

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

ИЗДАНИЕ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

Журнал издается с января 1958 г.

ТОМ 54

ИЮЛЬ 2011

№ 7

ТЕМАТИЧЕСКИЙ ВЫПУСК

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Под редакцией доктора технических наук, профессора М. Я. Марусиной

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	5
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ	
Павлов И. В. Современные требования к обеспечению единства измерений.....	7
Воронцов Е. А., Виноградов Н. С. Информационно-измерительные комплексы с применением биологической обратной связи.....	11
Виноградов Н. С., Воронцов Е. А. Оптоволоконный базис для поверки дальнометрического блока тахеометра.....	15
ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ	
Кириянов К. А., Сизиков В. С. Применение сигнальных микропроцессоров в задачах реконструкции искаженных изображений.....	20
Анодина-Андриевская Е. М., Божокин С. В., Марусина М. Я., Полонский Ю. З., Суворов Н. Б. Перспективные подходы к анализу информативности физиологических сигналов и медицинских изображений человека при интеллектуальной деятельности.....	27
Виноградова А. А., Трутненко С. В. Сравнительные особенности программ мультифрактального анализа.....	35
НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ	
Кинжагулов И. Ю. Модель термооптического возбуждения ультразвуковых волн в паяных тонкостенных изделиях.....	39
Быченко В. А. Лазерно-ультразвуковая диагностика остаточных напряжений в тонкостенных элементах изделий ракетно-космической техники.....	45
Быченко В. А., Кинжагулов И. Ю. Лазерно-ультразвуковой контроль тонкостенных паяных соединений камер жидкостных ракетных двигателей.....	50

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

Иванов И. Ю., Васильев А. А., Взнуздаев М. Е., Воропаев Н. И., Каммель П., Кравцов П. А., Надточий А. В., Петров Г. Е., Петижан К., Трофимов В. А. Криогенная времяпроекционная ионизационная камера для исследования процесса захвата мюона дейтроном в эксперименте MuSUN.....	55
Терехин С. Н., Васильев А. А., Взнуздаев М. Е., Коченда Л. М., Иванов И. Ю., Киселев С. С., Марусина М. Я., Кравцов П. А., Надточий А. В., Трофимов В. А. Приборная база эксперимента по исследованию сечения реакции dd -ядерного синтеза с поляризованными компонентами в проекте PolFusion	62
ПРИБОРЫ ТОЧНОЙ МЕХАНИКИ	
Дайнека Г. Б., Киселев С. С., Марусина М. Я., Мешковский И. К., Марусин М. П., Лопарёв В. А., Шугаев М. Н. Двухкоординатная поворотная платформа	68
Антонов С. Е., Марусина М. Я., Лямин А. В., Киселев С. С., Федосов Ю. В. Программный инструментарий для исследования математических моделей прецизионных триподов	72
Мешковский И. К., Унтилов А. А., Киселев С. С., Куликов А. В., Новиков Р. Л. Качество намотки чувствительного элемента волоконно-оптического гироскопа	76
Толкович Д. В. Разработка учебного макета магнитно-резонансного томографа.....	80
ИНФОРМАЦИЯ	82
SUMMARY (<i>перевод Ю. И. Копилевича</i>).....	85

THEMATIC ISSUE

INFORMATION-MEASURING TECHNOLOGIES

By Edition of M. Ya. Marusina, Doctor of Technical Science, Professor

CONTENTS

PREFACE	5
MEASURING TECHNOLOGIES	
Pavlov I. V. Up-to-Date Requirements to Maintenance of Measurements Uniformity.....	7
Vorontsov E. A., Vinogradov N. S. Information-Measuring Complex with Biofeedback ...	11
Vinogradov N. S., Vorontsov E. A. Fiber-Optic Basis for Verification of Tacheometer Distance-Measuring Unit.....	15
PROCESSING OF SIGNALS AND IMAGES	
Kiryanov K. A., Sizikov V. S. Application of Signal Microprocessors in Restoration of Distorted Images	20
Anodina-Andrievskaya E. M., Bozhokin S. V., Marusina M. Ya., Polonsky Yu. Z., Suvorov N. B. Promising Approaches to Analysis of Informative Physiological Signals and Medical Images of a Human During Intellectual Activity	27
Vinogradova A. A., Trutnenko S. V. Comparative Characterization of Programs for Multifractal Analysis	35
NONDESTRUCTIVE TESTING	
Kinzhagulov I. Yu. Theoretical Model of Thermo-Optical Excitation of Ultrasonic Waves in Soldered Thin-Walled Products	39
Bychenok V. A. Laser-Ultrasonic Diagnostics of Residual Stress in Thin-Walled Elements of Space-Rocket Technique.....	45
Bychenok V. A., Kinzhagulov I. Yu. Laser-Ultrasonic Testing of Thin-Walled Soldered Junctions in Liquid-Propellant Rocket Engine Chamber	50
INSTRUMENTS AND METHODS OF EXPERIMENTAL PHYSICS	
Ivanov I. Yu., Vasiliev A. A., Vznuzdaev M. E., Voropaev N. I., Kammel P., Kravtsov P. A., Nadtochy A. V., Petrov G. E., Petitjean C., Trofimov V. A. Cryogenic Time-Projection Ionization Chamber for Investigation of μ -Meson Capture by Deuteron in MuSUN Experiment.....	55

Terekhin S. N., Vasiliev A. A., Vznuzdaev M. E., Kotchenda L. M., Ivanov I. Yu., Kiselev S. S., Marusina M. Ya., Kravtsov P. A., Nadtochy A. V., Trofimov V. A. Instrumentation for Experimental Study of Cross Section of <i>dd</i>-Nuclear Fusion Reaction with Polarized Components in PolFusion Project	62
INSTRUMENTS OF PRECISE MECHANICS	
Daineka G. B., Kiselev S. S., Marusina M. Ya., Meshkovsky I. K., Marusin M. P., Loparev V. A., Shugaev M. N. Two-Coordinate Rotatable Platform	68
Antonov S. E., Marusina M. Ya., Lyamin A. V., Kiselev S. S., Fedosov Yu. V. Software Tool for Study of Mathematical Models of Precision Tripod.....	72
Meshkovsky I. K., Untilov A. A., Kiselev S. S., Kulikov A. V., Novikov R. L. The Quality of Winding of Fiber-Optic Gyroscope Sensor	76
Tolkovich D. V. Development of a Training Model of MR-Imager	80
INFORMATION	82
SUMMARY	85

Editor-in-Chief E. B. Yakovlev

ПРЕДИСЛОВИЕ

Тематический выпуск журнала посвящен некоторым направлениям научных исследований, проводимых на кафедре измерительных технологий и компьютерной томографии (ИТ и КТ).

В разделе „Измерительные технологии“ рассмотрены основные требования к обеспечению единства измерений, обусловленные принятием новой редакции закона РФ „Об обеспечении единства измерений“ от 26 июня 2008 г. 102-ФЗ. Представлен пример создания информационно-измерительного комплекса с биологической обратной связью, который может быть использован для сертификации поверителей. Описана конструкция оптоволоконного базиса для поверки дальномерного блока тахеометра. С 2011 г. на кафедре открыта подготовка по новой магистерской программе 221700.68.00 Метрологическое обеспечение приборостроительного производства (направление 221700 Стандартизация и метрология).

В разделе „Обработка сигналов и изображений“ представлены перспективные методы выявления информативных признаков физиологических показателей сигналов человека, характеризующих интеллектуальную деятельность. Показана эффективность применения вейвлет-преобразований для анализа сигналов и изображений. Рассмотрены особенности инструментальной реализации алгоритмов реконструкции искаженных (смазанных, дефокусированных или/и зашумленных) изображений.

Раздел „Неразрушающий контроль“ включает статьи, посвященные методу лазерно-ультразвуковой дефектоскопии, основанному на термооптическом возбуждении ультразвуковых волн. Данный раздел отражает новое научное направление в деятельности кафедры, в рамках которого с 2011 г. открыта подготовка по новой магистерской программе 160400.68.00 „Контроль качества изделий ракетно-космических комплексов“.

Раздел „Приборы и методы экспериментальной физики“ содержит материалы по приборной базе поляризационных экспериментов в области ядерного синтеза. В июле 2010 г. при кафедре ИТиКТ была создана базовая кафедра в ПИЯФ им. Б. П. Константинова РАН: „Приборы и методы поляризационных экспериментов“. На кафедрах ведутся работы по созданию детекторной камеры для эксперимента по исследованию сечения реакции dd -ядерного синтеза с поляризованными компонентами и криогенной времяпроекционной ионизационной камеры для исследования процесса захвата мюона дейтроном. 12—17 сентября 2011 г. в нашем Университете будут проходить Международная конференция “XIV International Workshop on Polarized Sources, Targets & Polarimetry” PST2011 и Молодежная школа „Современные направления ядерной физики и физики высоких энергий“. Организаторы — кафедра ИТиКТ и базовая кафедра ПиМПЭ.

В разделе „Приборы точной механики“ рассмотрена возможность создания прецизионного поворотного механизма, основанного на рычажных механизмах, представлен автоматизированный программно-аппаратный комплекс для исследования математических моделей прецизионных триподов. Предложен помехоустойчивый метод измерения скорости движущегося объекта по нескольким кадрам и рассмотрена проблема качества изготовления чувствительных элементов волоконно-оптических гироскопов.

*Заведующая кафедрой измерительных технологий
и компьютерной томографии СПбГУ ИТМО,
доктор технических наук, профессор М. Я. МАРУСИНА*

PREFACE

This thematic issue of the Journal covers several lines of investigations currently carried out at Department of Measuring Technologies and Computer Tomography.

Basic requirements imposed upon maintenance of measurements uniformity by enactment of the new version of the Russian Federation Law 102-FZ “On maintenance of measurements uniformity” of June 26th, 2008, are considered in Section “Measuring technologies”. Presented an information-measuring system with biofeedback developed for metrological support of geodetic measuring means. A design of geodetic basis for calibration of distance-measuring unit of tacheometer is described. In 2011 a new program of magister training is opened at the Department: 221700.68.00 “Metrological support of instrument-making works” in the frames of training line 221700 “Standardization and metrology”.

Section “Processing of signals and images” presents promising methods for revelation of information factors in physiological human signals to characterize intellectual activity. Effectiveness of application of wavelet transformation for signal and image analysis is demonstrated. Peculiarities of hardware realization of algorithms of restoration of distorted images are considered.

Section “Nondestructive testing” includes papers devoted to the laser-ultrasound defectoscopy method based on thermo-optical excitation of ultrasound waves. A model of excitation and propagation of ultrasonic waves is developed, experimental results of application of the new method to quality control of soldered thin-walled elements of space-rocket technique are presented. The Section represents the new avenue of investigation carried out at the Department, related to the new magister training program 160400.68.00 “Quality control over space-rocket technique elements” opened up in 2011.

Section “Instruments and methods of experimental physics” contains publications concerning instrumentation of experiments on nuclear fusion and perspectives of nuclear power engineering. In July 2010 the base Chair on Instruments and Methods of Polarization Measurements – a branch of Department of Measuring Technologies and Computer Tomography — was established at B. P. Konstantinov Petersburg Nuclear Physics Institute RAS. At present, cooperative works on development of detecting chamber to measure the cross section of dd -fusion reaction with polarized components are carried out at the two Chairs. Results of work on cryogenic time-projection ionization chamber for investigation of mu-meson capture by deuteron are presented also. XIV International Workshop on Polarized Sources, Targets & Polarimetry” PST2011 is to be hold at our University on September 12—17, 2011 is to be organized by Department of Measuring Technologies and Computer Tomography and the base Chair on Instruments and Methods of Polarization Measurements.

Papers assembled in Section “Instruments of precise mechanics” concern the possibility of development of precise rotatable platform based on application of a leverage instead of direct turn drives. A noise-immune method of moving object velocity estimation from a few shots is proposed. The problem of manufacturing quality of a fiber optic gyroscope sensor is discussed.

M. Ya. Marusina
Doctor of Technical Sciences, Professor
Head of Department of Measuring Technologies and Computer Tomography
St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 389:001.4

И. В. ПАВЛОВ

СОВРЕМЕННЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОБЕСПЕЧЕНИЮ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

Рассмотрены основные требования к обеспечению единства измерений, обусловленные принятием новой редакции Закона Российской Федерации „Об обеспечении единства измерений“ от 26 июня 2008 г. № 102-ФЗ.

Ключевые слова: физическая величина, единство измерений, измерение, средство измерений, эталон.

Единство измерений (an traceability) — состояние измерений, характеризующееся тем, что их результаты выражаются в узаконенных единицах, размеры которых в установленных пределах равны размерам единиц, воспроизводимых первичными эталонами, а погрешности результатов измерений известны и с заданной вероятностью не выходят за установленные пределы. Это определение приведено в рекомендации по межгосударственной стандартизации РМГ 29-99 „Метрология. Основные термины и определения“. В том же документе дано определение понятия „обеспечение единства измерений“ — деятельность метрологических служб, направленная на достижение и поддержание единства в соответствии с законодательными актами, а также правилами и нормами, установленными государственными (национальными) стандартами и другими нормативными документами по обеспечению единства измерений.

Для выполнения поставленных требований в Российской Федерации создана государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ) [1], которая включает в себя комплекс нормативных документов межрегионального и межотраслевого уровней, устанавливающих правила, нормы, требования, направленные на достижение и поддержание единства измерений в стране (при требуемой точности), утвержденных Росстандартом. В ГСИ выделяются основополагающие стандарты, устанавливающие общие требования, правила и нормы, а также стандарты, охватывающие какую-либо область или вид измерений.

Законодательство Российской Федерации об обеспечении единства измерений основывается на Конституции, в статье 71 которой записано „В ведении Российской Федерации находятся: ... р) ... , стандарты, эталоны, метрическая система и испытания“, а также на Федеральном Законе „Об обеспечении единства измерений“ (далее Федеральный Закон). Вторая редакция Федерального Закона № 102-ФЗ принята 26 июня 2008 г., одним из его основных положений являются требования к допущенным к применению в Российской Федерации единицам величин. Согласно Федеральному Закону, применяются единицы величин Международной системы единиц, принятые Генеральной конференцией по мерам и весам и рекомендованные к применению Международной организацией законодательной метрологии. Правительством Российской Федерации могут быть допущены к применению в стране наравне с

единицами величин Международной системы единиц внесистемные единицы величин. Наименования единиц величин, допускаемых к применению в Российской Федерации, их обозначения, правила написания, а также правила их применения устанавливаются Правительством РФ.

В октябре 2009 г. вышло постановление Правительства РФ от 31 октября 2009 г. № 879 „Об утверждении положения о единицах величин, допускаемых к применению в Российской Федерации“. В положении приведены основные единицы Международной системы единиц, производные и внесистемные единицы величин, допущенные к применению в Российской Федерации, даны правила применения и написания единиц величин и их сокращений и обозначений. В положении также указано, что в технической документации, научно-технических печатных изданиях (включая учебники и учебные пособия) допускается применять только утвержденные единицы величин.

В Федеральном Законе приведены требования, предъявляемые к средствам измерений, которые определяются как технические средства, предназначенные для измерений.

Необходимо отметить, что в нормативном документе [2] подчеркнута, что в течение межповерочного интервала метрологические характеристики средств измерений должны находиться в пределах допуска. *Средство измерений* — техническое средство, предназначенное для измерений, имеющее нормированные метрологические характеристики, воспроизводящее и (или) хранящее единицу физической величины, размер которой принимается неизменным (в пределах установленной погрешности) в течение известного интервала времени.

Федеральный Закон разрешает применять в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений только средства измерений утвержденного типа, занесенные в Государственный реестр средств измерений. При утверждении типа средств измерений устанавливаются показатели точности, интервал между поверками средств измерений, а также методика поверки данного типа средств измерений.

Решение об утверждении типа средств измерений принимается федеральным органом — Росстандартом — на основании положительных результатов испытаний. Утверждение типа средств измерений удостоверяется свидетельством. На каждый экземпляр средств измерений утвержденного типа наносится знак утверждения типа. Конструкция средства измерений должна обеспечивать возможность нанесения этого знака в месте, доступном для просмотра. Сведения об утвержденных типах средств измерений вносятся в Федеральный фонд по обеспечению единства измерений. Порядок проведения испытаний и отнесения технических средств к средствам измерений установлен приказом Министерства промышленности и торговли Российской Федерации от 27 апреля 2009 г. № 323 (приказ зарегистрирован в Министерстве юстиции Российской Федерации 21 мая 2009 г. № 13969).

К средствам измерений законодательством Российской Федерации предъявляются обязательные метрологические и технические требования, выполнение которых контролируется в процессе поверки средств измерений. Конструкция средств измерений должна обеспечивать ограничение доступа к их определенным частям в целях предотвращения несанкционированной настройки и вмешательства, которые могут привести к искажениям результатов измерений. Такие же требования предъявляются и к программному обеспечению средств измерений.

В Федеральном Законе не указывается понятие „образцовое средство измерений“, поэтому возникает неоднозначное мнение о возможности или невозможности его использования. Как следует из текста Федерального Закона, использование этого термина не запрещено. В современных нормативных документах на поверочные схемы вновь используется термин „образцовое средство измерений“ (см. [3] и другие нормативные документы).

Конструкция образцовых средств измерений может полностью соответствовать конструкции и устройству рабочих средств измерений, даже их точностные характеристики могут быть одинаковыми. Разница между образцовыми и рабочими средствами измерений заключа-

ется только в их применении. Так, рабочие средства измерений используются в технологическом процессе, в то время как образцовые предназначены только для метрологических работ (для хранения и передачи размера единицы величины). Запрещается применять образцовое средство измерений в технологических целях на производстве. Это одно из важнейших требований метрологии.

При выборе средств измерений для решения конкретной технологической задачи необходимо обращать внимание не только на метрологические параметры прибора, но и на:

- наличие свидетельства об утверждении типа средства измерений (справки можно получить на сайте ВНИИМС <www.vniims.ru> в разделе „ГОСРЕЕСТР“);
- наличие знака утверждения типа средства измерений;
- всю сопровождающую нормативную документацию (паспорт, инструкцию пользователя и т.п.), которая должна быть представлена на русском языке;
- наличие утвержденной методики поверки;
- наличие действующего свидетельства или знака первичной или периодической поверок.

Особое место в Федеральном Законе уделяется требованиям к эталонам единиц величин. Предусматриваются три вида эталонов.

1. *Государственный первичный эталон* предназначен для воспроизведения, хранения и передачи единицы величины с наивысшей в Российской Федерации точностью, он применяется в качестве исходного эталона на территории Российской Федерации.

2. *Государственный эталон* находится в федеральной собственности и служит для передачи размера единицы величины от государственного первичного эталона единицы величины к эталонам, образцовым и рабочим средствам измерений. Государственные эталоны единиц величин образуют эталонную базу Российской Федерации. Они не подлежат приватизации.

3. *Эталон* единицы величины предназначен для воспроизведения, хранения и передачи единицы величины. Эталон может применяться также вне области государственного регулирования.

Особенностью всех указанных выше типов эталонов является то, что порядок их содержания и применения устанавливается Правительством РФ. Каждый эталон единицы величины должен быть утвержден, разрабатывается порядок установления обязательных требований к нему и к его порядку хранения и применения. Каждый эталон должен быть зарегистрирован, после чего ему присваивается персональный номер. Для подтверждения метрологических характеристик эталонов они *сличаются* между собой. *Сличение* эталонов единиц величин — совокупность операций, устанавливающих соотношение между единицами величин, воспроизводимых эталонами одного уровня точности в одинаковых условиях.

Необходимо отметить, что образцовые средства измерений также предназначены для передачи размера единиц величин. Для подтверждения их метрологических характеристик они могут быть просто проверены. В Российской Федерации могут применяться только эталоны, обладающие свойством *прослеживаемости*.

В Федеральном Законе дано определение *прослеживаемости*: свойство эталона единицы величины или средства измерений, заключающееся в документально подтвержденном установлении их связи с государственным первичным эталоном соответствующей единицы величины посредством сличения эталонов единиц величин, поверки, калибровки средств измерений.

Все измерения, осуществляемые с помощью указанных выше технических устройств, должны выполняться по аттестованным методикам (методам) измерений. Исключение составляют прямые измерения. При всех видах измерений должны применяться только средства измерений утвержденного типа, прошедшие поверку и имеющие действующее свиде-

тельство поверки или знак поверки. Результаты измерений должны быть выражены в единицах величин, допущенных к применению в Российской Федерации.

Методики (методы) измерений, предназначенные для выполнения прямых измерений, должны быть внесены в эксплуатационную документацию на средства измерений. Подтверждение соответствия методик (методов) измерений обязательным метрологическим требованиям к измерениям осуществляется путем их аттестации. Сведения об аттестованных методиках (методах) измерений передаются в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений. Федеральные органы исполнительной власти определяют измерения, относящиеся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, и устанавливают к ним обязательные метрологические требования, в том числе показатели точности измерений. Желательно, чтобы производилась оценка неопределенности результатов измерений [4—6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 8.000-2000. Государственная система обеспечения единства измерений. Основные положения.
2. РМГ 29-99. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения.
3. ГОСТ 8.021-2005. Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений массы.
4. РМГ 43-2001. Государственная система обеспечения единства измерений. Применение „Руководства по выражению неопределенности измерений“.
5. Р 50.2.038-2004 2000. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые однократные. Оценивание погрешностей и неопределенности результата измерений.
6. РМГ 91-2009 2000. Государственная система обеспечения единства измерений. Совместное использование понятий „погрешность измерения“ и „неопределенность измерения“.

Сведения об авторе

Игорь Всеволодович Павлов — канд. техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии;
E-mail: gipavlov@hotmail.ru

Рекомендована кафедрой
измерительных технологий
и компьютерной томографии

Поступила в редакцию
01.03.11 г.

Е. А. Воронцов, Н. С. Виноградов

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Представлен пример разработки информационно-измерительного комплекса с использованием биологической обратной связи. Рассмотренный комплекс является инструментом метрологического обеспечения геодезических средств измерений, а также может быть использован для сертификации поверителей указанных средств измерений.

Ключевые слова: средства измерений, биологическая обратная связь, поверитель.

Системами с биологической обратной связью (БОС) будем называть системы, характер работы которых зависит от психофизиологического (биологического) состояния пользователя. Это означает, что в состав комплексов с БОС входят информационно-измерительные системы и системы искусственного интеллекта.

Информация о состоянии пользователя поступает с помощью контактных и/или дистанционных датчиков в режиме реального времени.

Информация может получаться по некоторому числу (кратному степеням двойки) каналов-показателей, подавляющее большинство которых обычно являются *неосознаваемыми* для пользователя. Это существенное обстоятельство, поскольку означает, что системы с БОС позволяют вывести на уровень сознания пользователя ранее не осознаваемую информацию о состоянии его организма, т.е. расширить область осознаваемого. Следовательно, у человека появляется возможность сознательно управлять своим состоянием, что является важным эволюционным достижением технократической цивилизации.

Основой разрабатываемого информационно-измерительного комплекса с БОС является универсальный автоматизированный коллиматорный стенд (УКС), предназначенный для проведения поверок геодезических и маркшейдерских средств измерений.

Стенд VEGA УКС предназначен для проведения следующих видов работ:

1) поверка и калибровка геодезических и маркшейдерских средств измерений: оптических, лазерных и цифровых нивелиров; оптических, электронных и лазерных теодолитов; оптических и электронных тахеометров (операции поверки и калибровки выполняются согласно утвержденным методикам поверки нивелиров, теодолитов и других геодезических угломерных приборов);

2) контроль основных геометрических характеристик и параметров нивелиров, теодолитов и других угломерных приборов;

3) юстировка угломерной части геодезических приборов, в том числе после проведения ремонтных работ;

4) настройка дальномерного канала электронных тахеометров;

5) проверка соосности энергетической оси дальномера и визирной оси зрительной трубы;

6) юстировка оптических нивелиров после проведения ремонтных работ;

7) юстировка всех типов лазерных нивелиров, в том числе после проведения ремонтных работ.

Устройство и особенности конструкции. На рис. 1 представлена схема расположения коллиматоров стенда, на рис. 2 — общий вид стенда. Согласно рис. 2, основание стенда *I* может жестко крепиться к фундаменту, также предусмотрена возможность установки стенда

на виброизолирующие опоры 2. На основание станда устанавливается станина крепления коллиматоров 3, на которую последовательно устанавливаются горизонтальные *A* и *B* (рис. 1; рис. 2, 5) и вертикальные коллиматоры *C* и *D* (6). Визирные оси коллиматоров образуют пучок, сходящийся в точке установки прибора, находящегося на регулируемом по высоте автоматизированном подъемном столике 4. На верхней части станины крепления коллиматоров 3 установлен монитор 7, питание на который подается от стандартной сети напряжением 220 В. Блок питания 9 предназначен для подачи питания на управляющий блок 10.

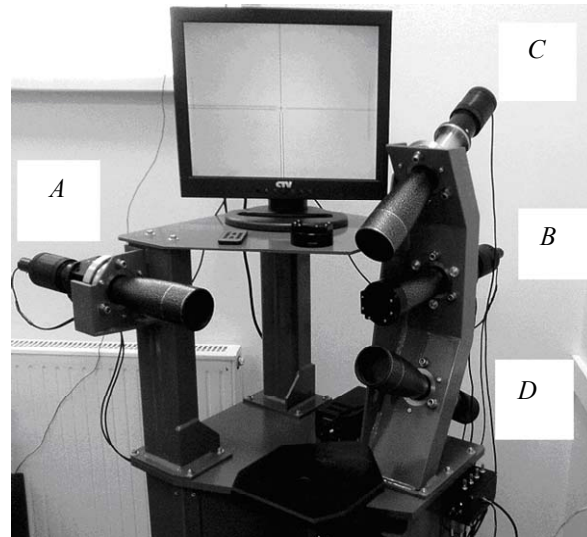


Рис. 1

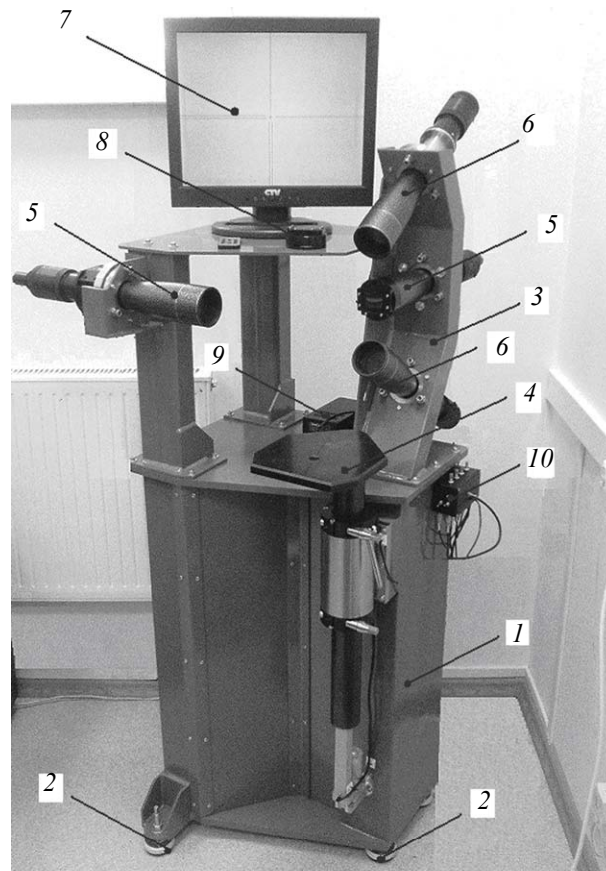


Рис. 2

Блок 10 обеспечивает:

- управление автоматическим подъемным столиком;
- включение и выключение подсветки коллиматоров;

- отдельную регулировку яркости подсветки каждого коллиматора;
- включение и выключение камер горизонтальных коллиматоров.

Поддержание заданного угла в горизонтальных автоколлиматорах обеспечивается точными компенсаторами. Коллиматоры, расположенные относительно центрального под углом $\pm 30^\circ$ в вертикальной плоскости, и коллиматоры, расположенные под углом 90° в горизонтальной плоскости, позволяют производить поверку теодолитов, тахеометров и лазерных нивелиров в полном объеме.

Поверка лазерных нивелиров, а также контроль непараллельности визирной оси приборов и лазерного луча электронных дальномеров осуществляются с помощью установленных в горизонтальных автоколлиматорах видеокамер, изображение с которых передается на монитор, входящий в комплект стенда. Набор светофильтров 8 (рис. 2), входящий в комплект стенда, необходим для безопасности при работе с лазерным излучением. Стенд оборудован электрическим подъемником предметного столика, что значительно облегчает и ускоряет работу на коллиматорном стенде.

Программное обеспечение, входящее в комплект поставки стенда, позволяет автоматизировать процесс поверки средств измерений, а также самого стенда. Результаты поверки сохраняются в виде протокола в базе данных.

На автоматическом подъемном столике устанавливается миниэкзаменатор, позволяющий задавать угол наклона предметного столика в диапазоне от $-40'$ до $+40'$ с погрешностью не более $15''$ либо от $-3'$ до $+3'$ с погрешностью не более $6''$.

Дополнительный коллиматор с четырьмя сетками нитей, соответствующими расстояниям 1,5, 5, 10 метров и бесконечность, позволяет проводить исследования влияния перефокусировки зрительной трубы поверяемого прибора на коллимационную погрешность и погрешность „место нуля“.

Визуальный контроль точностных характеристик поверяемых средств измерений осуществляется с использованием индивидуально разработанной для каждого из коллиматоров геометрией сетки нитей. На рис. 3 представлена сетка нитей коллиматора, разработанная компанией „Геостройизыскания“: P1, P8, P9 — дальномерные штрихи; P4, P5 — шкала измерений; P6, P7 — горизонтальный биссектор; P2, P3 — точка наведения.

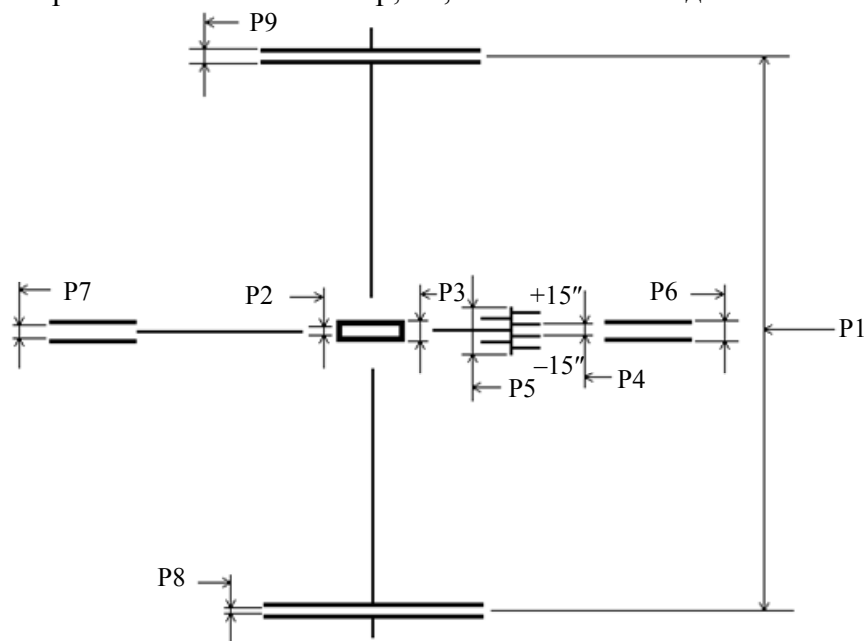


Рис. 3

Комплекс включает систему БОС, совокупность системы технического зрения (СТЗ) и электроэнцефалографа (ЭЭГ) (рис. 4). Система технического зрения состоит из видеокамеры

и ПК со специальным программным обеспечением. Данная система позволяет исследовать и учитывать саккастические движения глаз при совмещении сеток нитей и снятии отсчетов. В системе БОС используется также электроэнцефалограф — прибор, предназначенный для измерения и регистрации изменений разности потенциалов электрического поля головного мозга.

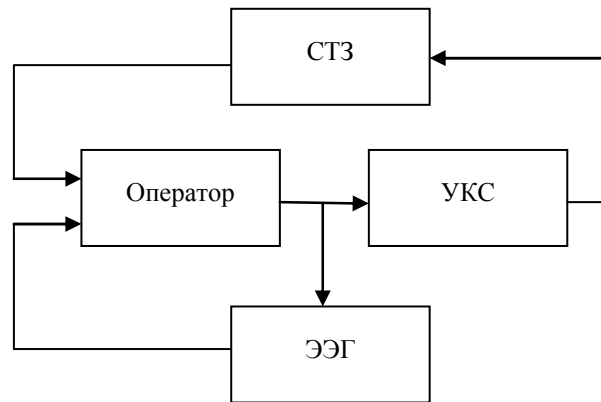


Рис. 4

БОС осуществляется по двум группам параметров:

- 1) характеристики саккастических движений глаз;
- 2) электрические потенциалы головного мозга.

Выбор параметров БОС обусловлен следующим. Одним из необходимых условий для измерений (совмещения, снятия отсчета) геодезическими СИ является правильное распределение внимания. Проведенные ранее исследования в области контроля распределения внимания [1] показали перспективность применения анализа ЭЭГ. В качестве аналога системы контроля распределения внимания рассматривалась система, предназначенная для исследования ЭЭГ у спортсменов-стрелков, поскольку наведение на цель и снятие отсчета при измерении аналогично наведению на цель и выстрелу. В качестве коррелята зрительного внимания использовали степень депрессии альфа-ритма. Было показано, что у начинающих стрелков прицеливание сопровождается выраженной депрессией альфа-ритма, вызванной активацией зрительного внимания, направленного на прицельные приспособления пистолета и мишень. В то же время опытные стрелки (мастера спорта) демонстрируют выраженный альфа-ритм во время прицеливания. Данные различия можно объяснить тем, что у стрелков высокой квалификации внимание в процессе прицеливания распределяется в основном между удержанием оружия и нажатием на спуск, в то время как у испытуемых контрольной группы внимание распределено в основном между прицельным приспособлением пистолета и мишенью, что нерационально и приводит к ошибкам в стрельбе [2, 3].

Предлагается использовать аналогичный подход при аттестации (сертификации) поверителей. Исследуя распределение внимания поверителя, возможно оценить ошибки наведения, сформулировать рекомендации по процедуре наведения, а также (при необходимости) произвести обучение-тренировку.

Вторая группа параметров БОС — характеристики саккастических движений глаз (траектория, скорость). Зная скорость и траекторию движения глаза, возможно решить задачу оптимального „местоположения“ глаза при снятии отсчета. Также можно решить задачу нахождения оптимальной траектории совмещения и наведения на цель. Определение указанных характеристик позволяет учесть влияние зрительного аппарата человека на процесс измерения.

Данный подход позволяет произвести комплексное объективное исследование процесса наведения и снятия отсчета при работе поверителя геодезических средств измерений. Имея описанный выше информационно-измерительный комплекс с БОС, возможно объективно

оценить психофизиологические способности кандидата в поверители (поверителя). Это, в свою очередь, позволяет повысить качество профессионального отбора поверителей и как следствие — качество поверки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Напалков Д. А., Коликов М. Б., Ратманова П. О., Рамендик Д. М., Евина Е. И., Брынских А. М., Латанов А. В., Шиян В. В., Шульговский В. В. Подходы к диагностике оптимального психофизиологического состояния стрелка // Медико-биологические технологии повышения работоспособности в условиях напряженных физических нагрузок. Вып. 2. М.: ООО „Анита Пресс“, 2006. С. 108—123.
2. Блеер А. Н., Коликов М. Б., Напалков Д. А., Рамендик Д. М., Шиян В. В. Методы оптимизации психофизиологического состояния стрелка при формировании двигательных навыков стрельбы из короткоствольного оружия. М.: Макс Пресс, 2006. 100 с.
3. Напалков Д. А., Ратманова П. О., Коликов М. Б. Аппаратные методы диагностики и коррекции функционального состояния стрелка. М.: Макс Пресс, 2009. 212 с.

Сведения об авторах

- Евгений Александрович Воронцов** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии;
E-mail: voroncov_evgenii@mail.ru
- Никита Сергеевич Виноградов** — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии; ассистент;
E-mail: vifmo@rambler.ru

Рекомендована кафедрой
измерительных технологий
и компьютерной томографии

Поступила в редакцию
01.03.11 г.

УДК 681.786.23, 681.783.24

Н. С. ВИНОГРАДОВ, Е. А. ВОРОНЦОВ

ОПТОВОЛОКОННЫЙ БАЗИС ДЛЯ ПОВЕРКИ ДАЛЬНОМЕРНОГО БЛОКА ТАХЕОМЕТРА

Приводится описание конструкции геодезического базиса. В качестве базисных линий для поверки дальномерного блока тахеометра применяется оптическое волокно.

