



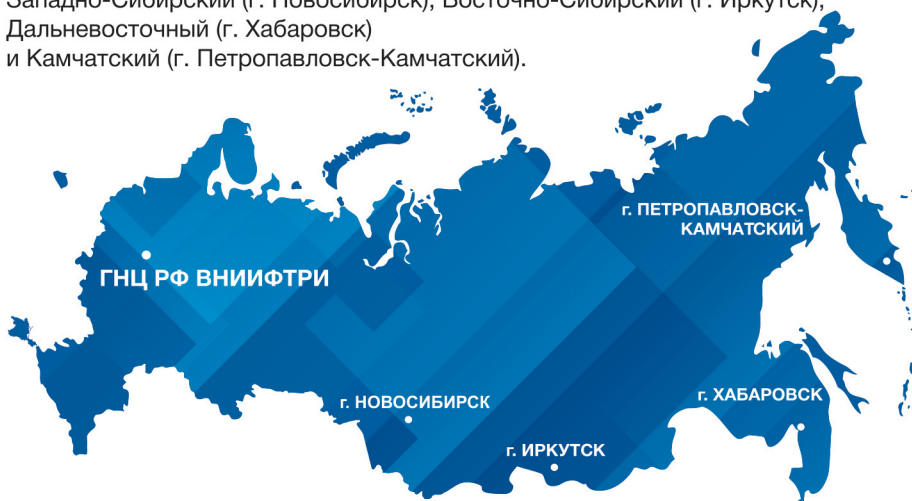
ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ
ТЕХНИКА
2020
№1



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ГЛАВНЫЙ МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ ЦЕНТР ГОСУДАРСТВЕННОЙ СЛУЖБЫ ВРЕМЕНИ, ЧАСТОТЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ (ГМЦ ГСВЧ), ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ.

Сегодня в состав института входят филиалы:

Западно-Сибирский (г. Новосибирск), Восточно-Сибирский (г. Иркутск),
Дальневосточный (г. Хабаровск)
и Камчатский (г. Петропавловск-Камчатский).



В настоящее время ВНИИФТРИ хранит и использует более 35% всех государственных первичных эталонов России:



В 2020 году ВНИИФТРИ отметит 65-летие!

ВНИИФТРИ производит:

- вторичные и рабочие эталоны, высокоточную аппаратуру, измерительные системы, средства контроля и автоматизации;
- буферные растворы и стандарт-титры — рабочие эталоны, используемые в области pH-метрии для калибровки и измерений;
- измерительную и анализирующую высокоточную аппаратуру различного назначения, включая стандарты времени и частоты, осциллографы цифровые запоминающие, миллитесламетры, термометры сопротивления платиновые вибропрочные;
- дозиметрическую и радиометрическую аппаратуру, аппаратуру радиационного контроля;
- гидроакустическую, гидрофизическую и сейсмометрическую аппаратуру, акустические и акустооптические приборы различного назначения, в т.ч. спектроанализаторы для экологического контроля, средства контроля состояния оборудования нефтегазового комплекса и физиотерапевтической аппаратуры;
- другое прецизионное метрологическое оборудование.

Благодаря уникальной научно-технической базе институт оказывает широкий спектр метрологических услуг, требующих высокого уровня точности:

- поверка и калибровка средств измерений;
- испытания СИ в целях утверждения типа;
- разработка и аттестация методик (методов) измерений;
- аттестация испытательного оборудования;
- аттестация чистых помещений;
- сертификация строительных испытательных лабораторий;
- сертификация и испытания продукции;
- метрологическая экспертиза проектов;
- предоставление открытого доступа к серверам синхронизации шкалы времени по протоколу NTP и др.

Институт разрабатывает, совершенствует, содержит, сличает и применяет государственные первичные эталоны единиц величин; обеспечивает воспроизведение национальной шкалы времени и удовлетворяет потребности пользователей в информации о параметрах вращения Земли; ведет фундаментальные и прикладные научные исследования и разработки в закрепленных областях и видах измерений; участвует в создании и ведении Федерального информационного фонда по обеспечению единства измерений, выполняет функции головной организации Росстандарта по поддержанию и развитию метрологического обеспечения системы ГЛОНАСС.

Многие эталоны ВНИИФТРИ входят в число лучших в мире, например, ГПЭ времени и частоты, ГПЭ единицы температуры, ГПСЭ больших длин, ГПЭ показателя pH, национальная шкала времени, формируемая ГМЦ ГСВЧ, и др.



**141570, Московская обл., Солнечногорский р-н, г. Солнечногорск,
р.п. Менделеево, промзона ФГУП «ВНИИФТРИ», корп. 11
Тел.: (495) 526-63-63; факс: (495) 660-00-92**

E-mail: office@vniiftri.ru

Сайт: www.vniiftri.ru

Интернет-портал: oscilloscope-vniiftri.ru

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА 2020

№ 1 январь

Ежемесячный
научно-технический
журнал
основан в 1939 г.

Издаётся
с приложением
«Метрология»

УЧРЕДИТЕЛИ

Федеральное агентство
по техническому регулированию
и метрологии

ФГУП «Всероссийский
научно-исследовательский
институт метрологии
им. Д. И. Менделеева»

ФГУП «Всероссийский
научно-исследовательский
институт оптико-физических
измерений»

ФГУП «Всероссийский
научно-исследовательский
институт физико-технических и
радиотехнических измерений»

ФГУП «Всероссийский
научно-исследовательский
институт метрологической
службы»

ФГУП «Российский
научно-технический центр
информации по стандартизации,
метрологии и оценке соответствия»

Метрологическая академия

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

- И. С. Сильвестров, В. Ф. Фатеев, Р. А. Давлатов.** Методы калибровки космических гравитационных градиентометров 5
- И. В. Безменов.** Вычисление эфемерид и временных поправок навигационных космических аппаратов ГЛОНАСС и GPS в оперативном режиме по данным измерений 11
- Е. В. Еремин.** Оценка погрешности результатов косвенных измерений некоторых величин 18

ИЗМЕРЕНИЯ В ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

- А. В. Апрельев, В. С. Беляев, И. М. Малай, В. Н. Шорин.** Метрологическое обеспечение измерений скорости и пропускной способности в пакетных сетях передачи данных: проблемы и перспективы развития 25

ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- О. В. Колмогоров, А. Н. Щипунов, О. В. Денисенко, С. С. Донченко, Д. В. Прохоров, С. Г. Бувеев, Е. В. Чемесова.** Уменьшение погрешности измерений задержек распространения сигнала с помощью оптического рефлектометра с пикосекундным разрешением 30

ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ

- С. И. Донченко, И. Ю. Блинов, И. Б. Норец, Ю. Ф. Смирнов, А. А. Беляев, Н. А. Демидов, Б. А. Сахаров, В. Г. Воронцов.** Характеристики долговременной нестабильности водородных стандартов частоты и времени нового поколения 35
- С. Л. Пасынок.** Повышение точности определения параметров вращения Земли методом комбинирования результатов измерений различных видов в Главном метрологическом центре Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли 39

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- В. Г. Кытин, М. Ю. Гавалян, Б. Г. Потапов, Э. Г. Асланян, А. Н. Щипунов.** Установка относительной акустической газовой термометрии в диапазоне низких температур от 4,2 до 80 К 45

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- А. В. Коудельный, И. М. Малай, В. А. Перепёлкин, И. П. Чирков.** Рабочий эталон единицы мощности электромагнитных колебаний в диапазоне частот 37,5–220 ГГц 52

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- А. С. Бондаренко, А. С. Боровков, И. М. Малай, В. А. Семёнов.** Методика определения метрологических характеристик эталонных мер единицы комплексного коэффициента отражения в волноводных трактах миллиметрового диапазона длин волн 58

АКУСТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- А. Е. Исаяев, С. Ф. Некрич, И. В. Черников.** Передача единицы звукового давления гидрофонам с учётом условий их применения 63

ИЗМЕРЕНИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

- С. Г. Бирюков, О. И. Коваленко, А. А. Орлов.** Состояние и перспективы развития эталонных средств воспроизведения единиц объёмной активности радона и торона и плотности потока радона с поверхности грунта 68

Главный редактор
С. С. Голубев

Редакционная коллегия:

В. И. Белоцерковский
С. И. Донченко
И. В. Емельянова
(зам. гл. редактора)
Л. К. Исаев
А. Д. Козлов
Е. П. Кривцов
В. Н. Крутиков
А. Ю. Кузин
С. В. Медведевских
А. И. Механиков
В. В. Окрепилов
В. Н. Храменков
И. А. Шайко
В. В. Швыдун

**Журнал переводится
на английский язык
под названием
«Measurement
Techniques»
издательством Springer
www.springer.com/11018**

Корректор *М. В. Бучная*
Компьютерная вёрстка *С. А. Мамедова*

Сдано в набор: 18.12.2019.
Подписано в печать: 24.01.2020.
Формат 60х90 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. п.л. 9,0. Уч.-изд. л. 11,5. Тир. 420 экз. Зак 20-026.

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-21572
от 15.07.2005.

Адрес редакции: 119361 Москва, ул. Озёрная, 46,
ФГУП «ВНИИМС»
Тел.: +7 (495) 781-48-70
e-mail: izmt@vniims.ru
www.izmt.ru

Редакция не несёт ответственности за
содержание рекламных материалов. Точка зрения
редакции может не совпадать с мнением авторов.

ООО «Типография Миттель Пресс»
127254 Москва, ул. Руставели, 14 с. 6, оф.14

© Измерительная техника, 2020

GENERAL PROBLEMS OF METROLOGY AND MEASUREMENT TECHNIQUES

- I. S. Silvestrov, V. F. Fateev, R. A. Davlatov. Methods of metrological support of space gravity gradiometers..... 5*
- I. V. Bezmenov. Estimation of precise orbits and clock corrections of GLONASS and GPS navigation satellites in ultra-rapid regime based on observation data..... 11*
- E. V. Eremin. Estimation of the error of the results of indirect measurements of some quantities..... 18*

MEASUREMENTS IN INFORMATION TECHNOLOGIES

- A. V. Aprelev, V. S. Belyaev, I. M. Malay, V. N. Shorin. Metrological support of methods of rate and throughput measurements in packet data networks: problems and development prospects..... 25*

OPTICOPHYSICAL MEASUREMENTS

- O. V. Kolmogorov, A. N. Shchipunov, O. V. Denisenko, S. S. Donchenko, D. V. Prokhorov, S. G. Buev, E. V. Chemesova. Reducing the measurement error of signal propagation delays using an optical reflectometer with picosecond resolution..... 30*

TIME AND FREQUENCY MEASUREMENTS

- S. I. Donchenko, I. Y. Blinov, I. B. Norets, Yu. F. Smirnov, A. A. Belyaev, N. A. Demidov, B. A. Sakharov, V. G. Vorontsov. The long-term instability of the new generation hydrogen masers..... 35*
- S. L. Pasynok. Increase of the Earth's orientation parameters combination accuracy in Main Metrological Center of State Service for time, frequency and Earth's orientation parameters evaluation..... 39*

TERMOPHYSICAL MEASUREMENTS

- V. G. Kytin, M. Yu. Ghavalyan, B. G. Potapov, E. G. Aslanyan, A. N. Shchipunov. Relative acoustic gas thermometry setup for low temperature range from 4,2 to 80 K..... 45*

ELECTROMAGNETIC MEASUREMENTS

- A. V. Koudelny, I. M. Malay, V. A. Perepelkin, I. P. Chirkov. The working standard of the unit of power of electromagnetic waves in the frequency range from 37,5 to 220 GHz..... 52*

RADIO MEASUREMENTS

- A. S. Bondarenko, A. S. Borovkov, I. M. Malay, V. A. Semyonov. The method of determining the metrological performance of unit reference standards of reflection coefficient in waveguides at millimeter waves..... 58*

ACOUSTIC MEASUREMENTS

- A. E. Isaev, S. F. Nekrich, I. V. Chernikov. Calibration of hydrophones taking into account the conditions of their use 63*

IONIZING RADIATION MEASUREMENTS

- S. G. Birjukov, O. I. Kovalenko, A. A. Orlov. Status and development prospects of standard means for reproducing units of volumetric activity of radon and thoron and radon flux density from the soil surface..... 68*



Дорогие читатели!

В 2020 г. Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ) отмечает 65-летие. Этот юбилей руководство и сотрудники ВНИИФТРИ встречают с гордостью и осознанием того, что их многолетняя работа всегда находилась на передовом рубеже науки и технологий. Научные достижения института в разные годы были отмечены различными Государственными премиями, премиями Правительства СССР и Российской Федерации, ведомственными наградами. У института много направлений деятельности. Работа на стыке фундаментальных и прикладных исследований позволяет ему оставаться флагманом российской науки уже на протяжении шести с половиной десятилетий.

Сегодня ВНИИФТРИ – Государственный научный центр Российской Федерации, Государственный научный метрологический институт, Главный метрологический центр Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли (ГМЦ ГСВЧ), ведущий институт в области метрологического обеспечения системы ГЛОНАСС. В его состав входят четыре филиала: Восточно-Сибирский, Дальневосточный, Камчатский и Западно-Сибирский.

ВНИИФТРИ является подведомственной организацией Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (Росстандарта) и выполняет функции головной организации Росстандарта по созданию средств обеспечения единства измерений в ГЛОНАСС, совершенствованию и развитию эталонной базы в интересах атомной энергетики и пр. Как часть системы Росстандарта институт активно сотрудничает с Международным бюро мер и весов (МБМВ) и Международным комитетом мер и весов (МКМВ). ВНИИФТРИ также активно участвует в создании и ведении Федерального информационного фонда по обеспечению единства измерений.

ВНИИФТРИ разрабатывает, совершенствует, содержит, сличает и применяет 57 государственных первичных эталонов, что составляет более 35 % всей эталонной базы страны. Из них два эталона воспроизводят основные единицы Международной системы единиц – секунду и кельвин. Помимо внушительной эталонной базы институт имеет производственные мощности и активно участвует в импортозамещении в области прецизионной техники. В настоящее время опытно-производственный технический центр института выпускает более 70 наименований продукции и линейка приборов постоянно расширяется.

За время существования институт сохранил высокий кадровый и научный потенциал. Сегодня во ВНИИФТРИ трудятся 45 докторов наук, 129 кандидатов наук, 11 профессоров, 3 заслуженных деятеля науки Российской Федерации, 6 заслуженных метрологов, 9 почётных метрологов, 2 академика и 2 члена-корреспондента Российской академии наук, 14 действительных членов и 16 членов-корреспондентов Метрологической академии Российской Федерации.

Начало международного сотрудничества ВНИИФТРИ совпало с периодом становления института. Научные достижения учёных ВНИИФТРИ получили широкое международное признание. Сегодня институт сотрудничает с ведущими метрологическими организациями мира, принимает участие в международных сличениях эталонов и других исследованиях.

Вы держите в руках выпуск журнала, в котором все научные статьи написаны учёными и специалистами ВНИИФТРИ. Статьи, подготовленные учёными института, познакомят вас с последними достижениями института в различных областях деятельности. Представленные вашему вниманию материалы отражают лишь некоторые достижения, полученные теми, кто трудится сегодня, но за их плечами стоит шесть с половиной десятилетий научных исследований, благодаря которым сегодня стали возможны эти успехи.

Открывает номер статья, посвящённая актуальным метрологическим проблемам космических гравитационных измерений, в частности методам калибровки космических гравитационных градиентометров. Авторы этой статьи – руководители одного из важнейших научно-исследовательских направлений института, связанного с координатно-временными и навигационными измерениями. В последнее время институт добился значительных успехов в этой области. В 2019 г. академик В. И. Пустовойт получил Государственную премию за создание фундаментальных основ и инструментальных решений проблем регистрации гравитационных волн. А в декабре 2019 г. группа учёных ВНИИФТРИ была удостоена премии Правительства Российской Федерации за разработку высокоточного комплекса квантовых эталонов времени и частоты для перспективных навигационных, геодезических и цифровых технологий. В состав этой группы вошли и авторы нынешнего выпуска журнала, представляющие ГМЦ ГСВЧ. Тематике этого направления – измерениям времени и частоты – посвящён целый раздел журнала. Особо следует отметить статьи, связанные с вычислениями эфемерид и временных поправок навигационных космических аппаратов ГЛОНАСС и GPS в оперативном режиме по данным измерений, повышением точности определения параметров вращения Земли методом комбинирования результатов измерений различных видов.

