктивного здоровья женщин”, *Российский вестник акушера-гинеколога*, 5, 53-57 (2013).
4. M. Kirillin, O. Panteleeva, E. Yunusova, E. Donchenko, and N. Shakhova “Criteria for pathology recognition in OCT of fallopian tubes“, *Journal of Biomedical Optics*, 17, 081413 (2012).

3.8. Предложено использовать сверхтонкие (менее 1мм) пластиковые образцы для многокаскадного временного сжатия петаваттных импульсов до длительностей в несколько периодов осцилляций светового поля. Перспективность данного подхода подтверждена результатами численного моделирования, а также результатами экспериментов по измерению линейных и нелинейных свойств пластика. Экспериментально продемонстрировано, что на образцах полиэтилентерефталата не наблюдается повреждений от воздействия более 100 лазерных импульсов с характерной для излучения петаваттных лазеров интенсивностью несколько единиц ТВт/см²; при этом спектр лазерных импульсов уширился также как и в стеклянных элементах.

Авторы: Миронов С.Ю., Гинзбург В.Н., Гачева Е.И., Силин Д.Е., Кочетков А.А., Мамаев Ю.А., Шайкин А.А., Хазанов Е.А, Сергеев А.М., G. Mourou (ИПФ РАН)

Аннотация. Благодаря изобретению техники усиления chirpiруемых импульсов (CPA) [1] были созданы лазерные системы с пиковой мощностью выходного излучения превышающей 1 ПВт [2]. Как правило, в подобных лазерных комплексах энергия в импульсе достигает десятков джоулей, а длительность составляет десятки фемтосекунд. Для ряда задач, например получения атто- и зептосекундных импульсов, необходимо использование мощных оптических импульсов с длительностью в несколько периодов осцилляций светового поля. В настоящее время создание подобных источников является нерешенной фундаментальной задачей. Один из возможных подходов к ее решению, основан на использовании эффекта самомодуляции фазы, возникающего в результате распространения сверхмощного излучения через среду с кубической нелинейностью. Нелинейная фаза или В-интеграл вносят спектральную фазовую модуляцию и уширяют спектр сверхмощного излучения. Использование внешних корректоров фазы спектра, например chirpiрующих зеркал, позволяет сократить длительность импульса. В последнее время выполнены экспериментальные исследования по временному сжатию импульсов с пиковой интенсивностью превышающей $1\text{ТВт}/\text{см}^2$, в которых достигнуто двукратное сокращение длительности с 40 фс до 20 фс [4]. Отметим, что указанный уровень пиковой интенсивности соответствует интенсивности нефокусированного излучения петаваттного уровня мощности. Применение аналогичного подхода для реализации временного сжатия у сверхмощных лазерных импульсов требует использования большеапертурных (более 100 мм) тонких (менее 1 мм) оптических элементов работающих на просвет, что является сложной технологической задачей.

В настоящей работе рассмотрена возможность применения пластиковых образцов полиэтилентерефталата для уширения спектра оптических импульсов. Выполнены экспериментальные исследования его линейных и нелинейных свойств. Показано, что коэффициент пропускания однородный в инфракрасной области спектра, а его значение составляет около 90%. Показатель преломления для длины волны 633 нм равен 1.573. Среднеквадратичное отклонение оптической толщины пластикового образца на апертуре 250 мм составляет 0.73 мкм, а на апертуре 100 мм 0.3 мкм. Полиэтилентерефталат вносит деполяризацию, значения которой зависят от ориентации образца по отношению к входной поляризации. Максимальный уровень деполяризации не превышает 7%, а минимальный не более 0.02%. Экспериментально продемонстрировано, что на образцах полиэтилентерефталата не наблюдается повреждений от воздействия более 100 лазерных импульсов с интенсивностью несколько единиц $\text{ТВт}/\text{см}^2$; при этом спектр лазерных импульсов уширяется также как и в стеклянных элементах. Значения кубической нелинейности примерно в два раза превышают значения для плавленого кварца, и составляет $5 \cdot 10^{-7} \text{см}^4/\text{ГВт}$. Использование пластиковых образцов открывает возможность реализации в эксперименте многокаскадного последовательного временного сжатия петаваттных импульсов до длительностей в несколько периодов осцилляций светового поля. С использованием трехмерного численного моделирования продемонстрировано сокращение длительности петаваттных лазерных импульсов с 27 Дж/27 фс до 7 фс на первой стадии сжатия, и с 7 фс до 2 фс на второй при толщинах пластика 0.5 мм и 0.1 мм соответственно [5].