Ключевые слова: тахеометр, поверка, лазерный дальномер, оптическое волокно, базис.

Тахеометр — прибор, позволяющий осуществлять тахеометрическую съемку для дальнейшего построения плана рельефа местности [1]. Как и многое другое геодезическое оборудование, в последние годы он активно совершенствовался, в результате тахеометр стал универсальным геодезическим инструментом, совмещающим в себе функции дальнометра и теодолита.

С помощью тахеометров проводится:

- определение высоты недоступного для непосредственных измерений объекта и расстояния от наблюдателя до точки на местности;
- выполнение измерений относительно базовых линий;

- выполнение обратной засечки;
- определение координат той или иной точки и др.

Тахеометр оснащен дальномерным блоком, использование безотражательного дальномера позволяет проводить измерения труднодоступных целей без участия оператора.

С помощью прибора определяется время, за которое лазерный луч от геодезического инструмента доходит до отражателя и поступает обратно (рис. 1).

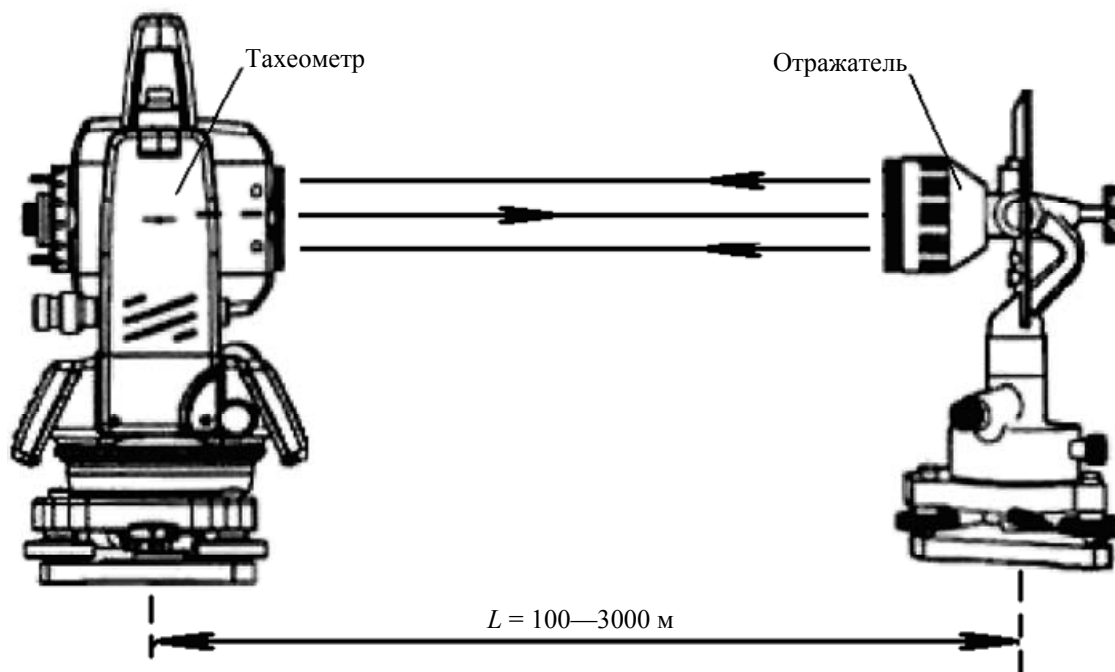


Рис. 1

Электромагнитное излучение распространяется в среде с постоянной скоростью, что позволяет определять расстояние до объекта [2]. Так, при импульсном методе дальнометрирования используется следующее соотношение:

$$L = \frac{ct}{2},$$

где L — расстояние до объекта; c — скорость распространения излучения; t — время прохождения импульса до цели и обратно.

Из этого соотношения следует, что потенциальная точность измерения дальности определяется точностью измерения времени прохождения импульса энергии до объекта и обратно. Задача определения расстояния между дальномером и целью сводится к измерению соответствующего интервала времени между зондирующим сигналом и сигналом, отраженным от цели. Различают три метода измерения расстояния в зависимости от того, какой характер модуляции лазерного излучения используется в дальномере: импульсный, фазовый или фазоимпульсный.

Сущность импульсного метода дальнометрирования состоит в том, что к объекту посылают зондирующий импульс, он же запускает временной счетчик в дальномере. Когда отраженный объектом импульс поступает на фотоприемник дальномерного блока, он останавливает работу счетчика. По временному интервалу (задержке отраженного импульса) определяется расстояние до объекта.

При фазовом методе дальнометрирования лазерное излучение формируется по синусоидальному закону с помощью модулятора. Обычно используют синусоидальный сигнал с частотой 10—150 МГц (измерительная частота). Отраженное излучение попадает в приемную

оптику и фотоприемник, в которых выделяется модулирующий сигнал. В зависимости от расстояния до объекта изменяется фаза отраженного сигнала относительно фазы сигнала в модуляторе. Измерив разность фаз, можно рассчитать расстояние до объекта. Технические особенности прибора определяют возможную дальность измерений. Так, приборы с отражательным дальномером при одном установленном призмическом отражателе могут измерять расстояния до 5 км. Безотражательные дальномеры работают в диапазоне до 1,5 км. Кроме того, на данную характеристику геодезического прибора влияет воздействие внешних факторов окружающей среды: влажность, температура, давление и пр.

Тахеометр является средством измерения (СИ), которое, как и любое другое СИ, зарегистрированное в Государственном реестре средств измерений, подвергается метрологическому контролю. Поверке подвергается как угломерная, так и дальномерная часть тахеометра. В настоящее время для поверки дальномерного блока тахеометра используется *базис эталонный* [3]. Согласно ОСТ 68-15-2001, *базис эталонный* — геодезический стенд для поверки дальномеров, содержащий одну линию или систему линий, конечные и промежуточные точки которых закреплены геодезическими центрами, а их длина известна с заданной точностью. Набор длин линий для поверки дальномерного блока тахеометра может быть следующим: 100, 500, 800, 1500 и 3000 метров.

Подобными эталонными базисами оснащены так называемые геодезические полигоны, представляющие собой открытые участки местности, предназначенные для метрологической аттестации геодезического оборудования [4]. Полигоны могут достигать в поперечнике нескольких километров. Открытая местность и удаленность полигонов зачастую негативно влияют на время выполнения поверки. Денежные затраты метрологической службой на аренду земли для полигона увеличивают стоимость работ по поверке геодезического оборудования. Удаление полигона от города усложняет доставку оборудования на место проведения метрологических испытаний.

При проведении поверки дальномерного блока тахеометра следует учитывать метеорологические условия. Дождь, снег, туман, яркое солнце, смог негативно сказываются на видимости, соответственно мощности отразившегося сигнала лазерного пучка может быть недостаточно для его регистрации. Негативный фактор при работе — широкий диапазон температур (от -30 до $+30$ °С), при котором проводится поверка прибора. Дальномерный блок тахеометра, в соответствии с методикой поверки, поверяется при температуре 20 ± 5 °С и влажности не более 80 %. Немаловажным моментом при подобных работах являются комфортные условия, в которых находится поверитель.

По этим причинам компания ЗАО „Геодезические приборы“ (Санкт-Петербург) совместно с ЗАО „Геостройизыскания“ (Москва) приступила к разработке базиса для поверки дальномерного блока тахеометра. В 2010 г. компания разработала и внедрила в несколько центров стандартизации и метрологии универсальный автоматизированный коллиматорный стенд (VEGA УКС), предназначенный для проведения поверок геодезических и маркшейдерских средств измерений. Стенд может контролировать все метрологические параметры тахеометра, кроме одного, но крайне важного, — погрешности измерения расстояний лазерным дальномером.

Цель настоящей работы заключается в упрощении процесса поверки тахеометра: уменьшении себестоимости поверочных работ, объединении базисов для поверки угломерной и дальномерной частей в единый измерительный комплекс, сведении к минимуму влияния внешних факторов (перепадов температур, влажности, освещенности и др.) на весь процесс поверки.

Необходимо оснастить стенд VEGA УКС блоком поверки дальномерной части тахеометра. Для этих целей нами в качестве базисных линий решено было выбрать оптическое волокно (рис. 2), которое обладает способностью практически без потерь передавать световой

сигнал на большие расстояния. Была предложена следующая конструкция базиса (см. рис. 2). Базис состоит из насадки на одну из коллимационных труб стенда VEGA УКС (рис. 3) и набора базисных линий.

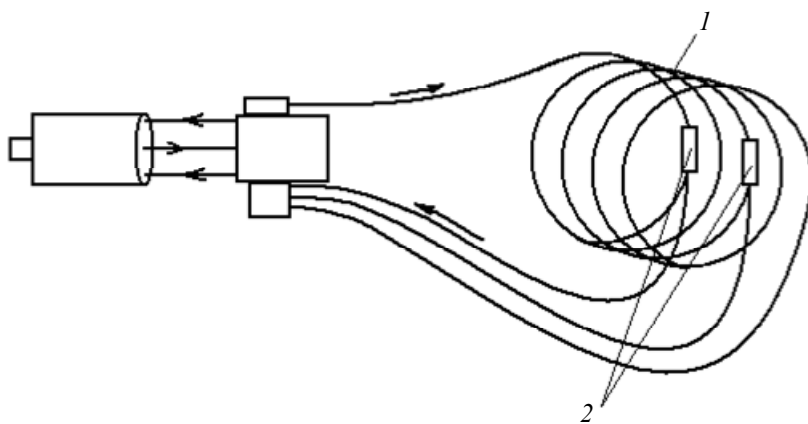


Рис. 2

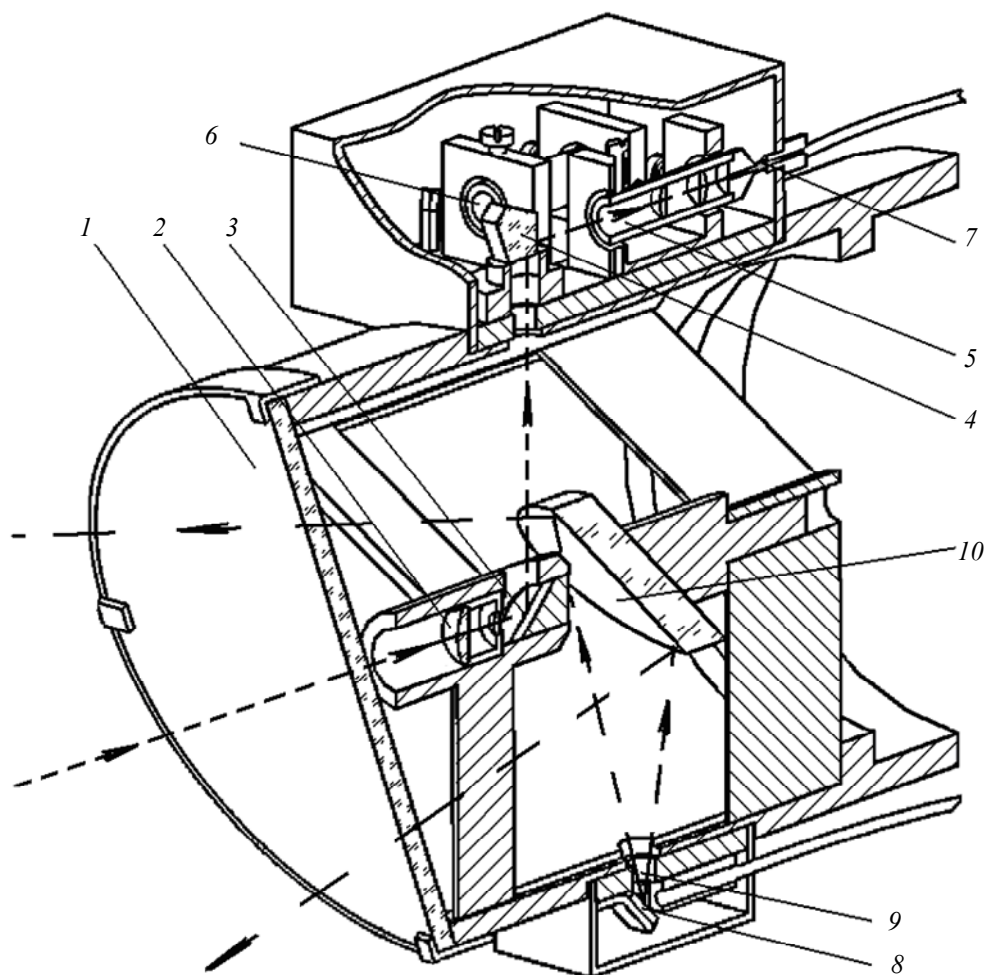


Рис. 3

Принцип работы устройства заключается в следующем. Лазерный луч дальномерного блока тахеометра проходит через прозрачную плоскопараллельную пластину 1, расположенную под определенным углом к оптической оси прибора. Далее лазерный луч, проходя через коллимационную трубку 2, уменьшается в диаметре в 3—4 раза, отражается от призмы 3 и попадает на зеркало 4. Зеркало 4 устанавливается в одно из трех фиксированных положений.

Отразившись, лазерный луч попадает в трубу фокусировки луча (рис. 2, 5, 6). Пройдя через трубку, луч фокусируется в точку, в этой же точке располагается торец оптического волокна 7. Пройдя через одну из трех базисных линий, луч возвращается в насадку. Лазерный пучок расфокусируется линзой 8 и, отразившись зеркалами 9, 10, возвращается в объектив прибора.

При работе устройство учитывает влияние температуры окружающей среды. Под воздействием колебаний температуры в помещении метрологической лаборатории оптическое волокно изменяет свою длину, что приводит к изменению пути, проходимого световым сигналом. Для обеспечения стабильной температуры оптического волокна необходимо использовать воздушный термостат с погрешностью поддержания температуры $\pm 0,1$ °С. Материал оптического волокна был выбран с наименьшим коэффициентом линейного расширения: кварц $5,5 \cdot 10^{-7}$ м·К⁻¹ [5].

На сегодняшний день одной из важнейших характеристик лабораторного оборудования являются его габаритные размеры. Использование оптических делителей 2 (см. рис. 2), предназначенных для разделения сигнала на два потока, позволит значительно уменьшить суммарную длину базисных линий, что приведет к уменьшению габаритов базиса.

В данной работе описан принцип и представлена конструкция устройства для поверки лазерных дальномеров. Следует отметить, что оптическое волокно для решения задачи поверки лазерных дальномеров применено впервые. Аналогов данного устройства не существует. Таким образом, применение оптического волокна для поверки лазерных дальномеров позволит усовершенствовать разработанный ранее стенд VEGA УКС и решить задачу поверки электронных тахеометров в полном объеме. VEGA УКС позволит поверять угломерный и дальномерный блоки и определять все необходимые (согласно методике поверки) метрологические характеристики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карсунская М. М. Геодезические приборы. М.: Институт оценки природных ресурсов, 2002.
2. Генике А. А., Афанасьев А. М. Геодезические свето- и радиодальномеры. М.: Недра, 1988.
3. ОСТ 68-15-2001. Измерения геодезические. Термины и определения.
4. Инструкция по проведению технологической поверки геодезических приборов. М.: ЦНИИГАиК, 1999.
5. Любина Дж. Справочник по композиционным материалам. Кн. 1. М.: Машиностроение, 1988.

Сведения об авторах

- Никита Сергеевич Виноградов** — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии; ассистент;
E-mail: vifmo@rambler.ru
- Евгений Александрович Воронцов** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии;
E-mail: voroncov_evgenii@mail.ru

Рекомендована кафедрой
измерительных технологий
и компьютерной томографии

Поступила в редакцию
01.03.11 г.

ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

УДК 004.932:621.397.3:517.983.5

К. А. КИРЬЯНОВ, В. С. СИЗИКОВ

ПРИМЕНЕНИЕ СИГНАЛЬНЫХ МИКРОПРОЦЕССОРОВ В ЗАДАЧАХ РЕКОНСТРУКЦИИ ИСКАЖЕННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Исследуются особенности инструментальной реализации алгоритмов реконструкции искаженных (смазанных, дефокусированных или/и зашумленных) изображений. Рассмотрены прямая задача — моделирование искажения или получение реального искаженного изображения и более сложная и важная для практики обратная задача — реконструкция (восстановление) изображения.

Ключевые слова: искажение изображения, прямая и обратная задачи, сигнальные микропроцессоры, программируемая логическая интегральная схема.

Описание реализуемых алгоритмов. Известная задача реконструкции (восстановления, реставрации) искаженных (смазанных, дефокусированных или/и зашумленных) изображений ([1—7] и др.) может быть практически решена не только на универсальных ЭВМ (или персональных компьютерах), но и на спецпроцессорах ([8—11] и др.). Использование спецпроцессоров ведет, во-первых, к уменьшению габаритов обрабатываемых устройств, а во-вторых, позволяет превратить недостаточно совершенный прибор наблюдения (фотоаппарат, телескоп, микроскоп и т.д.) в более совершенный путем подключения к нему спецпроцессора с заложенным в него алгоритмом обработки.

В работе рассматривается задача инструментальной реализации алгоритмов реконструкции искаженных изображений с помощью сигнальных микропроцессоров и программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) [8—11].

Однако прежде чем вести речь о технической реализации алгоритмов, необходимо сказать несколько слов о самих алгоритмах. Основные соотношения и уравнения, описывающие эти задачи в непрерывном виде, следующие [2—7]:

$$\int_{-\infty}^{\infty} h(x - \xi) w_y(\xi) d\xi = g_y(x) + \delta g, \quad (1)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x - \xi, y - \eta) w(\xi, \eta) d\xi d\eta = g(x, y) + \delta g, \quad (2)$$

где h — функция рассеяния точки (ФРТ), в большинстве случаев пространственно-инвариантная (или разностная), w и g — распределение интенсивности по неискаженному и искаженному изображению соответственно, δg — помеха. В соотношении (1) ось x направлена вдоль смаза, а y играет роль параметра.

Интегральное уравнение (ИУ) (1), точнее набор одномерных интегральных уравнений, обычно используется в задаче смазывания, а (2) — в задаче дефокусировки изображения [4, 6, 7]. Для решения интегральных уравнений (1) и (2) наиболее подходит метод регуляризации Ти-

хонова [2—7, 12]. Так как для инструментальной реализации интерес представляют численные методы, в настоящей работе им и уделено внимание. При численной реализации метода регуляризации Тихонова для решения обратной задачи обычно используются метод преобразования Фурье (ПФ) и метод квадратур [2, 3, 5—7]. Используются также методы итераций, например, метод итеративной регуляризации Фридмана [2, 7, 12].

Метод квадратур эффективен при решении набора одномерных ИУ (1) [6, 12, 13], каждое из которых можно записать в операторной форме:

$$Aw = g + \delta g, \tag{3}$$

где A — интегральный оператор. Для нахождения функции w необходимо построить такой оператор A^{-1} , который давал бы устойчивое приближение к w . Непрерывным уравнениям (1) можно поставить в соответствие дискретные выражения типа (3). Тогда (3) преобразуется в систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), где A — матрица, связанная с ФРТ. Однако задача решения уравнений (1)—(3) является некорректной [2, 3, 5—7, 12].

В методе регуляризации Тихонова вместо (3) решается уравнение

$$(\alpha E + A^T A)w_\alpha = A^T g, \tag{4}$$

где $\alpha > 0$ — параметр регуляризации, E — единичный оператор (единичная матрица). Матрица $\alpha E + A^T A$ является квадратной, симметричной и положительно-определенной, СЛАУ (4) имеет решение и численно устойчива [2, 3, 12, 14]. В результате получаем решение в виде:

$$w_\alpha = (\alpha E + A^T A)^{-1} A^T g. \tag{5}$$

Способы выбора α изложены, например, в [2, 3, 5—7, 12].

Метод регуляризации Тихонова с использованием преобразования Фурье применим для решения уравнений типа свертки. Рассмотрим частный случай ИУ Фредгольма I рода — уравнение типа свертки одномерное (1) и двумерное (2). Если ИУ вида (1) при его численном решении методом квадратур требует размещения в компьютерной памяти матрицы СЛАУ, то для решения одномерного уравнения типа свертки возможно применять метод ПФ, оперирующий лишь с векторами, и это требует меньшего объема памяти и времени решения. Особенно важен вопрос о памяти и времени при аппаратной реализации метода, в еще большей степени — для двумерного уравнения (2).

Задача смазывания сводится к решению одномерного ИУ Фредгольма I рода типа свертки (1) относительно $w_y(\xi)$ при каждом фиксированном значении y , играющем роль параметра. В уравнении (1) ФРТ выражается формулой [2, 3, 6]:

$$h(x) = \begin{cases} 1/\Delta, & -\Delta \leq x \leq 0, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \tag{6}$$

Решение уравнения (1) методом ПФ с регуляризацией Тихонова имеет вид [2, 3, 5—7, 12]:

$$w_{\alpha,y}(\xi) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} W_{\alpha,y}(\omega) e^{-i\omega\xi} d\omega, \tag{7}$$

где

$$W_{\alpha,y}(\omega) = \frac{H(-\omega)G_y(\omega)}{|H(\omega)|^2 + \alpha\omega^{2p}}, \tag{8}$$

$$H(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(x)e^{i\omega x} dx, \quad G_y(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} g_y(x)e^{i\omega x} dx, \tag{9}$$

где $p \geq 0$ — порядок регуляризации.

Особенности технической реализации изложенных алгоритмов. Решать задачи, описываемые уравнениями (1) и (2), на универсальных ЭВМ или ПК возможно в рамках системы MatLab. Однако такой способ не всегда оптимален по затрачиваемому на решение времени.

Существуют ситуации, когда на выполнение задачи отводится очень мало времени и нужно выполнить обработку изображения в режиме реального времени. Такие ситуации возникают, когда, например, необходимо распознать самолет, нарушитель территориальных границ, и восстановить опознавательные знаки на нем. При этом самолет может лететь настолько быстро, что получаемое изображение смазывается. У оператора очень мало времени, чтобы распознать характеристики самолета и принять решение. Задача намного усложняется, если помимо смазывания изображения самолет находится не в фокусе, а поскольку процесс быстротекущий, то устройства автофокусировки отработать не успевают ни на одном из полученных кадров.

Очевидно, что для решения таких задач требуемая производительность должна быть выше, чем у современных ПЭВМ. Одним из важнейших требований к техническим средствам является обеспечение режима обработки сигналов в реальном времени (со скоростью их поступления) при приемлемых стоимостных и массогабаритных характеристиках системы. Так, некоторые технические задачи цифровой обработки изображений требуют быстродействия аппаратных средств порядка 10^9 — 10^{10} операций в секунду для обеспечения обработки в реальном времени.

Другой особенностью подобных задач является необходимость обработки больших объемов (от 1 МБ и более) сложноструктурированных многомерных данных, что вносит дополнительные трудности в организацию вычислений и требования к правильному распределению памяти в ходе решения задачи.

Особенности при реализации на цифровом сигнальном процессоре. Как уже сказано, существуют два метода решения интегрального уравнения (1), описывающего задачу смазывания:

- 1) общий случай — решение методом квадратур с регуляризацией Тихонова;
- 2) частный случай, характерный для уравнений типа свертки — метод ПФ с регуляризацией Тихонова.

Несколько слов о первом методе. Для восстановления изображения нужно знать искажающее воздействие (ФРТ) $h(x, \xi)$ в общем случае, когда ФРТ не является пространственно-инвариантной (разностной), или $h(x - \xi)$ в случае, когда ФРТ является пространственно-инвариантной. При замене в уравнении (1) интеграла конечной суммой получаем СЛАУ (3), где по ФРТ можно найти матрицу A как матричный оператор искажающего воздействия, согласно соотношению

$$h(x, \xi) \rightarrow A = \begin{bmatrix} h(c, a) & h(c, a + h_\xi) & \dots & h(c, b) \\ h(c + h_x, a) & h(c + h_x, a + h_\xi) & \dots & h(c + h_x, b) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h(d, a) & h(d, a + h_\xi) & \dots & h(d, b) \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где h_x и h_ξ — шаги дискретизации по x и по ξ соответственно. Затем эта матрица транспонируется и вычисляется матрица $\alpha E + A^T A$, из которой с помощью метода Гаусса—Жордана [13, 14] получаем обратную, которая хранится в памяти устройства до завершения восстановления изображения, после чего находится решение, согласно (5). Также решение уравнения (4) можно получить с помощью метода LU-разложения или методом квадратных корней Краута—Холецкого [12].

Для решения по методу ПФ с регуляризацией Тихонова, как и в предыдущем случае, требуется знать искажающее воздействие и, как уже говорилось, этот метод может быть применен только для пространственно-инвариантной ФРТ. Важно правильно и грамотно распределять память сигнальных микропроцессоров. Для этих целей обычно применяется алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ) [10, 15, 16]. При использовании БПФ не только сокращается время выполнения всей процедуры (за счет исключения повторяющихся операций), но и происходит экономия памяти.

Для вычисления обычного дискретного ПФ нужны 4 массива: два для действительной и мнимой частей исходного процесса (оригинала изображения) и два — для вычисленного фурье-образа (фурье-спектра изображения). При использовании БПФ можно обойтись двумя массивами, потому что процесс вычисления БПФ итерационный. Число отсчетов N должно быть целой степенью числа 2, тогда количество итераций будет равно $\log_2 N$, а выполнение самой процедуры возможно с использованием той же области памяти, в которой находились исходные данные. Таким образом, для решения по этому методу с использованием алгоритма БПФ вычисляется фурье-спектр исходного процесса (каждой строки изображения), затем ФРТ, которая в большинстве случаев короче самого изображения и которую нужно дополнить до N нулями, после чего поточечно вычисляется соотношение (8), называемое регуляризованным спектром. И, наконец, от полученного массива, длина которого тоже является целой степенью числа 2, вычисляется обратное ПФ, при котором также используется алгоритм БПФ.

При восстановлении дефокусированных изображений, описываемых уравнением (2), нельзя применить метод квадратур (кубатур) из-за необходимости обращения трехмерной матрицы, что практически невозможно из-за требуемого чрезвычайно большого объема памяти для решения такой задачи. Если нет aberrаций линзы и объектив не является широкоугольным, то можно считать ФРТ пространственно-инвариантной. Таким образом, задача описывается двумерным уравнением типа свертки (2), которое можно решать с помощью ПФ. Здесь решение находится также с применением алгоритма двумерного БПФ и данную задачу иначе решить крайне сложно, так как используются двумерные массивы, а у специализированных процессоров довольно мал объем оперативной памяти, в который нужно уложиться.

При решении ИУ методом ПФ для уменьшения эффекта Гиббса можно использовать размытие краев [6, 7] (рис. 1). Для случая, когда ФРТ не является пространственно-инвариантной, решение ИУ (2) можно осуществить итерационными методами, такими как метод итеративной регуляризации Фридмана, метод Ландвебера и др. [2, 12].

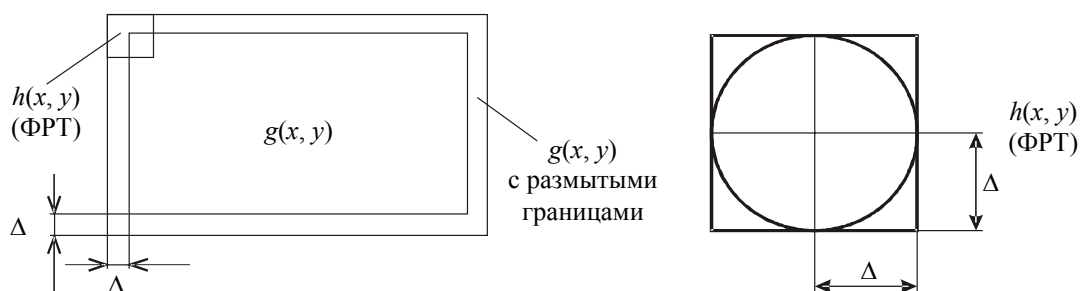


Рис. 1

Из всей номенклатуры предложенной элементной базы фирмы Texas Instruments (TI) [16] наиболее подходящими для решения перечисленных задач являются микропроцессоры семейства TMS320C64++, устройства с фиксированной запятой, разработанные специально для математической обработки изображений. Из их числа самыми подходящими являются процессоры C6455 и C6457. Структурная схема такого устройства отображена на рис. 2.

Ядро процессора состоит из восьми вычислительных узлов, двух файлов регистров общего назначения, двух шин данных. Каждый из файлов регистров (А и В) содержит по тридцать два 32-разрядных регистра. Действия можно выполнять с 8-, 16-, 32-, 40- и

64-разрядными данными. При разрядности данных более 32 бит они сохраняются в парах регистров. Восемь функциональных вычислительных узлов (M1, L1, D1, S1, M2, L2, D2, и S2) способны выполнять по одной инструкции за каждый машинный такт (M — умножители, S и L выполняют арифметико-логические и сдвиговые операции, D обеспечивают обмен данными между памятью и регистровым файлом). При операции комплексного умножения используются четыре 16-разрядных операнда (по два действительных и два мнимых), получаемый результат — 32 бита действительная часть и такая же мнимая. Также возможно выполнять комплексные умножения с округлением, в результате чего 32-разрядный результат содержит действительную и мнимую части, на каждую из которых отводится по 16 разрядов (см. рис. 2). В некоторых случаях это весьма удобно для вычисления ПФ.

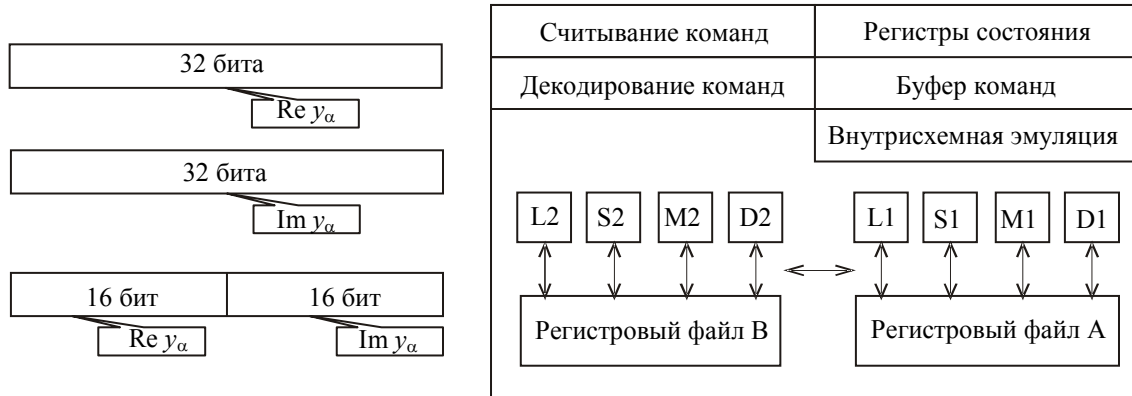


Рис. 2

Реализация всех алгоритмов для процессоров ПИ выполняется на языке C++ в специальной среде Code Composer v.4.0, поставляемой с отладочным модулем. Несколько реже применяются микропроцессоры другой фирмы, Analog Devices [17], для работы с которыми производителем поставляется программная среда VisualDSP++, программы выполняются тоже на C++. При этом программы, разработанные в среде MatLab, требуют выполнения двойной компиляции, что не является оптимальным по быстродействию и распределению памяти.

Особенности реализации метода на основе ПЛИС. Производительность даже специализированного процессора всегда меньше, чем производительность специализированного аппаратного блока, например, реализованного на основе программируемой логической интегральной схемы. Подход состоит в том, что для того или иного вида обработки изображений на базе ПЛИС реализуется конечный автомат, способный выполнять только одну функцию. При этом достигается максимально возможная производительность, которая определяется используемой разработчиком и производителем ПЛИС технологией изготовления (ALTERA, XILINX), но гибкость решения присутствует лишь в той мере, в которой ее предусмотрел разработчик.

Для реконструкции изображений при решении задачи методом квадратур необходимо правильно сформировать матрицу A , произвести ее транспонирование A^T , получить уравнение Тихонова (4), перемножив при этом транспонированную матрицу на исходную и на правую часть уравнения g , и решить уравнение Тихонова, которое может быть решено методом Гаусса—Жордана; схема такого устройства предложена в работе [8]. Сложность состоит только в том, что размерность матрицы нельзя сделать выше определенной величины, которая закладывается при разработке. Структурная схема такого устройства приведена на рис. 3 (здесь K — коммутатор).

Точно так же можно получить решение и для метода регуляризации Тихонова с ПФ для данной задачи — с помощью многоканальной систолической матрицы, систолического процессора БПФ, особенности реализации которых описаны в работе [8]. Производители FPGA

XILINX поставляют готовые программные конфигурации ПЛИС с реализацией различных видов ПФ. Структурная схема таких устройств для решения задачи (1) приведена на рис. 4 (здесь ОБФП — обратное быстрое преобразование Фурье).

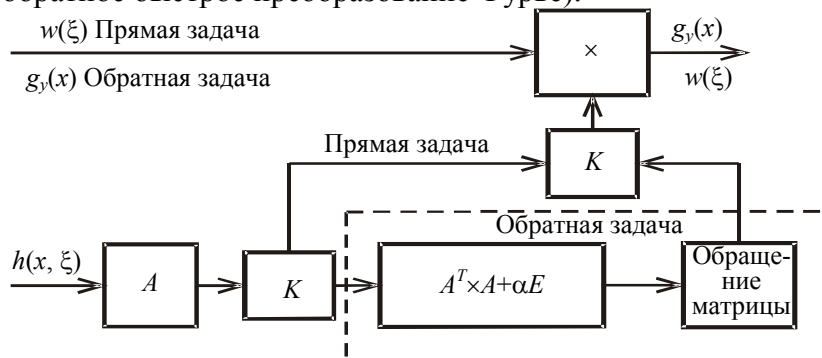


Рис. 3

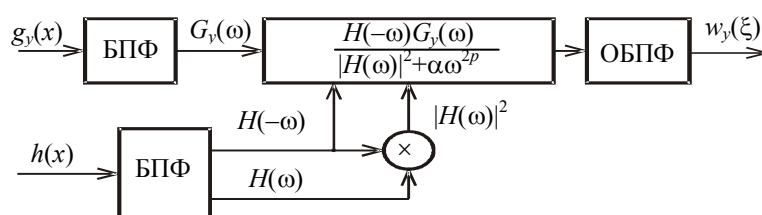


Рис. 4

На практике подход к разработке перечисленных устройств выбирается в зависимости от сложности алгоритма обработки и требований по временным параметрам. Довольно часто выбирают комбинированный подход, при котором используются как ПЛИС с реализованными функциями, требующими наибольшего быстродействия и не требующими большой гибкости, так и цифровой сигнальный процессор для реализации той части, где он будет справляться с алгоритмом по быстродействию, но где нужен более гибкий подход к решению.

Выводы. В работе используются в виде инструментальной реализации следующие приемы обработки изображений: „усечение“, „размытие краев“ и „поворот“ при использовании известных методов решения интегральных уравнений — преобразования Фурье или квадратур с регуляризацией Тихонова [6, 7]. Прием усечения используется для того, чтобы избежать так называемых „граничных условий“ [4]. Прием размытия краев используется для уменьшения эффекта Гиббса (эффекта ложных волн на изображении). Прием поворот используется для решения задачи смазывания при произвольном угле.

Указанные методы восстановления изображений могут применяться в таких областях, как томография (возникновение смазывания из-за случайных движений пациента во время обследования), восстановление старых фотографий, обнаружение самолетов-нарушителей территориальных границ и т.п. При этом необходима реализация методик на современной элементной базе, специализированной для обработки сигналов и адаптированной для быстрых алгоритмов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 09-08-00034а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бейтс Р., Мак-Доннелл М. Восстановление и реконструкция изображений. М.: Мир, 1989. 336 с.
2. Бакушинский А. Б., Гончарский А. В. Некорректные задачи. Численные методы и приложения. М.: Изд-во МГУ, 1989. 199 с.
3. Сизиков В. С. Математические методы обработки результатов измерений. СПб: Политехника, 2001. 240 с.
4. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2006. 1072 с.

