

Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова

ФИЗИКА, ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Тезисы докладов конференции

Всероссийская с международным участием
молодежная научно-практическая конференция
(22–30 апреля 2024 г., Ярославль)



Ярославль
ЯрГУ
2025

УДК 53(063)
ББК В3я43
Ф50

Организатор конференции:
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова.

Редакционная коллегия:
А. Я. Пархоменко – канд. физ.-мат. наук, ЯрГУ;
А. С. Гвоздарёв – канд. физ.-мат. наук, ЯрГУ.

Рецензенты:
И. С. Огнев – канд. физ.-мат. наук, ЯрГУ;
А. Я. Пархоменко – канд. физ.-мат. наук, ЯрГУ;
А. С. Гвоздарёв – канд. физ.-мат. наук, ЯрГУ.

Физика, техника и технология сложных систем : тезисы
Ф50 докладов конференции / под ред. : А. Я. Пархоменко, А. С. Гвоздарёва;
Яросл. гос. ун-т им. П. Г. Демидова. – Ярославль : ЯрГУ, 2025. – 154 с.
– (Всероссийская с международным участием молодежная научно-
практическая конференция ФТТСС-2024, 22–30 апреля 2024 г.,
Ярославль).

ISBN 978-5-8397-1252-2

В сборнике представлены тезисы докладов Всероссийской с международным участием молодежной научно-практической конференции «Физика, техника и технология сложных систем», проходившей 22–30 апреля 2024 года на базе физико-технического факультета ЯрГУ (г. Ярославль). Программа конференции включала работу следующих секций: «Путь в науку для школьников», «Прикладная физика, микроэлектроника и нанотехнологии», «Теоретическая физика», «Радиофизика», «Радиотехнические системы», «Системы машинного обучения, технического зрения и робототехники», «Инфокоммуникации и сети связи». Докладчики из научных организаций и университетов Ярославля представили результаты исследований по различным аспектам развития теоретических и экспериментальных подходов в физике и прикладных областях. Издание может быть полезно научным сотрудникам, преподавателям, аспирантам, студентам и всем, кто интересуется актуальным состоянием развития физики и её инженерных приложений.

УДК 53(063)
ББК В3я43

ISBN 978-5-8397-1252-2

© ЯрГУ, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ «ПРИКЛАДНАЯ ФИЗИКА, МИКРОЭЛЕКТРОНИКА И НАНОТЕХНОЛОГИИ»

Модификация поверхности пленок $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ различных составов ионами аргона с энергией 140 эВ Белов Я. Д.	9
Оптические показатели стекла: показатель преломления и дисперсия Гридасов И. А., Мулин М. А.	11
Комбинированный резистивно-емкостной МЭМС-переключатель для передовых систем связи Морозов М. О.	13
Электрическое дипольное поглощение цилиндрической частицей с граничными условиями Соффера Рубец В. С.	15
Электропроводность неметаллических проводящих материалов на примере графита Рыбаков Д. И., Кононенко А. В.	17
Киральные метаповерхности на основе массивов наноспиралей, получаемые методом наклонного напыления Титов Д. Р.	19
Расчёт электропроводности тонкого проводящего слоя в продольном магнитном поле с учётом анизотропного закона дисперсии Чураев Н. С.	21
Квантовый транспорт 2D электронного газа на границе гетероперехода Юганов В. А.	23

СЕКЦИЯ «ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА»

Точные динамические решения уравнения Шрёдингера Антипаева О. А.	25
Теория нейтринных осцилляций Бадурина О. А.	27
Рождение пар заряженных лептонов на перспективных линейных коллайдерах Власов М. А.	29

Распады прелестных адронов с рождением чармониевых пентакварков Вороненко М. М.	31
Электрослабые процессы во внешнем магнитном поле Гарасев М. Р.	33
Эффекты в низкоразмерных магнитных системах, индуцированные кривизной пространства Головкин В. В.	35
Энергия связи дважды тяжелых тетракварков в приближении Борна- Оппенгеймера Золотов А. В.	37
Динамические конфигурации неабелевых калибровочных полей Зуев Д. В.	39
Квантовая механика в мнимом времени Клюкин Д. Н.	41
Эволюция двойной звездной системы Ковалева А. Е.	43
Приближение для функции распределения нейтрино во внутренней части сверхновой Коптяева Е. А.	45
Генерация магнитного поля нейтринным потоком Корнева В. А.	47
Стерильные нейтрино: теоретические основания и возможности экспериментальной регистрации Кузьмицкий Д. И.	49
Дифференциальное сечение комптон-эффекта в виде распределений по энергиям и по углам вылета конечных электронов в произвольной системе отсчёта Лозина Е. В.	51
Переходные формфакторы в полуплептонном распаде $B^0 \rightarrow \phi \ell^+ \ell^-$ Панченко И. М.	53
Тройной альфа-процесс и резонанс Хойла Румянцев Т. Д.	55

Процесс $\gamma \rightarrow e^+e^-$ в пределах сильного магнитного поля и большого динамического параметра Сабитов А. А.	57
Затухание квантованной электромагнитной волны в замагниченной плазме Соков Д. В.	59
Динамика тяжелого дикварка в дважды тяжелом барионе Худова А. С.	61
Массовые поправки в КХД правилах сумм для B_s -мезонов Шухтина А. К.	63
Дисперсия фотонов и ее влияние на переходы в системе из фотона и аксиона Юрченков Р. А.	65

СЕКЦИЯ «РАДИОФИЗИКА»

Анализ вариантов проволочной многодиапазонной антенны Белов В. А.	67
Разработка модели рассеяния ЭМ волны на интеллектуальной рассеивающей поверхности Боков М. А.	69
Исследование поведения вероятности битовой ошибки в условиях многолучевого канала, описываемого моделью Ломакса Веселков А. А.	71
Анализ влияния корреляции антенных элементов на энергетическую эффективность массивных ММО систем с низкоразрядными ЦАП Гомулин К. В.	73
Компактная многополосная антенна для автомобильной связи Демидовский В. С.	75
Анализ влияния параметров канала F-Накагами на вероятность битовой ошибки Ермаков И. Д.	77
Обзор решений по созданию музыкальных инструментов «Терменвокс» Кравченко Е. А.	79

Нелинейные поверхностные потенциальные волны в глубокой жидкости	
Лапшина К. Ю.	81
Анализ качества функционирования энергетического обнаружителя в условиях канала с замираниями, подчиняющегося модели Ломакса	
Манахов Р. Ю.	83
Исследование влияния параметров модели канала типа F-Накагами на характеристики энергетического обнаружения сигнала	
Мозжухин С. О.	85
Анализ влияния случайного смещения элементов антенной решетки на ее корреляционные свойства	
Назаренко Б. Э.	87
Анализ излучения линейной антенной решётки с нелинейной зависимостью расстояния элементов от центра	
Панов И. А.	89
Избранные аспекты разработки защищенного программно-аппаратного комплекса беспроводной передачи информации	
Рыжиков А. Р.	91
Периодические возмущения в стратифицированном океане	
Трифорова У. О.	93
Анализ эффективности самодельной насадки на USB Wi-Fi адаптер	
Шитов М. С.	95

СЕКЦИЯ «РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ»

Тренировочный комплекс применения специальных радиотехнических систем	
Бедняков Р. И., Кустов К. О.	97
Особенности наведения зенитных управляемых ракет методом пропорционального сближения	
Будучин Р. С.	99
Система синхронизации для беспилотного роя	
Быков К. С.	101

Методика оценки характеристик рассеяния простых отражателей при зондировании широкополосных сигналов Денисова Н. А.	103
Формализация процесса оперативного восстановления пивоваренного оборудования Зюзин Г. М., Чернышов А. С.	105
Особенности наведения зенитных управляемых ракет методом пропорционального сближения Кизилев Р. Д., Медведев А. В.	107
Разработка тренажно-имитационной модели «проверка и регулировка основных параметров передающего устройства» Лавриченко П. А.	109
Оценка нормальных ускорений при наведении зенитной управляемой ракеты методом «трёх точек» на гиперзвуковые цели Лыжин З. В.	111
Метод оценки локальной траектории маловысотного БЛА и однозначное определение координат контрастных объектов по данным матричного зондирования бортовой РЛС Михайлова В. Л.	113
Фоновая радиолокация для повышения скрытности работы РЛС Силва Ж. Б. О., Олим Ж. С. Ф.	115
Экспериментальное исследование характеристик плоской спиральной антенны Уткин Д. А.	117
Анализ качества траекторной информации в радиолокаторе на основе многообзорного наблюдения Фариа С. В. А.	119
Способ повышения дальности обнаружения цели радиолокационной станцией с фазированной антенной решеткой с пространственным возбуждением в условиях воздействия активных шумовых помех Фатеев С. А.	121
Демонстрационно-обучающая модель статического преобразователя частоты переменного напряжения и результаты её использования в учебном процессе Хухрин Л. А.	123

СЕКЦИЯ «СИСТЕМЫ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ, ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ И РОБОТОТЕХНИКИ»

Нейросетевые технологии в задаче автоматического распознавания
видов модуляции

Савин С. А., Усков Н. А., Соколова Д. Д. 125

Применение трансферного обучения в задаче детектирования шумов
сердца на фонокардиограммах

Смирнова Т. А. 127

Исследование нейросетевого алгоритма в задачах распознавания
фазовых видов модуляции

Усков Н. А., Савин С. А. 129

Сверточные нейронные сети в задаче автоматического распознавания
вида цифровой модуляции

Ушакова А. М. 131

СЕКЦИЯ «ПУТЬ В НАУКУ ДЛЯ ШКОЛЬНИКОВ»

Электропроводность газов при низком давлении

Билан Е. А. 133

Модель паросиловой установки на водородном топливе

Глудзов А. Д. 135

Стробоскопический эффект

Гусаков В. К. 141

Тайна самой горячей планеты

Игнатова М. А. 143

Загадка водной поверхности

Платонова А. А. 148

Физика движения мяча в настольном теннисе

Ягодин А. С. 152

ГРНТИ 29.27.51

**МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПЛЕНОК $Pb_{1-x}Sn_xTe$
РАЗЛИЧНЫХ СОСТАВОВ ИОНАМИ АРГОНА С ЭНЕРГИЕЙ 140 ЭВ**

Я. Д. БЕЛОВ

*Научные руководители – зав. лаб. И. И. Амиров, с. н. с. С. П. Зимин
Ярославский Филиал Физико-технологического института имени К. А. Валиева
Российской академии наук, Ярославль, Россия
yadbelov@gmail.com*

Аннотация. Обсуждены модификация поверхности пленок теллурида свинца-олова и формирование ансамблей вертикальных наноконусов на поверхности при обработке ионами аргона с энергией 140 эВ для времен 60 и 120 с.

Ключевые слова: теллурид свинца-олова, эпитаксиальные пленки, ионно-плазменная обработка, наноструктуры, наноконусы.

В наших предыдущих работах была изучена морфология поверхности эпитаксиальных пленок $Pb_{1-x}Sn_xTe$ после плазменной обработки ионами аргона с энергиями 25 эВ [1], 75 эВ и 200 эВ [2]. Результаты данных исследований свидетельствуют о многообразии типов формирующихся наноструктур, архитектура которых во многом определяется температурными условиями на поверхности образцов в процессе ионно-плазменной обработки. Целью работы являлось изучение процессов формирования ансамблей вертикальных наноконусов на поверхности монокристаллических пленок $Pb_{1-x}Sn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) при ионно-плазменной обработке в аргоновой плазме при энергии ионов 140 эВ для времен обработки 60 и 120 с.

Монокристаллические пленки тройного твердого раствора $Pb_{1-x}Sn_xTe$ с ориентацией (111) толщиной 1–2 мкм были выращены на поверхности (111) методом молекулярно-лучевой эпитаксии на установке Riber 32 P (INPE, Brazil) [3]. Скорость роста варьировалась в пределах 1.31–1.56 Å/с для составов от 0 до 1. Поверхность пленок обрабатывали в индуктивно связанной аргоновой высокоплотной плазме низкого давления (13.56 МГц, 800 Вт) Расход аргона равнялся 20 см³/мин (при нормальных условиях), давление $P = 0.15$ Па.

После обработки в плазме ионов аргона с энергией 140 эВ в течение 60 с образуются наноконусы только для состава $x = 0.6$. Для других составов появляется шероховатость поверхности. При более длительном

времени обработки (120 с) на всем интервале составов образуются наноконусы, которые отличаются плотностью и размерами (рис.1).

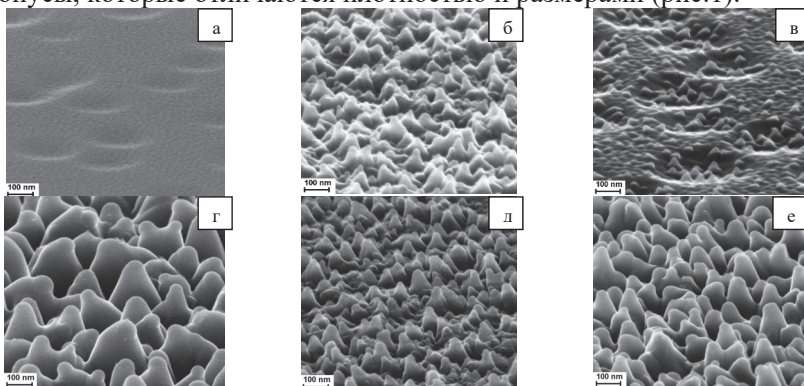


Рисунок 1– Модификация поверхности $Pb_{1-x}Sn_xTe$ после распыления в плазме Ar с энергией ионов 140 эВ в течение 60 с (а-в) и 120 с (г-е) при составах $x = 0.4, 0.6, 1$

В ходе работы было показано, что формирование наноконусов происходит по механизму ПЖК с параллельными процессами плазменного распыления и начинается при $x=0.6$ в согласии с диаграммой состояний сплава Pb-Sn.

Литература

1. Zimin S. P., Gorlachev E. S., Amirov I. I., Naumov V. V., Juskenas R., Skapas M., Abramof E., Rappl P. H. O. // *Semicond. Sci. Technol.* 2019. Vol. 34.P. 095001.
2. Зимин С. П., Амиров И. И., Наумов В. В., Белов Я.Д., Abramof E., Rappl P. H. O. // *Поверхность. рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования.* 2022. № 10. С. 66–74.
3. Rappl P. H. O., Closs H., Ferreira S. O., Abramof E., Boschetti C., Motisuke P., Ueta A. Y., Bandeira I. N. // *Cryst. Growth.* 1998. Vol. 191. P. 466.

Modification of the surface of $Pb_{1-x}Sn_xTe$ films of various compositions with argon ions with an energy of 140 eV

Y. D. BELOV

*Supervisors – Head of Laboratory I. I. Amirov, Senior Researcher S. P. Zimin
Valiev Institute of Physics and Technology of Russian Academy of Sciences, Yaroslavl
Branch, Yaroslavl, Russia*

Abstract. The modification of the surface of lead-tin telluride films and the formation of ensembles of vertical nanocones on the surface upon treatment with argon ions with an energy of 140 eV for times of 60 and 120 s are discussed.

Keywords: lead-tin telluride, epitaxial films, ion-plasma processing, nanostructures, nanocones.

ОПТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ СТЕКЛА: ПОКАЗАТЕЛЬ ПРЕЛОМЛЕНИЯ И ДИСПЕРСИЯ

И. А. ГРТДАСОВ, М. А. МУЛИН

*Научный руководитель – доц. М. Г. Волкова
Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны,
Ярославль, Россия
marinavlk@mail.ru*

Аннотация. Проанализировано деление оптических стекол на флинт и кроны. Экспериментально исследована зависимость показателя преломления различных стекол от длины волны падающего излучения. Рассчитаны коэффициенты зависимости дисперсии для флинтов и кронов.

Ключевые слова: показатель преломления, дисперсия, оптическое стекло

Теоретические сведения. Каждое оптическое стекло имеет свою плотность, свое значение скорости распространения света в этой среде и свой показатель преломления. Оптические стекла, в зависимости от сочетания значений показателя преломления и дисперсии, делят на две большие группы: кроны и флинты. Для группы **кронов** характерны сравнительно низкий показатель преломления. Пределы изменения свойств для группы кронов ограничены значениями показателя преломления от 1,47 до 1,67. **Флинты** отличаются высокими значениями показателя преломления - от 1,52 до 1,9 и выше [1, с. 16].

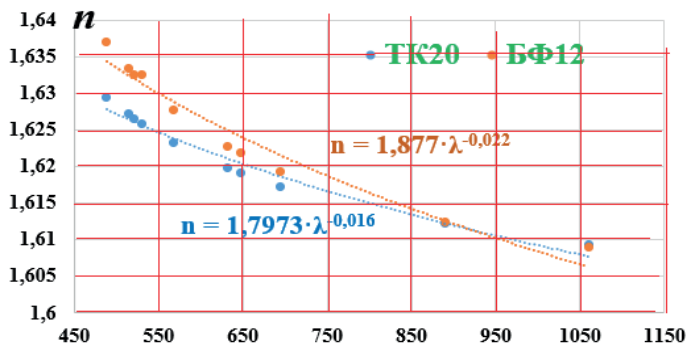


Рисунок 1 – Показатель преломления флинта и кроны от длины волны (нм)

Экспериментальная работа. Исследуя зависимость показателя преломления различных стекол от длины волны, было установлено, что показатель преломления для флинтов меняется быстрее чем для кронов, например, флинт БТ12 и кроны ТК20 (рис. 1).

Дисперсия характеризует изменение преломляющей способности вещества при изменении длины волны электромагнитного излучения. Эта зависимость достаточно сложна и не существует точного выражения, ее определяющего. Поэтому для нужд практики пользуются эмпирическими формулами [2, с. 32]. Одна из экспериментально проверенных зависимостей представлена на рис. 2.

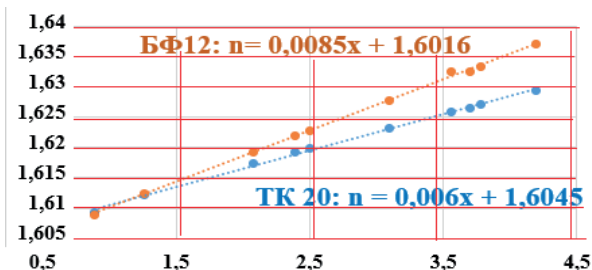


Рисунок 2 – Зависимости показателя преломления $n=f(\lambda^{-2})$

Заключение и выводы:

Проанализирована (графически) зависимость показателя преломления стекла от длины волны видимой части спектра (для разных типов стекол). Флинты имеют несколько больший показатель преломления и очень большую дисперсию, чем кроны. Проанализирована эмпирическая зависимость и определены постоянные для ТК20 и БФ12 в зависимости $n=f(\lambda^{-2})$. Планируется исследование зависимости угла отклонения луча (для разной длины волны) от преломляющего угла призмы.

Литература

1. Артюхина Н. К. Теория и расчет оптических систем: учебник для студентов специальности 1-38 01 02 «Опτικο-электронные и лазерные приборы и системы» / Н. К. Артюхина. Минск : БНТУ, 2020. 257 с.
2. Михеенко А. В. Поляризация, дисперсия и поглощение света: учеб. пособие / А. В. Михеенко. Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2016. 88 с.

Optical performance of glass: refractive index and dispersion

I. A. GRIDASOV, N. A. MULIN

Supervisor – Associate Professor M. G. Volkova

Yaroslavl Higher Military School of Air Defense, Yaroslavl, Russia

Abstract. The division of optical glasses into flints and crowns is analyzed. The dependence of the refractive index of various glasses on the wavelength of incident radiation has been experimentally investigated. Coefficients of the dispersion dependence for flints and crowns are calculated

Keywords: refractive index, dispersion, optical glass

**КОМБИНИРОВАННЫЙ РЕЗИСТИВНО-ЕМКОСТНОЙ МЭМС-
ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬ ДЛЯ ПЕРЕДОВЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ**
М. О. МОРОЗОВ

*Научный руководитель – с. н. с., доц. И. В. Уваров
Ярославский Филиал Физико-технологического института им. К. А. Валиева РАН,
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова,
Ярославль, Россия
matvey19991@mail.ru*

Аннотация. Основной характеристикой МЭМС-переключателя является отношение емкостей в замкнутом и разомкнутом состоянии. В стандартных изделиях это отношение обычно не превышает 10 и может быть увеличено за счет использования электрода с плавающим потенциалом. В работе исследуется зависимость емкостных характеристик, изоляции и вносимых потерь ключа с «плавающим» электродом от свойств материала подложки.

Ключевые слова: МЭМС переключатель, отношение емкостей, плавающий потенциал.

В последние десятилетия наблюдается интенсивное развитие беспроводной связи. Прогресс в этой отрасли требует создания перспективных коммутационных элементов, обладающих малым энергопотреблением и временем срабатывания в сочетании с высокой изоляцией и минимальными вносимыми потерями на частотах более 3 ГГц. В качестве таких элементов рассматриваются МЭМС-переключатели с емкостным контактом. Основной характеристикой МЭМС-ключа является отношение емкостей в замкнутом и разомкнутом состоянии C_{on}/C_{off} . В изделиях стандартной конфигурации оно составляет около 10, не обеспечивая требуемый эффект переключения. В настоящей работе представлен ключ, оснащенный электродом с плавающим потенциалом.

Переключатель схематично изображен на рисунке 1. Принцип его работы подробно изложен ранее [1]. Модель переключателя представляет собой фрагмент подложки размерами 9600х4300х460 мкм и показана на рисунке 2. Методом конечных элементов рассчитано отношение емкостей, вносимые потери и изоляция переключателей, изготовленных на различных подложках (рисунок 3 и 4). Увеличение удельного сопротивления подложки снижает C_{on} и C_{off} за счет уменьшения паразитной емкости и увеличивает C_{on}/C_{off} . Для подложки из высокоомного кремния отношение емкостей не

Работа выполнена в рамках государственного задания ФТИАН им. К.А. Валиева РАН Минобрнауки РФ по теме № FFNN-2022-0017 при финансовой поддержке гранта Фонда содействия инновациям №18ГУЭС18/91354.

превышает 7.4, в то время как для сапфира и боросиликатного стекла удастся добиться значений 27.7 и 46.1, соответственно. Все подложки обеспечивают приемлемую изоляцию менее 1 дБ и вносимые потери более 15 дБ, однако отличаются рабочим диапазоном частот. Переключатель, изготовленный на стекле, имеет диапазон 1–12 ГГц, на сапфире – 1–10 ГГц, на кремнии – 1–9 ГГц.

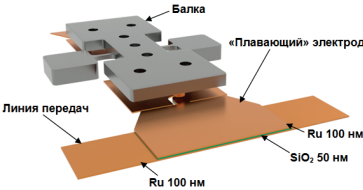


Рисунок 1 – Схематичное изображение переключателя

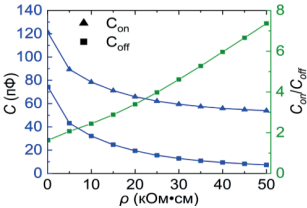


Рисунок 3 – Зависимость емкостных характеристик от удельного сопротивления подложки

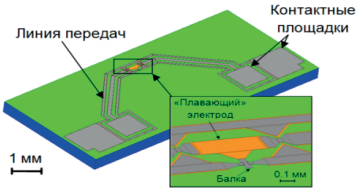


Рисунок 2 – Модель чипа

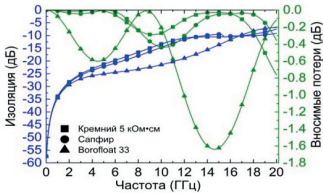


Рисунок 4 – Зависимость изоляции и вносимых потерь от частоты коммутируемого сигнала

Литература

1. Morozov M. O., Uvarov I. V. Performance Calculation for a MEMS Switch with a Floating Electrode // Russian Microelectronics. 2023. Vol. 52, № 6. P. 493–503.

Combined resistive-capacitive MEMS-switch for advanced communication systems

M. O. MOROZOV

*Supervisor – Senior Researcher, Associate Professor I. V. Uvarov
Valiev Institute of Physics and Technology of Russian Academy of Sciences,
P. G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia*

Abstract. The main characteristic of a MEMS switch is the ratio of capacitances in the open and closed states. In conventional switches, this ratio usually does not exceed ten and can be increased by using a floating potential electrode. The dependence of the capacitive characteristics, isolation and insertion loss of a switch with the «floating» electrode on the substrate material is investigated.

Keywords: MEMS-switch, capacitance ratio, floating potential.

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ДИПОЛЬНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЧАСТИЦЫ С ГРАНИЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ СОФФЕРА

В. С. РУБЕЦ

*Научный руководитель – доц. Д. Н. Романов
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова,
Ярославль, Россия
romanov.yar357@mail.ru*

Аннотация. В рамках кинетического подхода проведен расчет сечения поглощения цилиндрической частицы с использованием модели Соффера для функции распределения. Рассмотрен случай анизотропной изоэнергетической поверхности проводника, имеющей форму трехосного эллипсоида, одна из осей которого параллельна оси трубы.

Ключевые слова: кинетическое уравнение, функция распределения, цилиндрическая частица, сечение поглощения, модель Соффера.

Рассматривается проводящая неоднородная цилиндрическая частица длиной L . Частица состоит из непроводящего ядра радиусом R_1 , окружённого проводящей оболочки радиуса R_2 . Частица находится в поле плоской электромагнитной волны, направление электрического поля которой совпадает с осью цилиндра (ось Z).

Введём безразмерные величины:

$$k_{\perp} = \frac{m_{\perp}}{m_0}, \quad m_0 = \sqrt[3]{m_{\perp}^2 m_{\parallel}}, \quad K = \frac{R_1}{R_2}, \quad x_0 = \frac{R_2}{\lambda}, \quad y_0 = \frac{\omega R_2}{v_1}, \quad F = \frac{\tilde{\sigma}}{\tilde{\sigma}_0},$$

где $k_{\perp}$ - безразмерная поперечная эффективная масса, x_0 - безразмерный радиус проволоки, λ - длина свободного пробега электронов в частице, y_0 - безразмерная частота, ω - циклическая частота падающей на частицу электромагнитной волны, v_1 - средняя тепловая скорость электронов, F - безразмерное сечение поглощения, $\tilde{\sigma}$ и $\tilde{\sigma}_0$ - сечения поглощения цилиндрической частицы с учётом и без учёта влияния границ.

На рис. 1 представлена зависимость безразмерного сечения поглощения F от коэффициентов зеркальности в случае модели Фукса $q_{1,2} = q_1 = q_2$ и от параметров шероховатости $g_{1,2} = g_1 = g_2$ в случае модели Соффера поверхностей частицы. Наибольшее различие между расчетами наблюдается в диапазоне значений параметров шероховатости $g_{1,2} = 0.2 - 0.4$ ($q_{1,2} = 0.6 - 0.8$). С увеличением вклада зеркального рассеяния носителей заряда будет расти средняя скорость этих носителей, и как вследствие, электропроводность. В случае зеркальной поверхности $g_{1,2} = g_1 = g_2 = 0$ различие между кривыми для вырожденного и невырожденного случаев исчезает, так как наблюдается переход к классической проводимости. Это объясняется тем, что зеркальная поверхность не оказывает влияния на функцию распределения носителей заряда. Высокочастотный ток внутри слоя с

зеркально отражающими границами удовлетворяет локальному закону Ома при любом соотношении между толщиной слоя и длиной свободного пробега.

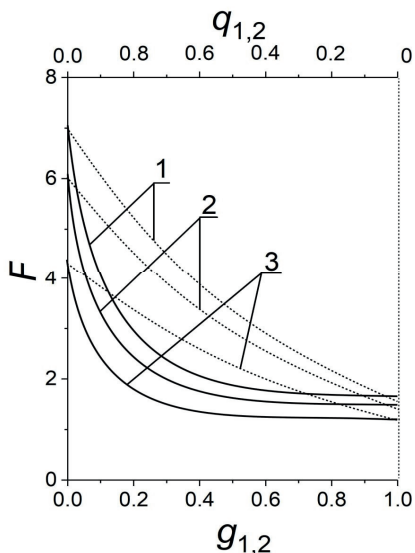


Рисунок 1 – Зависимость безразмерного сечения поглощения F от параметра шероховатости $g_{1,2} = g_1 = g_2$ и коэффициента зеркальности $q_{1,2} = q_1 = q_2$ при $x_0 = y_0 = 0.1$, $K = 0.5$. Кривые 1 – $k_{\perp} = 1.5$; кривые 2 – $k_{\perp} = 1$; кривые 3 – $k_{\perp} = 0.5$

Electric dipole absorption by a cylindrical particle with Soffer boundary conditions

V. S. RUBETS

Supervisor – Associate Professor D. N. Romanov

P.G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia

Abstract. Within the framework of the kinetic approach, the absorption cross section of a cylindrical particle is calculated using the Soffer model for the distribution function. The case of an anisotropic isoenergetic surface of a conductor having the shape of a triaxial ellipsoid, one of the axes of which is parallel to the axis of the tube, is considered.

Keywords: kinetic equation, distribution function, cylindrical particle, absorption cross section, Soffer model.

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРОВОДЯЩИХ МАТЕРИАЛОВ НА ПРИМЕРЕ ГРАФИТА

Д. И. РЫБАКОВ, А. В. КОНОНЕНКО

*Научный руководитель – доц. М. Г. Волкова
Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны,
Ярославль, Россия
marinavlk@mail.ru*

Аннотация. Экспериментально определен коэффициент, характеризующий быстроту изменения удельного сопротивления грифеля карандаша при изменении твердости. Сделан вывод об изменении быстроты изменения удельного сопротивления при переходе к наиболее твердым грифелям.

Ключевые слова: удельное сопротивление, грифель, степень твердости, проводимость

Гипотеза. Поскольку мягкость грифеля карандаша определяется степенью его очистки от примесей, т.е. чем больше степень твердости, тем будет больше его удельное сопротивление.

Решение задачи. Для исследования мы использовали набор чернографитных карандашей Малевиച്ച് "GrafArt", 8 штук разной степени твердости (8B, 6B, 4B, 2B, B, HB, H, 2H). Все карандаши имели одинаковую длину (0,2 м) и одинаковую площадь поперечного сечения (12 мм^2), что упрощало расчет удельного сопротивления грифелей по определенному значению электрического сопротивления каждого грифеля. Определение сопротивления проводилось двумя способами: прямым измерением с помощью омметра и косвенным, путем определения показаний амперметра и вольтметра. Для определения сопротивления с помощью омметра было проведено три измерения, а для определения сопротивления косвенным методом было проведено по 20 измерений для каждого типа грифеля.

Сопоставление результатов обоих измерений показало достаточно высокую точность измерений и небольшой процент погрешности. Так, для сопротивления относительная погрешность составила от 0,16% до 2,98%. Полученные значения удельного сопротивления в целом сопоставимы с электропроводностью графита и некоторых его соединений включения.

Результаты и выводы. Анализ результатов исследования позволил нам сделать ряд выводов:

- 1) Гипотеза о прямой зависимости удельного сопротивления от твердости подтверждена.
- 2) Выявлена резкая смена быстроты изменения удельного сопротивления от степени твердости при переходе границы HB (рис.1).

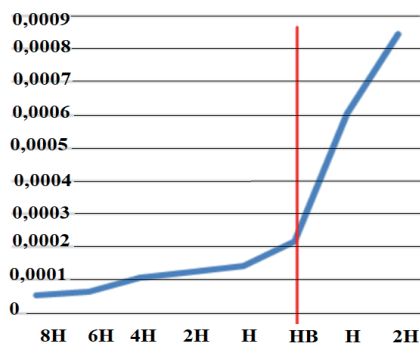


Рисунок 1 – Зависимость удельного сопротивления (Ом·м) грифеля от степени твердости

3) Рассчитан коэффициент быстроты изменения удельного сопротивления грифеля при изменении степени твердости для мягких $tg\alpha_m = 0,000025$ (Ом·м/ст. тв.) и твердых $tg\alpha_t = 0,00026$ (Ом·м/ст. тв.) грифелей соответственно. Установлено, что для грифелей повышенной твердости удельное сопротивление с увеличением степени твердости растет практически в 10 раз быстрее, чем у грифелей с пониженной твердостью.

4) Среднее значение удельного сопротивления вполне соответствует удельному сопротивлению проводника с примесями. Полученные результаты были сопоставлены с техническими характеристиками «паспорта карандашей» фирмы Малевич "GrafArt" и полностью им соответствуют.

Литература

1. Усачёв А. Е. Методы расчета электрических полей: учеб. пособие / А. Е. Усачёв. Казань : Казан. гос. энерг. ун-т, 2013. 111 с.
2. Демирчян К. С. Теоретические основы электротехники: В 3-х т. Учебник для вузов. Т. 3. / К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин, В. Л. Чечурин. СПб. : Питер, 2003. С. 56.

Electrical conductivity of non-metallic conductive materials on the example of graphite

D. I. RYBAKOV, A. V. KONONENKO

Supervisor – Associate Professor M. G. Volkova

Yaroslavl Higher Military School of Air Defense, Yaroslavl, Russia

Abstract. The coefficient characterizing the speed of change in the resistivity of a pencil lead with a change in hardness has been experimentally determined. The conclusion is made about the change in the rate of change in resistivity during the transition to the hardest lead.

Keywords: resistivity, lead, degree of hardness, conductivity

КИРАЛЬНЫЕ МЕТАПОВЕРХНОСТИ НА ОСНОВЕ МАССИВОВ НАНОСПИРАЛЕЙ, ПОЛУЧАЕМЫЕ МЕТОДОМ НАКЛОННОГО НАПЫЛЕНИЯ

Д. Р. ТИТОВ

*Научный руководитель – доц. О. С. Трушин
Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова,
Ярославль, Россия
titovdaniil88@gmail.com*

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований киральных пленочных структур на основе массивов кобальтовых наноспиралей, получаемых методом наклонного напыления. Показано, что в условиях электронно-лучевого испарения на вращающуюся наклонную подложку формируется массив наноспиралей, закрученных в одну сторону.

Ключевые слова: киральные метаматериалы, наноспираль, циркулярный дихроизм.

Создание метаматериалов с уникальными оптическими характеристиками позволяет исследовать фундаментальные механизмы взаимодействия света с веществом [1]. Особый интерес представляют киральные пленочные структуры, поскольку они по-разному взаимодействуют с право- и лево-циркулярно поляризованным светом.

В данной работе были созданы образцы из кобальта на стеклянных подложках при помощи наклонного напыления с вращением подложки (GLAD) [2]. Метод заключается в формировании массивов наноспиралей в условиях электронно-лучевого испарения на наклонную подложку за счет эффекта затенения. Условия напыления следующие: вакуум: 0.004 Па; напряжение электронного луча 8 кВ; ток 0.5 А, наклон подложек 80°, время осаждения 5 минут. Были напылены 4 образца при различных скоростях вращения подложки вокруг собственной оси: 0.3, 0.6, 1.6 и 30 об/мин соответственно. Изображения образцов, полученные на РЭМ Supra-40, приведены на рис. 1.

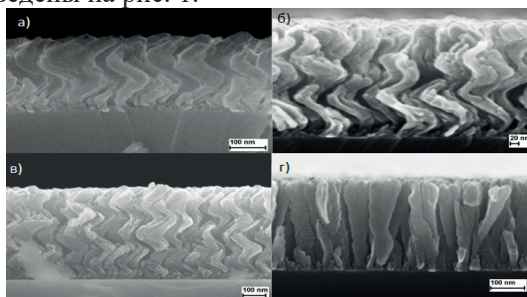


Рисунок 1 - образцы, напыленные с различными скоростями:
а) 0.3 об/мин, б) 0.6 об/мин, в) 1.6 об/мин, г) 30 об/мин

Из данных изображений следует, что, варьируя скорости вращения подложки во время напыления образцов, можно манипулировать их геометрией. Так, например, образцы 1-3 демонстрируют спирали с различным шагом, а 4 образец представляет из себя уже массив столбиков.

Образцы 1, 2 и 3 были исследованы методом эллипсометрии на отражение при угле падения 65° . На рис. 2 продемонстрированы степени поляризации левых и правых волн для данных образцов.

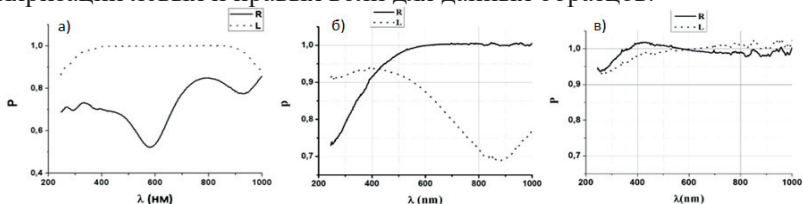


Рисунок 2 - степени поляризации левых и правых волн для данных образцов: а) 0.3 об/мин, б) 0.6 об/мин, в) 1.6 об/мин

Из полученных данных следует, что образцы, представляющие из себя массивы наноспиралей, по-разному взаимодействуют с циркулярно поляризованным светом и демонстрируют циркулярный дихроизм.

Таким образом, данные структуры из-за своих оптических свойств могут найти свое применение в МЭМС, различных датчиках света и поляризаторах.

Литература

1. Gibbs J. G., Mark A. G., Eslami S., Fischer P. Plasmonic nanohelix metamaterials with tailorable giant circular dichroism // Appl. Phys. Lett. 2013. Vol. 103. P. 213101.
2. Hawkeye M. M. Glancing Angle Deposition of Thin Films. / M. M. Hawkeye, M. T. Taschuk, M. J. Brett. John Wiley & Sons. 2014. 320 p.

Chiral metasurfaces based on nanospiral arrays produced by oblique spraying method

D. R. TITOV

Supervisor – Associate Professor O. S. Trushin

P. G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia

Abstract. The results of experimental studies of chiral film structures based on arrays of cobalt nanospirals obtained by inclined deposition are presented. It has been demonstrated that, under conditions of electron beam evaporation, an array of nanospirals twisted in one direction is formed on a rotating inclined substrate.

Keywords: chiral metamaterials, nanospirals, circular dichroism.

РАСЧЁТ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ТОНКОГО ПРОВОДЯЩЕГО СЛОЯ В ПРОДОЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ С УЧЁТОМ АНИЗОТРОПНОГО ЗАКОНА ДИСПЕРСИИ

Н. С. ЧУРАЕВ

*Научный руководитель – проф. И. А. Кузнецова
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова,
Ярославль, Россия
kuz@uniyar.ac.ru*

Аннотация. Построена теоретическая модель электропроводности тонкой проводящей пленки. В качестве граничных условий для функции распределения носителей заряда используется модель диффузно-зеркальных граничных условий. Для нахождения функции распределения носителей заряда используется кинетический подход.

Ключевые слова: тонкая плёнка, кинетическое уравнение, модель Фукса, изоэнергетическая поверхность, продольное магнитное поле.

Рассмотрим тонкую плёнку, лежащую в плоскости XOY . Материалом плёнки является проводник. Под проводником понимается металл или полупроводник с произвольной степенью вырождения. Толщина плёнки a много больше длины волны де Бройля носителя заряда, движущегося со средней скоростью, что позволяет пренебречь квантовыми размерными эффектами. Вдоль оси X направлено магнитное поле с индукцией $\mathbf{B}$ и электрического поле с напряжённостью $\mathbf{E}$. Плёнка находится в вакууме или расположена между двумя изолирующими слоями, не пропускающими ток через границы плёнки. Электрическое поле является однородным и испытывает гармонические колебания с частотой ω .

Пусть у проводника изоэнергетическая поверхность имеет форму трёхосного эллипсоида. Такая форма поверхности есть у Si, Ge, Bi и других материалов. Пусть полуоси эллипсоида лежат вдоль импульсных осей.

Введём безразмерные параметры:

$$m_0 = \sqrt[3]{m_1 m_2 m_3}, \quad k_{m1} = m_1/m_0, \quad k_{m2} = m_2/m_0, \quad k_{m3} = m_3/m_0, \\ a_0 = a/\lambda, \quad \omega_0 = \lambda\omega/v_1, \quad \beta_0 = \lambda eB/(m_0 v_1),$$

где m_0 – эффективная масса плотности состояний; k_{m1} , k_{m2} и k_{m3} – безразмерные эффективные массы вдоль осей p_x , p_y и p_z соответственно; v_1 – средняя тепловая скорость электронов; a_0 – безразмерная толщина плёнки; λ – длина свободного пробега электронов (дырок); ω_0 – безразмерная частота внешнего электрического поля; β_0 – безразмерная индукция магнитного поля.