1. Strickland D. and Mourou G., Compression of Amplified Chirped Optical Pulses, *Opt. Commun.* 56, 219-221 (1985).

2. А.В. Коржиманов, А.А. Гоносков, Е.А. Хазанов, А.М. Сергеев, Горизонты петаваттных лазерных комплексов, УФН, **181**, 9-32 (2011).

3. Mironov S.Y., Lassonde P., Kieffer J.-C., Khazanov E.A., and Mourou G.A., Quasi-uniform recompression of intense femtosecond 3D Gaussian optical pulses, *Eur. Phys. J. Special Topics* **223**, 1175-1180 (2014).

4. Mourou G., Mironov S.Y., Khazanov E.A., Mironov S.Y., and Sergeev A. M., Single cycle thin film compressor opening the door to Zeptosecond-Exawatt physics, *Eur. Phys. J. Special Topics* **223**, 1181-1188 (2014).

Публикации

1. G. Mourou, S. Mironov, E. Khazanov and A. Sergeev “Single cycle thin film compressor opening the door to Zeptosecond-Exawatt physics”, Eur. Phys. J. Special Topics, 223 6 (2014), 1181-1188.

2. S. Mironov, E. Gacheva, V. Ginzburg, D. Silin, A. Kochetkov, Yu. Mamaev, A. Shaykin, E. Khazanov, G. Mourou, “Use of polyethylene terephthalate for temporal recompression of intense femtosecond laser pulses”, Laser Physics Letters, submitted (2014).

3.9. Впервые теоретически и экспериментально изучена синхронизация высших порядков в системе осцилляторов с импульсными запаздывающими связями. Построены зоны синхронизации в пространстве параметров. Ширина зон зависит линейно от силы связи и периодически от времени запаздывания. Показано, что синхронизация возможна при сколь угодно больших величинах задержки, что было подтверждено экспериментально вплоть до сотен периодов собственных колебаний. Установлено, что в определенных интервалах задержек может сосуществовать несколько различных устойчивых режимов синхронизации одного порядка. Данный эффект является новым и ранее в теории синхронизации описан не был. Изучение влияния запаздывающих связей на режимы синхронизации высших порядков имеет большое значение для понимания процессов в нейронных сетях мозга и физических системах, в которых возникает задача синхронизации импульсов.

Авторы: Клиньшов В.В., Щапин Д.С., Некоркин В. И.

Аннотация. Проведено теоретическое и экспериментальное исследование синхронизации высших порядков двух импульсных генераторов с запаздывающими связями. Синхронизацией порядка $m:n$ называется периодический режим, при котором за один период первый осциллятор генерирует n , а второй осциллятор m импульсов. В теоретической части для описания взаимодействия осцилляторов используется фазовое описание и концепция кривых переустановки фазы. Была изучена динамика системы в случае слабой связи, построено отображение Пуанкаре, описывающее динамику фазового сдвига между осцилляторами. Режимы синхронизации соответствуют устойчивым неподвижным точкам данного отображения. Были получены условия существования таких режимов и найдены зоны синхронизации $m:n$ в пространстве параметров. На границах зон синхронизации устойчивое периодическое решение исчезает через седло-узловую бифуркацию.