5. Воскобойников Ю. Е. Комбинированный нелинейный алгоритм восстановления контрастных изображений при неточно заданной аппаратной функции // *Автометрия*. 2007. Т. 43, № 6. С. 3—18.
6. Сизиков В. С., Римских М. В., Мирджамолов Р. К. Реконструкция смазанных и зашумленных изображений без использования граничных условий // *Оптич. журн.* 2009. Т. 76, № 5. С. 38—46.
7. Сизиков В. С. Прием „усечение—размытие—поворот“ в восстановлении искаженных изображений // *Оптич. журн.* 2011. Т. 78, № 5. С. 18—26.
8. Кухарев Г. А., Тропченко А. Ю., Шмерко В. П. Системные процессоры для обработки сигналов. Минск: Беларусь, 1988. 127 с.
9. Кухарев Г. А., Тропченко А. Ю. Системный процессор для обращения матриц // *Изв. вузов. Приборостроение*. 1990. Т. 33, № 11. С. 23—27.
10. Тропченко А. Ю. Аппаратные средства для цифровой обработки сигналов. СПб: Изд-во СПбГУ ИТМО, 2005. 138 с.
11. Кирьянов К. А. Инструментальная реализация алгоритмов реконструкции искаженных изображений // Тр. 20-й Междунар. конф. „GraphiCon—2010“. СПб: Изд-во СПбГУ ИТМО, 2010. С. 188—191.
12. Верлань А. Ф., Сизиков В. С. Интегральные уравнения: методы, алгоритмы, программы. Киев: Наук. думка, 1986. 544 с.
13. Поршнев С. В. Вычислительная математика. Курс лекций. СПб: БХВ-Петербург, 2004. 304 с.
14. Киреев В. И., Пантелеев А. В. Численные методы в примерах и задачах. М.: Высш. школа, 2006. 480 с.
15. Рабинер Л., Гоулд В. Теория и применение цифровой обработки сигналов. М.: Мир, 1978. 848 с.
16. *Texas Instruments*. Digital Signal Processors & ARM Microprocessors [Electronic resource]: <www.ti.com/dsp>.
17. *Analog Devices*. Embedded processing and DSP [Electronic resource]: <<http://www.analog.com/dsp>>.

Сведения об авторах

- Константин Александрович Кирьянов** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии;
E-mail: kiryancon@front.ru
- Валерий Сергеевич Сизиков** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии;
E-mail: sizikov2000@mail.ru

Рекомендована кафедрой
измерительных технологий
и компьютерной томографии

Поступила в редакцию
01.03.11 г.

Е. М. АНОДИНА-АНДРИЕВСКАЯ, С. В. БОЖОКИН, М. Я. МАРУСИНА
Ю. З. ПОЛОНСКИЙ, Н. Б. СУВОРОВ

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПОДХОДЫ К АНАЛИЗУ ИНФОРМАТИВНОСТИ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ И МЕДИЦИНСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЧЕЛОВЕКА ПРИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Представлены современные подходы к оценке физиологических сигналов и томографических изображений человека при напряженной интеллектуальной деятельности. Сигналы регистрировались у профессиональных шахматистов во время игры вслепую с компьютерной программой, а также во время сеансов кардиореспираторного тренинга. Приведены материалы исследования информативности вейвлет-анализа многоканальной электроэнцефалограммы шахматистов, позволившего с высоким разрешением получить ее динамические спектральные характеристики во время обдумывания хода шахматной партии. Другая модификация вейвлет-анализа успешно применена для шумоподавления и обработки томограмм головного мозга.

Ключевые слова: интеллектуальная деятельность, психофизиологические показатели, вейвлетный анализ, томографические изображения.

Анализ комплекса психофизиологических показателей и формулирование научно-практических выводов — трудоемкий, ответственный процесс при диагностике текущего и прогнозе последующего состояний человека.

В задачах комплексной оценки функционального состояния человека при минимальной физической нагрузке и значительном умственном напряжении (например, операторов в системах управления) широко применяются биотехнические системы (БТС), позволяющие регистрировать и анализировать физиологические (*динамичные*) процессы. Качественные характеристики БТС зависят, в частности, от их состава и аналитических возможностей, которые должны обеспечивать быструю и достоверную переработку больших массивов информации.

Использование разработанных методов анализа, реализуемых аппаратно-программными средствами биотехнических систем, позволяет существенно расширить возможности медицинского и психофизиологического обследования и заметно снизить вероятность ошибок при оценке состояния оператора в реальном масштабе времени.

Интеллектуальная деятельность человека является одной из специфических и наиболее сложно организованных психических функций, и поэтому чрезвычайно сложна для инструментальных исследований. Как правило, изучаются электрофизиологические корреляты смоделированной умственной нагрузки. Практически идеальной формой творческого процесса представляется игра в шахматы, когда шахматист пребывает в состоянии реального (не имеющего аналогов) интеллектуального напряжения. Авторами создана уникальная БТС, при разработке которой было решено несколько принципиальных задач [1].

В качестве испытуемых выступали молодые шахматисты Санкт-Петербурга высокой квалификации — гроссмейстеры, мастера FIDE с рейтингом Эло до 2711. „Соперником“ шахматистов была выбрана компьютерная шахматная программа Deep Fritz 11 (рейтинг Эло программы 900—3000). Высокий профессионализм участников позволил проводить шахматные партии вслепую (с закрытыми глазами), что дало возможность минимизировать помехи при регистрации электроэнцефалограммы (21 канал), электрокардиограммы (ЭКГ с предплечий),

кардиоритмограммы (КРГ). Подобную регистрацию комплекса электрофизиологических параметров обеспечивал электроэнцефалограф „Мицар — ЭЭГ–202 (24+8)“, имеющий полосу пропускания от нуля до 150 Гц и диапазон измерений до 300 мВ (разработчик и производитель ООО „Мицар“, Санкт-Петербург, сертификат соответствия № РОСС RU.ИМ17.В00017). Помимо этого фиксировались функция дыхания и голос шахматиста, объявляющего свой ход, и „транслятора“, сообщающего о ходе, сделанном шахматной программой.

Шахматные партии протоколировались программой Deep Fritz. Каждый ход партии был синхронизирован с электрофизиологической „картиной“ — позиция на доске была „наложена“ на монитор с вышеуказанными показателями, создавался комплексный файл данных. После завершения партии анализировались записи ЭЭГ (частота квантования 500 Гц): функции когерентности в графическом и топографическом отображении, авто- и кросскорреляционные функции, диаграммы пространственно-временного взаимодействия 21 структуры головного мозга, координаты максимальной плотности распределения мозговых источников токов, взаимодействие кардиоритмограмм и кривых дыхания, индивидуальные особенности творчества испытуемых. На рис. 1 приведены спектры мощности ЭЭГ мастера ФИДЕ О. до партии — расслабленное бодрствование, глаза закрыты (а), непосредственно перед 35-м ходом — принятие решения (б). На графиках по оси абсцисс — частота колебаний ЭЭГ (Гц), по оси ординат — мощность (мкВ^2); на топограммах: слева — распределение двух гармоник по поверхности мозга, справа — шкала спектральной мощности.

Различия между фоном и одним из „критических“ моментов игры очевидны. Спектральная мощность системообразующего альфа-ритма частотой 8,3 Гц на фрагментах (исходный фон) в среднем по всем отведениям в несколько раз выше, чем при обдумывании хода и принятии решения, его частота на этих фрагментах превышает 10 Гц. И то, и другое — свидетельство умственного напряжения. Спектры мощности являются статической оценкой свойств ЭЭГ, полученной на ограниченном промежутке времени, и не позволяют оценить динамику гармонических компонентов биоэлектрического процесса. Значительно больший интерес представляет сопоставление умственного напряжения человека в ходе шахматной борьбы с внутренней динамикой психофизиологических феноменов.

Нестационарность большинства биологических сигналов ограничивает возможности их математического анализа и использования для целей управления состоянием человека (оператора) и, при необходимости, его психофизиологической коррекции. Обусловлено это не только особенностями происхождения и генерации биоэлектрических сигналов, но и внутренними переходными процессами, происходящими на разных уровнях интеграции и проявляющимися для „наблюдателя“ случайным образом. Один из самых непредсказуемых нестационарных биологических процессов нелинейного генеза — медленная электрическая активность головного мозга, отражением которой является электроэнцефалограмма.

Анализ ЭЭГ во время функциональных проб (фотостимуляция, гипервентиляция, психоэмоциональные тесты) показывает, что ее нестационарность в этих режимах носит вызванный характер, поэтому наряду с традиционными методами анализа стационарных процессов (спектральный, когерентный анализ и др.) необходимо развивать новые подходы [2—4].

Для исследования нестационарной ЭЭГ испытуемого во время проведения шахматной партии нами был разработан новый математический аппарат, адекватно описывающий детали перестроен пространственно-временных структур сигнала ЭЭГ [5, 6]. Этот аппарат использует теорию вейвлетов, включает анализ интегрального вейлет-преобразования и его скелетона, локальные плотности спектра энергии сигнала, спектральные интегралы и другие параметры, позволяющие вычислять большое число количественных параметров, описывающих переходные процессы в таких сигналах.

Вейвлет-преобразование является одним из перспективных способов анализа, очистки и сжатия различных видов сигналов. В работах [7—9] рассмотрены различные виды вейвлетов и проанализированы возможности их применения для вейвлетной очистки и сжатия сигнала.

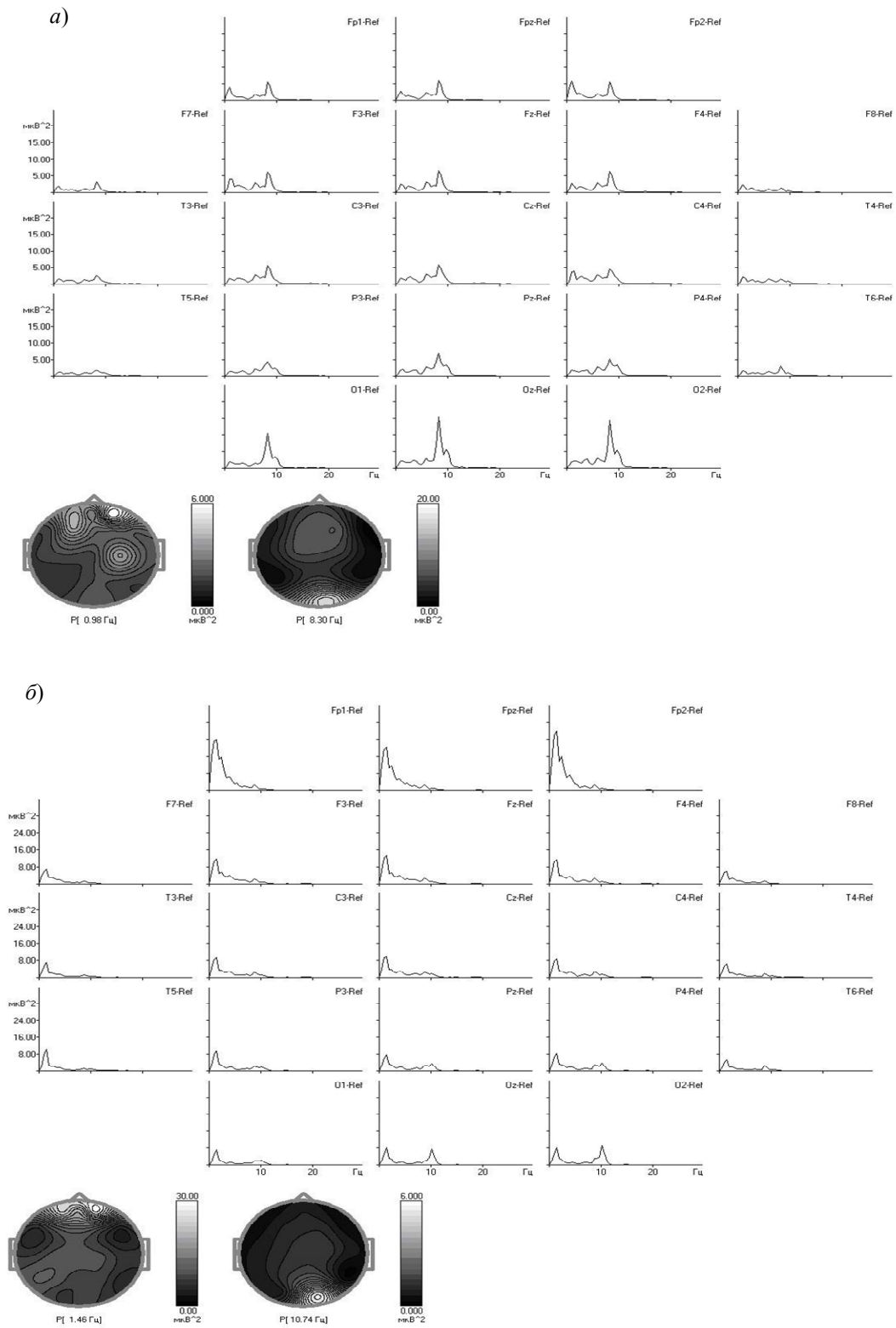


Рис. 1

Результаты очистки и сжатия были проанализированы по различным критериям с целью определения лучших (для решения данных задач) вейвлетов. В качестве этих

критериев выступают: отношение сигнал/шум между очищенным сигналом и наложенным шумом, коэффициент ковариации между очищенным и исходным сигналами, коэффициент корреляции между очищенным и исходным сигналами, уровень сжатия сигнала. В результате анализа были определены наиболее подходящие для очистки и сжатия сигнала вейвлеты (для вейвлетной очистки — это вейвлет Добеши, а для сжатия — обратный биортогональный вейвлет).

Представленные методы оценки могут быть использованы при решении задачи конструирования вейвлетных фильтров для очистки и сжатия сигнала.

Предлагаемый метод расчета корреляций различных каналов (отведений) ЭЭГ базируется на вычислении спектральных интегралов с помощью вейвлет-преобразования сигналов. Данный подход позволяет выполнить пространственно-временной анализ нарастания и угасания вспышек активности, возникающих в различных структурах коры головного мозга. Представляют интерес количественная оценка моментов резких перестроек частотных диапазонов для различных каналов ЭЭГ и их корреляционные взаимосвязи. Для расчета корреляций различных каналов нестационарной ЭЭГ во время шахматной партии рассмотрим спектральные интегралы $E_\mu(i, t)$ [5, 6], представляющие собой локальную плотность спектра энергии сигнала, проинтегрированную на интервале частот $[v_{\mu-1}, v_\mu]$, где величины v_μ ($\mu = 0, 1, 2, \dots$) характеризуют границы соответствующего частотного интервала μ , а индекс i соответствует номеру канала ЭЭГ.

С помощью спектральных интегралов $E_\mu(i, t)$ возможно осуществлять сжатие информации, хранящейся в сигнале, и анализировать динамику развития по времени t активности вспышек нестационарной ЭЭГ в данном спектральном диапазоне μ для данного канала i . Полагая v_0, v_1, \dots, v_4 равными 0,5; 4; 7,5; 14; 30 Гц и нормировав каждый спектральный интеграл на его максимальное значение, получаем значения спектральных интегралов $e_\mu(i, t)$, равные $e_\delta(i, t)$, $e_\theta(i, t)$, $e_\alpha(i, t)$, $e_\beta(i, t)$ соответственно в дельта- (δ), тета- (θ), альфа- (α) и бета-диапазонах (β) ЭЭГ, причем величина $e_\mu(i, t)$ изменяется в пределах $0 \leq e_\mu(i, t) \leq 1$.

Коэффициент корреляции Пирсона $\langle i | R_\mu | k \rangle$ между каналами i и k ЭЭГ, вычисленный в спектральном диапазоне $\mu = \delta, \theta, \alpha, \beta$, определяется следующим образом:

$$\langle i | R_\mu | k \rangle = \frac{\langle e_\mu(i, t) e_\mu(k, t) \rangle - \langle e_\mu(i, t) \rangle \langle e_\mu(k, t) \rangle}{\sqrt{(\langle e_\mu^2(i, t) \rangle - \langle e_\mu(i, t) \rangle^2)(\langle e_\mu^2(k, t) \rangle - \langle e_\mu(k, t) \rangle^2)}},$$

символы $\langle e_\mu(i, t) \rangle$ и $\langle e_\mu(i, t) e_\mu(k, t) \rangle$ означают усреднение соответствующих величин по всему промежутку времени наблюдения t .

Предлагаемые в настоящей статье коэффициенты корреляции Пирсона позволяют корректно решить задачу вычисления пространственной синхронизации переходных процессов ЭЭГ во всех спектральных диапазонах для всех каналов, а также получить принципиально новую информацию о динамике нестационарной ЭЭГ человека во время игры в шахматы с компьютерной программой.

На рис. 2 приведены нормированные на единицу спектральные интегралы, вычисленные в диапазоне альфа-ритма $e_\alpha(\text{Fr}2, t)$ (тонкая кривая) и $e_\alpha(\text{C}4, t)$ (жирная кривая) в отведениях Fr2 и C4, в зависимости от времени t в состоянии расслабленного бодрствования гроссмейстера перед началом шахматной партии (а), в конце обдумывания 17-го хода и принятия решения гроссмейстером В. (б). Рис. 2, а — коэффициент корреляции Пирсона для этих кривых $\langle \text{Fr}2 | R_\alpha | \text{C}4 \rangle = 0,173$, что указывает на слабую корреляцию сигналов ЭЭГ этих отведений в диапазоне альфа-ритма после процедуры сжатия инфор-

мации; $\bar{b} = \langle \text{Fr2} | R_\alpha | C4 \rangle = 0,905$ свидетельствует о высоком уровне синхронизации ЭЭГ этих отведений.

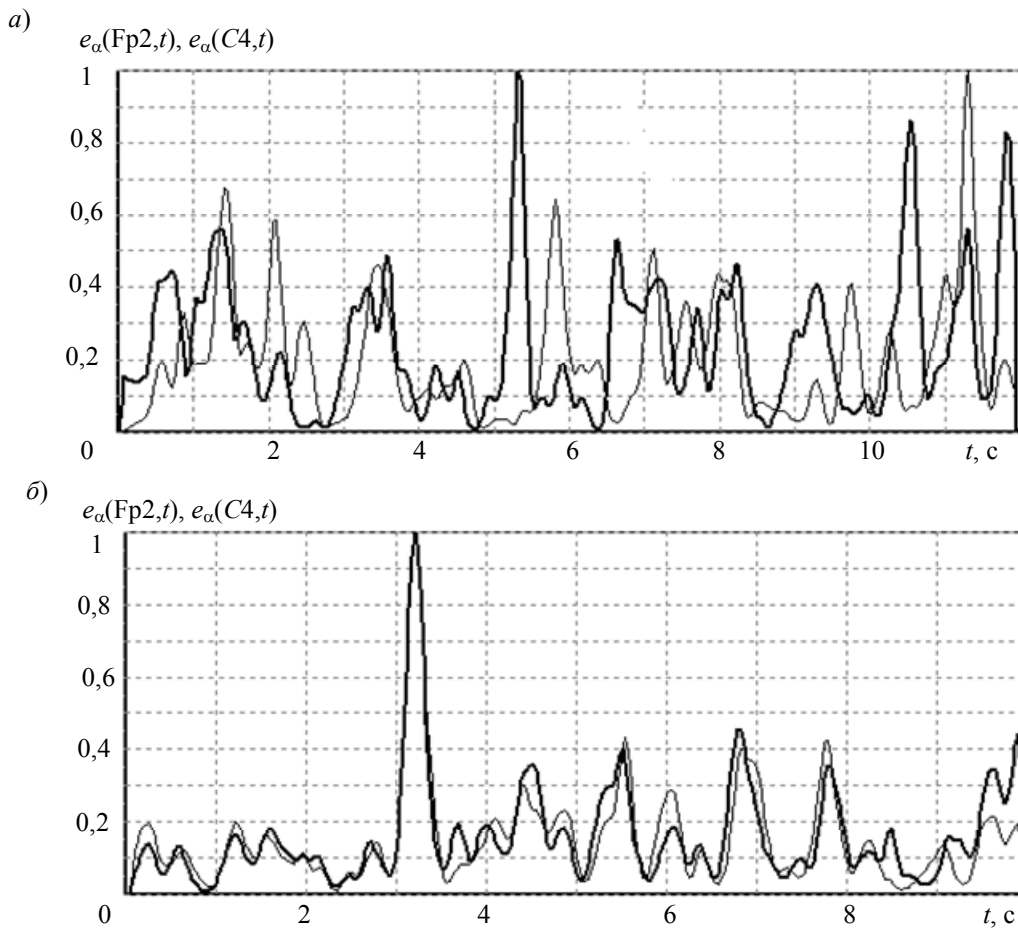


Рис. 2

Анализ рис. 2 показывает, что при переходе от состояния расслабленного бодрствования (перед началом партии) в состояние сильного умственного напряжения скоррелированность отведений Fr2 и $C4$ в диапазоне альфа-ритма сильно возрастает. Необходимо также отметить, что во время обдумывания шахматной позиции происходит активация взаимодействия лобно-центрально-височных структур коры головного мозга в диапазонах дельта-, тета- и альфа-ритмов.

Одним из перспективных направлений инструментальных исследований, в том числе интеллектуальной деятельности человека, в настоящее время является томография. Применение вейвлет-фильтров для анализа, очистки и сжатия томографических изображений является достаточно эффективным. В работах [7—10] систематизированы методы шумоподавления при обработке томографических изображений на основе вейвлетного анализа.

Для обработки томографических изображений (формат DICOM) с помощью методов вейвлетного анализа разработаны алгоритм шумоподавления и его программная реализация. Апробация методов была проведена на магнитно-резонансном томографе General Electric Signa Infinity в СПб ГУЗ „Городская Покровская больница“.

Анализ экспериментальных данных показал, что из рассмотренных в настоящей работе вейвлет-функций для решения задачи шумоподавления в томографии наиболее подходят вейвлет Мейера (dmeu) и модифицированный вейвлет Добеши. Наилучшие показатели шумоподавления достигаются при глубине разложения $N=2$. Результаты обработки данными вейвлетами при глубине разложения $N=2$ представлены на рис. 3 и 4.

Методы обработки изображений могут быть использованы для изучения работы вейвлетов при решении задачи обработки томографических изображений в технике. Результаты настоящей работы могут быть использованы также при конструировании фильтров, основанных на вейвлет-функциях.

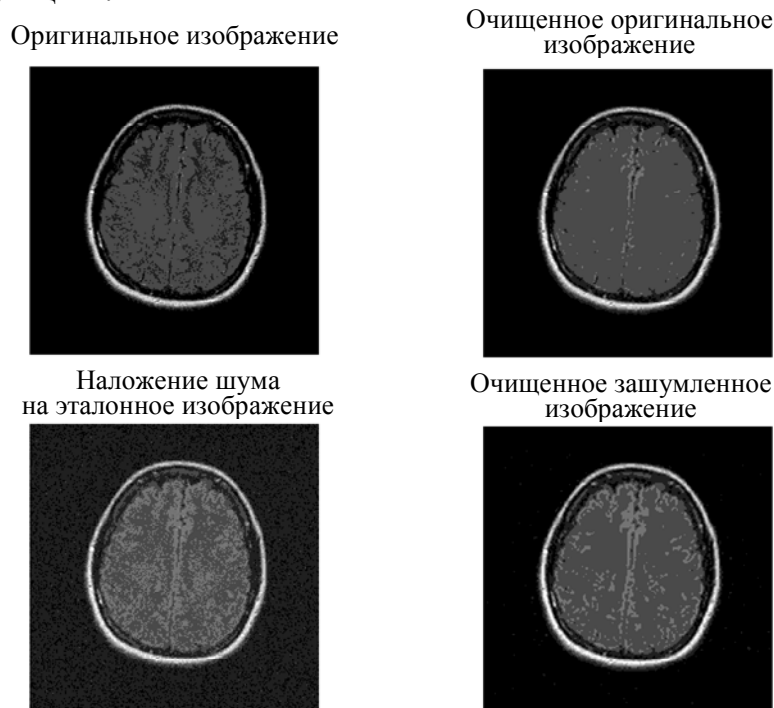


Рис. 3

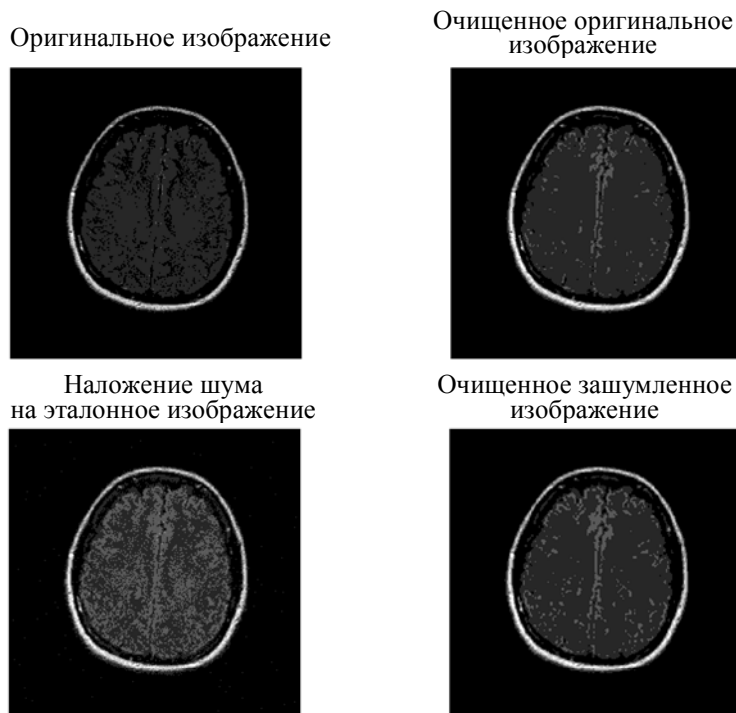


Рис. 4

В последние десятилетия активно разрабатываются и применяются методы нефармакологического воздействия на функциональное состояние человека, к которым относятся психотерапия, аутогенная тренировка, биоуправление с обратной связью (БОС). Последнее хорошо зарекомендовало себя как совокупность методов, направленных на мобилизацию

резервных возможностей организма за счет тренировки и повышения лабильности регуляторных механизмов. Основой тренировок в системах БОС являются биологические ритмы, играющие важную роль в их регулировании на молекулярном и клеточном уровнях, в функционировании механизмов памяти, в сфере энергетических и информационных процессов. В настоящее время под управлением с биологической обратной связью понимают комплекс исследовательских и лечебных процедур, в ходе которых испытуемому посредством внешней цепи обратной связи, организованной с помощью компьютерной или микропроцессорной техники, предъявляется информация о динамике тех или иных регулируемых физиологических процессов [11]. Процедуры позволяют в течение 10—15 сеансов при активном участии испытуемого (в интерактивном режиме) развить навыки саморегуляции и самоконтроля, произвести коррекцию собственного состояния.

Все обследованные шахматисты прошли курс респираторного кардиотренинга с колебательной обратной связью по кардиоритму с помощью дыхания [11, 12]. Цель — восстановление/приобретение навыка индивидуального для каждого человека стереотипа дыхания. Известно, что „гармонизация“ сердечного ритма, выражающаяся в респираторной синусовой аритмии (кардиореспираторная синхронизация в форме собственной гармоник), является благоприятным диагностическим и прогностическим признаком, одним из свидетельств вегетативного баланса. Обратная связь в ходе тренировки носит мотивационно-информационный характер и неизбежно активизирует когнитивные процессы, которые влияют на деятельность кардиореспираторной системы человека. Оценка этого влияния осуществляется широко известными методами вариационной пульсометрии. Одним из перспективных методов анализа кардиоритмограмм во временной области является скаттерограмма — зависимость последующего $RR_{(n+1)}$ интервала от предыдущего $RR_{(n)}$. Она отображается в виде точек на фазовой плоскости, последовательно во времени соединенных между собой. По форме скаттерограммы косвенно судят о вариабельности ритма сердца. По точкам, отстоящим далеко от основной группы, определяют наличие аритмий (нарушений ритма сердца) и артефактов. В диагностике нарушений сердечного ритма, при оценке функционального состояния испытуемого большое значение придается форме скаттерограммы. Количественной оценкой формы скаттерограммы может являться предложенный нами [11] фрактальный коэффициент, определяемый как

$$F = KL / 2\sqrt{\pi S},$$

где L — периметр внешнего контура скаттерограммы, S — ее площадь, K — коэффициент, величина которого зависит от средней частоты сердечных сокращений. Очевидно, что скаттерограммы могут иметь близкие формы в случае средних частот пульса и при этом их коэффициенты формы (фрактальные коэффициенты) также будут мало различаться между собой. На основании многочисленных собственных исследований авторов, подкрепленных литературными данными, были определены значения коэффициента K для различных средних частот сердечного ритма [11]. При такой оценке диагностически благоприятными с точки зрения биоритмологической структуры сердечного ритма будут низкие значения F .

Во время игры в шахматы вслепую значения F повышаются по сравнению со значением исходного состояния. При этом уровень повышения отражает степень умственного напряжения. Во время кардиореспираторного тренинга повышение F имеет временный характер и наблюдается только на начальном этапе тренировок. В дальнейшем, по мере нормализации вегетативного баланса и появления собственной гармоник, значение F снижается, поскольку внешний контур скаттерограммы приобретает овалообразную форму. Целью кардиореспираторного тренинга (не только шахматистов) является выработка умения кратковременно (в нужный момент) расслабляться за счет восстановленного или приобретенного собственного стереотипа гармоничного

дыхания. Этот навык важен как при напряженной интеллектуальной деятельности, так и при других видах нагрузок, включая стрессогенные.

Таким образом, были рассмотрены некоторые оригинальные технические решения и аналитические приемы, которые предлагается использовать для выявления информативных признаков физиологических показателей человека при интеллектуальной деятельности. Предложенные подходы являются разработкой, модификацией или адаптацией известных зарекомендовавших себя методов. Показана эффективность применения вейвлет-фильтров для повышения качества сигналов и изображений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Суворов Н. Б., Абрамов В. А., Козаченко А. В., Полонский Ю. З. Биотехническая система для исследования интеллектуальной деятельности человека // Информационно-управляющие системы. 2010. № 5. С. 70—77.
2. Чуи К. Введение в вейвлеты. М.: Мир, 2001.
3. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов. М.: Мир, 2005.
4. Божокин С. В., Лыков С. Н. Дополнительные главы теоретической физики. Вейвлеты. СПб: Изд-во СПбГПУ, 2007.
5. Божокин С. В. Вейвлет-анализ динамики усвоения и забывания ритмов фотостимуляции для нестационарной электроэнцефалограммы // ЖТФ. 2010. Т. 80, вып. 9. С.16—24.
6. Божокин С. В., Суворов Н. Б. Вейвлет-анализ переходных процессов электроэнцефалограммы при фотостимуляции // Биомедицинская радиоэлектроника. 2008. № 3. С. 21—25.
7. Анодина-Андреевская Е. М., Марусина М. Я. Использование вейвлетного преобразования сигналов при выявлении диагностических признаков элементов приборов и механизмов // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 12. С.31—33.
8. Марусина М. Я., Анодина-Андреевская Е. М. Вейвлетный анализ в обработке томографических изображений // Научное приборостроение. 2011. Т. 29, № 1. С. 120—124.
9. Марусина М. Я., Казначеева А. О. Шумоподавление в томографии с помощью вейвлет-фильтров // Изв. вузов. Приборостроение. 2006. Т. 49, № 10. С. 51—57.
10. Марусина М. Я., Казначеева А. О. Современные виды томографии: Учеб. пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. 152 с.
11. Суворов Н. Б. Информационная составляющая в биоуправлении функциональным состоянием человека // Информационно-управляющие системы. 2002. № 1. С.57—64.
12. Патент РФ № 43143. Устройство для осуществления функциональной психофизиологической коррекции состояния человека / Н. Б. Суворов. 2005. Бюл. № 1.

Сведения об авторах

- Елена Михайловна Анодина-Андреевская** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии
- Сергей Валентинович Божокин** — канд. физ.-мат. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра теоретической физики;
E-mail: bsvjob@mail.ru
- Мария Яковлевна Марусина** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии;
E-mail: marusina_m@mail.ru
- Юрий Зусьевич Полонский** — д-р биол. наук; Институт мозга человека им. Н. П. Бехтеревой РАН, лаборатория стереотаксических методов, Санкт-Петербург; ведущий научный сотрудник; E-mail: yzpol @qip.ru

Николай Борисович Суворов

— д-р биолог. наук, профессор; НИИ экспериментальной медицины РАМН, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет, кафедра биотехнических систем; E-mail: nbsuorov@yandex.ru

Рекомендована кафедрой измерительных технологий и компьютерной томографии

Поступила в редакцию 01.03.11 г.

УДК 620.178

А. А. Виноградова, С. В. Трутненко

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОГРАММ МУЛЬТИФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Дано краткое представление фрактала и мультифрактала. Рассматриваются три вида мультифрактального анализа на основе трех программ (программа, работающая под системой Linux, Fractan и Multifrac) и производится их сравнение.

Ключевые слова: анализ, фрактал, обработка сигналов, статистическая сумма, показатель Хёрста.

Введение. К фракталам относят геометрические объекты: линии, поверхности, тела, которые имеют сильно изрезанную форму и демонстрируют некоторую повторяемость в широком диапазоне масштабов. Она может быть полной (в этом случае говорят о фракталах), либо может наблюдаться некоторый элемент нерегулярности (такие фракталы называют случайными) [1]. При описании свойств фрактала используется такая характеристика, как фрактальная размерность — D [1]. Реальные физические объекты, даже обладающие признаками самоподобия, очень редко могут быть описаны с помощью лишь одной величины фрактальной размерности. Именно поэтому в последнее время получил большое распространение анализ, основанный на теории мультифракталов — неоднородных фрактальных объектов. Для характеристики мультифрактала недостаточно одной величины фрактальной размерности, а необходим их бесконечный спектр — $D(q)$. Такими объектами, например, являются сигналы и изображения. Для определения их мультифрактальности используются программы для мультифрактального анализа.

Программа мультифрактального анализа, работающая под операционной системой Linux. На выходе программы реализуются скейлинговая экспонента $\tau(q)$:

$$\tau(q) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln(Z(q, \varepsilon))}{\ln \varepsilon}$$

и спектр фрактальных размерностей $D(q)$:

$$D_q = \frac{\tau(q)}{q-1},$$

где $Z(q, \varepsilon)$ — обобщенная статистическая сумма, q — показатель степени обобщенной статистической суммы, ε — размер ячейки.

Для обработки был взяты экспериментальные данные трибологического взаимодействия, полученные на кафедре мехатроники СПбГУ ИТМО с экспериментальной установки „Трибал“ (рис. 1).

Входными данными для программы является текстовый файл, содержащий две колонки чисел (время и значение данных). Для получения входного сигнала необходимо преобразовать полученные экспериментальные данные (см. рис.1) в матрицу $n \times 2$, добавив столбец с порядковым номером.

На выходе получают скейлинговую экспоненту (рис. 2) и спектр фрактальных размерностей (рис. 3).

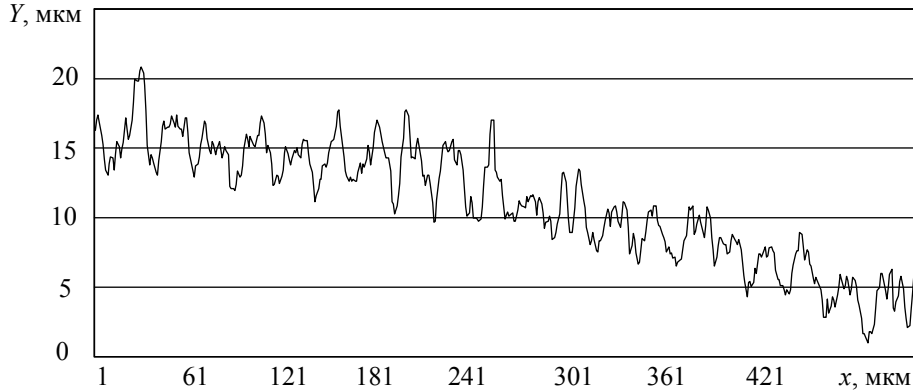


Рис. 1

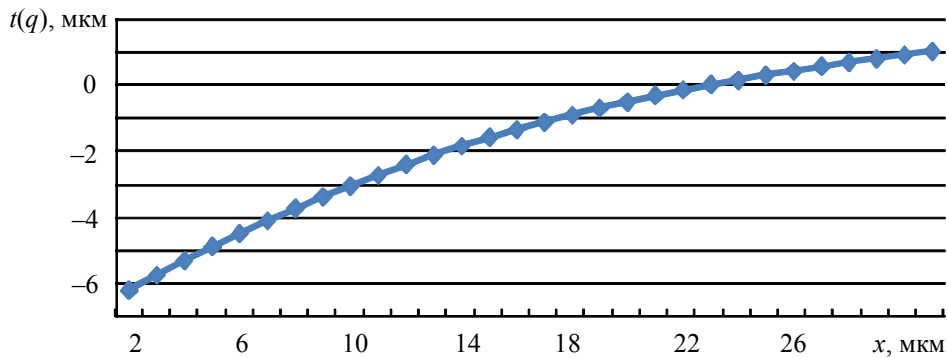


Рис. 2

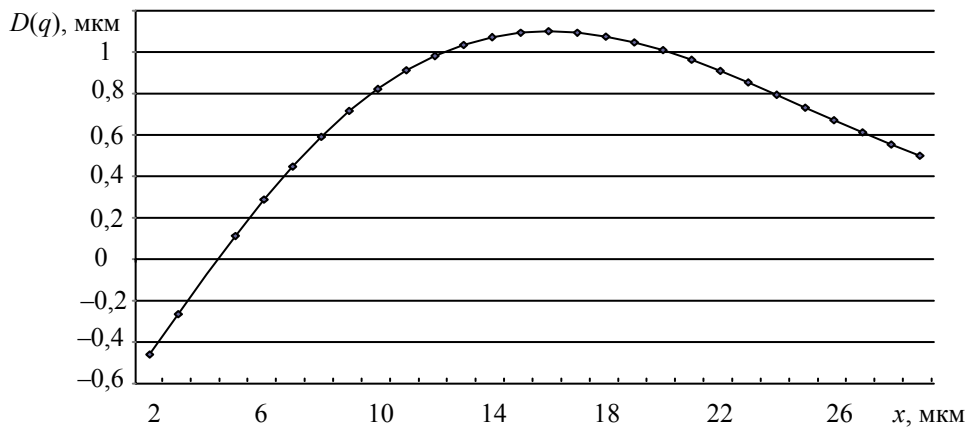


Рис. 3

Полученные выходные данные демонстрируют неравномерность входного сигнала, так как при изменении показателя степени обобщенной статистической суммы меняется и фрактальная размерность.