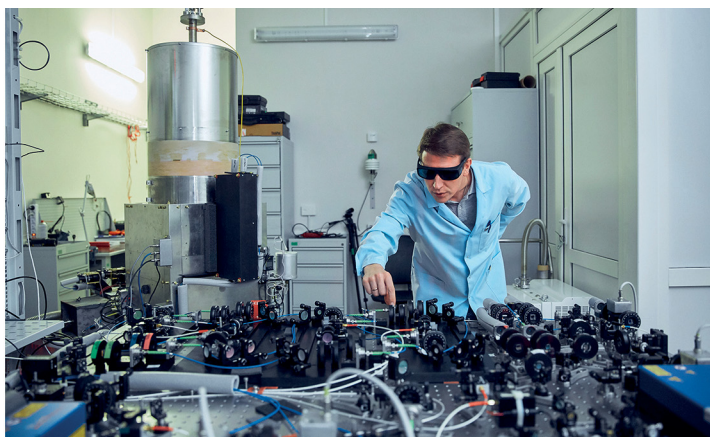
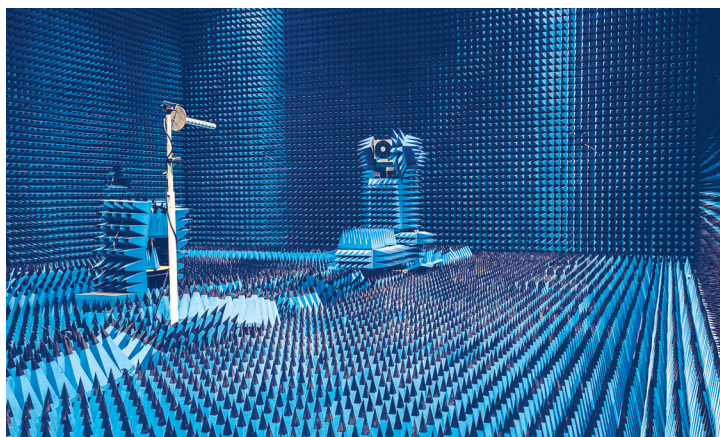
В 2020 г. в Российской Федерации планируется широкомасштабное развертывание сетей связи нового поколения – 5G. В начале 2019 г. во ВНИИФТРИ произведены комплексные испытания оборудования для этого проекта. Институт обладает уникальным аппаратным комплексом для подобных радиотехнических испытаний, а научно-техническая база позволяет измерять основные характеристики оборудования с высочайшей точностью. На сегодняшний день ВНИИФТРИ ведёт работу по совершенствованию метрологического обеспечения в части скорости передачи данных. Этому посвящена одна из статей номера.

Отдельного внимания заслуживает работа специалистов института в области совершенствования Государственного первичного эталона температуры в диапазоне 0,3–273,16 К (ГЭТ 35-2010) по созданию аппаратуры, реализующей новое определение единицы температуры на основе акустической газовой термометрии. В настоящее время такая аппаратура есть только в США, Франции, Великобритании, Италии. Более подробно об этих исследованиях можно прочитать в одной из статей номера. Учёные ВНИИФТРИ продолжают исследования в заданном направлении и принимают участие в разработке новой Международной температурной шкалы.

В журнале также опубликованы статьи учёных ВНИИФТРИ об исследованиях ионизирующих излучений, гидроакустических, радиотехнических и электромагнитных измерений.

За время существования ВНИИФТРИ приобрёл статус ведущего метрологического центра страны. Уже 65 лет в его стенах ведутся работы, позволяющие создавать будущее. Можно гордиться достигнутыми успехами в самых перспективных областях науки. Учёные института стараются не только сохранять уровень знаний, но и последовательно его развивать и внедрять в жизнь. Без сомнения, опубликованные материалы – результаты работы высококвалифицированного научного коллектива – вызовут большой интерес и будут полезны не только профессиональной аудитории, но и тем, кто на практике сталкивается с метрологией и использованием высокоточных средств измерений.

Генеральный директор ФГУП «ВНИИФТРИ»
С. И. Донченко



Методы калибровки космических гравитационных градиентометров

И. С. Сильвестров¹, В. Ф. Фатеев¹, Р. А. Давлатов^{1,2}

¹Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, г. п. Менделеево, Московская обл., Российская Федерация, e-mail: igsilv@vniiftri.ru, fateev@vniiftri.ru

²Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Российская Федерация, e-mail: davlatov_r_a@mail.ru

Проанализированы известные методы калибровки и оценки характеристик реализованных космических гравитационных градиентометров. Выделены и описаны основные этапы калибровки и оценки характеристик градиентометров: лабораторная оценка поправочных коэффициентов, оценка поправочных коэффициентов при эксплуатации, оценка поправочных коэффициентов по независимым данным, калибровка. Предложены два метода калибровки космических градиентометров: с использованием комплекса наземных полигонов и бортового стенда. Исследованы принципы построения элементов комплекса наземных полигонов, сформирована их структура. Проанализирована возможность применения бортовой массы на борту космического аппарата для калибровки космического градиентометра. Выделены основные параметры бортового стенда.

Ключевые слова: гравитационное поле Земли, калибровка, гравитационный градиентометр, космический аппарат, калибровочная площадка, бортовой стенд.

Введение. В настоящее время параметры гравитационного поля Земли (ГПЗ) занимают важное место в геодезическом обеспечении страны. Из основных параметров ГПЗ в условиях космоса можно определить только гравитационный градиент. Одним из эффективных измерительных средств уточнения параметров ГПЗ являются гравитационные градиентометры. Основным принцип действия этих приборов заключается в нахождении разности гравитационных сил, действующих на пробные тела. Если в качестве пробных тел задействованы космические аппараты или тела на их бортах, то такие гравитационные градиентометры называются космическими. Обработка результатов измерений приращения расстояния между спутниками или бортовыми чувствительными массами космическим градиентометром позволяет рассчитать месячные спутниковые модели ГПЗ.

Рассмотрим космические градиентометры, которые были успешно реализованы в период 2000–2017 гг.

1. CHAllenging Minisatellite Payload (CHAMP, Германия). На борту этого устройства находятся: аппаратура спутниковой навигации BlackJack (NASA/JPL, США), акселерометр STAR (ONERA, Франция), уголкового отражатель (GFZ, Германия), магнитометр MIAS (DTU, Дания/ LETI, Франция), звёздная камера (DTU, Дания) [1].

2. Gravity Recovery And Climate Experiment (GRACE, США, Германия). В состав его бортовой аппаратуры входят: спутниковый навигатор BlackJack (NASA/JPL, США), фазовый радиодальномер KBR (NASA/JPL, США), акселерометр SuperSTAR (ONERA/CNES, Франция), уголкового отражатель (GFZ, Германия), звёздная камера (DTU, Дания) [2].

3. The Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer (GOCE, Европейское космическое агентство).

Данный космический градиентометр включает в себя следующую аппаратуру: спутниковый навигатор SSTI (TAS, Франция), электростатический градиентометр EGG (ONERA/TAS, Франция), уголкового отражатель (GFZ, Германия), звёздную камеру (DTU, Дания), комплекс ионных двигателей IPA (EADS Astrium GmbH, Франция) [3].

На сегодняшний день единственным действующим гравитационным градиентометром, который перешёл в режим активной эксплуатации, является GRACE-FO, запущенный в мае 2018 г. В проекте впервые использован космический межспутниковый лазерный интерферометр LRI (NASA, США/DLR, Германия).

Главными элементами любого градиентометра являются система фиксирования движения пробных тел и измеритель негравитационных ускорений. Для получения достоверного результата – градиента ГПЗ – необходимо определить и подтвердить действительные метрологические характеристики измерителя, т. е. осуществить его калибровку. В настоящей работе представлены основные известные методы калибровки и рассмотрены их возможные варианты.

Методы калибровки космических градиентометров.

Согласно зарубежным исследованиям калибровка гравитационных градиентометров состоит из четырёх этапов: 1) лабораторная калибровка элементов; 2) бортовая калибровка; 3) внешняя калибровка на основе наземных измерительных данных; 4) оценка точности космического градиентометра.

На первых трёх этапах находят поправочные коэффициенты для активной коррекции наблюдений, а на четвёртом – оценивают погрешности космического градиентометра. Так как в терминах государственной системы

обеспечения единства измерений Российской Федерации калибровка – это совокупность операций, выполняемых в целях определения действительных значений метрологических характеристик средств измерений, то первые три ступени будем считать оценкой поправочных коэффициентов градиентометра, а последний шаг – именно калибровкой градиентометра. Таким образом, этапы можно переименовать в следующем виде: лабораторная оценка поправочных коэффициентов; оценка поправочных коэффициентов при эксплуатации; оценка поправочных коэффициентов по независимым данным; калибровка. Остановимся подробнее на каждом этапе.

Лабораторная оценка поправок. Для лабораторной оценки поправочных коэффициентов космических градиентометров применяют специальные наземные стенды. Так, для оценки масштабного коэффициента двух акселерометров, являющихся чувствительными элементами градиентометра GOCE, используют испытательную скамью. Эта скамья моделирует возмущающее ускорение путём изменения своего пространственного положения. На основе анализа результатов измерений возмущающего ускорения каждым акселерометром выводят масштабный коэффициент. Однако при проведении эксперимента однозначно можно создать лишь возбуждения с амплитудой до 10^{-6} м/с² [4].

Оценку поправочных коэффициентов выполняют и в условиях невесомости, например, в башнях падения, одна из которых находится в городе Бремен (Германия). Внутри башни расположена вертикальная стальная труба высотой 110 м. Испытательное оборудование помещают в специальную капсулу шириной 0,8 м и длиной до 2,5 м. Капсула движется в свободном падении и через 4,74 с приземляется в блок замедления, заполненный гранулами полистирола. При проведении эксперимента выделяют следующие источники возмущающих ускорений [5]:

аномалии вертикального градиента ГПЗ, составляющие 10^{-6} – 10^{-5} м/с²;

влияние гравитационного поля капсулы падения 10^{-9} – 10^{-8} м/с²;

вращение капсулы 10^{-6} м/с²;

влияние остаточного газа 10^{-6} м/с²;

вибрации капсулы при отпуске 10^{-6} м/с²;

влияние магнитного поля 10^{-6} м/с².

Получается, что в башне падения можно компенсировать паразитные ускорения до 10^{-6} м/с². Таким образом, существенным недостатком лабораторного сегмента является ограниченность создания реальных условий, так как в приведённых примерах ускорения достигают 10^{-6} м/с², а необходимое значение составляет 10^{-12} м/с².

Оценка поправок при эксплуатации. Запуск космического аппарата может повлиять на работу градиентометра, при этом лабораторная оценка станет невозможна или нецелесообразна. Поэтому оценку поправок градиентометра необходимо проводить при его эксплуатации. Данный этап подразумевает применение на космических аппаратах бортового оборудования, такого как звёздные датчики, навигационная

аппаратура потребителя, акселерометр, а также бортовые ионные двигатели.

В GOCE примерно каждые два месяца проводят встряску спутника для генерации линейных и угловых ускорений. Это позволяет определить масштабный коэффициент акселерометра путём сравнения измерений звёздного датчика и градиентометра. Встряску по направлению полёта осуществляют модуляцией ионной тяги, а по пяти другим степеням свободы – с помощью калибровочной системы градиентометра – GCD. Такая система состоит из двух комплектов по четыре двигателя холодного газа в каждом [6]. Однако эти двигатели могут работать только в режиме включения–выключения, что делает невозможным амплитудную модуляцию. При этом максимальное количество калибровок – 20.

Градиентометр GRACE позволяет определять масштабный коэффициент и смещения акселерометра, а также выполняет выравнивание прицела межспутникового дальномера со звёздной камерой. Калибровка межспутникового дальномера происходит на основе результатов измерений, полученных от приёмника сигналов глобальной навигационной спутниковой системы, а также результатов наземных лазерных измерений [7].

Оценка поправок по независимым данным. На этом этапе оценивание поправочных коэффициентов градиентометра производится по независимым, т. е. внешним данным. При этом учитываются результаты предыдущих этапов. Целью данного, третьего, этапа калибровки космических градиентометров является проверка правильности внутренней калибровки и вычисление параметров, которые нельзя определить с достаточной точностью на более ранних этапах. К таким параметрам относится, например, абсолютный масштабный коэффициент акселерометра.

Выделяют несколько способов оценивания в зависимости от используемых данных, в качестве которых могут быть [8]:

результаты измерений наземных гравиметров. В этом случае формируется участок земной поверхности с измеренными значениями ускорения свободного падения. Далее эти результаты редуцируются на высоту полёта градиентометра и сравниваются с измерениями градиентометра; модели ГПЗ;

результаты измерений других градиентометрических проектов. При применении этого типа данных желательно, чтобы градиентометры работали одновременно;

результаты измерений градиентометра при пролёте над одним и тем же участком. Такие сравнения выполняются не чаще одного раза в месяц и служат для грубой оценки работы градиентометра.

На рис. 1 представлена блок-схема оценки гравитационного градиентометра GOCE на основе измерений наземных гравиметров и модели ГПЗ. Модель ГПЗ в совокупности с данными наземной гравиметрии обрабатываются методами колокации и наименьших квадратов. В результате формируется матрица модельных градиентов. После фильтрации и обработки данных градиентометра GOCE формируется матрица измеренных градиентов. По полученным результатам рассчитывается масштабный коэффициент.

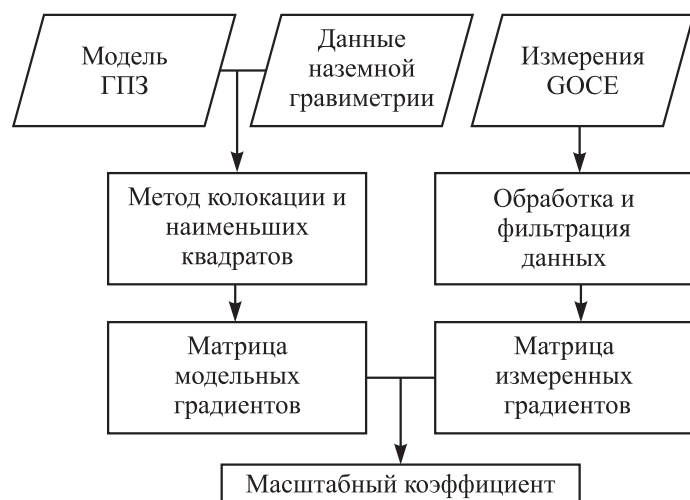


Рис. 1. Блок-схема оценки поправок градиентометра GOCE по независимым данным

Fig. 1. A block diagram assessment of amendments of the GOCE gradiometer according to independent data

Калибровка. Калибровку градиентометра часто путают с третьим этапом, потому что в каждом из них используются независимые данные. Однако это две принципиально разные операции. На этапе оценки поправок по независимым данным вычисляются поправочные коэффициенты, а во время калибровки оценивается точность космического градиентометра.

Калибровку можно осуществить по измерительной информации наземной гравиметрии. В работе [9] описана ситуация, когда для калибровки выбрали три региона с разным перепадом рельефа: Австралию, Канаду и Норвегию с результатами измерений на 29240; 9501; 5997 гравиметрических пунктах соответственно. В итоге минимальную погрешность масштабного коэффициента определили на уровне 10^{-2} по данным, полученным на территории Австралии. При этом были сформулированы четкие требования к размеру полигона и плотности измерительных данных: не менее 1000×1000 км и не более 1×1 км соответственно.