Показано, что ширина зон зависит линейно от силы связи и периодически от времени запаздывания. Следствием периодической зависимости от величины запаздывания является возможность наблюдения синхронизации при сколь угодно большом запаздывании. В экспериментальной части работы было проведено исследование двух электронных автогенераторов ФитцХью-Нагумо, обменивающихся импульсными сигналами через линии задержки. Построены экспериментальные бифуркационные диаграммы и зоны синхронизации 1:1, 2:1, 3:1, 4:1, 3:2, 4:3 на плоскостях параметров задержка – отношение частот и задержка – сила связи. Показано, что экспериментальные зоны синхронизации достаточно хорошо согласуются с теоретическими. Обнаружено, что в определенных интервалах величин запаздывания может сосуществовать несколько различных устойчивых режимов синхронизации одного порядка. При квазистатическом изменении величины запаздывания переключение между режимами имеет гистерезисный характер. Данный эффект связан с существованием двух или более устойчивых периодических решений. При изменении параметра одно из этих решений может исчезать через седло-узловую бифуркацию, что сопровождается скачкообразным переключением системы на другое решение.

Публикации

1. V. V. Klinshov, D. S. Shchapin, and V. I. Nekorkin, Cross-frequency synchronization of oscillators with time-delayed coupling, *Physical Review E* v.90, 042923 (2014).

2. V.V. Klinshov, Cross-frequency synchronization of delay-coupled oscillators. International conference XXXIV Dynamics Days Europe, 8-12 September 2014, Bayreuth, Germany.

3.10. Для модульных нейронных сетей, т.е. пространственно обособленных взаимодействующих подсетей, которые характеризуются высокой плотностью связей внутри модулей и редкими связями между ними, установлено существование синхронных режимов усредненной активности – синфазного и противофазного. Каждый из узлов сети демонстрирует стохастическую спайковую активность, а топология внутримодульных связей обладает свойством так называемого «малого мира». В отсутствие межмодульных связей каждый модуль демонстрирует нерегулярную активность в виде спайков, возникающих в случайные моменты времени. Показана возможность управления синхронными режимами всей сети за счет изменения межмодульного запаздывания. С помощью такого управления установлено: (а) чередование синфазного и противофазного режимов межмодульной синхронизации; (б) существование режима бистабильности; (в) изменение частоты колебаний усредненной модульной активности.

Авторы: Масленников О.В., Некоркин В.И.

Аннотация. Модульные нейронные сети – это пространственно обособленные взаимодействующие подсети, которые характеризуются высокой плотностью связей внутри модулей и редкими связями между ними. Такие структуры обнаружены в кортикальных сетях головного мозга, а также возникают при определенных условиях в диссоциированных нейронных культурах *in vitro*. В работе рассмотрены модели двухмодульных нейронных сетей взаимодействующих нейронов, которые генерируют нерегулярные последовательности спайков – коротких импульсов большой амплитуды. Внутри отдельного модуля нейроны связаны направленными соединениями посредством возбуждающих (~80 % от общего числа связей) и подавляющих (~20%) химических синапсов. Топология соединений внутри модуля организована по типу «малый мир»; межмодульные связи – это случайные направленные возбуждающие связи с запаздыванием. Топология «малый мир» возникает в регулярной сети с периодическими граничными условиями, в которой с определенной вероятностью (~10%) связи случайным образом перестраиваются (алгоритм Уотса-Строгаца). В отсутствие межмодульных связей нейроны генерируют стохастические спайковые последовательности, а усредненная по модулю активность представляет собой нерегулярные колебания. При включении межмодульного взаимодействия, начиная с некоторого порогового значения силы межмодульных связей, усредненная активность двух модулей представляет собой синфазные бёрстовые колебания. С появлением и дальнейшим увеличением межмодульного запаздывания в сети происходит чередование двух режимов усредненной модульной активности – синфазного и противофазного, на границах между которыми возникает режим бистабильности. Кроме этого, средняя частота бёрстов модульной активности в пределах каждого из этих режимов уменьшается с ростом запаздывания. Таким образом, запаздывание межмодульных связей производит управление режимами синхронной активности всей модульной сети.