Программа Fractan на выходе выдает несколько параметров, но основным для мультифрактального анализа является параметр Хёрста (H), который характеризует степень изрезанности исследуемого графика. Эмпирический закон Хёрст открыл, занимаясь изучением

Нила [4], впоследствии оказалось, что и многие другие природные явления хорошо описываются этим законом.

Временные последовательности, для которых $H > 0,5$, относятся к классу персистентных — сохраняющих имеющуюся тенденцию (термин образован Мандельбротом от латинского „persistere“ — пребывать, оставаться [5]). Если в течение некоторого времени в прошлом происходило увеличение значений, то и впредь в среднем будет происходить увеличение. И наоборот, тенденция к уменьшению в прошлом означает в среднем продолжение уменьшения в будущем. Чем больше значение H , тем сильнее выражена тенденция. При $H=0,5$ выраженной тенденции процесса не выявлено, и нет оснований считать, что она появится в будущем.

Случай $H < 0,5$ характеризуется антиперсистентностью — рост в прошлом означает уменьшение в будущем, и наоборот — чем меньше H , тем выше эта вероятность. В процессах после возрастания переменной обычно происходит ее уменьшение, а после уменьшения — возрастание. Задача программ мультифрактальной обработки состоит в том, чтобы идентифицировать существенно нелинейную динамическую систему, и здесь уровень идентификации отличается от уровня идентификации линейных систем.

Например, обработав данные экспериментальных данных (см. рис.1), получаем параметр Хёрста $H = 1,049\ 975$, это означает, что сигнал персистентен.

Параметр Хёрста H выражается через размах R изменений значений исследуемого сигнала на отрезке времени Δt и рассчитанное для этого отрезка стандартное отклонение S [2]:

$$H = \ln(R/S) / \ln(\Delta t),$$

$$R = \max X_H(t) - \min X_H(t).$$

X_H — функция, описывающая сигналы с определенным значением H [2].

Программа Multifrac. На кафедре мехатроники СПбГУ ИТМО создана программа, с помощью которой можно получить как фрактальную размерность, так и показатель Хёрста. Приложение позволяет просчитывать показатели сигнала, визуализировать данные и выводить информацию в соответствующие поля.

Данные в программе имеют следующие обозначения: HE (Энтропия) — мера беспорядка системы, состоящей из многих элементов, в данном случае — мера количества информации, необходимой для определения системы в некотором положении i ; H (Хёрст) — антиперсистентность сигнала; D0 — размерность данных (является локальной характеристикой данного объекта); D1 — информационная размерность (характеризует информацию, необходимую для определения местоположения точки в некоторой ячейке, в случае многомерного ряда не рассчитывается); D2 — обобщенная фрактальная (корреляционная) размерность.

Обобщенная фрактальная размерность определяет зависимость корреляционного интеграла I :

$$I(\varepsilon) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N^2} \sum_{n,m} \Theta(\varepsilon - |\mathbf{r}_n - \mathbf{r}_m|),$$

суммирование проводится по всем парам точек фрактального множества с радиусами-векторами \mathbf{r}_n и \mathbf{r}_m , с использованием ступенчатой функции Хевисайда $\Theta(x)$. Сумма в данном выражении определяет число пар точек n и m , для которых расстояние между ними меньше ε . Поэтому поделенная на N^2 , она определяет вероятность того, что две произвольные точки разделены расстоянием менее ε . По этой причине величину D2 называют корреляционной размерностью.

Между значениями среднеквадратического $\sigma = Rq$ и среднеарифметического отклонения профиля Ra установлена следующая зависимость: $\sigma = Rq = 0,016\ 28Ra$.

Зависимость между показателем Хёрста и величиной среднеарифметического отклонения профиля имеет вид $H_z = 2,636Ra$.

Программа Multifrac позволяет рассчитывать и выводить данные без использования математических моделей.

В таблице приведены значения, полученные при использовании трех программ (во второй колонке программа, работающая под системой Linux).

Параметры	Fractan	Linux	Multifrac
HE	—	—	0,210 49
H	1,0499 75	—	0,179 73
D0	0,950 025	0,301 03	1,8203
D1	—	0,316 081	0,003 656 5
D2	1,118	0,331 133	0,149 13
σ	—	—	0,011 628Ra
H_z	—	—	2,636Ra

Выводы. Обычно в любой программе используются разные математические модели, т.е. системы уравнений и концепций, используемых для описания и прогнозирования данного феномена или поведения объекта.

Программа Multifrac позволяет определять большее количество параметров по сравнению с программой Fractan и мультифрактальным анализом под системой Linux. Это дает возможность более точно описать характеристики обрабатываемого сигнала. В программе реализуется обработка без применения математических моделей. Планируется использование математических моделей в программе Multifrac.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кроновер Р. М. Фракталы и хаос в динамических системах. М.: Техносфера, 2006. 488 с.
2. Ashkenazy Y. Software for analysis of multifractal time series [Electronic resource]: <<http://physionet.ph.biu.ac.il/physiotools/>>.
3. Мусалимов В. М., Валетов В. А. Динамика фрикционного взаимодействия. СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. 191 с.
4. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. М., 2002.
5. Короленко П. В. Фрактальные и мультифрактальные методы, вейвлет-преобразования. М., 2004.
6. Научно-технический словарь [Электронный ресурс]: <<http://nts.sci-lib.com/article0002646.html>>.
7. Шредер М. Фракталы, хаос, степенные законы. М.: Научно-издательский центр „Регулярная и хаотическая динамика“, 2001.
8. Павлов А. Н. Мультифрактальный анализ сложных сигналов // УФН. 2005. Т. 177, № 8. С. 859—876.
9. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.

Сведения об авторах

- Алла Алексеевна Виноградова** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра мехатроники; E-mail: vinogradova_a@list.ru
- Сергей Викторович Трутненко** — студент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра мехатроники; E-mail: trutnenko@gmail.com

Рекомендована кафедрой
мехатроники

Поступила в редакцию
01.03.11 г.

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

УДК 534.6.08

И. Ю. КИНЖАГУЛОВ

МОДЕЛЬ ТЕРМООПТИЧЕСКОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН В ПАЯНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ИЗДЕЛИЯХ

Представлена теоретическая модель возбуждения и распространения ультразвуковых волн, возбуждаемых при помощи термооптического эффекта, который достигается за счет поглощения импульсного лазерного излучения объектом контроля — паяным тонкостенным изделием ракетно-космической техники.

Ключевые слова: ультразвуковая волна, термооптический эффект, лазерное излучение, неразрушающий контроль, пайка.

Одно из направлений развития ракетно-космической техники (РКТ) — внедрение новых технологий неразрушающего контроля (НК) сложных соединений: вакуумно-компрессионная пайка тонкостенных изделий. Сложность разработки таких технологий обусловлена конструктивными особенностями изделий РКТ, а также определяется максимально допустимыми размерами неспая (непропая) и физическими ограничениями традиционных видов и методов НК паяных соединений.

Решить перечисленные задачи возможно с помощью метода лазерно-ультразвуковой дефектоскопии, основанного на термооптическом возбуждении ультразвуковых волн. Теоретическая модель данного возбуждения и распространения ультразвуковых волн представлена в настоящей работе.

В большинстве задач лазерно-ультразвуковой дефектоскопии возбуждение ультразвуковых импульсов происходит за счет абсорбции импульсного лазерного излучения: оптико-акустический (ОА) сигнал возбуждается непосредственно в исследуемой среде либо вне ее — в ОА-генераторах ультразвука [1, 2]. В первом случае параметры исследуемой среды находятся по форме возбуждаемого в ней акустического импульса. Во втором диагностика осуществляется на основании анализа трансформации ультразвукового сигнала при его распространении в исследуемой среде.

Термооптические источники ультразвука и их передаточные функции. Форма акустического импульса при термооптическом возбуждении определяется как характеристиками среды — коэффициентом поглощения света, скоростью звука, так и параметрами лазерного излучения — длительностью импульса и диаметром пятна. Основная задача состоит в том, чтобы определить влияние формы лазерного импульса и свойств среды на профиль акустического сигнала. Это может быть сделано с помощью метода передаточных функций.

Пусть из прозрачной среды на границу раздела (плоскость XU) с поглощающей средой попадает лазерный импульс с интенсивностью $I=I_0f(t)g(x,y)$, где $f(t)$ и $g(x,y)$ описывают соответственно временную и пространственную форму импульса. Ось z направлена в глубь поглощающей среды (рис. 1).

За счет неоднородного нагрева при поглощении лазерного излучения среда расширяется, и в ней возникает импульс давления, который в одномерном приближении описывается формулой:

$$p'(\tau) = \frac{I_0}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{f}(\omega) K(\omega) e^{-i\omega\tau} d\omega, \quad (1)$$

где $\tau = t - z/V_{\text{п}}$ — время в сопровождающей системе координат, $V_{\text{п}}$ — фазовая скорость продольных звуковых волн в поглощающей среде, $I_0 \tilde{f}(\omega)$ — частотный спектр огибающей интенсивности лазерного импульса, $K(\omega)$ — передаточная функция термооптического преобразователя.

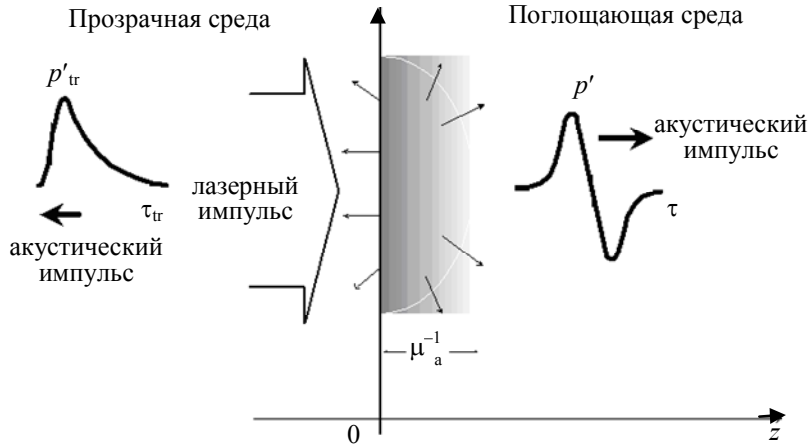


Рис. 1

Таким образом, спектр $p(\omega)$ импульса давления, возникающего в поглощающей среде за счет термооптического преобразования, есть произведение спектра огибающей интенсивности лазерного импульса $I_0 \tilde{f}(\omega)$ и передаточной функции $K(\omega)$:

$$p(\omega) = I_0 \tilde{f}(\omega) K(\omega). \quad (2)$$

Фактически задача оптоакустики сводится к определению передаточной функции термооптического преобразователя, зависящей от параметров поглощающей среды и условий на границе, и в случае однородно поглощающей среды:

$$K(\omega) = \frac{V_{\text{п}}}{c_{\text{т}}} \frac{\beta^*}{1 + N} \frac{1}{1 + i\omega/\omega_{\text{т}}} \left\{ \frac{i\omega}{\omega_{\text{т}}} \frac{1 - iN \frac{\omega}{\omega_{\text{а}}}}{1 + \left[\frac{\omega}{\omega_{\text{а}}} \right]^2} + \sqrt{\frac{i\omega}{\omega_{\text{т}}} \frac{M - b + Nm}{1 + M}} \right\}, \quad (3)$$

где $\beta^* = \beta(1 - 4V_{\text{с}}^2/3V_{\text{п}}^2)$ — эффективный коэффициент теплового расширения поглощающей среды; β , $V_{\text{с}}$, $V_{\text{п}}$, χ — соответственно коэффициент теплового расширения, скорости сдвиговой и продольной волн, температуропроводность, $\omega_{\text{т}} = \mu_{\text{а}}^2 \chi$, $\omega_{\text{а}} = \mu_{\text{а}}^2 V_{\text{п}}$ — характерные частоты, на которых волновой вектор тепловой и акустической волн равен коэффициенту поглощения света в поглощающей среде; $m = \omega_{\text{т}}/\omega_{\text{а}}$; $N = \rho_0 V_{\text{п}} / \rho_{0\text{тр}} V_{\text{птр}}$ — отношение акустических импедансов (волновых сопротивлений) поглощающей и прозрачной (tr) сред; $M = \rho_0 c_{\text{т}} \sqrt{\chi} / \rho_{0\text{тр}} c_{\text{тр}} \sqrt{\chi_{\text{тр}}}$ — отношение тепловых потоков в поглощающую и прозрачную среду, $c_{\text{т}}$ — скорость теплового потока; b характеризует относительный вклад прозрачной среды в генерацию звука.

Из выражения (3) следует, что значения $K(\omega)$ сильно различаются в случае хорошо ($m \sim 1$) и плохо ($m \ll 1$) проводящих тепло сред, а также они сильно зависят от условий на границе поглощающей среды.

В случае хорошо проводящей тепло среды ($m \sim 1$, поверхностное поглощение) получим при акустически жесткой границе поглощающей среды ($\partial p' / \partial z|_{z=0} = 0$ или $N \ll 1$):

$$K(\omega) = \beta^* \frac{V_{\text{п}}}{c_{\text{т}}} \frac{1+b}{1+M}, \quad (4)$$

В случае плохо проводящей тепло среды ($m \ll 1$) получим в области частот $\omega > \omega_{\text{т}}$:

$$K(\omega) = \beta^* \frac{V_{\text{п}}}{c_{\text{т}}} \frac{1}{N+1} \frac{1-i\omega/\omega_{\text{а}}}{1+(\omega/\omega_{\text{а}})^2} \quad (5)$$

или при жесткой границе:

$$K(\omega) = \beta^* \frac{V_{\text{п}}}{c_{\text{т}}} \frac{1}{1+(\omega/\omega_{\text{а}})^2}. \quad (6)$$

Формулы (5)—(6) показывают, что в случае плохо проводящей тепло среды передаточная функция $K(\omega)$ зависит не только от теплофизических параметров среды, но и от коэффициентов поглощения и рассеяния света.

Для сред с известными оптическими характеристиками ОА-эффект можно применить при создании источников мощных акустических сигналов с известными амплитудой и частотным спектром [3].

Таким образом, используя термооптические источники ультразвука, возможно возбуждать мощные широкополосные акустические импульсы. Методы ультразвуковых измерений, основанные на ОА-эффекте, во многих случаях будут обладать рядом преимуществ по сравнению с методами, использующими традиционные пьезопреобразователи.

Изменение профилей оптико-акустических сигналов. Метод передаточных функций позволяет определить спектр ОА-сигнала. Однако такой подход может быть применен только в том случае, когда дифракционные, нелинейные и диссипативные явления проявляются слабо в зоне генерации, т.е.

$$\mu_{\text{а}} L_{\text{д}}, \mu_{\text{а}} L_{\text{н}}, \mu_{\text{а}} L_{\text{з}} \gg 1, \quad (7)$$

где $L_{\text{д}}, L_{\text{н}}, L_{\text{з}}$ — соответственно характерная длина дифракции, нелинейности и затухания (диссипации) звука. Соотношения (7) позволяют анализировать тепловое возбуждение звука поэтапно: 1) рассматривается задача о тепловом возбуждении звука в отсутствие дифракционных, нелинейных и диссипативных эффектов; 2) рассматривается эволюция профиля ОА-импульса в нелинейной диссипативной среде при ограниченных поперечных размерах пучка [4] и с учетом геометрически сложных ограниченных областей распространения в поглощающей среде.

Уравнение, описывающее такую эволюцию волны (Хохлова—Заболотской—Кузнецова [5]), с учетом геометрически сложной области распространения волны в поглощающей среде, может быть записано в виде:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \left(\frac{\partial p'}{\partial z} - \frac{\varepsilon}{\rho_0 V_{\text{п}}^3} p' \frac{\partial p'}{\partial \tau} - \frac{b_3}{2 \rho_0 V_{\text{п}}^3} \frac{\partial^2 p'}{\partial \tau^2} \right) = \frac{V_L}{2} \Delta_{\perp} p', \quad (8)$$

где ε — нелинейный акустический параметр поглощающей среды, b_3 — коэффициент диссипации.

Аналитические результаты решения (8) могут быть получены в случае существенного различия в масштабах проявления отдельных эффектов. При распространении ультразвука в твердых телах влияние нелинейных искажений на профиль ОА-сигнала существенно слабее,

чем влияние диссипации и дифракции [3]. Применительно к тонкостенным изделиям наиболее интересным в рассматриваемой задаче является влияние дифракции.

При термооптическом возбуждении звука на поверхности поглощающей среды в точке $z=0$ радиус акустического пучка совпадает с радиусом лазерного пучка a_0 . В зависимости от соотношения радиуса пучка a_0 и глубины проникновения света μ_a^{-1} фазовый фронт акустической волны может быть близким к плоскому ($a_0 \mu_a \gg 1$), цилиндрическому ($a_0 \mu_a \ll 1$) или сферическому ($a_0 \mu_a \sim 1$).

В случае цилиндрического и сферического фазового фронта профиль оптико-акустического сигнала не изменяется при распространении. Если исходно фронт волны близок к плоскому, то ситуация несколько сложнее. При $z \neq 0$ $L_d = \pi a_0^2 / \lambda$ (λ — длина звуковой волны) пучок расплывается (поперечное сечение увеличивается в два раза) за счет дифракции [6]; при $z \geq 3L_d$ фронт волны становится близким к сферическому. Отличительной особенностью оптико-акустических сигналов является широкий диапазон содержащихся в них частот, поэтому длина волны гармонических составляющих сигнала изменяется в широких пределах и соответственно длина дифракции L_d отдельных гармоник существенно различается. Низкочастотные составляющие спектра дифрагируют быстрее высокочастотных (на меньших расстояниях). В то же время для достижения высокого пространственного разрешения необходимо принимать сигнал в возможно более широкой полосе частот. Поэтому наиболее целесообразно регистрировать акустическую волну, распространяющуюся по нормали к границе поглощающей среды.

Если для всех гармоник ОА-сигнала $L_d \ll L_3$, то соотношение (8) сводится к параболическому уравнению теории дифракции [3, 7]:

$$\frac{\partial^2 p'}{\partial \tau \partial z} = \frac{c}{2} \Delta_{\perp} p'. \quad (9)$$

Считая поперечное распределение интенсивности света в пучке гауссовым, граничное условие задачи дифракции можно записать в виде:

$$p'(z=0, \tau, \mathbf{r}_{\perp}) = p_0(\tau) \exp\left(-\frac{\mathbf{r}_{\perp}^2}{a_0^2}\right), \quad (10)$$

где $p_0(\tau) = p'(\tau, z=0)$ — профиль волны на границе поглощающей среды. При распространении импульса для каждой из гармонических составляющих в (10) гауссово поперечное распределение сохраняется и решение может быть записано в виде:

$$p'(z, \tau, \mathbf{r}_{\perp}) = \int_{-\infty}^{\infty} p_0(t) dt \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-i\omega(\tau-t) - \frac{\mathbf{r}_{\perp}^2}{a_0^2} \frac{\omega}{\omega + i \frac{2c_0 z}{a_0^2}}\right) \left(\omega + i \frac{2c_0 z}{a_0^2}\right)^{-1} \omega d\omega \right]. \quad (11)$$

На оси пучка ($\mathbf{r}_{\perp} = 0$) решение (11) может быть упрощено:

$$p'(z, \tau, \mathbf{r}_{\perp} = 0) = p_0(\tau) - \int_{-\infty}^{\tau} \omega_D \exp(-\omega_D(\tau-t)) p_0(t) dt, \quad (12)$$

где $\omega_D = 2V_{\Pi} z / a_0^2$. Характерная частота ω_D растет с увеличением z и с уменьшением площади поперечного сечения пучка. В дальней волновой зоне ($\omega_D / \mu_a V_{\Pi} \gg 1$, $z \rightarrow \infty$) решение (12) переходит в

$$p'(z, \tau, \mathbf{r}_\perp = 0) = \frac{a_0^2}{2c_0 z} \frac{dp_0}{d\tau}. \quad (13)$$

Как видно из (13), в дальней зоне профиль волны переходит в производную профиля на границе и его амплитуда убывает обратно пропорционально пройденному волной расстоянию.

Для случая однородного поглощения света ($\mu_a = \text{const}$) и короткого лазерного импульса ($\mu_a V_\Pi \tau_\Pi \ll 1$) интеграл (12) можно выразить в элементарных функциях:

$$p'_r(\tau) = \frac{\mu_a \beta^* E_0 c_0^2}{2C_p} \begin{cases} \frac{\exp(\omega_a \tau)}{1+D}, & \tau < 0, \\ \frac{\exp(-\omega_a \tau)}{D-1} - \frac{2D \exp(-\omega_d \tau)}{D^2 - 1}, & \tau > 0, \end{cases} \quad (14)$$

где $\omega_a = \mu_a V_\Pi$ — характерная частота спектра оптико-акустического сигнала, $D = \omega_d / \omega_a = 2z / \mu_a a_0^2$ — безразмерное расстояние, выраженное в длинах дифракции $L_d = \mu_a a_0^2 / 2$ на частоте ω_a . В общем случае конечного значения N решение может быть выражено через представленные решения $p'_r(\tau)$ и $p'_f(\tau)$:

$$p'(\tau) = \frac{1}{1+N} (p'_r(\tau) + N p'_f(\tau)). \quad (15)$$

При $\tau > 0$ сигнал представляет собой разность двух экспонент с показателями, определяемыми коэффициентом поглощения света и частотой дифракции. В зависимости от величины D каждая из них проявляется либо при малых, либо при больших значениях τ . На малых расстояниях ($D \ll 1$) при малых τ профиль ОА-сигнала определяется поглощением света, а дифракционная составляющая будет существенной только при $\omega_a \tau > 3-5$. В случае $D \geq 3$, наоборот, при малых τ ($\omega_d \tau < 1-2$) сигнал изменяется по экспоненте с показателем ω_d , а при $\omega_a \tau \geq 1$ — с показателем ω_a .

Дифракционная трансформация оптико-акустических сигналов для различных значений D ($1 - 0; 2 - 0,1; 3 - 0,5; 4 - 1,5$) приведена на рис. 2.

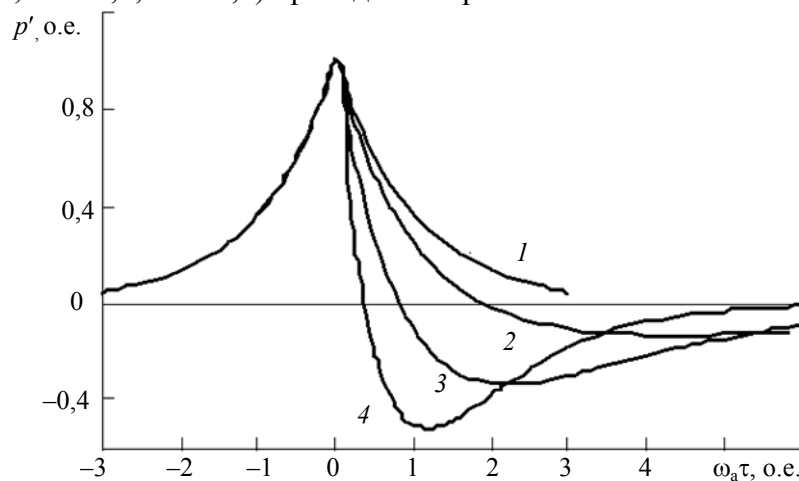


Рис. 2

Первоначально симметричный импульс сжатия по мере распространения (увеличения значения D) приобретает вид следующих друг за другом импульсов сжатия и разрежения. Как видно, даже на достаточно малых расстояниях ($D \cong 0,1$) фаза разрежения проявляется весьма заметно.

На малых расстояниях или при достаточно большом поглощении света ($D \ll 1$) спад сигнала (3) сначала соответствует экспоненте с показателем ω_a (1) (при $\omega_a \tau_{tr} \leq 1-2$), а в дальнейшем — экспоненте с показателем ω_d (2) ($\omega_d \tau_{tr} \geq 1$). При переходе в дальнюю зону или при слабом поглощении света ($D > 1$) картина меняется на обратную. При $D \gg 1$ ОА-сигнал будет состоять из короткого импульса длительностью $\approx \omega_d^{-1}$.

Таким образом, поэтапный подход позволяет рассчитать форму ОА-сигнала, возбуждаемого в поглощающей среде, и проанализировать дифракционные искажения импульса при распространении в исследуемой среде, а также учесть геометрические особенности, влияющие на трансформацию сигнала. Данный анализ позволяет сделать вывод о применимости метода лазерно-ультразвуковой дефектоскопии с термооптическим возбуждением звука для контроля сложных соединений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Карабутов А. А., Матросов М. П., Подымова Н. Б., Пыж В. А.* Импульсная акустическая спектроскопия с лазерным источником звука // Акуст. журн. 1991. Т. 37(2). С. 311.
2. *Карабутов А. А., Матросов М. П., Подымова Н. Б.* Термооптический генератор широкополосных импульсов сдвиговых волн // Акуст. журн. 1993. Т. 39(2). С. 373.
3. *Гусев В. Э., Карабутов А. А.* Лазерная оптоакустика. М.: Наука, 1991. 304 с.
4. *Ахманов С. А., Руденко О. В.* Параметрический лазерный излучатель ультразвука // Письма в ЖТФ. 1975. Т. 1(15). С. 725.
5. *Бахвалов Н. С., Жилейкин Я. М., Заболоцкая Е. А.* Нелинейная теория звуковых пучков. М.: Наука, 1982. 176 с.
6. *Виноградова М. Б., Руденко О. В., Сухоруков А. П.* Теория волн. М.: Наука, 1990. 432 с.
7. *Новиков Б. К., Руденко О. В., Тимошенко В. И.* Нелинейная гидроакустика. Л.: Судостроение, 1981.

Сведения об авторе

Игорь Юрьевич Кинжагулов — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии; E-mail: kinzhiki@mail.ru

Рекомендована кафедрой
измерительных технологий
и компьютерной томографии

Поступила в редакцию
01.03.11 г.

В. А. БЫЧЕНОК

ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ДИАГНОСТИКА ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ТОНКОСТЕННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Экспериментально исследована возможность лазерно-ультразвуковой диагностики остаточных напряжений в тонкостенных элементах камер. Исследования проводились с использованием лазерно-ультразвукового дефектоскопа УДЛ-2М и лазерных оптико-акустических преобразователей продольных и поверхностных волн Рэлея.

Ключевые слова: безотказность функционирования, остаточные напряжения, метод, лазерно-ультразвуковая диагностика, прецизионная точность, тонкостенные элементы.

Наличие остаточных напряжений в поверхностных слоях материала изделий существенным образом влияет на их усталостную прочность, безотказность и долговечность. Многолетний опыт производства и эксплуатации изделий ракетно-космической техники (РКТ) показывает, что безотказность функционирования элементов РКТ, таких как камеры, топливные баки и агрегаты пневмогидравлических систем жидкостных ракетных двигательных установок, в значительной мере зависит от технологических остаточных напряжений, которые возникают в результате механических, термических и термомеханических воздействий на данные изделия. В процессе эксплуатации данных изделий суммарные напряжения (остаточные напряжения и напряжения, возникающие под действием эксплуатационных нагрузок) порой могут превысить допустимые значения и тем самым вызвать отказ изделия или его разрушение. На сегодняшний день определение остаточных напряжений осуществляется методами как разрушающего, так и неразрушающего контроля. Недостатки разрушающих методов контроля общеизвестны и не требуют дополнительных комментариев. Существующие методы неразрушающего контроля (НК), такие как рентгеновский, вихретоковый, тепловой, оптический, магнитный, электрический, ультразвуковой [1—6], имеют ряд ограничений, что не позволяет применять их при определении остаточных напряжений в изделиях из алюминиевых, никелевых и других сплавов, которые широко применяются при производстве элементов РКТ.

В рассматриваемом типе жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) в качестве компонентов топлива используются жидкий кислород и керосин, двигатель выполнен по схеме с дожиганием окислительного генераторного газа и имеет следующие технические характеристики: удельный импульс тяги в пустоте 359 с, давление в камере сгорания 15,69 МПа, давление горючего на выходе из насоса от 36,3 до 47,1 МПа. Камера ЖРД конструктивно представляет собой двустенную оболочку, изготовленную из высоколегированных сталей. Внутренняя стенка камеры оребренная с шириной ребра 0,8 мм и высотой 1,5 мм при общей толщине стенки 2,1 мм, наружная стенка гладкая, толщиной 0,6 мм. Соединение внутренней и наружной стенок камеры выполняется по ребрам методом вакуумно-компрессионной пайки с использованием припоя на основе серебра. Кроме того, верхняя сопловая часть камеры ЖРД содержит подколлекторное кольцо, которое приваривается к ее наружной стенке, соединение верхнего и нижнего сопел камеры также производится с использованием сварки.

Все перечисленные методы НК не позволяют определить уровень остаточных напряжений, возникающих при изготовлении ЖРД, что требует поиска новых методов и средств НК.

На сегодня не существует универсального метода, дающего распределение трехосных остаточных напряжений по всему объему тела. Причиной этому, прежде всего, является относительно слабое влияние остаточных напряжений на изменение упругих и теплофизических свойств напряженной среды (плотности, теплопроводности, скорости звука, электропроводности, электрической и магнитной восприимчивости и т.д.).

Одна из основных сложностей данного метода заключается в том, что относительное изменение скорости звука, даже при напряжениях на пороге текучести, невелико, как правило, не выше нескольких процентов. При типичных напряжениях порядка 100 МПа относительное изменение скорости упругих волн лежит в диапазоне 10^{-3} — 10^{-4} . Поэтому требуется высокая точность измерения скорости звука [8, 9] в ограниченной области. Такой прецизионной точности можно достичь с использованием коротких акустических импульсов, получаемых средствами лазерной оптоакустики [8]. При этом вопрос количественной оценки остаточных напряжений по изменению скорости звука является очень важным для данного метода, но не всегда очевидно разрешимым.

Основной целью настоящей работы являлось рассмотрение результатов проведенных автором совместно со специалистами Международного лазерного центра МГУ им. М. В. Ломоносова экспериментальных исследований, позволяющих оценить возможности применения метода лазерно-ультразвуковой диагностики для оценки остаточных напряжений в тонкостенных элементах камер ЖРД.

Экспериментальные исследования проводились с использованием лазерно-ультразвукового дефектоскопа УДЛ-2М и лазерных оптико-акустических (ОА) преобразователей продольных и поверхностных волн Рэлея.

Использование продольных волн для диагностики остаточных напряжений. Лазерно-ультразвуковые исследования были проведены на образцах из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т. Параметры образцов представлены в таблице.

Образец	Размеры, мм	Ширина шва, мм
<i>A-1</i>	106,5×78×8,51	5
<i>A-2</i>	106,5×78×8,87	6
<i>A-3</i>	106,5×78×8,73	7
<i>C-1</i>	80×50×1,91	2
<i>C-2</i>	80×50×1,67	3
<i>C-3</i>	80×50×1,97	4

Измерения скорости продольных акустических волн проводились с помощью лазерного ОА-преобразователя. Измерялся интервал времени между зондирующим ОА-импульсом, возбуждаемым на лицевой поверхности образца, и одной из ревербераций этого импульса в образце. По измеренным значениям определялось относительное изменение скорости продольных волн в различных точках образцов.

Использование волн Рэлея для диагностики двuosных остаточных напряжений. Возбуждались поверхностные волны Рэлея для времяпролетных измерений и вычисления вариации скоростей этих волн с целью восстановления распределения двuosных напряжений $\sigma_{11}(x_1, x_2)$ и $\sigma_{22}(x_1, x_2)$ в плоскости исследуемых объектов.

В ходе эксперимента измерялись значения скорости V_1 и V_2 . Возбуждаемый акустический импульс распространяется вдоль (ось x_1 , рис. 1, *a*) и поперек (ось x_2 , рис. 1, *b*) шва и регистрируется клиновидным пьезоэлектрическим приемником. Для высокого пространственного разрешения измерений, особенно для измерения скорости V_2 (из-за сильного градиента напряжений поперек шва у его границы), нужно иметь соответствующую базу время-

пролетных измерений. Лазерный луч смещается по направлению распространения возбуждаемого сигнала на расстояние $\Delta x_1 = 500$ и $\Delta x_2 = 125$ мкм для V_1 и V_2 соответственно.

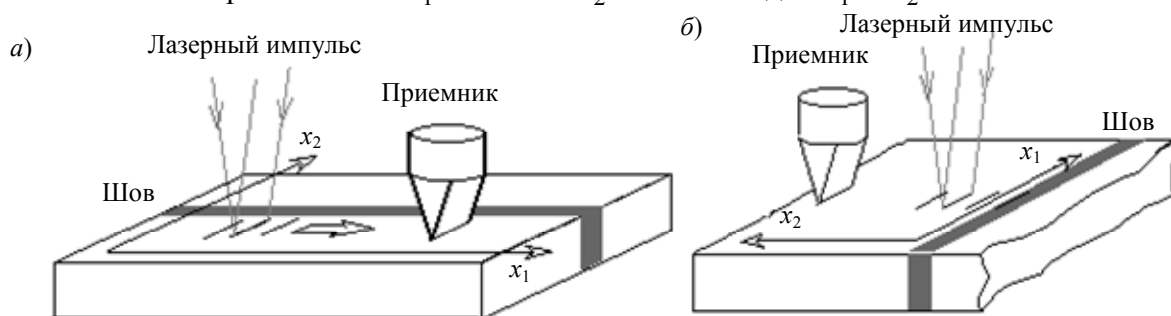


Рис. 1

При проведении исследований в образцах *A-1*, *A-2*, *A-3* измерялись относительные изменения скоростей, вызванные остаточными напряжениями, появившимися при сварке. На рис. 2 показана область измерений. Поскольку особый интерес представляет поле сильных градиентов остаточных напряжений, т.е. зона термического влияния шва $\Delta x_T \approx 6-8$ мм, исследовалась 15-миллиметровая зона около шва.