В настоящее время существуют перспективы в области применения измерительной информации космических радиовысотомеров для проверки космического градиентометра. Уровень океана служит индикатором местного изменения параметров ГПЗ. К примеру, в работе [10] для определения изменения градиента ГПЗ, полученного вследствие изменения уровня воды на участке площадью 60×80 км, используется измерительная информация космического радиовысотомера CryoSat-2 (EADS Astrium, Франция). Вычисленные изменения градиента сравниваются с результатами измерений бортового градиентометра FTG (Bell Geospace Ltd., США). Погрешность измерений такого метода составила $5 \cdot 10^{-9} \text{ с}^{-2}$.

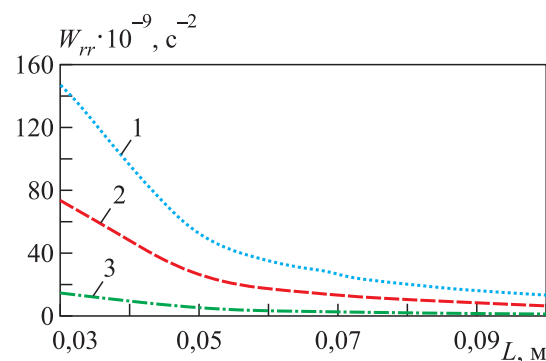


Рис. 2. Изменение бортового значения гравитационного градиента W_{rr} созданного на расстоянии L калибровочными телами различных масс:

1–3 – 1,0; 0,5; 0,1 кг соответственно

Fig. 2. The magnitude of the onboard gravitational gradient W_{rr} created at a distance L by calibration body:

1–3 – 1,0; 0,5; 0,1 kg respectively

Предложения по калибровке космических градиентометров. В настоящей статье авторы предлагают рассмотреть два метода калибровки космических градиентометров.

Комплекс наземных полигонов. Для выполнения калибровки с помощью данных наземной гравиметрии следует создать комплекс полигонов, характеризующийся следующими параметрами: количество полигонов и место их размещения; размеры полигонов; дискретность измерительной информации; состав и погрешность измерительной информации. Полигоны следует располагать на участках с разными вариациями ГПЗ: равнинная, холмистая и горная местности. Следовательно, нужно создать не менее трёх полигонов.

Площадь каждого полигона определяются параметрами космического градиентометра. В случае космического градиентометра по линии «спутник–спутник» длина должна быть не меньше расстояния между этими спутниками, т. е. около 200 км. Для бортового градиентометра длина полигона должна быть не меньше расстояния, которое пролетает градиентометр за время, равное дискретности отчётов. В GOCE дискретность отчётов достигает 1 Гц, при этом космический аппарат пролетает расстояние порядка 8 км. Тогда, согласно теореме Котельникова, необходим участок не менее 16 км для однозначного восстановления сигнала аномального ГПЗ. Таким образом, для обеспечения бортовых и космических градиентометров по линии «спутник–спутник» длина полигона должна составлять не менее 200–300 км.

Дискретность измерительных пунктов зависит от аномальности ГПЗ в данном районе, т. е. от рельефа местности. При выполнении работ следует придерживаться следующих требований: для горной местности расстояние между пунктами должно составлять 1–3 км, для холмистой – 3–7, а для равнинной – 7–10 км.

В зарубежных исследованиях при калибровке градиентометров ещё до недавнего времени применяли полученные ранее результаты наблюдений гравиметров. Однако в последние десятилетия произошёл резкий скачок в области разработки средств определения параметров ГПЗ и появились принципиально новые измерители, например измеритель разности гравитационных потенциалов на основе стандарта частоты и времени [11–13]. В настоящее время ведутся работы по усовершенствованию существующих измерителей. В Российской Федерации разработаны несколько образцов измерителей уклонов отвесной линии с погрешностью на уровне 0,2"–0,3" [14, 15]. Таким образом, возникают предпосылки к созданию полигонов, в которых заранее определены такие параметры ГПЗ, как гравитационный потенциал, ускорение силы тяжести, вертикальный и горизонтальный градиенты, уклонение отвесной линии.

Использование измерителей различных параметров ГПЗ позволяет выполнить верификацию полученной измерительной информации и с меньшей погрешностью провести её интерполяцию и редуцирование. Создание комплекса наземных полигонов требует серийного производства перспективных наземных гравиметрических измерителей: измерителей разности гравитационных градиентов – выполнено несколько экспериментов на территории Российской Федерации; относительных и абсолютных гравиметров; вертикальных и горизонтальных градиентометров; измерителей уклонов отвесной линии.

Бортовой стенд для калибровки градиентометра. Градиент ГПЗ наиболее чувствителен к выполнению измерений в ближней зоне притягивающих масс. По этой причине в результаты измерений космического градиентометра вносят поправку на самогравитацию космического аппарата путём расчёта притяжения всех его составных частей. Если на борту космического аппарата расположить тело, то чувствительный элемент градиентометра будет изменять своё положение вследствие изменения притяжения при перемещении этого тела. Впервые такая технология была продемонстрирована в проекте LISA Pathfinder [16]. В этом проекте для компенсации воздействия сил негравитационного происхождения использовали бортовую балансирующую массу. Компенсацию выполняли при перемещении балансирующей массы, которая притягивала чувствительную массу и регулировала её передвижения. Применение балансирующей массы позволило значительно сократить расход топлива. В качестве балансирующей массы использовали вольфрамовый брусок массой 1,8 кг.

Однако бортовое тело может также использоваться для калибровки космических гравитационных градиентометров. Для этого на борту космического аппарата необходимо расположить калибровочное тело однородной плотности с известными геометрическими параметрами. При высокоточном определении изменения положения

этого тела нужно вычислить изменение гравитационного градиента, которое впоследствии необходимо сравнить с результатами измерений градиентометра. Отличие результата измерений от расчётного значения характеризует точность градиентометра.

Масса и форма калибровочного тела, а также значение, направление и скорость перемещения тела относятся к параметрам стенда для калибровки градиентометра.

Для оценки массы калибровочного тела выполнен расчёт значения W_{rr} изменения градиента ГПЗ вследствие движения калибровочных тел массами 1,0; 0,5; 0,1 кг. Результат вычислений представлен на рис. 2. По оси абсцисс отложены расстояния L до градиентометра, а по оси ординат – значения изменения градиента из-за перемещения калибровочного тела. Из рисунка следует, что при увеличении массы калибровочного тела и значении изменения его положения возрастает значение изменения градиента. Кроме того, существенное влияние оказывает область, в которой происходит перемещение тела. Чем ближе эта область к градиентометру, тем больше изменение градиента.

Оценим изменение бортового градиента по рис. 2. Если калибровочное тело массой 0,5 кг переместить с 10 см до 3 см от градиентометра, то градиент изменится на $65 \cdot 10^{-9} \text{ с}^{-2}$. С учётом того, что точность бортового градиентометра GOCE составляет $0,001 \cdot 10^{-9} \text{ с}^{-2}$, это значение является существенным.

Заключение. При разработке и эксплуатации космического градиентометра по линии «спутник – спутник» или космического бортового градиентометра необходимо определять и подтверждать действительные метрологические характеристики, т. е. осуществлять калибровку. В работе рассмотрены известные методы оценки поправочных коэффициентов и калибровки реализованных космических градиентометров. Наиболее распространённым методом калибровки является использование наземной измерительной информации значений ускорения свободного падения. Авторы настоящей статьи сформировали конкретные предложения по калибровке существующих и планируемых космических градиентометров. В настоящее время разработаны макеты перспективных измерителей параметров гравитационного поля Земли, которые должны применяться при калибровке. Впервые предложено применение комплекса высокоточных полигонов. На каждом полигоне как серийными, так и перспективными гравиметрическими измерительными средствами нужно определить следующие параметры: разность гравитационных потенциалов; уклонения отвесной линии; гравитационный градиентометр. Кроме того, показано, что калибровка градиентометра может быть осуществлена на основе бортового стенда с использованием калибровочного тела. При известном значении перемещения тела можно рассчитать модельные изменения значения бортового градиента. Измеренные гравитационные градиенты нужно сравнить с модельными, что позволит оценить точность градиентометра.

Список литературы

1. Reigber C., Schwintzer P. and Lühr H., *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 1999, vol. 40, no. 3–4, pp. 285–289.
2. Tapley B., Bettadpur S., Watkins M. and Reigber C., *Geophysical Research Letters*, 2004, vol. 31, pp. 1–4. DOI: 10.1029/2004GL019920
3. Johannessen J., Aguirre-Martinez M., *The Four Candidate Earth Explorer Core Missions – Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation*. ESA, 1999, 217 p.
4. Willemenot E., Touboul P. and Josselin V., *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 1999, vol. 40, no. 3–4, pp. 527–532.
5. Dittus H., *Endeavour*, 1991, vol. 15, no. 2, pp. 72–78. DOI: 10.1016/S0160-9327(05)80008-0
6. Blott R., Wallace N., Simpson H., Hutchins M., *Ion engine products and application by qinetiq ltd*, Proceedings of the 57th IAC/IAF/IAA, Valenica, October 2–6, 2006. Paris, International Astronautical Congress, 2006, pp. 6263–6277.
7. Bouman J., Koop R., *Earth Gravity Field from Space – From Sensors to Earth Sciences*, Proceedings of an ISSI Workshop, Bern, March 11–15, 2002. Springer, 2002, pp. 293–303.
8. Koop R., Yisser P. and Tscherning C., *Proceedings International GOCE Users Workshop*, Katwijk, April 23–24, 2001. Noordwijk, ESA/ESTEC, vol. WPP-188, 2001.
9. Yunlong W., Huil L., Zhengho Z. and Kabman K., *Geodesy and Geodynamics*, 2012, vol. 3, pp. 34–39. DOI: 10.3724/SP.J.1246.2012.00034.2
10. Roman B., *Comparison between gravity gradients from dense CryoSat-2 altimetry and from shipborne gradiometry*, Stuttgart, University of Stuttgart Publ., 2017, 49 p.
11. Фатеев В. Ф., Жариков А. И., Сысоев В. П., Рыбаков Е. А., Смирнов Ф. Р. Об измерении разности гравитационных потенциалов земли с помощью перевозимых квантовых часов // Доклады Академии наук. 2017. Т. 472. № 2. С. 206–209. DOI: 10.1134/S1028334X17010147
12. Ribakov E. A., Fateev V. F., Zharikov A. I., Sysoev V. P., Smirnov F. R., *4th IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements*, Saint Petersburg, Russia, April 12–15, 2016, Saint Petersburg, State Research Center of the Russian Federation, Concern CSRI Elektropribor, 2016, pp. 228–232.
13. Фатеев В. Ф., Сысоев В. П., Рыбаков Е. А. Экспериментальное измерение гравитационного эффекта замедления времени с помощью перевозимых квантовых часов // Измерительная техника. 2016. № 4. С. 41–43.
14. Мурзабеков М. М., Копеев А. В., Фатеев В. Ф. Метрологические характеристики астрогеодезического измерителя уклонений отвесной линии на основе цифрового зенитного телескопа // Геодезия и картография. 2016. № 4. С. 10–17. DOI: 10.22389/0016-7126-2016-910-4-10-17
15. Gaivoronskii S., Kuzmina N., Tsodokova V., Starosel'tsev L., *Proceedings of the 4th IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements (TG-SMM 2016)*.

Saint Petersburg, April 12–15, 2016. Saint Petersburg, State Research Center of the Russian Federation, Concern CSRI Elektropribor, 2016, pp. 250–258.

16. Racca G. D, McNamara P. W., *Space science reviews*, 2010, vol. 151, pp. 159–181. DOI: 10.1007/s11214-009-9602-x

References

1. Reigber C., Schwintzer P. and Lühr H., *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 1999, vol. 40, no. 3–4, pp. 285–289.
2. Tapley B., Bettadpur S., Watkins M. and Reigber C., *Geophysical Research Letters*, 2004, vol. 31, pp. 1–4. DOI: 10.1029/2004GL019920
3. Johannessen J., Aguirre-Martinez M., *The Four Candidate Earth Explorer Core Missions – Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation*. ESA, 1999, 217 p.
4. Willemenot E., Touboul P. and Josselin V., *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 1999, vol. 40, no. 3–4, pp. 527–532.
5. Dittus H., *Endeavour*, 1991, vol. 15, no. 2, pp. 72–78. DOI: 10.1016/S0160-9327(05)80008-0
6. Blott R., Wallace N., Simpson H., Hutchins M., *Ion engine products and application by qinetiq ltd*, Proceedings of the 57th IAC/IAF/IAA, Valenica, October 2–6, 2006. Paris, International Astronautical Congress, 2006, pp. 6263–6277.
7. Bouman J., Koop R., *Earth Gravity Field from Space – From Sensors to Earth Sciences*, Proceedings of an ISSI Workshop, Bern, March 11–15, 2002. Springer, 2002, pp. 293–303.
8. Koop R., Yisser P. and Tscherning C., *Proceedings International GOCE Users Workshop*, Katwijk, April 23–24, 2001. Noordwijk, ESA/ESTEC, vol. WPP-188, 2001.
9. Yunlong W., Huil L., Zhengho Z., and Kabman K., *Geodesy and Geodynamics*, 2012, vol. 3, pp. 34–39. DOI: 10.3724/SP.J.1246.2012.00034.2
10. Roman B., *Comparison between gravity gradients from dense CryoSat-2 altimetry and from shipborne gradiometry*, Stuttgart, University of Stuttgart Publ., 2017, 49 p.
11. Fateev V. F., Zharikov A. I., Sysoev V. P., Rybakov E. A., Smirnov F. R., *Doklady Earth Sciences. Pt. 1*, 2017, vol. 472, pp. 91–94 (In Russian). DOI: 10.1134/S1028334X17010147
12. Ribakov E. A., Fateev V. F., Zharikov A. I., Sysoev V. P., Smirnov F. R., *4th IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements*, Saint Petersburg, Russia, April 12–15, 2016, Saint Petersburg, State Research Center of the Russian Federation, Concern CSRI Elektropribor, 2016, pp. 228–232.
13. Fateev V. F., Sysoev V. P., Rybakov E. A., *Measurement Techniques*, 2016, vol. 59, no. 4, pp. 402–404. DOI: 10.1007/s11018-016-0979-0
14. Murzabekov M. M., Kopaev A. V., Fateev V. F., *Geodesy and Cartography*, 2016, no. 4, pp. 10–17 (In Russian). DOI: 10.22389/0016-7126-2016-910-4-10-17

15. Gaivoronskii S., Kuzmina N., Tsodokova V., Starosel'tsev L., *Proceedings of the 4th IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements (TG-SMM 2016)*. Saint Petersburg, April 12–15, 2016. Saint Petersburg, State Research Center of the Russian Federation, Concern CSRI Elektropribor, 2016, pp. 250–258.

16. Racca G. D, McNamara P. W., *Space science reviews*, 2010, vol. 151, pp. 159–181. DOI: 10.1007/s11214-009-9602-x

Дата поступления: 20.10.2019.

Дата принятия: 25.11.2019.

Methods of metrological support of space gravity gradiometers

Igor S. Silvestrov¹, Vyacheslav F. Fateev¹, Ruslan A. Davlatov^{1,2}

¹Russian metrological institute of technical physical and radio engineering measurements, Mendeleevo, Moscow region, Russian Federation, e-mail: igsilv@vniiftri.ru, fateev@vniiftri.ru

²Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russian Federation, e-mail: davlatov_r_a@mail.ru

An analysis is made of the known methods for calibrating and evaluating the parameters of implemented space gradiometers. There are 4 main stages: laboratory assessment of amendments, assessment of amendments during operation, assessment of amendments from independent data, calibration. A description of each step is provided. Two methods for calibrating space gradiometers are proposed: based on a complex of calibration sites and an onboard stand. The principles of building elements of a complex of calibration sites are investigated and their structure is formed. The analysis of the possibility of using the onboard mass on board the spacecraft for calibrating the space gradiometer is carried out. The main parameters of the onboard stand are highlighted. Scope: determination of metrological characteristics of space gravitational gradiometers.