На рис. 1 изображена зависимость модуля безразмерной электропроводности от безразмерной эффективной массы k_{m2} вдоль оси

p_y при различных значениях магнитной индукции. С ростом индукции магнитного поля уменьшается длина траектории носителей заряда, что приводит к меньшей вероятности рассеяния на границах плёнки.

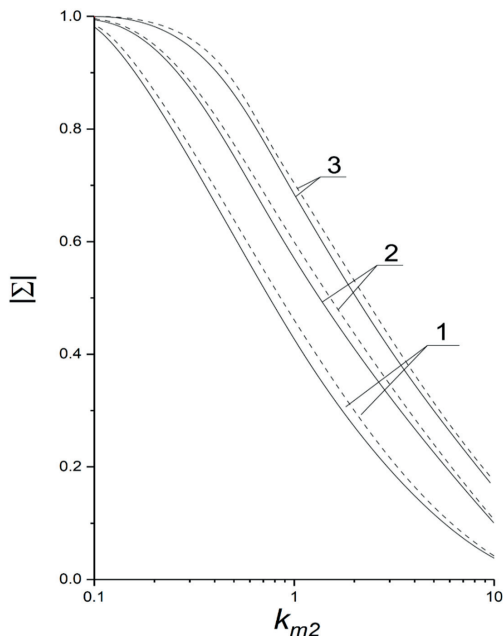


Рисунок 1 – Зависимость $|\Sigma|$ в вырожденном случае (сплошные линии) и в невырожденном случае (пунктирные линии) от безразмерной эффективной массы k_{m2} при $k_{m1} = 1$, $a_0 = 0.1$, $\omega_0 = 0.1$, $q_1 = q_2 = 0.2$. Кривые 1, 2, 3 получены при $\beta_0 = 10, 20, 30$ соответственно

Calculation of the electrical conductivity of a thin conductive layer in a longitudinal magnetic field taking into account the anisotropic law of dispersion

N. S. CHURAEV

Supervisor – Professor I. A. Kuznetsova

P. G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia

Abstract. A theoretical model of the electrical conductivity of a thin conductive film is constructed. The model of diffuse-mirror boundary conditions is used as boundary conditions for the charge carrier distribution function. A kinetic approach is used to find the charge carrier distribution function.

Keywords: thin film, kinetic equation, Fuchs model, isoenergetic surface, longitudinal magnetic field.

КВАНТОВЫЙ ТРАНСПОРТ 2D ЭЛЕКТРОННОГО ГАЗА НА ГРАНИЦЕ ГЕТЕРОПЕРЕХОДА

В. А. ЮГАНОВ

*Научный руководитель – доц. Д. Н. Романов
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова,
Ярославль, Россия
romanov.yar357@mail.ru*

Аннотация. Получено аналитическое выражение интегральной электропроводности полупроводникового нанослоя, носители заряда которого находятся в треугольной квантовой яме. Изоэнергетическая поверхность материала полупроводника имеет форму трёхосного эллипсоида. Поведение носителей заряда описывается квантовым уравнением Лиувилля. Влияние поверхностного рассеяния носителей заряда учитывается через граничные условия Фукса.

Ключевые слова: полупроводниковый нанослой, уравнение Лиувилля, модель Фукса, проводимость, треугольная квантовая яма.

Рассмотрим гетероструктуру, которая характерна для транзисторов с высокой подвижностью электронов (HEMT). На затвор подано напряжение V_g , которое изменяет поперечную напряжённость E_g . Между истоком и стоком подано переменное напряжение V_{sd} , которое создаёт внешнее переменное электрическое поле напряжённости E_{sd} в слое с двумерным электронным газом. Данное поле E_{sd} приводит к образованию переменного тока в проводящем канале.

Проводящий канал с 2DEG представляет собой полупроводниковый слой, который имеет толщину a . Целью работы является определение интегральной проводимости данного слоя. Введём декартовую систему координат. Пусть плоскость слоя лежит в плоскости XY , а ось X направлена вдоль вектора напряжённости электрического поля между истоком и стоком E_{sd} , а ось Z направлена вдоль вектора напряжённости электрического поля затвора E_g . Слой граничит с диэлектриком в МДП-структуре в плоскости $z = 0$ и имеет бесконечные размеры в плоскости XY .

Введём безразмерные параметры:

$$m_0 = \sqrt[3]{m_1 m_2 m_3}, \quad k_{m1} = m_1/m_0, \quad k_{m2} = m_2/m_0, \quad k_{m3} = m_3/m_0, \\ \lambda_{BV} = h/p_{0V}, \quad p_{0V} = m_3 v_{0V}, \quad \lambda = v_0 \tau = v_{0V} \tau_V, \\ x_\lambda = \lambda/\lambda_{BV}, \quad y_0 = \omega \tau_V, \quad E_0 = \left(\frac{heE_g}{\pi m_0^2} \right)^{1/3} \bigg/ \sqrt{\frac{2k_B T}{m_0}},$$

где k_{m1} , k_{m2} , k_{m3} – безразмерные эффективные массы носителей заряда вдоль осей X , Y и Z соответственно; λ_{BV} – длина волны де Бройля; λ – длина

свободного пробега электронов; y_0 – безразмерная частота электрического поля $\mathbf{E}_{sd}$; E_0 – безразмерная напряжённость поперечного поля.

На рис. 1 показаны зависимости модуля безразмерной электропроводности Σ от безразмерной напряжённости поперечного электрического поля E_0 . С увеличением напряжённости расстояние между уровнями увеличивается и поднимается энергия первого уровня ε_{z1} . Электронам (дыркам) становится труднее перейти из валентной зоны в зону проводимости полупроводника, что приводит к уменьшению концентрации носителей заряда и проводимости как по модулю, так и по аргументу.

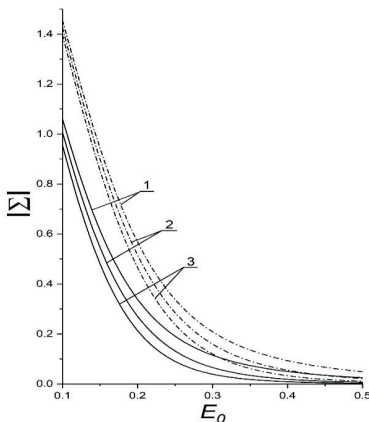


Рисунок 1 – Зависимость $|\Sigma|$ от безразмерной напряжённости E_0 при $k_{m1} = 2.86$, $x_\lambda = 10$, $y_0 = 0.1$, $u_\mu = -45$. Кривые 1, 2, 3 получены при $q_1 = q_2 = 1$, $q_1 = q_2 = 0.5$, $q_1 = q_2 = 0$ соответственно. Сплошные линии построены для $k_{m3} = 0.59$, а пунктирные – для $k_{m3} = 1$

Quantum transport of 2D electron gas at the boundary of a heterojunction

V. A. YUGANOV

Supervisor – Associate Professor D. N. Romanov

P. G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia

Abstract. An analytical expression of the integral electrical conductivity of a semiconductor nanolayer, the charge carriers of which are located in a triangular quantum well, is obtained. The isoenergetic surface of the semiconductor material has the shape of a triaxial ellipsoid. The behavior of charge carriers is described by the quantum Liouville equation. The effect of surface scattering of charge carriers is taken into account through Fuchs boundary conditions.

Keywords: semiconductor nanolayer, Liouville equation, Fuchs model, conductivity, triangular quantum well.

ГРНТИ 29.05.15

ТОЧНЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ШРЁДИНГЕРА

О. А. АНТИПАЕВА

*Научный руководитель – проф. А. В. Кузнецов
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова,
Ярославль, Россия
oa.ped@yandex.ru*

Аннотация. Получены общие решения нестационарного уравнения Шрёдингера для одномерного случая, исследованы плотности вероятности в отсутствие внешнего поля и в поле квантового гармонического осциллятора с заданными начальными условиями. Рассмотрен классический предел полученных решений.

Ключевые слова: квантовая механика, гармонический осциллятор.

Если в нестационарном уравнении Шрёдингера потенциальная энергия U в операторе Гамильтона $\hat{H}$ не зависит явно от времени, можно представить частное решение уравнения – волновую функцию $\Psi(x, y, z, t)$ – в виде произведения пространственной $\psi(x, y, z)$ и временной $T(t)$ частей. Разделив переменные, получим как уравнения для пространственной и временной функций, так и полную энергию системы E , которая является собственным значением оператора Гамильтона $\hat{H}$.

Мы рассмотрели одномерную задачу, задав начальное условие в виде движущегося гауссова пакета: $\Psi(x, 0) = A \exp(-x^2/(2a^2) + ipx/\hbar)$. Найдено решение уравнения Шрёдингера для одномерного движения частицы в отсутствие внешнего поля. Получены выражения для волновой функции $\Psi(x, t)$ и квадрата модуля волновой функции $|\Psi(x, t)|^2$.

Рассмотрена задача об одномерном гармоническом осцилляторе. В этом случае потенциальная энергия имеет вид $U(x) = m\omega^2 x^2/2$, где m – масса частицы, ω – собственная частота колебаний классического осциллятора. При этом решение уравнения для координатной части содержит полиномы Чебышёва-Эрмита $H_n(\xi)$, где $\xi = x/x_0$, x_0 – параметр, имеющий размерность длины, $x_0^2 = \hbar/(m\omega)$. Возникновение целочисленного параметра $n = 0, 1, 2, \dots$ обусловлено необходимостью существования нормированных решений, что приводит к физическому следствию в виде квантования энергии: $E_n = \hbar\omega (n + 1/2)$. Общее решение $\Psi(x, t)$ имеет вид бесконечной суммы по n от произведения $\psi_n(x) T_n(t)$.

Начальные условия задавались в виде движущегося гауссова пакета с дополнительным множителем в виде полинома Чебышёва Эрмита $H_k(x)$. Задача в поле гармонического квантового осциллятора рассматривалась при $k = 0$ и $k = 1$.

При $k = 0$ плотность вероятности $|\Psi_0(x,t)|^2$ была вычислена в двух случаях: при $\alpha = x_0$ и $\alpha \neq x_0$, с использованием соотношений для рядов из специальных функций [1]. При $\alpha = x_0$ был выполнен переход к классическому пределу, когда действие системы велико, $S \gg \hbar$, что формально соответствует предельному переходу $\hbar \rightarrow 0$. Показано, что плотность вероятности $|\Psi_0(x,t)|^2$ в классическом пределе стремится к дельта-функции, что удовлетворяет принципу соответствия между квантовой и классической механикой. Равенство нулю аргумента дельта-функции даёт закон движения классического гармонического осциллятора.

Исследовано также движение в поле гармонического квантового осциллятора с начальным условием, содержащим полином $H_1(x) = 2x$. Плотность вероятности $|\Psi_1(x,t)|^2$ также была вычислена в случаях $\alpha = x_0$ и $\alpha \neq x_0$. При этом для случая $\alpha = x_0$ переход в выражении для плотности вероятности $|\Psi_1(x,t)|^2$ к классическому пределу, $\hbar \rightarrow 0$, выявил интересное свойство. Упрощая обозначения, можно представить плотность вероятности $|\Psi_1|^2$ в виде: $f(z, \varepsilon) = (A/\varepsilon) (z/\varepsilon)^2 \exp(-(z/\varepsilon)^2)$, при этом переход к классическому описанию соответствует пределу $\varepsilon \rightarrow 0$. Как легко видеть, функция $f(z, \varepsilon)$ обращается в ноль при $z = 0$. Но при $z \neq 0$ и в пределе $\varepsilon \rightarrow 0$ функция $f(z, \varepsilon)$ также обращается в ноль. Однако интеграл от функции, в соответствии с условием нормировки, равен единице. Исследуя функцию $f(z, \varepsilon)$ до перехода к пределу $\varepsilon \rightarrow 0$ можем видеть, что производная по z обращается в ноль в точках $z=0$ и $z = \pm \varepsilon$. В пределе $\varepsilon \rightarrow 0$ максимумы в точках $z = \pm \varepsilon$ возрастают как $1/\varepsilon$, становясь всё более узкими, в точке $z=0$ функция остаётся равной нулю, а интеграл – равным единице.

Автором планируется провести исследование, описан ли данный «парадокс» в теории обобщённых функций.

Литература

1. Prudnikov A. P. Integrals and series / A. P. Prudnikov, Y. A. Brychkov, O. I. Marichev. Gordon and Breach Science Publishers. 1986. Vol. 2. 750 p.

Exact dynamic solutions of the Schrodinger equation

O. A. ANTIPAEWA

Supervisor – Professor A. V. Kuznetsov

P. G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia

Abstract. General solutions of the nonstationary Schrodinger equation for the one-dimensional case are obtained, probability densities in the absence of an external field and in the field of a quantum harmonic oscillator with specified initial conditions are investigated. The classical limit of the solutions obtained is considered.

Keywords: quantum mechanics, harmonic oscillator.

ТЕОРИЯ НЕЙТРИННЫХ ОСЦИЛЛЯЦИЙ

О. А. БАДУРИНА

*Научный руководитель – доц. А. А. Добрынина
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова,
Ярославль, Россия*

fgiokjhhy@gmail.com

Аннотация. Рассмотрена теория нейтринных осцилляций в вакууме и в веществе в модель с двумя сортами нейтрино. Получены выражения для вероятностей перехода нейтрино одного сорта в другой. Используя профили для распределения концентрации электронов в Солнце, был рассмотрен эффект Михеева—Смирнова—Вольфенштейна.

Ключевые слова: нейтрино, осцилляции нейтрино, Солнце, концентрация электронов, эффект Михеева—Смирнова—Вольфенштейна

Известно, что поток нейтрино от Солнца, рассчитанный на основе стандартной солнечной модели, отличается от реального потока нейтрино, зарегистрированного в экспериментах. Наблюдаемый дефицит нейтрино получил название «проблемы солнечных нейтрино». Одним из решений данной проблемы является превращения одного сорта нейтрино в другой, называемые осцилляциями нейтрино. Рассмотрению осцилляций нейтрино в вакууме и в веществе посвящена данная работа.

Используя уравнение Шредингера, рассмотрим модель смешивания двух сортов нейтрино, а именно мюонного и электронного, в вакууме. В этом подходе были получены следующие выражения для вероятности нейтринных осцилляций в вакууме в терминах вакуумной длины осцилляций $L = 4\pi E/\Delta m^2$:

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{\pi x}{L} \right),$$

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_e) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{\pi x}{L} \right),$$

где θ — угол смешивания нейтрино в вакууме, x — расстояние, $\Delta m^2 = m_2^2 - m_1^2$ — разность квадратов масс двух сортов нейтрино, E — энергия нейтрино. Далее, были рассмотрены осцилляции нейтрино в среде. Известно, что при распространении в веществе нейтрино взаимодействуют с веществом посредством электрослабого взаимодействия. В среде, состоящей из ядер и электронов, потенциал взаимодействия может быть представлен в виде

$$V = \pm \sqrt{2} G_F \times \begin{cases} n_e - n_n/2, & \text{для } \nu_e, \\ -n_n/2, & \text{для } \nu_{\mu, \tau}. \end{cases}$$

где G_F — постоянная Ферми, n_e — концентрация электронов в веществе, n_n — концентрация нейтронов в веществе. Верхний знак соответствует нейтрино, а нижний знак — антинейтрино. Часто вклад в потенциал V , вносимый нейтронами, не учитывается, поскольку он выпадает из уравнений для осцилляций вследствие своего диагонального вида.

По аналогии с вакуумом, получено выражение для вероятности перехода электронного нейтрино в мюонное:

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = \sin^2 2\theta_m \sin^2 \left(\frac{\pi R}{L_m} \right),$$

а вероятность перехода электронного нейтрино самого в себя имеет вид:

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_e) = 1 - P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \sin^2 2\theta_m \sin^2 \left(\frac{\pi R}{L_m} \right).$$

Здесь использована длина осцилляций в веществе L_m :

$$L_m = \frac{L}{\sqrt{1 - 2\chi \cos 2\theta + \chi^2}},$$

где $\chi = 2\sqrt{2}G_F n_e E / \Delta m^2$, $\Delta m^2 = m_2^2 - m_1^2$ — разность квадратов масс двух сортов нейтрино, E — энергия нейтрино, θ_m — угол смешивания в среде, R — расстояние между источником нейтрино и детектором. Далее, используя профили для распределения концентрации электронов в Солнце, был рассмотрен эффект резонансного перехода нейтрино, который называется эффектом Михеева—Смирнова—Вольфенштейна.

Theory of neutrino oscillations

O. A. BADURINA

Supervisor – Associate Professor A. A. Dobrynina

P. G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia

Abstract. Theory of two-specie neutrino oscillations is considered both in vacuum and a matter. Neutrino transition probabilities are obtained. Using profiles of the electron number density in the Sun, the Mikheev—Smirnov—Wolfenstein effect is considered.

Keywords: neutrino, neutrino oscillations, Sun, electron number density, Mikheev—Smirnov—Wolfenstein effect

РОЖДЕНИЕ ПАР ЗАРЯЖЕННЫХ ЛЕПТОНОВ НА ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЛИНЕЙНЫХ КОЛЛАЙДЕРАХ

М. А. ВЛАСОВ

*Научный руководитель – доц. М. В. Мартынов
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова,
Ярославль, Россия
maksim-v2002@yandex.ru*

Аннотация. Рассматриваются линейные и круговые коллайдеры, а также процесс $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$. Получены значения матричного элемента S -матрицы перехода. Рассчитано сечение рождения мюонной пары.

Ключевые слова: линейный коллайдер, сечение рождения.

Главной задачей данного исследования стало рассмотреть калибровочный процесс столкновения на перспективных линейных e^+e^- коллайдерах, получить матричные элементы S -матрицы перехода и вычислить полное сечение рождения процесса

$$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^- \quad (1)$$

В данной работе рассматриваются три перспективных коллайдера: СЕРС (Circular Electron Positron Collider), CLIC (Compact Linear Collider), ILC (International Linear Collider).

Линейные коллайдеры интересны тем, что проходящие на них процессы столкновения элементарных частиц, в частности e^+e^- , происходят при высоких энергиях $E \sim 300$ ГэВ и выше.

В соответствии с теорией электрослабого взаимодействия e^+e^- пара может превратиться либо в фотон (электрослабое взаимодействие), либо в Z -бозон (слабый нейтральный ток).

Задавая S -матрицу перехода и используя часть лагранжиана электрослабого взаимодействия, получаем матричный элемент:

$$|S_{fi}|^2 = (2\pi)^8 |M_{fi}|^2 \delta(P' - P). \quad (2)$$

Из данного матричного элемента мы получим дифференциальное сечение рождения мюонной пары. После интегрирования по телесному углу получим полное сечение рождения,

$$\sigma = \frac{4\pi\alpha}{3E^2} \sqrt{1 - (4m^2/E^2)} (1 + (2m^2/E^2)), \quad (3)$$

где E – энергия пары начальных лептонов в системе их центра инерции.

Процесс $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ в физике высоких энергий — один из основных. Столкновения пучков элементарных частиц высоких энергий возможно приведет к открытию новой физики за рамками Стандартной модели. Также этот процесс используется для калибровки линейных коллайдеров.

Литература

1. Биленький С. М. Введение в диаграммы Фейнмана и физику электрослабого взаимодействия / С. М. Биленький. М. : Энергоатомиздат, 1990. 327 с.
2. Пескин М. Введение в квантовую теорию поля / М. Пескин, Д. Шрёдер. Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. 784 с.

Charged-lepton pair production on promissing linear colliders

М. А. VLASOV

Supervisor – Associate Professor M. V. Martynov

P. G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia

Abstract. Linear and circle colliders as well as $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ process are considered. Elements of the transition S -matrix are obtained. The cross section of the muon pair production is calculated.

Keywords: linear collider, production cross section.

РАСПАДЫ ПРЕЛЕСТНЫХ АДРОНОВ С РОЖДЕНИЕМ ЧАРМОНИЕВЫХ ПЕНТАКВАРКОВ

М. М. ВОРОНЕНКО

*Научный руководитель – доц. А. Я. Пархоменко
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова,
Ярославль, Россия
millenavoronenko@gmail.com*

Аннотация. В настоящее время интенсивно изучаются рождение, свойства и распады тяжёлых барионов и мезонов. Найдены соотношения между относительными вероятностями распадов прелестных барионов на пентакварки чармониевого типа и лёгкие мезоны, следующие из ароматовой $SU(3)$ -симметрии адронов и симметрии тяжелого кварка. Аналогичные вычисления проводятся для распадов B -мезонов на пентакварк и лёгкий антибарион.

Ключевые слова: мезон, барион, пентакварк, аромат кварка, ароматовая $SU(3)$ -симметрия, амплитуда распада, относительная вероятность.

Адроны — это связанные состояния из кварков и глюонов. Обычные адроны состоят из кварков и антикварков и делятся на две большие группы: мезоны, образованные из кварка и антикварка, и барионы — трёхкварковые состояния. Теория также допускает существование других экзотических адронов [1], таких как тетракварки, состоящие из двух кварков и двух антикварков, и пентакварки, отличающиеся от обычных барионов дополнительной кварк-антикварковой парой в составе. Помимо статистики, определяемой спином частицы, у адронов существуют дополнительные квантовые числа, обусловленные ароматами кварков. Как хорошо известно [2], только кварки пяти ароматов из шести возможных могут образовывать связанные состояния, причем наиболее тяжелые из них — прелестные адроны — должны содержать хотя бы один b -кварк. Что касается экзотических адронов, то на данный момент экспериментально выявлено достаточно большое число тетракварков и пентакварков со скрытым чармом, т. е. частиц, содержащих в своем составе пару из очарованных кварка и антикварка [2]. Следует отметить, что мезон, образованный из пары очарованных кварка и антикварка, называется чармонием, поэтому частицы, включающие в свой состав такую пару, можно назвать адронами со скрытым чармом или чармониевыми адронами. Чармониевые пентакварки были открыты в распадах Λ_b -бариона, самого легкого и наиболее хорошо изученного экспериментально из семейства прелестных барионов. В данной работе исследуются слабые распады прелестных барионов на пентакварки со скрытым чармом и лёгкие

мезоны, обусловленные $SU(3)_F$ симметрией легких кварков, а также распады B -мезонов на пентакварк и лёгкий антибарион.

Ароматова $SU(3)_F$ симметрия, выявленная у лёгких кварков, допускает существование большого числа чармониевых пентакварковых состояний, различающихся составом этих кварков. Подобно легким барионам, наличие $SU(3)_F$ симметрии позволяет объединить пентакварки в октет и декуплет, легкие мезоны — в октет и синглет и прелестные барионы — в антитриплет и секстет. Используя ароматовую симметрию, вычислены амплитуды распадов прелестных барионов из триплетного и секстетного представлений $SU(3)_F$ группы. Полученные амплитуды зависят от трех универсальных амплитуд, характеризующих динамику распадов. Из-за дополнительной симметрии тяжелого кварка диаграмма, в которой легкий дикварк из прелестного бариона переходит напрямую в пентакварк, будет давать наибольший вклад в полную амплитуду распада бариона [3]. Учитывая эту симметрию, были получены относительные вероятности распадов прелестных барионов и среди них были выявлены наиболее перспективные для экспериментального обнаружения новых пентакварков каналы. Аналогичные вычисления были проведены для распадов B -мезонов на чармониевый пентакварк и лёгкий антибарион.

Литература

1. Gell-Mann M. A Schematic Model of Baryons and Mesons // Phys. Lett. 1964. Vol. 8. P. 678-680.
2. Окунь Л. Б. Лептоны и кварки / Л. Б. Окунь. М. : Эдиториал УРСС, 2008. 352 с.
3. Ali A., Ahmed I., Aslam M. J., Rehman A. Heavy quark symmetry and weak decays of the b -baryons in pentaquarks with a cc^- component // Phys. Rev. 2016. Vol. D94. P. 054001. arXiv:hep-ph/1607.00987.

Production of charmonium pentaquarks in decays of bottom hadrons

M. M. VORONENKO

*Supervisor – Associate Professor A. Ya. Parkhomenko
P. G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia*

Abstract. At present, production, properties, and decays of heavy baryons and mesons are studied very intensively. Branching fraction ratios of bottom baryon decays into pentaquarks and light mesons are calculated, after the flavor $SU(3)$ -symmetry of hadrons and heavy quark symmetry are taken into account. Similar ratios are obtained for the B -meson decays to pentaquarks and light antibaryons.

Keywords: meson, baryon, pentaquark, quark flavor, flavor $SU(3)$ -symmetry, decay amplitude, branching fraction.

ЭЛЕКТРОСЛАБЫЕ ПРОЦЕССЫ ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ**М. Р. ГАРАЕВ**

*Научный руководитель – проф. А. А. Гвоздев
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова,
Ярославль, Россия*

uschebamaksdinewot@gmail.com

Аннотация. В работе получено выражение для вероятности распада фотона на электрон-позитронную пару во внешнем магнитном поле произвольной величины, актуальное в контексте квантовой электродинамики и астрофизики. Для вычисления вероятности использован метод матрицы плотности. Проверка правильности результата проведена в двух предельных случаях: сильного магнитного поля и большого динамического параметра. В первом случае результат совпадает с ранее известным, во втором случае получено промежуточное выражение, требующее дальнейшего анализа.

Ключевые слова: распад фотона, электрон-позитронная пара, магнитное поле, динамический параметр, матрица плотности.

Целью работы является получение выражения для вероятности процесса распада фотона на электрон-позитронную пару во внешнем магнитном поле произвольной величины. Данный процесс играет ключевую роль в формировании излучения магнитосферы нейтронной звезды.

Впервые выражение для вероятности процесса было получено методом матрицы плотности. Финальное выражение содержит лишь суммы по уровням Ландау электрона и позитрона от функций, выраженных через специальные полиномы, свойства которых подробно изучаются в [1]. Суммы по уровням Ландау могут быть вычислены в двух предельных случаях: пределе сильного и пределе большого динамического параметра.

В пределе сильного магнитного поля для вероятности воспроизводится известный результат [2]:

$$W^{(2)} \cdot \omega = Z^{(2)}(q) \cdot \frac{4\alpha(eB)m^2 \theta(q_{\parallel}^2 - 4m^2)}{\sqrt{q_{\parallel}^2(q_{\parallel}^2 - 4m^2)}} \cdot \exp\left[-\frac{q_{\perp}^2}{2eB}\right]. \quad (1)$$

В пределе большого динамического параметра $\chi^2 = (\frac{eB}{m^2})^2 (\frac{q_{\perp}^2}{m^2}) \gg 1$ получено выражение в виде двукратного интеграла:

$$W^{(1)} \cdot \omega \simeq Z^{(1)} \cdot 2\alpha(eB) \cdot \frac{2}{\pi} \int_0^\infty dn \int_0^\infty dn' * \frac{x_0}{\tilde{x}_0} \frac{\theta \left[z - \left(\frac{2\tilde{x}_0}{\Delta^2} \right)^{1/3} \frac{m^2}{eB} \right]}{\sqrt{\tilde{x}_0^2 - x_0^2}} * \\ * \frac{\left(\frac{d\Phi}{dz} \right)^2}{\sqrt{z - \left(\frac{2\tilde{x}_0}{\Delta^2} \right)^{1/3} \frac{m^2}{eB}}}, \quad (2)$$

для получения $W^{(2)} \cdot \omega$ необходимо заменить множитель $x_0/\tilde{x}_0$ на 1. Данные выражения требуют дальнейшего анализа для проверки их соответствия известному результату [2].

Литература

1. Kaminker A. D., Yakovlev D. G. Calculations of elementary processes with relativistic electrons in a strong magnetic field // Theor. Math. Phys. (USSR). 1982. Vol. 49. P. 1012-1021.
2. Kuznetsov A. Electroweak processes in external electromagnetic fields / A. Kuznetsov, N. Mikheev. Springer Tracts in Modern Physics, Vol. 197. New York : Springer-Verlag, 2003. 120 p.

Electroweak processes in an external magnetic field

M. R. GARAEV

Supervisor – Professor A. A. Gvozdev

P. G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia

Abstract. An expression for the probability of photon decay into an electron-positron pair in an external magnetic field of arbitrary strength, relevant in the context of quantum electrodynamics and astrophysics, is derived in the paper. The probability is calculated using the density matrix method. The correctness of the result is verified in two limiting cases: strong magnetic field and large dynamical parameter. In the first case, the result coincides with the previously known one, while in the second case, an intermediate expression is obtained that requires further analysis.

Keywords: photon decay, electron-positron pair, magnetic field, dynamical parameter, density matrix.

ЭФФЕКТЫ В НИЗКОРАЗМЕРНЫХ МАГНИТНЫХ СИСТЕМАХ, ИНДУЦИРОВАННЫЕ КРИВИЗНОЙ ПРОСТРАНСТВА

В. В. ГОЛОВКИН

*Научный руководитель – проф. А. В. Проказников
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова,
Ярославль, Россия
golovkin.vdm@gmail.com*

Аннотация. Исследование посвящено изучению влияния кривизны пространства на параметры формирования и стабилизации компактных магнитных состояний. Для тонкого нанопровода получена зависимость полной энергии от кривизны пространства.

Ключевые слова: скирмион, нанопровод, кривизна, рамка Френе-Серре

В настоящее время особые надежды возлагают на использование скирмионов в спиновой электронике. Одна из популярных в настоящее время концепций, называемая трековой памятью (race-track memory, дословно «память на беговой дорожке»). Это ферромагнитная нанопроволока с данными, зашифрованными в виде областей магнитных доменов вдоль участка нанопровода.

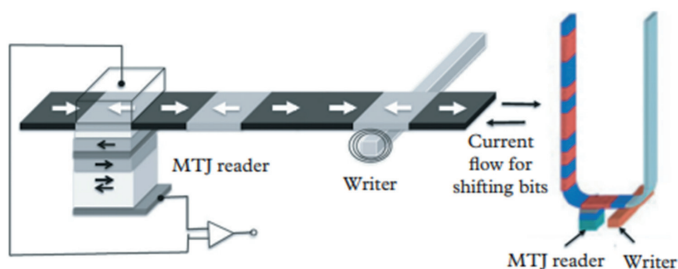


Рисунок 1 – Схема функционирования магнитной памяти

Дифференциальные свойства кривой, описывающей нанопровод, задаются формулами Френе-Серре. Строение матрицы коэффициентов разложения, определяемое этими формулами, имеет следующий вид:

$$\|F_{\alpha\beta}\| = \begin{pmatrix} 0 & \psi & 0 \\ -\psi & 0 & \tau \\ 0 & -\tau & 0 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Было установлено, что, в зависимости от кривизны пространства, в Гамильтониане появляются дополнительные слагаемые, связанные с вкладом во все виды взаимодействий: обменное, анизотропию и взаимодействие Дзялошинского-Мории. Минимизация энергетического

функционала, определяющего полную плотность энергии системы, дает явную зависимость углов φ и θ от кривизны и кручения:

$$\left| \theta = \frac{\pi}{2} - \frac{\ell^2}{|\lambda|} \text{ш} + O\left(\frac{1}{|\lambda|^2}\right) \quad \varphi = \frac{\ell^2}{|\lambda|} \text{ш}' + O\left(\frac{1}{|\lambda|^2}\right) \right. \quad (2)$$

Вид соответствующих решений представлен на рис. 2.

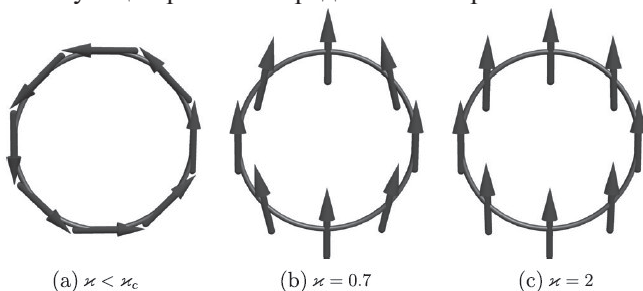


Рисунок 2 – Распределение намагниченности основного состояния в кольце, соответствующее различным значениям параметрам κ

Значение энергии состояния на рис. 2а, равное энергии состояния на рис.2б, соответствует значению κ_c .

Литература

1. Krishnan K. M. Fundamentals and applications of magnetic materials / K. M. Krishnan. Oxford University Press, 2016. 816 p.
2. Sheka D. D., Kravchuk V. P., Gaididei Y. Curvature effects in statics and dynamics of low dimensional magnets. // Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical. 2015. Vol. 48, No.12. P. 125202.

Effects in low-dimensional magnetic systems induced by space curvature

V. V. GOLOVKIN

Supervisor – Professor A. V. Prokaznikov

P. G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia

Annotation. The study is devoted to investigations of the influence of space curvature on parameters of the formation and stabilization of compact magnetic states. For a thin nanowire, the dependence of the total energy on the space curvature is obtained.

Keywords: skyrmion, nanowire, curvature, Frenet-Serret frame

**ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ ДВАЖДЫ ТЯЖЕЛЫХ ТЕТРАКВАРКОВ
В ПРИБЛИЖЕНИИ БОРНА-ОППЕНГЕЙМЕРА
А. В. ЗОЛОТОВ**

*Научный руководитель – доц. А. Я. Пархоменко
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова,
Ярославль, Россия
Alexzolotovzet@gmail.com*

Аннотация. Приближение Борна-Оппенгеймера, используемое в квантовой механике в приложении к многоатомным молекулам и, в частности, к молекуле водорода, получило развитие в квантовой теории поля как метод вычисления спектра масс экзотических адронов — дважды тяжелых тетра- и пентакварков. Обобщение приближения на тетракварки обсуждается в данной работе.

Ключевые слова: молекула водорода, приближение Борна-Оппенгеймера, адрон, мезон, кварк, дикварк, квантовая теория поля, тетракварк.

За последние двадцать лет физика экзотических адронов — многокварковых состояний прочно вошла в планы исследований, проводимых на современных ускорителях элементарных частиц. Наиболее многочисленное семейство таких адронов — это тетракварки, представляющие собой связанные состояния из двух кварков и двух антикварков. Используя приближение Борна-Оппенгеймера, можно описать дважды тяжелые тетракварки, в состав которых входят либо пара тяжелых кварка и антикварка, либо два тяжелых кварка. Если состояния со скрытым тяжелым ароматом известны уже на протяжении 20 лет, то мезон с двойной прелестью — $X_{cc}(3875)^+$ — пока единственный [1]. Как было показано в [2, 3], в приближении Борна-Оппенгеймера два тяжелых кварка (дважды тяжелый дикварк) или пару из тяжелых кварка и антикварка у таких адронов следует считать статическими источниками внешнего поля, в котором движутся два оставшихся легких кварка. Как следствие, энергия связи адрона представляет собой сумму энергии взаимодействия тяжелых частиц и средней энергии легких кварков, вычисленную по теории возмущений. Аналогичный способ расчета энергии молекулы водорода можно найти в [4]. Если для энергии связи молекулы водорода, находящейся в основном состоянии, удалось получить аналитические выражения, то задача о дважды тяжелом тетракварке была решена численно [2, 3]. Однако, имеется возможность и для основного состояния тетракварка также получить аналитические выражения для энергии связи, при условии, что взаимодействие между кварками задается потенциалом взаимодействия, например, корнельским потенциалом [2, 3].

Волновая функция в нулевом приближении выбирается как произведение двух волновых функций атома водорода, считая, что невозмущенная потенциальная энергия кулоновского типа. Это действительно так, если ограничиться только вкладом от одноглюонного обмена. Остальные слагаемые в операторе Гамильтона — операторы возмущения, которые усредняются по волновым функциям нулевого приближения. Добавив к вычисленной средней энергии потенциальную энергию взаимодействия между тяжелыми (анти)кварками, получим полную энергию связи тетракварка. Анализ энергии связи на наличие или отсутствие минимума в зависимости от расстояния между кварками позволяет определить существование связанного состояния. Предварительные расчеты показывают наличие связанных состояний в дважды тяжелых тетракварках со скрытым тяжелым ароматом, что согласуется с результатами [2, 3], полученными численными методами.

Литература

1. Workman R. L. et al. [Particle Data Group] Review of Particle Physics // Progress of Theoretical and Experimental Physics. 2022. V. 2022. P. 083C01.
2. Maiani L., Polosa A. D., Riquer V. Hydrogen bond of QCD in doubly heavy baryons and tetraquarks // Physical Review D. 2019. Vol. 100. P. 074002.
3. Maiani L., Polosa A. D., Riquer V. Hydrogen bond of QCD // Physical Review D. 2019. Vol. 100. P. 014002.
4. Флюгге З. Задачи по квантовой механике. Т. 2 / 3. Флюгге. М. : Мир, 1974. 315 с.

Binding energy of doubly heavy tetraquarks in the Born-Oppenheimer approximation

A. V. ZOLOTOV

*Supervisor – Associate Professor A. Ya. Parkhomenko
P. G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia*

Abstract. The Born-Oppenheimer approximation used in quantum mechanics in application to polyatomic molecules and to the hydrogen molecule, in particular, gets its extension in quantum field theory as a method for calculating a mass spectrum of exotic hadrons — doubly-heavy tetra- and pentaquarks. The generalization of this approximation to tetraquarks is discussed.

Keywords: hydrogen molecule, Born-Oppenheimer approximation, hadron, meson, quark, diquark, quantum field theory, tetraquark.

ДИНАМИЧЕСКИЕ КОНФИГУРАЦИИ НЕАБЕЛЕВЫХ КАЛИБРОВОЧНЫХ ПОЛЕЙ

Д. В. ЗУЕВ

*Научный руководитель – доц. М. В. Мартынов
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова,
Ярославль, Россия
daniil_zuev_03@mail.ru*

Аннотация. Рассмотрена модель с неабелевой калибровочной симметрией с группой $SU(2)$. Из лагранжиана модели, описывающего калибровочные поля, получены уравнения Янга-Миллса. Исследованы решения полевых уравнений в виде плоских волн.

Ключевые слова: калибровочное поле, лагранжиан, уравнения Янга-Миллса.

Стандартная модель современной физики элементарных частиц рассматривает фундаментальные взаимодействия, как проявления особых видов симметрии, называемых калибровочными симметриями. Этим симметриям соответствуют группы – абелева группа $U(1)$ для электромагнитного взаимодействия и неабелевы группы $SU(2)$ для слабого взаимодействия и $SU(3)$ для сильного взаимодействия.

Главной задачей в данной работе являлось получение лагранжианов и уравнений поля из соответствующих калибровочных симметрий, проверка инвариантности лагранжиана калибровочных полей при локальных преобразованиях с последующим получением уравнений полей.

Сначала были рассмотрены глобальные преобразования лагранжиана, где матрица преобразований принадлежала группе $SU(2)$ и не зависела от координат. В этом случае лагранжиан оставался инвариантным. Далее требовалось рассмотреть поведение лагранжиана при локальных преобразованиях, здесь матрица преобразований уже зависела от координат, поэтому, чтобы лагранжиан стал инвариантен при локальных преобразованиях, нужно было ввести ковариантную производную, содержащую новые поля. Эти поля называют калибровочными.

Далее было получено выражение для тензора напряженностей неабелева калибровочного поля, используя коммутационные соотношения для генераторов группы $SU(2)$, представили тензор напряжённости через структурные константы группы $SU(2)$. Теперь после преобразования тензора выразили лагранжиан и записали действие неабелева калибровочного поля. Из принципа наименьшего

действия получили уравнения для неабелевых калибровочных полей — уравнения Янга-Миллса.

Уравнения Янга-Миллса — это система нелинейных уравнений в частных производных, нахождение решений этой системы представляет большую математическую сложность. Были проверены и исследованы известные в литературе решения в виде плоских волн.

Литература

1. Рубаков В. А. Классические калибровочные поля. Бозонные теории / В. А. Рубаков. М. : URSS, 2017. 296 с.
2. Actor A. Classical solutions of $SU(2)$ Yang—Mills theories // Rev. Mod. Phys. 1979. Vol. 51, No. 3. P. 461.

Dynamical configurations of non-Abelian gauge fields

D. V. ZUEV

Supervisor – Associate Professor M. V. Martynov

P. G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia

Abstract. A model with non-Abelian gauge symmetry with the group $SU(2)$ is considered. The Yang—Mills equations are obtained from the gauge field Lagrangian. Plane wave solutions of the field equation are studied.