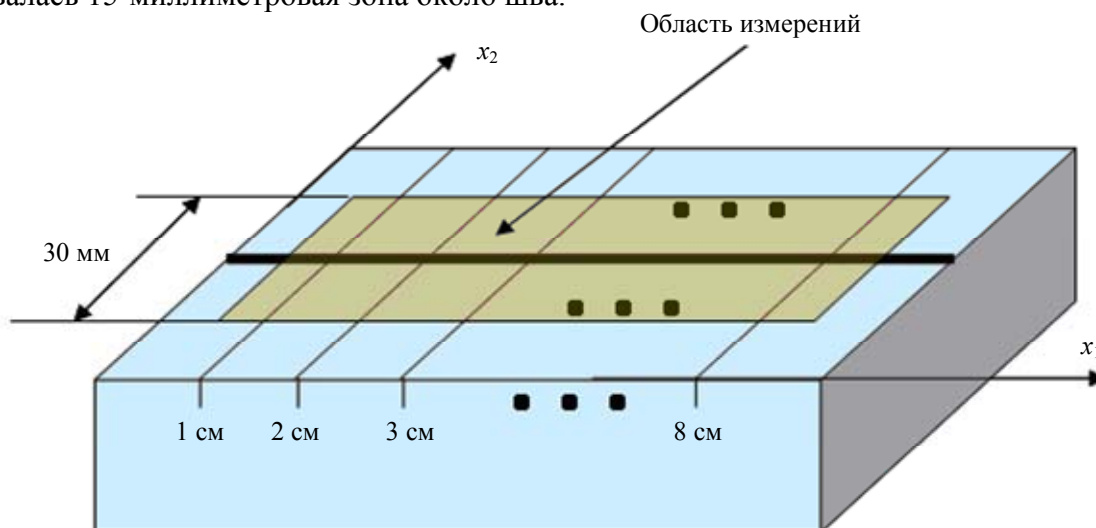


Рис. 2

Градиент напряжений вдоль шва практически отсутствует, поэтому сканирование по оси x_1 проводилось по линиям, разнесенным на 1 см. Вдоль x_1 скорость V_1 измерялась с шагом 1 мм. При измерении скорости V_2 вдоль x_2 шаг регистрации сигналов составлял 125 мкм, после чего при расчетах проводилось усреднение скорости по пяти точкам.

Для анализа зависимости скорости распространения поверхностной акустической волны (ПАВ) от присутствующих в среде остаточных напряжений используются фазовые скорости. Однако в проведенных ранее исследованиях [10] было показано, что групповая скорость чувствительна к напряжениям, как и фазовая. Однако технически процесс измерения групповой скорости более удобен. Поэтому в данном эксперименте измерялись именно групповые скорости V_1 и V_2 .

На рис. 3 представлены результаты измерения относительных изменений скоростей вдоль ($\Delta V_1/V_0$) и поперек ($\Delta V_2/V_0$) шва в образце *A-1*.

Видно, что около шва присутствует существенный градиент скоростей, соответствующий градиенту напряжений, а вдали от шва эпюры относительных изменений скорости плавно выходят на нулевое значение, соответствующее отсутствию напряжений. Максимальное изменение скорости V_1 у шва достигает значения 0,5 %, предсказываемого теорией, и соответствует

положительным значениям напряжений σ_{11} — напряжениям растяжения. Изменение скорости V_2 у шва имеет тот же уровень, что и для скорости V_1 , и соответствует отрицательным значениям напряжений σ_{22} — напряжениям сжатия.

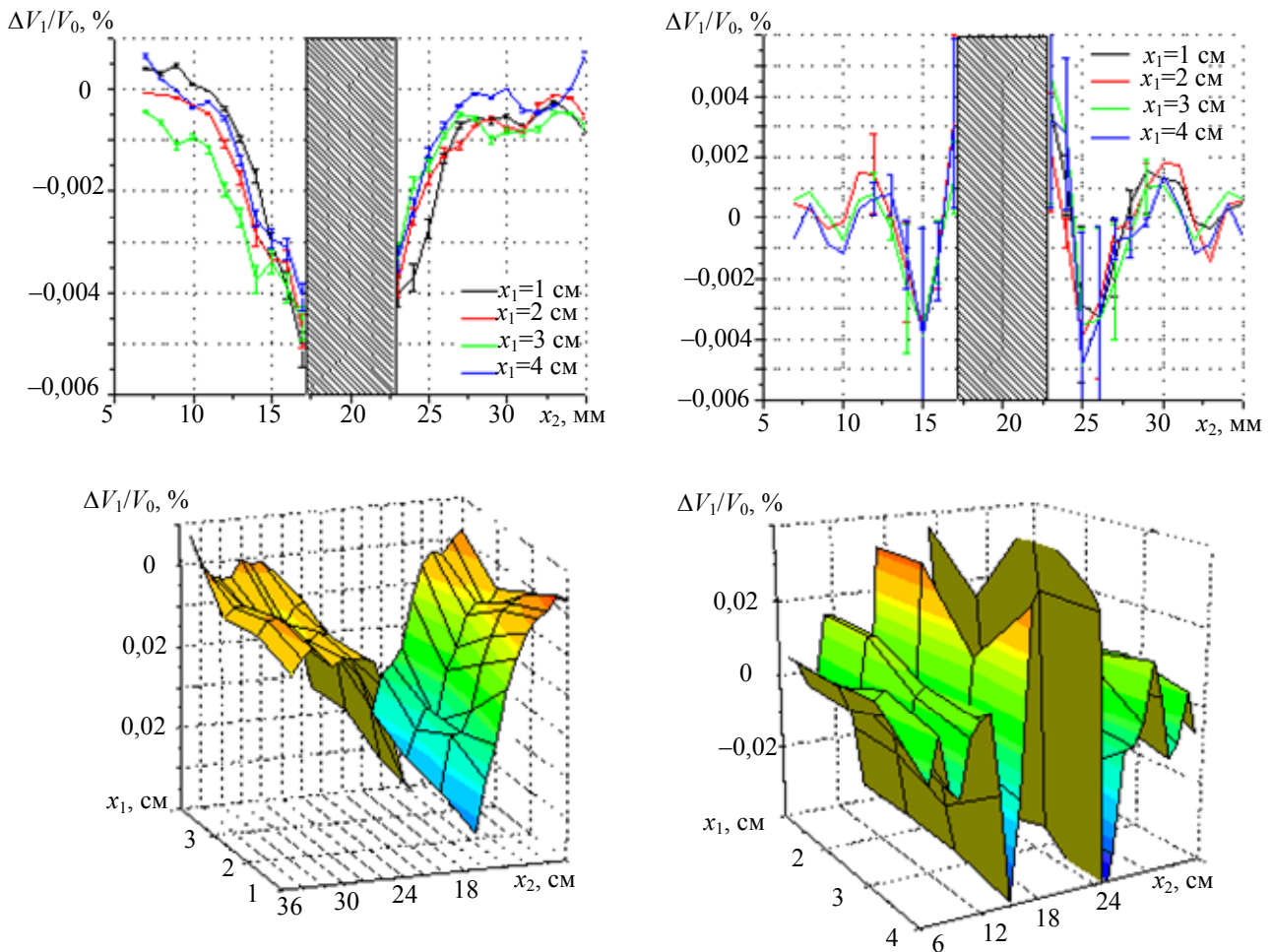


Рис. 3

Обсуждение результатов. Проведенные исследования с помощью лазерно-ультразвукового метода на продольных акустических волнах позволяют сделать следующие выводы.

Относительное изменение скорости продольных волн $\Delta V/V_0$ пропорционально сумме продольных и поперечных напряжений, определить их влияние или измерить анизотропию напряжений на продольных волнах невозможно. Кроме того, данный метод предполагает усреднение напряжений по глубине образца. Для диагностики остаточных напряжений в сварных швах последнее приближение оправдано. Однако использовать метод для диагностики, например, поверхностных упрочнений в металлах нельзя, необходимо анализировать временную форму рассеянного назад ультразвукового импульса.

Используя ОА-эффект, можно возбудить мощные широкополосные акустические сигналы наносекундной длительности. Как отмечалось выше, погрешность в определении скорости напрямую зависит от точности измерения интервала времени Δt между сигналами. С помощью данного метода величину Δt удастся измерить с точностью не менее 0,5 нс, что является наилучшим результатом для всех методов измерения скорости звука. При данной погрешности $\Delta V/V_0 = \frac{\Delta t}{2H} V_0 \cong 1,5 \cdot 10^{-4}$ для толщины образца $H = 10$ мм. Такая точность

вполне приемлема при диагностике образцов толщиной $H > 1,6$ мм. Для образцов серии А удалось восстановить распределение напряжений. Однако для самых тонких образцов (серия С) удается установить лишь тенденцию к изменению напряжений. Поэтому использование данного метода для более тонких образцов, по-видимому, бессмысленно.

При рассмотрении лазерного ультразвукового метода неразрушающей диагностики остаточных напряжений в металлах, использующего поверхностные волны Рэлея, измерены относительные изменения скорости ПАВ в трех образцах из нержавеющей стали, проваренных электронным пучком. Измеренные зависимости пересчитаны в распределения остаточных напряжений в образцах и построены соответствующие эпюры. Максимальное значение изменения скоростей составляет 0,5 %.

При обработке результатов измерений применялся корреляционный алгоритм расчета, позволяющий определять не только относительные изменения скоростей, но и их абсолютные значения. При этом пространственное разрешение данного метода при измерении V_1 составляет $\Delta x_1 = 5,5$ мм, а при измерении V_2 — $\Delta x_2 = 0,5$ мм.

Проведенные с помощью лазерно-ультразвукового метода исследования на поверхностных акустических волнах Рэлея показывают не только принципиальную возможность применения данного метода для диагностики остаточных напряжений, но и его высокую эффективность, возможно измерять не только требуемые для диагностики напряжений относительные изменения скоростей с очень высоким пространственным разрешением, но и абсолютные значения как фазовых, так и групповых скоростей.

Полученные результаты экспериментов позволяют сделать вывод о возможности применения для оценки остаточных напряжений тонкостенных элементов изделий РКТ лазерно-ультразвукового метода с использованием поверхностных волн.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 1. Ф. Р. Соснин. Визуальный и измерительный контроль. Ф. Р. Соснин. Радиационный контроль. М.: Машиностроение, 2006. 560 с.
2. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 2. А. И. Евлампиев, Е. Д. Попов, С. Г. Сажин, Л. Д. Муравьева С. А. Добротин, А. В. Половинкин, Ю. А. Кондратьев. Контроль герметичности. Ю. К. Федосенко, В. Г. Герасимов, А. Д. Покровский, Ю. Я. Останин. Вихретоковый контроль. М.: Машиностроение, 2006. 688 с.
3. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 5. В. П. Вавилов. Тепловой контроль. К. В. Подмастерьев, Ф. Р. Соснин, С. Ф. Корндорф, Т. И. Ногачева, Е. В. Пахолкин, Л. А. Бондарева, В. Ф. Мужичкий. Электрический контроль. М.: Машиностроение, 2006. 679 с.
4. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 6. В. В. Клюев, В. Ф. Мужичкий, Э. С. Горкунов, В. Е. Щербинин. Магнитные методы контроля. В. Н. Филинов, А. А. Кеткович, М. В. Филинов. Оптический контроль. В. И. Матвеев. Радиоволновой контроль. М.: Машиностроение, 2006. 832 с.
5. Васильков С. Д. Применение неразрушающего резистивного электроконтактного метода контроля напряженного состояния металлов и сплавов после различных технологических воздействий // „Техника и технологии трибологических исследований“. Тез. докл. II Междунар. семинара. Иваново: Иван. гос. ун-т, 2009. С. 45.
6. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 3. И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге. Ультразвуковой контроль. М.: Машиностроение, 2006. 864 с.
7. Гусев В. Э., Карабутов А. А. Лазерная оптоакустика. М.: Наука, 1991. 304 с.
8. Ивочкин А. Ю., Карабутов А. А., Ляшев М. Л., Пеливанов И. М., Рохатги У., Субудхи М. Измерение распределения скорости продольных акустических волн в сварных соединениях лазерным оптико-акустическим методом // Акустич. журн. 2007. Т. 53, № 4. С. 1—8.
9. Гузь А. Н., Махорт Ф. Г., Гуца О. И. Введение в акустоупругость. Киев: Наукова думка, 1977. 151 с.

10. Karabutov A., Devichensky A., Ivochkin A., Lyamshev M., Pelivanov I., Rohadgi U., Solomatin V., Subudhi M. Laser ultrasonic diagnostics of residual stress // Ultrasonics. 2008. Vol. 48. P. 631—635.
11. Pao Y.-H., Sachse W., Fukuoka H. Acoustoelasticity and ultrasonic measurements of residual stresses // Physical acoustics. 1984. Vol. 17. P. 61—143.

Сведения об авторе

Владимир Анатольевич Быченко — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии;
E-mail: bychenok-vladimr@mail.ru

Рекомендована кафедрой
измерительных технологий
и компьютерной томографии

Поступила в редакцию
01.03.11 г.

УДК 534.08

В. А. БЫЧЕНОК, И. Ю. КИНЖАГУЛОВ

**ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ
ТОНКОСТЕННЫХ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ КАМЕР
ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Представлен пример применения метода лазерно-ультразвукового контроля качества паяных тонкостенных изделий ракетно-космической техники. Достоверность полученных в ходе эксперимента данных подтверждена результатами прочностных гидроиспытаний.

Ключевые слова: лазерно-ультразвуковой контроль, лазерное излучение, неразрушающий контроль, пайка.

Тонкостенные конструкции, получаемые при помощи пайки, широко применяются в ракетном двигателестроении. Современные жидкостные ракетные двигатели (ЖРД) в России представляют собой конструкции, наружная и внутренняя стенки которых соединены при помощи пайки. С увеличением удельного импульса двигателей, и следовательно с повышением рабочего давления внутри камер и в межстенном пространстве, возросла необходимость контроля таких соединений. Данный вопрос пытались решить с помощью различных методов контроля: как разрушающих, так и неразрушающих. Использование первых экономически неэффективно, поэтому выбор был сделан в пользу неразрушающих методов контроля (МНК). Использование традиционных методов неразрушающего контроля (магнитного, рентгеновского и ультразвукового) по разным причинам не привело к положительному результату. В качестве альтернативы был предложен лазерно-ультразвуковой метод контроля, с использованием которого был проведен ряд экспериментов по оценке качества паяных соединений сопел камер ЖРД 14Д23 ракеты-носителя „Союз 2-1-Б“.

Характерными дефектами паяных соединений камер сгорания ЖРД являются неспаи (непропаи). Минимальный размер площади неспая (непропая), который в соответствии с конструкторской документацией (КД) необходимо выявлять, составляет 1 мм². Величина раскрытия неспая и непропая точно не установлена, однако, по предварительным оценкам, она может составлять для неспая порядка нескольких микрометров, а для непропая — нескольких десятков микрометров.

Современные ультразвуковые методы с возбуждением ультразвуковых волн пьезоэлектрическими преобразователями не могут применяться для неразрушающего контроля паяных соединений камер сгорания ЖРД. Это связано со следующими факторами [1]:

1) длительность ультразвукового импульса составляет порядка $\Delta t = 0,1—0,5$ мкс, что соответствует продольному разрешению $\Delta l = 0,6—3,0$ мм;

2) глубина „мертвой зоны“ составляет не менее $0,8—1,0$ мм;

3) диаметр зондирующего импульса (ультразвукового луча) более 4 мм.

Для возможности акустического контроля необходимо, чтобы метод характеризовался следующими показателями:

1) малая длительность ($\Delta t = 5—20$ нс) зондирующего ультразвукового импульса, что приводит к повышению продольного пространственного разрешения $\Delta l = 5—10$ мкм;

2) малый диаметр зондирующего пучка $0,6—1$ мм, что позволяет повысить чувствительность контроля на эффективной площади неоднородности;

3) апериодичность зондирующего импульса, которая дает практическое отсутствие „мертвой зоны“ и позволяет определять акустический импеданс неоднородности. Последнее позволяет различить, например, расслоение (непропай или неспай).

Указанные характеристики позволяют сделать вывод о возможности применения лазерно-ультразвукового метода контроля для оценки качества паяных соединений сопел камер ЖРД [2].

Эксперимент. Для проведения экспериментальных исследований была предоставлена вырезка из сопла верхнего в подколлекторной зоне (далее — фрагмент), предварительно была подвергнута гидроиспытаниям с избыточным давлением 900 атм. Эти испытания могли привести к появлению локальных отрывов в местах пайки ребер. Поэтому было сделано предположение о том, что при лазерно-ультразвуковом контроле будут выявляться как собственно неспай, так и отрывы в паяных соединениях ребер, появившиеся при гидроиспытаниях. Указанные несплошности не различить при лазерно-ультразвуковом контроле, поскольку их акустическая картина идентична. При этом и глубина залегания этих несплошностей будет примерно одинаковой и будет соответствовать толщине ребер внутренней стенки между канавками перетока ($\approx 2,3 \pm 0,1$ мм).

Порядок эксперимента:

— разметка по внутренней поверхности кольцевой зоны в районе перемычки на участки (с 1-го по 14-й) длиной по 40 мм;

— лазерно-ультразвуковой контроль с использованием двух типов преобразователей (ПЛУ-6Ц-01 и ПЛУ-15Ц-01), регистрация результатов контроля в виде исходных файлов;

— анализ акустических изображений (с использованием исходных файлов и программных средств лазерно-ультразвукового дефектоскопа УДЛ-2М) контролируемых участков и определение мест возможных неспаев;

— уточнение местоположения возможных неспаев;

— гидравлические испытания фрагмента. Испытания проводятся ступенчато (800, 900, ..., 1100 атм) до полного разрушения фрагмента. На каждой ступени ведется визуальный контроль предполагаемых мест неспаев с измерением размеров выпучины;

— оптический контроль разрушенных мест с использованием микроскопа МБС-2 и последующие металлографические исследования на шлифах.

В результате испытаний были выявлены места предполагаемых неспаев (несплошностей), которые располагались на участках № 1, 12 и 13.

Результаты контроля, проведенного с использованием преобразователя ПЛУ-15Ц-01, имеющего диаметр зондирующего импульса 0,5 мм, показали следующее.

В местах, в которых отсутствовали неспаи (несплошности), типовая акустическая картина в зоне между канавками перетока со стороны сопла верхнего имеет вид, представленный на рис. 1 (сканирование при контроле проводилось поперек ребер).

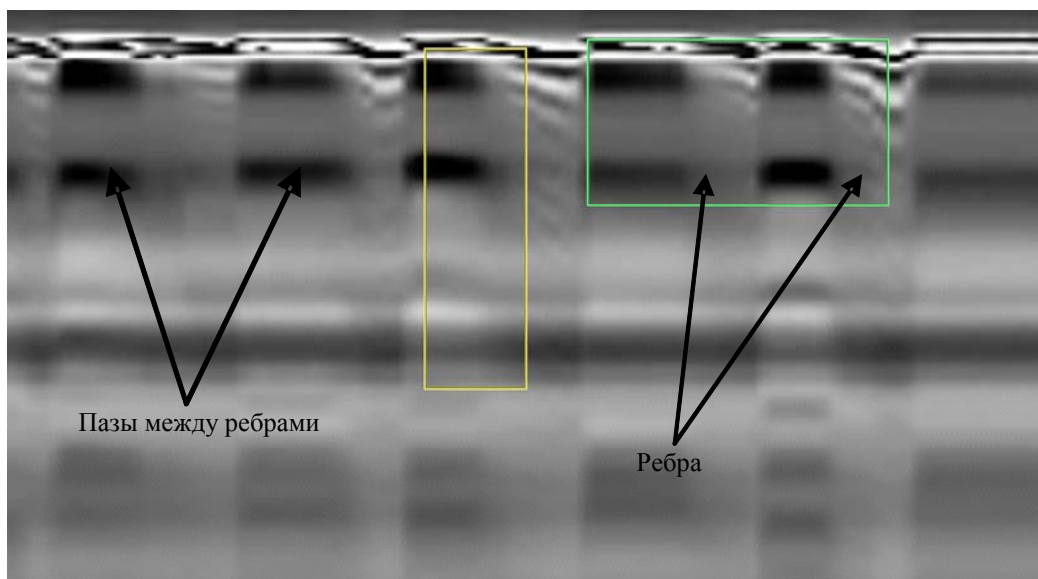


Рис. 1

Между ребрами внутренней и кольцом наружной стенок фрагмента должно присутствовать сплошное паяное соединение. В этом случае заметного отражения от границы паяного соединения не происходит, и на акустическом изображении отсутствуют сигналы, длительность которых соответствует времени пробега от поверхности до внутренней стенки по ребру ($2,3 \pm 0,1$ мм). При нахождении преобразователя над пазом внутренней стенки, а также над канавкой перетока наблюдаются отражения, приходящие с глубин, соответствующих их толщине — 0,8 и 1,4 мм соответственно (рис. 2).

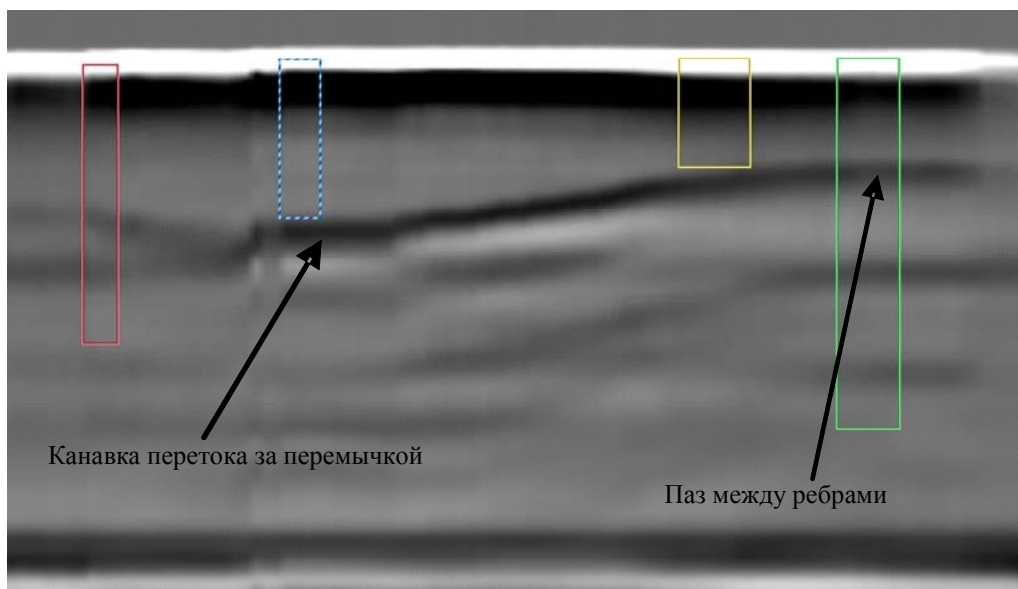


Рис. 2

Как видно из рис. 1, в зонах с регулярной структурой отсутствуют сигналы, соответствующие отражениям от паяного соединения, что должно свидетельствовать об отсутствии неспаев.

На участках № 1, 12, 13 были выявлены места, на акустическом изображении которых присутствовали отражения с глубины $\approx 2,3$ мм. Это свидетельствовало об отражении акустического сигнала от свободной границы ребра внутренней стенки сопла (рис. 3). Данный вид акустического изображения соответствует наличию неспая или несплошности.

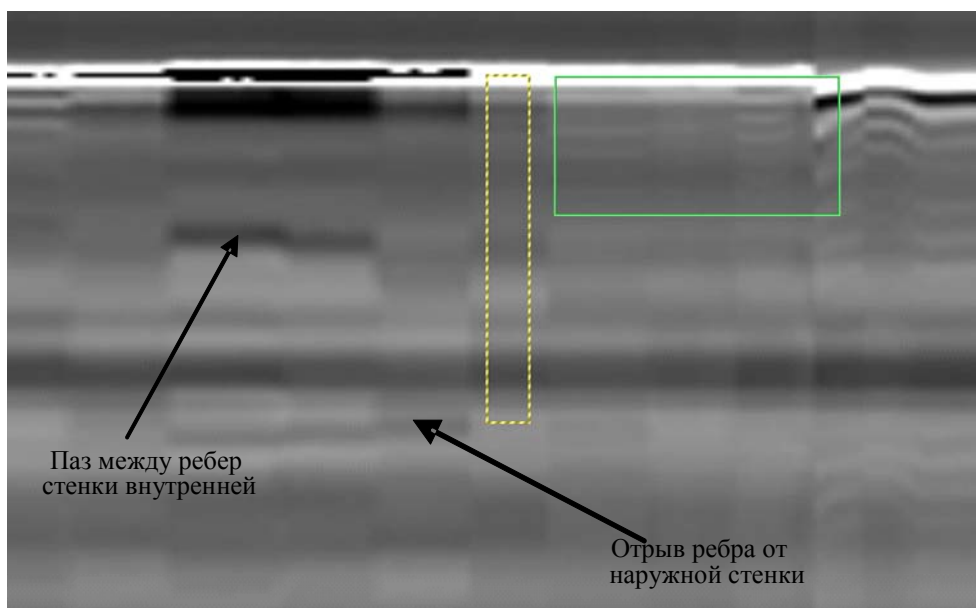


Рис. 3

Для правильной интерпретации результатов визуального контроля выявленных мест предполагаемых неспаев было необходимо окрасить области неспаев (несплошностей), образовавшихся при предварительных испытаниях. С этой целью в пазы фрагмента была залита проникающая красная краска, применяемая при контроле методом Ц1 [3], с последующей сушкой и фиксацией окраски путем выдержки фрагмента в печи при 150 °С.

Прочностные гидроиспытания проводились на специальном стенде в следующем режиме: нагружение фрагмента давлением 800 атм, выдержка 5 мин, сброс давления и внешний осмотр вырезки с контролем предполагаемых мест неспаев путем измерения расширения выпучин [4].

Процесс нагружения повторялся с повышением давления на 100 атм выше предыдущего до разрушения фрагмента.

При давлении 1100 атм произошло разрушение фрагмента в выделенной зоне предполагаемого неспая на участке № 13. После гидроиспытаний было произведено вскрытие разрушенного участка (рис. 4), исследования проводились с использованием микроскопа МБС-2. Между канавками перетока со стороны высокого давления обнаружены:

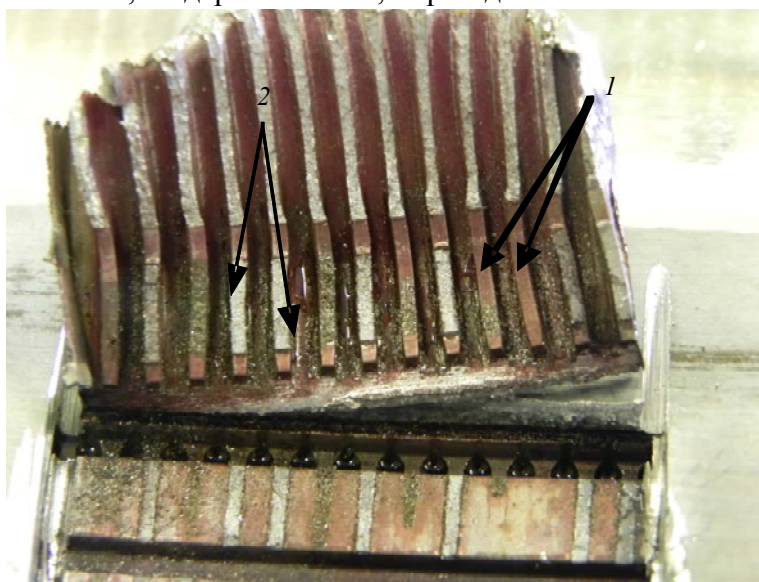


Рис. 4

— неспая двух ребер, положение которого точно соответствовало положению предполагаемого неспая, обнаруженного при лазерно-ультразвуковом контроле (рис. 4, 1);

— места разрушения паяного соединения по четырем ребрам, образовавшиеся при автономных двигательных испытаниях (2);

— места разрушения паяного соединения по семи ребрам, образовавшиеся при данных гидроиспытаниях (1100 атм).

Анализ полученных результатов дает возможность сделать вывод, что чувствительность лазерно-ультразвукового метода с использованием дефектоскопа УДЛ-2М позволяет обнаруживать неспаи (непропаи) в соединениях по ребрам сопла верхнего в зоне подколлекторного узла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 3. И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге. Ультразвуковой контроль. М.: Машиностроение, 2006. 864 с.
2. Гусев В. Э., Карабутов А. А. Лазерная оптоакустика. М.: Наука, 1991. 304 с.
3. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 4. Акустическая тензометрия. В. А. Анисимов, Б. И. Каторгин, А. Н. Куценко и др. Магнитопорошковый метод контроля. Г. С. Шелихов. Капиллярный контроль. М. В. Филинов. М.: Машиностроение, 2004. 736 с.
4. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 1. Ф. Р. Соснин. Визуальный и измерительный контроль. Ф. Р. Соснин. Радиационный контроль. М.: Машиностроение, 2006. 560 с.

Сведения об авторах

Владимир Анатольевич Быченко — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии;
E-mail: bychenok-vladimr@mail.ru

Игорь Юрьевич Кинжагулов — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии;
E-mail: kinzhiki@mail.ru

Рекомендована кафедрой
измерительных технологий
и компьютерной томографии

Поступила в редакцию
01.03.11 г.

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

УДК 53.082.77

И. Ю. ИВАНОВ, А. А. ВАСИЛЬЕВ, М. Е. ВЗНУЗДАЕВ, Н. И. ВОРОПАЕВ, П. КАММЕЛЬ,
П. А. КРАВЦОВ, А. В. НАДТОЧИЙ, Г. Е. ПЕТРОВ, К. ПЕТИЖАН, В. А. ТРОФИМОВ

КРИОГЕННАЯ ВРЕМЯПРОЕКЦИОННАЯ ИОНИЗАЦИОННАЯ КАМЕРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЗАХВАТА МЮОНА ДЕЙТРОНОМ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ MUSUN

Силами лаборатории криогенной и сверхпроводящей техники Петербургского института ядерной физики разработана и изготовлена ионизационная время-проекционная камера (CryoTPC). Описаны технические особенности установки и приведены результаты ее испытаний.

Ключевые слова: времяпроекционная камера, захват мюона, дейтерий, криогеника.

Введение. Международный эксперимент MuSUN [1] с использованием мюонного пучка μE3 Швейцарской мезонной фабрики (S μ S, Swiss muon source) института им. Пауля Шеррера (PSI) осуществляется коллективом исследователей из России, Швейцарии и США [2]. Основной задачей эксперимента является прецизионное (с погрешностью не выше $\sim 1,5\%$) измерение скорости ядерного захвата мюона (μ -захвата) дейтроном:



Заявленная точность измерений необходима для экспериментальной проверки современной теории слабого взаимодействия, так называемой эффективной теории поля (Effective Field Theory, EFT), основы которой были заложены в 1990-х гг. Стивеном Вайнбергом [3].

Сопоставив измеренную скорость μ -захвата с вычисленной, возможно определить с высокой точностью сечения фундаментальных астрофизических реакций:



Ядерная реакция синтеза с участием двух протонов (2) протекает на Солнце и является основным источником электронных нейтрино. Реакции (3) и (4) используются для регистрации потоков нейтрино в нейтринных экспериментах [4]. Возможность точного вычисления характеристик нейтрино позволит решить многие вопросы в этой области науки.

Таким образом, рассматриваемый в настоящей статье эксперимент весьма актуален и его результаты будут востребованы в различных областях современной физики.

Экспериментальная методика. Для измерения скорости μ -захвата с высокой точностью в эксперименте MuSUN применена методика, успешно зарекомендовавшая себя в

предшествующем эксперименте MuCAP, где исследовался процесс захвата отрицательного мюона на протоне [5]. Методика основана на измерении разницы времени жизни отрицательного μ^- и положительного μ^+ мюонов в дейтерии. Так как положительный мюон ядрами вещества не захватывается, разница времени будет равна скорости захвата отрицательного мюона ядром дейтерия. Схема эксперимента приведена на рис. 1.

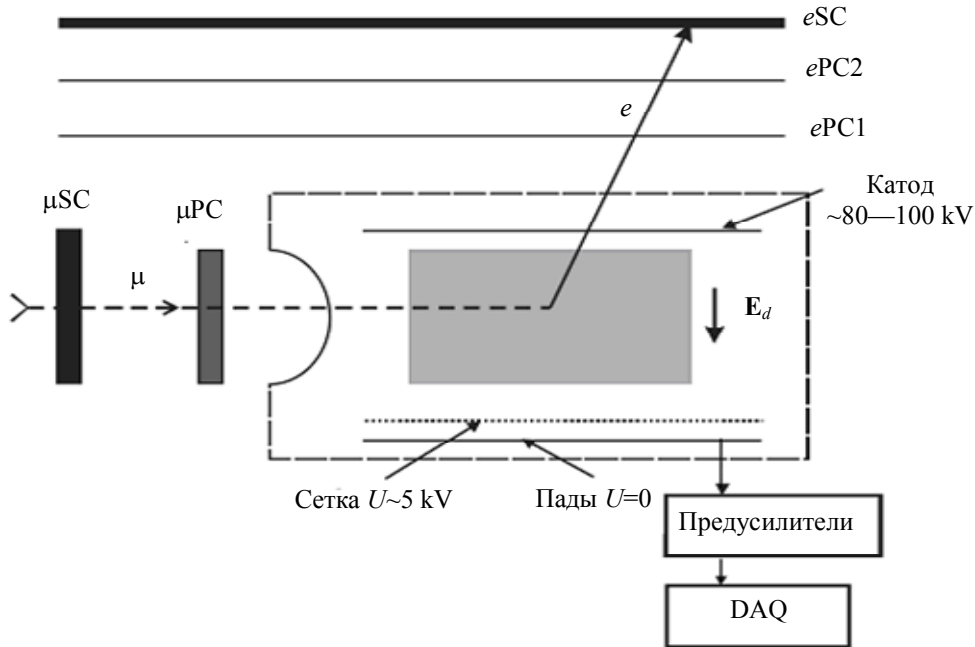


Рис. 1

Мюон из пучка регистрируется входными детекторами (μPC и μSC), после чего попадает внутрь основного детектора, заполненного прошедшим изотопную и химическую очистку дейтерием, где теряет энергию за счет ионизации атомов среды вплоть до полной остановки.

Остановившийся отрицательный мюон замещает в молекуле D_2 электрон и образует $d\mu$ -мезоатом. Мезоатом может „погибнуть“ из-за таких процессов, как перехват мюона на примеси элементов с большей массой ядра и мюонный катализ dd - и pd -синтеза. С целью подавления этих процессов дейтерий очищается от тяжелых примесей до уровня 10^{-9} , от протия — до уровня 10^{-4} , и охлаждается до температуры 30 К.

Подавляющее большинство отрицательных мюонов и все положительные далее распадаются:



порождая электрон и два нейтрино. Электрон с энергией 10—60 МэВ проникает через стенки камеры и регистрируется системой детекторов $e\text{PC1}$, $e\text{PC2}$, $e\text{SC}$.

Для того чтобы исключить поглощение входных мюонов стенками камеры, измеряются три пространственные координаты точки остановки мюона. Это достигается благодаря использованию ионизационной камеры, у которой система анодов поделена на отдельные участки (так называемые пады).

В объеме камеры помещается высоковольтная система, состоящая из плоского катода, находящегося под напряжением ~ 80 — 100 кВ, заземленного анода, разделенного на плоские токопроводящие пластины (пады), и экранирующей сетки под напряжением ~ 5 кВ, расположенной на расстоянии 1—2 мм от анода. В пространстве между катодом и падами возникает электростатическое поле E_d (дрейфовая зона).

Мюон, влетев в камеру, ионизует атомы дейтерия, образуя трек из свободных электронов и дейтронов. В электростатическом поле свободные электроны дрейфуют по направлению к аноду с постоянной скоростью. Достигнув сетки, электроны проникают в дрейфовый

зазор сетка—анод и наводят на отдельных падах импульс тока, который регистрируется зарядочувствительным предусилителем. Далее аналоговый сигнал с предусилителя оцифровывается регистрирующей системой и полученная информация записывается в компьютер через систему сбора данных (DAQ). Номер пада анода, на котором появился сигнал, задает две координаты в анодной плоскости, время появления сигнала задает третью координату.

Сетка служит для экранировки анодов от ионов трека, обеспечивая линейную зависимость времени появления сигнала на падах от вертикальной координаты точки остановки мюона.

Временное распределение мюон—электрон представлено на рис. 2. Здесь по оси абсцисс отложен временной интервал между срабатыванием входного детектора μ SC и электронного eSC, а на оси ординат в логарифмическом масштабе — число событий N , соответствующих данному интервалу времени. Построенные зависимости для положительных и отрицательных мюонов имеют экспоненциальное распределение с параметрами τ_{μ^+} и τ_{μ^-} соответственно. Искомая величина Λ_d связана с этими параметрами следующим соотношением:

$$\Lambda_d = \frac{1}{\tau_{\mu^-}} - \frac{1}{\tau_{\mu^+}}. \quad (6)$$

Для определения Λ_d с заявленной точностью необходимо зарегистрировать более 10^{10} событий распада как для μ^- , так и для μ^+ .