Key words: Earth's gravitational field, calibration, gravitational gradiometer, spacecraft, complex of calibration sites, onboard stand.

Вычисление эфемерид и временных поправок навигационных космических аппаратов ГЛОНАСС и GPS в оперативном режиме по данным измерений

И. В. Безменов

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений,
г. п. Менделеево, Московская обл., Российская Федерация, e-mail: bezmenov@vniiftri.ru

Разработаны алгоритм и программа расчёта в оперативном режиме эфемеридно-временной информации навигационных космических аппаратов ГЛОНАСС и GPS. Представленные результаты получены в Главном метрологическом центре Государственной службы времени и частоты и определения параметров вращения Земли Всероссийского научно-исследовательского института физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ). Вычисления эфемеридно-временной информации осуществляются по данным кодовых и фазовых измерений на двух несущих частотах. Данные измерений представлены в виде часовых RINEX-файлов наблюдений и файлов навигационных сообщений от станций слежения, входящих в сеть международной службы глобальных навигационных спутниковых систем IGS (International GNSS Service). Представлены результаты проведённых тестовых расчётов эфемерид и временных поправок навигационных космических аппаратов ГЛОНАСС и GPS в оперативном режиме. Приведён анализ точности полученных результатов по сравнению с апостериорными данными других Центров обработки и анализа данных.

Ключевые слова: навигационный космический аппарат, глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), эфемериды и временные поправки, центры анализа и обработки данных, часовые RINEX-файлы, международная ГНСС-служба.

Введение. Эфемеридно-временная информация (ЭВИ) навигационных космических аппаратов (НКА) глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) является основой для многих приложений в области космической геодезии, проведения кадастровых работ, точного позиционирования объектов, как неподвижно расположенных на поверхности Земли, так и перемещающихся в околоземном пространстве [1]. При этом для получения оперативных результатов часто возникает потребность в ЭВИ НКА ГНСС в режиме реального времени. В Центрах анализа и обработки данных (далее – Центры) как за рубежом, так и на территории Российской Федерации рассчитывают эфемериды и временные поправки НКА ГНСС по данным, получаемым со станций слежения, входящих в международную сеть IGS (International GNSS Service) (Международная служба GNSS: [сайт]. URL: <http://www.igs.org/network>). Полученная разными Центрами ЭВИ при этом может различаться. Так, в определении пространственных координат НКА различия (среднеквадратичные отклонения) между двумя Центрами могут достигать нескольких сантиметров, а временные поправки – 10 нс и более. Поскольку точные значения координат орбит и временных поправок НКА остаются неизвестными, то для получения опорных значений прибегают к процедуре комбинирования [2–5]. С 1993 г. IGS (США) формирует ЭВИ методом комбинирования (эфемериды и поправки часов) для спутников GPS по результатам расчётов девяти (на 2019 г.) Центров. Аналогичная процедура

(комбинирование только эфемерид) для получения ЭВИ НКА ГЛОНАСС с 2004 г. до настоящего момента применяется Центром NOAA/NGS (Национальная геодезическая служба США) (Национальная геодезическая служба США: [сайт]. URL: <https://www.ngs.noaa.gov/>) в рамках программы IGLOS-PP (International GLONASS Service Pilot Project) [6]. При этом используются результаты расчётов восьми Центров. Файлы ЭВИ формируются в оперативном, срочном и апостериорном режимах и выкладываются в виде готовых продуктов на ftp-серверах соответствующих Центров (табл. 1).

На территории Российской Федерации функционируют два Центра – Информационно-аналитический центр (ИАЦ) КВНО ГЛОНАСС (ИАЦ [сайт]. URL: <https://www.glonass-iac.ru/>) и Система высокоточного определения эфемерид и временных поправок (СВОЭВП: [сайт]. URL: <http://www.glonass-svoevp.ru/>), осуществляющих оценивание ЭВИ НКА ГНСС (см. табл. 1). В то же время ни один из них не формирует опорные значения ЭВИ, которые могли бы иметь статус официальных.

Одна из целей проведения работ в данной области – создание в Российской Федерации, а именно в Главном метрологическом центре Государственной службы времени и частоты и определения параметров вращения Земли (ГМЦ ГСВЧ) ВНИИФТРИ системы метрологического контроля над ЭВИ НКА ГЛОНАСС, аналогичной системам IGS и NOAA/NGS (США). Предпосылкой служит тот факт, что ГМЦ ГСВЧ, являясь организацией Росстандарта, по статусу может быть

Таблица 1

Формирование ЭВИ (файлов в формате SP3) НКА ГНСС в Центрах

Центр	Группировка НКА (количество Центров)	Режим формирования ЭВИ	Файл	Оперативность	Периодичность
IGS(США)	GPS (9)	Оперативный (ultra rapid)	IGUwwwwd_00.SP3* IGUwwwwd_06.SP3 IGUwwwwd_12.SP3 IGUwwwwd_18.SP3	Реальное время	6 ч
		Срочный (rapid)	IGRwwwwd.SP3	Задержка 1–2 сут	1 сут
		Апостериорный (final)	IGSwwwwd.SP3	Задержка 2 недели	1 сут
NOAA/NGS (США)	ГЛОНАСС (8)	Оперативный (ultra rapid)	IGVwwwwd_00.SP3 IGVwwwwd_06.SP3 IGVwwwwd_12.SP3 IGVwwwwd_18.SP3	Реальное время	6 ч
		Срочный (rapid)	–	–	–
		Апостериорный (final)	IGLwwwwd.SP3	Задержка 2–3 недели	1 сут
ИАЦ (РФ)	ГНСС	Оперативный (ultra rapid)	Stark_1D_yymmddhh.SP3**	Реальное время	6 ч
		Срочный (rapid)	Stawwwwwd.SP3	Задержка 1–2 сут	1 сут
		Апостериорная (final)	Stawwwwwd.SP3	~5 сут	1 сут
СВОЭВП (РФ)	ГНСС	Оперативный (ultra rapid)	PMKyymmdd.SPU	Реальное время	1 сут
		Срочный (rapid)	PMKyymmdd.SPR	Задержка 1–2 сут	1 сут
		Апостериорный (final)	PMKyymmdd.SP3	Задержка 2 недели	1 сут

Примечание. *«www» и «d» обозначают порядковый номер и день недели GPS соответственно;

**«уу», «mm», «dd», «hh» обозначают соответственно две последние цифры года, месяц, день месяца и часовой сдвиг (00/06/12/18).

высшим звеном в системе обеспечения единства измерений в области ЭВИ в соответствии с целями, установленными в ГОСТ Р 8.000-2015 «Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Основные положения».

Одна из сложностей при создании в Российской Федерации системы метрологического контроля, основанной на технологии комбинирования, как это осуществлено в IGS и NOAA/NGS (США), заключается в том, что в Российской Федерации отсутствует достаточное количество Центров, результаты которых после соответствующей обработки можно было бы использовать для получения опорных значений эфемерид и временных поправок НКА ГЛОНАСС. Поэтому получение альтернативной ЭВИ еще одним Центром – ГМЦ ГСВЧ – может создать реальные предпосылки для формирования (также в ГМЦ ГСВЧ) статистически обоснованного решения.

Определение эфемерид и временных поправок НКА ГЛОНАСС и GPS в ГМЦ ГСВЧ. В настоящей статье

представлены основные результаты по разработке программно-аппаратного комплекса формирования альтернативной ЭВИ НКА ГНСС в оперативном режиме. Достигнутые к настоящему времени результаты получены в ГМЦ ГСВЧ. Отметим, что прикладное программное обеспечение по формированию ЭВИ НКА ГНСС в срочном и апостериорном режимах были разработаны в ГМЦ ГСВЧ ранее [7, 8].

Используемые в данной статье термины «эфемериды» и «временные поправки» обозначают трёх- и одномерный временные ряды соответственно пространственных координат НКА и поправок к показаниям их бортовых часов. Временные ряды вычислены в моменты времени, следующие друг за другом с 15-минутным интервалом начиная с начала суток. Следует заметить, что в научно-технической литературе наряду с указанными терминами часто используют синонимичные термины «орбиты» и «поправки часов» соответственно.

Программно-аппаратный комплекс расчёта эфемерид и временных поправок НКА ГНСС в оперативном режиме формирует соответствующие файлы с периодичностью четыре раза в сутки (с интервалом 6 ч) в соответствии с устоявшейся международной практикой. В настоящее время программно-аппаратный комплекс работает в режиме тестирования, целью которого является совершенствование программного обеспечения, улучшение точностных характеристик вычисляемых эфемерид НКА и повышение оперативности получения конечного результата. Исходными данными для расчётов являются часовые RINEX-файлы (в форматах d/g/n), содержащие результаты измерений кодовых и фазовых псевдодалностей на двух несущих частотах. Эти данные получены станциями слежения за спутниками ГНСС, входящими в глобальную сеть IGS. Общее количество станций, данные которых используются в расчётах, варьируется от 450 до 700. В течение одних суток формируются четыре файла в формате SP3, каждый из которых содержит данные по эфемеридам и временным поправкам спутников ГНСС за двое суток по аналогии с оперативными (ultra rapid) данными по эфемеридам, формируемыми зарубежными аналитическими центрами IGS (США) и NOAA/NGS (США) ([сайт]. URL: <https://www.ngs.noaa.gov/>). Первая половина каждого файла – оценённая часть – содержит ЭВИ, полученную по результатам обработки данных измерений. Вторая половина файла – спрогнозированная часть – содержит ЭВИ, полученную на основе прогнозирования. В течение суток, обозначаемых как *wwwwd*, где *wwww* и *d* – неделя и день GPS соответственно, создаются следующие файлы, перечисленные в порядке их формирования: VNUwwwwd_00.SP3, VNUwwwwd_06.SP3, VNUwwwwd_12.SP3 и VNUwwwwd_18.SP3. Аббревиатура VNU происходит от VNIIFTRI и Ultra-rapid. Через подчеркивание указан сдвиг в часах от начала предыдущих суток до того момента времени, начиная с которого в файле приведены оценённые значения эфемерид и временных поправок. Например, первый из вышеперечисленных файлов VNUwwwwd_00.SP3 содержит оценённые значения эфемерид и поправок часов спутников с 00:00 до 23:59 предыдущих суток (*wwwwd-1*) и спрогнозированные значения этих величин с 00:00 до 23:59 текущих суток, что схематично представлено на рис. 1, а.

Часовые RINEX-файлы в форматах d/g/n скачиваются с ftp-серверов международных баз данных: информационно-аналитического Центра СОД ЦНИИмаш КВНО ГЛОНАСС (ИАЦ), РФ; Earth Observing System Data and Information System (EOSDIS), США; Европейского центра определения орбит, г. Берн, Швейцария. Как показывает

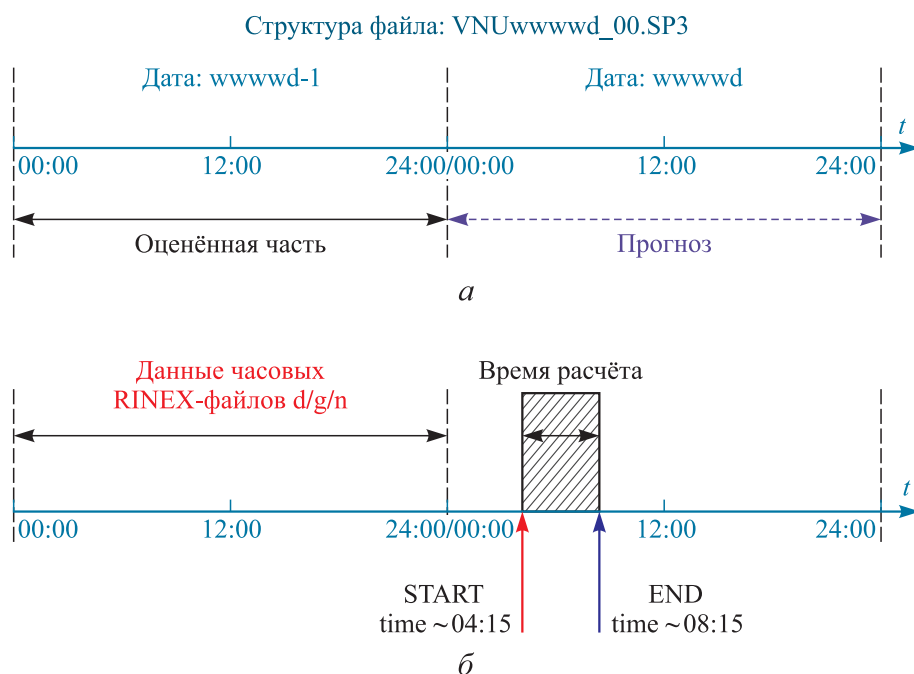


Рис. 1. Временная диаграмма формирования файла VNUwwwwd_00.SP3 в оперативном режиме

Fig. 1. The time diagram of VNUwwwwd_00.SP3 file generation in ultra rapid mode

практика, часовые RINEX-файлы поступают на серверы международных баз данных примерно с четырёхчасовой задержкой, откуда они скачиваются в автоматическом режиме в базу данных ГМЦ ГСВЧ. Запуск программы вычислений эфемерид и временных поправок НКА ГНСС происходит автоматически после проверки необходимого количества скачанных файлов. Примерно через четыре часа вычислений создаётся файл с оперативной ЭВИ НКА ГНСС. На рис. 1, б показана временная диаграмма формирования файла VNUwwwwd_00.SP3. В табл. 2 приведено расписание выпуска каждого из четырёх типов файлов, а также временные интервалы, к которым относятся содержащиеся в этих файлах данные.

Результаты расчётов. Для контроля точности вычисления эфемерид и временных поправок НКА ГНСС по разработанной в ГМЦ ГСВЧ методике были проведены тестовые расчёты. Далее представлены некоторые из них за четыре последовательные даты (выбраны случайно), начиная с 30.05.2018 и заканчивая 03.06.2018. При этом для анализа были взяты файлы оперативных данных, соответствующих шестичасовому сдвигу: VNU20033_06.SP3, VNU20034_06.SP3, VNU20035_06.SP3, VNU20036_06.SP3.

Оценка точности эфемерид НКА GPS и ГЛОНАСС, вычисленных в ГМЦ ГСВЧ, осуществлялась путём их сравнения (координат спутников) с апостериорными эфемеридами, полученными зарубежными Центрами IGS и NOAA/NGS. При этом оценённые и спрогнозированные значения эфемерид и временных поправок сравнивались отдельно.

Значения среднеквадратичных погрешностей оценённых (VNF) эфемерид НКА оказались: для GPS не более 2 см, а для ГЛОНАСС – не более 5 см. Значения среднеквадратичных погрешностей спрогнозированных (VNP) эфемерид НКА составили: для GPS примерно 6 см, для ГЛОНАСС – порядка 10 см. Вычисления СКП для каждой из систем производились по всем НКА в совокупности.