Публикации

1. O.V. Maslennikov, V.I. Nekorkin. Modular networks with delayed coupling: synchronization and frequency control. // Phys. Rev. E. 2014. Vol. 90, Issue 1, 012901.
2. O.V. Maslennikov, V.I. Nekorkin. Collective dynamics of spiking neural networks with modular structure and delayed coupling. // Доклад на международном симпозиуме “Topical problems of nonlinear wave physics”, Н. Новгород – Саратов – Н. Новгород, 2014 г.
3. O.V. Maslennikov, D.V. Kasatkin, V.I. Nekorkin. Synchronization and control in modular networks of spiking neurons. // Доклад на международном симпозиуме “ISCS 2014: Interdisciplinary Symposium on Complex Systems”, Флоренция, Италия, 2014.

3.11. Осуществлены первые количественные исследования спектра одной из важнейших атмосферных молекул - димера воды - в условиях, соответствующих атмосферным, что позволило существенно продвинуться в понимании природы атмосферного континуума. Спектр поглощения димера наблюдался в водяном паре и в воздухе при различных температурах, давлениях и влажностях. Полученные экспериментальные данные позволили уточнить значения основных термодинамических и спектроскопических констант димера, важных для создания физически обоснованной модели распространения излучения в атмосфере, необходимой для точных расчетов радиационного баланса Земли и прогнозирования климата, а так же разработать модель вращательного спектра димера, обосновывающую возможность прямого радиометрического наблюдения и анализа димерного поглощения в атмосфере Земли с помощью современных приёмных комплексов.

Авторы: М.Ю. Третьяков, М.А. Кошелев, А.Ф. Крупнов, Т.А. Одинцова
Е.А. Серов, В.В. Парши

Аннотация. Связанный с влажностью атмосферный континуум дает значительно больший вклад в радиационный баланс Земли, чем большинство газов, традиционно считающихся парниковыми. Дискуссии о природе континуума начались с момента его обнаружения в начале прошлого века и не прекращаются до наших дней. Гипотеза С.А. Жевакина о том, что континуум водяного пара обусловлен димерами воды после полувековых значительных усилий многих экспериментаторов многих стран мира была, наконец, подтверждена нами в 2012 году, когда в миллиметровом спектре водяного пара в условиях близких к атмосферным на грани чувствительности наилучшего в своем классе спектрометра была обнаружена последовательность пиков однозначно интерпретируемая, как принадлежащая димерам [1]. Эта работа подтвердила факт наличия димеров в теплом водяном паре и продемонстрировала возможность проведения количественных исследований его спектра в атмосферных условиях. Из нее также следовало, что более оптимальным для количественного изучения спектра димера является следующее, более высокочастотное микроокно прозрачности атмосферы, что и подтвердилось экспериментальными исследованиями в диапазоне частот 188-258 ГГц в условиях, соответствующих атмосферным температурам и давлениям. В зарегистрированных спектрах отчетливо наблюдается квазиэквидистантная последовательность из шести пиков, каждый из которых соответствует слившимся линиям вращательного спектра димера [3]. Наблюдающаяся серия является продолжением серии, обнаруженной на более низких частотах [1]. Достигнутое в экспериментах отношение сигнала к шуму позволило проследить эволюцию спектра чистого водяного пара при разбавлении его воздухом до давления 540 торр.