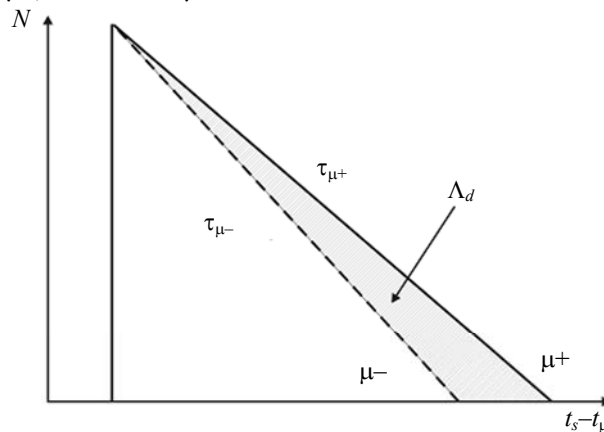


Рис. 2

„Сердцем“ эксперимента является криогенная ионизационная времяпроекционная камера (CryoTPC), наполненная сверхчистым дейтерием при давлении 5 атм и температуре 30 К. Конструкция CryoTPC и необходимая для ее работы инфраструктура была разработана в Лаборатории криогенной и сверхпроводящей техники Петербургского института ядерной физики РАН (ПИЯФ). Представление о конструкции детектора можно получить с помощью рис. 3.

Детектор представляет собой цилиндрическую камеру (4) диаметром 202 мм и длиной 360 мм, изготовленную из алюминиевого сплава АМГ-6. Толщина стенки камеры в ее цилиндрической части составляет 2,5 мм; в торцах сделаны утолщения до 20 мм для расположения крепежных отверстий под шпильки М8. Торцы камеры закрыты фланцами из стали 12Х18Н10Т; в меньший из фланцев впаяно полусферическое бериллиевое окно диаметром 60 мм с толщиной стенки 0,4 мм (1), в больший (9) вварены высоковольтные вводы (8 и 11), сигнальные разъемы типа D-SUB (12) и штуцер для ввода-вывода газа (на рисунке не показан). Кроме этого, большой фланец несет кронштейны (14), на которых размещена высоковольтная структура времяпроекционной камеры.

Четыре керамических стойки-изолятора (20) закреплены непосредственно на кронштейнах; алюминиевая пластина катода (5) толщиной 1,5 мм лежит на стойках-изоляторах. Корректирующие проволоки диаметром 2 мм (19) уложены в пазы стоек-изоляторов на

равном расстоянии друг от друга; резисторы высоковольтного делителя (7) припаяны непосредственно к корректирующим проволокам.

Рамка экранирующей сетки (16) изготовлена из сплава „ковар“ и крепится к кронштейнам посредством поддержек (15 и 22), гальваническую развязку с „землей“ обеспечивают керамические изоляторы (21). Сетка изготовлена из проволоки диаметром 25 мкм (17), напаянной на рамку с шагом 250 мкм.

Аноды (18) представляют собой медные ламели, нанесенные химическим способом на тонкую керамическую пластину (анодную плоскость), которая крепится непосредственно к рамке сетки посредством винтов М3, зазор между анодной плоскостью и сеткой выставляется с помощью тонких подкладных шайб. Сигнал с анодов снимается через плоские кабели (13).

Дополнительную жесткость и вибрационную устойчивость конструкции придают опорные стержни (23), которые входят в отверстия на утолщенной части алюминиевой камеры.

Катод, анодная плоскость и корректирующие проволоки ограничивают чувствительный объем времяпроекционной камеры.

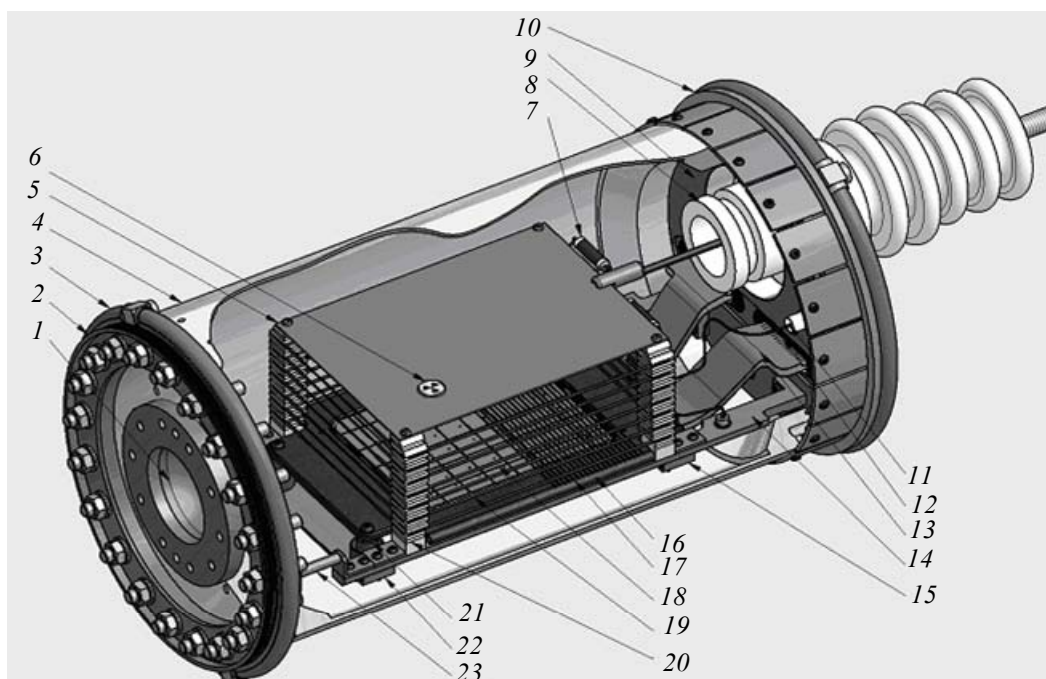


Рис. 3

Резисторы высоковольтного делителя подобраны таким образом, что потенциал выравнивающих проволок равномерно изменяется при удалении от катода к заземленному аноду. Геометрия катода, анода и выравнивающих проволок, а также распределение потенциала на них обеспечивают равномерность и однородность электростатического поля внутри чувствительного объема камеры.

Для получения калибровочных треков, необходимых для настройки камеры, на катоде закреплен источник альфа-частиц на основе изотопа америций-241 с интенсивностью 50 Бк (6).

Для охлаждения и поддержания стабильной температуры камера снабжена теплообменниками (3 и 10) и нагревателями (2). Работа системы охлаждения, а также всей установки заслуживает специального рассмотрения.

Система охлаждения (рис. 4) построена на основе криогенератора (1) и представляет собой замкнутый контур, состоящий из конденсатора (4), вертикальных медных трубок (6), горизонтальных сильфонов (7) и теплообменников времяпроекционной камеры (8 и 9). Система заполняется неоном при комнатной температуре под давлением ~5 атм, после чего герметически закрывается. В рабочем режиме криогенератор охлаждает медную крышку конденсатора, снабженную пластинчатым радиатором для увеличения поверхности теплообмена (3).

Неон конденсируется на радиаторе и стекает вниз по медным трубкам и далее по сильфонам, попадая в теплообменники. В теплообменниках неон испаряется и, охлаждая камеру, вновь поступает в конденсатор через возвратные трубки (5). Электрический нагреватель (2), предназначенный для регулирования температуры и нагрева системы, смонтирован на крышке конденсатора.

Полное время охлаждения камеры от комнатной температуры до 30 К составляет 12 часов.

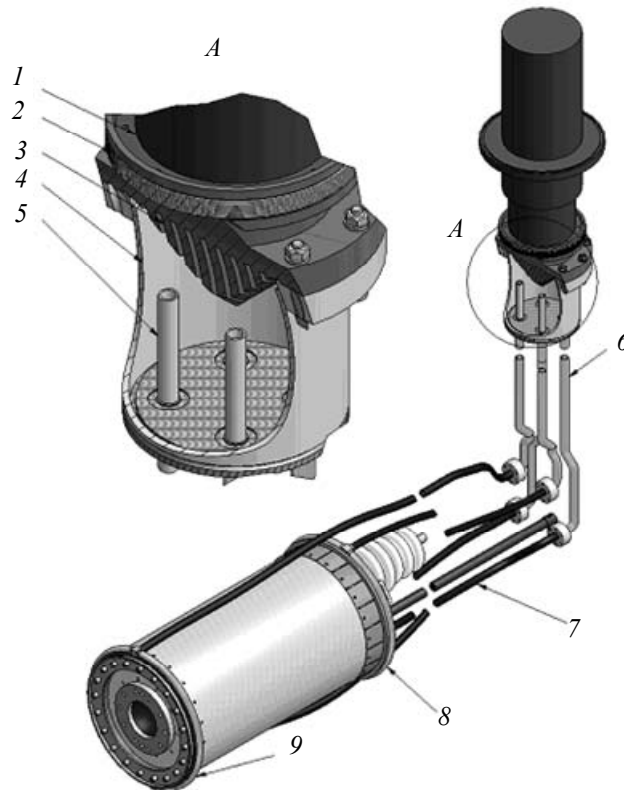


Рис. 4

Общая структура установки. Установка (рис. 5) состоит из CryoTRC (12), системы ее охлаждения, вакуумной и высоковольтной систем, которые конструктивно связаны вакуумным объемом (10). Установка смонтирована на двух стойках (3, 14), каждая из которых независимо закреплена на собственной подвижной платформе (8, 15). Разнесенный подвес и гибкий тарельчатый сильфон (2) позволяют снизить вибрационное воздействие криогенератора (1) на CryoTRC.

Вакуумная система на основе турбомолекулярного насоса (4) со скоростью откачки до 400 л/с обеспечивает поддержание вакуума в системе на уровне 10^{-7} мм рт. ст. Высокий вакуум необходим для теплоизоляции CryoTRC и системы охлаждения, а также играет роль высоковольтной изоляции.

Для обеспечения прохождения мюонного пучка внутрь вакуумного объема передний фланец алюминиевой обечайки (11) снабжен окном из высокопрочного полимера (13).

Для наполнения CryoTRC дейтерием, а системы охлаждения неонем используется газовый пульт (6). Поддержание заданной чистоты и давления газа в камере обеспечивается криогенной циркуляционной системой очистки, подробно описанной в [6]. Изотопная чистота дейтерия обеспечивается предварительной его подготовкой в системе криогенной дистилляции [7].

Высоковольтная система состоит из RC-фильтра (5), помещенного в специальный объем, заполненный трансформаторным маслом, и высоковольтного источника (на схеме не показан).

Зарядочувствительные предусилители расположены вне вакуумного объема на специальном фланце (7). На верхнем фланце (9) расположены разъемы системы температурной стабилизации СтупТРС.

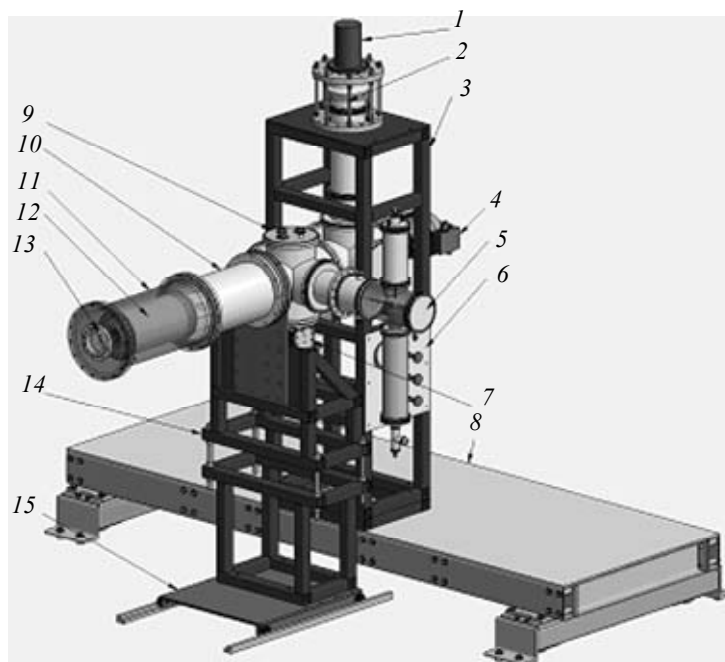


Рис. 5

Результаты испытаний камеры. Криогенная времяпроекционная камера была разработана и изготовлена в ПИЯФ, затем перевезена в PSI и смонтирована с системой охлаждения в 2009 г.

Работоспособность СтупТРС была подтверждена испытаниями с использованием тестового альфа-источника. На рис. 6 продемонстрирован пример сигнала, порождаемого треком альфа-частицы тестового источника. Сигнал измерен с выхода предусилителей цифровым осциллографом. Совпадающие по времени пики на верхней и нижней линиях соответствуют треку одиночной альфа-частицы, распределенному между двумя соседними падами.

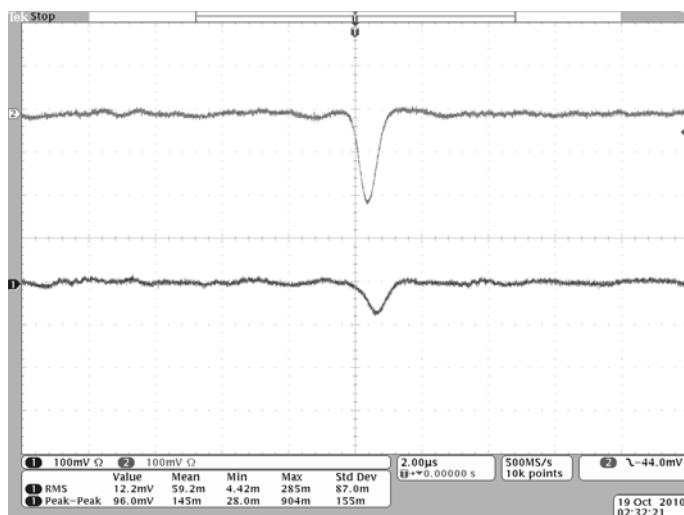


Рис. 6

В течение 2010 года в PSI были проведены два успешных экспериментальных сеанса на пучке $S\mu S$. Сеансы показали работоспособность самой камеры, ее системы охлаждения и системы сбора данных. На 2011—2013 гг. запланирован ряд продолжительных экспериментальных сеансов с получением полного массива экспериментальных данных, необходимых для получения физического результата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эксперимент MuSun [Электронный ресурс]: <<http://www.npl.illinois.edu/exp/musun/>>.
2. Институт имени Пауля Шеррера [Электронный ресурс]: <<http://psi.ch>>.
3. *Weinberg S.* // Phys. Lett. B. 1990. Vol. 251. P. 288.
4. *Aharmim B.* et al. // Phys. Rev. Lett. 2008. Vol. 101. P. 111 301.
5. *Andreev V. A.* et al. // Phys. Rev. Lett. 2007. Vol. 99. P. 032 002.
6. *Ganzha V.* et al. // NIM A. 2007. Vol. 578. P. 485—497.
7. *Alekseev I.* et al. // Fusion Science and Technology. 2008. Vol. 54, N 2. P. 407—410.

Сведения об авторах

- Илья Юрьевич Иванов** — Петербургский институт ядерной физики им. В. П. Константинова РАН, базовая кафедра Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики: приборы и методы поляризационных экспериментов; старший лаборант; E-mail: ivannov_ilya@mail.ru
- Александр Анатольевич Васильев** — канд. физ.-мат. наук; Петербургский институт ядерной физики им. В. П. Константинова РАН, базовая кафедра Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики: приборы и методы поляризационных экспериментов; заведующий кафедрой; E-mail: vassilie@pnpi.spb.ru
- Марат Евгеньевич Взнуздаев** — канд. хим. наук; Петербургский институт ядерной физики им. В. П. Константинова РАН, базовая кафедра Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики: приборы и методы поляризационных экспериментов; старший научный сотрудник; E-mail: marat@pnpi.spb.ru
- Николай Иванович Воробаев** — канд. физ.-мат. наук; Петербургский институт ядерной физики им. В. П. Константинова РАН; старший научный сотрудник; E-mail: vogoraev@pnpi.spb.ru
- Петер Каммель** — PhD, профессор; Университет штата Вашингтон, США; E-mail: pkammel@uw.edu
- Петр Андреевич Кравцов** — канд. физ.-мат. наук; Петербургский институт ядерной физики им. В. П. Константинова РАН, базовая кафедра Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики: приборы и методы поляризационных экспериментов; старший научный сотрудник; E-mail: pkravt@gmail.com
- Александр Васильевич Надточий** — канд. физ.-мат. наук; Петербургский институт ядерной физики им. В. П. Константинова РАН; старший научный сотрудник; E-mail: avnad@pnpi.spb.ru
- Геннадий Егорович Петров** — Петербургский институт ядерной физики им. В. П. Константинова РАН; ведущий инженер; E-mail: petrov@pnpi.spb.ru
- Клод Петижан** — PhD, Институт Пауля Шеррера, Швейцария; ведущий исследователь; E-mail: Claude.Petitjean@psi.ch
- Виктор Алексеевич Трофимов** — канд. физ.-мат. наук; Петербургский институт ядерной физики им. В. П. Константинова РАН, базовая кафедра Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики: приборы и методы поляризационных экспериментов; старший научный сотрудник; E-mail: vtrof@gmail.com

Рекомендована кафедрой
измерительных технологий
и компьютерной томографии

Поступила в редакцию
01.03.11 г.

С. Н. ТЕРЕХИН, А. А. ВАСИЛЬЕВ, М. Е. ВЗНУЗДАЕВ, Л. М. КОЧЕНДА, И. Ю. ИВАНОВ,
С. С. КИСЕЛЕВ, М. Я. МАРУСИНА, П. А. КРАВЦОВ, А. В. НАДТОЧИЙ, В. А. ТРОФИМОВ

ПРИБОРНАЯ БАЗА ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ИССЛЕДОВАНИЮ СЕЧЕНИЯ РЕАКЦИИ DD-ЯДЕРНОГО СИНТЕЗА С ПОЛЯРИЗОВАННЫМИ КОМПОНЕНТАМИ В ПРОЕКТЕ POLFUSION

Разработан и исследован прототип электронно-механической детекторной системы для эксперимента по исследованию сечения реакции dd -ядерного синтеза с поляризованными компонентами.

Ключевые слова: поляризованные атомы, сечение реакции, ядерный синтез.

Реакции ядерного синтеза $d + d \rightarrow {}^3\text{He} + n$, $d + t \rightarrow {}^4\text{He} + n$, $d + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + p$ в плазме при энергии от нескольких килоэлектрон-вольт до 100 кэВ играют ключевую роль в астрофизических процессах, они могут найти применение в практической ядерной энергетике будущего. Известны экспериментальные данные, главным образом, для этих реакций с неполяризованными сталкивающимися ядрами [1, 2]. Между тем эффекты поляризации могут оказывать существенное влияние на величину сечения реакций, изменение которой даже на несколько процентов может привести к значительным изменениям параметров будущих термоядерных реакторов. Теоретические вычисления сечения в этом случае чрезвычайно усложнены, и точность таких вычислений нельзя гарантировать [3]. Только экспериментальное измерение этих сечений может дать необходимую информацию с приемлемой точностью. Для изучения астрофизических и технических аспектов реакций ядерного синтеза очень важно измерить сечения реакций для случая двух поляризованных начальных ядер. Полученные результаты позволят рассматривать возможность применения реакции при низких температурах. При использовании поляризованных первичных частиц сечение реакции может существенно увеличиться.

Общая схема эксперимента приведена на рис. 1.

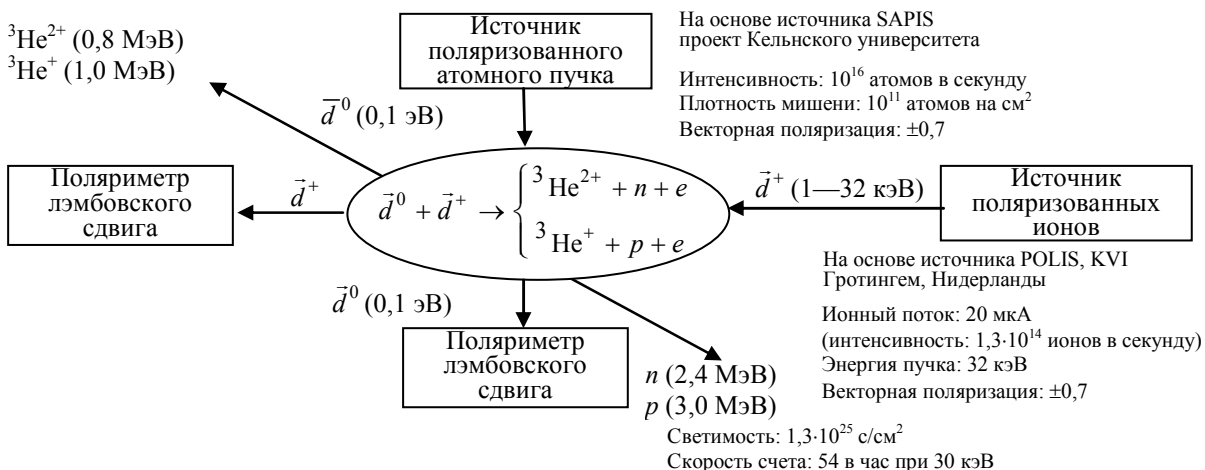


Рис. 1

В состав экспериментальной установки входят два поляризованных источника. Источник поляризованных атомов используется для создания газовой мишени. Поляризованный ионный источник создает пучок поляризованных ионов дейтерия с энергией от 1 до 30 кэВ. Для измерения степени поляризации каждого источника применяются поляриметры лэмбов-

ского сдвига. В центре находится детекторная камера, в которой протекает реакция и детектируются продукты синтеза.

ABS — источник поляризованных атомов. Конструкция и описание источника поляризованных атомов приведены на рис. 2.

Для создания водородного или дейтериевого атомарного пучка используется радиочастотный диссоциатор. Радиочастотная мощность подается в параллельный LC-контур от генератора с частотой 13,56 МГц. Охлаждение разрядной трубки обеспечивается потоком смеси спирта и воды между двумя внешними коаксиальными трубками большего диаметра. Для стабилизации температуры сопла в диапазоне 40—100 К применен криогенератор, соединенный с соплом посредством гибкого медного теплового моста. Верхняя вакуумная камера разделена двумя подвижными алюминиевыми перегородками на три ступени дифференциальной откачки (I, II, III). Скиммер, служащий для формирования газовой струи, закреплен на перегородке, разделяющей камеры I и II (на рис. 2 приведены значения давления в камерах).

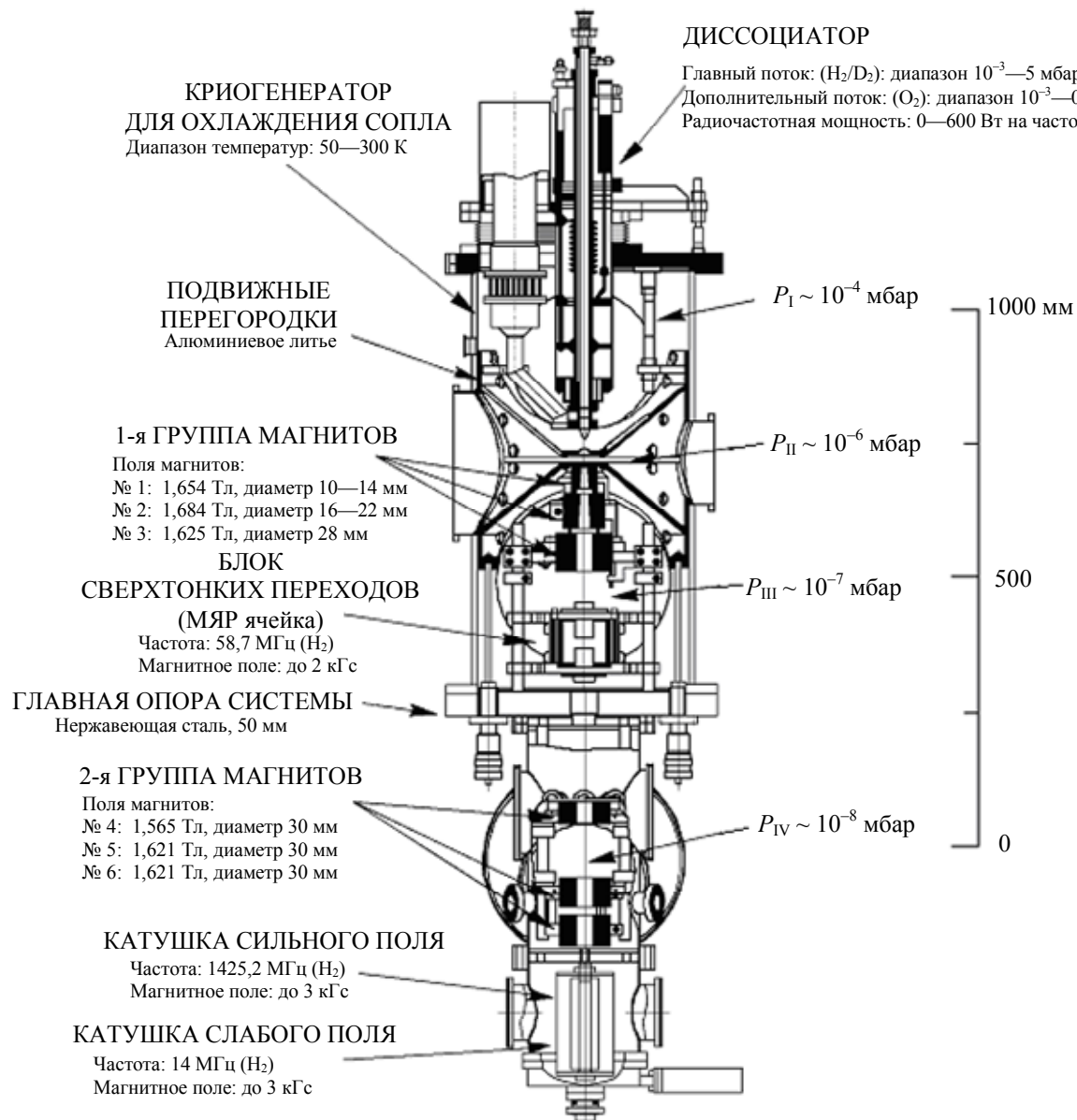


Рис. 2

Конструкция верхнего фланца позволяет выполнить перемещение оси сопла относительно оси скиммера во всех направлениях. Применение гибкого вакуумного соединения между фланцем диссоциатора и верхним фланцем вакуумной камеры позволяет варьировать

расстояние между соплом и скиммером без нарушения вакуума. На перегородке, разделяющей камеры II и III, установлен коллиматор, окончательно формирующий газовую струю.

Спин-сепарирующая магнитная система. Разделение пучка атомов по ориентации электронного спина происходит в неоднородном магнитном поле „шестиполюсных“ магнитов (рис. 3). Характерным свойством такого магнита является то, что он создает аксиально-симметричное поле, фокусирующее атомы, магнитный момент которых ориентирован параллельно радиусу-вектору \mathbf{r} , и дефокусирует атомы с противоположной ориентацией магнитного момента. Сила \mathbf{F} , действующая на атом и ответственная за фокусировку и дефокусировку, определяется следующим образом:

$$\mathbf{F} = -\nabla W = -\frac{\partial W}{\partial B} \frac{\partial B}{\partial r} \frac{\mathbf{r}}{r} = \begin{cases} -\mu_{\text{eff}} \frac{\partial B}{\partial r} \frac{\mathbf{r}}{r} & m_j = +1/2 \quad (\text{фокусировка}), \\ +\mu_{\text{eff}} \frac{\partial B}{\partial r} \frac{\mathbf{r}}{r} & m_j = -1/2 \quad (\text{дефокусировка}), \end{cases}$$

где W — потенциальная энергия, B — магнитное поле и μ_{eff} — эффективный магнитный момент атома.

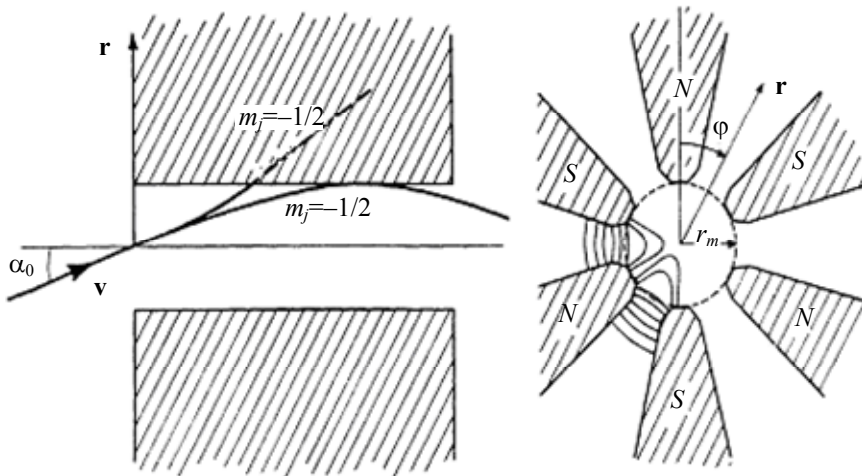


Рис. 3

Таким образом, состояния с проекциями электронного спина $m_j = +1/2$ и $m_j = -1/2$ пространственно разделяются в сильном неоднородном магнитном поле. В результате атомарный компонент с $m_j = -1/2$ выбывает из пучка и удаляется насосами, обеспечивающими откачку вакуумной камеры [4].

Блоки сверхтонких переходов. Вторым важнейшим элементом источника помимо спин-сепарирующих „шестиполюсных“ магнитов, отвечающим за создание поляризованного пучка, является система блоков сверхтонких переходов. Именно здесь индуцируются переходы между уровнями сверхтонкого расщепления для создания той или иной конфигурации заселенности уровней.

Принцип действия блоков сверхтонких переходов состоит в следующем. Уровни энергии атома, помещенного во внешнее магнитное поле B , в соответствии с эффектом Зеемана, расщепляются на $2F + 1$ подуровней. Воздействие высокочастотным полем с частотой, соответствующей энергетической разности уровней сверхтонкого расщепления для данного B , приводит к возбуждению переходов между заданными уровнями. В силу того что в равновесном состоянии переходы происходят в обе стороны (поглощение и вынужденное излучение), для атомов пучка необходимо создать условия, при которых исключается возможность обратных переходов. Эта задача решается путем возбуждения переходов в градиентном магнитном поле, т.е. для атома, движущегося в таком поле, условия для перехода складываются

лишь в ограниченной области пространства, где частота соответствует величине поля. Следует отметить, что амплитуда ВЧ-поля, или, иными словами, плотность фотонов, не должна быть слишком большой, поскольку в этом случае один и тот же атом может испытывать более одного взаимодействия с фотоном, что приведет к обратным переходам и, следовательно, снизит поляризацию пучка [5].

Поляриметр лэмбовского сдвига. В работе поляриметра (рис. 4) используется эффект, открытый в 1950-е гг. Лэмбом и Резерфордом. Он заключается в том, что уровни $2S_{1/2}$ и $2P_{1/2}$ у атома водорода должны обладать одинаковыми энергиями, согласно релятивистской теории Дирака, но У. Лэмб обнаружил, что энергии этих уровней различаются на $4,4 \cdot 10^{-6}$ эВ. Это расщепление уровней получило название лэмбовского сдвига.

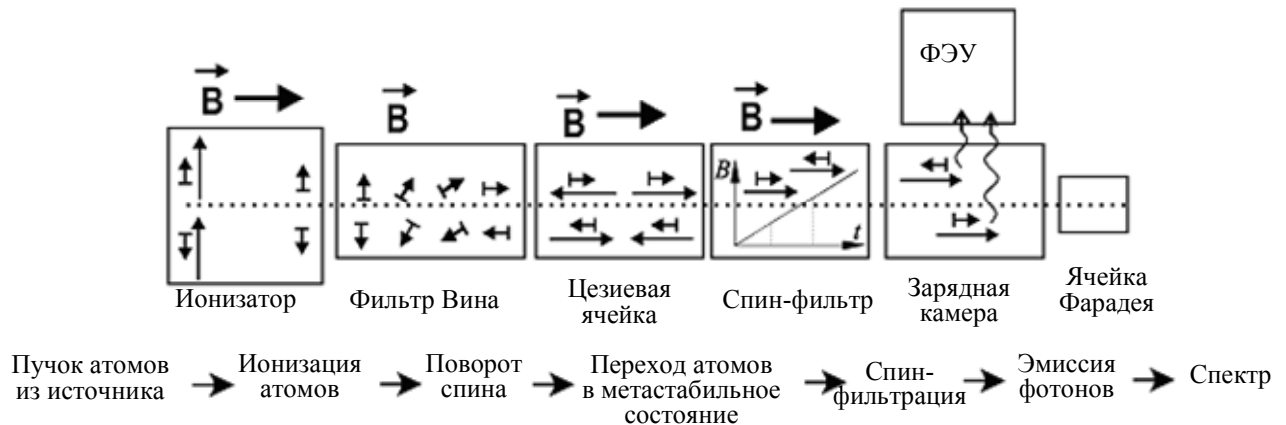
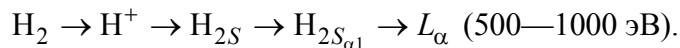


Рис. 4

Принцип действия такого поляриметра следующий. Пучок атомов ионизируется в сильном магнитном поле, что позволяет исключить деполаризационные эффекты при электронном ударе. Затем пучок ионов попадает в фильтр Вина, где спины атомов поворачиваются на 90° и фильтруются по скоростям, так как электрическое и магнитные поля, перпендикулярные друг другу в фильтре Вина, не меняют траекторию движения только частиц с определенными скоростями. Далее ионы, попадая в цезиевую ячейку, в результате зарядово-обменной реакции образуют атомы в $2S$ метастабильном состоянии. Затем пучок проходит через спин-фильтр, который в зависимости от магнитного поля пропускает атомы с $m_j = +1/2$ и определенным значением m_l , а атомы с $m_j = -1/2$ при этом разряжаются в основное состояние. Попав в неоднородное электрическое поле, атомы переходят в основное состояние, испуская фотон (линия $L\gamma$ - α). Общая схема переходов:



Таким образом, измерив число испущенных фотонов как функцию магнитного поля в спин-фильтре, можно говорить о заселенности уровней с определенным m_l и, следовательно, о поляризации пучка на входе в ионизатор.

Детекторная система предназначена для регистрации продуктов реакции. Детектирование будет производиться с помощью PIN-диодов. В окончательном варианте планируется использовать 4- π -детекторную систему с 60 %-ным заполнением. Это примерно 320 кремниевых PIN-фотодиодов (Hamamatsu S3590). Площадь одного диода составляет 1 см^2 .

На этапе тестирования системы предполагается создание прототипа из двух сборок по 4 диода, расположенных напротив друг друга. Это позволит произвести тестовый запуск установки, проверить работу детекторов в вакууме и сделать тестовые измерения.

Тестовая система установлена на вращающемся 4- π -карданном подвесе и управляется двумя шаговыми двигателями с хорошим угловым разрешением ($0,1^\circ$).

Вся система помещена в детекторную камеру, соединенную с остальными компонентами установки (рис. 5, здесь 1 — корпус камеры; 2 — вакуумные электрические вводы; 3 — центральный канал; 4 — вакуумные механические вводы; 5 — вакуумная камера; 6 — центральный фланец; 7 — входные каналы; 8 — привод; 9 — карданный подвес; 10 — шаговый двигатель привода; 11 — карданный подвес; 12 — сборка PIN-диодов; 13 — детекторная система). Окончательный вариант детекторной камеры находится в разработке на кафедре измерительных технологий и компьютерной томографии СПбГУ ИТМО.