В табл. 3 приведены среднеквадратичные погрешности временных поправок для различных Центров, а также для оценённой части файлов оперативных данных (VNF) и прогноза (VNP) (показано полужирным шрифтом). Сравнение осуществлялось с апостериорными значениями временных поправок IGS на четырёх следующих друг за другом суточных интервалах, начиная с 06:00 30.05.2018 и заканчивая 05:59 03.06.2018. Так, например, интервал 1 начинался в 06:00 30.05.2018 и заканчивался в 05:59 31.05.2018. Аналогичные данные для временных поправок ГЛОНАСС приведены в табл. 4. Сравнение осуществлялось с опорными значениями. В табл. 3, 4 использованы следующие аббревиатуры Центров: IGS – Международная служба Глобальных навигационных спутниковых

систем (США); COD – Европейский центр определения орбит (Астрономический институт г. Берн, Швейцария); GFZ – Центр геодезических исследований (г. Потсдам, Германия); GRG – Национальный центр космических исследований (Франция); EMX – Министерство природных ресурсов Канады (Канада); ESA – Европейское космическое агентство (Германия); IAC – Информационный аналитический центр ГЛОНАСС (ЦНИИМАШ, Российская Федерация); IGL – Центр обработки и анализа данных – NOAA/NGS (США); MIT – Массачусетский технологический институт (США); PMK – система высокоточного определения эфемерид и временных поправок (СВОЭВП) (Российская Федерация); BRD – данные навигационных сообщений; VNF, VNP – оценённая и спрогнозированная части данных ГМЦ ГСВЧ (ВНИИФТРИ, Российская Федерация) соответственно.

Если эфемериды НКА ГЛОНАСС формируются Центром NOAA/NGS путём совместной обработки данных восьми Центров, и поэтому могут выступать в качестве опорных значений, то временные поправки, записываемые в файл IGLwwwd.SP3, отличаются от аналогичных значений, передаваемых в навигационных сообщениях, лишь сдвигом. Поэтому временные поправки IGL, как и поправки из навигационных сообщений, не могут быть приняты в качестве опорных значений, и в случае ГЛОНАСС производилось построение опорного временного ряда $\delta_{k,Ref}^i$ в соответствии с описанным в [3] методом по следующим формулам:

$$\delta_{k,Ref}^i = \sum_{j=1,...,N} \delta_{k,j}^i \sigma_j^{-2} / \sum_{j=1,...,N} \sigma_j^{-2};$$

$$\sigma_j = \left(\frac{1}{N_{Sat}K} \sum_{j=1,...,N_{Sat}} \sum_{k=1,...,K} (\delta_{k,j}^i - \bar{\delta}_k^i)^2 \right)^{1/2};$$

$$\bar{\delta}_k^i = \frac{1}{N} \sum_{j=1,...,N} \delta_{k,j}^i,$$

где k – номер эпохи; i, j – индексы спутника и Центра соответственно; N – количество Центров; $\delta_{k,j}^i$ – временные поправки i -го спутника, оценённые j -м Центром в эпоху k ; σ_j – сигма j -го Центра; N_{Sat} – количество спутников; K – число эпох.

На рис. 2 представлены временные поправки для НКА ГЛОНАСС с системным номером PRN=R03 (выбор номера НКА случайный), оценённые различными Центрами за период с 06:00 31.05.2018 до 05:59 01.06.2018. Также на рис. 2 приведены опорные данные REF, полученные как средневзвешенное результатов Центров ESA, GRG, IAC, PMK, VNF. Другие данные при формировании опорных значений не использовались.

Так как временные поправки $\delta_{VNF,k}^i$ ГМЦ ГСВЧ (VNF) вычисляли по шкале времени GPS, то для сравнения

Таблица 2

Расписание формирования файлов, содержащих оперативную ЭВИ

Файл	Время выпуска	Часть интервала данных	
		оценённая	спрогнозированная
VNUwwwd_00.SP3	~08:15	00:00(–24)–23:59(–24)	00:00–23:59
VNUwwwd_06.SP3	~14:15	06:00(–24)–05:59	06:00–05:59(+24)
VNUwwwd_12.SP3	~20:15	12:00(–24)–11:59	12:00–11:59(+24)
VNUwwwd_18.SP3	~02:15(+24)	18:00(–24)–17:59	18:00–17:59(+24)

Таблица 3

Среднеквадратичные погрешности, нс, временных поправок НКА GPS, оценённых различными Центрами

Интервал	Центр								
	COD	EMX	ESA	GFZ	GRG	MIT	PMK	VNF	VNP
1	0,692	1,095	1,406	0,353	0,165	2,246	3,771	0,294	–
2	0,701	1,550	0,872	0,379	0,166	2,306	3,543	0,410	1,930
3	0,636	1,294	1,157	0,376	0,167	2,255	3,897	0,467	1,854
4	0,636	0,764	1,289	0,389	0,151	2,305	3,894	0,625	1,709

Таблица 4

Среднеквадратичные погрешности, нс, временных поправок НКА ГЛОНАСС, оценённых различными Центрами

Интервал	Центр					
	ESA	GRG	IAC	PMK	VNF	VNP
1	3,418	1,524	2,544	7,381	0,675	–
2	3,315	1,768	2,480	6,977	0,614	5,663
3	3,491	2,072	2,231	6,946	0,609	4,405
4	4,053	2,297	1,392	6,564	0,975	6,468

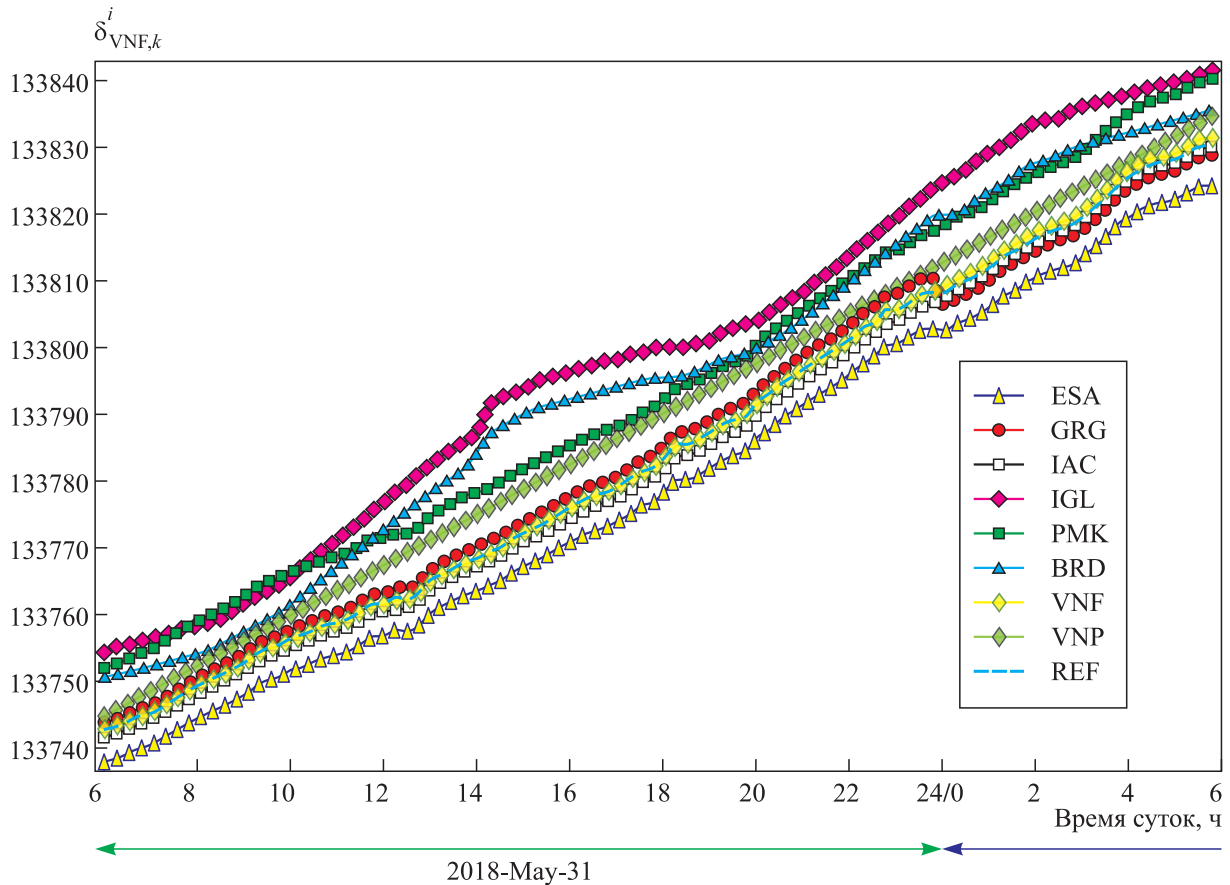


Рис. 2. Временные поправки НКА ГЛОНАСС (PRN=R03), полученные в ГМЦ ГСВЧ в оперативном режиме: VNF – оценённая часть; VNP – прогноз с предыдущих суток. Сравнение оцененных значений временных поправок с аналогичными апостериорными значениями других Центров

Fig. 2. GLONASS Satellite clock corrections (PRN=R03) estimated in MMC SSTF in ultra rapid mode: VNF – estimated part, VNP – prediction part derived from the previous day. Comparison of estimated values of clock corrections with similar aposteriori values of other Analysis Centers

с результатами других центров эти значения были приведены к шкале времени ГЛОНАСС. Процедура приведения временных поправок $\delta_{j,k}^i$ j -го Центра к шкале времени ГЛОНАСС состоит в следующем преобразовании:

$$\delta_{j,k}^{*i} = \delta_{j,k}^i - \Delta T - d \Delta t_k, \quad k = 1, \dots, K,$$

где $\delta_{j,k}^{*i}$ – временные поправки, приведённые к системной шкале времени; $\Delta t_k = t_k - t_1$ – временной интервал между k -й и первой эпохами; ΔT , d – параметры смещения и дрейфа соответственно, подлежащие определению.

Значения параметров ΔT , d находятся из решения вариационной задачи по минимизации функционала:

$$\sum_{j=1, \dots, N_{Sat}} \sum_{k=1, \dots, K} \left| \delta_{j,k}^i - \Delta T - d \Delta t_k - \delta_{BRD,k}^i \right| \frac{1}{\Delta T, d} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $\delta_{BRD,k}^i$ – временные поправки, полученные из навигационных сообщений (BRD) НКА ГЛОНАСС.

Функционал вида (1), являющийся аналогом L_1 -нормы, более устойчив к грубым измерениям (выбросам) во временных рядах $\delta_{BRD,k}^i$ по сравнению с функционалом, представляющим среднеквадратичное отклонение. Тем не менее, грубые измерения в навигационных данных могут отрицательно повлиять на точность оцениваемых параметров. Чтобы устранить выбросы из временных рядов $\delta_{BRD,k}^i$, применяется следующая процедура, состоящая из двух шагов. На первом шаге для каждого i -го НКА из ряда $\delta_{BRD,k}^i$ вычитается составляющая дрейфа:

$$\hat{\delta}_{BRD,k}^i = \delta_{BRD,k}^i - \bar{d}_{BRD}^i (t_k - t_1),$$

где $\bar{d}_{BRD}^i$ – среднее значение дрейфа, вычисленное по значениям $d_{BRD,k}^i$ дрейфа в моменты t_k из файла навигационных сообщений.

На втором шаге процедуры детектирования выбросов к временным рядам $\hat{\delta}_{BRD,k}^i$ применяется алгоритм из [9]. Далее при определении параметров ΔT , d , минимизирующих

Таблица 5

Установленные среднеквадратичные погрешности определения эфемерид и временных поправок НКА ГЛОНАСС и GPS в оперативном режиме

Параметры	Часть интервала данных	
	оценённая	спрогнозированная
Эфемериды НКА GPS, м	~0,017	<0,06
Эфемериды НКА ГЛОНАСС, м	~0,045	<0,1
Временные поправки GPS, нс	<1,0	~3,0
Временные поправки ГЛОНАСС, нс	<1,0	~5,0

функционал (1), все найденные выбросы предварительно удаляются из рядов $\delta_{BRD,k}^i$.

Из-за возможных междусуточных скачков в рядах $\delta_{j,k}^i$, процедура приведения шкалы времени j -го Центра к системной шкале времени ГЛОНАСС должна применяться только на суточных временных интервалах от 0:00 до 23:59. В свою очередь, выравнивание шкалы времени j -го Центра с системной шкалой времени позволяет устранить междусуточные скачки в значениях временных поправок этого Центра. Так, например, чтобы устранить междусуточные скачки в рядах временных поправок Европейского космического агентства (ESA), достигающие нескольких десятков наносекунд, к временным поправкам этого Центра была применена описанная выше процедура приведения к системной шкале времени ГЛОНАСС.

Заключение. Разработан программно-аппаратный комплекс для получения ЭВИ КА ГНСС в оперативном режиме. Значения среднеквадратичных погрешностей оценённых в оперативном режиме эфемерид НКА GPS оказались не более 2 см, эфемерид НКА ГЛОНАСС порядка 4–5 см. Значения среднеквадратичных погрешностей спрогнозированных в оперативном режиме эфемерид НКА оказались примерно 6 см и 10 см по всем НКА систем GPS и ГЛОНАСС соответственно. Эти и другие результаты проведённых тестовых расчётов отражены в табл. 5.

При вычислениях использовали программные модули Бернского ППО обработки ГНСС-измерений версии 5.2 (Bernese Software, Version 5.2) [10], некоторые из которых были адаптированы к распараллеливанию, бернское ядро обработки BPE (Bernese Processing Engine), методы BPE, позволяющие также вести обработку на многопроцессорных вычислительных системах в параллельном режиме. Ряд новых разработанных программ и скриптов был имплементирован в BPE. При написании программ и скриптов использовали языки программирования FORTRAN-90, Delphi XE7, Perl 6.0.

Список литературы

1. Перов А. И., Харисов В. Н. ГЛОНАСС: принципы построения и функционирования. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Радиотехника, 2010.

2. Beutler G., Kouba J. and Springer T., *Bulletin Géodésique*, 1995, vol. 69, iss. 4, pp. 200–222. DOI: 10.1007/BF00806733

3. Kouba J., Mireault Y., Lahaye F., (1995) 1994 IGS orbit/clock combination and evaluation, Appendix 1 of the analysis coordinator report, international GPS Service For Geodynamics 1994 Annual Report, Jet Propulsion Laboratory publication 95–18, pp. 70–94.

4. Kouba J. and Mireault Y., 1996, IGS Analysis Coordinator Report, International GPS Service for Geodynamics (IGS) 1995 Annual Report, pp. 45–76.

5. Kouba J. and Y. Mireault, 1997, Analysis Coordinator Report, International GPS Service for Geodynamics (IGS) 1996 Annual Report, pp. 55–100.

6. Weber R., 2000, *IGS Technical Report 1999*.

7. Безменов И. В., Пасынок С. Л., Формирование опорных значений координат и поправок часов КА ГЛОНАСС // Альманах современной метрологии. 2015. № 2. С. 143–158.

8. Безменов И. В., Пасынок С. Л., Определение эфемеридно-временной информации космических аппаратов ГНСС в срочном режиме по данным измерений // Альманах современной метрологии. 2017. № 11. С. 104–120.

9. Безменов И. В., Наумов А. В., Пасынок С. Л. Эффективный алгоритм устранения выбросов из данных измерений глобальных навигационных спутниковых систем // Измерительная техника. 2018. № 9. С. 26–30. DOI: 10.32446/0368-1025it.2018-9-26-30

10. Dach R., Andritsch F., Arnold D., Bertone S., Fridez P., Jäggi A., Jean Y., Maier A., Mervart L., Meyer U., Orliac E., Ortiz-Geist E., Prange L., Scaramuzza S., Schaer S., Sidorov D., Sušnik A., Villiger A., Walser P., Baumann C., Beutler G., Bock H., Gäde A., Lutz S., Meindl M., Ostini L., Sošnica K., Steinbach A., Thaller D., *Bernese GNSS Software Version 5.2* / ed. by R. Dach, S. Lutz, P. Walser, P. Fridez. Astronomical Institute, University of Bern, 2015.

References

1. A. I. Perov and V. N. Kharisov, *GLONASS: Principles of Construction and Operation*, Radiotekhnika, Moscow (2010), 4th ed.

2. Beutler G., Kouba J. and Springer T., *Bulletin Géodésique*, 1995, vol. 69, iss. 4, pp. 200–222. DOI: 10.1007/BF00806733

3. Kouba J., Mireault Y., Lahaye F., (1995) 1994 IGS orbit/clock combination and evaluation, Appendix 1 of the analysis coordinator report, international GPS Service For Geodynamics 1994 Annual Report, Jet Propulsion Laboratory publication 95–18, pp. 70–94.