Спектр димера настолько сложный и густой, что обычные спектроскопические методы для его анализа не годятся. Для извлечения количественной информации из

полученных экспериментальных данных разработана модель спектра димера, представляющая собой сумму лоренцевых контуров и квадратично растущую с частотой «подставку». Показано, что в диапазоне частот 60-350 ГГц модель (с 10-ю эмпирическими параметрами) хорошо описывает результаты *ab initio* расчетов спектра димера в широком интервале температур и влажностей, характерных для атмосферы. Для количественного анализа спектров в модели имеется три варьируемых параметра – амплитуда, связанная с количеством димеров, ширина димерного пика, связанная с его однородным и неоднородным уширением и амплитуда квадратичной с частотой функции, характеризующей вклад в континуальное поглощение других механизмов, не связанных со стабильными димерами воды. Моделирование яркостной температуры атмосферы с учетом полученных данных показывает, что чувствительность современных радиометров, достаточна для наблюдения димерных пиков непосредственно в атмосфере [2].

Анализ полученных спектров позволил определить константу димеризации, энергию диссоциации водородной связи в димере, а так же спектральные характеристики димера, включающие средний параметр столкновительного уширения линий димера давлением водяного пара и воздуха. Проанализирован вклад в наблюдаемое поглощение метастабильных состояний димера и свободных пар молекул воды.

Известно, что континуум является результатом парных столкновительных взаимодействий молекул. Полученные нами данные позволили впервые построить диаграмму относительных вкладов различных парных состояний молекул водяного пара во второй вириальный коэффициент уравнения состояния в широком интервале атмосферных температур. Таким образом, в результате проделанной работы достигнуто существенное продвижение в понимании природы атмосферного континуума [3,4].

Публикации

1. M.Yu. Tretyakov, E.A. Serov, M.A. Koshelev, V.V. Parshin, A.F. Krupnov, Observation of the rotationally resolved spectrum of the water dimer at room temperature, *Phys. Rev. Letters*, 110, 093001 (2013).

2. T.A. Odintsova, M.Yu. Tretyakov, A.F. Krupnov, C. Leforestier, The water dimer millimeter-wave spectrum at ambient conditions: A simple model for practical applications, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* 140, 75–80 (2014).

3. E.A. Serov, M.A. Koshelev, T.A. Odintsova, V.V. Parshin, M.Yu. Tretyakov. Rotationally resolved water dimer spectra in atmospheric air and pure water vapour in the 188 - 258 GHz range. *Physical Chemistry Chemical Physics* (2014), принята к публикации.

4. М.Ю. Третьяков, М.А. Кошелев, Е.А. Серов, В.В. Паршин, Т.А. Одинцова, Г.М. Бубнов. Димер воды и атмосферный континуум. *Усп. Физ. Наук. (Обз. акт. пробл.)*, 2014, принята к публикации.

3.12. Продемонстрирована возможность создания синтезатора мм/субмм-диапазона на основе первичного источника излучения, стабилизированного по гребенке частот фемтосекундного лазера. Осуществлено пошаговое цифровое управление частотой излучения с неразрывной фазой при переключениях и запись отклика резонатора Фабри-Перо с характерной шириной 60 кГц, что сравнимо с шириной субдоплеровских профилей молекулярных линий. Спектральная чистота синтезатора выше спектральной чистоты, обеспечиваемой источником, стабилизированным по гармонике прецизионного микроволнового синтезатора частоты. Полученный результат имеет значение для развития методов высокоточной субтерагерцовой спектроскопии.

Авторы: Д.С. Макаров, М.Ю. Третьяков, А.П. Шкаев, А.М. Киселев, А.Н. Степанов, В.В. Паршин

Аннотация. Прецизионные измерения в оптическом и инфракрасном диапазонах волн с помощью частотно-стабилизированных лазерных гребенок широко известны. В настоящее время гребенки используются для стабилизации частоты источников излучения оптического, инфракрасного и ТГц-диапазонов, создания источников ТГц-излучения малой мощности и высокоточных анализаторов спектра. Потребность распространения лазерных методов в диапазон миллиметровых и субмиллиметровых (мм/субмм) волн обусловлена, прежде всего, уникальной спектральной чистотой компонент лазерной гребенки, достигающей в лучших экспериментах субмиллигерцового уровня.