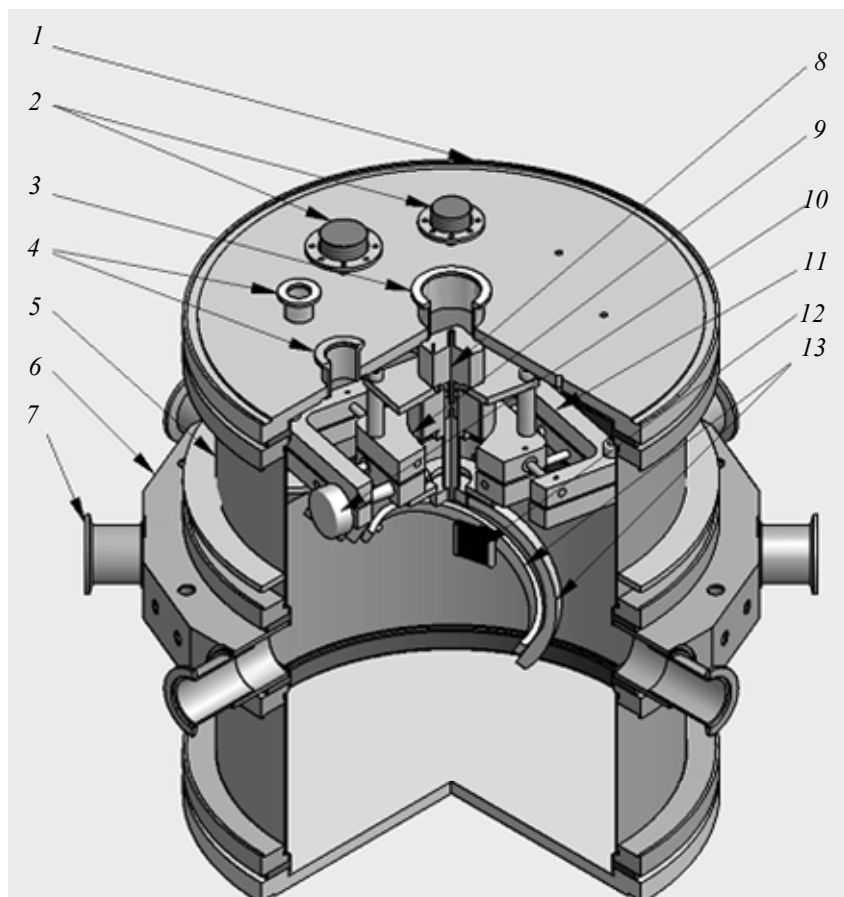


Рис. 5

Электронный комплекс сбора данных состоит из 16-канального предусилителя, на который поступают сигналы с PIN-диодов, 16-канального усилителя-формирователя, 12-разрядного АЦП и компьютерной системы сбора и обработки данных. В дальнейшем полученные данные могут обрабатываться на ЭВМ или передаваться по сетевым интерфейсам для дистанционной обработки.

Выводы. Предлагаемая экспериментальная установка позволит провести измерения, которые внесут существенный вклад в фундаментальные исследования реакций ядерного синтеза и астрофизические исследования. На основе разработанных источников поляризованных атомов будет создана установка, обеспечивающая возможность изучения реакции синтеза поляризованных атомов дейтерия. В дальнейшем с помощью методики получения поляризованных атомов $^3\vec{\text{H}}\text{e}$ станет возможным осуществлять реакцию $\vec{d} + ^3\vec{\text{H}}\text{e} \rightarrow ^4\vec{\text{H}}\text{e} + p$ с поляризованными исходными атомами. Эта реакция наиболее перспективна для использования в реакторе ядерного синтеза вследствие отсутствия нейтронного излучения. Результаты, которые будут получены при выполнении комплекса работ предлагаемого проекта, чрезвычайно важны для дальнейших исследований проблем ядерного синтеза и перспектив термоядерной энергетики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Paetz gen Schieck H. Experiments on four-nucleon reactions // *Few Body Syst.* 1988. Vol. 5. P. 171—207.
2. Leonard D. S. et al. Contribution to Few-Body-17. 2003. P. 264.
3. Glockle W. et al. The three-nucleon continuum: achievements, challenges and applications // *Phys. Rev. Rep.* 1996. Vol. 274. P.107—285.
4. Микиртычьянц М. С. Разработка и исследование источника атомарного водорода и дейтерия с ядерной поляризацией для экспериментов на внутренних пучках ускорителей. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. СПб: ПИЯФ РАН, 2002.
5. Микиртычьянц М. С., Васильев А. А., Коптев В. П., Кравцов П. А., Зайферт Х, Лорентц Б., Ратманн Ф., Энгельс Р. Блоки сверхтонких переходов для создания ядерной поляризации в источнике поляризованного атомарного водорода и дейтерия ANKE ABS. Препринт ПИЯФ РАН, 2002.

Сведения об авторах

- Сергей Николаевич Терехин** — Петербургский институт ядерной физики им. В. П. Константинова РАН; научный сотрудник; E-mail: serzh@gti.ru, lab19@yandex.ru
- Александр Анатольевич Васильев** — канд. физ.-мат. наук; Петербургский институт ядерной физики им. В. П. Константинова РАН, базовая кафедра Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики: приборы и методы поляризационных экспериментов; заведующий кафедрой; E-mail: vassilie@pnpi.spb.ru
- Марат Евгеньевич Взнуздаев** — канд. хим. наук; Петербургский институт ядерной физики им. В. П. Константинова РАН, базовая кафедра Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики: приборы и методы поляризационных экспериментов; старший научный сотрудник; E-mail: marat@pnpi.spb.ru
- Леонид Михайлович Коченда** — канд. техн. наук; Петербургский институт ядерной физики им. В. П. Константинова РАН; ведущий научный сотрудник; E-mail: kotch@pnpi.spb.ru
- Илья Юрьевич Иванов** — Петербургский институт ядерной физики им. В. П. Константинова РАН, базовая кафедра Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики: приборы и методы поляризационных экспериментов; старший лаборант; E-mail: ivannov_ilya@mail.ru
- Сергей Степанович Киселев** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии; E-mail: kiselev@mail.ifmo.ru
- Мария Яковлевна Марусина** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии; E-mail: marusina_m@mail.ru
- Петр Андреевич Кравцов** — канд. физ.-мат. наук; Петербургский институт ядерной физики им. В. П. Константинова РАН физики, базовая кафедра Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики: приборы и методы поляризационных экспериментов; старший научный сотрудник; E-mail: pkravt@gmail.com
- Александр Васильевич Надточий** — канд. физ.-мат. наук; Петербургский институт ядерной физики им. В. П. Константинова РАН; старший научный сотрудник; E-mail: avnad@pnpi.spb.ru
- Виктор Алексеевич Трофимов** — канд. физ.-мат. наук; Петербургский институт ядерной физики им. В. П. Константинова РАН, базовая кафедра Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики: приборы и методы поляризационных экспериментов; старший научный сотрудник; E-mail: vtrof@gmail.com

Рекомендована кафедрой
измерительных технологий и компьютерной томографии

Поступила в редакцию
01.03.11 г.

ПРИБОРЫ ТОЧНОЙ МЕХАНИКИ

УДК 621.001.2

Г. Б. ДАЙНЕКА, С. С. КИСЕЛЕВ, М. Я. МАРУСИНА, И. К. МЕШКОВСКИЙ,
М. П. МАРУСИН, В. А. ЛОПАРЁВ, М. Н. ШУГАЕВ

ДВУХКООРДИНАТНАЯ ПОВОРОТНАЯ ПЛАТФОРМА

Рассмотрена возможность создания поворотной платформы, основанной не на приводах прямого поворота, а на рычажных механизмах, таких как рычаги и тяги.

Ключевые слова: поворотная платформа, прецизионный механизм.

Введение. В настоящее время существует необходимость в точном позиционировании различных систем, в частности, систем слежения. Для этих целей используются поворотные платформы [1, 2]. Можно отметить поворотные прецизионные платформы “MICOS” Rotation stage Pollux RSP-200, Rotation stage DT-80R, Ultra Precision rotation stage UPR-100 и манипулятор ООО „Рухсервомотор“.

На кафедре измерительных технологий и компьютерной томографии разработана двухкоординатная поворотная платформа, основными достоинствами которой являются высокая точность перемещения ($<0,001^\circ$) и высокий показатель полезной нагрузки (рис. 1). Некоторые технические характеристики различных платформ представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметр	Rotation stage Pollux RSP-200	Rotation stage DT-80R	Ultra Precision rotation stage UPR-100	Манипулятор ООО „Рухсервомотор“	Проектируемая платформа
Угол поворота OZ, \dots°	360	360	360	360	140
Угол поворота OX, \dots°	—	—	—	—	45
Точность перемещения, \dots°	0,2	$\pm 0,1$	$\pm 0,005$	0,5	$<10^{-3}$
Скорость перемещения, $^\circ/\text{с}$	0,01—1440	0,001—1100	0,02—360	1	До 50
Нагрузка, кг	До 2	До 2	3	До 50	До 50
Масса, кг	2,1	0,8	1,2	—	~ 27

Разработанная двухкоординатная поворотная прецизионная платформа может быть использована в следящих системах, прецизионном станочном оборудовании, в роботизированных комплексах, лидарных станциях, высокоточных системах управления оружием [3]. Анализ объектов проводится с помощью видеокамеры, закрепленной на платформе. Двухкоординатный поворотный механизм содержит неподвижное основание и подвижную платформу. Возможность изменения пространственного положения платформы относительно неподвижного основания обеспечивают две шарико-винтовые пары, каждая из которых состоит из винта и параллельно расположенной цилиндрической направляющей. Конструктивные особенности платформы позволяют уменьшить количество связей между шаровой опорой и

подвижной платформой, а также за счет установки пары винт—гайка увеличить жесткость, благодаря чему возможно повышение точности позиционирования.

Поворот платформы осуществляется посредством двух шаговых двигателей, которые соединены с шарико-винтовой парой (ШВП). Поворот платформы происходит при изменении длины тяги ШВП.

Платформа может совершать поворот вокруг оси Y и оси Z (рис. 2). Рассчитаем длину правой ШВП:

$$B'E'' = \sqrt{B'E'^2 - E'E''^2} .$$

Вычислить длину левой тяги ШВП можно следующим образом:

$$A'D'' = \sqrt{A'D'^2 - D'D''^2} .$$

Далее величину $B'E''$ будем называть „длина правой тяги ШВП“ T_r , а $A'D''$ — „длина левой тяги ШВП“ T_l .

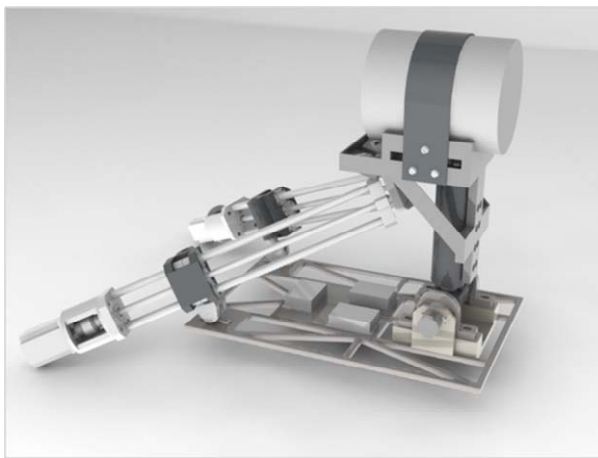


Рис. 1

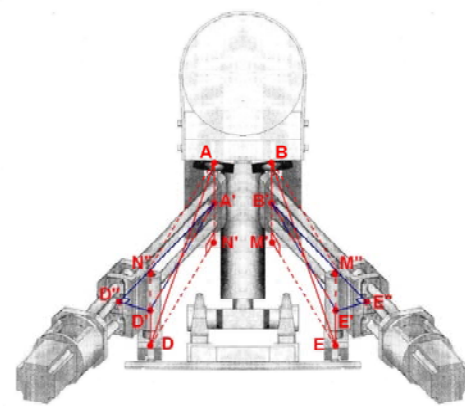


Рис. 2

Исследуемая платформа может поворачиваться вокруг оси Z в пределах от -70° до $+70^\circ$ и вокруг оси Y — в пределах от -25° до $+25^\circ$. Построим это пространство углов с шагом в 1° . По оси абсцисс отложен угол поворота вокруг оси Z (α), по оси ординат — угол поворота вокруг оси Y (β) (рис. 3).

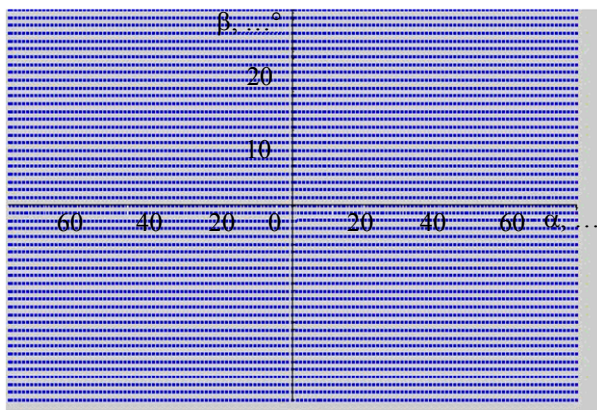


Рис. 3

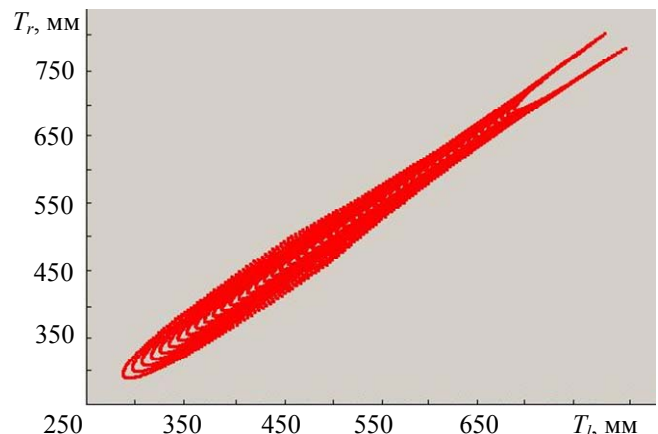


Рис. 4

Каждому положению платформы соответствуют определенные значения T_r и T_l , которые изменяются с помощью шаговых двигателей. Построим пространство длин тяг (рис. 4), соответствующее пространству, приведенному на рис. 3.

Для большей наглядности приведем зависимости T_l от α (рис. 5), T_l от β (рис. 6), которые соответствуют пространствам, изображенным на рис. 3 и 4.

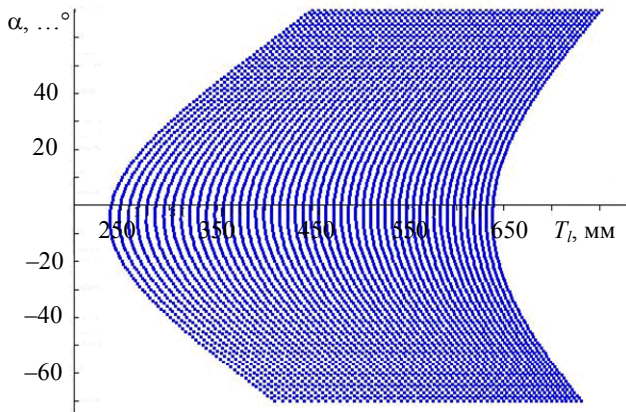


Рис. 5

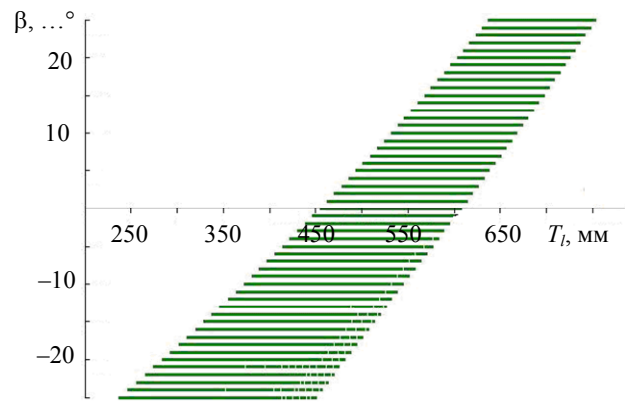


Рис. 6

Поворот прецизионной платформы осуществляется за счет изменения длин ШВП, это обеспечивается двумя шаговыми приводами. За один шаг привод поворачивается на $1,8^\circ$, т.е. полный оборот он делает за 200 шагов. ШВП имеет резьбу с шагом 1 мм, т.е. за один шаг привода длина ШВП изменяется на 5 мкм.

Зависимость изменения длины тяги от угла поворота платформы неравномерная. Проведем оценку изменения угла при выполнении шаговым приводом одного шага при различных положениях следящей платформы. В табл. 2 представлены результаты вычислений для некоторых углов. На пересечении значений α и β приведено изменение угла поворота платформы при одном шаге привода (в градусах).

Таблица 2

Изменение положения платформы при одном шаге шагового привода

α, \dots° β, \dots°	-25	-20	-10	0	10	20	25
-70	0,0000458	0,0000505	0,0000176	0,0000929	0,0002880	0,0004807	0,0005297
-69	0,0000533	0,0000592	0,0000292	0,0000781	0,0002728	0,0004713	0,0005236
-68	0,0000609	0,0000680	0,0000408	0,0000634	0,0002575	0,0004618	0,0005173
-67	0,0000686	0,0000768	0,0000524	0,0000486	0,0002419	0,0004521	0,0005110
-66	0,0000764	0,0000858	0,0000641	0,0000338	0,0002261	0,0004422	0,0005046
-65	0,0000843	0,0000948	0,0000758	0,0000189	0,0002101	0,0004321	0,0004982
-64	0,0000924	0,0001038	0,0000875	0,0000040	0,0001939	0,0004218	0,0004917
-63	0,0001005	0,0001130	0,0000993	0,0000109	0,0001775	0,0004113	0,0004852
-62	0,0001087	0,0001223	0,0001110	0,0000259	0,0001608	0,0004005	0,0004786
-61	0,0001170	0,0001316	0,0001229	0,0000409	0,0001440	0,0003895	0,0004719

Как видно из табл. 2, погрешность позиционирования следящей платформы в самом неблагоприятном случае приблизительно $0,001^\circ$, что составляет менее $4''$. Точность позиционирования можно улучшить, если использовать шаговый привод с большим числом шагов на полный оборот. Так, если использовать привод с 400 шагами на один оборот, то точность позиционирования платформы увеличится примерно в 2 раза.

Исследования осуществлены при проведении НИР в рамках реализации ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009—2013 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крайнев А. Ф. Словарь-справочник по механизмам. М.: Машиностроение, 1987.
2. Гаврилов С. В., Коноплев В. А. Компьютерные технологии исследования многозвенных мехатронных систем. СПб: Наука, 2004.

3. Патент РФ № 101696. Двухкоординатная поворотная платформа / И. К. Мешковский, Г. Б. Дайнека, Ю. Ф. Федосов, С. С. Киселев, М. П. Марусин. Оpubл. 27.01.2011.

Сведения об авторах

- Геннадий Борисович Дайнека** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра физики и техники оптической связи
- Сергей Степанович Киселев** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии;
E-mail: kiselev@mail.ifmo.ru
- Мария Яковлевна Марусина** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии;
E-mail: marusina_m@mail.ru
- Игорь Касьянович Мешковский** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра физики и техники оптической связи; заведующий кафедрой;
E-mail: igorkm@spb.runnet.ru
- Михаил Петрович Марусин** — студент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра мониторинга и прогнозирования информационных угроз
- Вячеслав Александрович Лопарёв** — студент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии;
E-mail: viper-sl@hotmail.com
- Максим Николаевич Шугаев** — студент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии;
E-mail: max2008sh@gmail.com

Рекомендована кафедрой
измерительных технологий
и компьютерной томографии

Поступила в редакцию
01.03.11 г.

С. Е. АНТОНОВ, М. Я. МАРУСИНА, А. В. ЛЯМИН, С. С. КИСЕЛЕВ, Ю. В. ФЕДОСОВ

ПРОГРАММНЫЙ ИНСТРУМЕНТАРИЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРЕЦИЗИОННЫХ ТРИПОДОВ

Определены подходы к разработке автоматизированного программно-аппаратного комплекса для исследования прецизионных триподов. Рассмотрены ограничения математической модели, позиционирование трипода, определены конфигурационное пространство системы и линейные перемещения платформы трипода. Приведен пример визуального представления системы.

Ключевые слова: прецизионные установки, автоматизированные системы для научных исследований, программно-аппаратный комплекс, трипод, механизмы параллельной кинематики.

Введение. Механизмами параллельной кинематики называются устройства, исполнительное звено которых присоединяется к основанию несколькими независимыми кинематическими цепями. Данным механизмам свойственны надежность и повышенная точность работы, обусловленные их параллельной структурой [1], также они могут выдерживать большие нагрузки. Подобные системы находят применение в самых различных областях: от астрономии до эмуляторов полетов. Недостатком таких систем является повышенная математическая сложность программного обеспечения [2], связанная с нелинейностью системы, необходимостью в режиме реального времени учитывать множество взаимосвязанных ограничительных параметров.

Триподом (рис. 1) называют параллельное кинематическое устройство, состоящее из платформы, установленной на трех опорах, которые под управлением компьютера, изменяя длину, изменяют положение и наклон платформы.

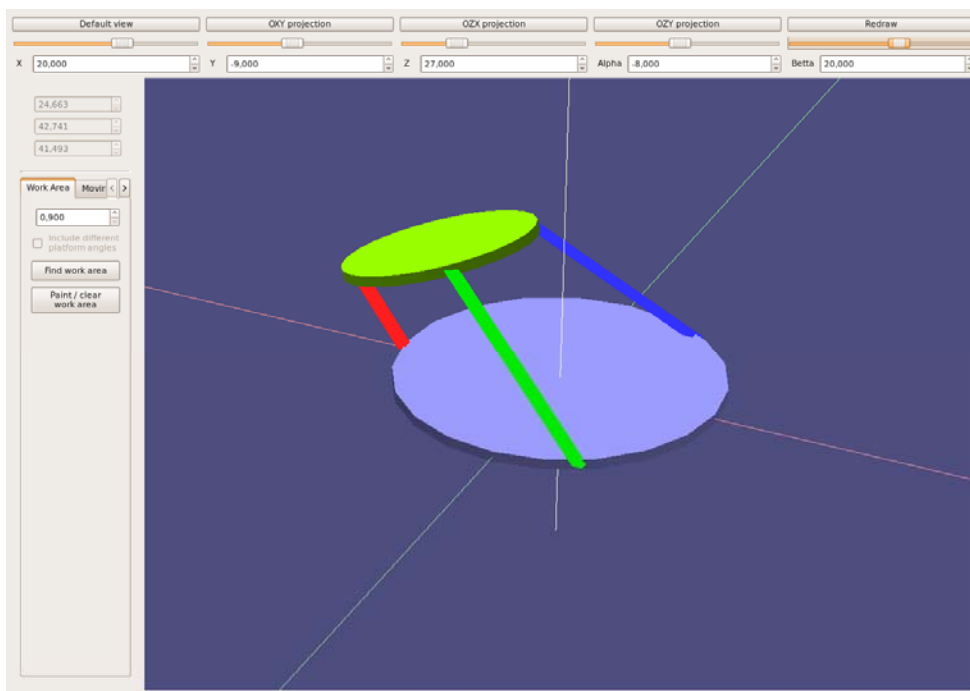


Рис. 1

Целью настоящей работы является создание автоматизированной программно-аппаратной системы для исследования прецизионных триподов. Данная АСНИ (автоматизированная система для научных исследований) обеспечит возможности решения широкого круга задач:

- 1) исследования модели трипода, выявления кинематических и динамических характеристик системы;
- 2) траекторного, терминального управления, слежения;
- 3) планирования движений;
- 4) адаптивного управления системой;
- 5) выявления характеристик реального трипода, калибровки модели и трипода.

Разрабатываемая математическая модель трипода описывает закон позиционирования платформы в обобщенной системе координат. Возможна калибровка системы следующим образом: для разной длины опор трипода в автоматическом режиме снимаются данные о положении платформы, далее эти данные сравниваются с аналитическими значениями и вносятся в математическую модель в виде погрешностей. Погрешности учитываются как при позиционировании платформы реального устройства, так и при имитационном моделировании системы.

Имитационное моделирование позволяет описывать поведение сложных систем в течение продолжительных периодов времени.

При разработке статической модели трипода были выделены следующие ограничения модели, присущие реальной системе:

- радиусы платформы и основания;
- точки крепления опор к платформе и основанию;
- максимальная и минимальная длина опор;
- диаметр опор;
- минимальные углы между опорами и платформой, опорами и основанием.

Проверка ограничений реализована в математической модели при расчете конфигурационного пространства. Также была реализована возможность внесения данных параметров в модель через графический пользовательский интерфейс, что позволяет моделировать и исследовать работу триподов различных конфигураций.

При разработке статической модели была реализована возможность позиционирования платформы трипода в пространстве с заданной точностью с учетом ограничений, накладываемых моделью. Также средствами OpenGL был реализован функционал визуализации состояний трипода (см. рис. 1) с возможностями интерактивного перемещения платформы, просмотра проекций системы на различные координатные оси.

Варьировать состояние системы возможно, изменяя длину опор в зависимости от положения платформы трипода и изменяя координаты платформы в зависимости от длины опор. Первый метод менее сложен алгоритмически вследствие того, что для заданных конфигурации трипода, положения и углов наклона платформы точки крепления опор к платформе в системе координат, связанной с основанием трипода, можно детерминированно вычислить через преобразование координат. Метод позволяет реализовать быстрые алгоритмы управления триподом через расчет необходимых изменений длины опор в зависимости от изменения положения платформы (при известном начальном состоянии системы). Однако данный метод может использоваться только для детерминированных систем.

Второй метод обладает более высокой алгоритмической сложностью (для произвольной конфигурации трипода), но позволяет с заданной точностью определить поведение системы при изменении длины опор. Реализуется метод через моделирование перемещения трипода. Для каждого малого дискретного изменения длины опоры в интервале, зависящем от точности моделирования, определяется наиболее соответствующее необходимой длине опор положение платформы путем перебора возможных состояний системы. Таким образом, возможно оценить различные допустимые положения платформы при одинаковой длине опор, т.е. детерминированность системы.

Перемещение платформы между двумя заданными точками при изменении ее углов и координат по линейному закону эффективнее реализуется с применением первого метода позиционирования: с помощью разбиения необходимого промежутка перемещения на минимально допустимые для заданной точности отрезки и последовательного перемещения платформы с рассчитанным шагом. Таким образом можно получить зависимости изменения длины опор от изменения координат и углов наклона платформы. Данная функциональность была реализована в разработанном программном обеспечении. Пример результатов работы алгоритма представлен на рис. 2.

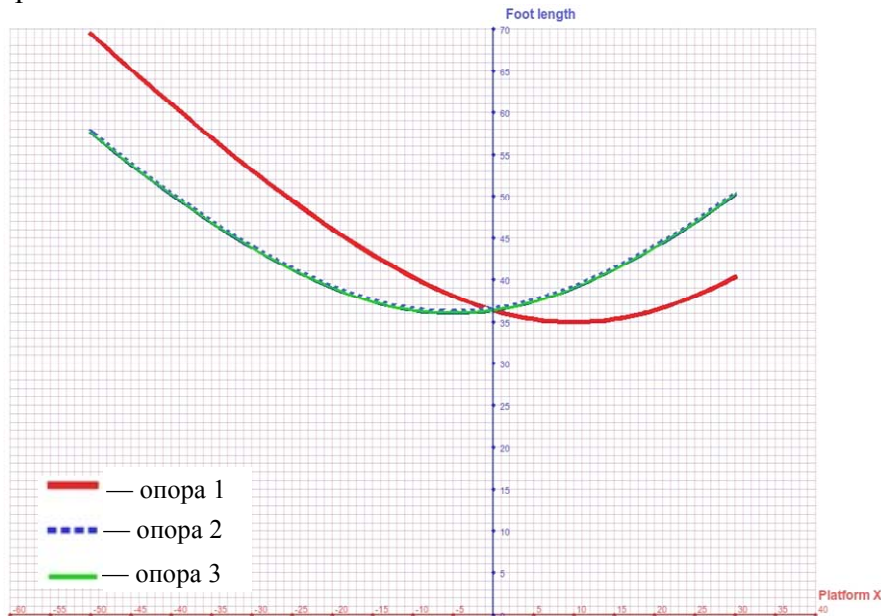


Рис. 2

Определение рабочей области трипода необходимо для:

- поиска „запрещенных зон“ и положений механизмов системы;
- создания более корректного алгоритма планирования сложных траекторий [3];
- моделирования работы, калибровки системы в граничных состояниях;

Определение рабочей области модели возможно с помощью:

- полного перебора возможных состояний системы с заданной точностью;
- волнового алгоритма;
- бинарного поиска;
- комбинированных алгоритмов, интервального анализа граничных областей.

Для решения задачи поиска рабочей области был реализован следующий алгоритм: максимально возможная рабочая область заданной конфигурации системы обходится в цикле по координатам X , Y , Z с целью проверки на возможность позиционирования платформы трипода в заданную точку без учета углов наклона платформы. Если находится граничная точка рабочей области, то от нее с помощью волнового алгоритма начинается поиск допустимых положений платформы по всем координатам и углам наклона. Таким образом учитываются все допустимые состояния платформы трипода при приемлемом времени поиска.

Пример найденных рабочих областей триподов различных конфигураций приведен на рис. 3. При изменении различных параметров моделируемого трипода его рабочая область может существенно измениться вследствие изменения допустимых граничных положений системы, увеличения влияния на рабочую область отдельных характеристик модели. Таким образом, варьируя параметры модели, возможно моделировать триподы с оптимальным для имеющейся задачи характеристиками рабочей области. На рисунке представлены рабочие области триподов с различными значениями параметрами минимальных и максимальных

длин опор и различными допустимыми углами наклона между опорами и платформой, опорами и основанием.

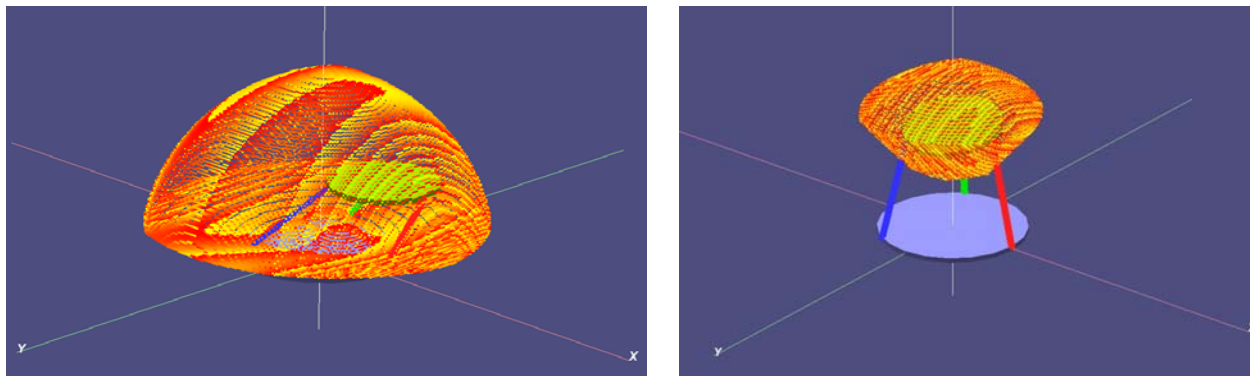


Рис. 3

Исследования осуществлены при проведении НИР в рамках реализации ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009—2013 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Merlet J.-P. Parallel Robots. The Netherlands: Springer, 2006. 401 p.
2. Kong X., Gosselin C. Type Synthesis of Parallel Mechanisms. Berlin: Springer-Verlag, 2007. 271 p.
3. Наука и образование [Электронный ресурс]: <<http://technomag.edu.ru/>>.

Сведения об авторах

- Семен Евгеньевич Антонов** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерных образовательных технологий; E-mail: semyon.antonov@gmail.com
- Мария Яковлевна Марусина** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии; E-mail: marusina_m@mail.ru
- Андрей Владимирович Лямин** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерных образовательных технологий; E-mail: lyamin@mail.ifmo.ru
- Сергей Степанович Киселев** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии; E-mail: kiselev@mail.ifmo.ru
- Юрий Валерьевич Федосов** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра технологии приборостроения; E-mail: yf01@yandex.ru

Рекомендована кафедрой
измерительных технологий
и компьютерной томографии

Поступила в редакцию
01.03.11 г.

И. К. МЕШКОВСКИЙ, А. А. УНТИЛОВ, С. С. КИСЕЛЕВ, А. В. КУЛИКОВ, Р. Л. НОВИКОВ

КАЧЕСТВО НАМОТКИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА

Обсуждаются вопросы качества изготовления чувствительных элементов волоконно-оптических гироскопов. Анализируются данные, полученные в процессе намотки чувствительных элементов. Определяются основные дефекты, возникающие при квадрупольной намотке, и природа их возникновения. Рассматривается задача точной установки шага укладки.

Ключевые слова: волоконно-оптический гироскоп, квадрупольная намотка, дефект намотки.

Введение. Волоконно-оптический контур представляет собой катушку оптического волокна с квадрупольным способом намотки. Он используется в качестве чувствительного элемента волоконно-оптического гироскопа (ВОГ), который получает все большее распространение в инерциальных системах навигации, управления и стабилизации [1—5].

Для снижения влияния температуры на характеристики ВОГ используется специальная квадрупольная намотка оптического волокна на катушку: равноудаленные от середины катушки участки волокна размещаются максимально близко. При таком способе необходимо попеременно наматывать на катушку волокно в разные стороны от середины (правое и левое плечо).

Можно выделить ряд факторов, усложняющих процесс создания контура:

— малый диаметр используемого волокна, что значительно затрудняет визуальный контроль;

— наличие в волокне внутренних напряжений;

— большая длина наматываемого волокна;

— несовершенство технологии намотки волоконного контура,

— специфика квадрупольного метода намотки.

Под параметрами качества намотки понимаются такие свойства чувствительного элемента ВОГ, которые влияют на выходные характеристики самого гироскопа:

— суммарная длина волоконного контура;

— соотношение длины левого и правого плеча контура;

— количество различных дефектов намотки.

Исследованию параметров качества чувствительного элемента ВОГ и факторов, на них влияющих, посвящена эта статья.

Дефекты намотки. Волоконно-оптический контур состоит из N слоев волокна, диаметр каждого из которых больше диаметра предыдущего слоя [6]. Как следствие, и длина волокна последующего слоя должна быть больше длины волокна:

$$L = \sqrt{\pi^2 (D_k + D_b (1 + (N - 1)\sqrt{3}))^2 + D_b^2 n}, \quad (1)$$

где D_k — диаметр каркаса рабочей катушки, D_b — диаметр волокна, n — число витков в одном слое.

Были обработаны данные, полученные в процессе намотки шести волоконно-оптических контуров с использованием фотоэлектрического датчика длины, имеющего погрешность ± 5 мм. На рис. 1 для сравнения приведены графики теоретических (отрезки, параллельные оси абсцисс) и практических зависимостей приращения длины волокна от номера слоя (a —

контур № 1, б — 2, в — 3, г — 4, д — 5, е — 6). Как видно, практические зависимости имеют скачкообразный характер. Стоит заметить, что изменение длины происходит как в сторону увеличения, так и уменьшения.