Keywords: gauge field, function, Lagrangian, Yang—Mills equation.

КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА В МНИМОМ ВРЕМЕНИ

Д. Н. КЛЮКИН

*Научный руководитель – проф. А. А. Гвоздев
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова,
Ярославль, Россия
dnklyukin2@gmail.com*

Аннотация. В работе рассмотрен метод Фейнмана вычисления амплитуды туннелирования квантовой частицы в квазиклассическом приближении. Данный метод, эквивалентный WKB в квантовой механике, является менее громоздким и интуитивно понятным на каждом шаге вычисления. В формализме интеграла по путям в мнимом времени вычисляется амплитуда туннелирования квантовой частицы в потенциале Хиггса. Обсуждается физический смысл полученного результата.

Ключевые слова: квантовая механика, интегралы по путям, потенциал Хиггса, формализм Фейнмана, мнимое время.

Для решения задачи о туннелировании квантовой частицы под барьером в квазиклассическом приближении в квантовой механике используется WKB-метод [1]. Результат вычисления амплитуды туннелирования может быть представлен в виде [1]:

$$P = Ae^{-S_0/\hbar}, \quad (1)$$

где S_0 — действие частицы на классической траектории в мнимом времени $\tau = it, \tau > 0$, A — первая квантовая поправка, вычисление которой не только громоздко, но и плохо понятно интуитивно.

Этот недостаток отсутствует в формализме Фейнмана. Как показано в [2], амплитуда туннелирования может быть представлена, как интеграл по путям в мнимом времени:

$$K(x_2, T/2; x_1, -T/2) = \mathcal{N}(T) \int \mathcal{D}x(\tau) e^{-S[x, \tau]/\hbar}, \quad (2)$$

при условии $x(-T/2) = x_1, x(T/2) = x_2$, $S[x(\tau), T]$ — действие частицы при заданных граничных условиях в мнимом времени $-T/2 \leq \tau \leq T/2$. При вычислении (2) в квазиклассическом приближении:

1. Представляем $x(\tau) = \bar{x}(\tau) + y(\tau)$, где $\bar{x}(\tau)$ — классическая траектория, $y(\tau)$ — вариация. Полагаем вариацию $y(\tau)$ малой величиной первого порядка и раскладываем действие $S[x(\tau), T]$ в ряд до членов второго порядка малости по $y(\tau)$ и $\dot{y}(\tau)$. Учитываем, что мера интегрирования при переходе к вариации не меняется.

2. Раскладываем $y(\tau)$ по полной системе собственных функций линейного дифференциального оператора $\hat{D} = -\frac{d^2}{d\tau^2} + \frac{V''(\bar{x})}{m}$,

$y(\tau) = \sum_n c_n y_n(\tau)$, $\hat{D}y_n(\tau) = \mathcal{E}_n y_n(\tau)$ при граничных условиях $y_n(-T/2) = y_n(T/2) = 0$. Результат вычисления амплитуды можно представить в виде: $P(x_2, T/2; x_1, -T/2) = B(T)e^{-S_0/\hbar} \left\{ \det \hat{D} \right\}^{-1/2}$, где $\det \hat{D} = \prod_n \mathcal{E}_n$.

Отметим, что множитель $B(T)$ не зависит от параметров потенциала $V(x)$ и, по этой причине, его явный вид можно получить, вычисляя амплитуду перехода P квантового осциллятора.

В работе данным методом вычисляется амплитуда туннелирования $P(\eta, T/2; -\eta, -T/2)$ из основного состояния (полная энергия частицы равна нулю) в основное при $T \rightarrow \infty$ в потенциале Хиггса:

$$V(x) = \lambda(x^2 - \eta^2)^2. \quad (3)$$

Для амплитуды туннелирования воспроизведен известный результат [3], обсуждается его физический смысл.

Литература

1. Блохинцев Д. И. Основы квантовой механики / Д. И. Блохинцев М. : Наука, 1976. 664 с.
2. Фейнман Р. Ф. Квантовая механика и интегралы по траекториям / Р. Ф. Фейнман, А. Р. Хиббс. М. : Мир, 1968. 379 с.
3. Вайнштейн А. И. и др. Инстантонная азбука // Успехи физических наук. 1982. Т. 136, №. 4. С. 553–591.

Quantum mechanics in imaginary time

D. N. KLYUKIN

Supervisor – Professor A. A. Gvozdev

P. G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia

Abstract. Feynman's method of calculating the tunneling amplitude of a quantum particle in the quasi-classical approximation is considered. This method, being equivalent to WKB approximation, is less cumbersome intuitively at every step of calculation. In the imaginary-time path-integral method, the tunneling amplitude of the particle in the Higgs potential is calculated. A physical meaning of the result is discussed.

Keywords: quantum mechanics, path integrals, Higgs potential, Feynman formalism, imaginary time.

ЭВОЛЮЦИЯ ДВОЙНОЙ ЗВЕЗДНОЙ СИСТЕМЫ

А. Е. КОВАЛЕВА

*Научный руководитель – ст. преп. А. А. Сабитов
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова,
Ярославль, Россия*

nastena.kovaleva.04@mail.ru

Аннотация. В приближении слабого гравитационного поля были получены и проанализированы выражения, описывающие изменение геометрических и динамических параметров двойной системы компактных объектов.

Ключевые слова: двойные пульсары, гравитационное излучение, потеря энергии, уменьшение эксцентриситета, уменьшение орбитального периода.

Применяя приближение слабого гравитационного поля, создаваемого медленно движущимися объектами (при условии, что безразмерный гравитационный потенциал системы много меньше единицы), были получены выражения для интенсивности гравитационного излучения, создаваемого двойной системой компактных объектов, и средней скорости потери орбитального момента системы:

$$\frac{\overline{dE}}{dt} = -\frac{32}{5} \frac{G^4}{c^5} \frac{m_1^2 m_2^2}{a^5} \frac{(m_1 + m_2)}{(1 - e^2)^{7/2}} \left(1 + \frac{73}{24} e^2 + \frac{37}{96} e^4 \right), \quad (1)$$

$$\frac{\overline{dL}}{dt} = -\frac{32}{5} \frac{G^{7/2}}{c^5} \frac{m_1^2 m_2^2}{a^{7/2}} \frac{(m_1 + m_2)^{1/2}}{(1 - e^2)^2} \left(1 + \frac{7}{8} e^2 \right). \quad (2)$$

На основе формул для потери энергии и момента системой были получены выражения, описывающие изменение большой полуоси a и эксцентриситета e двойной системы:

$$\frac{\overline{da}}{dt} = -\frac{64}{5} \frac{G^3}{c^5} \frac{m_1 m_2}{a^3} \frac{(m_1 + m_2)}{(1 - e^2)^{7/2}} \left(1 + \frac{73}{24} e^2 + \frac{37}{96} e^4 \right), \quad (3)$$

$$\frac{\overline{de}}{dt} = -\frac{304}{15} \frac{G^3}{c^5} \frac{m_1 m_2}{a^4} \frac{(m_1 + m_2)}{(1 - e^2)^{5/2}} e \left(1 + \frac{7}{8} e^2 \right). \quad (4)$$

Было получено выражение, объясняющее наблюдаемое уменьшение периода системы:

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{192\pi G^{5/2} m_1 m_2 (m_1 + m_2)^{1/2}}{5 c^5 a^{5/2} (1 - e^2)^{7/2}} \left(1 + \frac{73}{24} e^2 + \frac{37}{96} e^4\right). \quad (5)$$

Были проведены оценки времени падения по спирали для наблюдаемых систем двойных пульсаров с массами компонентов порядка солнечных и эксцентриситетом орбиты, близким к нулю. Было выяснено, что время жизни систем, чьи компоненты расположены достаточно далеко друг от друга, может быть порядка времени существования Вселенной.

Для систем с модельными параметрами были проведены оценки зависимости времени падения по спирали от начального радиуса орбиты, а также темпа изменения радиуса в зависимости от соотношения масс компонент системы. Из оценки модельных параметров подтвердился факт возрастания времени падения по спирали при увеличении начального радиуса системы.

Было также выяснено, что чем больше соотношение масс компонент системы, тем медленнее она будет уменьшать свой радиус. Это можно объяснить тем, что центр масс системы будет смещаться в сторону более тяжелого компонента, что приведет к движению более легкого в центральном поле притяжения тяжелого и снова вернет задачу к классическому пределу.

Литература

1. Ландау Л. Д. Теория поля / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц М. : ФИЗМАТЛИТ, 2022. 512 с.
2. Jaranowski P. Analysis of gravitational-wave data / P. Jaranowski, A. Królak. Cambridge Monographs on Particle Physics, Nuclear Physics and Cosmology, Vol. 29. Cambridge University Press, 2009. 270 p.

Evolution of binary star system

A. E. KOVALEVA

Supervisor – Senior Lecturer A. A. Sabitov

P.G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia

Abstract. In the approximation of a weak gravitational field, expressions describing the change in geometric and dynamic parameters of a binary system of compact objects were obtained and analyzed.

Keywords: double pulsars, gravitational radiation, energy loss, eccentricity decrease, orbital period decrease.

ПРИБЛИЖЕНИЕ ДЛЯ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НЕЙТРИНО ВО ВНУТРЕННЕЙ ЧАСТИ СВЕРХНОВОЙ

Е. А. КОПТЯЕВА

*Научный руководитель – доц. И. С. Огнев
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова,
Ярославль, Россия
koptiaeva2016@yandex.ru*

Аннотация. В работе рассмотрено несколько вариантов четырехпараметрических аналитических приближений локальной неравновесной функции распределения нейтрино в сверхновой с коллапсом центральной части. Для оценки их точности использовались результаты одномерного моделирования распространения нейтрино в сверхновой, самосогласованного с гидродинамикой взрыва. Было показано, что во внутренней части сверхновой наиболее точным является ферми-подобное приближение для распределения нейтрино по энергии. Угловая часть распределения в этой области наиболее близка к линейному приближению. Получены локальные значения параметров распределения как функции от времени после взрыва и радиального расстояния.

Ключевые слова: сверхновая с коллапсом центральной части, угловое распределение нейтрино, энергетическое распределение нейтрино.

Исследована задача о построении аналитических приближений для локальной неравновесной функции распределения нейтрино во внутренней части сверхновой с коллапсом центральной части. Приближения строились в минимально возможном, четырехпараметрическом варианте. В этом случае необходимо предполагать, что нейтрино распространяются в сверхновой сферически-симметрично, их функция распределения может быть разделена на энергетическую и угловую части, а максимум углового распределения соответствует радиальному направлению. Отметим, что данные предположения в целом достаточно хорошо выполняются в сверхновой.

Построение приближений основывалось на результатах численного одномерного моделирования распространения нейтрино в сверхновой с помощью кода Prometheus-Vertex, самосогласованного с гидродинамикой взрыва [1]³. Использовались данные по шести моделированиям для предсверхновых 11.2, 13.8, 15, 17.8, 20.6 и 25 солнечных масс. Проводилась проверка указанных выше

³ <https://www.mpa.mpg-garching.de/ccsnarchive/archive.html>

предположений о функции распределения нейтрино. Области сверхновой, в которых они нарушались, исключались из дальнейшего рассмотрения. В качестве приближений рассматривалось по три варианта для энергетического и углового распределения нейтрино.

В ходе исследования получены локальные значения параметров для всех модельных распределений, как функции от времени после взрыва и расстояния от центра сверхновой. Показано, что наиболее точным для описания энергетической части функции распределения нейтрино во внутренней части сверхновой является ферми-подобное [2]. Угловая часть распределения наиболее близка к линейному по косинусу угла между импульсом нейтрино и радиальным направлением. Полученные результаты согласуются с тем, что в самой внутренней части сверхновой нейтрино находятся практически в локальном термодинамическом равновесии со средой. А в более внешней части их распространение хорошо описывается диффузионным приближением.

Литература

1. Huedephohl L. Neutrinos from the formation, cooling, and black hole collapse of neutron stars // PhD Thesis, Tech. Univ. of Munich. 2014. 141 p.
2. Janka H.-T., Hillebrandt W. Neutrino emission from type II supernovae: an analysis of the spectra // Astron. Astrophys. 1989. Vol. 224. P. 49–56.

Approximation for neutrino distribution function in core-collapse supernova interior

Е. А. КОПТЫАЕВА

Supervisor – Associate Professor I. S. Ognev

P. G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia

Abstract In this paper we consider a set of variants of four-parameter analytical approximations of the local nonequilibrium neutrino distribution function in the core-collapse supernova interior. To evaluate their accuracy, the results of one-dimensional modeling of neutrino propagation in a supernova, self-consistent with the hydrodynamics of the explosion are used. It is shown that in the supernova interior the most accurate is the Fermi-like approximation for the neutrino energy distribution. Its angular part in this region agrees well with the linear approximation. Local values of the neutrino distribution parameters as a function of time after bounce and radial distance are obtained.

Keywords: core-collapse supernova, neutrino angular distribution, neutrino energy distribution.

ГЕНЕРАЦИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НЕЙТРИННЫМ ПОТОКОМ

В. А. КОРНЕВА

*Научный руководитель – проф. Д. А. Румянцев
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова,*

Ярославль, Россия

khorneva.thph@gmail.com

Аннотация. Исследуется возможность генерации магнитного поля за счет неоднородного распределения нейтрино в потоке и в присутствии нейтральной электрон-ионной плазмы.

Ключевые слова: магнитное поле, джет, пондеромоторная сила, нейтрино.

Исследования образования и распространения джетов, которые присутствуют в некоторых астрофизических объектах, таких, как черные дыры, молодые звезды, нейтронные звезды, гамма-всплески и сверхновые, проводятся достаточно давно и до сих пор остаются актуальными. Джет — это коллимированный поток плазмы, жидкости или газа, который несет часть энергии, импульса и углового момента источника. Образование и распространение джетов связано с магнитным полем. За счет энергии вращения ускоряющей системы создается азимутальное магнитное поле, которое выбрасывает частицы плазмы. При этом коллимированная струя коллапсирующего ядра сверхновой будет представлять собой быстро вращающуюся плазму, пронизанную магнитным полем.

Источники джетов обычно отождествляются с ядрами активных галактик (особенно радиогалактики и квазары), черными дырами и нейтронными звездами. Длина джета может достигать нескольких тысяч и даже нескольких сотен тысяч световых лет, рекорд — почти 1,5 миллиона световых лет. Если скорость струи близка к скорости света, то эффекты специальной теории относительности значительны; например, релятивистское излучение изменит видимую яркость луча. С другой стороны, для поддержания такой крупномасштабной конфигурации необходима эффективная генерация магнитного поля [1,2].

В джете нейтрино интенсивно взаимодействует с электронами и ионами, что приводит к изменению дисперсии нейтрино и возникновению дополнительной (пондеромоторной) силы с плотностью

$$\vec{f} = -\frac{1}{4\pi}[\vec{B} \times [\vec{\nabla} \times \vec{B}]] = \frac{2\sqrt{2}G_F n_0}{4\pi} \sum_{k\nu} \frac{1}{k_\nu} \vec{\nabla} \langle |\mathcal{W}_{k\nu}|^2 \rangle, \quad (1)$$

где n_0 — средняя концентрация электронов в джете, G_F — константа Ферми, $\vec{B}$ — индукция магнитного поля,

$$\sum_{k_\nu} \frac{1}{k_\nu} \bar{\nabla} \langle |W_{k_\nu}|^2 \rangle = \frac{4\pi}{\langle \omega_\nu \rangle} W_0 e^{-r^2/r_0^2} \quad (2)$$

— распределение интенсивности ансамбля пучков нейтрино со случайной фазой, W_0 — некоторая постоянная, k_ν — импульс нейтрино, $\langle \omega_\nu \rangle$ — средняя энергия нейтрино в джете, r_0 — радиус джета. Используется система единиц, в которой $\hbar = c = 1$, m — масса электрона, $e > 0$ — элементарный заряд. Интерес представляет генерация азимутальной компоненты B_ϕ магнитного поля, предполагая, что компонента B_z мала по сравнению с собственным полем джета. В этом случае, интегрируя (1) с учетом (2), получим:

$$B_\phi^2 = \frac{4\sqrt{2}eG_F n_0}{m\langle \omega_\nu \rangle} W_0^2 r_0^2 (1 - e^{-r^2/r_0^2}). \quad (3)$$

Из выражения видно, что существует возможность генерации дополнительного магнитного поля в джете за счет ponderomotive силы случайно распределенных неоднородных пучков нейтрино. Получен явный профиль для спонтанно сгенерированного стационарного поля. Можно предположить, что предложенная модель генерации магнитных полей может быть успешно использована для понимания происхождения первичных магнитных полей в ранней Вселенной.

Литература

1. Bingham R. et al. Nonlinear scattering of neutrinos by plasma waves: a ponderomotive force description // *Physics Letters A*. 1996. Vol. 220. P. 107–110.
2. Shukla P. K. et al. Generation of magnetic fields by nonuniform neutrino beams // *Physics Letters A*. 1997. Vol. 223. P. 181–183.

Magnetic field generation by neutrino flux

V. A. KORNEVA

Supervisor – Professor D. A. Rumyantsev

P. G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia

Annotation. It is investigated how the magnetic field is generated due to the inhomogeneous distribution of neutrinos in a flow and in the presence of a neutral electron-ion plasma.

Keywords: magnetic field, jet, ponderomotive force, neutrino

СТЕРИЛЬНЫЕ НЕЙТРИНО: ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВАНИЯ И ВОЗМОЖНОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ РЕГИСТРАЦИИ

Д. И. КУЗЬМИЦКИЙ

*Научный руководитель – проф. А. В. Кузнецов
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова,
Ярославль, Россия
danilikuz11@gmail.com*

Аннотация. Обсуждается феноменология стерильного нейтрино, причины и способы его введения в теорию как возможное расширение Стандартной Модели, а также эксперименты, впервые указавшие на необходимость его введения.

Ключевые слова: стерильные нейтрино, нейтринные эксперименты, нейтринные детекторы, расширения Стандартной Модели, осцилляции нейтрино.

«Стерильным нейтрино» называют гипотетический правый фермион, не участвующий в фундаментальных взаимодействиях кроме гравитационного, и, соответственно, истинно нейтральный по отношению к калибровочной группе $SU(3)_C \times SU(2)_W \times U(1)_Y$. В целом Стандартная Модель не запрещает его существование, но в эксперименте он напрямую пока не наблюдался.

Необходимость введения стерильного нейтрино возникла из аномальных результатов экспериментов LSND и MiniBooNE, направленных на поиск нейтринных осцилляций. В качестве объяснения этих аномалий были предложены модели, в которых присутствует стерильное нейтрино, которое, смешиваясь с флейворными состояниями, создаёт свой вклад в измеряемый поток.

Расширение Стандартной Модели путём добавления стерильных нейтрино реализуется по крайней мере двумя способами: введением частицы дираковского или майорановского типа [1-6]. Кроме этого, выбор интервала масс вводимой частицы позволяет решать различные задачи. Например, стерильные нейтрино массой до 10 кэВ рассматриваются как кандидаты в тёплую тёмную материю, а более тяжёлые частицы, находящиеся в интервале масс от 10^2 ГэВ до верхнего предела 10^{15} ГэВ, могут быть ответственны за барионную асимметрию Вселенной. Практически более интересным может быть лёгкий сектор, так как на Большом адронном коллайдере становится возможным детектировать нейтрино с массой до 1 ТэВ.

Модель дираковского нейтрино включает в лагранжиан Стандартной Модели массовое слагаемое вида

$$\bar{\nu}_L m_D \nu_R + h.c. \quad (1)$$

Это удобно тем, что вместо добавления новых частиц возникают лишь дополнительные спиновые состояния для лёгких нейтрино и антинейтрино, которые могут быть соединены в спинор

$$\Psi_\nu \equiv U_\nu^\dagger \nu_R + U_\nu^\dagger \nu_L. \quad (2)$$

В модели с майорановским нейтрино вводится массовое слагаемое вида

$$\bar{\nu}_L m_\nu \nu_L^c + h.c., \quad (3)$$

добавляющее новую степень свободы и тем самым нарушающее калибровочную инвариантность теории.

В настоящее время в нескольких лабораториях ведется и планируется целый ряд экспериментов, которые, возможно, ответят на вопросы о существовании и физических характеристиках стерильного нейтрино.

Литература

1. Drewes M. The phenomenology of right handed neutrinos // *Int. J. Mod. Phys. E* 2013. V. 22, No. 8. P. 1330019.
2. Горбунов Д. С. Стерильные нейтрино и их роль в физике частиц и космологии // *УФН*. 2014. Т. 184, № 5. С. 545-554.
3. Abazajian K. N. Sterile neutrinos in cosmology // *Phys. Rep.* 2017. V. 711–712. P. 1–28.
4. Boyarsky A., Drewes M., Lasserre T. *et al.* Sterile neutrino dark matter // *Prog. Part. Nucl. Phys.* 2019. V. 104. P. 1–45.
5. Dasgupta B., Kopp J. Sterile neutrinos // *Phys. Rep.* 2021. V. 928. P. 1-63.
6. Acero M. A., Argüelles C. A., Hostert M. *et al.* White paper on light sterile neutrino searches and related phenomenology // arXiv: 2203.07323 [hep-ex].

Sterile neutrino: theoretical foundations and possibilities for direct experiments

D. I. KUZMITSKY

Supervisor – Professor A. V. Kuznetsov

P. G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia

Abstract. The phenomenology of the sterile neutrino, the causes and methods of its introduction into the theory as a possible extension of the Standard Model, as well as experiments that for the first time indicated the need for its introduction are discussed.

Keywords: sterile neutrinos, neutrino experiments, neutrino detectors, extensions of the Standard Model, neutrino oscillations.

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ СЕЧЕНИЕ КОМПТОН-ЭФФЕКТА В ВИДЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПО ЭНЕРГИЯМ И ПО УГЛАМ ВЫЛЕТА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В ПРОИЗВОЛЬНОЙ СИСТЕМЕ ОТСЧЁТА Е. В. ЛОЗИНА

*Научный руководитель – проф. А. В. Кузнецов
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова,
Ярославль, Россия
catherine.lozina77@gmail.com*

Аннотация. Анализируется возможность существования взаимосвязи высыпаний заряженных частиц из радиационного пояса Земли, зарегистрированных детектором PAMELA, и космических гамма-всплесков. Это совпадение может быть вызвано комптоновским рассеянием гамма-кванта на электроны. Рассчитано дифференциальное сечение рассеяния в произвольной системе отсчёта в виде распределений конечных электронов по энергиям и углам вылета.

Ключевые слова: гамма-всплеск, радиационный пояс, высыпания заряженных частиц, PAMELA, эффект Комптона.

Целью работы является попытка объяснения совпадений гамма-всплесков и увеличений потока заряженных частиц, зарегистрированных детектором PAMELA. Эксперимент PAMELA [1] был посвящён наблюдениям первичных космических лучей.

Гамма-всплески — это кратковременные выбросы космического гамма-излучения с энерговыделением 0.1–1 МэВ [2].

Радиационные пояса Земли — это области магнитосферы, где накапливаются и удерживаются заряженные частицы. Они представляют собой тороиды: внутренний на высоте ≈ 4000 км, состоящий в основном из протонов с энергией в десятки МэВ, и внешний радиационный пояс на высоте $\approx 17\,000$ км из электронов с энергией в десятки кэВ.

Обработка данных PAMELA за отрезки времени, соответствующие десяти гамма-всплескам, показала, что для трёх из них обнаружены высыпания из радиационных поясов Земли [3].

Было высказано предположение, что совпадение гамма-всплесков и увеличения потока заряженных частиц вызвано рассеянием гамма-кванта на электроны (эффектом Комптона) $\gamma + e^- \rightarrow \gamma + e^-$. Мы рассчитали дифференциальное сечение рассеяния в виде распределений конечных электронов по энергиям и углам вылета в системе покоя начального электрона:

$$\frac{d\sigma}{dE'd\Omega'} = \frac{p'}{(8\pi)^2 m \omega \omega'} \delta(\omega + m - \omega' - E') \Sigma |M|^2. \quad (1)$$

Рассмотренный процесс в таком приближении не позволяет полностью объяснить экспериментальный результат, поскольку

интенсивности гамма-излучения с энергиями выше десятков МэВ оказывается недостаточно для объяснения наблюдаемой в эксперименте PAMELA величины превышения сигнала над фоном.

Мы вычислили дифференциальное сечение Комптон-эффекта в виде распределения по углам вылета конечных электронов в произвольной системе отсчёта:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega'} = \frac{1}{2(4\pi)^2(S - m^2)} \Sigma |M|^2 \frac{p'^2}{Q_0 p' - E' |Q| \cos \alpha}. \quad (2)$$

Планируется выполнить численный расчёт потока заряженных частиц за счёт указанного механизма с учётом спектра γ -квантов в γ -всплеске и распределения электронов внешнего радиационного пояса Земли по энергиям и параметру магнитной оболочки Мак-Илвейна.

Литература

1. Adriani O., Barbarino G. C. et al. The PAMELA Mission: Heralding a new era in precision cosmic ray physics // *Physics Reports*. 2014. V. 554. P. 323-370.
2. Постнов К. А. Космические гамма-всплески // *Успехи физических наук*. 1999. Т. 169, № 5. С. 545-558.
3. Morozova D. N., Mayorov A. G. Search for the relationship between particle precipitation from the Earth's radiation belt and cosmic gamma-ray bursts // *Physics of Atomic Nuclei*. 2021. V. 84, No. 9. P. 1636–1640.

Differential cross section of Compton effect in the form of distributions by energy and angles emission of final electrons in arbitrary reference frame

E. V. LOZINA

Supervisor – Professor A. V. Kuznetsov

P. G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia

Abstract. The possibility of the existence of a relationship between the eruptions of charged particles from the Earth's radiation belt, recorded by the PAMELA detector, and cosmic gamma-ray bursts is analyzed. This coincidence may be caused by the Compton scattering of a photon on an electron. The differential scattering cross section in an arbitrary reference frame is calculated in the form of distributions of finite electrons in terms of energies and departure angles.

Keywords: gamma-ray burst, radiation belt, precipitation of charged particles, PAMELA, Compton effect.

ПЕРЕХОДНЫЕ ФОРМФАКТОРЫ В ПОЛУЛЕПТОННОМ РАСПАДЕ $B^0 \rightarrow \phi \ell^+ \ell^-$ И. М. ПАНЧЕНКО

*Научный руководитель – доц. А. Я. Пархоменко
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова,
Ярославль, Россия
parnova.irina@yandex.ru*

Аннотация. Рассматриваются стандартное и альтернативное определения формфакторов перехода $B \rightarrow V$, где V – векторный мезон, а также определение дифференциальной вероятности распада $B \rightarrow V \ell^+ \ell^-$ в рамках теории с альтернативными формфакторами. Обсуждается применение этого формализма к исследованию аннигиляционного распада $B^0 \rightarrow \phi \ell^+ \ell^-$.

Ключевые слова: Стандартная модель, редкий распад, эффективный гамильтониан, переходный формфактор, векторный мезон.

В Стандартной модели (СМ) нейтральные токи, изменяющие аромат кварков, определяют редкие полулептонные распады B -мезонов, которые являются хорошим инструментом для проверки правильности СМ, а также поиска возможной «Новой физики». Редкие распады B -мезонов, идущие за счет $b \rightarrow s$ тока, такие, как $B^{\pm,0} \rightarrow K^{\pm,0} \ell^+ \ell^-$ и $B_s^0 \rightarrow \phi \ell^+ \ell^-$, где $\ell = e, \mu, \tau$, достаточно хорошо изучены теоретически и экспериментально, а именно, теоретические предсказания их полных и дифференциальных ширин распада согласуются с измеренными. Среди распадов B -мезонов с рождением векторных ϕ , ρ и ω мезонов представляют интерес чисто аннигиляционные распады, которые являются предметом поисков коллаборациями LHCb на БАК и Belle-II на SuperKEKB. Недавние экспериментальные результаты в этой области — это ограничение на полную вероятность распада $\text{Br}(B^0 \rightarrow \phi \gamma) < 1.0 \times 10^{-7}$, полученное Belle в 2016 году [1], а также на полную вероятность распада $\text{Br}(B^0 \rightarrow \phi \ell^+ \ell^-) < 3.2 \times 10^{-9}$, полученное LHCb в 2022 году [2].

Ширины этих распадов могут быть вычислены теоретически с использованием эффективного электрослабого гамильтониана. При этом вводятся матричные элементы адронных переходов, которые выражаются через независимые формфакторы. Определения векторного и тензорного матричных элементов $B \rightarrow V$ перехода следующие [3]:

$$\langle V(k, \varepsilon(k)) | \bar{q} \gamma^\mu b | B(p) \rangle = i \varepsilon_{\mu\nu\rho\delta} \varepsilon^{*\nu}(k) p^\rho k^\delta \frac{2V(q^2)}{(m_B + m_V)}, \quad (1)$$

$$\langle V(k, \varepsilon(k)) | \bar{q} \sigma_{\mu\nu} q^\nu b | B(p) \rangle = -\varepsilon_{\mu\nu\rho\delta} \varepsilon^{*\nu}(k) p^\rho k^\delta 2T_1(q^2), \quad (2)$$

где $\varepsilon(k)$ — вектор поляризации векторного мезона, k и p — импульсы V - и B -мезонов соответственно, q — передаваемый в переходе импульс.

Всего вводится 7 формфакторов перехода: $V(q^2)$ характеризует переход за счет векторного тока (1), $T_1(q^2)$ — за счет тензорного тока (2), псевдовекторный переход определяется тремя формфакторами $A_{0,1,2}(q^2)$, а псевдотензорный переход — двумя $T_{2,3}(q^2)$. Определения пяти последних можно найти в [3].

Помимо стандартного определения, существует альтернативное, которое позволяет записывать амплитуды в более компактном виде. При этом новые формфакторы $B_{V,\sigma}(q^2)$ и $B_{T,\sigma}(q^2)$ являются линейными комбинациями общепринятых [4]. Выраженная через них дифференциальная вероятность распада $B \rightarrow V\ell^+\ell^-$ имеет следующий вид:

$$\frac{d\Gamma}{dq^2 d\cos\theta} = \frac{3}{8} \mathcal{N}^2 [(1 + \cos^2\theta) H_T(q^2) + 2 \cos\theta \cdot H_A(q^2) + 2(1 - \cos^2\theta) \cdot H_L(q^2)], \quad (3)$$

где $\mathcal{N} = |V_{tb}V_{td}^*| \cdot [(G_F^2 \alpha_{em}^2)/(3 \cdot 2^{10} \pi^5 m_B^3) \cdot \lambda^{3/2}]^{1/2}$, а функции $H_{T,A,L}(q^2)$ выражаются через коэффициенты Вильсона и переходные формфакторы. Данный подход может быть использован при теоретическом анализе аннигиляционного распада $B^0 \rightarrow \phi\ell^+\ell^-$ для учета вкладов всех диаграмм на древесном уровне, а также анализа ω - ϕ смешивания.

Литература

1. King Z. et al. (Belle Collaboration). Search for the decay $B^0 \rightarrow \phi \gamma$ // Phys. Rev. 2016. Vol. D93. P. 111101.
2. Aaij, R. et al. (LHCb collaboration). Search for the decay $B^0 \rightarrow \phi\mu^+\mu^-$ // J. High Energy Phys. 2022. Vol. 05. P. 067.
3. Beneke M., Feldmann T. Symmetry breaking corrections to heavy-to-light B -meson form-factors at large recoil // Nucl. Phys. 2001. Vol. B592. P. 3–34.
4. Bharucha A., Feldmann T., Wick M. Theoretical and Phenomenological Constraints on Form Factors for Radiative and Semi-Leptonic B -Meson Decays // J. High Energy Phys. 2010. Vol. 1009. P. 090.

Transition form factors in $B^0 \rightarrow \phi\ell^+\ell^-$ decay

I. M. PANCHENKO

Supervisor – Associate Professor A. Ya. Parkhomenko

P. G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia

Abstract. Standard and alternative definitions of $B \rightarrow V$ transition form factors, where V is a vector meson, and a determination of the $B \rightarrow V\ell^+\ell^-$ differential decay width using alternative form factors are considered. A possible application of this formalism to study the annihilation $B^0 \rightarrow \phi\ell^+\ell^-$ decay is discussed.

Keywords: Standard Model, rare decay, effective Hamiltonian, transition form factor, vector meson.

ТРОЙНОЙ АЛЬФА-ПРОЦЕСС И РЕЗОНАНС ХОЙЛА

Т. Д. РУМЯНЦЕВ

*Научный руководитель- проф. А. В. Кузнецов
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова
Ярославль, Россия*

t.rumyancev@stud.uniya.ac.ru

Аннотация. Рассмотрен синтез ядер углерода-12 и кислорода-16 в условиях центральной части звезды первого поколения. Сформулирована система уравнений для массовых долей ядер гелия-4, углерода-12 и кислорода-16, выполнено их численное решение. Результат представлен в виде графика.

Ключевые слова: ядерная астрофизика, синтез углерода, тройной альфа-процесс, возбуждённый уровень ядра.

Согласно теории Большого взрыва, элементный состав Вселенной в возрасте около двадцати минут (конец эпохи первичного нуклеосинтеза) был следующий: около 3/4 водорода, около 1/4 гелия-4, и ничтожные количества дейтерия, гелия-3 (около 10^{-5}) и лития-7 (около 10^{-10}). Согласно данным ядерной астрофизики по распространённости элементов, в настоящее время существенную долю, после водорода и гелия-4, составляют ядра углерода-12 (около 0.39% по массе) и кислорода-16 (около 0.85%). Состав ядра углерода-12 указывает, что оно может получаться соединением трёх α -частиц — ядер гелия-4. Однако такое тройное столкновение α -частиц имеет крайне малую вероятность. Как показал Э. Солпитер [1, 2], вначале должны соединиться две α -частицы, образовав ядро бериллия-8, которое затем поглощает третью α -частицу. Но этот изотоп бериллия крайне нестабилен, время жизни ядра составляет около 10^{-16} с. Тем не менее, в условиях центра массивной звезды, при плотности $10^4 \div 10^6$ г/см³ и температуре $\sim 10^8$ К, наступает равновесие в реакции $\alpha + \alpha \leftrightarrow {}^8\text{Be}$ и образуется очень малая доля бериллия-8, на уровне 10^{-10} по массе по отношению к ядрам ${}^4\text{He}$. Но сечение реакции $\alpha + {}^8\text{Be} \rightarrow {}^{12}\text{C}$ оказалось слишком мало для объяснения наблюдаемой распространённости ${}^{12}\text{C}$. Как показал Ф. Хойл, необходимо существование возбуждённого уровня ядра углерода, ${}^{12}\text{C}^*$, для того, чтобы указанная реакция имела резонансный характер, при котором сечение возрастает на 7-8 порядков. При этом подавляющее большинство рождающихся возбуждённых ядер ${}^{12}\text{C}^*$ распадается обратно на три α -частицы, и только одно из примерно 2200 ядер, испуская два γ -кванта или, гораздо реже, электрон-позитронную пару, переходит в стабильное ядро ${}^{12}\text{C}$. Именно эти ядра и составляют углерод Вселенной. Группа физиков-ядерщиков под руководством У. Фаулера проверила гипотезу Ф. Хойла и действительно обнаружила

возбуждённое состояние $^{12}\text{C}^*$ с нужными характеристиками. Это, возможно, единственный пример предсказания, на основе данных из космологии и астрофизики, существования возбуждённого ядерного уровня.

В настоящей работе воспроизведена система уравнений [1] для массовых долей гелия-4, углерода-12 и кислорода-16, выполнено их численное решение, результат для одного из наборов начальных значений плотности и температуры представлен на рис. 1.

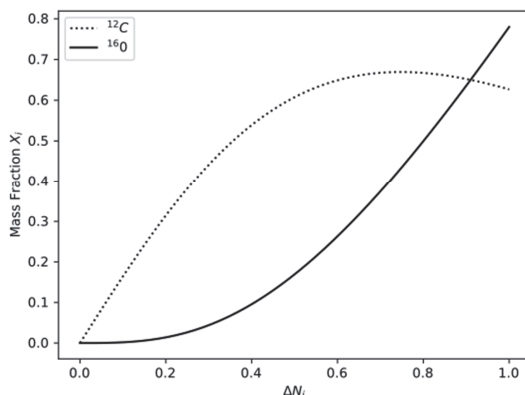


Рисунок 1 – Зависимость массовых долей ^{12}C и ^{16}O от остатка ^4He .

Литература

1. Iliadis C. Nuclear Physics of Stars / C. Iliadis. Wiley-VCH. 2015. 672 p.
2. Иванов В. В. Физика звезд / В. В. Иванов. Санкт-Петербург. 2018. 539 с.

Triple alpha process and Hoyle resonance

T. D. RUMYANTSEV

Supervisor – Professor A. V. Kuznetsov

P. G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia

Abstract. Synthesis of carbon-12 and oxygen-16 nuclei in the conditions of the central part of the first generation star is considered. A system of equations has been formulated for the mass fractions of helium-4, carbon-12 and oxygen-16, and their numerical solution has been performed. The result is presented as a graph.

Keywords: nuclear astrophysics, carbon synthesis, triple alpha process, excited nucleus level.

**ПРОЦЕСС $\gamma \rightarrow e^+ e^-$ В ПРЕДЕЛАХ СИЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ
И БОЛЬШОГО ДИНАМИЧЕСКОГО ПАРАМЕТРА**
А. А. САБИТОВ

*Научный руководитель – проф. А. А. Гвоздев
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова,
Ярославль, Россия
a.sabitov1@uniyar.ac.ru*

Аннотация. В работе рассматриваются предельные случаи для процесса аннигиляции фотона в электрон-позитронную пару в произвольном по напряженности магнитном поле.

Ключевые слова: магнитар, магнитосфера пульсара, аннигиляция фотона.

Известно, что рассматриваемая реакция играет ключевую роль в процессе формирования излучения в полярных шапках нейтронных звезд [1]. Ранее, нами было получено общее выражение для вероятности данного процесса в произвольном магнитном поле. В настоящей работе мы изучаем поведение этой вероятности в двух предельных случаях:

$$(q_{\perp}^2)/eB \ll 1, \quad (1)$$

$$\chi^2 = (eB/m^2)^2 \cdot \frac{q_{\perp}^2}{m^2} \gg 1. \quad (2)$$

В пределе сильного поля (1) электрон и позитрон находятся на основном уровне Ландау $n = n' = 0$. В этом случае фотон первой моды не распадается. Для вероятности распада фотона моды два нетрудно получить следующее выражение:

$$\left(W_{\gamma^{(2)} \rightarrow e^+ e^-}^{(2)} \cdot \omega \right)_{n=n'=0} = Z^{(2)}(q) \cdot \frac{4\alpha \cdot (eB) \cdot m^2 \cdot \theta(q_{\parallel}^2 - 4m^2)}{\sqrt{q_{\parallel}^2 (q_{\parallel}^2 - 4m^2)}} \cdot e^{-\frac{q_{\perp}^2}{2eB}}. \quad (3)$$

Это выражение совпадает с приведенным в [2].

В пределе большого динамического параметра (2) вероятность распада запишется в форме интеграла:

$$W^{(1,2)} \cdot \omega \simeq \frac{\alpha m^2}{3\sqrt{3}\pi} \int_1^{\infty} \frac{(2v+1)[2v-1\mp 1] \cdot K_{2/3}(y)}{v\sqrt{v(v-1)(2v-1)}} dv, \quad y \equiv \frac{8}{3\chi} v, \quad (4)$$

вычислять который удобно численно. Приведем здесь оценку интеграла:

$$W^{(1,2)} \simeq \alpha m^2 \chi^{\frac{2}{3}} \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{6^{4/3}} \frac{1}{\Gamma(1/3)} \cdot A^{(1,2)}, \quad (5)$$

характеризуемую числовой константой

$$A^{(1,2)} \leq \int_1^\infty \frac{dv}{v^{13/6}} \frac{(2v+1)(2v-1 \mp 1)}{\sqrt{(v-1)(2v-1)}}. \quad (6)$$

Отметим, что полученное выражение согласуется с [3]. Необходимо отметить также, что нами получено оценка сверху числа $A^{(1,2)}$ в (6) и требуется более аккуратный анализ (4) для определения значения этой константы. Помимо этого, в работе обсуждается поведение перенормировочных функций $Z^{(1,2)}$ в малых окрестностях вблизи точек циклотронного резонанса.