4. Kouba J. and Mireault Y., 1996, IGS Analysis Coordinator Report, International GPS Service for Geodynamics (IGS) 1995 Annual Report, pp. 45–76.

5. Kouba J. and Mireault Y., 1997, Analysis Coordinator Report, International GPS Service for Geodynamics (IGS) 1996 Annual Report, pp. 55–100.

6. Weber R., 2000, *IGS Technical Report 1999*.

7. Bezmenov I. V., Pasynok S. L., *Al'manac of Modern Metrology*, 2015, no. 2, pp. 143–158 (in Russian).

8. Bezmenov I. V., Pasynok S. L., *Al'manac of Modern Metrology*, 2017, no. 11, pp. 104–120 (in Russian).

9. Bezmenov I. V., Naumov A. V. and Pasynok S. L., *Measurements Techniques*, 2018, vol. 61, no. 9, pp. 878–884. DOI: 10.1007/s11018-018-1518-y

10. Dach R., Andritsch F., Arnold D., Bertone S., Fridetz P., Jäggi A., Jean Y., Maier A., Mervart L., Meyer U., Orliac E.,

Ortiz–Geist E., Prange L., Scaramuzza S., Schaer S., Sidorov D., Sušnik A., Villiger A., Walser P., Baumann C., Beutler G., Bock H., Gäde A., Lutz S., Meindl M., Ostini L., Sošnica K., Steinbach A., Thaller D., *Bernese GNSS Software Version 5.2* / ed. by R. Dach, S. Lutz, P. Walser, P. Fridetz. Astronomical Institute, University of Bern, 2015.

Дата поступления: 15.11.2019.

Дата принятия: 29.11.2019.

Estimation of precise orbits and clock corrections of GLONASS and GPS navigation satellites in ultra-rapid regime based on observation data

Igor V. Bezmenov

Russian metrological institute of technical physics and radio engineering (VNIIFTRI), Mendeleevo, Moscow Region, Russian Federation, e-mail: bezmenov@vniiftri.ru

The article presents the results on development of an algorithm and a program for calculation in ultra-rapid regime of ephemeris-time information for GLONASS and GPS navigation satellites, achieved by now in the Main metrological center of the state service of time and frequency and determination of earth rotation parameters of VNIIFTRI. Calculation of ephemeris-time information is carried out by data of code and phase measurements at two carrier frequencies. The measurement data are presented in the form of hourly RINEX observation files and navigation message files from tracking stations involved in the IGS (International GNSS Service) network. Results of test calculations of ephemeris and clock corrections of GLONASS and GPS navigation satellites are presented. The analysis of the accuracy of the obtained results compared to the a posteriori data of other analysis centers is given.

Key words: navigation satellite, global navigation satellite systems (GNSS), ephemerides and clock corrections, analysis centers, hourly RINEX-files, International GNSS service (IGS).

Оценка погрешности результатов косвенных измерений некоторых величин

Е. В. Еремин

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений,
г. п. Менделеево, Московская область, Российская Федерация, e-mail: e_eremin@mail.ru

Рассмотрены основные математические положения, обуславливающие необходимые и достаточные условия применения метода линеаризации нелинейных функций случайных аргументов при оценке погрешностей результатов косвенных измерений. Отмечена необходимость оценивания возникающей систематической составляющей погрешности и степени приближённого представления функций. В рамках необходимых и достаточных условий разложения произвольной функции в ряд Тейлора получена новая аналитическая формула для приближения нелинейной функции в виде частного от независимых случайных аргументов. При использовании этой формулы для оценки погрешностей результатов указанных косвенных измерений можно не уточнять полученные результаты путём добавления членов в ряд Тейлора и не оценивать степень приближения нелинейной функции по значениям соответствующих остаточных членов. Предложенная формула позволяет определять практические условия, при которых для оценки погрешностей соответствующих результатов можно использовать известные и достаточно простые формулы для оценок абсолютной и относительной погрешностей без предварительной обработки результатов прямых измерений.

Ключевые слова: косвенные измерения, оценка, систематическая погрешность, методическая погрешность.

Введение. В соответствии с международным словарём [1] метод измерений представляет собой общее описание логической последовательности действий в процессе измерений, при этом методы прямых и косвенных измерений являются отдельными видами методов измерений. В отечественных терминологических документах к косвенным измерениям принято относить измерения, при которых искомое значение величины определяется на основании результатов прямых измерений других величин, функционально связанных с искомой величиной [2]. Таким образом, специфический признак косвенных измерений (в отличие от прямых) – функциональная зависимость между искомым значением величины и значениями, получаемыми непосредственно от средств измерений.

Пусть, например, искомая величина z функционально связана с величинами x , y , найденными в процессе прямых измерений:

$$z = f(x, y). \quad (1)$$

Если при измерениях величин x , y возникают случайные погрешности, то эти величины становятся случайными, их функция (1) также является случайной величиной с распределением вероятностей, обусловленным распределением величин x , y [3].

Решение задачи косвенных измерений включает нахождение математического ожидания $M[f(x, y)]$ и дисперсии $D[f(x, y)]$ функции (1) случайных аргументов и представление измеренного значения величины z с указанием соответствующего показателя точности (например, среднего

квадратического отклонения) этого измерения [1, 4–6 и др.]. Если известно математическое ожидание этой функции, то можно найти её дисперсию:

$$D[f(x, y)] = M\{[f(x, y) - M[f(x, y)]]^2\}.$$

В общем случае математическое ожидание $M[f(x, y)]$ функции $f(x, y)$ случайных аргументов x , y не равняется этой функции от математических ожиданий $M[x]$, $M[y]$, т. е. $M[f(x, y)] \neq f(M[x], M[y])$. Для точного определения $M[f(x, y)]$, $D[f(x, y)]$ необходимо знать закон совместного распределения случайных величин x , y [7, 8].

Задача нахождения числовых характеристик функций случайных величин – математического ожидания и дисперсии, оставляя при этом совершенно в стороне законы распределения, может быть решена на основе теорем о числовых характеристиках функций случайных величин [7, 8]. Однако эти теоремы из всего многочисленного класса функций, заданных аналитическим выражением или формулой и используемых в математическом анализе [9], распространяются только на линейные функции случайных величин, включая возможность их умножения (но исключая их деления). В связи с последним обстоятельством для решения задач косвенных измерений применяется так называемый «метод линеаризации» [4–6, 10–12] – метод приближённой замены нелинейной функции (1), связывающей искомую величину z с величинами x , y , полученными прямыми измерениями, линейной функцией этих величин.

Известно [9, 13, 14], что любая непрерывная дифференцируемая функция в достаточно узких пределах изменения аргументов может быть приближённо заменена линейной (линеаризована). Такая замена осуществляется на основе разложения нелинейной функции в ряд Тейлора – представлением нелинейной функции $f(x, y)$ в некоторой окрестности точки (a, b) суммой степенного многочлена $P_n(x, y)$ по степеням разностей $(x-a)^j$, $(y-b)^j$ и их совместных произведений $(x-a)^i(y-b)^j$, $i, j=1, \dots, n$, и дополнительного (остаточного) члена $R_n(x, y)$, характеризующего степень приближения функции многочленом в этой точке:

$$f(x, y) = P_n(x, y) + R_n(x, y).$$

Значение многочлена $P_n(x, y)$ степени не выше n в точке $(x=a, y=b)$ равняется значению функции $f(x, y)$ в этой точке, а значения его производных до n -го порядка включительно в точке $(x=a, y=b)$ равняются значениям соответствующих производных функции $f(x, y)$ в этой точке. Для функции $f(x, y)$ такое представление в общем случае имеет вид [9, 13, 14]:

$$\begin{aligned} f(x, y) = & P_n(x, y) + R_n(x, y) = f(a, b) + \\ & + \frac{1}{1!} [(x-a)f'_x(a, b) + (y-b)f'_y(a, b)] + \\ & + \frac{1}{2!} [(x-a)^2 f''_{xx}(a, b) + 2(x-a)(y-b)f''_{xy}(a, b) + \\ & + (y-b)^2 f''_{yy}(a, b)] + \frac{1}{3!} [(x-a)^3 f'''_{xxx}(a, b) + \\ & + 3(x-a)^2(y-b)f'''_{xxy}(a, b) + 3(x-a)(y-b)^2 + \\ & + 3(x-a)(y-b)^2 f'''_{xyy}(a, b) + (y-b)^3 f'''_{yyy}(a, b)] + \dots \\ & \dots + \frac{1}{n!} [(x-a)^n f^{(n)}_{(x^n)}(a, b) + \dots + (y-b)^n f^{(n)}_{(y^n)}(a, b)] + R_n(x, y). \quad (2) \end{aligned}$$

Выражение для $R_n(x, y)$ из (2) в случае функции двух переменных достаточно сложно записывается в развёрнутом виде, в символах же дифференциального исчисления в форме Лагранжа остаточный член представляется как

$$R_n(x, y) = \frac{1}{(n+1)!} d^{(n+1)} f(\xi_i, \eta_1),$$

где $df(x, y)$ – дифференциал функции $f(x, y)$; $\xi_i = a + \theta_{i+1}(x-a)$; $i=1, \dots, n+1$; $\eta_1 = b + \theta_1(y-b)$; $0 < \theta_k < 1$ для $k=1, \dots, n+2$ [9, 13].

Степень точности замены функции $f(x, y)$ многочленом в виде ряда Тейлора определяется значением остаточного члена $R_n(x, y)$ при фиксированных значениях аргументов функции [14]. В форме Лагранжа остаточный член напоминает следующий очередной член ряда Тейлора и позволяет численно оценить погрешность замены нелинейной функции рядом Тейлора [9].

Подчеркнём основные математические положения, обуславливающие необходимые и достаточные условия для представления нелинейных функций рядом Тейлора при решении задач косвенных измерений [9, 13, 14]:

функция $f(x, y)$ должна быть определена в закрытых интервалах $[a, a+H; b, b+G]$ и $[a, a-H; b, b-G]$ ($H, G > 0$) и иметь

все непрерывные частные производные по x, y до n -го порядка включительно в этих интервалах, а в открытых интервалах $(a, a+H; b, b+G)$ и $(a, a-H; b, b-G)$ – производные $(n+1)$ -го порядка;

значения производных функции $f(x, y)$ до n -го порядка включительно вычисляются для точки $(x=a, y=b)$, которая должна быть некоторым постоянным частным (фиксированным) значением для x и y соответственно;

частные производные $(n+1)$ -го порядка этой функции, входящие в остаточный член $R_n(x, y)$ и необходимые для рассмотрения степени точности приближения (замены) нелинейной функции степенным многочленом, должны вычисляться для аргументов ξ_i, η_1 , заключённых соответственно между a и x , между b и y . О значениях этих аргументов известно только, что в соответствии с теоремой Ролля они существуют и не равны соответственно ни a , ни b .

Доказано, что именно при соблюдении указанных необходимых и достаточных условий относительно функции $f(x, y)$ будет справедливо равенство (2), дающее возможность заменить нелинейную функцию (1) многочленом $P_n(x, y)$ со степенью точности, определяемой значением остаточного члена $R_n(x, y)$ [13]. Таким образом, для разложения в ряд Тейлора функции (1) в некоторой точке $(x=a, y=b)$ в качестве значений этих точек не могут выступать случайные величины, в противном случае значения производных становятся случайными величинами, а само разложение – неопределённым. С точки зрения теории вероятностей и математической статистики [3, 7, 8], такой точкой могут являться математические ожидания результатов измерений величин x, y , значения которых (например, a, b) и будут некоторыми постоянными частными (фиксированными) значениями случайных величин x, y . С метрологической же точки зрения из указанных выше условий следует, что функция (1) должна быть определена во всём диапазоне измерений величин x, y , полученных прямыми измерениями.

Из необходимых и достаточных условий применения математического аппарата разложения нелинейных функций в ряд Тейлора вытекают и особенности использования метода линеаризации для нахождения несмещённых и состоятельных оценок результатов косвенных измерений. Эти особенности, к сожалению, не рассматриваются и не учитываются (начиная, например с [15], и до некоторых современных источников, например [16]), зачастую приводятся достаточно простые, но необоснованные решения задач косвенных измерений, как отмечено в [6].

Выделим две основные особенности применения метода линеаризации для решения задач косвенных измерений, на которые обращено внимание в [7, 11, 17–21].

Во-первых, в [7, 11, 17–19] показано, что из-за остаточного члена в ряде Тейлора (в рассматриваемом ряде (2) – члена $R_n(x, y)$) математическое ожидание функции $f(x, y)$, получаемое из разложения этой функции в виде (2), никогда не будет равно истинному значению измеряемой величины z :

$$M[f(x, y)] \approx M[P_n(x, y)] + M[R_n(x, y)] \neq M[z].$$

Таким образом, при решении задач косвенных измерений методом линейаризации возникает дополнительная (к случайной) погрешность – методическая – по причине возникновения, и систематическая – по характеру проявления. Оценивание этой дополнительной систематической погрешности является значимой и необходимой составляющей обработки данных при измерениях [20]. Уменьшить указанную погрешность косвенных измерений, при реализации которых применяется метод линейаризации, можно, оценив значения остаточного члена разложения в ряд Тейлора и (при необходимости) уменьшив значение остаточного члена путём сохранения в разложении функции последующих членов более высоких порядков и оценке погрешностей, связанных с этими членами [7, 11, 17, 19, 21].

В-вторых, чтобы определить влияние значения остаточного члена $R_n(x, y)$ на степень точности замены нелинейной функции (1) многочленом $P_n(x, y)$ выбранной степени n , необходимо вычислить соответствующие производные, истинные значения аргументов которых становятся неизвестными случайными величинами (как следствие, значения таких производных также становятся случайными величинами), и при которых в общем случае нельзя найти выражение для математического ожидания остаточного члена $R_n(x, y)$ [17, 19].

Рассмотрим возможности оценки погрешности результатов косвенных измерений некоторой величины z , связанной функционально с величинами x и y , полученными прямыми измерениями, в виде следующей функции двух случайных аргументов:

$$z = f(x, y) = x/y. \quad (3)$$

Зависимости вида (3) характерны для измерений таких величин, как теплоёмкость (Дж/К), напряжённости электрического (В/м) и магнитного (А/м) полей, удельная электрическая проводимость (См/м), а также для величин, характеризующих степень быстроты движения, распространения, действия: в механике – скорость движения (м/с, км/ч); в информационных технологиях – скорость передачи информации (бит/с, байт/с); в промышленности – тепловой поток (кал/с), расход жидкости и газа (м³/с, м³/ч, л/ч и кг/с, кг/с, т/ч соответственно для объёмного и массового расходов), частота вращения (об/с); в ядерной физике – мощность экспозиционной дозы (Р/с) [22, 23].

Рассмотрим некоторое «упрощение» решения конкретной задачи косвенных измерений – возможность исключения необходимости оценки степени приближения функции (3) многочленом $P_n(x, y)$ и уточнения полученных результатов (например, уточнения значения систематической погрешности) путём добавления членов в ряд Тейлора (2).

Найдём для величины z , связанной нелинейной функцией (3) с полученными прямыми измерениями величин x и y , линейное приближение в виде соответствующего ряда Тейлора (2). Введём обозначения $\Delta_x = x - a$, $\Delta_y = y - b$ разностей многочлена $P_n(x, y)$. Будем считать, что при любых a, b соблюдаются неравенства $|\Delta_x/a| < 1$, $|\Delta_y/b| < 1$, т. е. осуществим приближённую замену непрерывной дифференцируемой нелинейной функции линейной в достаточно узких пределах изменения аргументов.