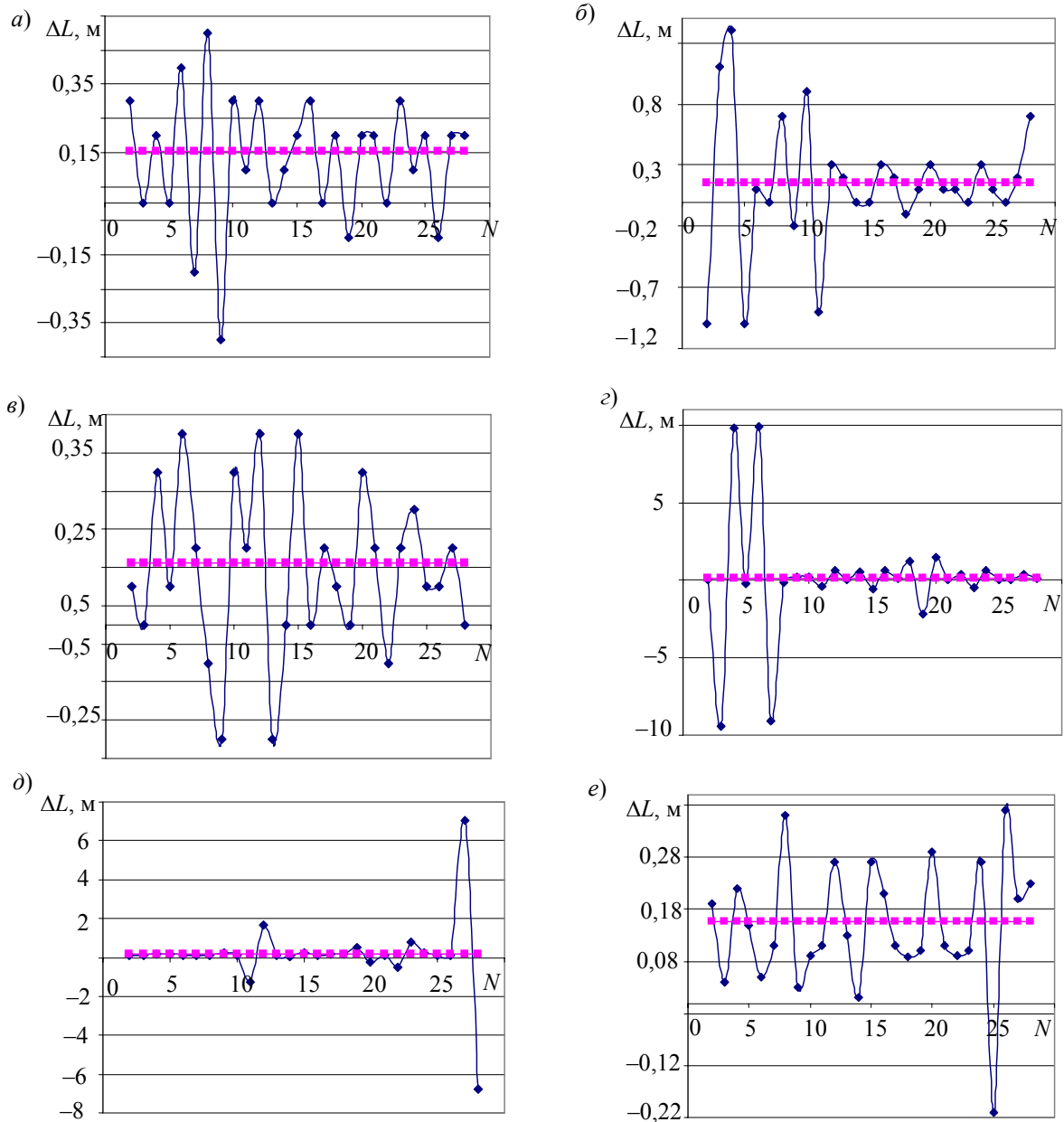


Рис. 1

Данное обстоятельство объясняется, прежде всего, тем, что структура волоконно-оптического контура содержит множество дефектов. Условно их можно разделить на постоянные и переменные, первые обусловлены конструкцией каркаса рабочей катушки, наличием угла между укладываемыми волокнами и бортом каркаса, чередованием намотки левого и правого плеча и т.д. К ним относятся перескок (рис. 2, 1), пристеночный дефект (рис. 2, 2) и дефект „выходящего волокна“ (рис. 2, 3). Перескок характеризуется регулярным смещением волокна через виток и происходит из-за различия между текущим углом намотки и углом намотки витков предыдущего слоя. Пристеночный дефект возникает вследствие того, что борт катушки образует „клин“ с ближайшим к нему витком предыдущего слоя, так что виток, непосредственно прилегающий к борту, проваливается в зоне основания „клина“. „Дефект выходящего волокна“ является следствием чередования правой и левой половины волокна при

намотке контура: последнему витку текущего слоя необходимо огибать „выходящее“ волокно последнего витка предыдущего слоя.

Случайные дефекты, как правило, обусловлены большим значением жесткости волокна, плохим качеством намотки волокна на транспортную катушку, ошибками укладчика и т.д. Среди них различают дефекты 1-го и 2-го рода. Дефект 1-го рода (рис. 2, 4) вызван нерегулярным смещением волокна на один или несколько витков, 2-го рода — нерегулярным смещением волокна поверх одного из предыдущих витков (рис. 2, 5).

На рис. 3 приведен пример дефекта 1-го рода.

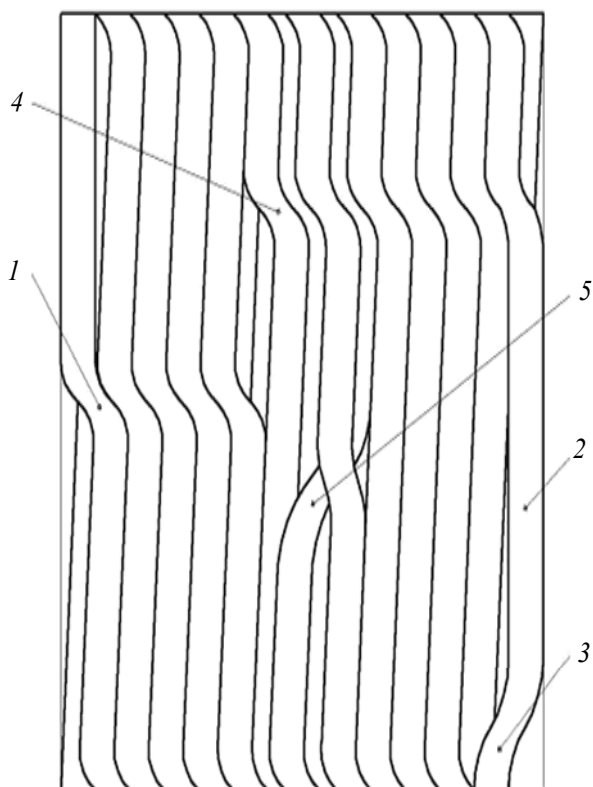


Рис. 2



Рис. 3

Наиболее значимыми причинами случайных дефектов являются жесткость волокна и качество его намотки на катушку — т.е. факторы, которые полностью не зависят от оператора. Было замечено, что при намотке контуров № 1, 3 и 6 данные условия были значительно лучше, нежели при намотке контуров № 2, 4 и 5. Как видно из рис. 1, зависимости приращенения длины слоя от номера слоя контуров второй группы характеризуются значительными скачками, которые, в конечном счете, вносят существенный вклад в неравенство длины левого и правого плеча интерферометра.

Наличие описанных дефектов в структуре квадрупольной намотки приводит, во-первых, к неодинаковому приращению длины волокна в каждом слое, вследствие чего увеличивается неравенство длины плеч ВОГ, во-вторых, к увеличению количества локальных изгибов волокна. Первое обстоятельство увеличивает зависимость контура от градиента температуры, второе — повышает рассеяние света в волноводе.

Шаг укладки. Длина волокна, составляющего волоконно-оптический контур, зависит от диаметра катушки и волокна, ширины катушки, шага укладки, дефектов укладки.

При намотке каждого нового слоя происходит приращение суммарного диаметра волоконно-оптического контура. В отсутствие дефектов будем иметь следующее значение диаметра контура:

$$D_{\text{кон}} = D_{\text{к}} + (2 + (N - 1)\sqrt{3})D_{\text{в}}. \quad (2)$$

Как следствие, длина волокна каждого последующего слоя будет прямо зависеть от диаметра катушки и волокна. Значения этих параметров не зависят от оператора, производящего намотку контура, в отличие от шага укладки, точная установка которого является очень важной задачей. При значении шага укладки, меньшем диаметра волокна на величину ΔD , через n витков, где $n = D_{\text{в}}/\Delta D$, может произойти дефект второго рода, что существенным образом нарушит регулярность структуры волоконно-оптического контура. Установка величины шага укладки большей, чем диаметр волокна, приведет к значительно меньшим нарушениям структуры, однако в этом случае один слой контура будет вмещать меньшее число витков. Кроме того, диаметр контура будет несколько сокращен, вследствие того что витки каждого последующего слоя будут попадать в промежутки между витками предыдущего слоя. Оба фактора приведут к уменьшению длины волокна в контуре.

Как следствие, необходимо точно измерять диаметры сечений оптического волокна для увеличения длины контура в пределах установленного числа квадруполей.

Заключение. В ходе проведенных исследований были обработаны данные, полученные при намотке волоконных контуров, выявлены основные дефекты намотки, а также определено влияние шага укладки на параметры качества. Было установлено, что дефекты намотки приводят, во-первых, к изменению длины контура (однако в силу своего случайного характера данное изменение различается для левого и правого плеча контура), во-вторых, к увеличению количества локальных изгибов волокна и, как следствие, увеличению рассеяния света в волноводе. Кроме того, была определена природа дефектов, которая напрямую связана с особенностями волокна, оборудования и технологии намотки.

Представленные результаты могут быть использованы в дальнейшей работе по исследованию, с целью повышения, качества намотки чувствительных элементов ВОГ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Peshekhonov V. G., Nesenjuk L. P., Staroseltsev L. P.* Trends in Development of Miniature Strapdown Inertial Measurement Units in CSRI Elektropribor // Symp. Gyro Technology. Stuttgart, Germany, 2000. P. 13.
2. *Paturel Y., Rumoroso V., Chapelon A., Honthaas J.* MARINS, the First FOG Navigation System for Submarines // Symp. Gyro Technology. Stuttgart, Germany, 2006. P. 17.
3. *Kolevatov A. P., Nikolaev S. G., Andreev A. G., Ermakov V. S., Dunaev D. A., Kel O. L., Malgin N. V.* Development of a Dual Mode Attitude and Heading Reference System on Fiber Optic Gyros for Land Vehicles // 13th Intern. Conf. on Integrated Navigation Systems. St. Petersburg, 2006. P. 338—347.
4. *Meshkovsky I. K., Strigalyov V. I., Deineka G. B., Peshekhonov V. G., Nesenjuk L. P.* A three-axis fiber-optic gyroscope for marine navigation systems // 16th Intern. Conf. on Integrated Navigation Systems. St. Petersburg, 2009. P. 7—12.
5. *Шереметьев А. Г.* Волоконно-оптический гироскоп. М.: Радио и связь, 1987. 152 с.
6. *Мешковский И. К., Киселев С. С., Куликов А. В., Новиков П. Л.* Дефекты намотки оптического волокна при изготовлении чувствительного элемента волоконно-оптического интерферометра // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 2. С. 47—51.

Сведения об авторах

- Игорь Касьянович Мешковский** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра физики и техники оптической связи; заведующий кафедрой; E-mail: igorkm@spb.runnet.ru
- Александр Алексеевич Унтилов** — канд. техн. наук; ОАО Концерн «ЦНИИ „Электроприбор“», Санкт-Петербург; начальник лаборатории; E-mail: untilov_aa@mail.ru

- Сергей Степанович Киселев** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии;
E-mail: kiselev@mail.ifmo.ru
- Андрей Владимирович Куликов** — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра физики и техники оптической связи; инженер; E-mail: a.kulikov86@gmail.com
- Роман Леонидович Новиков** — студент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии;
E-mail: novikov_r_l@mail.ru

Рекомендована кафедрой
измерительных технологий
и компьютерной томографии

Поступила в редакцию
01.03.11 г.

УДК 539.143.43, 53.082.7, 53.084.885, 620.179.162

Д. В. ТОЛКОВИЧ

РАЗРАБОТКА УЧЕБНОГО МАКЕТА МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНОГО ТОМОГРАФА

Представлены результаты разработки учебного макета магнитно-резонансного томографа.

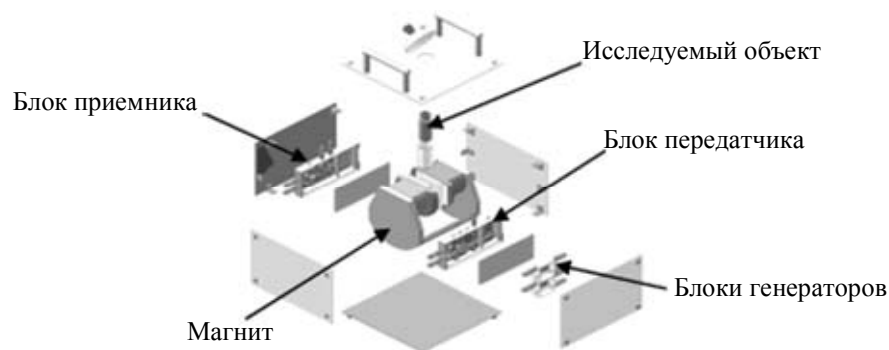
Ключевые слова: магнитно-резонансный томограф, лабораторная работа.

К моменту окончания вуза студенты должны иметь как теоретические знания, так и практические навыки в выбранной ими отрасли науки и техники. Так, например, студентам, планирующим связать свою жизнь с приборостроением или неразрушающим контролем в промышленности, будет полезно наблюдать явление ядерно-магнитного резонанса, а также иметь навыки работы на соответствующем оборудовании, что можно сделать в рамках курса лабораторных работ по предмету „Физические основы получения информации“ или в рамках учебно-исследовательской работы студентов. В настоящее время на кафедре измерительных технологий и компьютерной томографии установлен магнитно-резонансный томограф (МРТ), обладающий следующими характеристиками: пространственное разрешение 64×64 пкс/см, рабочая область 3 см, напряженность магнитного поля 0,125 Тл. Однако характеристики МРТ не позволяют в должной мере использовать его в учебном процессе вследствие невысокой разрешающей способности и его стационарности.

Разработка учебного макета переносного МРТ (см. рисунок) позволит получать более качественное изображение исследуемых объектов, расширит возможности применения данного прибора в учебном процессе, кроме того, миниатюризация томографа позволит оперативно проводить исследования с его помощью в любой лаборатории, клинике и на выезде [1].

В ходе исследования были разработаны: структурная схема, функциональная схема, принципиальные электрические схемы радиочастотного тракта (приемника и передатчика) мини-МРТ. Рассчитаны параметры генератора, фазовых импульсов, смесителя, а также коэффициент усиления оконечного усилителя, схема катушек градиентной системы. Разработана синхронизация импульсных последовательностей. Разработан вариант компоновки учебной установки мини-МРТ (см. рисунок) на основе постоянного магнита с напряженностью поля

0,3 Тл. Корпус, также исполняющий роль электромагнитного экрана, собран из стальных листов для увеличения коэффициента экранирования.



Практические опыты с генератором и фазоделителем показали высокую стабильность их работы, которая достигает 10^{-3} МГц. Разработанный высокоскоростной предварительный усилитель в блоке приемника обладает чувствительностью 20 пВ и скоростью 13 000 В/мкс, что позволяет усилить кратковременные всплески спектра [1]. Разрешающая способность генератора градиентной системы составляет 4096×4096 пкс/см при области исследования 3 см в диаметре [2]. В перспективе предполагается применение магнитных линз для увеличения глубины и фокусирования сканируемой области объекта [3].

Методы, предложенные при разработке макета мини-МРТ и отдельных его блоков, представляют интерес для промышленного исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Толкович Д. В. Разработка учебного макета МР-томографа // Сборник аннотаций ВКР. СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. 60 с.
2. Толкович Д. В. Задающий генератор градиентных импульсов // Измерения в современном мире — 2009. Сб. тр. 2-й Междунар. науч.-практ. конф. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. С. 164—166.
3. Белов П. А., Симорский К. Р., Иконен П. и др. Передача изображения с разрешением, много меньшим длины волны, в микроволновом, терагерцовом и оптическом диапазоне частот // Радиотехника и электроника. 2007. Т. 52, № 9. С. 1—15.

Дмитрий Владиславович Толкович —

Сведения об авторе

аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии;
E-mail: pyby@inbox.ru

Рекомендована кафедрой
измерительных технологий
и компьютерной томографии

Поступила в редакцию
01.03.11 г.

SUMMARY

P. 7—10.

UP-TO-DATE REQUIREMENTS TO MAINTENANCE OF MEASUREMENTS UNIFORMITY

The basic requirements to control over measurements uniformity stipulated by the Russian Federation Law 102-FZ “On maintenance of measurements uniformity” of June 26th, 2008 are considered.

Keywords: physical quantity, measurement uniformity, measuring tool, standard measure.

Data on author

Igor V. Pavlov — Cand. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Measuring Technologies and Computer Tomography;
E-mail: gipavlov@hotmail.ru

P. 11—15.

INFORMATION-MEASURING COMPLEX WITH BIOFEEDBACK

An example of design and construction of information-measuring system with biofeedback is presented. The system under consideration is a metrological mean of geodetic measurements, and can also be used for certification of verification tools for the measuring instruments.

Keywords: measuring tool, biofeedback, verification tool.

Data on authors

Eugeny A. Vorontsov — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Measuring Technologies and Computer Tomography;
E-mail: voroncov_evgenii@mail.ru

Nikita S. Vinogradov — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Measuring Technologies and Computer Tomography; Lecturer;
E-mail: vifmo@rambler.ru

P. 15—19.

FIBER-OPTIC BASIS FOR VERIFICATION OF TACHEOMETER DISTANCE-MEASURING UNIT

A geodetic basis design for calibration of distance-measuring unit of tacheometer is described. The basis employs optical fiber as the basis lines.

Keywords: tacheometer, verification, laser range-finder, fiber optic, geodetic basis.

Data on authors

Nikita S. Vinogradov — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Measuring Technologies and Computer Tomography; Lecturer;
E-mail: vifmo@rambler.ru

Eugeny A. Vorontsov — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Measuring Technologies and Computer Tomography;
E-mail: voroncov_evgenii@mail.ru

P. 20—26.**APPLICATION OF SIGNAL MICROPROCESSORS IN RESTORATION OF DISTORTED IMAGES**

Peculiarities of hardware realization of algorithms of restoration of distorted (blurred, de-focused, and/or noisy) images are considered. Both the direct problem (distortion modeling or simulation of actual image) and inverse problem (image restoration) are analyzed.

Keywords: image distortion, direct and inverse problems, signal microprocessors, programmable logical integrated circuit.

Data on authors

- Konstantin A. Kiryanov** — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Measuring Technologies and Computer Tomography; E-mail: kiryancon@front.ru
- Valery S. Sizikov** — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Measuring Technologies and Computer Tomography; E-mail: sizikov2000@mail.ru

P. 27—35.**PROMISING APPROACHES TO ANALYSIS OF INFORMATIVE PHYSIOLOGICAL SIGNALS AND MEDICAL IMAGES OF A HUMAN DURING INTELLECTUAL ACTIVITY**

Methods of identification of informative features of physiological parameters in the course of intellectual activity are considered. Efficiency of wavelet transformations to analyze signals and images is demonstrated.

Keywords: intellectual activity, psycho physiological indicators, wavelet analysis, tomography images.

Data on authors

- Elena M. Anodina-Andrievskaya** — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Measuring Technologies and Computer Tomography
- Sergey V. Bozhokin** — Cand. Phys.-Math. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Theoretical Physics; E-mail: bsvjob@mail.ru
- Maria Ya. Marusina** — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Measuring Technologies and Computer Tomography; E-mail: marusina_m@mail.ru
- Yury Z. Polonsky** — Dr. Biolog. Sci.; N. P. Bekhtereva Institute of the Human Brain RAMS, Laboratory of Stereotactic Methods, St. Petersburg; Leading Scientist; E-mail: yzpol @qip.ru
- Nikolay B. Suvorov** — Dr. Biolog. Sci., Professor; Institute of Experimental Medicine of the North West Branch RAMS, St. Petersburg; St. Petersburg State Electrotechnical University, Department of Bioengineering Systems; E-mail: nbsuvorov@yandex.ru

P. 35—38.**COMPARATIVE CHARACTERIZATION OF PROGRAMS FOR MULTIFRACTAL ANALYSIS**

Brief presentation of fractal and multifractal is given. Three types of multifractal analysis based on three different programs for Linux, Fractan, and Multifrac are analyzed. Comparison of the programs characteristics is performed.

Keywords: analysis, multifractal, fractal, signal processing, statistical sum, Hurst index.

Data on authors

- Alla A. Vinogradova* — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Mechatronics; E-mail: vinogradova_a@list.ru
- Sergey V. Trutnenko* — Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Mechatronics; E-mail: trutnenko@gmail.com

P. 39—44.

THEORETICAL MODEL OF THERMO-OPTICAL EXCITATION OF ULTRASONIC WAVES IN SOLDERED THIN-WALLED PRODUCTS

A theoretical model of excitation and propagation of ultrasonic waves in thin-walled soldered structure is developed. The waves in question are excited due to thermo-optical effect caused by absorption of pulsed laser radiation in the soldered thin-walled product of space-rocket technique under testing.

Keywords: ultrasonic wave, thermo-optical effect, laser radiation, nondestructive check, soldering.

Data on author

- Igor Yu. Kinzhagulov* — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Measuring Technologies and Computer Tomography; E-mail: kinzhiki@mail.ru

P. 45—50.

LASER-ULTRASONIC DIAGNOSTICS OF RESIDUAL STRESS IN THIN-WALLED ELEMENTS OF SPACE-ROCKET TECHNIQUE

Applicability of laser-ultrasonic method for estimation of residual stress in thin-walled elements is studied experimentally. The investigation is carried out with the use of a laser-ultrasonic defectoscope and laser acousto-optical converters of longitudinal and superficial Raleigh waves.

Keywords: reliable functioning, residual stress, laser-ultrasonic diagnostics, thin-wall elements.

Data on author

- Vladimir A. Bychenok* — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Measuring Technologies and Computer Tomography; E-mail: bychenok-vladimr@mail.ru

P. 50—54.

LASER-ULTRASONIC TESTING OF THIN-WALLED SOLDERED JUNCTIONS IN LIQUID-PROPELLANT ROCKET ENGINE CHAMBER

Laser-ultrasonic method is applied for quality control of thin-walled elements of liquid-propellant rocket engine elements. Results of the experiments are checked upon hydro test strength data.

Keywords: laser-ultrasonic testing, laser radiation, nondestructive check, soldering.

Data on authors

- Vladimir A. Bychenok* — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Measuring Technologies and Computer Tomography; E-mail: bychenok-vladimr@mail.ru
- Igor Yu. Kinzhagulov* — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Measuring Technologies and Computer Tomography; E-mail: kinzhiki@mail.ru

P. 55—61.

CRYOGENIC TIME-PROJECTION IONIZATION CHAMBER FOR INVESTIGATION OF μ -MESON CAPTURE BY DEUTERON IN MUSUN EXPERIMENT

The experimental goal of MuSUN experiment at Paul Scherrer Institute (PSI) is a high-precision measurement of the rate for μ -meson capture by deuteron to better than 1,5 %. Experimental technique based on Cryogenic Time Projection Chamber (CryoTPC) specially developed at St. Petersburg Nuclear Physics Institute is applied. The chamber is filled with deuterium of ultra-high isotopic and chemical purity. The detector is cooled by closed neon circulation system. Basic operation principles of the CryoTPC and its cooling system are described.

Keywords: time projection chamber, μ -meson capture, deuterium, cryogenics.

Data on authors

- Ilya Yu. Ivanov* — B. P. Konstantinov Petersburg Nuclear Physics Institute RAS; Department of Instruments and Methods of Polarization Measurements of St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Senior Laboratory Assistant; E-mail: ivannov_ilya@mail.ru
- Alexander A. Vasiliev* — Cand. Phys.-Math. Sci.; B. P. Konstantinov Petersburg Nuclear Physics Institute RAS; Department of Instruments and Methods of Polarization Measurements of St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Head of Department; E-mail: vassilie@pnpi.spb.ru
- Marat E. Vznuzdaev* — Cand. Chem. Sci.; B. P. Konstantinov Petersburg Nuclear Physics Institute RAS; Department of Instruments and Methods of Polarization Measurements of St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Senior Scientist; E-mail: marat@pnpi.spb.ru
- Nikolay I. Voropaev* — Cand. Phys.-Math. Sci.; B. P. Konstantinov Petersburg Nuclear Physics Institute RAS; Senior Scientist; E-mail: voropaev@pnpi.spb.ru
- Peter Kammel* — PhD, Professor; University of Washington, Seattle, USA; E-mail: pkammel@uw.edu
- Peter A. Kravtsov* — Cand. Phys.-Math. Sci.; B. P. Konstantinov Petersburg Nuclear Physics Institute RAS; Department of Instruments and Methods of Polarization Measurements of St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Senior Scientist; E-mail: pkravt@gmail.com
- Alexander V. Nadtochy* — Cand. Phys.-Math. Sci.; B. P. Konstantinov Petersburg Nuclear Physics Institute RAS; Senior Scientist; E-mail: avnad@pnpi.spb.ru
- Gennady E. Petrov* — B. P. Konstantinov Petersburg Nuclear Physics Institute RAS; Leading Engineer; E-mail: petrov@pnpi.spb.ru
- Claude Petitjean* — PhD, Paul Scherrer Institute, Switzerland; Leading Researcher; E-mail: Claude.Petitjean@psi.ch
- Viktor A. Trofimov* — Cand. Phys.-Math. Sci.; B. P. Konstantinov Petersburg Nuclear Physics Institute RAS; Department of Instruments and Methods of Polarization Measurements of St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Senior Scientist; E-mail: vtrof@gmail.com

P. 62—67.

INSTRUMENTATION FOR EXPERIMENTAL STUDY OF CROSS SECTION OF DD-NUCLEAR FUSION REACTION WITH POLARIZED COMPONENTS IN POLFUSION PROJECT

The polarized atomic beam sources are to be utilized in experiments to measure the cross sections of nuclear fusion reactions $d + d \rightarrow {}^3\text{He} + n$ and $d + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + p$ with polarized components. The proposed experiment is supposed to allow for measurements providing a significant contribution to fundamental research on nuclear fusion reactions and astrophysical research.

Keywords: polarized atomics, nuclear fusion reactions, astrophysical research.

Data on authors

- Sergey N. Terekhin** — B. P. Konstantinov Petersburg Nuclear Physics Institute RAS; Scientist; E-mail: serzh@gtn.ru, lab19@yandex.ru
- Alexander A. Vasiliev** — Cand. Phys.-Math. Sci.; B. P. Konstantinov Petersburg Nuclear Physics Institute RAS; Department of Instruments and Methods of Polarization Measurements of St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Head of Department; E-mail: vassilie@pnpi.spb.ru
- Marat E. Vznuzdaev** — Cand. Chem. Sci.; B. P. Konstantinov Petersburg Nuclear Physics Institute RAS; Department of Instruments and Methods of Polarization Measurements of St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Senior Scientist; E-mail: marat@pnpi.spb.ru
- Leonid M. Kotchenda** — Cand. Techn. Sci.; B. P. Konstantinov Petersburg Nuclear Physics Institute RAS; Leading Scientist; E-mail: kotch@pnpi.spb.ru
- Ilya Yu. Ivanov** — B. P. Konstantinov Petersburg Nuclear Physics Institute RAS; Department of Instruments and Methods of Polarization Measurements of St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Senior Laboratory Assistant; E-mail: ivannov_ilya@mail.ru
- Sergey S. Kiselev** — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Measuring Technologies and Computer Tomography; E-mail: kiselev@mail.ifmo.ru
- Maria Ya. Marusina** — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Measuring Technologies and Computer Tomography; E-mail: marusina_m@mail.ru
- Peter A. Kravtsov** — Cand. Phys.-Math. Sci.; B. P. Konstantinov Petersburg Nuclear Physics Institute RAS; Department of Instruments and Methods of Polarization Measurements of St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Senior Scientist; E-mail: pkravt@gmail.com
- Alexander V. Nadtochy** — Cand. Phys.-Math. Sci.; B. P. Konstantinov Petersburg Nuclear Physics Institute RAS; Senior Scientist; E-mail: avnad@pnpi.spb.ru
- Viktor A. Trofimov** — Cand. Phys.-Math. Sci.; B. P. Konstantinov Petersburg Nuclear Physics Institute RAS; Department of Instruments and Methods of Polarization Measurements of St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Senior Scientist; E-mail: vtrof@gmail.com

P. 68—71.

TWO-COORDINATE ROTATABLE PLATFORM

The possibility is analyzed for development of rotatable platform based on application of a leverage (such as arms and rods) instead of direct turn drives.

Keywords: rotatable platform, precision positioning.

Data on authors

- Gennady B. Daineka** — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical Communications Physics and Technology
- Sergey S. Kiselev** — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Measuring Technologies and Computer Tomography E-mail: kiselev@mail.ifmo.ru
- Maria Ya. Marusina** — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Measuring Technologies and Computer Tomography; E-mail: marusina_m@mail.ru
- Igor K. Meshkovsky** — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical Communications Physics and Technology; Head of Department; E-mail: igorkm@spb.runnet.ru
- Mikhail P. Marusin** — Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Monitoring and Prediction of Information Threats

- Vyacheslav A. Loparev** — Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Measuring Technologies and Computer Tomography; E-mail: viper-sl@hotmail.com
- Maxim N. Shugaev** — Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Measuring Technologies and Computer Tomography; E-mail: max2008sh@gmail.com

P. 72—75.**SOFTWARE TOOL FOR STUDY OF MATHEMATICAL MODELS OF PRECISION TRIPOD**

Approaches to the problem of development of automated system for precision tripod study are formulated. Limitations imposed by the employed mathematical model are analyzed; tripod positioning, configuration space of the system, and linear motion of the tripod are considered. An example of the system visual presentation is given.

Keywords: precision arrangements, automated system for scientific investigation, firmware, tripod, parallel kinematics mechanisms.

Data on authors

- Semyon E. Antonov** — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computer Educational Technologies; E-mail: semyon.antonov@gmail.com
- Maria Ya. Marusina** — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Measuring Technologies and Computer Tomography; E-mail: marusina_m@mail.ru
- Andrey V. Lyamin** — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computer Educational Technologies; E-mail: lyamin@mail.ifmo.ru
- Sergey S. Kiselev** — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Measuring Technologies and Computer Tomography; E-mail: kiselev@mail.ifmo.ru
- Yury V. Fedosov** — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Instrument-Making Technology; E-mail: yf01@yandex.ru

P. 76—80.**THE QUALITY OF WINDING OF FIBER-OPTIC GYROSCOPE SENSOR**

The problem of manufacturing quality of a fiber-optic gyroscope sensor is discussed. Data obtained during the winding coils are analyzed. The major defects of the quadrupole winding and the nature of its occurrence are identified. The problem of precision installation of winding pitch is considered.

Keywords: fiber-optic gyroscope, quadrupole winding, winding defect.

Data on authors

- Igor K. Meshkovsky** — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical Communications Physics and Technology; Head of Department; E-mail: igorkm@spb.runnet.ru
- Alexander A. Untilov** — Cand. Techn. Sci.; Public Corporation Concern “TSNII Electropribor”; Head of Laboratory; E-mail: untilov_aa@mail.ru
- Sergey S. Kiselev** — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Measuring Technologies and Computer Tomography; E-mail: kiselev@mail.ifmo.ru
- Andrey V. Kulikov** — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical Communications Physics and Technology; Engineer; E-mail: a.kulikov86@gmail.com

Roman L. Novikov — Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Measuring Technologies and Computer Tomography;
E-mail: novikov_r_1@mail.ru

P. 80—81.

DEVELOPMENT OF A TRAINING MODEL OF MR-IMAGER

A training model of MR-imager is developed. General schematic, electrical drawings of radio-frequency channel (transmitter and receiver) of the model are presented.

Keywords: MR-imager, laboratory training.

Data on author

Dmitry V. Tolkovich — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Measuring Technologies and Computer Tomography;
E-mail: pyby@inbox.ru

ИНФОРМАЦИЯ

СООБЩЕНИЕ

12—17 сентября 2011 г. в СПбГУ ИТМО будет проходить XIV International Workshop on Polarized Sources, Targets & Polarimetry (PST2011).

Место проведения: СПбГУ ИТМО,

Кронверкский пр., 49, актовЫй зал (открытие);

Биржевая линия, д. 4; <<http://pstp2011.lkst.ru/>>.

Задачей Международного сообщества по спиновой физике является изучение спиновых явлений в ядерных реакциях. Спин — это квантовая характеристика собственного момента импульса элементарной частицы. Он является фундаментальным свойством структурных элементов материи, таких как лептоны или кварки.

XIVth International Workshop on Polarized Sources, Targets & Polarimetry

12-15 September 2011
St. Petersburg
RUSSIA

TOPICS

- Polarized gas targets
- Polarized solid targets
- Polarized ion sources
- Polarized electron sources
- Polarimetry
- Applications and new techniques

International SPIN Physics Committee
<http://www.spin-community.org/>

Steffens E., Erlangen (Chair)	Efremov A.V., JINR	Prepost R., Wisconsin
Roser T., BNL (Past-Chair)	Fidecaro G. *, CERN	Prescott C.Y. *, SLAC
Milner R.G., MIT (Chair-Elect)	Haeblerli W. *, Wisconsin	Saito N., KEK
Anselmino M., Torino	Imai K., Kyoto	Sakai H., Tokyo
Belov A.S., INR	Krisch A.D., Michigan	Soergel V. *, Heidelberg
Bradamante F. *, Trieste	Lenisa P., Ferrara	Stephenson E.J., Indiana
Courant E.D. *, BNL	Mallot G., CERN	Stroher H., COSY
Crabb D.G. *, Virginia	Masaike A. *, Kyoto	Tyurin N.E., IHEP
Gao H., Duke	van Oers W.T.H. *, Manitoba	
	Poelker M., JLAB	* Honorary Members

Local Organizing Committee

- Alexander Vasilyev
- Mariya Marusina
- Eugenia Brui
- Peter Kravtsov
- Kirill Grigoryev

Sponsors:

Contact Address

Kronverksky pr. 49, 197101,
St. Petersburg, Russia

Mariya Marusina
Phone: +7 (812) 233-59-52
Fax: +7 (812) 498-10-70

Alexander Vasilyev
Phone: +7 (921) 311-11-71
E-mail: pstp2011@gmail.com
<http://www.pstp2011.lkst.ru/>

photo: P. Kravtsov

Проблемы спиновой физики обсуждаются в рамках конференций SPIN: с 1960 по 1994 г. — „Поляризационные явления в ядерных исследованиях“; с 1974 по 1998 г. — „Спиновая физика в физике высоких энергий“. В 2000 г. (Осака) был организован „Международный симпозиум по спиновой физике“. В 2010 г. в г. Юлих прошел симпозиум SPIN2010 <<https://www.congressa.de/SPIN2010/?path=spin2010>>. С материалами предыдущих симпозиумов можно ознакомиться на сайте <<http://www.fz-juelich.de/ikp/pax/spin/index.php?id=2>>.

В рамках Симпозиума проводятся международные совещания, связанные с экспериментальными и теоретическими вопросами спиновых экспериментов <<http://www.fz-juelich.de/ikp/pax/spin/index.php?id=3>>:

- поляризованные пучки (ионные, электронные, нейтронные, антипротонные и т.д.),
- поляризованные мишени (динамические или постоянно поляризованные твердотельные мишени, газовые мишени),
- поляриметрия пучков и мишеней,
- теория спиновых экспериментов.

Серию спиновых конференций и рабочих совещаний организует „Международный комитет по спиновой физике“ <<http://www.fz-juelich.de/ikp/pax/spin/index.php?id=4>>.

Развитие поляризованных источников и мишеней возможно только в рамках широкой международной коллаборации, определяющей основные пути научного и технического развития в данной области.

В рамках PST2011 рассматриваются экспериментальные и технические аспекты создания поляризованных мишеней, поляризованных пучков и поляриметрии. Традиционно такие исследования проводятся в США, Европе, Японии и России. Совещания проводятся каждые два года в научных центрах, которые реализуют наиболее интересные исследования в спиновой физике. Решение о проведении PST2011 в Санкт-Петербурге на базе СПбГУ ИТМО и Петербургского института ядерной физики им. Б. П. Константинова РАН (ПИЯФ) было принято на международном симпозиуме SPIN2010, проходившем в г. Юлих (Германия).

В соответствии с традицией совещание начнется с приглашенных докладов по основным ключевым направлениям развития за прошедшие два года. Далее совещание будет проводиться по следующим секциям.

1. Поляризованные водородные и дейтериевые мишени.
2. Водородные и дейтериевые мишени с созданием поляризации с помощью лазерной техники.
3. Измерение поляризации мишеней с помощью пучков частиц.
4. Поляриметрия пучков.
5. Томография с использованием ядерного магнитного резонанса на инертных газах.
6. Источники поляризованных электронов.
7. Поляриметрия электронных пучков.
8. Поляризованные ионные источники.
9. Развитие атомарных пучков. Теоретические и прикладные аспекты.

В рамках совещания запланировано проведение Молодежной школы „Современные направления ядерной физики и физики высоких энергий“ с целью привлечения талантливой молодежи к работам, проводимым в рамках международной коллаборации на базовой кафедре „Приборы и методы поляризационных экспериментов“, созданной в ПИЯФ.

Ведущими учеными в области ядерной физики и физики высоких энергий планируется проведение мастер-классов по следующим направлениям.

1. Введение в историю ядерной физики и физики высоких энергий. Задачи сегодняшнего дня. Перспективы.
2. Понятие спина частиц и спиновые явления в ядерной физике.
3. Ускорители заряженных частиц. Краткий обзор экспериментов, проводимых на ускорителях заряженных частиц.
4. Экспериментальная техника, применяемая при проведении экспериментов на ускорителях заряженных частиц. Мишени, применяемые на ускорителях заряженных частиц. Детекторные системы, применяемые в экспериментах.
5. Поиск бозона Хиггса в ЦЕРН. Пример построения экспериментальной установки. Принципы международной коллаборации.

6. Принципы получения поляризованных частиц в ядерной физике. Источники поляризованных атомов.

7. Структура построения науки в США и Европе. Ступени карьерного роста, система финансирования, система грантов.

Председатель локального организационного комитета
СПбГУ ИТМО Мария Яковлевна МАРУСИНА

Приглашаем к участию всех заинтересованных лиц.