Литература

1. Song H. H., Tamburini M. Polarized QED cascades over pulsar polar caps // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2024. Vol. 530, No. 2. P. 2087-2095.
2. Kuznetsov A. Electroweak processes in external electromagnetic fields / A. Kuznetsov, N. Mikheev. Springer Tracts in Modern Physics. Vol. 197. New York : Springer-Verlag, 2003. 120 p.
3. Ритус В. И., Никишов А. И. Квантовая электродинамика явлений в интенсивном поле // Труды ФИАН. 1979. Т. 111. С. 497-618.

Process $\gamma \rightarrow e^+e^-$ in strong magnetic field at large values of dynamic parameter

A. A. SABITOV

Supervisor – Professor A. A. Gvozdev

P. G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia

Abstract. Limiting cases for the process of photon annihilation into an electron-positron pair in a magnetic field of arbitrary strength are considered.

Keywords: magnetar, pulsar magnetosphere, photon annihilation.

ЗАТУХАНИЕ КВАНТОВАННОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ В ЗАМАГНИЧЕННОЙ ПЛАЗМЕ

Д. В. СОКОВ

*Научный руководитель – проф. Д. А. Румянцев
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова,
Ярославль, Россия
sdensok@mail.ru*

Аннотация. Рассматривается распространение квантованной электромагнитной волны (фотона) в сильно замагниченной плазме с учетом ее возможного затухания, в зависимости от угла распространения по отношению к магнитному полю. Проводиться анализ коэффициента затухания фотона.

Ключевые слова: затухание фотона, сильно замагниченная плазма, циклотронный резонанс.

Рассмотрим квантованную электромагнитную волну, распространяющуюся в области занятой сильно замагниченной плазмой. В такой плазме все электроны и позитроны будут занимать преимущественно нулевой и первый уровни Ландау. Как было показано в [1], фотон в сильном магнитном поле, и тем более в замагниченной плазме, может быть нестабильным, т.е. соответствующее квантовое состояние будет эффективно затухать. В настоящий момент известно 3 основных подхода [1–3] к описанию затухания фотона с основным параметром, соответствующим коэффициенту затухания γ_{eff} . В первом подходе описание производится с помощью коэффициента затухания, содержащего корневую сингулярность. Данный подход рассмотрен в [1]. Второй подход основан на вычислении полюсной зависимости на втором римановом листе и рассматривается в работе [2]. Третий подход основан на расчете коэффициента затухания с помощью интегрирования по разрезу в комплексной плоскости на первом римановом листе за счет создания специфического источника в начальный момент времени для случая чистого магнитного поля [3] и замагниченной плазмы [4], когда фотон распространяется поперек магнитного поля.

Как отмечено в [4], в сильно замагниченной плазме фотон обладает такими же поляризационными состояниями, как и в чистом магнитном поле с векторами $\varepsilon_{\alpha}^{(1)}$ и $\varepsilon_{\alpha}^{(2)}$. Численный анализ коэффициента затухания для фотона моды 1 для величины магнитного поля $B = 200B_e$ ($B_e = \frac{m^2}{e} = 4.41 \cdot 10^{13}$ Гс — критическое значение поля) и температуры при нулевом химическом потенциале $T = 1$ МэВ (m — масса электрона, e — элементарный заряд) представлен на рис. 1 в зависимости от

эффективной энергии фотона и различных углов между импульсом фотона и направлением магнитного поля ($\hbar = c = k_B = 1$).

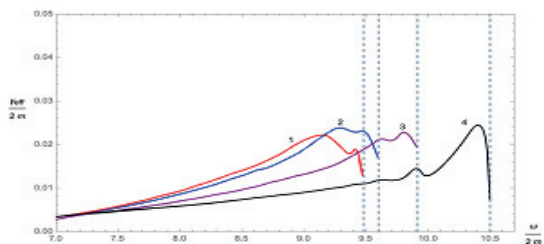


Рисунок 1– Зависимость γ_{eff} от ω при $B = 200B_e$, $T = 1$ МэВ для разных углов θ : кривая 1 - коэффициент затухания для $\theta = 90^\circ$; кривая 2 - коэффициент затухания для $\theta = 80^\circ$; кривая 3 - коэффициент затухания для $\theta = 70^\circ$; кривая 4 - коэффициент затухания для $\theta = 60^\circ$.

Как видно из рис. 1 при изменении угла распространения квантованной электромагнитной волны (фотона), по отношению к магнитному полю происходит существенное смещение циклотронных резонансов, однако при этом коэффициент затухания изменяется незначительно.

Литература

1. Клепиков Н. П. Излучение фотонов и электрон-позитронных пар в магнитном поле // ЖЭТФ. 1954. Т. 26, № 1. С. 19–34.
2. Шабад А. Е. Поляризация вакуума и квантового релятивистского газа во внешнем поле // Тр.ФИАН СССР “Поляризационные эффекты во внешних калибровочных полях”. 1988. Т. 192. С. 5-152.
3. Михеев Н. В., Чистяков М. В. Затухание фотона в результате рождения электрон-позитронной пары в сильном магнитном поле // ЖЭТФ. 2001. Т. 73, № 12. С. 726–730.
4. Rumyantsev D. A., Chistyakov M. V., Yarkov A. A. Photon damping in strongly magnetized plasma // Physics of Atomic Nuclei. 2022. Vol. 85, No. 9. P. 1566-1569.

Damping of quantum electromagnetic wave in magnetized plasma

D. V. SOKOV

Supervisor – Professor D. A. Rumyantsev

P. G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia

Abstract. The propagation of a quantized electromagnetic wave (photon) in a strongly magnetized plasma is considered, taking into account its possible damping, depending on the propagation angle relative to the magnetic field. The photon damping coefficient is analyzed.

Keywords: photon damping, strongly magnetized plasma, cyclotron resonance.

ДИНАМИКА ТЯЖЕЛОГО ДИКВАРКА В ДВАЖДЫ ТЯЖЕЛОМ БАРИОНЕ**А. С. ХУДОВА**

*Научный руководитель – доц. А. Я. Пархоменко
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова,
Ярославль, Россия*

annakhudova394@gmail.com

Аннотация. Приближение Борна-Оппенгеймера может быть использовано для дважды тяжелых барионов, так как они являются аналогом положительно заряженного иона молекулы водорода. Расчеты показывают, что энергия связи в дважды тяжелом дикварке, входящем в барион, не имеет минимума и для нахождения массы бариона требуется учесть динамику кварков в дикварке

Ключевые слова: ион молекулы водорода, дважды тяжелый барион, уравнение Шредингера, приближение Борна-Оппенгеймера, динамика ядер.

Приближение Борна-Оппенгеймера, в котором тяжелые степени свободы считаются статическими источниками внешнего поля и динамика системы полностью определяется легкими степенями свободы, обычно используется для расчета энергии связи в молекулах или их ионах, где тяжелые степени свободы — ядра атомов, а легкие — электроны [1–4]. При решении задачи о нахождении энергии связи положительно заряженного иона молекулы водорода с учетом динамики ядер получается уравнение Шредингера, решение которого возможно найти численными методами. Выражение для энергии с учетом динамики протонов содержит в себе энергию связи электрона в ионе, которая была найдена с помощью вариационного метода Ритца. Согласно этому методу волновые функции задаются в явном виде и выражаются через радиус первой боровской орбиты, вариационный параметр Ритца и расстояние от электрона до ядра. Связанное состояние наблюдается только у иона с симметричной координатной волновой функцией. Энергия связи такого состояния 15.9 эВ при расстоянии между ядрами 10.6 нм.

Дважды тяжелые барионы, в состав которых входят дважды тяжелый дикварк — система из двух тяжелых кварков и один легкий кварк [5], представляют собой аналог положительно зараженного иона молекулы водорода. Два тяжелых кварка являются аналогами протонов, а легкий кварк эквивалентен электрону. Отличие барионов от ионов в том, что внешнее поле кварков имеет не электромагнитную, а сильную природу. Тем не менее, приближение Борна-Оппенгеймера можно также использовать для расчета спектра масс дважды тяжелых барионов. Оператор Гамильтона записывается с учетом того, что операторы

потенциальной энергии взаимодействия между парами кварков – это корнелльские потенциалы [6]. Решение задачи рассматривается на масштабе массы тяжелого дикуарка. Для описания основного состояния бариона используются волновые функции атома водорода также основного состояния. Радиус первой борховской орбиты в случае иона заменяется на радиус тяжелого дикуарка, в единицах которого удобно анализировать расстояние между тяжелыми кварками. Среднее значение оператора Гамильтона для бариона находится вариационным методом Ритца, а энергия связи двух статических тяжелых кварков ищется как минимум средней энергии [6]. Полученное аналитическое выражение исследовано на наличие экстремумов. Связанное состояние с двумя неподвижными тяжелыми кварками не реализуется. Планируется учет динамики тяжелых кварков для нахождения энергии связи и массы ДТБ.

Литература

1. Ландау Л. Д. Квантовая механика (нерелятивистская теория). / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. М. : ФИЗМАТЛИТ. 2016. 800 с.
2. Блохинцев Д. И. Основы квантовой механики. / Д. И. Блохинцев М. : Наука. 1976. 664 с.
3. Давыдов А. С. Квантовая механика. / А. С. Давыдов М. : Наука. 1973. 700 с.
4. Соколов А. А. Квантовая механика. / А. А. Соколов, И. М. Тернов, В. Ч. Жуковский / М. : Наука, 1979. 528 с.
5. Workman R. et al. Review of Particle Physics // PTEP. 2022. Vol. 2022, No. 8. P. 083C01.
6. Maiani L., Polosa A. D., Riquer V. Hydrogen bond of QCD in doubly heavy baryons and tetraquarks // Physical Review D. 2019. Vol. 100. P. 074002. arXiv:1908.03244 [hep-ph]

Dynamics of heavy diquark in doubly heavy baryon

A. S. KHUDOVA

*Supervisor – Associate Professor A. Ya. Parkhomenko
P. G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia*

Abstract. Born-Oppenheimer approximation can be used for doubly heavy baryons, since they are an analog of a positively charged ion of a hydrogen molecule. It is shown that the binding energy in doubly heavy diquark entering the baryon has no minimum and for an evaluating of a baryon mass one should take into account quarks dynamics inside the diquark.

Keywords: hydrogen molecule ion, doubly heavy baryon, Schrodinger equation, Born-Oppenheimer approximation, dynamics of nuclei.

МАССОВЫЕ ПОПРАВКИ В КХД ПРАВИЛАХ СУММ ДЛЯ B_s -МЕЗОНОВ

А. К. ШУХТИНА

*Научный руководитель – доц. А. Я. Пархоменко
Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова,
Ярославль, Россия
aliceshu@yandex.ru*

Аннотация. Для вычисления обратных моментов амплитуды распределения ведущего твиста B_s -мезона использовался пропагатор легкого кварка в форме разложения по глюонному фоновому полю с учетом линейной по массе s -кварка поправки. Изучение вклада более тяжелого c -кварка требует знания точной зависимости поправок в пропагаторе от его массы, что обсуждается в данной работе.

Ключевые слова: кварк, метод собственного времени Фока-Швингера, пропагатор, тяжелый мезон.

Пропагатор кварка играет важную роль в вычислениях характеристик адронов, где требуется его представление в форме, учитывающей влияние непертурбативных эффектов взаимодействия с мягкими глюонами. Это приближение соответствует распространению кварка в фоновом медленно меняющемся глюонном поле и решение уравнения для функции Грина можно записать как операторное разложение по внешнему калибровочному полю. Данная формулировка базируется на использовании метода собственного времени Фока-Швингера, предложенного в рамках квантовой электродинамики [1]. Позднее этот метод был использован в квантовой хромодинамике (КХД) [2]. Технические вопросы применения метода Фока-Швингера и калибровки Фока-Швингера в КХД, а также приложение этого метода к вычислению амплитуд квантовых процессов, можно найти в обзоре [3]. Отметим, что пропагатор кварка в такой форме был использован для нахождения правил сумм КХД для обратных моментов амплитуды распределения лидирующего твиста B_s -мезона [4].

Пропагатор кварка $S(x, y)$ — функция Грина уравнения Дирака [3]:

$$(i\hat{d} + \hat{A}(x) + m) S(x, y) = -i \delta(x - y). \quad (1)$$

В предположении, что поле $A^\mu(x)$ — слабое и произвольным образом ориентировано в пространстве и времени, можно найти решение (1) в виде ряда [3]: $S(x, y) = S_0(x-y) + S_1(x, y) + \dots$, где $S_0(x-y)$ — пропагатор свободного поля, $S_1(x, y)$ — первая поправка, (взаимодействие кварка с одним глюоном), и многоточие относится к поправкам более высокого порядка с двумя и более глюонами. Уравнение для $S(x, y)$ в виде ряда схематично изображено на рис. 1.

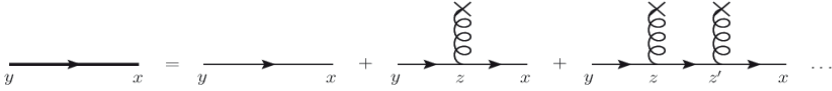


Рисунок 1 – Разложение в ряд по полю глюона пропагатора кварка

Для первой поправки получим:

$$S_1(x, y) = \int d^4 z S_0(x - z) i A^\mu(z) S_0(z - y). \quad (2)$$

Далее, следует зафиксировать калибровку поля глюона в (2), в качестве которой удобно выбрать калибровку Фока-Швингера: $x_\mu A^\mu(x) = 0$. В случае безмассового кварка эта поправка, как впрочем и несколько следующих, вычисляются достаточно просто, однако учет массы кварка существенно усложняет выражение для этой поправки. Более того, наши расчеты, будучи независимой проверкой правильности массовых членов, не согласуются с [4]. Причина различий выясняется.

Литература

1. Schwinger J. S. On gauge invariance and vacuum polarization // Phys. Rev. 1951. Vol. 82. P. 664.
2. Novikov V. A. et. al. Operator expansion in Quantum Chromodynamics beyond perturbation theory // Nucl. Phys. B. 1980. Vol. 174. P. 378.
3. Novikov V. A. et. al. Calculations in External Fields in Quantum Chromodynamics. Technical Review // Fortsch. Phys. 1984. Vol 32. P. 585.
4. Khodjamirian A., Mandal R., Mannel T. Inverse moment of the B_s -meson distribution amplitude from QCD sum rule // JHEP. 2020. Vol. 10. P. 043.
5. Piscopo M. A. Higher order corrections to the lifetime of heavy hadrons // Preprint arXiv:2112.03137[hep-ph].

Mass corrections in QCD Sum Rules for B_s -meson

A. K. SHUKHTINA

*Supervisor – Associate Professor A. Ya. Parkhomenko
P.G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia*

Abstract. To calculate the inverse moments of the B_s -meson leading-twist distribution amplitude, the light-quark propagator as an expansion in a gluon background field is used with an account of a linear correction in the s -quark mass. A contribution of a heavier c -quark requires knowledge of an exact dependence of corrections in the propagator on its mass, which is discussed in this paper.

Keywords: quark, propagator, Fock-Schwinger proper-time formalism, heavy meson.

ДИСПЕРСИЯ ФОТОНОВ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА ПЕРЕХОДЫ В СИСТЕМЕ ИЗ ФОТОНА И АКСИОНА Р. А. ЮРЧЕНКОВ

*Научный руководитель – доц. А. А. Добрынина
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова,
Ярославль, Россия
r.yurchenkov@uniyar.ac.ru*

Аннотация. Рассмотрен вопрос о модификации закона дисперсии фотонов ТэВ-ных энергий при их рассеянии на фотонах среды и оценке роли измененного закона дисперсии для описания осцилляций системы из фотонов и аксионоподобных частиц. В качестве рассеивающих центров (фотонов среды) были рассмотрены следующие источники: реликтовое излучение, галактические магнитные поля, излучение от аккрецирующих объектов.

Ключевые слова: фотон, аксионоподобная частица, фотон-фотонное взаимодействие, фотон-аксионные осцилляции.

Фотоны больших энергий $\omega > 100$ ГэВ испускаются удаленными источниками — активными ядрами галактик. Экспериментально они детектируются различными установками, такими как H.E.S.S., космический гамма-телескоп Ферми, MAGIC и другие. Поток гамма-лучей очень высокой энергии от удаленных источников ослабляется из-за взаимодействия с фоновым излучением, существующим во Вселенной. Основным способом поглощения ТэВ-ных фотонов электромагнитным фоном является процесс рождения электрон-позитронной пары. В 2006 году коллаборация H.E.S.S. произвела сравнение теоретических расчетов спектров удаленных источников с полученными данными и обнаружила расхождение между ними. Полученное расхождение получило название проблема «прозрачности Вселенной для гамма-лучей».

Как показал анализ, переход фотона в аксионоподобную частицу помогает решить проблему прозрачности Вселенной для фотонов очень высокой энергии.

Распространение фотонов и аксионоподобных частиц, а также их переходы друг в друга, можно описать, воспользовавшись аналогией с нейтринными осцилляциями [1, 2]. Считаем, что распространение фотона и аксиона происходит в направлении оси Ox и только поперечную составляющую магнитного поля B_T следует учесть при смешивании аксионного и фотонного полей:

$$-i\partial_x \begin{pmatrix} A_{\parallel} \\ a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \chi_{\text{tot}} \omega & g_{a\gamma} B_T/2 \\ g_{a\gamma} B_T/2 & -m_a^2/(2\omega) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_{\parallel} \\ a \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Здесь, $A_{\parallel}$ — амплитуда фотона с поляризацией, параллельной $\mathbf{B}_T$, a — амплитуда аксионоподобной частицы, $\chi_{\text{tot}} = \chi_{\text{CMB}} + \chi_B$ — сумма вкладов в коэффициент преломления за счет реликтового излучения $\chi_{\text{CMB}} = 0.511 \times 10^{-42}$ и магнитного поля галактики $\chi_B = 0.485 \times 10^{-43}$ соответственно. В дополнение, туда могут быть включены вклады и других источников фотонов, находящихся в нашей галактике. Как показал анализ, для характерных значений параметров аксионоподобных частиц и фотонов с энергией $\omega \gtrsim 100$ ТэВ, вклады $\chi_{\text{CMB}} \omega$ и $g_{a\gamma} B_T$ будут одного порядка величины. Следовательно, необходимо учитывать вклад в дисперсию от взаимодействия с фотонами среды. Рассматривая в качестве фотонов среды излучение от аккрецирующего объекта с эдингтоновской светимостью, например, активное ядро галактики, получаем коэффициент преломления фотона в следующем виде:

$$\chi_{\text{AGN}} = \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right) \left(\frac{1 \text{ кpc}}{R} \right)^2 \times 10^{-4} \chi_{\text{CMB}}, \quad (2)$$

где $M_{\odot}$ — масса Солнца, M — масса рассматриваемого объекта, R — расстояние от аккрецирующего объекта до места встречи с ТэВ-ным фотоном. При $M \sim 10^4 M_{\odot}$ и ближе к источнику излучения $R \sim 10^{-2}$ кpc, дополнительный вклад становится сравним по величине с вкладом от реликтового излучения.

Литература

1. Raffelt G. G., Stodolsky L. Mixing of the Photon with Low Mass Particles // Phys. Rev. D. 1988. Vol. 37. P. 1237.
2. Dasgupta B., Raffelt G. G. Adiabatic Faraday effect in a two-level Hamiltonian formalism // Phys. Rev. D. 2010. Vol. 82. P. 123003.

Photon dispersion and its influence on transitions in system of photon and axion

R. A. YURCHENKOV

Supervisor – Associate Professor A. A. Dobrynina

P. G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia

Abstract. A modification of the photon dispersion relation of TeV-photons due to its scattering on background photons is considered. An influence of such the modification on the axion-photon oscillation is analyzed. As a source of background photons, we consider cosmic microwave background radiation, galactic magnetic fields and accretion objects.

Keywords: photon, axion-like particle, photon-photon interaction, photon-axion oscillations.

ГРНТИ 17.45

АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ ПРОВОЛОЧНОЙ МНОГОДИАПАЗОННОЙ АНТЕННЫ **В. А. БЕЛОВ**

Научный руководитель – доц. Т. К. Артемова
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова,
Ярославль, Россия
belov.vlad01@yandex.ru

Аннотация. Смоделированы и согласованы с помощью П-контура три вида антенн, которые способны работать в нескольких диапазонах. Зонтичная антенна с двумя «спицами» настроена на 4 диапазона работы спасательных буёв.

Ключевые слова: многодиапазонная антенна, согласование, П-контур.

Универсальные устройства, в том числе спасательные буи, требуют совмещения различных диапазонов частот и многодиапазонных антенн. Между тем, форм-фактор антенны диктует её конкретное применение, а многодиапазонность можно обеспечить, например, за счёт согласования с помощью П-контура [1]. Целью работы был анализ работы моделей трёх проволочных антенн, согласованных специально рассчитанными контурами, в 4-х диапазонах работы спасательных буёв.

Согласование основывалось на величине сопротивления антенны как нагрузки для П-контура. Затем задавались значения добротности, вычислялись реактивные сопротивления двух конденсаторов и одной катушки индуктивности на каждый из диапазонов частот, всего 4 контура. Далее по формулам для реактивных сопротивлений определялись номиналы деталей П-контура.

Лучшие результаты из трёх моделей, выполненных в MMANA-GAL basic, обеспечила зонтичная антенна [2] с двумя «спицами» (рисунок 1).

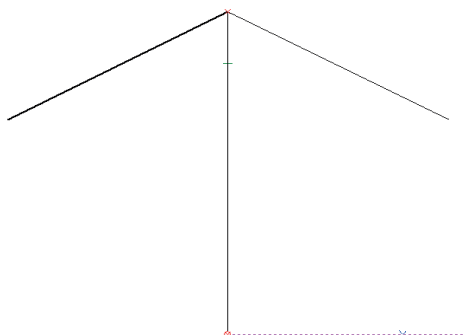


Рисунок 1 – Прототип антенны

Номиналы деталей контуров для её согласования приведены в таблице 1, а частотные свойства антенны – в таблице 2.

Таблица 1 – Параметры П-контура

Номер контура	L, мкГн	C, пФ
1	0,056	85,35
		44,15
2	0,042	64,01
		33,12
3	0,026	39,89
		20,64
4	0,017	25,54
		13,21

Таблица 2 – Параметры антенны после согласования

F (МГц)	R (Ом)	X (Ом)	KCB 200
121,5	381,6	-67,45	1,9
162	205,8	27,49	1,2
265	264,4	55,48	1,4
406	172,2	118,4	1,9

Литература

1. Ляхов В. К. Настройка и согласование антенн // QRZ.ru: технический портал. URL: <https://www.qrz.ru/schemes/contribute/antenns/ua4hul.phtml?ysclid=lfhxm8oh66132094457>.
2. Ротхаммель К. Антенны. Т.1 / К. Ротхаммель, А. Кришке. М. : Лайт ЛТД, 2000. 416 с.

Analysis of prototypes for a multi-band wire antenna

V. A. BELOV

*Supervisor – Associate Professor T. K. Artemova
P. G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia*

Abstract. Three types of antennas were modeled and matched using the parallel contour, which are capable of operating in several frequency bands. The umbrella antenna with two "spokes" is configured for 4 bands of rescue beacon.

Keywords: multi-band antenna, matching, parallel contour.

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ РАССЕЯНИЯ ЭМ ВОЛНЫ НА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ РАССЕИВАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

М. А. БОКОВ

*Научный руководитель – доц. А. С. Гвоздарев
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова,
Ярославль, Россия
mihail.bokov@gmail.com*

Аннотация. В работе предложена численная модель процесса дифракции электромагнитной волны на интеллектуальной рассеивающей поверхности, позволяющая оперативно рассчитать диаграмму рассеяния. Сравнение результатов разработанной модели с результатами моделирования в специализированном программном обеспечении показало высокие точность модели и скорость вычислений.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, диаграмма рассеяния, интеллектуальные рассеивающие поверхности.

В процессе исследования интеллектуальных рассеивающих поверхностей (ИРП) часто встаёт задача расчёта диаграммы рассеяния (ДР). Так как принцип функционирования ИРП заключается в том, что её диаграмма рассеяния может быть настроена необходимым образом, важно иметь возможность быстрого расчёта ДР с целью анализа влияния на неё различных факторов и определения алгоритмов синтеза необходимых ДР. Однако, использование специализированного ПО (например, CST Studio Suite (Student Edition)), позволяющего моделировать рассеяние электромагнитных волн на сложных поверхностях с учётом множества факторов, приводит к достаточно длительному времени расчёта, что затрудняет процесс исследования.

В рамках данной работы была поставлена задача разработать упрощённую численную модель, позволяющую оперативно и достаточно точно рассчитывать диаграмму рассеяния ИРП. В ходе моделирования рассматривались рассеивающие поверхности, состоящие из 11 управляемых прямоугольных элементов, сравнимых по размерам с длиной волны. Каждый элемент ИРП характеризуется комплексным коэффициентом отражения R . Для определения диаграммы рассеяния при моделировании рассчитывается распределение поля в дальней зоне на основе принципа Гюйгенса. Рассеивающая поверхность разбивается прямоугольной сеткой с шагом $\Delta \ll \lambda$. Узлы сетки являются источниками вторичных сферических волн. Напряжённость вторичной волны определяется как:

$$E(r) = |R_{i,j}| A_{inc} \exp \left(i \left(\frac{2\pi}{\lambda} r + \arg(R_{i,j}) + \varphi_{inc} \right) \right) / r, \quad (1)$$

где A_{inc} и φ_{inc} – амплитуда и фаза падающей волны, r – расстояние от узла сетки до точки пространства в которой рассчитывается поле, R_{ij} – комплексный коэффициент отражения элемента ИРП, на котором располагается узел сетки. Суммированием вторичных волн от всех узлов сетки получается значение ЭМ поля в заданной точке пространства.

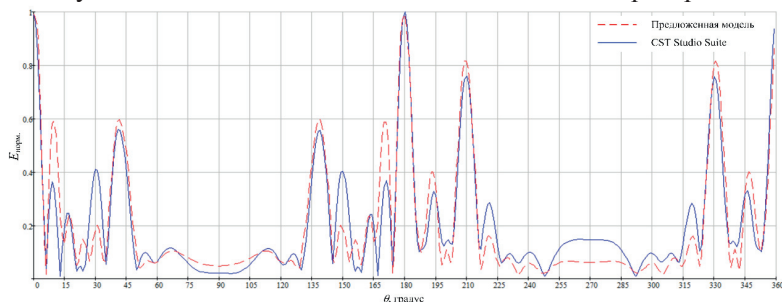


Рисунок 1 – Диаграммы рассеяния, полученные с помощью предложенной модели и с помощью пакета CST Studio Suite

На рисунке 1 представлены нормированные диаграммы рассеяния ИРП, полученные в пакете CST Studio Suite (Student Edition) путём решения электродинамической задачи в частотной области и с помощью модели, предложенной в данной работе. Можно отметить хорошее совпадение результатов в части расположения, величины и ширины основных лепестков ДР. При этом вычисление ДР предложенной моделью в пакете MathCAD заняло 6,4 с, что в 30 раз быстрее чем в CST.

Литература

1. Штагер Е. А. Рассеяние радиоволн на телах сложной формы. М. : Радио и связь. 1986. 184 с.

The development of a numerical model of scattering on the intelligent reflecting surface

M. A. BOKOV

Supervisor – Associate Professor A. S. Gvozdev

P. G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia

Abstract. A computer model of the diffraction of an electromagnetic wave on an intelligent reflecting surface developed in this paper, which makes it possible to calculate quickly the scattering diagram. A comparison of the results of the developed model with the results of modeling in specialized software showed high model accuracy and calculation speed.

Keywords: computer modeling, scattering diagram, intelligent reflecting surfaces.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ БИТОВОЙ ОШИБКИ
В УСЛОВИЯХ МНОГОЛУЧЕВОГО КАНАЛА,
ОПИСЫВАЕМОГО МОДЕЛЬЮ ЛОМАКСА
А. А. ВЕСЕЛКОВ**

*Научный руководитель – доц. А. С. Гвоздарёв
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова,
Ярославль, Россия
andruf2014@gmail.com*

Аннотация. В работе исследовано поведение вероятности битовой ошибки в условиях многолучевого канала, описываемого моделью Ломакса. Получены зависимости для средней вероятности ошибки и порогового значения отношения сигнал/шум, необходимого для достижения допустимой ошибки, от параметра распределения.

Ключевые слова: битовая ошибка, распределение Ломакса, беспроводная связь.

В рамках проведённого исследования рассматривается задача поведения вероятности битовой ошибки сигнала беспроводной системы связи, функционирующей в условиях канала с замираниями, подчиняющимися модели Ломакса [1] с параметром формы α и с плотностью вероятности мгновенного отношения сигнал/шум (ОСШ) γ , задаваемой следующим выражением:

$$f_{\gamma}(\gamma) = \frac{\alpha}{\bar{\gamma}(\alpha-1)} \left[1 + \frac{\gamma}{\bar{\gamma}(\alpha-1)} \right]^{-(\alpha+1)}. \quad (1)$$

В качестве исследуемых видов модуляции были выбраны QAM и PSK [2]. Графики на рисунке 1 иллюстрируют полученные зависимости порогового ОСШ, требуемого для достижения заданного значения вероятности ошибки $P_{cr}=10^{-4}$ от параметра формы распределения Ломакса α .

Можно заметить, что увеличение размерности созвездия для QAM модуляции (4, 64, 1024) и PSK (2, 4, 8) приводит к изменению требований к пороговому значению ОСШ. Например, при изменении размерности созвездия QAM с 4 до 1024 (сплошные линии на рисунке 1) разница составляет около 3 дБ. Из графиков также видно, что изменения порогового ОСШ присутствуют только при α меньшем 5, а при $\alpha > 5$ значения порогового ОСШ практически не изменяются. Похожая ситуация происходит и при PSK модуляции (см. пунктирные кривые на рисунке 1).

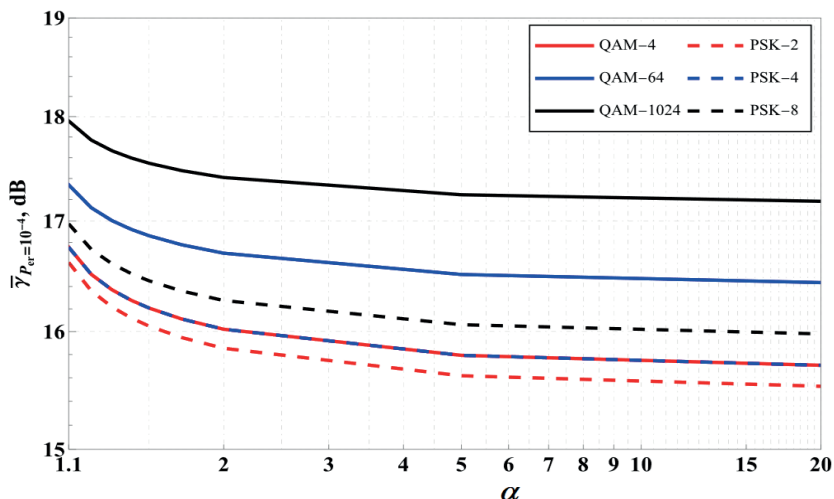


Рисунок 1 – Зависимости порогового значения ОСШ от параметра α

Кроме того, можно сравнить модуляции QAM и PSK. Результаты исследования позволяют сделать вывод, что фазовая модуляция предъявляет меньшие требования с точки зрения обеспечения необходимой энергии источника (из-за меньшего требуемого ОСШ).

Литература

1. Sánchez I., López Martínez F. J. The Lomax distribution for wireless channel modeling: theory and applications // IEEE Open Journal of Vehicular Technology. 2024. V. 5. P. 162 – 171.
2. Голдсмит А. Беспроводные коммуникации. / А. Голдсмит. М. : Техносфера, 2011. 904 с.

Bit error probability behavior under multipath channel conditions described by the Lomax model

A. A. VESELKOV

*Supervisor – Associate Professor A. S. Gvozdarev
P. G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia*

Abstract: The paper investigates the behavior of the bit error rate in the conditions of a multipath channel described by the Lomax model. The dependences for the average error rate and the threshold value of the signal-to-noise ratio, which is necessary to achieve an acceptable error, on the distribution parameter are obtained.

Keywords: bit error rate, Lomax distribution, wireless communication.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОРРЕЛЯЦИИ АНТЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ МАССИВНЫХ МІМО СИСТЕМ С НИЗКОРАЗЯДНЫМИ ЦАП

К. В. ГОМУЛИН

*Научный руководитель – доц. А. С. Гвоздарев
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова,
Ярославль, Россия
kirill20000501@gmail.com*

Аннотация. В работе рассмотрена МІМО-система, использующая низкоразрядные ЦАП. Проведены эксперименты, в которых изменяется тип модуляции, количество антенн и коэффициент корреляции. Анализируется вероятность битовой ошибки относительно отношения сигнал/шум.

Ключевые слова: МІМО, низкоразрядные ЦАП, отношение сигнал/шум, вероятность битовой ошибки, корреляция, модуляция.

В работе рассматриваются МІМО-системы [1] с прекодированием на передающей стороне [2, 3], использующие низкоразрядные ЦАП [4] и такие типы демодуляции как: Zero Forcing, MRT и МСКО [3].

Проведено имитационное моделирование МІМО системы с размерностью 16×16 антенных элементов на передающей и приёмной сторонах. Объём выборки для моделирования составил 10^5 элементов, отношение сигнал/шум выбиралось в диапазоне $[-10, 50]$ дБ с шагом в 2,5 дБ. Рассмотрены несколько видов модуляций: QPSK, 64-QAM и 256-QAM, разрядность используемых ЦАП изменялась в диапазоне от 2 до 4.

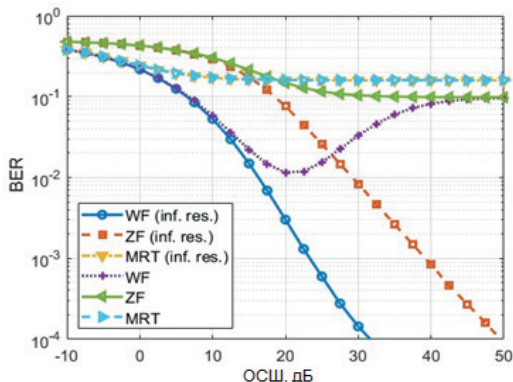


Рисунок 1 – Результат моделирования для МІМО 16×16 с QPSK модуляцией, четырёхразрядным ЦАП, и коэффициентом корреляции 0,1

Предполагалось, что сигналы, излучаемые антенными элементами на приёмной и передающей сторонах, коррелированы. Для учёта этого фактора использовалась экспоненциальная корреляционная модель с одношаговым коэффициентом корреляции между любой парой соседних элементов изменяющимся от 0 (полностью не коррелированные сигналы) до 0,9 (сильно коррелированные сигналы) с шагом 0,1. По итогам проведенного моделирования были получены графики зависимостей битовой ошибки от отношения сигнал/шум, изображенные на рисунке 1.

При проведении анализа полученных результатов было установлено:

1. Наличие корреляции приводит к возникновению экстремума кривой энергетической эффективности для случая обработки сигнала с помощью Винеровской фильтрации с конечной разрешающей способностью ЦАП.
2. Увеличение коэффициента корреляции приводит к уменьшению значения обнаруженного экстремума, а увеличение разрядности ЦАП – к его возрастанию.

Литература

1. Бакулин М. Г., Варукина Л. А., Крейнделин В. Б. Технология MIMO: принципы и алгоритмы. 2014.
2. Jacobsson S. et al. Quantized precoding for massive MU-MIMO // IEEE Transactions on Communications. 2017. V. 65, №. 11. P. 4670 – 4684.
3. Голдсмит А. Беспроводные коммуникации / А. Голдсмит/ М. : Техносфера, 2011. 904 с.
4. Radboud A., Atzeni I., Tolli A. Enhanced data detection for Massive MIMO with 1-Bit ADCs // arXiv:2312.04183. 2023.

Analysis of antenna correlation impact on the energy efficiency of the massive MIMO systems with low-bit DACs

K. V. GOMULIN

*Supervisor – Associate Professor A. S. Gvozdarev
P. G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia*

Abstract. In this paper a MIMO system using low-bit DACs is considered. Experiments are conducted in which the modulation type, number of antennas and correlation coefficient are varied. The bit error rate with respect to the signal-to-noise ratio is analyzed.

Keywords: MIMO, low-bit DAC, SNR, BER, correlation, modulation.

КОМПАКТНАЯ МНОГОПОЛОСНАЯ АНТЕННА ДЛЯ АВТОМОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ

В. С. ДЕМИДОВСКИЙ

*Научный руководитель – доц. Т. К. Артёмова
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова,
Ярославль, Россия*

sir.demidowsky@yandex.ru

Аннотация. Моделировалась и исследовалась в свободном пространстве и на модели крыши кузова автомобиля планарная широкополосная антенна. Показано, что для реальных условий прототип требует дополнительной оптимизации или согласования в ряде диапазонов автомобильной связи.

Ключевые слова: антенна, компактная, многополосная, моделирование.

Использование антенны для автомобильной связи предъявляет к ней ряд требований: высокое значение КПД, исключение экранирующего эффекта кузова, широкая полоса пропускания, минимальное влияние на настройку антенны людей и предметов, находящихся в салоне и вокруг автомобиля, минимальный уровень поля в салоне, питание согласованным коаксиальным кабелем. Не может быть произвольным и размещение антенны. Создаваемое поле сильно искажается, если антенна установлена в углу крыши; из-за требований дизайна и производства, наилучшее место установки автомобильной антенны – центр задней кромки крыши.

Целью работы являлось моделирование и исследование свойств автомобильной антенны, удовлетворяющей этим требованиям.

Для исследования была отобрана конструкция, предложенная в [1] (рисунок 1), в которой различные элементы обеспечивают широкополосные свойства, а также работу в нескольких диапазонах частот.

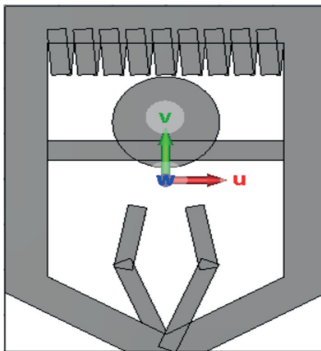


Рисунок 1 – Модель исследуемой широкополосной антенны

Исследовались свойства антенны в свободном пространстве (как у авторов [1]) и при размещении вблизи металлической поверхности, имитирующей крышу кузова автомобиля.

По результатам моделирования на произвольно выбранных частотах (0.775 ГГц, 0.86 ГГц, 2.595 ГГц, 3.73 ГГц, 4.865 ГГц) в диапазоне рабочих частот антенны (690 – 910 ГГц, 1,4 – 6 ГГц) для параметра S_{11} , характеризующего согласование антенны с 50-Омным кабелем, получили для свободного пространства значения (-22.8 дБ, -22.2 дБ, -7.7 дБ, -9 дБ, -5.7 дБ) соответственно.

Частотная зависимость параметра S_{11} антенны, размещённой на модели крыши кузова, приведена на рисунке 2. Видно, что в некоторых диапазонах частот требуется оптимизация конструкции или применение согласующего устройства – в них предложенная авторами конструкция не обеспечивает на кузове нужного согласования.

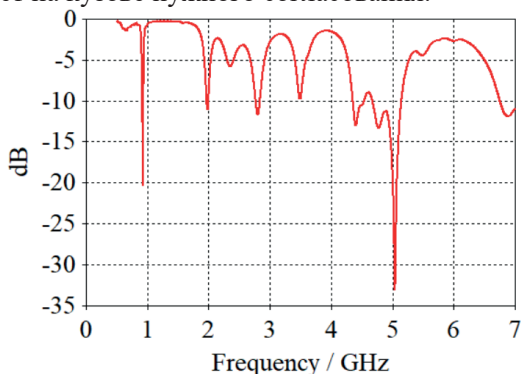


Рисунок 2 – Частотная зависимость S_{11} для размещения на кузове

Литература

1. Luo W., Chen W., Feng Y. et al. A novel automobile antenna for vehicles communication of IoT systems in 5G network // J. Wireless Com. Network. 2020. Art. no. 218. DOI 10.1186/s13638-020-01838-7.