Лабораторный макет синтезатора мм/субмм диапазона был сконструирован на основе разработанного ранее принципа фазовой стабилизации частоты излучения первичного источника по спектральным составляющим высокостабильной гребенки опорных частот, создаваемой излучением фемтосекундного лазера. В качестве первичного источника в синтезаторе использовалась серийная лампа обратной волны (типа ОВ-71) и гребенка опорных частот, создаваемая излучением Ti:Sa лазера с длительностью импульсов ~50 фс. Частота повторения импульсов (~92 МГц) стабилизировалась с помощью системы ФАПЧ по стандарту частоты и времени. Сигнал управления в полосе 0-250 Гц подавался на пьезокерамическое кольцо, корректировавшее изменение длины резонатора лазера.

Перенос лазерной гребенки в мм/субмм диапазон (оптико-терагерцовая конверсия) осуществлена на серийном планарном СВЧ диоде Шоттки. Излучение лазера фокусировалось на полупроводник (GaAs) в контактной области диода, приводя к возникновению фотоиндуцированных пикосекундных импульсов тока носителей, спектр которых образует гребенку опорных частот вплоть до 1 ТГц. На этот же диод принималось излучение ЛОВ. Стабилизированная частота ЛОВ $f_{ЛОВ}$ в разработанном синтезаторе определяется через частоту n -й компоненты гребенки $nf_{имп}$ ($f_{имп}$ – частота повторения импульсов) как $f_{ЛОВ} = nf_{имп} \pm f_{ПЧ}$, где $f_{ПЧ}$ – промежуточная частота, задаваемая высокоточным синтезатором (величина $f_{ПЧ}$ может составлять несколько десятков мегагерц и не должна превышать половину от $f_{имп}$, в данной работе использовался синтезатор PTS x10B3O2AE). Управление частотой синтезатора в конечном итоге осуществляется через управление синтезатором промежуточной частоты и, при необходимости, переключением привязки к следующей компоненте гребенки фемтосекундного лазера.

Для демонстрации работы синтезатор был использован в качестве источника излучения в резонаторном спектрометре на базе резонатора Фабри-Перо. Форма резонансного отклика резонатора Фабри-Перо вблизи собственной частоты представляет собой профиль Лоренца, ширина которого определяется однопроходными потерями мощности излучения в резонаторе. Для резонатора, использовавшегося в данной работе, характерная ширина резонансного профиля составляет 60 кГц. Отклик резонатора работает как частотный дискриминатор: фазовые шумы излучения источника на склонах профиля преобразуются в шумы принятого со спектрометра сигнала, что позволяет оценить спектральную чистоту источника, использованного для записи профиля.

Для сравнения синтезатора, стабилизированного по оптической гребенке, с источником, стабилизированным по гармонике микроволнового синтезатора Agilent E8257D, оба источника были использованы для записи одного и того же резонансного профиля в резонаторном спектрометре. С использованием каждого из источников было получено большое количество записей. Анализ записанных профилей показал, что излучение синтезатора, стабилизированного по оптической гребенке, имеет заметно более узкий спектр по сравнению с источником, стабилизированным по гармонике микроволнового синтезатора.

Подобный синтезатор ММ/СубММ-диапазона, стабилизированный по оптической гребенке фемтосекундного лазера, может применяться для решения задач прецизионной

субдоплеровской спектроскопии, дистанционного зондирования атмосферы и поверхности Земли, радиолокации, спутниковой навигации и других задач.

Публикации

1. D. S. Makarov, M. Yu. Tretyakov, A. P. Shkaev, A. M. Kiselev, A. N. Stepanov, and V. V. Parshin, "Femtosecond laser comb based subterahertz synthesizer", Applied Physics Letters 105, 063502 (2014).