Для получения искомого многочлена $P_n(x, y)$ из (2) необходимо найти коэффициенты степенного ряда, определяемые значениями соответствующих производных функции (3). Последовательное дифференцирование функции (3) по x, y показывает, что производные $f_{(x^j)}^{(j)}(x, y) = 0$, для $j \geq 2$ и $f_{(x^2 y^{j-2})}^{(j)}(x, y) = 0$ для $j \geq 3$, а производные $f_{(xy^{j-1})}^{(j)}(x, y)$ и $f_{(y^j)}^{(j)}(x, y)$ существуют для всех $j \geq 2$ и $j \geq 1$ соответственно.

Для функции вида (3) можно установить следующие рекуррентные соотношения для вычисления производных:

$$\begin{aligned} f_{(xy^{j-1})}^{(j)}(x, y) &= f_x^{(1)}(x, y)(-1)(-2)\dots(-(j-1))/y^{j-1} = \\ &= [y]^{-1} [(-1)(-2)\dots(-(j-1))/y^{j-1}], \quad j = 2, \dots, n; \\ f_{(y^j)}^{(j)}(x, y) &= f(x, y)(-1)(-2)\dots(-j)/y^j = \\ &= [x/y] [(-1)(-2)\dots(-j)/y^j], \quad j = 1, \dots, n. \end{aligned}$$

При разложении в ряд Тейлора значения производных функции $f(x, y)$ до n -го порядка включительно вычисляются для точки $(x=a, y=b)$, поэтому рекуррентные соотношения для вычисления производных $f_{(xy^{j-1})}^{(j)}(x, y)$, $f_{(y^j)}^{(j)}(x, y)$ в этой точке примут вид

$$\begin{aligned} f_{(xy^{j-1})}^{(j)}(a, b) &= [b]^{-1} [(-1)(-2)\dots(-(j-1))/b^{j-1}], \quad j = 2, \dots, n; \\ f_{(y^j)}^{(j)}(a, b) &= [a/b] [(-1)(-2)\dots(-j)/b^j], \quad j = 1, \dots, n. \end{aligned}$$

Если учесть (с точностью до знака) равенство факториальных множителей этих рекуррентных соотношений для производных $f_{(xy^{j-1})}^{(j)}(a, b)$ и $f_{(y^j)}^{(j)}(a, b)$ факториальным коэффициентам перед суммами частных производных в равенстве (2), а также множитель n -го порядка перед смешанными частными производными в (2) для соответствующего порядка производных, то получим следующее выражение:

$$\begin{aligned} P_n(x, y) &= a/b + [\Delta_x(1/b) + \Delta_y(a/b)(-1/b)] + \\ &+ [\Delta_x \Delta_y(1/b)(-1/b) + \Delta_y^2(a/b)(-1/b)^2] + \dots \\ &\dots + [\Delta_x \Delta_y^{i-1}(1/b)(-1/b)^{i-1} + \Delta_y^i(a/b)(-1/b)^i] + \dots \\ &\dots + [\Delta_x \Delta_y^{n-1}(1/b)(-1/b)^{n-1} + \Delta_y^n(a/b)(-1/b)^n]. \quad (4) \end{aligned}$$

Выражение (4) для многочлена $P_n(x, y)$ содержит только члены с производными вида $f_{(xy^{j-1})}^{(j)}(x, y)$, $f_{(y^j)}^{(j)}(x, y)$, при этом производные вида $f_{(xy^{j-1})}^{(j)}(x, y)$ при $j \geq 2$ не зависят от аргумента x . В этом случае и частные производные $(n+1)$ -го порядка функции (3), входящие в остаточный член $R_n(x, y)$ и необходимые для нахождения степени точности приближения (замены) нелинейной функции рядом Тейлора, будут вычисляться только для аргумента η_1 . Для $R_n(x, y)$ из (2) получим

$$\begin{aligned} R_n(x, y) &= R_n(\eta_1) = \Delta_x \Delta_y^n(1/b)(-1/b)^n + \\ &+ \Delta_y^{n+1}(a/\eta_1)(-1/\eta_1)^{n+1}. \end{aligned}$$

Если функция (1) в некоторой области имеет все непрерывные частные производные (как в рассматриваемом случае) и $\lim_{n \rightarrow \infty} R_n(x, y) = \lim_{n \rightarrow \infty} R_n(\eta_1) = 0$, то равенство (2) приводит к разложению функции (1) в кратный степенной ряд (кратный ряд Тейлора) [9, 13]. Рассмотрим предел $\lim_{n \rightarrow \infty} R_n(\eta_1)$ как сумму двух пределов:

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} R_n(\eta_1) &= \lim_{n \rightarrow \infty} \Delta_x \Delta_y^n (1/b) (-1/b)^n + \\ &+ \lim_{n \rightarrow \infty} \Delta_y^{n+1} (a/\eta_1) (-1/\eta_1)^{n+1} = \lim_{n \rightarrow \infty} (-1)^n (\Delta_x/b) (\Delta_y/b)^n + \\ &+ \lim_{n \rightarrow \infty} (-1)^{n+1} (a/\eta_1) (\Delta_y/\eta_1)^{n+1}. \end{aligned}$$

Рассмотрим сомножители $\Delta_x/b, (\Delta_y/b)^n$ в первом слагаемом указанной суммы пределов. Очевидно, что абсолютное значение отношения $|\Delta_x/b|$ – ограниченная величина: $|\Delta_x/b| \leq M_1$, где M_1 – некоторое число.

Так как $|\Delta_y/b| < 1$, то согласно [9, 13, 14] переменная $|(-1)^n (\Delta_x/b) (\Delta_y/b)^n| \rightarrow 0$ при $n \rightarrow \infty$, т. е. становится бесконечно малой величиной, и, следовательно, выполняется равенство

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (-1)^n (\Delta_x/b) (\Delta_y/b)^n = 0.$$

Сомножители $a/\eta_1, (\Delta_y/\eta_1)^{n+1}$ во втором слагаемом суммы пределов рассмотрим отдельно. Так как $b < \eta_1 < b + \theta_1 \Delta_y$, т. е. η_1 – ограниченная величина, то и множитель a/η_1 ограничен сверху некоторым числом M_2 : $a/\eta_1 < M_2$. Поскольку $\eta_1 > b$, то с учётом условия $|\Delta_y/b| < 1$ будет соблюдаться неравенство $|\Delta_y/\eta_1| < |\Delta_y/b| < 1$, откуда переменная $|(-1)^{n+1} (a/\eta_1) (\Delta_y/\eta_1)^{n+1}| \rightarrow 0$ при $n \rightarrow \infty$, т. е. становится бесконечно малой величиной [9, 13, 14], и, следовательно, выполняется равенство

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (-1)^{n+1} (a/\eta_1) (\Delta_y/\eta_1)^{n+1} = 0.$$

Таким образом, $\lim_{n \rightarrow \infty} R_n(x, y) = \lim_{n \rightarrow \infty} R_n(\eta_1) = 0$. Это означает, что равенство (4) приводит к разложению функции (3) в кратный степенной ряд (кратный ряд Тейлора) [9, 13].

Рассмотрим полученный в (4) степенной ряд (кратный ряд Тейлора) $P_n(x, y)$ как сумму первого члена a/b ряда и двух последовательностей $A^{(*)}$ и $B^{(*)}$, содержащих слагаемые из выражения для $P_n(x, y)$ с множителями вида $\Delta_x, \Delta_x \Delta_y$ и Δ_y соответственно:

$$P_n(x, y) = a/b + A^{(*)} + B^{(*)};$$

$$\begin{aligned} A^{(*)} &= \Delta_x (1/b) - \Delta_x \Delta_y (1/b)^2 + \dots + \Delta_x \Delta_y^{i-1} (-1/b)^i + \dots \\ &\dots + \Delta_x \Delta_y^{k-1} (-1/b)^k = \frac{\Delta_x}{b} \left[1 - \Delta_y (1/b) + \dots + \Delta_y^k (-1/b)^k \right]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B^{(*)} &= -(a/b) (\Delta_y/b) \times \\ &\times \left[1 - (\Delta_y/b) + (\Delta_y/b)^2 + \dots + \Delta_y^m (-1/b)^m \right], \end{aligned}$$

где $k, m = 1, \dots, \infty$.

Последовательности $A^{(*)}, B^{(*)}$ представляют собой геометрические прогрессии с одинаковым знаменателем

$q = -\Delta_y/b$. Суммы этих последовательностей равны соответственно

$$S_{\infty}^{A^{(*)}} = \Delta_x / (b + \Delta_y);$$

$$S_{\infty}^{B^{(*)}} = -(a/b) \left[\Delta_y / (b + \Delta_y) \right].$$

Таким образом, согласно [9, 14] ряд (4) сходится, а функция вида (3) может быть разложена в этот ряд, сходящийся в некоторой окрестности $|\Delta_x/a| < 1, |\Delta_y/b| < 1$ точки (a, b) , и является аналитической функцией, которую можно записать как

$$z = f(x, y) = a/b + \Delta_x / (b + \Delta_y) - (a/b) \left[\Delta_y / (b + \Delta_y) \right]. \quad (5)$$

Представление нелинейной функции (3) формулой (5) не привело к «линеаризации» функции, однако позволило исключить из дальнейшего рассмотрения уточнение полученных результатов косвенных измерений путём добавления членов в ряд Тейлора (2) и оценивание погрешности метода линеаризации нелинейной функции (3) по оцениванию значения остаточного члена $R_n(x, y)$.

Оценим погрешности косвенных измерений вида (3) на основе полученного приближения (5). Будем полагать, что, результаты прямых измерений x, y не имеют систематических погрешностей, но содержат независимые случайные погрешности Δ_x, Δ_y , распределённые по нормальному закону и имеющие ограниченные значения $|\Delta_x/a| < 1, |\Delta_y/b| < 1$. Эти условия соответствуют метрологическим требованиям к относительным погрешностям прямых измерений $|\delta_x| < 1, |\delta_y| < 1$. Математическими ожиданиями результатов измерений x, y являются значения a, b , которые, в свою очередь, соответствуют истинным значениям измеряемых величин x, y .

Так как

$$M \left[\Delta_x / (b + \Delta_y) \right] = M[\Delta_x] M \left[1 / (b + \Delta_y) \right];$$

$$M[\Delta_x] = 0,$$

то для математического ожидания функции случайных аргументов (5) получим

$$M[z] = M[f(x, y)] = a/b - (a/b) M \left[\Delta_y / (b + \Delta_y) \right],$$

т. е. $M[z] = M[f(x, y)] \neq a/b$ и оценка результата косвенных измерений вида $\tilde{z} \cong \bar{z}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i$ будет смещена на величину $\Delta_{\text{мет}} = (a/b) M \left[\Delta_y / (b + \Delta_y) \right]$.

В принципе, при известной функции распределения вероятностей случайной величины Δ_y можно найти математическое ожидание функции одномерной случайной величины $\varphi = \varphi(\Delta_y) = \Delta_y / (b + \Delta_y)$, так как распределение вероятностей функции $\varphi(\Delta_y)$ определяется функцией распределения вероятностей случайной величины Δ_y , если (как и в рассматриваемом случае) случайные величины Δ_y, φ связаны взаимно однозначным соотношением [3, 7, 13].

Для дальнейшей оценки влияния погрешностей прямых измерений величин x, y на значение величины, представляющее результат измерения (измеренное значение) $z = f(x, y) = x/y$, ограничимся приближёнными оценками.

В соответствии с неравенствами $|\Delta_x/a| < 1$ и $|\Delta_y/b| < 1$ и используя биномиальное разложение для дроби $1/(b+\Delta_y)$ без учёта членов второго порядка и выше получим следующее приближение функции (5):

$$z = f(x, y) \cong (a/b) \times \times [1 + \Delta_x/a - (\Delta_x/a)(\Delta_y/b) - \Delta_y/b + \Delta_y^2/b^2]. \quad (6)$$

При учёте принятых условий для случайных погрешностей Δ_x, Δ_y из (6) можно получить приближённое значение математического ожидания функции случайных аргументов (3):

$$\tilde{M}[z] = \tilde{M}[f(x, y)] = a/b + (a/b)(D_y/b^2), \quad (7)$$

где D_y – дисперсия случайных погрешностей прямых измерений y .

При отсутствии систематических погрешностей справедливо $M[\Delta_y^2] = D_y \cong \Delta_y^2$, тогда $D_y/b^2 \cong (\Delta_y/b)^2 = \delta_b^2$, где $\delta_b = \Delta_y/b$, и приближённое значение второго слагаемого (7) будет $\tilde{\Delta}_{мет} = \delta_b^2 a/b$. Эта методическая погрешность, очевидно, тем меньше, чем выше точность прямых измерений y , и в явном виде не зависит от погрешностей прямых измерений величины x .

При использовании приближённого значения математического ожидания $\tilde{M}[z]$ из (7) и представления нелинейной функции (3) в виде (6) общее выражение для приближённой (степени приближения порядка δ_b^2/δ_a) оценки дисперсии $\tilde{D}_z$ случайных погрешностей косвенных измерений рассматриваемого вида запишем как

$$\begin{aligned} \tilde{D}_z &= M\left[\{f(x, y) - \tilde{M}[f(x, y)]\}^2\right] = \\ &= \left(\frac{a}{b}\right)^2 \left[\frac{D_x^2}{a^2} + \frac{D_x^2}{a^2} \frac{D_y^2}{b^2} + \frac{D_y^2}{b^2} - \frac{D_y^2}{b^4} + 3 \frac{D_y^4}{b^4} \right], \end{aligned} \quad (8)$$

где D_x – дисперсия случайных погрешностей прямых измерений x .

При $\tilde{M}[z] = \tilde{M}[f(x, y)] \cong a/b$ из (8) получим

$$\tilde{D}_z = \left(\frac{a}{b}\right)^2 \left[\frac{D_x^2}{a^2} + \frac{D_x^2}{a^2} \frac{D_y^2}{b^2} + \frac{D_y^2}{b^2} + 3 \frac{D_y^4}{b^4} \right]. \quad (9)$$

Выражения (8), (9) для дисперсий $\tilde{D}_z$ случайных погрешностей косвенных измерений вида (3) могут быть использованы для оценки степени влияния случайных погрешностей прямых измерений величин x и y на общий результат. Из анализа выражений (8), (9) следует, что дисперсия случайных погрешностей косвенных измерений вида (3) не является простой суммой дисперсий случайных погрешностей прямых измерений и что влияние случайных погрешностей прямых измерений, входящих в знаменатель функции вида (3), существенно вкладывает случайных погрешностей прямых измерений, входящих в числитель функции вида (3).

Рассмотрим возможности практического применения полученных результатов для решения задачи косвенных измерений вида (2), полагая, что для этой нелинейной

функции случайных аргументов из её приближения (6) математическое ожидание равно $\tilde{M}[z] = \tilde{M}[f(x, y)]$ из (7). Известно [3, 7, 8, 13], что если существует математическое ожидание $M[Z]$ непрерывной случайной величины Z , то можно найти и её дисперсию $D[Z] = M[(Z - M[Z])^2]$, и если установлено применять на практике в качестве состоятельной, несмещённой и эффективной оценки $M[Z]$ – величины

$$\tilde{Z} \cong \bar{Z}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i,$$

где $\bar{Z}_n$ – среднее арифметическое из n возможных реализаций случайной величины Z – результатов измерений z_i , то в качестве состоятельной и несмещённой оценки $D[Z]$ можно использовать величину

$$\tilde{S}_z^2 = (1/n - 1) \sum_{i=1}^n (z_i - \bar{Z}_n)^2,$$

где $\tilde{S}_z$ – среднее квадратическое отклонение случайной величины Z .