Compact multiband antenna for automotive communications

V. S. DEMIDOVSKY

*Supervisor – Associate Professor T. K. Artemova
P. G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia*

Abstract. A planar broadband antenna was simulated and studied in free space and on a car body roof model. It is shown that for real-world conditions, the prototype requires additional optimization or matching in a number of automotive communication frequency bands.

Keywords: antenna, compact, multiband, simulation.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ КАНАЛА F-НАКАГАМИ НА ВЕРОЯТНОСТЬ БИТОВОЙ ОШИБКИ

И. Д. ЕРМАКОВ

*Научный руководитель – доц. А. С. Гвоздарёв
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова,
Ярославль, Россия
ilyer76@yandex.ru*

Аннотация. Анализируется влияние параметров канала связи типа F-Накагами на вероятность битовой ошибки. Получены зависимости вероятности битовой ошибки и порогового отношения сигнал/шум, необходимого для достижения требуемого уровня вероятности битовой ошибки, от параметров канала.

Ключевые слова: битовая ошибка, распределение F-Накагами, беспроводная связь.

Одной из основных характеристик, описывающих качество связи в беспроводных системах, является вероятность ошибки на один переданный элемент сообщения (бит, символ, пакет и др.). В условиях многолучевого распространения сигнала эта вероятность определяется распределением вероятности мгновенного отношения сигнал/шум в канале.

В работе рассматривается влияние параметров многолучевого канала с замираниями, описываемыми моделью флуктуирующего распределения Накагами [1] (далее F-Накагами), на вероятность битовой ошибки. Проведено численное моделирование зависимости вероятности битовой ошибки от параметров замирания (m) и затенения (m_s) сигнала, подчиняющегося закону F-Накагами с плотностью распределения вероятности γ :

$$f_{\Gamma}(\gamma) = \frac{m_s}{\Gamma(m)} \gamma^{-1} G_{1,2}^{1,1} \left(\frac{m_s m}{(m_s - 1) \gamma} \gamma \middle| \frac{1 - m_s}{m, -m_s} \right). \quad (1)$$

В качестве исследуемых видов модуляции были выбраны QAM-4, QAM-64, QAM-1024 и PSK-2, PSK-4, PSK-8 [2].

Была изучена зависимость усреднённой вероятности ошибки от среднего ОСШ и величины ОСШ, требуемого для достижения заданной вероятности битовой ошибки (см. рисунок 1). Был сделан вывод, что при малых значениях параметра замирания ($m < 1$) требуемый уровень не достигается. Для больших значений параметра ($m > 1$) наблюдается следующая зависимость: при увеличении параметра m_s пороговый уровень ОСШ, который требуется обеспечить для достижения требуемого уровня вероятности битовой ошибки, уменьшается. В работе в качестве фиксированного уровня ошибки был выбран уровень 10^{-4} .

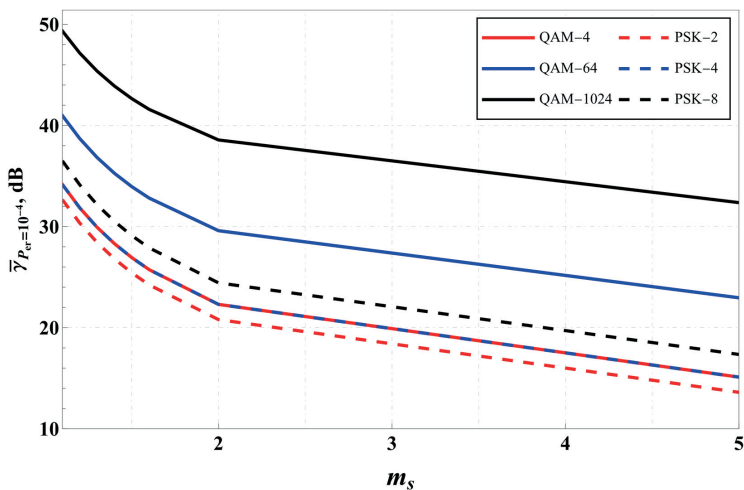


Рисунок 1 – Зависимость порогового значения ОСШ от m_s при $m = 0.9$

Анализ зависимости порогового значения ОСШ, требуемого для достижения вероятности ошибки, от m_s при фиксированном параметре замирания позволил сделать схожие заключения, но относительно изменения параметра m при фиксировании m_s .

Литература

1. Badarneh O. S., Da Costa D. Fluctuating Nakagami- m fading distribution // IEEE Wireless Communications Letters. 2024. V. 13, No. 4. P. 959 – 963.
2. Голдсмит А. Беспроводные коммуникации / А. Голдсмит. М. : Техносфера, 2011. 904 с.

AN ANALYSIS OF THE OF THE F-NAKAGAMI CHANNEL PARAMETERS' INFLUENCE ON THE BIT ERROR RATE

I. D. ERMAKOV

*Supervisor – Associate Professor A. S. Gvozdarev
P. G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia*

Abstract. The influence of the channel parameters with the F-Nakagami distribution on the bit error rate is analyzed. The dependences of the bit error rate and the threshold signal-to-noise ratio, which is necessary to achieve the required level of bit error rate, upon the channel parameters are obtained.

Keywords: bit error, F-Nakagami, wireless communications.

ОБЗОР РЕШЕНИЙ ПО СОЗДАНИЮ МУЗЫКАЛЬНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ «ТЕРМЕНВОКС»

Е.А. КРАВЧЕНКО

*Научный руководитель – доц. Т. К. Артёмова
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова,
Ярославль, Россия
egor.kravchenko03@mail.ru*

Аннотация. Работа посвящена обзору решений по созданию музыкальных инструментов “Терменвокс”. Рассмотрены варианты музыкальных инструментов, проведён сравнительный анализ устройств, оценка их характеристик и определение наилучшего варианта среди разновидностей “Терменвокс”.

Ключевые слова: классический терменвокс, терменвокс “системы Ковальского”, матрёмин, виртуальный терменвокс.

Важность физики в музыке проявляется через понимание принципов звука, резонанса и электромагнитных явлений, которые лежат в основе работы терменвоксов и других электронных инструментов. Сравнение терменвоксов помогает выявить их особенности, преимущества и недостатки, что ценно как для разработчиков новых моделей, так и для потенциальных пользователей при выборе подходящего инструмента для музыкальной практики, создавая инновационный и уникальный музыкальный инструмент. Цель данной работы состояла в обзоре решений по созданию музыкальных инструментов “Терменвокс” путем сравнения схем и характеристик устройств, таких как: напряжение, длина, ширина, высота, вес музыкального инструмента, количество октав, тип антенн и их количество, тип схем и само управление терменвоксом.

Терменвокс появился, когда в 1920 году Лев Термен настраивал измерительную аппаратуру и заметил, что разность между генераторами создает слышимые звуки. В первом музыкальном инструменте использовали ламповую схему и две большие катушки, из-за чего он был тяжелым и требовал улучшений. Известны следующие модификации терменвокса: классический, "системы Ковальского", матрёмин и виртуальный.

Классическим считается терменвокс, основанный на первых моделях Л. Термена [1]. Звук контролируется движением рук в электромагнитном поле, где вертикальная антенна регулирует громкость, а горизонтальная – тон. В современных моделях используются кремниевые компоненты, что обеспечивает надежность, миниатюрность и энергоэффективность. Недостатки: ограниченная настройка, сложность ремонта, зависимость от окружающей среды.

Терменвокс "системы Ковальского" создан Константином Ковальским [2]. При игре на нем высота звука регулируется правой рукой, левая управляет характеристиками через кнопки, а громкость – педалью. Он использует ламповую схему, что даёт преимущества в простоте, устойчивости к температуре и отсутствие искажений. Недостатки схемы: ограниченный срок службы, массивность, большой расход энергии и высокая цена.

Матрёмин [2] — терменвокс, созданный Масами Такэути в 1999 году в Японии и спрятанный в корпус матрешки с автоматической регулировкой громкости. Он использует схему на германиевых транзисторах, обеспечивая мобильность, широкий диапазон частот и низкий шум, но отличается высокой стоимостью, энергопотреблением и низкой распространенностью.

Виртуальный терменвокс [2] — программа для смартфона или КПК с сенсорным экраном, имитирующая терменвокс. Она создает прямоугольную систему координат, где вертикальное движение управляет громкостью, а горизонтальное — высотой звука. Есть функция проверки фильтров, но сам инструмент не может быть использован в приложении.

Сравнительный анализ показал, что классический терменвокс — наилучший вариант среди всех представленных. Он обладает высокой надежностью, удобством использования, качеством звука и платой на основе современных компонент, что делает его предпочтительным для профессионалов и любителей музыки.

Литература

1. Электромузыкальный инструмент типа «терменвокс»: авт.свид. 1048503 СССР: МКИ G10H 5/08 / Л. С. Термен, Л. Д. Королев. 1983.
2. Гриднев Л. Терменвокс: инструмент будущего родом из прошлого // Первые шаги в науке. 2021. С. 102 – 111.

Overview of termenvox musical instrument creation solutions

E. A. KRAVCHENKO

*Supervisor – Associate Professor T. K. Artemova
P. G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia*

Abstract. The work is devoted to the review of solutions for creation of musical instruments “Termenvox”: consideration of variants of musical instruments, comparative analysis of devices, evaluation of their characteristics and determination of the best variant among varieties of “Termenvox”.

Keywords: classical termenvox, termenvox of “Kowalski system”, matryomin, virtual termenvox.

НЕЛИНЕЙНЫЕ ПОВЕРХНОСТНЫЕ ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ВОЛНЫ В ГЛУБОКОЙ ЖИДКОСТИ

К. Ю. ЛАПШИНА

*Научный руководитель – доц. А. А. Очиров
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова,
Ярославль, Россия
krislapshina03@gmail.com*

Аннотация. Рассчитаны параметры и характеристики гравитационных волн, возникающих при решении задачи о распространении потенциальных волн в глубокой идеальной жидкости в нелинейной постановке. Получены предельные значения углов, характеризующие переход волн от “гладких” к “острым”. Получены выражения скорости дрейфа и рассчитаны потоки энергии и количества вещества в жидкостях с параметрами воды и воздуха.

Ключевые слова: идеальная жидкость, волновое движение, W-функция Ламберта, нелинейные волны, характеристики волн.

Исследования течений жидкостей привлекают внимание в связи с большим количеством академических и практических приложений. Особый интерес представляет точное решение задачи о распространении нелинейных волн, поскольку это является трудоемкой задачей. Известен ряд точных решений задач о распространении нелинейных поверхностных волн [1-3]. Целью данной работы является изучение параметров и характеристик нелинейных волн на примере гравитационных волн Кистовича-Ламберта, возникающих при решении задачи о распространении потенциальных волн в глубокой идеальной жидкости в нелинейной постановке [4]. Рассматриваются стационарные потенциальные волны, распространяющиеся со скоростью c вдоль поверхности глубокой однородной идеальной жидкости с плотностью ρ , рассматриваются в двух системах координат. Первая – это двумерная лабораторная система координат (x, z) , вертикальная ось которой направлена против вектора поля сил тяжести g , а вторая – движущаяся система координат (ζ, z) , связанная с волной $\zeta = x - ct$.

Основные уравнения движения выглядят следующим образом:

$$z < 0: \begin{cases} \partial_t \rho + \operatorname{div}(\rho \cdot \mathbf{u}) = 0 \\ \rho \partial_t \mathbf{u} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla P + \rho \mathbf{g} \\ \Delta \psi = 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$z = 0: \begin{cases} \partial_t(z - \zeta) + \mathbf{u}_a \cdot \nabla(z - \zeta) = 0 \\ P = P_0 \end{cases} \quad (4)$$

Жидкость считается несжимаемой и компоненты поля скоростей можно представить в виде производных функций тока (3). Решение ищется в виде бегущего пакета волн. описывается функцией $P(\zeta, z)$. Отклонение свободной поверхности от равновесного состояния $z=0$ задается функцией $\zeta(\zeta)$.

$$\mathbf{u} = (u, w) = (\partial_z \psi, -\partial_x \psi). \quad (5)$$

В ходе решения задачи было получено выражение для отклонения свободной поверхности $\zeta(\zeta)$ от равновесного состояния $z=0$ и дисперсионное соотношение, выраженное через скорость волны или волновое число. Несмотря на иной подход к решению задачи, итоговые выражения совпали с полученными в [4].

Для получившегося выражения $\zeta(\zeta)$ рассчитывались характеристики и параметры свободной поверхности. Было найдено решение задачи о распространении гравитационных волн в нелинейной модели свободной поверхности идеальной глубокой несжимаемой жидкости. Были вычислены параметры волн, которые можно применить в эксперименте для описания характеристик этих волн.

Литература

1. Gerstner F. J. Theorie die wellen, Abh. Kön. Böhm. Gesel. Wiss. 1802, reprinted in Ann. der Physik. 1809. V. 32. P. 412 – 445.
2. Stokes G. G. On the theory of oscillatory waves // Trans. Cam. Philos. Soc. 1847. V. 8. P. 441 – 455.
3. Лэмб Г. Гидродинамика / Г. Лэмб. М.-Л.: ГИТТЛ. 1949. 928 с.
4. Kistovich A. V., Chashechkin Y. D. Propagating stationary surface potential waves in a deep ideal fluid // Water resources. 2018. V. 45. P. 719 – 727.

Nonlinear surface potential waves in deep liquids

K. YU. LAPSHINA

*Supervisor – Associate Professor A. A. Ochirov
P. G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia*

Abstract. The parameters and characteristics of gravitational waves arising when solving the problem of propagation of potential waves in a deep ideal liquid in a nonlinear formulation are calculated. The limiting values of the angles characterizing the transition of waves from “smooth” to “sharp” are obtained. Expressions of the drift velocity are obtained and energy fluxes and amounts of matter in liquids with water and air parameters are calculated.

Keywords: ideal liquid, wave motion, Lambert W-function, nonlinear waves, wave characteristics.

АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБНАРУЖИТЕЛЯ В УСЛОВИЯХ КАНАЛА С ЗАМИРАНИЯМИ, ПОДЧИНЯЮЩЕГОСЯ МОДЕЛИ ЛОМАКСА Р. Ю. МАНАХОВ

*Научный руководитель – доц. А. С. Гвоздарёв
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова,
Ярославль, Россия
manakhov-r@yandex.ru*

Аннотация. В работе рассмотрена задача исследования качества функционирования энергетического обнаружителя в каналах с замираниями, подчиняющимися модели Ломакса. Получены зависимости вероятности правильного обнаружения и порогового отношения сигнал/шум, необходимого для достижения заданного уровня обнаружения от параметра формы распределения и базы обнаружения.

Ключевые слова: энергетическое обнаружение, распределение Ломакса, беспроводная связь.

В рамках проведённого исследования рассматривается задача энергетического обнаружения сигнала беспроводной системы связи, функционирующей в условиях канала с замираниями, подчиняющимися модели Ломакса [1] с параметром формы α и с плотностью вероятности мгновенного отношения сигнал/шум (ОСШ) γ , задаваемой следующим выражением:

$$f_{\gamma}(\gamma) = \frac{\alpha}{\bar{\gamma}(\alpha-1)} \left[1 + \frac{\gamma}{\bar{\gamma}(\alpha-1)} \right]^{-(\alpha+1)}. \quad (1)$$

Графики на рисунке 1 иллюстрируют полученные зависимости порогового ОСШ, требуемого для достижения заданного значения вероятности верного обнаружения ($P_{\text{Dth}} = 0.8$) от параметра формы распределения Ломакса α . Можно заметить, что при небольших значениях базы обнаружения u (равной произведению времени обнаружения на анализируемую полосу частот) её изменение приводит к резкому изменению требований к пороговому значению ОСШ. Например, при изменении базы с 2 до 5 разница составляет около 2 дБ, а при изменении с 5 до 20 разница составляет всего 1 дБ. Также на графике наблюдается то, что при достижении α -параметром значения равного 8, значения порогового ОСШ практически не изменяются.

Также в ходе работы была проведено исследование зависимости порогового ОСШ от базы обнаружения при фиксированных значениях α и вероятности ложного срабатывания.

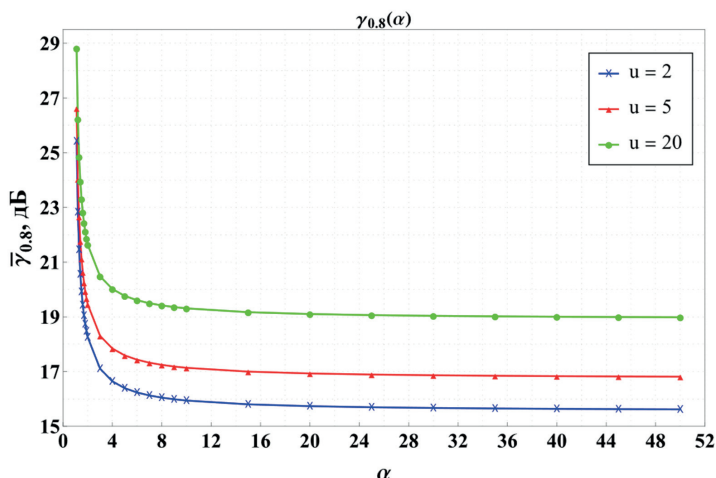


Рисунок 1 – Зависимость порогового ОСШ от α -параметра

Был сделан вывод, что наибольшее изменение требуемого порога ОСШ происходит при малых значениях базы обнаружения u . При увеличении значений α -параметра требуется меньшее пороговое значение ОСШ для достижения требуемого уровня обнаружения. Это означает, что к приёмнику предъявляются меньшие требования с точки зрения обеспечения необходимой энергетики, что эквивалентно тому, что можно обнаружить сигнал при больших уровнях шумов.

Литература

1. Sánchez I., López Martínez F. J. The Lomax distribution for wireless channel modeling: theory and applications // IEEE Open Journal of Vehicular Technology. 2024. V. 5. P. 162 – 171.

Energy-based sensing in the presence of Lomax fading model

R. Y. MANAKHOV

Supervisor – Associate Professor A. S. Gvozdarev

P. G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia

Abstract. The paper examines the issue of investigating the performance of an energy detector in wireless channels subject to fading, following the Lomax model. It derives the dependencies of the probability of correct detection and the signal-to-noise ratio required for a given threshold detection probability on the shape parameter of the fading distribution and the sensing base.

Keywords: energy detection, Lomax distribution, wireless communications.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ КАНАЛА ТИПА F-НАКАГАМИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАЛА

С. О. МОЗЖУХИН

*Научный руководитель – доц. А. С. Гвоздарёв
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова,
Ярославль, Россия
setuons.2019@mail.ru*

Аннотация. В работе рассмотрена задача анализа влияния параметров канала связи типа F-Накагами на характеристики энергетического обнаружения сигнала. Проведено численное исследование поведения вероятности верного обнаружения в зависимости от величины замираний и степени затенения сигнала. Проанализировано поведение отношения сигнал/шум, требуемого для достижения заданной вероятности обнаружения.

Ключевые слова: Wolfram Mathematica, энергетическое обнаружение, распределение F-Накагами, беспроводная связь.

В рамках проведённого исследования рассматривается задача анализа влияния параметров беспроводного канала связи, подчиняющегося модели типа F-Накагами [1], на качество энергетического обнаружения сигнала в когнитивных радиосетях [2]. Было проведено численное моделирование поведения вероятности правильного обнаружения (P_D) от параметров замирания (m) и затенения (m_s) сигнала при учёте того, что модель изменения мгновенного отношения сигнал/шум (ОСШ) определялась следующим образом γ :

$$f_{\Gamma}(\gamma) = \frac{m_s}{\Gamma(m)} \gamma^{-1} G_{1,2}^{1,1} \left(\frac{m_s m}{(m_s - 1) \gamma} \gamma \middle| \frac{1 - m_s}{m, -m_s} \right). \quad (1)$$

Графики на рисунке 1 иллюстрируют полученные зависимости вероятности правильного обнаружения от среднего ОСШ при изменяющихся параметрах замирания и затенения.

С ростом значений параметров m и m_s требуется меньшее ОСШ для достижения заданного уровня обнаружения, что можно интерпретировать как снижение требований, предъявляемых к приёмнику, при увеличении значений m и m_s . Это эквивалентно способности работать при больших уровнях шумов.

Также в ходе работы были изучены зависимости влияния параметра затенения при фиксированной величине замирания и наоборот. В области больших m ОСШ изменяется меньше, чем при малых значениях. Наибольшее значение порогового ОСШ наблюдается при увеличении m_s до значения равного 2.

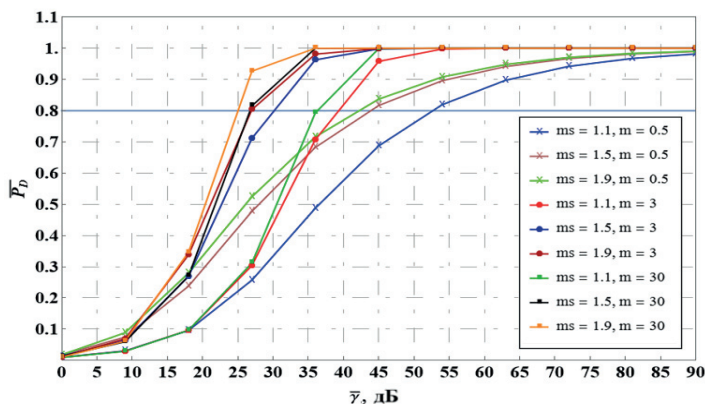


Рисунок 1 – Зависимость вероятности правильного обнаружения от среднего ОСШ

Для обратной зависимости можно наблюдать следующие эффекты: существенное изменение значения порогового ОСШ происходит в пределах m от 0.1 до 1. При изменении m_s от 1.1 до 1.5 пороговое ОСШ, которое требуется обеспечить, изменяется примерно на 1 дБ. При увеличении параметра m_s на такую же величину это изменение значительно уменьшается.

Литература

1. Badarneh O. S., Da Costa D. Fluctuating Nakagami- m fading distribution // IEEE Wireless Communications Letters. 2024. V. 13, No. 4. P. 959 – 963.
2. Atapattu S., Tellambura C., Jiang H. Energy detection for spectrum sensing in cognitive Radio. Springer Briefs in Computer Science. 2014.

Energy-based signal detection in the presence of multipath fading with F-Nakagami model

S. O. MOZZHUKHIN

Supervisor – Associate Professor A. S. Gvozdev

P. G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia

Abstract. The paper assumes the problem of the F-Nakagami type fluctuating channel impact on the characteristics of the energy detection of the unknown signal. A numerical study of the behavior of the probability of correct detection, depending on the severity of fading and the degree of shadowing of the signal, has been carried out. The behavior of the signal-to-noise ratio required to achieve a given detection probability is analyzed.

Keywords: energy detection, F-Nakagami, wireless communications.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СЛУЧАЙНОГО СМЕЩЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ НА ЕЕ КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ СВОЙСТВА

Б. Э. НАЗАРЕНКО

*Научный руководитель – доц. Т. К. Артёмова
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова,
Ярославль, Россия
b.e.nazarenko@yandex.ru*

Аннотация. В работе был проведен анализ изменения свойств линейной эквидистантной антенной решетки, состоящей из полуволновых диполей, вызванных случайным смещением элементов от исходного расположения.

Ключевые слова: антенная решетка, взаимное влияние, случайное смещение, статистический анализ.

При проектировании и моделировании антенных решеток часто исходят из предположения, что элементы расположены эквидистантно. Такой подход удобен для упрощения задачи, однако на практике элементы решетки могут быть смещены относительно своего заданного положения. Причиной являются технологические особенности процесса изготовления. Существующие исследования проводят анализ направленных свойств [1]. Однако случайное смещение может также оказывать влияние на корреляционные свойства, такие как матрицы S- и Z-параметров, что может влиять на качество функционирования [2].

Целью работы являлось исследование изменения параметров взаимного влияния при наличии случайного смещения между элементами линейной антенной решетки.

Рассмотрим эквидистантную антенную решетку, состоящую из $N = 11$ полуволновых диполей (радиусом сечения r_w), ориентированных вдоль оси z . Смещение элементов будем определять в виде вектора $\Delta \mathbf{r}$, длина и фаза φ которого являются равномерно распределенными случайными величинами:

$$|\Delta \mathbf{r}| \sim U(0, 2r_w), \varphi \sim U(0, 2\pi). \quad (1)$$

Моделирование проводилось на центральной частоте $f_c = 3,55$ ГГц. Длина диполя составляет $0,44\lambda_c$. В результате были получены значения матрицы Z-параметров. Объем выборки составляет 115 измерений.

Собственные значения матрицы Z-параметров в выборке незначительно отличаются от значений для решетки без смещения. Для модулей различия составляют единицы Ом, и не превышают 4,2 Ом.

Значения аргументов также отличаются незначительно. Среднее значение отличается не более чем на 2° , однако в некоторых измерениях различия составляют более 4° . Результаты для измерений параметра $Z_{1,1}$ представлены на рисунке 1.

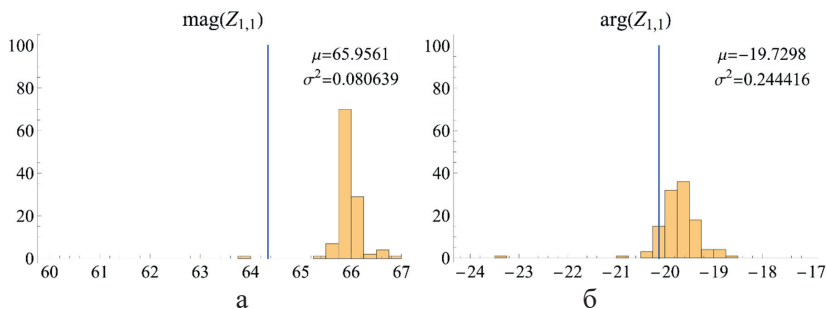


Рисунок 1 – Гистограммы значений модуля (а) и аргумента (б) параметра $Z_{1,1}$, синим обозначены значения для решетки без смещения

В работе были получены значения матрицы Z-параметров для антенной решетки со случайным смещением. Согласно результатам моделирования, средние значения модуля и аргумента параметров отличаются незначительно от значений для решетки без смещения. При этом некоторые измерения демонстрируют сильные различия, что может говорить о влиянии смещения на значения элементов матрицы Z-параметров. Полученные данные могут быть использованы для учета неточности расположения элементов при проектировании антенных решеток.

Литература

1. Маслов О. Н. Случайные антенны (теория и практика): монография / О. Н. Маслов. Самара : Изд-во ПГУТИ, 2013. 480 с.
2. Artemova T. K., Gvozdev A. S. Antenna array characteristics influence on MIMO system reliability // 2019 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). IEEE, 2019. P. 1 – 5.

Analysis of the influence of random displacement of antenna array elements on its correlation properties

B. E. NAZARENKO

*Supervisor – Associate Professor T. K. Artemova
P. G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia*

Abstract. In this paper we analyzed the change in the properties of a linear equidistant antenna array consisting of half-wave dipoles, which is caused by random displacement of the elements from the original arrangement.

Keywords: antenna array, mutual coupling, random displacement, statistical analysis.

АНАЛИЗ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛИНЕЙНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЁТКИ С НЕЛИНЕЙНОЙ ЗАВИСИМОСТЬЮ РАССТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ОТ ЦЕНТРА

И. А. ПАНОВ

*Научный руководитель – доц. Т. К. Артёмова
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова,
Ярославль, Россия
ivan_pan1213@mail.ru*

Аннотация. Проанализированы максимумы поля и коэффициент усиления линейной вибраторной решётки с размещением элементов в чётных или нечётных зонах Френеля.

Ключевые слова: линейная антенная решётка, фокусное расстояние, зоны Френеля, исследование, анализ.

Обычно в связи или радиолокации используют эквидистантные антенные решётки, состоящие из ряда однородных элементов, расположенных на равных интервалах друг от друга. При синфазном возбуждении элементов условие интерференционных максимумов у таких решёток выполняется в направлении перпендикуляра к оси решётки. При этом из-за разности расстояний от отдельных элементов до точки наблюдения эти максимумы дают меньший уровень поля, чем если бы сложение полей шло когерентно. В системах беспроводной передачи энергии такую проблему, например, решают, создавая фазовое распределение вдоль решётки, позволяющее изменять дальность точки фокусировки. Если же отказаться от управления фазами и амплитудами сигналов на входах элементов, то можно воспользоваться неэквидистантным их размещением. Цель работы – исследование возможностей такого размещения элементов, при котором их положение соответствует радиусам открытых зон Френеля в зонной пластинке.

Моделировалась линейная антенная решетка из 11 диполей с длиной волны 84,5 мм (частотой 3,55 ГГц, диапазон для исследований и медицины). Разместили элементы расстояниях, соответствующих радиусам открытых зон Френеля в зонной пластинке Френеля:

$$r_m = \sqrt{fm\lambda}.$$

Исследовалась возможность фокусировки поля на расстояния от 350 до 900 мм на четных и нечетных зонах Френеля. В картине поля наблюдалось несколько максимумов разной величины. График зависимости величины максимумов электрического поля от теоретического фокусного расстояния f приведён на рисунке 1. Максимальным поле является в первом максимуме, а напряженность во 2-м и 3-м максимумах практически одинакова. Аналогичное поведение демонстрирует и размещение элементов в чётных зонах.

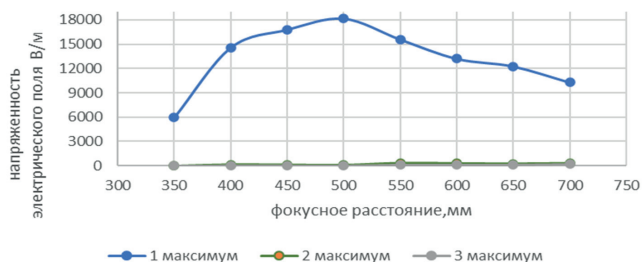


Рисунок 1 – Зависимость максимумов поля от фокусного расстояния при размещении элементов на нечетных зонах Френеля

На рисунке 2 сравниваются достигнутые величины коэффициента усиления решётки при фокусировках на различные теоретические f .

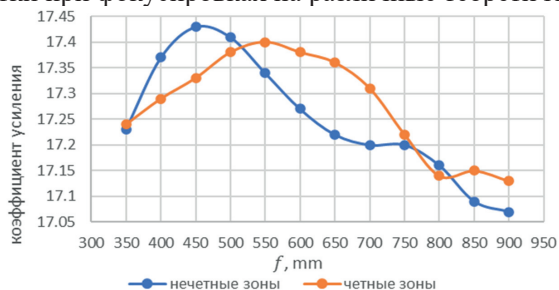


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента усиления антенной решетки от теоретического фокусного расстояния

По результатам исследования получено, что максимальный коэффициент усиления и максимальная концентрация электромагнитного излучения в диапазоне перестройки f 350 – 900 мм достигаются при фокусном расстоянии 450 мм на нечетных и 550 мм на четных зонах Френеля. Кроме того, координаты наблюдаемых максимумов поля несколько отличаются от координат теоретических точек фокусировки, отличие нелинейное и должно быть учтено при практической реализации.

Radiation analysis of a linear antenna array with nonlinear dependence of the distance of elements from the center

I. A. PANOV

*Supervisor – Associate Professor T. K. Artemova
P. G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia*

Abstract. The maxima of the field and the gain coefficient of a linear vibrator array with the placement of elements in even or odd Fresnel zones are analyzed.

Keywords: linear antenna array, focal length, Fresnel zones, research, analysis.

ИЗБРАННЫЕ АСПЕКТЫ РАЗРАБОТКИ ЗАЩИЩЕННОГО ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

А. Р. РЫЖИКОВ

*Научный руководитель – доц. Т. К. Артемова
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова,
Ярославль, Россия
allesharr@gmail.com*

Аннотация. Построен прототип системы, представлена логическая схема работы, представлена программная реализация системы. Выявлены достоинства и недостатки системы.

Ключевые слова: кодирование, программно-аппаратный, комплекс, передача.

Использование системы защищенного кодирования совместно с протоколами шифрования способно увеличить защищенность информационных систем. Для практической реализации защищённого программно-аппаратного комплекса предложено использовать следующие компоненты.

Аппаратные компоненты обеспечивают бесперебойную работу системы. К ним можно отнести [1]: подсистему питания устройства, антенно-фидерный тракт, систему линейной защиты от короткого замыкания, систему защиты от наведенных электромагнитных полей.

Программные компоненты предназначены для выполнения математических операций и должны обеспечивать работу защищенного кодирования, как в пределах существующих стандартов, так и в пределах разрабатываемого протокола. Одной из программных компонент является правило синхронизации [2] (см. рисунок 1).

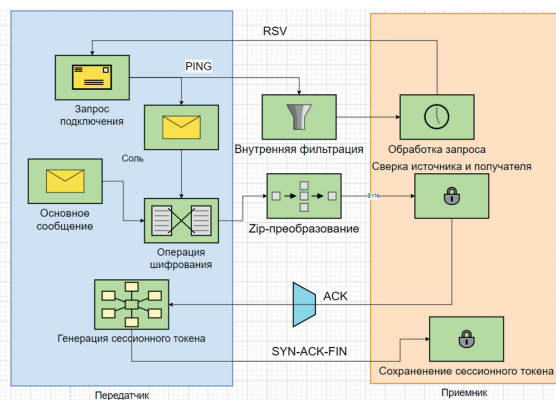


Рисунок 1 – Структурная схема правила синхронизации подключения

```

pub struct SimplePacket {
    //Level of voltage got via ping. Controlled by ulevel_by_code
    pub ULevel: String,
    // Id of destination device
    pub DestType: i8,
    // 0 for basic, 1 for zip, 2 for gzip...
    pub ArchiveType: i8,
    // Where from packet came
    pub SourceAddress: String,
    // Destination address
    pub DestinationAddress: String,
    // u8 data to send 128 bytes
    pub Data: String,
}

```

Рисунок 2 – Структура передаваемого пакета

Основными преимуществами приведенной структуры является быстроедействие системы. Во время тестирования система, построенная на основе приведенного правила синхронизации, показала возможность обработки 5000 пакетов/с. Структура и размер рабочих пакетов приведены на рисунке 2.

К дополнительным достоинствам системы также можно отнести возможность архивации передаваемого трафика и выбора протокола архивации, а также постепенное заполнение структуры в процессе синхронизации, что позволяет с точностью до шага определить неисправность в процессе работы.

Литература

1. Голиков А. М. Кодирование в радиоэлектронных системах передачи информации / А. М. Голиков. Томск: Томск. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2018. С. 29 – 32, 69 – 74.
2. Симак О. В., Щерба В. В. Математическая обфускация. Криптографическая защита программного кода // Материалы Всероссийского Круглого стола «Актуальные проблемы обеспечения кибербезопасности» (Москва, 15 февраля 2018 г.). Москва, 2018. С. 120–125.

Selected aspects of developing a secure hardware-software complex for wireless information transmission

A. R. RYZHIKOV

*Supervisor – Associate Professor T. K. Artemova
P. G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia*

Abstract. A system prototype has been constructed, with the logical operation scheme and software implementation presented. Both the advantages and drawbacks of the system have been identified

Keywords: Encoding, software-hardware, complex, transmission.

ПЕРИОДИЧЕСКИЕ ВОЗМУЩЕНИЯ В СТРАТИФИЦИРОВАННОМ ОКЕАНЕ У. О. ТРИФОНОВА

*Научный руководитель – доц. А. А. Очиров
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова,
Ярославль, Россия
ulya-trifonova02@yandex.ru*

Аннотация. Проведено исследование периодических инфинитезимальных возмущений, распространяющихся в стратифицированных сжимаемых и слабо сжимаемых средах. Получены дисперсионные соотношения и их решения.

Ключевые слова: стратификация, сжимаемая среда, несжимаемая среда, дисперсионные характеристики, сингулярные и регулярные решения.

Задачи о распространении колебаний в сжимаемых средах не теряют своей актуальности на протяжении длительного времени. Задача о распространении колебаний в сжимаемых средах моделируется сложными и громоздкими выражениями и требует от исследователей использование серьезного математического аппарата и больших вычислительных мощностей. Часто используются приближенные методы, в том числе методы возмущения [1]. В последнее время актуализировались исследования периодических течений в стратифицированных средах [2], наиболее часто встречающиеся в природе. Это связано с повышением доступности высокопроизводительных вычислительных машин и развитием математических методов.

Исследована задача о распространении периодических течений в несжимаемом стратифицированном океане со свободной поверхностью. Задача решается в декартовой системе координат, при наличии силы тяжести и поверхностного натяжения. По поверхности распространяется периодическое возмущение. Математическая формулировка задачи представляет из себя систему фундаментальных уравнений, дополняемых физически обоснованными граничными условиями на свободной поверхности. Задача решается в приближении Буссинеска и линеаризуется, а решение ищется в виде бегущего волнового возмущения. Задача обезразмеривается на собственные параметры, характеризующие среду. При таком выборе параметров обезразмеривания в задаче естественным образом возникает малый параметр, который характеризует отношение собственных масштабов задачи. Из условия совместности уравнений и граничных условий возникает дисперсионное уравнение, которое оказывается сингулярно возмущенным и допускает два типа решений: регулярное и сингулярное.

При выполнении предельных переходов, регулярные решения сведутся к волнам в идеальной жидкости, а сингулярные решения вырождаются.

В сжимаемых средах математическая формулировка описывается уравнениями гидродинамики с учетом сжимаемости. Математическая формулировка дополнена уравнениями теплопроводности и переноса солености. Решение ищется в виде периодического возмущения. Для каждого из процессов было получено дисперсионное соотношение, решение которого можно получить численным методом. В дальнейшем исследовании будут рассматриваться предельные переходы.

Исследованы периодические течения в различных моделях среды. В вязкой стратифицированной сжимаемой атмосфере построены дисперсионные соотношения, связывающие компоненты волнового вектора с частотой периодических колебаний идеального газа в адиабатическом и изотермическом приближениях. В модели слабо сжимаемого стратифицированного океана со свободной поверхностью исследованы соотношения, определяющие динамику регулярных (волновых) и сингулярных (тонкоструктурных) компонентов периодических течений.

Литература

1. Найфэ А. Введение в методы возмущений / А. Найфэ. М.: Мир, 1984. 452 с.
2. Чашечкин Ю. Д., Очиров А. А. Расчет двумерных периодических возмущений свободной поверхности жидкости в различных моделях среды // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. 2023. Т. 513, № 1. С. 95 – 102.

Periodic disturbances in the stratified ocean

U. O. TRIFONOVA

Supervisor – Associate Professor A. A. Ochirov

P. G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia

Abstract. A study of periodic infinitesimal perturbations propagating in stratified compressible and weakly compressible media has been carried out. Dispersion relations and their solutions are obtained.

Keywords: stratification, compressible fluid, incompressible fluid, dispersion relations, singular and regular solutions.

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ САМОДЕЛЬНОЙ НАСАДКИ НА USB Wi-Fi АДАПТЕР М. С. ШИТОВ

*Научный руководитель – доц. Т. К. Артемова
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова,
Ярославль, Россия
maxxsh02@mail.ru*

Аннотация. Был проведен анализ самодельной насадки на USB Wi-Fi адаптер, представляющей собой набор пассивных переотражателей – частей логопериодической антенны. Качество связи, обеспечиваемой адаптером, сравнивалось с использованием насадки и без неё.

Ключевые слова: Wi-Fi, адаптер, насадка, логопериодическая антенна.

Часто встречаются ситуации, когда уровень сигнала недостаточен для надёжной работы Wi-Fi. В этих случаях стараются заменить антенну на более направленную или обеспечить повышение уровня различными «домашними» способами. Один из вариантов – использовать насадку на антенну Wi-Fi адаптера [1]. В этом случае антенна адаптера выступает в роли активного элемента, траверза – как крепёж насадки и для размещения пассивных элементов, и в целом они образуют логопериодическую антенну [2]. У такой антенны длины пассивных элементов пропорциональны логарифму частоты. Достоинствами такого решения является простота, дешевизна, возможность самостоятельного изготовления для непрофессионала, а также хорошая разработанность методик синтеза логопериодических антенн [3].

Был произведен расчет насадки, её изготовление, проведены эксперименты по связи с использованием насадки и без неё. Для определения мощности сигнала использовался Wi-Fi Analyzer. Затем результаты уровня сигнала оцифровывались с помощью GetData Graph Digitizer, отображались и анализировались с помощью электронных таблиц и Wolfram Mathematica.

Результаты статистического анализа уровней мощности сигнала с Fi-Fi адаптера, полученные в условиях проводимых в жилом помещении экспериментов на интервале в 1,5 минуты, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Свойства сигнала, обеспечиваемого USB Wi-Fi адаптером с насадкой и без

Свойства сигнала	С насадкой	Без насадки
Мат. ожидание, дБм	-24,40	-55,25
Дисперсия, %	21,58	12,25

Разница в математическом ожидании составляет -30,85 дБм, что даёт улучшение на 44,16 % от значения без насадки и позволяет сделать вывод об эффективности насадки как усилителя Wi-Fi сигнала. Одновременно выросла и дисперсия, показывающая разброс мгновенных значений мощности в ходе передачи информации. Получившаяся конструкция (рисунок 1), в отличие от чисто антенны адаптера, обладает направленностью, что надо учитывать при ориентации её относительно роутера.



Рисунок 1 – Модель насадки на USB Wi-Fi адаптер

Литература

1. Как усилить Wi-Fi сигнал // “Sdelaysam”. URL: <https://sdelaysam-svoimirukami.ru/4150-kak-prosto-usilit-signal-wi-fi.html>.
2. Ротхаммель К. Антенны. Т.1 / К. Ротхаммель, А. Кришке. М. : Лайт ЛТД, 2000. 416 с.
3. Синдеев Ю. Г. Телевизионные антенны / Ю. Г. Синдеев. Ростов-на-Дону : Феникс, 1999. 182 с.

Analysis of the effectiveness of a homemade nozzle on a USB Wi-Fi adapter

M. S. SHITOV

*Supervisor – Associate Professor T. K. Artemova
P. G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia*

Abstract. An analysis of a homemade nozzle on a USB Wi-Fi adapter, which is a set of passive reflectors – parts of a logoperiodic antenna, was carried out. The quality of communication provided by the adapter was compared with and without the nozzle.

Keywords: Wi-Fi, Adapter, nozzle, logoperiodic antenna.

ГРНТИ 78.25.17

**ТРЕНИРОВОЧНЫЙ КОМПЛЕКС ПРИМЕНЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ
РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Р. И. БЕДНЯКОВ, К. О. КУСТОВ

*Научный руководитель – доц. С. Г. Поздняков
Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны,
Ярославль, Россия
kirya_kustov@bk.ru*

Аннотация. Применение программ-тренажёров учебно-тренировочного комплекса специальных радиотехнических систем при подготовке военных специалистов, в качестве безопасной и эффективной альтернативы традиционным методам тренировок.

Ключевые слова: программа-тренажёр, безопасность, эффективность, оптимизация, алгоритм, выполнение операций.

Применение программ-тренажёров —эффективный инструмент для подготовки и обучения специалистов, который обеспечивает высокий уровень готовности к выполнению задач в различных условиях.

В связи с отсутствием необходимого варианта тренажёра на определённую единицу техники требуется разработать модель, позволяющую оптимизировать работу тренировочного комплекса специальных радиотехнических систем (СРС) для повышения эффективности процесса обучения с применением программ-тренажёров.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд задач:

- разработать алгоритм «действия пользователя – выдача результата программы»;
- выбрать функции взаимодействия;
- написать исходный код;
- подобрать графические иллюстрирующие материалы.

Усилиями коллектива, при выполнении поставленных задач, были реализованы следующие операции:

- опускание и подъём выносных опор из походного и рабочего состояния;
- блокировка рессор;
- выдача питания на панель управления и индикации;
- проверка состояния индикаторов;
- включение режимов работы насосов;
- управление гидроопорами;
- развёртывание и свёртывания агрегата;
- перемещение агрегата в различных плоскостях;

- управление траверсой в различных плоскостях;
- закрепление и раскрепление груза, его перемещение;
- выполнение операций заряжения и разряжения пусковой установки.

Применение в обучении тренировочного комплекса создаёт благоприятные условия для более быстрого усвоения обучаемыми алгоритмов проведения операций с применением СРС без потери времени на поиск дополнительных ресурсов; сокращается время на подготовку специалистов-операторов, уменьшается риск повреждения вооружения и военной техники, получение травм личным составом, а также уменьшается стоимость обучения и расход материалов; тренировочный комплекс обеспечивает возможность неоднократного повторения обрабатываемых операций и имеет функцию отслеживания изменения результатов, отображение ошибочных действий, что также оптимизирует процесс приобретения необходимых навыков СРС.

Следует отметить успешность разработки нового варианта тренажёра на определённую единицу техники, тип которого ранее отсутствовал. При этом поставлен дополнительный круг задач. Необходимо добиться определённой «гибкости» тренажёра, - создать функциональную составляющую, при которой возможны индивидуальные автоматические настройки под конкретного человека.

Литература

1. Авдеев Ю. Алмазная молодёжь: [науч.-техн. конф. молодых учёных и специалистов: «Направления создания средств воздушно-космической обороны», провод. Головным системным конструкторским бюро Концерна ПВО «Алмаз-Антей» им. акад. А.А. Расплетина] // Красная звезда. 2010. № 124. С. 16. (Еженед. вып. 14—20 июля).
2. Волков Л. Н. Системы цифровой радиосвязи – базовые методы и характеристики / Л. Н. Волков, М. С. Немировский, Ю. С. Шинаков. М.: Эко-Трендз. 2005. 392 с.
3. Брусникин А. Виртуальный тренажер для обучения военнослужащих // Зарубеж. воен. обозрение. 2010. № 6. С. 80.

Training complex for the application of special radio systems

R. I. BEDNYAKOV, K. O. KUSTOV

*Supervisor – Associate Professor S. G. Pozdnyakov
Yaroslavl Higher Military School of Air Defense, Yaroslavl, Russia*

Abstract. Simulator programs play a significant role in modern military training, providing a safe and effective alternative to traditional training methods.

Keywords: simulator program, alternative, reduction of specialist training time, quality.

ОСОБЕННОСТИ НАВЕДЕНИЯ ЗЕНИТНЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ РАКЕТ МЕТОДОМ ПРОПОРЦИОНАЛЬНОГО СБЛИЖЕНИЯ

Р. С. БУДУЧИН

*Научный руководитель – ст. преп. А. Ю. Чернов
Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны,
Ярославль, Россия
ach-yar@yandex.ru*

Аннотация. В целях повышения структурной скрытности функционирования радиолокационной станции предлагается использовать в качестве зондирующих линейно-частотно-модулированные сигналы с поимпульсным изменением частотно-временных параметров. Обоснована возможность обработки такого вида сигналов с помощью многоканального некогерентного накопителя.

Ключевые слова: структурная скрытность, линейно-частотно-модулированный сигнал, некогерентный накопитель.

Из опыта военных конфликтов последних лет следует, что одним из основных способов преодоления системы ПВО средствами воздушно-космического нападения является постановка активных шумовых помех различных видов. При этом, наиболее эффективными являются ответно-импульсные помехи, поэтому повышаются требования к структурной скрытности (СК) работы радиолокационной станции (РЛС).

Как меру СК РЛС можно использовать энтропию, показывающую степень неопределённости выбора множества параметров зондирующих сигналов. В таком случае, наиболее целесообразным представляется применение линейно-частотно-модулированных сигналов (ЛЧМ) с поимпульсным изменением частотно-временных параметров.

Одним из основных свойств ЛЧМ сигнала является наличие скоростной ошибки измерения дальности. Такая ошибка может быть скомпенсирована проведением дополнительного зондирования аналогичным сигналом, но противоположным по знаку крутизны частотной модуляции (КЧМ). Таким образом дальность до цели может быть определена как полусумма измеренных времён запаздывания, а скорость цели – по величине измеренной скоростной ошибки. Применение ЛЧМ сигналов с поимпульсным изменением знака КЧМ позволяет произвести оценку истинной дальности до цели и её радиальной скорости. При этом, в случае нахождения более одной цели в неразрешаемом, по угловым координатам объёме, возможна ситуация, при которой невозможно определить пары эхо-сигналов, принадлежащих одной и той же цели и возникает неопределённая многоцелевая ситуация. Для устранения погрешности необходимо решить задачу отождествления первичных результатов измерения

времён запаздывания проведением дополнительных зондирований ЛЧМ сигналов с изменёнными частотно-временными параметрами, например, длительностью импульса или (и) девиацией частоты.

Задача отождествления первичных результатов измерения решается автоматически, – использованием некогерентного накопителя, представляющего собой многоканальное по скорости устройство. Количество скоростных каналов определяется диапазоном скоростей обнаруживаемых целей, а также требуемыми точностными характеристиками измерения скорости. Каждый канал включает в себя четыре согласованных фильтра, настроенных на определённую доплеровскую добавку частоты, трёх линий задержки и двух сумматоров. Отражённые сигналы от одной и той же цели будут суммироваться в канале некогерентного накопителя соответствующего радиальной скорости цели. В остальных каналах эхо-сигналы будут «рассыпаться» на непросуммированные остатки.

Анализ результатов позволяет сделать вывод о возможности применения ЛЧМ сигналов с поимпульсным изменением частотно-временных параметров для обнаружения, измерения дальности и радиальной скорости целей в многоцелевых ситуациях. Высокий уровень некомпенсированных остатков уменьшается за счёт перемножения сумм двух пар обрабатываемых сигналов внутри одного канала и применением системы шумовой автоматической регулировкой усиления.

Литература

1. Сосулин, Ю. Г. Теоретические основы радиолокации и радионавигации: учеб. пособие для вузов / Ю. Г. Сосулин. М. : Радио и связь, 1992. 304 с.
2. Теоретические основы радиолокации / под ред. Я. Д. Ширмана. М. : Сов. радио, 1970. 560с.

Features of processing complexly encoded linearly-frequency-modulated signals with pulse change of time-frequency parameters

R. S. BUDUCHIN

*Supervisor – Senior Lecturer A. Yu. Chernov
Yaroslavl higher military school of Air Defense, Yaroslavl, Russia*

Abstract. In order to increase the structural of the operation of the radar station? It is processed to use linear-frequency-modulated signals with pulse change of time-frequency parameters as probing signals. The possibility of processing this tipe of signals using a multichannel incoherent storage device is substantiated.

Keywords: structural stealth, linear-frequency-modulated signal, incoherent storage.

СИСТЕМА синхронизации для беспилотного роя

К. С. БЫКОВ

*Научный руководитель – проф. Л. Н. Казаков
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова,
Ярославль, Россия*

keraelbykov@gmail.com

Аннотация. Предложен децентрализованный алгоритм синхронизации внутренних часов на борту БЛА в составе роя. Алгоритм не сложен в реализации и надёжно синхронизирует внутренние часы в группе беспилотных летательных аппаратов.

Ключевые слова: синхронизация, беспроводная сеть, беспилотный летательный аппарат.

Когда мы говорим о системе синхронизации, мы имеем в виду систему, которая обеспечивает учёт и синхронизацию всех тактовых импульсов в распределённой группе, как внутренних тактовых импульсов, так и фазовых задержек для каждого отдельного двухточечного канала. Это связано с тем, что оба аспекта имеют решающее значение для скоординированной и синхронизированной работы БПЛА.

Протокол заряженных частиц — это алгоритм синхронизации часов, основанный на поведении заряженных частиц в физике. Это распределённый алгоритм, который можно использовать для синхронизации часов устройств в сети, и он особенно полезен в ситуациях, когда имеется большое количество устройств и сеть очень динамична.

Основная идея протокола заряженных частиц заключается в присвоении каждому устройству в сети «заряда», который представляет собой относительное смещение устройства по времени. Изначально для зарядов устанавливаются случайные значения, а затем устройства связываются друг с другом, чтобы попытаться достичь консенсуса относительно правильного времени.

Протокол работает следующим образом:

1. Каждое устройство передаёт свой заряд соседям.
2. Каждое устройство получает заряды от своих соседей и вычисляет средний заряд своих соседей.
3. Каждое устройство немного корректирует свой заряд, исходя из среднего заряда его соседей.
4. Шаги 1-3 повторяются много раз, пока заряды всех устройств не сойдутся к единому значению.

Протокол заряженных частиц имеет ряд преимуществ перед другими алгоритмами синхронизации часов. Например, он очень

надежен и может обрабатывать большое количество устройств и высокий уровень сетевой динамики. Его также относительно просто реализовать, и он не требует централизованного сервера времени.

Каждый аппарат корректирует свой временной сдвиг Δt_i на основании среднего значения временных сдвигов Δt_j , полученных от других аппаратов, согласно уравнению (1), постепенно выравниваясь среди всей группы, как это показано на рисунке 1.

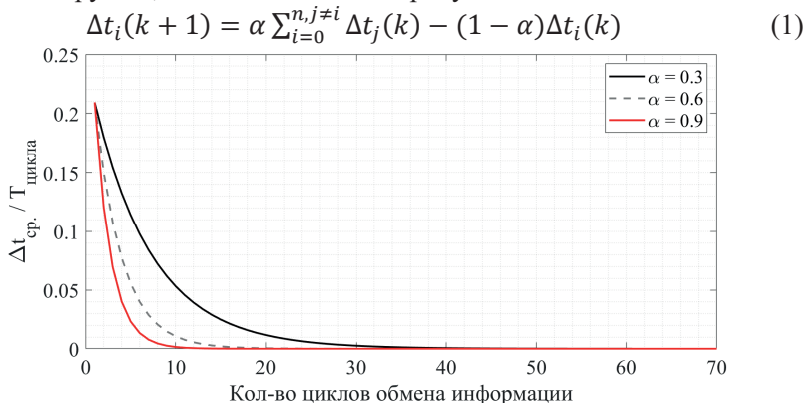


Рисунок 1 – Сходимость средней величины отклонения внутренних часов в течение информационного обмена

Литература

1. Sundararaman B., Buy U., Kshemkalyani A. D. Clock synchronization for wireless sensor networks: a survey // Department of Computer Science, University of Illinois at Chicago, Ad Hoc Networks. 2005. Vol. 3. P. 281–323.
2. Ананьев А. В. Разработка способа организации связи с использованием беспилонных летательных аппаратов малой дальности / А. В. Ананьев, М. А. Стафеев, Е. В. Макеев. 2019. Труды МАИ. Вып. 105.

Synchronization system for an unmanned swarm

K. S. BYKOV

Supervisor – Professor L. N. Kazakov

P. G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia

Abstract. A decentralized algorithm for synchronizing the internal clocks on board a UAV as part of a swarm is proposed. The algorithm is not difficult to implement and reliably synchronizes the internal clocks in a group of unmanned aerial vehicles.

Keywords: synchronization, wireless network, unmanned aerial vehicle.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯНИЯ ПРОСТЫХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ ПРИ ЗОНДИРОВАНИИ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ

Н. А. ДЕНИСОВА

*Научный руководитель – доц. А. Б. Герасимов
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова,
Ярославль, Россия
n.denisova386@gmail.com*

Аннотация. Рассматривается возможность получения оценки эффективной поверхности рассеяния объекта при зондировании сигналом с заданной полосой частот. Предполагается возможность оценки эффективной поверхности рассеяния путём прямого суммирования частотных составляющих спектра сигнала.

Ключевые слова: эффективная поверхность рассеяния, корреляционная функция, суммирование спектра, корреляция.

Оценка характеристик рассеяния при использовании импульсных сигналов с заданной шириной полосы предполагает применение спектрального метода анализа [1]. Такой классический подход требует производить вычисления спектра зондирующего сигнала и преобразования каждой его спектральной составляющей. Это приводит к большим временным затратам на расчёт характеристик рассеяния и создаёт сложности для получения баз данных угловой зависимости характеристик рассеяния различных объектов методом моделирования.

В качестве характеристики рассеяния принимается уровень сигнала на выходе согласованного фильтра РЛС, который можно представить следующим выражением:

$$A(\tau) = \sum_{k=1}^N |S_t(\omega_k)|^2 \sqrt{\frac{G^2}{(4\pi)^3}} \frac{2\pi}{R\omega_k} L(\omega_k) \exp(-j\omega_k \tau) \quad (1)$$

где $S_t(\omega_k)$ – спектр излучаемого сигнала; G – коэффициент усиления антенны; R – расстояние до объекта; $L(\omega_k)$ – матрица эффективной длины; N – количество спектральных составляющих; τ – момент ожидаемого прихода эхо-сигнала от объекта.

В качестве зондирующего сигнала РЛС будем рассматривать импульсы с линейной частотной модуляцией. Спектр такого сигнала можно считать равномерным в полосе частот, равной девиации частоты. Тогда суммирование в (1) осуществляется только по спектральным составляющим, находящимся в полосе частот сигнала, с псевдослучайными начальными фазами, и значение сигнала на выходе согласованного фильтра можно рассматривать как случайную величину.

Получить случайную величину с аналогичным законом распределения можно путем суммирования меньшего числа спектральных составляющих в соответствии с выражением:

$$A' = \frac{P_t}{K} \sum_{k=1}^K \sqrt{\frac{G^2}{(4\pi)^3} \frac{(2\pi c)^2}{R^2 \omega_k}} L(\omega_k) \quad (2)$$

Проверка адекватности выражения (2) для оценки характеристик рассеяния проводилась на примере равносторонней треугольной металлической пластины. Проводился расчёт характеристик рассеяния по формулам (1) и (2) и определялось СКО (таблица 1).

Таблица 1 – Значения СКО

Процент учтённых спектральных составляющих	СКО значений ЭПР, м ²	
	Выбор с шагом	Случайный выбор
99%	0,0081	0,0080
50%	1,1667	0,0078
25%	1,4604	0,0099
10%	1,5582	0,0109

Из полученных результатов видно, что выражение (2) даёт адекватные оценки характеристик рассеяния при случайном выборе частот в соответствии с равномерным законом распределения.

Литература

1. Борзов А. Б. Миллиметровая радиолокация: методы обнаружения и наведения в условиях естественных и организованных помех / А. Б. Борзов и др. М. : Радиотехника, 2010. 376 с.

Method for assessing the scattering characteristics of simple reflectors when probing broadband signals

N. A. DENISOVA

Supervisor – Associate Professor A. B. Gerasimov

P. G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia

Abstract. The paper considers the possibility of obtaining an estimate of the effective scattering surface of an object when probing with a signal with a given frequency band. It is assumed that the effective scattering surface can be estimated by direct summation of the frequency components of the signal spectrum.

Keywords: effective scattering surface, correlation function, spectrum summation, correlation.

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ОПЕРАТИВНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПИВОВАРЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Г. М. ЗЮЗИН, А. С. ЧЕРНЫШЕВ

*Научный руководитель – доц. М. А. Сенченко
Ярославский государственный аграрный университет,
Ярославль, Россия
glebzuzin245@gmail.com*

Аннотация. Рассмотрено представление процесса оперативного восстановления оборудования пивоваренного производства на основе логико-лингвистического подхода за счёт семантического и языкового описания.

Ключевые слова: в оперативное восстановление, теоретико-множественное представление, вербальное представление.

Для автоматизации информационной поддержки дежурной смены автоматизированной системы управления технологического процесса (АСУ ТП) в ходе оперативного восстановления (ОВ) оборудования необходимо формальное представление этого процесса, как сложноорганизованной деятельности. Примеры построения формализованной концептуальной модели $M = M(\Pi)$ для процесса Π ОВ оборудования пивоваренного производства (ПП) в литературе отсутствуют, что приводит к необходимости создания такой модели.

Решать задачу представления процесса ОВ оборудования ПП предлагается на основе логико-лингвистического подхода [1] за счёт семантического и языкового описания. Поскольку процесс ОВ изделий ОПП носит многоаспектный характер, то для его представления необходимо выделить следующие аспекты g :

функциональный ($g = \Phi$), структурный ($g = \text{Ст}$), ресурсный ($g = \text{Р}$), временной ($g = \text{Вр}$), а также аспект представления данных ($g = \text{W}$).

Любой из этих аспектов подразделяется на материальные и информационные объекты, участвующие в реализации этого процесса, а также на взаимосвязи между ними, которые целесообразно представить в виде процессных элементов в предметных понятиях и терминах естественного языка. Примером таких элементов в процессе ОВ ОПП выступают операции, документы, ресурсы и т.п., которые описываются в моделях (IDEF0, DFD и т.д.) процесса предметными понятиями [3].

Рассмотрено логико-лингвистическое представление $M_g(\Pi)$ g -го аспекта процесса Π , $g \in \{\text{Ст}, \Phi, \text{Р}, \text{Вр}, \text{W}\}$, которое учитывает его два представления, – теоретико-множественное и вербальное.

$$M_g(\Pi) = M_g(M_g^1(\Pi), M_g^2(\Pi)), \quad (1)$$

где $M_g^1(\Pi)$ и $M_g^2(\Pi)$ - модели соответственно теоретико-множественного и вербального представления процесса ОБ ОПП.

При теоретико-множественном представлении аспекта g процесса Π выделяются соответствующие процессные элементы $\mathcal{E}_g$ и связи $\mathcal{C}_g$ между ними: $M_g^1(\Pi) = \{\mathcal{E}_g, \mathcal{C}_g(\mathcal{E}_g)\}$.

При вербальном представлении g -го аспекта процесса Π определяются в понятиях и терминах естественного языка процессные элементы и связи между ними, представленные в модели $M_g^1(\Pi)$. При этом необходимо как предметное (например, «заявка на ремонт», «представитель ремонтного органа»), так прикладное (например, «заявка на ремонт сусловарочного аппарата Stromboli», «начальник цеха ремонта и восстановления ФИО») описание g -го аспекта процесса оперативного восстановления оборудования пивоваренного производства.

Литература

1. Поспелов Д. А. Логико–лингвистические модели в системах управления. М. : Энергоиздат, 1981. 232 с.
2. Зюзин Г. М., Чернышов А. С. Модельные представления оперативного восстановления пивоваренного оборудования для использования в средствах информационной поддержки АСУ ТП // Доклад на Всероссийской студенческой научно-практической конференции. Череповец: ЧГУ, 2024.
3. Киммел П. UML. Основы визуального анализа и проектирования / Пол Киммел. М. : НТ Пресс, 2008. 272 с.

Formalization of the process of prompt restoration of brewery equipment

G. M. ZYUZIN, A. S. CHERNYSHOV

*Supervisor – Associate Professor M. A. Senchenko
Yaroslavl State Agrarian University, Yaroslavl, Russia*

Abstract. Examines the presentation of the process of prompt restoration of brewery equipment on the basis of a logical-linguistic approach due to semantic and linguistic description abstract is a brief summary of a research article, thesis, review, conference proceeding, or any in-depth analysis of a particular subject and is often used to help the reader quickly ascertain the paper's purpose.

Keywords: operative recovery, set-theoretic representation, verbal representation.

ОСОБЕННОСТИ НАВЕДЕНИЯ ЗЕНИТНЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ РАКЕТ МЕТОДОМ ПРОПОРЦИОНАЛЬНОГО СБЛИЖЕНИЯ

Р. Д. КИЗИЛОВ, А. В. МЕДВЕДЕВ

*Научный руководитель – доц. С. Г. Позняков
Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны,
Ярославль, Россия
kizilov.romochka@mail.ru*

Аннотация. Наведение ракет методом пропорционального сближения получило широкое распространение, но ввиду широкого скоростного спектра средств воздушного нападения противника возникает проблема с выбором коэффициента пропорциональности.

Ключевые слова: метод наведения, уравнение связи, параметр рассогласования, лучи нулевой кривизны, коэффициент пропорциональности.

Методом пропорционального сближения называется метод наведения, при котором в течение всего времени полёта ракеты к цели угловая скорость вращения вектора скорости ракеты остаётся пропорциональной угловой скорости вращения линии «ракета–цель». Уравнение метода в вертикальной плоскости:

$$\dot{\theta}_{pk} = k\dot{\varphi}, \quad (1)$$

где:

- $\dot{\theta}_{pk}$ - требуемая (кинематическая) угловая скорость вращения вектора скорости ракеты;
- $\dot{\varphi}$ - угловая скорость вращения линии «ракета–цель»;
- k - коэффициент пропорциональности.

Рассмотрим условия существования прямолинейных траекторий (лучей нулевой кривизны) для метода пропорционального сближения. При методе пропорционального сближения команда управления, а значит, и потребное нормальное ускорение ракеты формируется пропорционально угловой скорости вращения линии «ракета–цель». Уравнение, позволяющее определить лучи нулевой кривизны для метода пропорционального сближения:

$$V_{\text{ц}} \sin \varphi = V_p \sin[(k - 1)\varphi + \theta_0] \quad (2)$$

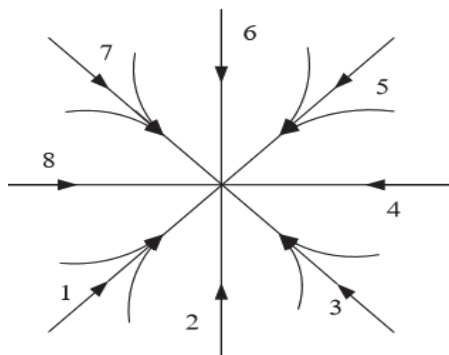


Рисунок 1 – Вид лучей нулевой кривизны для метода пропорционального сближения

Наличие большого числа устойчивых лучей нулевой кривизны означает, что метод пропорционального сближения обеспечивает атаку целей с различных направлений. В связи с появлением гиперзвуковых средств воздушного нападения возникает необходимость увеличивать значение коэффициента пропорциональности k , однако значительное увеличение k ограничено возможностями управления ракеты. Данная проблема на сегодняшний день не решена, в дальнейшем необходимо определить оптимальное значение k по гиперзвуковым летательным аппаратам, учитывающим возможности ракеты.

Литература

1. Кожевников В. А. Автоматическое наведение ракет и космических аппаратов. / В. А. Кожевников М. : Изд-во Московского университета, 1981. 215 с.

Features of the guidance of anti-aircraft guided missiles by the proportional approach method

R. D. KIZILOV, A. V. MEDVEDEV

*Supervisor – Associate Professor S. G. Poznyakov
Yaroslavl Higher Military School of Air Defense, Yaroslavl, Russia*

Abstract. Missile guidance by the proportional approach method has become widespread, but due to the wide high-speed range of enemy air attack means, there is a problem with choosing the proportionality coefficient.

Keywords: guidance method, coupling equation, misalignment parameter, rays of zero curvature, proportionality coefficient.

РАЗРАБОТКА ТРЕНАЖНО-ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ «ПРОВЕРКА И РЕГУЛИРОВКА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕДАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА»

П. А. ЛАВРИЧЕНКО

*Научный руководитель – доц. Е. А. Яскин
Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны,
Ярославль, Россия
lavrichenko.petya@mail.ru*

Аннотация. Рассмотрен способ повышения эффективности подготовки обслуживающего персонала с использованием тренажно-имитационной модели «Проверка и регулировка основных параметров передающего устройства».

Ключевые слова: передающее устройство, внешний вид и расположение органов управления передающим устройством.

Целью исследования является повышение эффективности подготовки обслуживающего персонала военного образца. Для достижения цели работы необходимо решить ряд задач:

- изучить общие принципы построения передающего устройства;
- проверить и осуществить регулировку основных параметров передающего устройства, провести осциллографический контроль аппаратуры, разработать тренажно-имитационную модель;
- осуществить проверку функционирования тренажно-имитационной модели и дать подробное описание её работы.

Исследовательская часть работы заключалась в следующем:

1. Проанализировать «органы управления» (изучить их внешний вид, порядок работы с ними).
2. Создать максимально похожую модель, которая будет схожа с той аппаратурой, которая расположена на военном образце.
3. Произвести правильную визуализацию «органов управления» передающим устройством, что упростит освоение устройства обучающимися, взамен посещения реального образца боевой техники.

Обслуживающий персонал военной техники должен иметь глубокие теоретические знания о принципах её работы, характере возможных неисправностей для эффективного выполнения поставленных задач.

Экономическая целесообразность разрабатываемой тренажно-имитационной модели объекта военной техники обусловлена существенно меньшими финансовыми затратами на его использование относительно боевого образца.



Рисунок 1 – Выполнение проверки «Контроль формы, огибающей СВЧ-импульсов»

На рисунке 1 представлена одна из основных проверок передающего устройства, которая реализована в программе.

Разработанная модель позволяет обучающимся ознакомиться с правильностью выполнения основных этапов проверок передающего устройства, назначением и составом «органов управления» передающего устройства.

Литература

1. Советов В. А. Устройство и эксплуатация командных пунктов зенитных ракетных систем противовоздушной обороны дальнего действия. Аппаратура радиолокационного комплекса. Часть 1: учебное пособие / В. А. Советов, Е. А. Яскин, К. А. Кэссиди и др. Ярославль: ЯВВУ ПВО, 2020.

Development of a simulation model «Checking and adjusting the main parameters of the transmitting device»

P. A. LAVRICHENKO

*Supervisor – Associate Professor E. A. Yaskin
Higher Military School of Air Defense, Yaroslavl, Russia*

Abstract. The paper considers a way to improve the efficiency of training military-style service personnel using a simulator simulation model «Checking and adjusting the basic parameters of the transmitting device».

Keywords: the transmitting device, the appearance and location of the controls of the transmitting device.

ОЦЕНКА НОРМАЛЬНЫХ УСКОРЕНИЙ ПРИ НАВЕДЕНИИ ЗЕНИТНОЙ УПРАВЛЯЕМОЙ РАКЕТЫ МЕТОДОМ «ТРЁХ ТОЧЕК» НА ГИПЕРЗВУКОВЫЕ ЦЕЛИ**З. В. ЛЫЖИН**

*Научный руководитель – ст. преп. А. Ю. Чернов
Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны,
Ярославль, Россия
ach-yar@yandex.ru*

Аннотация. Одним из направлений развития средств воздушного нападения является создание и применение гиперзвуковых летательных аппаратов. Наведение зенитных управляемых ракет на такие цели сопровождается большими значениями потребных перегрузок. В работе предлагается способ уменьшения таких перегрузок при реализации трёхточечных методов наведения.

Ключевые слова. Зенитная управляемая ракета, потребные нормальные перегрузки, «трехточечные» методы наведения.

Анализ развития средств воздушного нападения показал, что одним из наиболее перспективных направлений является создание и совершенствование гиперзвуковых летательных аппаратов. В этих условиях повышаются требования к обеспечению потенциальной точности наведения зенитной управляемой ракеты (ЗУР) на цель.

Известно, что для обеспечения потенциальной точности наведения необходимо выполнение условия:

$$n_{\text{расп}} \geq n_{\text{потр}} \quad (1)$$

где $n_{\text{расп}}$ – располагаемая перегрузка по нормальным ускорениям, определяющая минимальный радиус кривизны траектории, по которой может развернуться ЗУР, $n_{\text{потр}}$ – потребная перегрузка, зависящая от реализуемого метода наведения и скорости цели. Потребная перегрузка определяет требуемый радиус кривизны траектории ракеты. Очевидно, что в случае нарушения выполнения условия (1), например, при превышении скорости цели скорости ракеты, ЗУР не сможет развернуться по окружности требуемого радиуса, то есть возникает ошибка наведения, обусловленная ограниченными возможностями ракеты по перегрузке.

Таким образом, для обеспечения потенциальной точности наведения требуется выбирать такой метод наведения, который будет обеспечивать выполнение условия (1).

В зенитных ракетных комплексах, реализующих командное радиоуправление первого вида наибольшее распространение получили «трёхточечные» методы наведения. Общий вид уравнения «трёхточечных» методов наведения имеет вид:

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{\text{ц}} + k\varepsilon_{\text{упр}}, \beta_p = \beta_{\text{ц}} + k\beta_{\text{упр}} \quad (2)$$

где $\varepsilon_p(\beta_p)$ – угол места (азимут) ракеты, $\varepsilon_{\text{ц}}(\beta_{\text{ц}})$ – угол места (азимут) цели, $\varepsilon_{\text{упр}}(\beta_{\text{упр}})$ угол упреждения, k – коэффициент пропорциональности ($k=0 \div 1$).

При $k=0$ имеет место метод «трёхточек». Такой метод обладает высокой помехозащищённостью, но предполагает максимальные значения потребных перегрузок в районе точки встречи. При $k=1$ реализуется метод полного спрямления, обеспечивающий нулевые потребные перегрузки, но он чувствителен к маневру цели. В настоящее время реализуются только методы «трёхточек» ($k=0$) и «половинного» спрямления ($k=0,5$).

В ходе работы была разработана модель расчёта кинематической траектории и оценки потребных перегрузок при реализации трёхточечных методов наведения ЗУР на цели, летящие с различными скоростями. Анализ результатов моделирования показал, что при работе по гиперзвуковым целям для уменьшения потребных перегрузок, следует использовать адаптивный коэффициент пропорциональности k , зависящий от скорости цели. Так, например, при скорости цели, превышающей скорость ракеты более чем в два раза следует выбирать коэффициент k , близким к единице, при наведении на цели имеющих скорость меньше скорости ракеты использовать метод «половинного спрямления» или «трёхточек», в зависимости от помеховой обстановки.

Таким образом, использование адаптивного коэффициента пропорциональности позволяет обеспечивать выполнение условия (1) во всём диапазоне скоростей целей.

Литература

1. Неупокоев Ф. К. Стрельба зенитными ракетами / Ф. К. Неупокоев. М. : Воениздат, 1991. 343 с.

Assessment of normal accelerations when aiming a three-point anti-aircraft guided missile at hypersonic targets

Z. V. LYZHIN

Supervisor – Senior Lecturer A. Yu. Chernov

Yaroslavl Higher Military School of Air Defense, Yaroslavl, Russia

Abstract. One of the directions of development of air attack means is the creation and use of hypersonic aircraft. Aiming anti-aircraft guided missiles at such targets is accompanied by high values of required overloads. The paper proposes away to reduce such overloads when implementing three-point guidance methods.

Keywords: anti-aircraft guided missile; required normal overloads; «three-point» guidance methods.

МЕТОД ОЦЕНКИ ЛОКАЛЬНОЙ ТРАЕКТОРИИ МАЛОВЫСОТНОГО БЛА И ОДНОЗНАЧНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ КОНТРАСТНЫХ ОБЪЕКТОВ ПО ДАНЫМ МАТРИЧНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ БОРТОВОЙ РЛС

Е. Л. МИХАЙЛОВА

*Научный руководитель – проф. В. Е. Туров
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова,
Ярославль, Россия
lvikabruno@yandex.ru*

Аннотация. Рассмотрена модель построения радиолокационной станции (РЛС), использующей матричное (комбинированное) зондирование подстилающей поверхности коротко импульсными радиосигналами с ортогональной поляризацией с разнесенными в горизонтальной плоскости двумя передающими и двумя приемными антеннами, обеспечивающей однозначное определение координат контрастных объектов. Показано, что матричная схема построения РЛС с цифровой обработкой набора принятых сигналов даёт возможность с высокой точностью определять угловые координаты и дальность объекта локации на фоне подстилающей поверхности и локальную траекторию полета БЛА относительно этого объекта.

Ключевые слова: РЛС, БЛА, коротко импульсный радиосигнал, ортогональная поляризация, фазовый метод определения угловых координат, объект на фоне подстилающей поверхности.

Для оценки локальной траектории маловысотного БЛА и однозначного определения координат контрастных объектов на фоне подстилающей поверхности с помощью компактной РЛС будем использовать фазовый метод пеленгации цели с опорными матрицами, состоящими из значений принятых сигналов от точек на поверхности обзора антенной системы бортовой РЛС.

Траекторию полета представляем в виде линии локальной траектории (набора значений комплексных сигналов сечения как матрицы разности фаз, так и матриц каждой приемной антенны).

Для однозначного определения координаты объекта и локальной траектории маловысотного БЛА используем набор корреляционных функций произведения сигналов двух приемных антенн и произведения их опорных матриц, имеющих один максимум. При совместной обработке результатов (Рисунок 1), по максимальному значению отклика определяем координаты объекта в зоне обзора ($x = 150$, $y = 150$) и локальную траекторию БЛА вдоль оси ОХ с поперечным отклонением $y=150$.

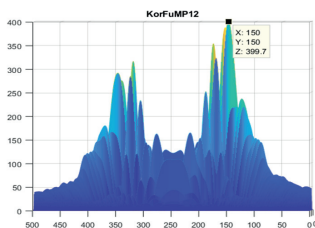


Рисунок 1 – Результат совместной обработки

Литература

1. Ямпольский С. М., Наумов А. И., Кичигин Е. К., Рубинов В. И., Мох А. М. Статистическая модель прогнозного профиля рельефа местности в задаче выполнения маловысотного полета воздушного судна по цифровой карте высот // Электронный журнал «Труды МАИ». 2014. Выпуск № 76. <https://mai.ru/upload/iblock/776/77662caa7afa67fc19a97e9711744798.pdf>
2. Wilkinson N., Brookes T., Price A., Godfrey M. Latest Developments of the TERPROM® Digital Terrain System 2009 // Joint Navigation Conference, Orlando, Florida, USA, June 2009.
3. Никольский М. Н. 20 лет на передовом рубеже // Авиация и космонавтика. 2012. № 3. С. 1 – 5.
4. Кулагин В. В., Соколов А. В., Черепенин В. А. Моноимпульсная локация с помощью мощных наносекундных микроволновых импульсов. <http://www.cplire.ru/joined/iso/lection5/text.html>

Method for estimating the local trajectory of low-altitude UAV and unambiguous determination of coordinates of contrasting objects based on data of on-board radar matrix sensing

E. L. MIKHAILOVA

Supervisor – Professor V. E. Turov

P. G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia

Abstract. A radar construction model is considered using matrix (combined) sensing of the underlying surface with short-pulse radio signals with orthogonal polarization with two transmitting and two receiving antennas spaced horizontally, providing unambiguous determination of the coordinates of contrasting objects. It is shown that the matrix scheme of radar construction with digital processing of a set of received signals makes it possible to determine with high accuracy the angular coordinates and range of the location object against the background of the underlying surface and the local flight path of the UAV relative to this object.

Keywords: Radar, UAV, short-pulse radio signal, orthogonal polarization, phase method for determining angular coordinates, an object against the background of the underlying surface.

ФОНОВАЯ РАДИОЛОКАЦИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СКРЫТНОСТИ РАБОТЫ РЛС

Ж. Б. О. СИЛВА, Ж. С. Ф. ОЛИМ

*Научный руководитель – проф. А. Н. Цыбульник, проф. Л. Н. Казаков
Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова,
Ярославль, Россия
joao-mayu86@mail.ru*

Аннотация. Рассматривается проблема повышения скрытности работы РЛС с помощью фоновой радиолокации. Анализируются принципы и методы этого подхода, а также перспективы его развития.

Ключевые слова: включите фоновая радиолокация, скрытность работы РЛС, принципы, методы, перспективы развития.

В современном мире применение РЛС стремительно растёт. РЛС играет важную роль в обеспечении безопасности и эффективности функционирования различных систем и объектов. Однако работа РЛС может быть обнаружена и проанализирована средств радиотехнической разведки противником, что снижает её эффективность, безопасность, а также живучесть. В связи с этим возникает необходимость повышения скрытности РЛС. Одним из перспективных направлений повышения скрытности работы РЛС является применение фоновой радиолокации.

Принцип работы фоновой радиолокации заключается в том, что РЛС излучает зондирующий сигнал, который отражается от окружающих объектов и возвращается на РЛС. Однако, если рядом с РЛС находятся дополнительные отражатели, то они могут создавать дополнительный фон, который затрудняет обнаружение зондирующего сигнала РЛС.

Одним из преимуществ фоновой радиолокации является её способность снижать заметность РЛС для средств радиотехнической разведки противником. Это достигается за счёт того, что зондирующий сигнал становится менее различимым на фоне дополнительных отражений от местных предметов. Кроме того, фоновая радиолокация может использоваться для создания помех, которые затрудняют определение истинного местоположения РЛС.

Для повышения эффективности фоновой радиолокации необходимо учитывать следующие факторы:

- характеристики зондирующих сигналов;
- параметры РЛС и её окружающие объекты.

$$S_{\text{изл}}(t) = S_{\text{пер}}(t) \cdot \sqrt{G_0 \cdot G_{\text{пер}}(\theta, \varepsilon)} \quad (1)$$

где:

G_0 – коэффициент усиления передающей антенны РЛС;

$G_{пер}(\theta, \varepsilon)$ – ДН передающей антенны РЛС.

Фоновый метод радиолокации по принципу схож с методами когерентно-импульсных радиолокаторов с внешней когерентностью. Отличие между ними состоит в том, что в когерентно-импульсных радиолокаторах с внешней когерентностью подвижная цель и неподвижный объект, переотражающий радиоволну и формирующий опорный сигнал на выходе антенны, находятся в одном строке дальности.

Таким образом, фоновая радиолокация является перспективным методом повышения скрытности работы РЛС. Этот метод позволяет создавать ложные (маскирующие) зондирующие сигналы, которые затрудняют обнаружение факта работы РЛС и снижают вероятность её успешного анализа средствами разведки противником. Однако для широкого внедрения этого метода необходимо проведение дополнительных исследований и разработок, направленных на улучшение характеристик ЗС, повышение и снижение энергетических показателей ЗС.

Литература

1. Охрименко А. Е. Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба / А. Е. Охрименко. М. : Воениздат, 1983. 456 с.
2. Куприянов А. И. Теоретические основы радиоэлектронной разведки: учеб. пособие / А. И. Куприянов, П. Б. Петренко, М. П. Сычев. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. 381 с.
3. Шахтарин Б. И. Обнаружение сигналов : учеб. пособие / Б. И. Шахтарин. М. : Гелиос АРВ, 2006. 488 с.

Background radar to increase the stealth of radar operation

J. B. O. SILVA, J. S. F. OLIM

*Supervisor – Professor A. N. Tsybulnik, Professor L. N. Kazakov
P. G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia*

Abstract. The problem of increasing the stealth of radar operation using background radar is considered. The principles and methods of this approach are analyzed, as well as the prospects for its development.

Keywords: background radar, stealth radar operation, principles, methods, development prospects.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛОСКОЙ СПИРАЛЬНОЙ АНТЕННЫ

Д. А. УТКИН

*Научный руководитель – доц. А. Н. Крнев; вед. инж. Ю. Н. Кривов
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова,
Ярославль, Россия
Daniil.Ytkin@yandex.ru*

Аннотация. Данная работа посвящена экспериментальному исследованию характеристик плоской спиральной антенны. В ходе работы исследованы следующие характеристики: коэффициент стоячей волны, коэффициент усиления, диаграмма направленности. Целью работы является определение возможности применения антенны в пеленгаторе сигналов БПЛА.

Ключевые слова: спиральная антенна, диаграмма направленности, радиопеленгация.

Программа исследований антенного устройства включает в себя экспериментальное определение значений коэффициента стоячей волны (КСВ), коэффициента усиления (КУ), диаграммы направленности (ДН). Исследуемая антенна представляет собой плоскую двухзаходную эквиугольную спираль, расположенную на диэлектрической подложке (текстолите) размером 49×49 мм. Заявленный производителем диапазон рабочих частот 2,4 ГГц – 5,8 ГГц.

Исследование антенны по КСВ проводится с помощью векторного анализатора цепей Р4М-18 в соответствии с инструкцией на прибор. Исследование диаграммы направленности проводится методом дальней зоны на частотах 2,4 ГГц и 5,8 ГГц. Исследование КУ проводится методом замещения на тех же частотах. В качестве индикаторной и эталонной используются рупорные антенны с размерами раскрыва 342×256 мм. Критерий дальней зоны для частоты 2,4 ГГц – $R_{д.з.} > 2,4$ м, для 5,8 ГГц – $R_{д.з.} > 6,0$ м.

КСВ испытываемой антенны в диапазоне 2,4 ГГц – 5,8 ГГц не более 2. Ввиду влияния переотражений сигнала, искажающих ДН, потребовалось проведение повторных исследований в помещении с большей площадью. Расстояние между индикаторной и испытываемой антеннами 10 м. Полученные ДН имеют нули (рисунки 1 и 2), которые теоретически должны отсутствовать. Вместе с этим на частоте 5,8 ГГц наблюдается провал ДН в главном направлении. При моделировании в среде CST Studio антенна имеет один широкий лепесток в главном направлении и меньший КУ (2,4 ГГц – 1,9 дБ; 5,8 ГГц – 3,7 дБ) в отличие от испытываемого образца (2,4 ГГц – 5,5 дБ; 5,8 ГГц – 9,6 дБ). Передне-заднее отношение на частоте 2,4 ГГц – -0,7 дБ, 5,8 ГГц – -0,3 дБ.

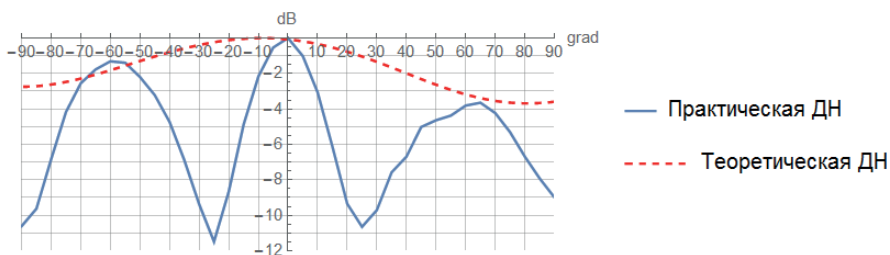


Рисунок 1 – Практическая и теоретическая ДН на частоте 2,4 ГГц

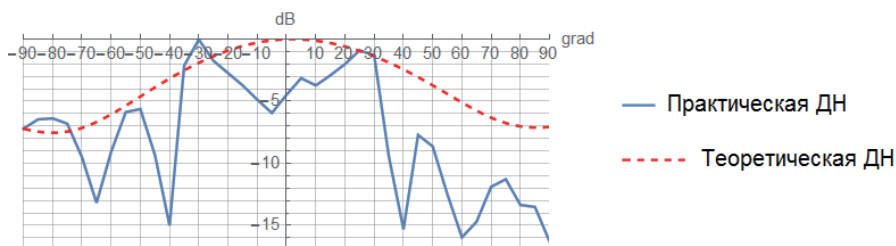


Рисунок 2 – Практическая и теоретическая ДН на частоте 5,8 ГГц

Антенна для пеленгатора должна обладать одним передним широким лепестком диаграммы направленности и малым задним лепестком во избежание искажения ДН в месте установки антенны. Таким образом, испытываемая антенна не подходит по данным критериям.

Литература

1. Захарьев Л. Н. Методы измерения характеристик антенн СВЧ / Л. Н. Захарьев, А. А. Леманский, В. И. Турчин и др. М. : Радио и связь, 1985. 368 с.
2. Chun Yiu Chu. Printed dipole antenna design for wireless communications / Chun Yiu Chu; McGill University, Department of Electrical & Computer Engineering. Montreal: McGill University, 2005. 81 p.

Experimental research of characteristics of planar spiral antenna

D. A. UTKIN

*Supervisor – Associate Professor A. N. Krenev, Leading Engineer Yu. N. Krivov
P. G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia*

Abstract. This paper is devoted to the experimental research of the characteristics of the planar spiral antenna. During the course of the research, the following characteristics were tested: standing wave ratio, gain and radiation pattern. The aim of the research is to investigate the feasibility of using an antenna for detecting UAV signals.

Keywords: spiral antenna, radiation pattern, direction finding.

АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ТРАЕКТОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ В РАДИОЛОКАТОРЕ НА ОСНОВЕ МНОГООБЗОРНОГО НАБЛЮДЕНИЯ

С. В. А. ФАРИА

*Научный руководитель – проф. А. Б. Силантьев
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова,
Ярославль, Россия
silantiev@mail.ru*

Аннотация. Рассмотрены вопросы оценки качества траекторной информации, получаемой в дополнительном канале многообзорного накопления. Проанализирована перспективная многоканальная структура обработки радиолокационной информации. Показана эффективность такой обработки в условиях ограниченного потенциала радиолокатора. Проанализировано качество траекторной информации, получаемой в канале многообзорного наблюдения.

Ключевые слова: многоканальная структура, траекторная информация, дополнительный канал, многообзорное наблюдение.

Современные радиолокаторы осуществляют многоэтапную обработку радиолокационной информации (РЛИ). При такой структуре на этапе первичной обработки радиолокатор обнаруживает цели, то есть выделяет эхо-сигналы целей на фоне шумов. На этапе первичной обработки одновременно с фактом обнаружения обычно получают также предварительные оценки координат целей. На этапе вторичной обработки в ходе многократных зондирований происходит обнаружение траектории (трассы) цели. Результат этого этапа – объединение некоторых отметок в единую трассу целей. Результирующие показатели этапа вторичной обработки – вероятности обнаружения истинных и ложных траекторий. Далее в течение определенного времени обычно происходит «сопровождение целей» с целью уточнения их координат, параметров движения.

Структура обработки РЛИ, содержащая каналы многообзорного наблюдения (МОН) и реализующие процедуры «track-before-detect» (TBD) предполагает внутриимпульсное и межпериодное накопление сигналов, предварительное обнаружение при пониженном пороге, межобзорное накопление и обнаружение траекторий целей. В каналах МОН в расчёте на межобзорное накопление слабых сигналов снижают пороги первичной обработки (первичные пороги), а частота ложных тревог уменьшается за счёт вторичной обработки. Это облегчает обнаружение (слабоотражающих) целей на фоне мешающих отражений.

Будем рассматривать объединение траекторной информации на примере обзорного радиолокатора многоканальной структуры. В основном канале такого радиолокатора реализованы известные

процедуры первичной и вторичной обработки РЛИ. В ходе вторичной обработки реализуется фильтрация или последовательное сглаживание координат. Как известно, результирующая точность оценивания определяется длительностью наблюдения и точностью «первичных» оценок. В ходе многократных измерений (режим слежения) результирующая дисперсия будет уменьшаться по мере накопления данных измерений.

Вероятна ситуация, когда количество отметок от цели, полученных в дополнительном канале, превышает число отметок основного канала, так как порог первичного обнаружения в каналах МОН ниже. При этом можно отождествить только часть отметок дополнительного канала с отметками основного. Оставшиеся отметки дополнительного канала могут быть, например, отождествлены с отметками основного, полученными по результатам обратного прогноза или ретроспективы.

Таким образом, обнаружение малоразмерных объектов локации может быть реализовано с помощью достаточно длительного многообзорного наблюдения, когда одновременно с фактом обнаружения целей дополнительно может быть получена траекторная информация, необходимая в дальнейшем для решения задач управления.

Литература

1. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория: справ. / ред. Я. Д. Ширман. М. : ЗАО «МАКВИС», 1998. 826 с.
2. Голубев А. В., Силантьев А. Б., Фернанду К. А. Г., Олим Ж. С. М. Сравнительный анализ точности оценки траекторных параметров методами длительного радиолокационного наблюдения. В сборнике: Радиолокация, навигация, связь: Сборник трудов XXVI Международной научно-технической конференции, в 6 т. Воронеж, 2020. С. 52-62.

Analysis of the quality of trajectory information in radar based on multi-view observation

C. V. A. FARIA

Supervisor – Professor A. B. Silantiev

P. G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia

Abstract. The issues of assessing the quality of trajectory information obtained in an additional channel of multi-overview accumulation are considered. A promising multichannel structure of radar information processing is analyzed. The effectiveness of such processing in conditions of limited radar potential is shown. The quality of the trajectory information obtained in the multi-view observation channel is analyzed.

Keywords: multi-channel structure, trajectory information, additional channel, multi-view observation.

**СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ЦЕЛИ
РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИЕЙ С ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ
РЕШЕТКОЙ С ПРОСТРАНСТВЕННЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ В УСЛОВИЯХ
ВОЗДЕЙСТВИЯ АКТИВНЫХ ШУМОВЫХ ПОМЕХ**

С. А. ФАТЕЕВ

*Научный руководитель – ст. преп. Р. А. Калашиников
Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны,
Ярославль, Россия
ivanov@uniyar.ac.ru*

Аннотация. Рассмотрен способ повышения дальности обнаружения цели РЛС с ФАР с пространственным возбуждением в условиях воздействия АШП за счёт использования видов распределений плотности размещения элементов в раскрыве антенной решётки.

Ключевые слова: неэквидистантная фазированная антенная решётка, виды распределений плотности размещения элементов, активно-шумовая помеха, автокомпенсатор помех.

Целью исследования является повысить дальность обнаружения РЛС с ФАР с пространственным возбуждением в условиях воздействия АШП за счет улучшения пространственной избирательности антенной системы.

Для достижения цели работы необходимо решить ряд задач:

- создать модель пассивной ФАР с пространственным возбуждением, учитывающей ошибки установки фаз токов (полей) возбуждения элементов решетки;

- разработать способ повышения дальности обнаружения РЛС с ФАР с пространственным возбуждением в условиях воздействия АШП;

- провести оценку эффективности способа повышения дальности обнаружения РЛС с ФАР с пространственным возбуждением в условиях воздействия АШП. Исследовались следующие факторы:

Параметры диаграммы направленности.

Ширина диаграммы направленности $2\theta_{0,5P} = 1,0^\circ \pm 10\% = 1,1$

Уровень первого БЛ $F_{6л} = -22,34$ дБ

Зададим отношение p дальности обнаружения РЛС с ФАР неэквидистантного распределения излучателей $r_{н.п}$ к дальности обнаружения РЛС с эквидистантной пассивной антенной решеткой $r_{э.п}$ в условиях АШП. При этом для достижения цели работы, необходимо, чтобы отношение p было больше единицы.

При использовании многопараметрического распределения Тейлора (рисунок 1) удастся повысить дальность обнаружения РЛС в 1,24 и 1,56 раз при применении одного и двух ПАП соответственно

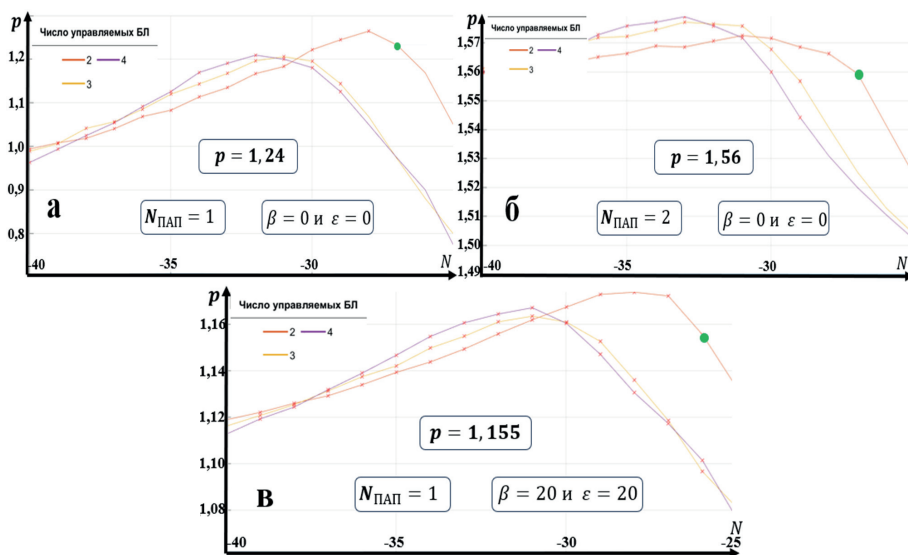


Рисунок 1 – Зависимость отношения дальностей обнаружения РЛС от параметров многопараметрического распределения Тейлора:

а – при одном ПАП, б – при двух ПАП, в – при отклонении главного лепестка на 20° .

Литература

1. Хансен Р. С. Фазированные антенные решетки / Р. С. Хансен. М. : Техносфера, 2012. 497 с.
2. Бененсон Л. С. Антенные решетки. Методы расчета и проектирования: Обзор зарубежных работ / Л. С. Бененсон, В. А. Журавлев, С. В. Попов и др. М. : Радио и связь, 1966. 368 с.

Method for increasing the target detection range by a radar station with a phased array antenna with spatial excitation under the influence of active noise interference

S. A. FATEEV

*Supervisor – Senior Lecturer R. A. Kalashnikov
Yaroslavl Higher Military School of Air Defense, Yaroslavl, Russia*

Abstract. The paper considers a method for increasing the target detection range of radar with headlights with spatial excitation under the influence of ASP by using types of density distributions of elements in the opening of the antenna array.

Keywords: non-equidistant phased array antenna, types of density distributions of element placement, active noise interference, auto noise compensator.

ДЕМОНСТРАЦИОННО-ОБУЧАЮЩАЯ МОДЕЛЬ СТАТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЕЁ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ

Л. А. ХУХРИН

*Научный руководитель – проф. А. Н. Цыбульник
Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны,
Ярославль, Россия
cybulnik@uniyar.ac.ru*

Аннотация. Обоснован подход к моделированию статического преобразователя частоты переменного напряжения. Основным предназначением данной модели является помощь обучаемым в осознании принципа работы преобразователя, обеспечение качественного восприятия информации и в результате повышение качества подготовки лиц, эксплуатирующих и обслуживающих данное изделие. Аргументирована нецелесообразность моделирования всех процессов и подсистем статического преобразователя частоты.

Ключевые слова: преобразователь частоты, компьютерное моделирование, модель, среда моделирования.

Разработана модель, позволяющая оперативно получать обучаемым необходимую информацию в наглядной форме, такую как назначение, состав принцип функционирования, основные параметры и характеристики подсистем статического преобразователя частоты переменного напряжения и всего изделия в целом.

Выбран метод компьютерного моделирования являющийся хорошим средством для подготовки специалистов и обеспечивающий:

- визуализацию объектов любой природы;
- исследование процессов в динамике их развития;
- управление временем (трансформировать временной масштаб);
- получение разных характеристик объекта в числовом или графическом виде.

Демонстрационно-обучающая модель разработана в пакете прикладных программ MATLAB-SIMULINK.

Для создания модели в среде Simulink определены и последовательно выполнены шесть действий.

Модель предполагает наличие текстовой части, которая даёт текстовое описание, позволяющее понять назначение, состав и основной принцип действия преобразователя, а также его входные и выходные параметры. Модель состоит из специализированных блоков- Subsystem. Эти специализированные блоки содержат в себе входы, выходы и внутренние логические элементы, имитирующие различные устройства, в основном, входящих в состав высоковольтной части СПЧ, такие как:

1). Входной фильтр (Ф); 2). Выпрямитель (В1); 3). Сглаживающий фильтр (СФ1); 4). Инвертор (И1); 5). Датчик тока (ДТ1); 6). Трансформатор (Т); 7). Выпрямитель (В2); 8). Сглаживающий фильтр (СФ2); 9). Инвертор (И2); 10). Сглаживающий фильтр (СФ3); 11). Датчики тока (ДТ2), (ДТ3), (ДТ4).

В состав высоковольтной части модели входят специализированные блоки - Subsystem тех устройств, которые не входят в состав статического преобразователя частоты, но они необходимы для обеспечения наглядности порядка его функционирования, к таким блокам относятся: дизель-генераторная установка и блок с аппаратурой.

Все элементы модели настроены в соответствии с руководством по эксплуатации на СПЧ и имитируют работу реальной системы. На данные подсистемы, так называемые блоки - Subsystem, наложены маски, позволяющие изменить внешний вид подсистемы, задать и отобразить их описание.

Использование данной демонстративно-обучающей модели в структуре тренажно-имитационного комплекса позволяет повысить качество подготовки обучаемых.

Литература

1. Бушуев В. М. Электропитание устройств и систем телекоммуникаций / В. М. Бушуев, В. А. Деминский, Л. Ф. Захаров, Ю. Д. Козляев, М. Ф. Колканов М. : Горячая линия - Телеком, 2009. 384 с.
2. Угрюмов Е. П. Теория и практика эволюционного моделирования / Е. П. Угрюмов. СПб. : БХВ-Петербург, 2005. 800 с.

Demonstration and training model of static frequency converter of alternating voltage and results of its use in educational process

L. A. KHUKHRIN

Supervisor – Professor A. N. Tsybulnik

Yaroslavl higher military school of Air Defense, Yaroslavl, Russia

Abstract. An approach to modeling a static frequency converter of alternating voltage is substantiated. The main purpose of this model is to help students understand the principle of operation of the converter, ensure high-quality perception of information and, as a result, improve the quality of training for persons operating and servicing this product. The inexpediency of modeling all processes and subsystems of a static frequency converter is argued.

Keywords: frequency converter, computer simulation, model, simulation environment.

ГРНТИ 47.47

**НЕЙРОСЕТЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЗАДАЧЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО
РАСПОЗНАВАНИЯ ВИДОВ МОДУЛЯЦИИ**

С. А. САВИН, Н. А. УСКОВ, Д. Д. СОКОЛОВА

*Научный руководитель – доц. К. С. Красавин
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова,
Ярославль, Россия
s.savin@uniyar.ac.ru*

Аннотация. Исследуется архитектура сверточной нейронной сети (СНС) CNN_NET. Для анализа выбраны три вида модуляции: BPSK, QPSK, QAM-16 из набора данных RadioML2018.01A. Представлены результаты обучения: точность распознавания и потери в процессе обучения и валидации СНС, а также приведены результаты распознавания отношения сигнал/шум указанных видов модуляции.

Ключевые слова: модуляция, сверточная нейронная сеть, обучение, точность, потери.

Целью работы является получение результатов обучения сверточной нейронной сети высокой точности при распознавании видов цифровой модуляций. В связи с активным использованием в радиосвязи для работы выбраны 3 вида модуляции: BPSK, QPSK и QAM-16.

В исследовании использована модель сверточной нейронной сети CNN_NET. В качестве функции активации нейрона выбрана ReLU (rectified linear unit), реализующая простой пороговый переход в нуле.

В результате обучения точность распознавания сигналов сетью CNN_NET составила 75,77%. Графики точности распознавания и потерь в процессе обучения и валидации СНС, а также точность распознавания соотношения сигнал/шум представлены на рисунках 1 и 2 соответственно.

На рисунке 1 видно, что точность обучения и валидации больше 70%. Это показывает, что архитектура CNN_NET способна различать поданные ей на вход сигналы с большой вероятностью.

Анализ рисунка 2 показывает, что сеть CNN_NET неэффективно определяет отношение сигнал/шум для модуляции QAM-16 в диапазоне от -20 дБ до -12 дБ. Средняя точность распознавания в этом диапазоне составляет 0,5%. Однако в диапазоне от -10 дБ до -2 дБ точность начинает увеличиваться. При значении -2 дБ точность распознавания достигает аналогичных уровней модуляций BPSK и QPSK.

Таким образом, архитектура сети CNN_NET соответствует минимальному требованию классификации видов цифровой модуляции,

а обученные модели можно применять на практике, в том числе и в процессе обучения.

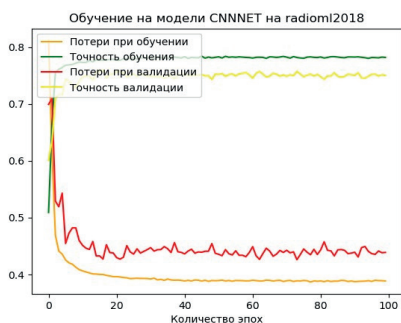


Рисунок 1 – Точность распознавания и потери в процессе обучения и валидации СНС

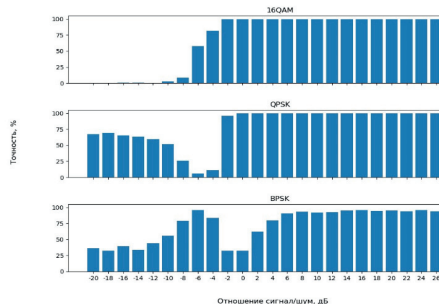


Рисунок 2 – Точность распознавания соотношения сигнал/шум

Литература

1. Журавлев В.И. Методы модуляции-демодуляции радиосигналов в системах передачи цифровых сообщений / Журавлев В.И., Трусевич Н.П. М. : Инсвязиздат, 2009. 312 с.
2. Нгуен Ван Минь. Методы идентификации видов модуляции на основе искусственной нейронной сети с использованием кумулянтных признаков: специальность 2.2.15 «Системы, сети и устройства телекоммуникаций»: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Нгуен Ван Минь. М. : МИРЭА Российский технологический университет, 2023. 112 с.

Neural network technologies in the task of automatic recognition of modulation types

S. A. SAVIN, N. A. USKOV, D. D. SOKOLOVA

*Supervisor – Associate Professor K. S. Krasavin
P. G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia*

Abstract. The architecture of the convolutional neural network (SNN) CNN_NET is investigated. Three types of modulation were selected for analysis: BPSK, QPSK, QAM-16 from the RadioML2018.01A dataset. The results of training are presented: recognition accuracy and losses in the process of SNA training and validation, as well as the results of recognition of the signal-to-noise ratio of these types of modulation.

Keywords: modulation, convolutional neural network, learning, accuracy, loss.

ПРИМЕНЕНИЕ ТРАНСФЕРНОГО ОБУЧЕНИЯ В ЗАДАЧЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ШУМОВ СЕРДЦА НА ФОНОКАРДИОГРАММАХ Т. А. СМЕРНОВА

*Научный руководитель – доц. А. И. Топников
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова,
Ярославль, Россия
tanaya270305@mail.ru*

Аннотация. В работе представлен алгоритм детектирования шумов сердца на фонокардиограммах, основанный на трансферном обучении нейронной сети YAMNet. Формулируется цель и идея исследования, описывается процесс обучения и тестирования нейросетевого алгоритма.

Ключевые слова: шумы сердца, трансферное обучение, нейронная сеть.

Цель работы заключается в разработке алгоритма, основанного на нейронных сетях и трансферном обучении, для детектирования шумов сердца на фонокардиограммах.

Для обучения нейросетевых классификаторов критическим является наличие достаточного объема размеченных данных, отвечающих требованиям решаемой задачи. В области детектирования и классификации шумов сердца ситуация с доступностью данных существенно изменилась с появлением базы CirCor DigiScope [1]. В ней собрано 5272 размеченные записи звуков сердца из основных четырех мест аускультации. Общедоступными являются 3163 записи, выложенные в открытый доступ в рамках конкурса The George B. Moody PhysioNet Challenge 2022 [2]. Длительности записей лежат в диапазоне от 4,8 до 80,4 секунд, частота дискретизации — 4 кГц. Исходя из ограниченности размера и сильной несбалансированности набора данных, принято решение использовать трансферное обучение предобученной нейронной сети YAMNet.

Фрагменты звуковых сигналов длиной 0,96 секунды представляются в виде мел-спектрограмм размером 64×96, которые затем преобразуются сверточными слоями сети в векторы (эмбендинги) длиной 1024. Классификация векторов-признаков осуществляется полносвязными слоями нейросети. В рамках исследования осуществлялось дообучение только классификатора. Имеющиеся данные разделяются на 3 подвыборки: обучающую, валидационную и тестовую. Вся необходимая информация о каждом файле (путь и имя, номер пациента, место аускультации, метка класса и значение весового коэффициента) заносится в массив типа Pandas DataFrame. В качестве весов классов выбраны значения, используемые в конкурсе The George B. Moody PhysioNet Challenge 2022 для вычисления взвешенной

точности: для класса Absent – 1, Present – 5, Unknown (невозможность уверенного принятия решения кардиологом) – 3 [2].

Для обучения классификатора используется оптимизатор Adam. Стандартное для алгоритма Adam значение коэффициента, отвечающего за скорость обучения, пришлось снизить до значений порядка 10^{-4} – 10^{-6} , так как только при них наблюдалось устойчивое снижение потерь на валидационном множестве. Продолжительность обучения – до 200 эпох.

Исследовалось влияние на взвешенную точность классификации числа нейронов в полносвязном слое, параметров оптимизатора, применения исключения и регуляризации, а также предварительной фильтрации звуковых сигналов. Значительного улучшения результатов по сравнению с базовым вариантом в этих исследованиях не выявлено.

После завершения обучения проводилось тестирование алгоритма. На основе результатов вероятностного предсказания класса для отдельных фрагментов осуществлялось предсказание класса для каждой записи, а затем – пациента. Итоговая взвешенная точность на тестовой выборке составила 67,41%, что является удовлетворительным результатом, так как результат победителя конкурса 2022 г. был около 78%.

Литература

1. Oliveira J., Renna F., Costa P., Nogueira M., Oliveira A. C., Elola A., Ferreira C., Jorge A., Bahrami Rad A., Reyna M., Sameni R., Clifford G., Coimbra M. The CirCor DigiScope Phonocardiogram Dataset // PhysioNet [Электронный ресурс] URL: <https://physionet.org/content/circor-heart-sound/1.0.3/>
2. Reyna M. A., Kiarashi Y., Elola A., Oliveira J., Renna F., Gu A., Perez-Alday E. A., Sadr N., Sharma A., Mattos S., Coimbra M. T., Sameni R., Rad A. B., Clifford G. D. Heart murmur detection from phonocardiogram recordings: The George B. Moody PhysioNet Challenge 2022 // MedarXiv [Электронный ресурс] URL: <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2022.08.11.22278688v2>

Transfer learning for heart murmur detection from phonocardiogram recordings

T. A. SMIRNOVA

Supervisor – Associate Professor A. I. Topnikov

P. G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia

Abstract. The paper presents an algorithm based on transfer learning of a neural network for detecting heart murmurs using phonocardiogram recordings. The purpose and idea of the research are formulated, the process of algorithm's training and testing is described.

Keywords: heart murmur, transfer learning, neural network..

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЙРОСЕТЕВОГО АЛГОРИТМА В ЗАДАЧАХ РАСПОЗНАВАНИЯ ФАЗОВЫХ ВИДОВ МОДУЛЯЦИИ

Н. А. УСКОВ, С. А. САВИН

Научный руководитель – проф. А. Л. Приоров
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова,
Ярославль, Россия
n.uskov@uniyar.ac.ru

Аннотация. Исследуется нейросетевой алгоритм в задаче распознавания фазовых видов цифровой модуляции. Описывается решение задачи классификации видов цифровой модуляции с использованием сверточных нейронных сетей.

Ключевые слова: сверточная нейронная сеть, цифровая модуляция, алгоритм, классификация, распознавание.

Работа выполнялась с применением различных архитектур сверточных нейронных сетей для классификации видов цифровой модуляции. Выбран готовый набор данных RadioML2018.018.A. Указанный набор содержит радиочастотные сигналы для машинного обучения, выпущенный фирмой «Deepsiginc». Он используется для классификации радиосигналов, посредством нейронных сетей. В наборе находится 2555904 сложных данных с плавающей точкой. Каждый сигнал состоит из 1024 временных отсчетов, содержащих синфазную и квадратурную составляющие (I/Q). Отсчеты разделяются между 24 видами модуляции по 106496 на каждую. Затем 106496 делится между 26 значениями отношений сигнал к шуму (SNR) по 4096 на каждый. Значения SNR находятся в диапазоне от -20 до +30 дБ с шагом в 2 дБ. Для обучения нейронной сети выбраны 4 вида модуляции: BPSK, QPSK, 8PSK, 16PSK.

Работа проводилась на двух моделях сверточных нейронных сетей: CNN_Net и RES_Net. На рисунке 1 и рисунке 2 показана точность распознавания сигналов сетью Res_Net и CNN_Net.

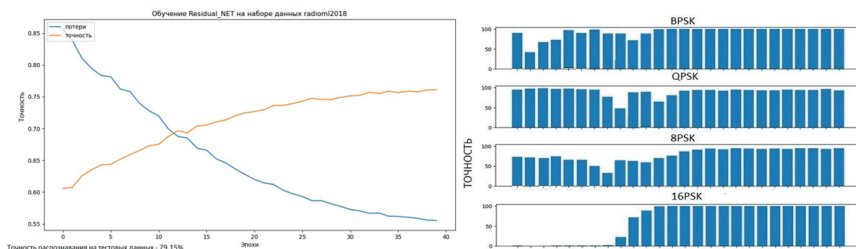


Рисунок 1 – Точность распознавания сигналов сетью Res_Net

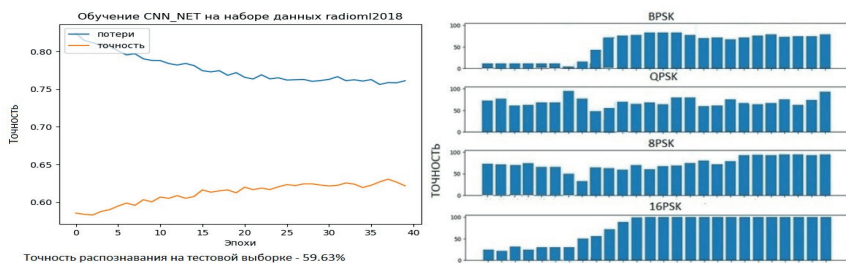


Рисунок 2 – Точность распознавания сигналов сетью CNN_Net

В ходе исследования выяснено, что сверточная сеть Res_Net оказалась значительно эффективней сети CNN_Net. Указанные сети тестировались в одинаковых условиях. Точность распознавания сигналов сетью Res_Net в период обучения составила 79,15 %, а сети CNN_Net – 59,63 %.

Обе сети показали свою неточность в распознавании некоторых видов модуляции в диапазоне от -20 до -6 дБ отношения сигнал к шуму.

Для достижения более точных результатов нужно обучить модель, используя все данные из рассматриваемого датасета «RadioML2018.01A».

Литература

1. Сергиенко А. Б. Цифровая связь: Учеб. пособие. / А. Б. Сергиенко. СПб. : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012. 164 с.
2. Крон Джон. Глубокое обучение в картинках. Визуальный гид по искусственному интеллекту. / Джон Крон, Грант Бейлелвельд и Аглаз Бассенс. СПб. : Питер, 2020. 400 с.

Study of neural network algorithm in problems of recognition of phase types of modulation

N. A. USKOV, S. A. SAVIN

Supervisor – Professor A. L. Priorov

P. G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia

Abstract. A neural network algorithm is being investigated in the task of recognizing phase types of digital modulation. The solution of the problem of classification of types of digital modulation using convolutional neural networks is described.

Keywords: convolutional neural network, digital modulation, algorithm, classification, recognition.

**СВЕРТОЧНЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ В ЗАДАЧЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО
РАСПОЗНАВАНИЯ ВИДА ЦИФРОВОЙ МОДУЛЯЦИИ**

А. М. УШАКОВА

*Научный руководитель – доц. В. В. Хрящев
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова,
Ярославль, Россия
a.ushakova3@uniyar.ac.ru*

Аннотация. Рассматривается распознавание вида цифровой модуляции с помощью сверточной нейронной сети (СНС) с глубоким обучением. В качестве входных данных для СНС используются компоненты I и Q модулированных сигналов. На выходе СНС выдает номер класса, которому соответствует определенный вид цифровой модуляции из 5 возможных со средней точностью 86%.

Ключевые слова: сверточные нейронные сети, цифровая модуляция, BPSK, QPSK, M-QAM, I/Q компоненты.

В работе проводилось исследование сверточной нейронной сети в задаче распознавания видов цифровой модуляции принимаемого сигнала при неизвестной несущей частоте.

Выбран готовый набор данных RadioML2018.018.A. Для обучения нейронной сети выбрано 5 из 24 предложенных видов модуляции: BPSK, QPSK, QAM-16, QAM-64, QAM-256.

В наборе «Radioml2018/01A» хранятся уже готовые компоненты сигнала: синфазная (I), представляющая вещественный сигнал и квадратурная (Q) – комплексная составляющая сигнала.

Набор данных был сокращен, в связи с нехваткой вычислительной мощности. На каждый вид модуляции взято 5018 сигналов для обучения.

НАСТОЯЩЕЕ ЗНАЧЕНИЕ	QAM256	0.020	0.041	0.062	0.450	0.420
	QAM64	0.020	0.020	0.210	0.500	0.250
	QAM16	0.039	0.078	0.628	0.157	0.098
	QPSK	0.040	0.720	0.060	0.100	0.080
	BPSK	0.868	0.019	0.057	0.038	0.018
		BPSK	QPSK	QAM16	QAM64	QAM256
ПРЕДСКАЗАННОЕ ЗНАЧЕНИЕ						

Рисунок 1 – Матрица несоответствия обученной сети с архитектурой ResNet50

Алгоритм распознавания разработан на основе архитектуры сверточной нейронной сети ResNet-50. Проведено обучение и тестирование модели, получены результаты.

В ходе исследования выявлено, что обученная модель предсказывает BPSK модуляцию с вероятностью 0.868%, QAM-256, с вероятностью 0.420 или 42%.

Промежуточные результаты других видов модуляции показывают вероятность предсказания свыше или равную 0.5 или 50%. С вероятностью 45% модель путает QAM-256 и QAM-64. С вероятностью 0,018% модель путает виды модуляции BPSK и QAM-256.

Литература

1. Zhu Z., Nandi A.K. Automatic modulation classification principles, algorithms and applications. 2015.
2. Набилков В. Д., Дубов М. А. Анализ влияния параметров канала на точность классификации типов модуляции радиосигналов с использованием нейронной сети // Цифровая обработка сигналов и ее применение. Сер. «Цифровая обработка сигналов и её применение». М. : 2020. С. 625-629.

Convolutional neural networks in the task of automatic recognition of the type of digital modulation

A. M. USHAKOVA

*Supervisor – Associate Professor V. V. khryashchev
P. G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia*

Abstract. The recognition of the type of digital modulation using a convolutional neural network (SNN) with deep learning is considered. Components I and Q of modulated signals are used as input data for the SNA. At the output, the SNA outputs a class number that corresponds to a certain type of digital modulation out of 5 possible ones with an average accuracy of 86%.

Keywords: convolutional neural networks, digital modulation, BPSK, QPSK, M-QAM, I/Q components.

ГРНТИ 29.17

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ГАЗОВ ПРИ НИЗКОМ ДАВЛЕНИИ

Е. А. БИЛАН

*Научный руководитель – учитель физики А. Н. Лаптев
Государственное общеобразовательное учреждение Ярославской области
«Средняя школа «Провинциальный колледж», Ярославль, Россия
katabilan7@gmail.com*

Аннотация. В работе рассматривается возможность изучения электропроводности газов в рамках демонстрационного школьного эксперимента, получения характеристик газового разряда и даются рекомендации по выбору доступных газов для школьных опытов.

Ключевые слова: газовый разряд, светимость, электропроводность газов, вольт-амперная характеристика (ВАХ).

Школьный демонстрационный эксперимент зачастую достаточно примитивен и даже показывая определенное явление не позволяет школьнику увидеть «науку» в показах учителя. В работе исследовался тлеющий разряд, который образовался при протекании постоянного тока через трубку с холодными электродами, в которой находился газ, как обычный демонстрационный опыт по теме «Ток в различных средах». При анализе теоретических материалов по этой теме была обнаружена возможность более глубокого смыслового наполнения этого опыта. Для этого были проведены опыты с несколькими газами, разделенными на два «сорта»: одноатомные (инертные) и двухатомные (основные компоненты воздуха). Кроме этого был проведен и опыт со смесью газов – с атмосферным воздухом.

Порядок проведения опытов ничем не отличается от стандартной школьной демонстрации, но позволяет учителю показать, что могут быть получены полезные научные результаты, которые, в свою очередь, могут стать хорошей помощью, подтверждающей теоретический материал темы «Законы постоянного тока».

В частности, в работе были получены ВАХ газовых разрядов для различных газов, которые позволили сделать вывод о различной величине сопротивления газов. У инертных газов оно оказалось на порядок ниже двухатомных.

Исследования по зажиганию разряда также показали, что получить разряд у одноатомных газов было возможно при более низком напряжении.

Поскольку опыты проводились при фиксации различных низких давлений в газоразрядной трубке, то была получена однозначная зависимость параметров разряда от давления и показано, что все

свойства и различия между газами проявляются ярче при более низком давлении.

Таблица 1 – Сравнительные характеристики газов при давлении 2 кПа

Газ	ЭДС, кВ	Падение напряжения, кВ	Сила тока, мА	Сопротив- ление, МОм	Светимость, лк
Гелий	6,0	2,46	0,650	3,8	0,3
Аргон	11,5	6,50	1,350	4,8	1
Азот	10,5	7,45	0,382	19,5	0,01
Кислород	7,0	6,40	0,088	72,7	0,09
Воздух	10,0	6,90	0,349	19,8	2,2

Используя люксметр (опыт проводился в полной темноте), удалось определить абсолютную светимость каждого газа при одинаковых условиях. Это позволило сделать несколько неожиданный вывод: несмотря на лучшие характеристики разряда у одноатомных газов, очень хорошую светимость показал воздух, в котором, как известно, основной состав дают именно двухатомные газы. Поэтому одна из рекомендаций, которую мы можем дать - для показа именно демонстрации газового разряда не обязательно запасаться, например, гелием. Опыт замечательно проходит и при низком давлении воздуха. Но если требуется показать различие разрядов газов, то, например, пара «аргон-кислород» позволит увидеть разницу свечения и ВАХ этих газов очень наглядно.

Литература

1. Мякишев Г. Я. Физика. Электродинамика. 10-11 кл. Углублённый уровень: учебник // Г. Я. Мякишев, А. З. Синяков. М. : Дрофа, 2018. 477 с.
2. Пеннинг Ф. Электрические разряды в газах // Ф. Пеннинг. М. : Издательство ИНОСТРОННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, 1960. 97 с.
3. Смирнов А. С. Прикладная физика. Физика газового разряда // А. С. Смирнов СПб. : Издательство СПбГТУ, 1997. 68 с.

Electrical conductivity of gases at low pressure

E. A. BILAN

Supervisor – Teacher of Physics A. N. Laptev

State educational institution of the Yaroslavl region

“Secondary school “Provincial College”, Yaroslavl, Russia

Abstract. The paper examines the possibility of studying the electrical conductivity of gases as part of a school demonstration experiment, obtaining the characteristics of a gas discharge, and provides recommendations on the selection of available gases for school experiments.

Keywords: gas discharge, luminosity, electrical conductivity of gases, current-voltage characteristic (CVC).

МОДЕЛЬ ПАРОСИЛОВОЙ УСТАНОВКИ НА ВОДОРОДНОМ ТОПЛИВЕ

А. Д. ГЛУДЗОВ

Научный руководитель – учитель физики А. Ю. Еделев

Муниципальное автономное общеобразовательное учреждение «Лицей № 38»,

Нижний Новгород, Россия

Alexzolotovzet@gmail.com

Аннотация. Интенсивное использование углеводородного топлива приводит к экологическим катастрофам мирового масштаба, а также, сокращению углеводородных ресурсов, как таковых. Потребность в альтернативных видах топлива с каждым годом все возрастает, однако имеющиеся виды альтернативного топлива не могут качественно решить проблему энергетического оснащения. Данная работа посвящена разработке и созданию действующей модели теплоэлектростанции на водородном топливе, исследованию её характеристик. Неоспоримым достоинством этого топлива являются относительная экологическая безопасность его использования, приемлемость для тепловых двигателей без существенного изменения их конструкции, высокая калорийность, возможность длительного хранения, транспортировки по существующей транспортной сети и т.д.

Ключевые слова: водород, топливо, паросиловая установка.

Водородная энергетика основывается на использовании водорода как средства производства энергии.

Успехи в развитии ряда водородных технологий. в первую очередь, таких как: топливные элементы, системы хранения и получения водорода продемонстрировали, что использование водорода приводит к качественно новым показателям в работе установок и систем, а выполненные технико-экономические исследования показали, что, хотя водород является вторичным энергоносителем, его применение во многих случаях экономически оправдано и эффективно.

Водород, самый простой и легкий элемент из всех химических элементов, теоретически его можно считать идеальным топливом. Он имеется всюду. Суммарная масса водорода составляет 1% общей массы Земли, а число атомов - 16%. Особенно важен здесь тот фактор, что при сгорании, водород превращается в воду и полностью возвращается в круговорот природы. Весовая теплотворная способность водорода (28630 ккал/кг) в 2.8 раза выше по сравнению с бензином. Энергия воспламенения в 15 раз меньше, чем для углеводородного топлива. Максимальная скорость распространения фронта пламени в 8 раз больше по сравнению с углеводородами. Излучение пламени в 10 раз меньше по

сравнению с пламенем углеводородов. КПД водорода достигает 90%, а степень вредного воздействия на природу значительно снижается.

Основные проблемы водородной энергетики заключаются в том, что получение вещества сопряжено с необходимостью траты иных энергоносителей (нефть, электричество, газ), а также высокой угрозой образования «гремучих газов». Специалисты стремятся найти возможности устранения этих проблемных аспектов.

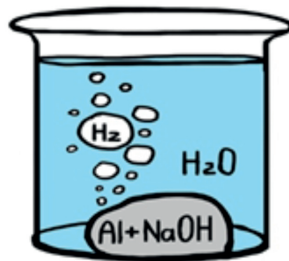


Рисунок 1 – Получение водорода

Предлагается способ получения водорода, в-первых, в относительно больших объемах. А во-вторых, удовлетворять конструкциям модели ПСУ



Данная реакция является окислительно-восстановительной:

$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2^0$ — реакция восстановления;

$Al^0 - 3e^- \rightarrow Al^{+3}$ — реакция окисления.

Расчеты по реакции получения водорода

$$m(Al) = 54 \text{ г}, \quad m(H_2O) = 108 \text{ г}, \quad m(Na[Al(OH)_4]) = 236 \text{ г},$$

$$V(H_2)_{\text{теор.}} = 67,2 \text{ л},$$

ΔH

$$= 2\Delta H_{298}^0(H_2) + 2\Delta H_{298}^0(Na[Al(OH)_4]) - 2\Delta H_{298}^0(Al) + 2\Delta H_{298}^0(NaOH) + 2\Delta H_{298}^0(H_2O). \quad (2)$$

Выход тепла

$$Q = -\Delta H = 3067,6 \text{ кДж.}$$

Полученный результат показывает, что реакция является эффективной.

В результате реакции образуются алюминаты, то есть комплексные соединения, которые активно можно использовать в бумажной и текстильной промышленности.

В качестве генератора водорода используется стальной баллон от огнетушителя с регулирующим клапаном, контролирующим поступление водорода из баллона, выдерживающий большие температуры, в котором находится манометр для измерения давления в процессе реакции. Баллон генератора находится в ёмкости с водой, отводящей от него тепло, выделяемое в процессе реакции, для получения дополнительного тепла в ходе работы установки. В воде установлен датчик термометра для измерения температуры.

Таким образом, добившись получения водорода, была предложена принципиальная схема ПСУ (Рисунок 2) на основании которой создавалась действующая модель (Рисунок 3).



Рисунок 2 – Принципиальная схема ПСУ

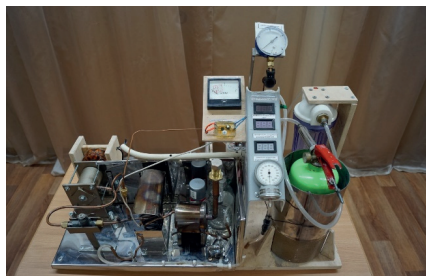


Рисунок 3 – Действующая модель ПСУ

Полученный водород проходит предохранительный клапан из широкой медной трубы и плотной стальной губки для защиты от попадания огня из горелок в реактор, водяной затвор, состоящий из большой закрытой герметичной ёмкости из толстого пластика, используемого во избежание деформации от высокой температуры, наполовину заполненной водой, в которую через одну трубку водород попадает, пропускается через воду и очищается от ненужных продуктов реакции, а через вторую проходит дальше по установке, также водяной затвор осуществляет дополнительную защиту от воспламенения водорода в баллоне, после чего водород попадает во второй водяной затвор (Рисунок 4), и, пройдя, второй предохранительный клапан и манометр, показывающий давление водорода, он попадает к горелкам, где сжигается.

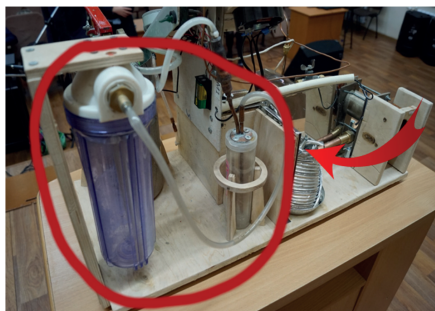


Рисунок 4 – Система фильтрации полученного водорода



Рисунок 5 – Пароперегреватель и парогенератор



Рисунок 6 – Турбина и аксиальный генератор

Парогенератор (Рисунок 5) состоит из медного цилиндра, изолированного нержавеющей сталью во избежание потери тепла при нагревании, к которому подсоединены две медные трубки – для подачи воды и отвода пара. Трубка для подачи воды герметично закрывается во избежание утечки пара. Под ним находится горелка, представляющая собой змеевик из медной трубы с шестью форсунками для выхода водорода. Подача водорода в эту горелку регулируется дополнительным клапаном. Испарившаяся вода проходит в пароперегреватель, состоящий из медной спирали, прикрытой дополнительно нержавеющей сталью для изоляции. Под ней находится вторая горелка, состоящая из медной спирали с девятью форсунками для поступления водорода. Температуру и давление перегретого пара измеряют установленные между пароперегревателем и турбиной термометр и манометр.

Достигнув давления ~ 5 атм. перегретый пар поступает на одноступенчатую 20-ти лопастную осевую турбину из нержавеющей стали с углом поворота лопастей в 45 градусов и с углом атаки форсунки пара к крыльчатке в 90 градусов (Рисунок 6). После прохождения через турбину отработанный пар попадает в конденсатор из конуса из гофрированной алюминиевой фольги с ёмкостью для конденсата и выходным отверстием. Вращение с турбины передается на аксиальный генератор, состоящий из 12 магнитов и 12 овальных катушек из медного провода.

Работа ПСУ описывается усеченным циклом Ренкина (Рисунок 7), в силу отсутствия питательного насоса, одной из основных составляющих этого цикла.

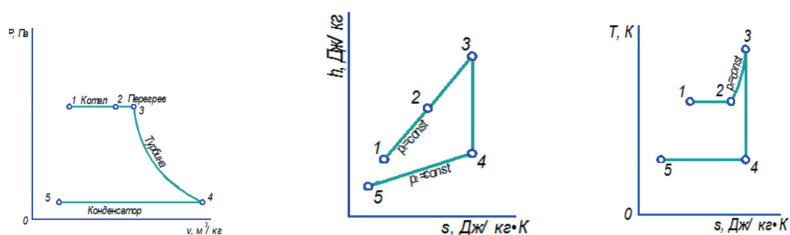


Рисунок 7 – Цикл Ренкина

Исходя из экспериментальных данных, полученных при работе установки, были определены параметры характерных точек цикла Ренкина, представленных в Таблице 1. Также рассчитаны:

удельная теплота, затраченная на образование 1 кг пара в турбине:

$$q_1 = h_1 - h_2 = 2855 - 2258 = 597 \text{ кДж/кг},$$

удельный отвод теплоты в конденсаторе:

$$q_2 = h_2 - h_3 = 2258 - 417,51 = 1840,49 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}},$$

Таблица 1 – Параметры характерных точек

Обозначение	Единицы	Точки цикла				
<i>P</i>	<i>бар</i>	<i>5</i>	<i>5</i>	<i>5</i>	<i>1</i>	<i>1</i>
<i>t</i>	°C	100	100	200	45	45
<i>v</i>	м ³ /кг	0,00106	0,3748	0.42	15	0.001
<i>h</i>	кДж/кг	546,5	2748,5	285	225	417,5
<i>s</i>	кДж/кг	1.6341	6,8215	7.05	6.8	0,636

удельная полезная работа, совершаемая паром в турбине, в адиабатном процессе расширения:

$$I_T = H_p = h_1 - h_2 = 2855 - 2258 = 597 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}},$$

работа, совершаемая паром в турбине:

$$I_{\text{ц}} = I_T = 597 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}},$$

Скорость пара на выходе из форсунки:

$$w = 44.7 \sqrt{h_1 - h_{\text{кр}}} = 44.7 \sqrt{2855 - 2722,3} = 514.98 \text{ м/с.}$$

Так как цикл установки является незамкнутым, то невозможно рассчитать её КПД.

В результате проделанной проектной деятельности была реализованная модель ПСУ на водородном топливе, полученном на основе реакции каустической соды и алюминия. Данная установка показала стабильную работоспособность. По произведенным расчетам, мы можем наблюдать малую мощность установки. Это связано со способом ее создания. Тем не менее, были предложены пути развития данной установки, начиная от замыкания цикла Ренкина, и заканчивая оснащением дополнительными трубопроводами и автоматизацией.

Литература

1. Рыжкин В. Я. Тепловые электрические станции: Учебник для теплоэнерг. спец. вузов / В. Я. Рыжкин/ М.-Л. : Энергия, 1967. 400 с.
2. Теплотехника. Учебник для вузов. / А. П. Баскаков, Б. В. Берг, О. К. Витт и др. Под ред. А.П. Баскакова. М, : Энергоатомиздат, 1991. 224 с.

Model of steam power device on hydrogen fuel

A. D. GLUDZOV

Supervisor – Teacher of Physics A. Yu. Edelev

*Municipal Autonomous Institution of General Education "Lyceum No. 38",
Nizhny Novgorod, Russia*

Abstract. Intensive use of hydrocarbon fuel leads to environmental disasters on a global scale, as well as the reduction of hydrocarbon resources as such. The need for alternative fuels is growing every year, but the existing types of alternative fuel cannot qualitatively solve the problem of energy equipment. This work is devoted to the development and creation of an operating model of a thermal power plant on hydrogen fuel, the study of its characteristics. The undeniable advantage of this fuel is the relative environmental safety of its use, acceptability for thermal engines without significant changes in their design, high calorific value, the possibility of long-term storage, transportation through the existing transport network, etc.

Keywords: hydrogen, fuel, steam power device.

СТРОБОСКОПИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

В. К. ГУСАКОВ

*Научный руководитель – учитель физики Ю. Ю. Шитков
Муниципальное бюджетное общеобразовательное учреждение
«Лицей «Физико-техническая школа», Обнинск, Россия
vovan2007gusakov@gmail.com*

Аннотация. В данной статье предложен краткий рассказ об понятии стробоскопического эффекта и построение физической модели, демонстрирующей явление. Основная идея- существование зрительного эффекта, демонстрирующий недействительное движение тела. В работе описывается актуальность работы, практическое моделирование, наблюдение, эксперимент над установкой.

Ключевые слова: стробоскопический эффект.

Актуальность работы- исследование даст развитие к созданию новых моделей, основанных на этом эффекте. Цель исследования- понять природу стробоскопического эффекта и создание установки.

Задачи:

1. Исследовать физический аспект эффекта.
2. Создание физической модели.
3. Найти полезное применение эффекта.

Стробоскопический эффект — возникновение мнимого движения предмета при его прерывистом визуальном наблюдении. Благодаря коротким вспышкам высокой интенсивности изображение предмета «застывает» на сетчатке глаза, создавая отчетливый стоп-кадр. Если предмет движется, его движение понимается как серия стоп кадров и создается ложное визуальное представление движения тела. С прекращением раздражения зрительное впечатление исчезает не сразу из-за инерции зрения, т. е. сохранения в сознании наблюдателя зрительного образа после того, как картина исчезнет.

Пример, демонстрирующий эффект-вентилятор с вращающимися лопастями. Если мы возьмем источник света, который будет мерцать с частотой вращения вентилятора, создастся эффект что лопасти не крутятся и находятся в состоянии покоя. Из-за инерции зрения мы как раз и будем наблюдать непрерывную картину.

Принцип работы установки, изображенной на Рисунке 1: помпа качает воду в емкость с динамиком, динамик совершает колебания с частотой 50 Гц, создавая из струи воды отдельные капли, которые капая с такой же частотой, источник света светит с вспышками в 50 Гц и создается стробоскопический эффект, человеческий глаз видит эффект «левитации капель».

$F = F\partial - Fu.c.$, где $F\partial$ — частота движения тела, Гц; $Fu.c.$ — частота импульсов света, Гц., F — частота движения тела, которую замечает наш глаз при стробоскопическом эффекте, Гц.

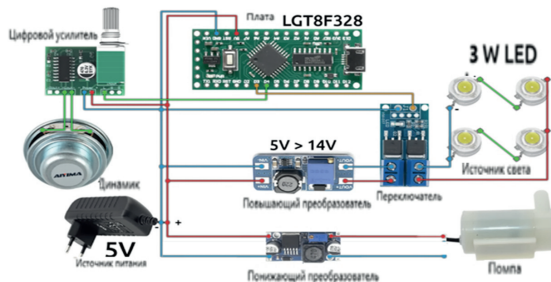


Рисунок 1 – Схема установки стробоскопического эффекта

3 случая, в которых F может принимать значения:

1. $F < 0$ ($F\partial < Fu.c.$) — в таком состоянии капли будут «капать вверх».
2. $F = 0$ ($F\partial = Fu.c.$) — в таком состоянии капли будут «застывать в воздухе».
3. $F > 0$ ($F\partial > Fu.c.$) — в таком состоянии капли будут «капать вниз».

Применение установки: демонстрации в образовательных целях, создание экспериментов и задач на уроках по физике.

Литература

1. Jeff K. Lamps and lighting installations: overview // Wiring Matters, The IET. 2008. V. 28, No. 4. P. 28.
2. Рылько Н. М. Стробоскопический эффект // Вестник науки и образования. 2019. Т. 62, №8. С. 12-14.
3. Кравков С. В. Глаз и его работа: психофизиология зрения, гигиена освещения / С. В. Кравков. М.-Л. : Изд-во АН СССР, 1950. 532 с.

Stroboscopic effect

V. K. GUSAKOV

*Supervisor – Teacher of Physics Yu. Yu. Shitkov
Municipal Budget Educational Institution
“Lyceum “Physical and Technical School”, Obninsk, Russia*

Abstract. This paper offers a brief account of the concept of the stroboscopic effect and the construction of a physical model demonstrating the phenomenon. The main idea is the existence of a visual effect demonstrating the invalid motion of a body. The paper describes the relevance of the work, practical modeling, observation, experiment on the installation.

Keywords: Stroboscopic effect.

ТАЙНА САМОЙ ГОРЯЧЕЙ ПЛАНЕТЫ

М. А. ИГНАТОВА

Научный руководитель – учитель физики и астрономии Л. Е. Прусская

*ГАОУ МО «Долгопрудненская гимназия»,
Долгопрудный, Московская область, Россия*

lubovevgenyevna@mail.ru

Аннотация. В работе исследованы причины того, почему Венера, более далекая от Солнца, чем Меркурий, является самой горячей планетой Солнечной системы. На взгляд автора работы, следующие факторы лежат в основе этого парадокса: размер планеты, массивность атмосферы, большое содержание углекислого газа в ней, ураганы верхних слоев.

Ключевые слова: Венера, закон обратных квадратов, альbedo, парниковый эффект.

На кружке по астрономии, сравнивая максимальные дневные и ночные температуры на поверхностях планет, я обратила внимание, что самая горячая планета не та, которая ближе к Солнцу, не Меркурий, а Венера. В причинах этого решила разобраться.

Я заметила, чем ближе подношу руку к светящейся лампе накаливания, тем большее ощущаю тепло, идущее от нее. Проверила это с помощью мультиметра, показывающего температуру. Чем ближе к лампе, тем большую температуру он показывает. Значит, чем ближе к Солнцу, тем большее тепло получает планета.

Возможно так, что иногда Солнце освещает меньшую часть поверхности планеты, а когда-то большую? Я проверила это с лампой и шариком. Убедилась, что лампа освещает ровно половину поверхности шарика, с какой бы стороны и с какого бы расстояния лампа ни светила на шарик. Поэтому и Солнце всегда освещает только половину поверхности планеты, где бы планета ни находилась.

Одинаковое ли тепло от Солнца получает планета в разных точках своей орбиты? Солнце излучает свет по всем направлениям одинаково. Так как любая планета движется по окружности, в центре которой находится Солнце, поэтому в любой точке своей орбиты Венера и Меркурий получают одинаковое тепло.

От чего зависит количество тепла, получаемого планетой от Солнца? Чем большая по размерам планета находится на орбите, тем большее тепло получает она от Солнца. Во сколько раз? Во сколько раз видимая со звезды площадь поверхности планеты больше видимой площади другой планеты.

Меркурий и Венера имеют разные размеры и находятся на разных расстояниях от Солнца. Как сравнить солнечную энергию, падающую на

планеты разных размеров и находящихся на разных расстояниях от звезды?

Я сделала из палочек пирамидку с квадратным основанием 6 см на 6 см, площадью 36 см². Отступила на 1/3 от вершины пирамидки. Измерила стороны основания маленькой получившейся пирамидки (из ниточки) – 2 см на 2 см. Значит, площадь основания маленькой пирамидки равна 4 см². Представила себе, что в вершине пирамидки находится центр Солнца. Рассмотрим свет, идущий от Солнца внутри пирамидки. И на маленький квадрат, и на большой квадрат падает одинаковый поток тепла от Солнца. Значит, площадку в 9 раз большая и удаленная на расстояние в 3 раза большее, получает такое же тепло.

Я решила перепроверить, получится ли такой же результат с треугольной пирамидкой. В основании самой маленькой пирамидки лежит 1 треугольник. У большой пирамидки в основании, удаленном от вершины на расстояние в 3 раза большее, находятся 9 маленьких таких же треугольников. Предыдущий результат подтверждается.

Изменится ли результат, если площадку удалить на большее расстояние? Я представила, какие пирамиды получатся, если достроить этой же пирамидке основание из большего количества палочек. При удалении от вершины на расстояние в 4 раза большее, площадь основания имеет 16 малых треугольников. А при удалении в 5 раз площадка увеличилась в 25 раз. Я пришла к закономерности, которая, оказывается, называется законом обратных квадратов.

Как сравнить тепло, получаемое Венерой и Меркурием, если они находятся на разных расстояниях от Солнца и имеют разные размеры? Меркурий находится на расстоянии 60 млн. км, Венера на расстоянии 110 млн. км. Венера дальше расположена от Солнца, чем Меркурий, почти в 2 раза. Значит, чтобы на Венеру упала от Солнца такая же энергия, как и на Меркурий, она должна иметь площадь в $2 \cdot 2 = 4$ раза большую Меркурия. Диаметр Меркурия – 4 880 км, диаметр Венеры - 12 104 км. Но по площади видимая поверхность Венеры в 6 раз больше Меркурия.

$$\frac{12\,104^{2,34}}{4\,880^{2,34}} \approx 6 \text{ раз} \quad (1)$$

Значит, на Венеру падает от Солнца в $6:4=1,5$ раза больший поток тепла, чем на Меркурий. Если принять поток солнечного излучения на Меркурий за 100%, то тогда на Венеру 150%.

Но древние римляне называли Венеру именем богини красоты и любви, так как планета является самым ярким светилом на небе Земли после Солнца и Луны. Я узнала, что причина этого в альбедо Венеры. Альбедо – это количество отраженного излучения по отношению к

падающему излучению. Альbedo Венеры 70%, Альbedo Меркурия 10%. Атмосфера Венеры отражает большую часть падающего на нее света.

Я сравнила энергию, поглощаемую Меркурием и Венерой, и результаты сравнения оформила в виде Таблицы 1.

Таблица 1 – Баланс энергии на Меркурии и Венере

	Меркурий	Венера
Количество падающей энергии	100%	150%
Альbedo	10%	70%
Отражается	10%	$150:100 \cdot 70 = 105\%$
Поглощается грунтом	90%	$150 - 105 = 45\%$

Несмотря на то, что на Венеру из-за ее размеров падает в 1,5 раза больший поток тепла, чем на Меркурий, но из-за большого альbedo поверхность Венеры поглощает только половину той энергии, которую поглощает Меркурий.

Почему же Венера более горячая планета, чем Меркурий? Значит, надо рассмотреть особенности атмосфер этих двух планет.

Первая особенность. Венера обладает мощной атмосферой, масса которой примерно в 100 раз превышает массу атмосферы Земли. Меркурий поглощает больше тепла, чем Венера, но он не имеет существенной атмосферы, поэтому не способен удерживать тепло. Дневная температура на поверхности Меркурия поднимается до 427°C, а ночная опускается до минус 180°C. Это самый большой температурный перепад в солнечной системе. А атмосфера Венеры не дает охлаждаться ночной поверхности Венеры, на которую не падает солнечное излучение. На Венере дневные и ночные температуры сглаживаются ее атмосферой и составляют почти 500°C.

Вторая особенность. Атмосфера Венеры состоит в основном из углекислого газа (97%), который относится к парниковым газам. Большое количество углекислого газа создает сильный парниковый эффект, «ловушку» для солнечного тепла, не выпуская его. Солнечное излучение, прошедшее через атмосферу Венеры, нагревает ее поверхность. А тепловое излучение от нагретой поверхности Венеры не уходит от нее.

Нагрев поверхности любой планеты зависит и от угла наклона солнечных лучей к поверхности планеты. Одинаковый поток солнечных лучей на полюсе падает на большую поверхность, чем на экваторе, поэтому меньше ее нагревает. Но третья особенность в виде ураганов в

верхних слоях атмосферы Венеры, движущихся вокруг планеты, сглаживает разность температур между экватором и полюсом.

Я смоделировала механизм парникового эффекта, существующий на Венере. Насыпала темный грунт слоем 2-3 см в прозрачную пластмассовую коробку, увлажнила его пульверизатором (так как в атмосфере Венеры есть небольшое количество воды), накрыла прозрачной пленкой. В моем эксперименте пленка, покрывающая коробку с грунтом, играет роль углекислого газа. Пленка пропускала излучение лампы накаливания, но не выпускала тепловые лучи от грунта. Термометр (для измерения температуры на улице) положила на грунт внутри коробки. Отметила начальную (комнатную) температуру эксперимента. Включила лампу накаливания над коробкой, записывала показания термометра каждую минуту в течение 30 минут.

Затем повторила опыт с темным грунтом, не накрывая коробку прозрачной пленкой.

Так как я не знаю, какого цвета грунт на Венере, то провела такие же опыты с более светлым грунтом, перемешанным с белым порошком.

Результаты четырех опытов внесла в таблицу. Затем по полученным данным построила графики зависимости температуры грунта от времени для темного и светлого грунтов под пленкой и без пленки. Темный грунт под пленкой нагрелся до 38°C, а без пленки до 33°C, светлый грунт под пленкой нагрелся до 36°C, а без пленки до 33°C. Проведенные опыты показали, что парниковый эффект увеличивает температуру поверхности.

Земля, как и Венера, имеет углекислый газ в атмосфере, но только менее 1%. Небольшое количество углекислого газа очень важно для поддержания постоянной температуры земной поверхности. Без парникового эффекта океаны замерзли бы и жизнь, в той форме в какой она сегодня существует на Земле, была бы невозможна. Парниковый эффект создает оптимальные тепловые условия для существования жизни на Земле.

Вывод. Температура на планете зависит от следующих факторов: расстояние до Солнца, размеры планеты, альбедо планеты, наличие атмосферы, и состава атмосферы.

В этой работе я выяснила, почему Венера является самой горячей планетой.

Литература

1. Сурдин В. Г. Астрономия : популярные лекции / В. Г. Сурдин. М. : МЦНМО, 2019. 352 с.

The mystery of the hottest planet

M. A. IGNATOVA

*Supervisor – Teacher of Physics and Astronomy L. E. Prusskaya
State Autonomous Educational Institution «Dolgoprudny Gymnasium»,
Dolgoprudny, Moscow Region, Russia*

Annotation. The work explores the reasons why Venus, farther from the Sun than Mercury, is the hottest planet in the solar system. In the opinion of the author of the work, the following factors underlie this paradox: the size of the planet, the massiveness of the atmosphere, the high content of carbon dioxide in it, hurricanes in the upper layers.

Keywords: Venus, inverse square law, albedo, greenhouse effect.

ЗАГАДКА ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

А. А. ПЛАТОНОВА

*Научный руководитель – учитель физики и астрономии Л. Е. Прусская
ГАОУ МО «Долгопрудненская гимназия»,
Долгопрудный, Московская область, Россия
lubovevgenyevna@mail.ru*

Аннотация. Проведены эксперименты, выясняющие особенности поверхностного слоя жидкости, рассмотрены формы капель разных жидкостей, проведено сравнение величины поверхностного натяжения воды из-под крана, мыльного водного раствора, раствора сахара, соли.

Ключевые слова: поверхностное натяжение жидкости, фигура с минимальной площадью поверхности, капли жидкостей, мыльные пузыри.

Насекомое водомерка может «гулять» по водоемам, стоять на воде и не тонуть. Если приглядеться, вода под ним немного прогибается. Почему это насекомое не тонет? Разве может вода прогибаться?

В работе я хотела выяснить, в чем причина возникновения особенностей поверхностного слоя жидкости, какими свойствами обладает поверхность жидкости, от чего зависят свойства поверхности жидкости.

Я решила положить на поверхность воды разные предметы. Если опустить скрепку наклонно, она тонет, так как сталь тяжелее воды. Опускаю скрепку в горизонтальном положении с помощью второй разогнутой скрепки. Первая скрепка теперь лежит на воде. Пуговица тоже лежит на воде. Значит, чтобы тяжелый предмет не тонул, нужно ему опираться на большую поверхность воды. На моих фотографиях видно, что вода под скрепкой прогибается. На воду можно положить и большую металлическую крышку, которой не мешают плавать проделанные в ней отверстия.

Причина существования особого слоя жидкости. В глубине жидкости каждая молекула со всех сторон окружена соседями, которые тянут ее во все стороны одинаково. Молекулы поверхностного слоя соседей сверху не имеют, поэтому они испытывают притяжение со стороны только нижележащих молекул. Верхний слой жидкости прогибается и удерживает лежащий на нем предмет. Выводы. Поверхность жидкости способна «держат» различные легкие предметы, сделанные из «тонущих» материалов. Поверхность жидкости можно сравнить с растянутой упругой пленкой. Лежащий на воде предмет вдавливают ее поверхность, а поверхностная пленка стремится распрямиться и таким образом «держит» предмет.

В опытах я клала предметы на верхнюю поверхность воды. А нижняя поверхность обладает такой же особенностью? В ситечко наливаю воды, и вода не проливается. Нижний слой жидкости прогибается в промежутках между проволоками ситечка и нитями ткани, удерживая воду от проливания. Поверхностное натяжение не позволяет воде выливаться из ситечка. На непромокаемой ткани вода тоже не проливается, пока я не разрушу рукой снизу целостность нижней водной поверхности.

Поиск фигуры с наименьшей площадью поверхности. Натянутая пленка всегда стремится сжать свое содержимое, уменьшить поверхность того вещества, которое находится внутри пленки. Из одинаковых кусочков пластилина я слепила разные фигуры и по готовым формулам определила площади их поверхностей. Самую маленькую поверхность имеет шар.

Поэтому понятно, почему капля чистой воды на листе мяты и капля заварки на бутерброде с маслом имеют шарообразную форму. Какую форму на бутерброде будут иметь капли разных жидкостей? По форме капель можно сделать вывод, что подсолнечное масло имеет наименьшее поверхностное натяжение по сравнению с водой и молоком. Выводы. Небольшое количество жидкости не растекается по поверхности твердого тела, а собирается в каплю. Чем меньше капля, тем ее форма ближе к сферической. Поверхностное натяжение стягивает небольшое количество воды в форму шарика.

От чего зависит наибольший объем жидкости в сосуде? В заполненные водой пробирки разного диаметра добавляла капли воды до момента ее выливания. Чем толще пробирка, тем большая дополнительная «шапка» воды может в ней поместиться. Зависимость добавляемого количества капель от диаметра пробирки отражена в диаграмме. Наибольший объем жидкости в сосуде зависит от диаметра сосуда. Излишек воды в пробирках разного диаметра удерживается поверхностным натяжением. Вывод. Поверхностное натяжение воды не позволяет выливаться жидкости даже тогда, когда объем наливаемой воды больше вместимости сосуда. Поверхность воды вздувается, возвышаясь над краями пробирок. Чем шире пробирка, тем больше объем вздутия.

Сравним поверхностное натяжение обычной воды и мыльной воды. Наблюдая за максимально возможным объемом жидкости в одном и том же сосуде, можно сравнить поверхностные натяжения этих жидкостей. 29 звеньев цепочки из скрепок можно опустить до начала выливания воды через край. 19 звеньев цепочки можно опустить до начала выливания воды, смешанной с мыльным раствором. Если жидкость начинает выливаться из переполненного сосуда раньше, значит, в этом

опыте силы поверхностного натяжения ослабли. Результаты опыта показаны на диаграмме. Вывод. Водный раствор мыла поднимается над краем сосуда меньше, чем чистая вода. Значит, мыльный раствор имеет меньшее поверхностное натяжение.

Опыты, подтверждающие меньшее поверхностное натяжение водного раствора мыла по сравнению с обычной водой. Как поведут себя поверхности двух жидкостей, встретившись в одном сосуде? Скрепка уплывает от капли шампуня, так как молекулы мыльного раствора слабее притягивают к себе скрепку, чем молекулы чистой воды. Это подтверждается и другим опытом. Поверхность воды, покрытая зубным порошком, расступилась от капли шампуня. Выводы. Натяжение поверхностной «пленки» жидкости зависит от вида жидкости. Раствор шампуня, мыла или стирального порошка ослабляют силы поверхностного натяжения воды. Вот почему этот раствор лучше смывает грязь.

Опыты с пузырями. Можно ли получить пузырь из чистой воды? Пузырь представляет собой объем воздуха, «обтянутый» со всех сторон тонким слоем воды. Пустив сильную струю в немного наполненную ванну, можно увидеть пузырьки из воды. Но они быстро лопаются. Из чистой воды выдуть пузырь не получится из-за сильного поверхностного натяжения, поэтому нужен мыльный раствор.

Исследование мыльных пузырей. Если ослабить поверхностное натяжение, то воздух в пузыре легче растягивает водную пленку. Мыльный пузырь живет дольше. Из-за имеющегося поверхностного натяжения мыльного раствора воздух выходит из пузыря по трубочке, отклоняя верхнюю часть пламени свечи. Причем можно заметить, что отклонение пламени тем сильнее, чем меньше диаметр пузыря. Выводы. Пузыри имеют форму шара. Пузырь, находящийся на трубочке, сдувается из-за сил поверхностного натяжения.

Измерение величины поверхностного натяжения воды. Опыт с тканью. Я измерила величину силы, которая требуется, чтобы оторвать от поверхности воды квадратик легкой непромокаемой ткани от зонта. В опыте потребовалось для этого 4 скрепки. Чтобы тот же кусок ткани оторвать от соленой воды, потребовалось 2 скрепки. От сладкой воды 1 скрепка оторвала ткань. Те же эксперименты провела с фольгой. Результаты опытов показаны на диаграмме. Вывод. Поверхностное натяжение чистой воды больше, чем водных растворов.

В работе выяснила: причину поверхностного натяжения, от чего зависит величина поверхностного натяжения, измерила величину поверхностного натяжения.

Литература

1. Рачлис Х. Физика в ванне (Серия Библиотечка «Квант». Вып. 51) / Х. Рачлис. М. : Наука. 1986. 96 с.
2. «Квант» для младших школьников. Физика. (Прил. к журналу «Квант» № 6/99) / Составители В.А. Тихомирова, А.И. Черноуцан. М. : Бюро Квантум, 1999. 128 с.

Mystery of the water surface

A. A. PLATONOVA

*Supervisor – Teacher of Physics and Astronomy L. E. Prusskaya
State Autonomous Educational Institution «Dolgoprudny Gymnasium»,
Dolgoprudny, Moscow Region, Russia*

Abstract. Experiments were carried out to clarify the features of the surface layer of a liquid, the shapes of drops of different liquids were examined, and the value of the surface tension of tap water, a soapy aqueous solution, a sugar solution, and salt was compared.

Keywords: surface tension of a liquid, figure with a minimum surface area, drops of liquids, soap bubbles.

ФИЗИКА ДВИЖЕНИЯ МЯЧА В НАСТОЛЬНОМ ТЕННИСЕ

А. С. ЯГОДИН

*Научный руководитель – учитель физики А. Р. Мазурова,
МБОУ «Гимназия № 24», Калуга, Россия
sevyagodin@mail.ru*

Аннотация. В результате работы были систематизированы знания о физике движения мяча в настольном теннисе. С помощью робота-тренажера данные закономерности продемонстрированы начинающим спортсменам.

Ключевые слова: физические законы, траектория движения мяча, робот-тренажер, дальность полета мяча зависит от верхнего или нижнего вращения

В настольном теннисе различают следующие удары: плоский удар, удар с верхним вращением, удар с нижним вращением.

Плоским ударом считают такой удар, при котором вращение мяча почти отсутствует, частота вращения мяча не превышает примерно 20 оборотов в секунду, скорость мяча максимальна, все энергия удара переходит в поступательную энергию движения мяча. При верхнем вращении траектория мяча отклоняется вниз, тем существеннее, чем выше скорость вращения. Траектория становится круче, ее длина заметно укорачивается, мяч приземляется ближе к сетке, угол падения получается меньше, а угол отскока, соответственно, больше. При ударах с нижним вращением траектория мяча удлиняется, мяч как бы парит в воздухе. При ударах с нижним вращением мяч опускается медленно.

Сила сопротивления воздуха воздействует на движение мяча, так как он очень легкий по сравнению с его габаритами: диаметр мяча составляет 4 см, а его масса 2,7 грамма. Сила сопротивления – это сила, которая возникает при движении тела в среде и направлена против этого движения, зависит от размеров и формы тела, а также от скорости его перемещения. Вектор силы сопротивления всегда направлен против вектора скорости движущегося тела.

Магнус-эффект - это явление, при котором движущийся в воздухе объект, который имеет вращательное движение по направлению к своему движению, создает силу, направленную перпендикулярно к направлению движения.

Для более глубокого понимания траектории движения мяча в настольном теннисе создана математическая модель на базе MS Excel. При построении траектории движения мяча в модели был учтен эффект воздействия трех сил: сила тяжести, сила сопротивления воздуха и сила Магнуса. Математическая модель показала, что при верхнем вращении

дальность полета меньше, чем при отсутствии вращения и при нижнем вращении.

С целью подтверждения математической модели был проведен эксперимент с помощью робота-тренажера «Фора-Кадет». Робот может повторить приблизительно одинаковые выбросы мячей, т.е. с одинаковыми параметрами: начальной скоростью, углом выброса к горизонту, скоростью вращения.

Эксперимент показал, что при «верхнем» вращении мяча при неизменной линейной скорости дальность полета мяча уменьшается. При «нижнем» вращении при неизменной линейной скорости дальность полета мяча увеличивается.

Результаты математической модели и эксперимента показали схожие выводы, которые в свою очередь совпадают с интуитивными представлениями спортсменов о траектории движения мяча с вращением.

Выводы по тактике игры: при сравнении нижнего вращения мяча, то есть «запиле» и верхнем вращении мяча, то есть «топ-спине»:

1. При нижнем вращении необходимо играть дальше от стола, т.к. дальность полета мяча увеличивается.
2. Горизонтальная скорость мяча должна быть меньше при нижнем вращении, чем при верхнем.
3. Угол направления движения мяча к горизонту должен быть меньше при нижнем вращении мяча, чем при верхнем.

Литература

1. Куликов И.Ю. Эффект Магнуса // Чудесности вокруг нас. – М. : Инноватэк, 2017.
2. Мякишев Г. Я. Физика 10 класс // Г. Я. Мякишев, Б. Б. Буховцев, Н. Н. Сотский. М. : Просвещение, 2004.
3. Жданов И. Обучение настольному теннису. Топспин справа за 3 месяца. 7 тренировочных упражнений. URL: <https://expert-tennis.ru/nastolnyj-tennis-obuchenie-top-spinu-sprava-za-3-mesyaca-texnika-trenirovochnye-uprazhneniya.html?ysclid=lszxzft038301218815>.

Physics of ball movement in table tennis

A. S. YAGODIN

Supervisor – Teacher of Physics

A. R. Mazurova Gymnasium No. 24, Kaluga, Russia

Abstract. As a result of the work, knowledge about the physics of ball movement in table tennis is systematized. With the help of a robot simulator, these patterns are demonstrated to novice athletes.

Keywords: physical laws, the trajectory of the ball, a robot simulator, the range of the ball depends on the upper or lower rotation.

Научное издание

ФИЗИКА, ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Тезисы докладов конференции

Всероссийская с международным участием
молодежная научно-практическая конференция
(22–30 апреля 2024 г., Ярославль)

Компьютерная верстка А. С. Гвоздарёва

Подписано в печать 05.02.2025.
Формат 60×84 $\frac{1}{16}$ Уч.-изд. л. 6,84.
Тираж 36 экз. Заказ 00000.

Отпечатано в типографии ООО «Филигрань»
150049, г. Ярославль, ул. Свободы, д. 91
pechataet@bk.ru