Таким образом, при известной (заданной) допустимой (требуемой) относительной погрешности $\delta_{z \text{ доп}}$ выполняемых или планируемых косвенных измерений вида (2), и при выполнении условия $\delta_b^2 \leq k \delta_{z \text{ доп}}$ (где $k \leq 1$ – некоторое число, определяемое из условий измерительной задачи или по другим соображениям) можно полагать, что будет соблюдаться равенство $\tilde{M}[z] = \tilde{M}[f(x, y)] \cong a/b$ и для оценки погрешностей измерений вида (2) можно использовать известные и достаточно простые формулы для абсолютной и относительной погрешности соответственно:

$$\Delta_z = \pm t_p \sqrt{\tilde{S}_z^2} = \pm t_p \tilde{S}_z;$$

$$\delta_z = \pm \Delta_z / \bar{Z}_n,$$

где t_p – коэффициент, определяющий доверительную вероятность оценки.

Заключение. Установление факта содержания в результатах косвенных измерений систематических погрешностей – отдельная метрологическая задача, но применение метода линеаризации нелинейных функций в виде ряда Тейлора при решении задачи косвенных измерений неизбежно приводит к возникновению в такой оценке методической, а по характеру проявления – к систематической погрешности, никак не связанной с «физикой» самих измерений. Поэтому корректное представление результатов косвенных измерений должно обязательно включать в себя оценку этой возникающей погрешности и оценку степени приближённого представления функций соответствующим многочленом, т. е. оценку возможных значений остаточного члена этого приближения.

В рамках необходимых и достаточных условий разложения произвольной функции в ряд Тейлора для приближения нелинейной функции в виде частного независимых случайных аргументов получена аналитическая формула, позволяющая при оценке погрешностей результатов косвенных измерений этого вида исключить вопросы уточнения полученных результатов путём добавления членов в ряд Тейлора

и оценки степени приближения нелинейной функции по значениям соответствующих остаточных членов.

Наиболее существенный вклад в погрешность косвенных измерений как частного от результатов прямых измерений вносят случайные погрешности прямых измерений, входящих в знаменатель такой функции, и эти же погрешности определяют значение систематической погрешности, возникающей при замене функции полученным приближением.

Полученное новое приближение для замены нелинейной функции в виде частного от независимых случайных аргументов позволяет определять практические условия, при которых для представления результатов таких измерений возможно использование известных, и достаточно простых, формул для оценок абсолютной и относительной погрешностей без предварительной обработки результатов прямых измерений.

Список литературы

1. *Международный словарь по метрологии. Основные и общие понятия и соответствующие термины*: Пер. с англ. ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, БелГИМ. Изд. 2-е, испр. СПб.: НПО «Профессионал», 2010. 82 с.
2. Дойников А. С. Лекции по метрологии. Менделеево: ВНИИФТРИ, 2018. 292 с.
3. Крамер Г. Математические методы статистики: Пер. с англ. М.: Мир, 1975. 720 с.
4. Денисенко О. В., Добровольский В. И., Донченко С. И., Еремин Е. В. Испытания спутниковой навигационной аппаратуры // Партнёры и конкуренты. 2002. № 9. С. 32–38.
5. Денисенко О. В., Донченко С. И., Еремин Е. В. Комплекс эталонов для проведения испытаний аппаратуры потребителей сигналов спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС/GPS // Измерительная техника. 2003. № 2. С. 13–21.
6. Еремин Е. В. О корректности представления значений величин и показателей точности результатов косвенных измерений // Приборы. 2019. № 9. С. 46–54.
7. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М.: Высшая школа, 1998. 576 с.
8. Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. М.: Наука, 1969. 512 с.
9. Фиктенгольц Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. В 3-х т. Т. 1. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 680 с.
10. Селиванов М. Н., Фридман А. Э., Кудряшова Ж. Ф. Качество измерений: Метрологическая справочная книга. Л.: Лениздат, 1987. 295 с.
11. Грановский В. А., Сирая Т. Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. Л.: Энергоатомиздат, 1990. 288 с.
12. Фридман А. Э. Основы метрологии. Современный курс. СПб.: НПО «Профессионал», 2008. 284 с.
13. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров: Пер. с англ. М.: Наука, 1974. 832 с.
14. Пискунов Н. С. Дифференциальное и интегральное исчисления. В 2-х т. Т.1. СПб.: Мифрил, 1996. 416 с.

15. Тейлор Дж. Введение в теорию ошибок: Пер. с англ. М.: Мир, 1985. 272 с.

16. Миронов Э. Г., Бессонов Н. П. Метрология и технические измерения. М.: КНОРУС, 2015. 422 с.

17. Рабинович С. Г. Погрешности измерений. Л.: Энергия, 1978. 262 с.

18. Бурдун Г. Д., Марков Б. Н. Основы метрологии. М.: Издательство стандартов, 1985. 256 с.

19. Rabinovich S. G., *Measurement errors and uncertainties: theory and practice*, New York, Springer-Verlag, 2005. 308 p.

20. Сирая Т. Н. Методы обработки данных при измерениях и метрологические модели // Измерительная техника. 2018. № 1. С. 9–14. DOI: 10.32446/0368-1025it.2018-1-9-14

21. Гвоздев В. Д. МИ 2083-90. ГСИ. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и их погрешностей. Об остаточном члене разложения в ряд Тейлора // Законодательная и прикладная метрология. 2011. № 3. С. 52–54.

22. Деньгуб В. М., Смирнов В. Г. Единицы величин: словарь-справочник. М.: Издательство стандартов, 1990. 240 с.

23. Чертов А. Г. Физические величины (терминология, определения, обозначения, размерности, единицы). М.: Высшая школа, 1990. 335 с.

References

1. JCGM 200:2008 (E/F). VIM3 – International vocabulary of metrology: Basic and general concepts and associated terms.
2. Doynikov A. S., *Lektsii po metrologii*, Mendeleyevo, VNIIFTRI Publ., 2018 (in Russian).
3. Cramer H., *Mathematical Methods of Statistics*, Princeton, Princeton University Press, 1946.
4. Denisenko O. V., Dobrovolskiy V. I., Donchenko S. I., Eremin E. V., *Partnyory i konkurenty*, 2002, no. 9, pp. 32–38 (in Russian).
5. Denisenko O. V., Donchenko S. I., Eremin E. V., *Measurement Techniques*, 2003, vol. 46, no. 2, pp. 143–151. DOI: 10.1023/A:1023601718289
6. Eremin E. V., *Instruments*, 2019, no. 9, pp. 46–54.
7. Venttsel' E. S., *Teoriya veroyatnostey*, Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1998 (in Russian).
8. Smirnov N. V., Dunin-Barkovskiy I. V., *Kurs teorii veroyatnostey i matematicheskoy statistiki dlya tekhnicheskikh prilozheniy*, Moscow, Nauka Publ., 1969 (in Russian).
9. Fikhtengol'ts G. M., *Kurs differentsial'nogo i integral'nogo ischisleniya*, in 3 vol., vol. 1, Moscow, FIZMATLIT Publ., 2003 (in Russian).
10. Selivanov M. N., Fridman A. E., Kudryashova Zh. F., *Kachestvo izmereniy: Metrologicheskaya spravochnaya kniga*, Leningrad, Lenizdat Publ., 1987 (in Russian).
11. Granovskiy V. A., Siraya T. N., *Metody obrabotki eksperimental'nykh dannykh pri izmereniyakh*, Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1990 (in Russian).
12. Fridman A. E., *Osnovy metrologii. Sovremennyy kurs*, St. Petersburg, NPO "Professional" Publ., 2008 (in Russian).
13. Korn G. A., Korn, T. M., *Mathematical handbook for scientist and engineers. Definitions, theorems and formulas for reference and review*, New York, McGraw-Hill Book Company, 1968.

14. Piskunov N. S., *Differentsial'noye i integral'noye ischisleniya*, in 2 vol., vol. 1, St. Petersburg, Mifril Publ., 1996 (in Russian).
 15. Taylor, John R., *An introduction to error analysis*, California, University Science Books Mill Valley, 1982.
 16. Mironov E. G., Bessonov N. P., *Metrologiya i tekhnicheskiye izmereniya*, Moscow, KNORUS Publ., 2015 (in Russian).
 17. Rabinovich S. G., *Pogreshnosti izmereniy*, Leningrad, Energiya Publ., 1978 (in Russian).
 18. Burdun G. D., Markov B. N., *Osnovy metrologii*, Moscow, Standartov Publ., 1985 (in Russian).
 19. Rabinovich S. G., *Measurement errors and uncertainties: theory and practice*, New York, Springer-Verlag, 2005.
 20. Siraya T. N., *Measurement Techniques*, 2018, vol. 61, no. 1, pp. 9–16. DOI: 10.1007/s11018-018-1380-y
 21. Gvozdev V. D., *Zakonodatelnaya i prikladnaya metrologiya*, 2011, no. 3, pp. 52–54 (in Russian).
 22. Den'gub V. M., Smirnov V. G., *Edinitsy velichin: slovar'-spravochnik*, Moscow, Standartov Publ., 1990 (in Russian).
 23. Chertov A. G., *Fizicheskiye velichiny (terminologiya, opredeleniya, oboznacheniya, razmernosti, edinitsy)*, Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1990 (in Russian).
- Дата получения: 03.09.2019.
Дата принятия: 03.10.2019.

Estimation of the error of the results of indirect measurements of some quantities

Evgenii V. Eremin

All-Russian research Institute of physical-technical and radio engineering measurements, Mendeleevo, Moscow region, Russian Federation, e-mail: e_eremin@mail.ru

The basic mathematical provisions that determine the necessary and sufficient conditions for the application of the method of linearization of nonlinear functions of random arguments in the evaluation of errors of the results of indirect measurements are considered, and the need to present the assessment of the arising systematic component of the error and the degree of approximate representation of functions is noted. Within the framework of the necessary and sufficient conditions for the expansion of an arbitrary function into a Taylor series, a new analytical formula for the approximation of a nonlinear function in the form of a quotient of independent random arguments is obtained, which allows to exclude the questions of refinement of the results by adding terms to the Taylor series and estimating the degree of approximation of a nonlinear function by the values of the corresponding residual terms when evaluating the errors of indirect measurements. It is shown that the obtained new approximation for the replacement of such a function allows us to determine the practical conditions under which to estimate the errors of the corresponding results it is possible to use known, and quite simple, formulas for estimating the absolute and relative errors without preprocessing the results of direct measurements.

Key words: indirect measurement, estimate, systematic error, methodical error.

Метрологическое обеспечение измерений скорости и пропускной способности в пакетных сетях передачи данных: проблемы и перспективы развития

А. В. Апрелев, В. С. Беляев, И. М. Малай, В. Н. Шорин

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений,
г. п. Менделеево, Московская обл., Российская Федерация,
e-mail: aprelev@vniiftri.ru, belyaev@vniiftri.ru, malay@vniiftri.ru, chorin@vniiftri.ru

Рассмотрены основные проблемы метрологического обеспечения измерений скорости и пропускной способности в цифровых пакетных сетях передачи данных. Перечислены мероприятия для выполнения измерений скорости передачи данных. Предложены различные способы обеспечения прослеживаемости измерителей скорости передачи цифровой информации, такие как модернизация существующего ГЭТ 200-2012, разработка первичной референтной методики измерений скорости и создание локальной поверочной схемы для измерений скорости передачи цифровой информации. Даны рекомендации по реализации выбранного метода обеспечения прослеживаемости измерителей скорости передачи данных и пропускной способности каналов связи. Предложенные подходы можно применять в метрологии цифровых систем связи.

Ключевые слова: пропускная способность, цифровой пакет, скорость передачи, задержка передачи пакета.

Введение. Интенсивное развитие методов передачи данных и их внедрение в повседневную жизнь оказывает значительное влияние на широкий круг технологий в самых различных областях. Появление высокоскоростных и надёжных каналов связи позволяет удалённо управлять производственными комплексами, выполнять сложнейшие хирургические операции, осуществлять беспилотное управление поездами и автомобилями и т. д. Влияние цифровых технологий в различных сферах экономических отношений стало настолько глубоким, что возникло новое понятие – цифровая экономика. Развитие цифровой экономики требует существования соответствующей инфраструктуры, базисом которой являются сети связи.

Постановка задачи. Федеральный закон от 07.07.2003 № 126-ФЗ «О связи» предписывает федеральному органу исполнительной власти в области связи установление обязательных метрологических требований к измерениям, выполняемым при эксплуатации сети связи общего пользования. Эти требования вводятся в целях обеспечения целостности и устойчивости функционирования сетей связи. При этом под устойчивостью функционирования сети в стандарте ГОСТ Р 53111-2008 «Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. Требования и методы проверки» понимается её способность выполнять функции даже при выходе из строя части элементов в результате воздействия дестабилизирующих факторов. Показателем устойчивости является наличие хотя бы одного пути, по которому возможна передача информации с требуемым качеством и объёмом. Обеспечение требуемого качества канала связи очень важно при определении устойчивости и стабильности сети, поскольку

предоставление услуги с пониженным уровнем качества недопустимо для потребителя и в некоторых случаях равносильно прекращению работы определённых сервисов. Заметим, что для обеспечения функционирования различных сервисов требуется разная скорость передачи данных и, следовательно, различная пропускная способность каналов связи [1].

Несмотря на упомянутое предписание до сих пор отсутствуют установленные на государственном уровне метрологические требования к измерениям скорости передачи данных (пропускной способности) и соответствующего контроля за их соблюдением, что создаёт риски нарушения целостности и устойчивости функционирования сетей связи общего пользования, связанные с неполной и несвоевременной передачей и получением информации. Согласно распоряжению Правительства Российской Федерации от 15 апреля 2013 г. № 611-р «Об утверждении перечня нарушений целостности, устойчивости функционирования и безопасности единой сети электросвязи РФ» к нарушениям целостности, устойчивости функционирования и безопасности единой сетей связи относятся:

несоблюдение операторами требований к пропуску трафика и его маршрутизации;

отступление от требований к сетям и средствам связи для проведения оперативно-розыскных мероприятий.

Правилами применения оборудования систем коммутации (включая программные ресурсы), обеспечивающего выполнение установленных действий при проведении оперативно-розыскных мероприятий, а также утверждёнными приказами Минкомсвязи Российской Федерации установлены требования к величинам пропускной способности каналов связи и интерфейсов коммутационной аппаратуры. Кроме того, требования

к скорости передачи данных прописаны в 12 нормативных правовых актах Правительства Российской Федерации, а также в ряде нормативных правовых актов других федеральных органов исполнительной власти. Недостоверность учёта объёма передачи данных в единицу времени может привести к завышению стоимости оплаты услуг связи. Скорость передачи данных – один из важнейших показателей перехода Российской Федерации на цифровую экономику. Согласно Плану мероприятий по направлению «Информационная инфраструктура» программы «Цифровая экономика Российской Федерации», медицинские организации государственной и муниципальной систем здравоохранения, образовательные учреждения, органы государственной власти и местного самоуправления, а также домохозяйства должны иметь доступ к сети интернет со скоростью не менее 100 Мбит/с. Развитие инфраструктуры сетей связи создаёт условия для обеспечения её интеграции с международными сетями.

Реальная пропускная способность сети и цифровых каналов связи во многом обусловлена состоянием физической среды передачи данных, точнее – шириной частотной полосы пропускания и отношением сигнал–шум в канале [2]. Однако немалую роль на скорость передачи данных оказывает производительность коммуникационной аппаратуры [3].

В Рекомендациях, изложенных в методике тестирования каналов Ethernet ITU-T Y.1564 Ethernet service activation test methodology и выпущенных Международным союзом электросвязи, для каждого связанного сервиса определяются гарантированная скорость передачи данных (CIR), допустимое превышение гарантированной скорости (EIR), задержка пакетов (FTD), джиттер пакетов (FDV), коэффициент потери пакетов (FLR). Показатель пропускной способности наряду с такими показателями как задержка передачи пакетов данных, вариация задержки передачи пакетов данных и коэффициент потерь пакетов данных внесён в проект перечня измерений, относящихся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений и выполняемых при обеспечении целостности и устойчивости функционирования сети связи общего пользования.

Универсальность технологии построения асинхронных пакетных сетей привела к значительному удешевлению соответствующих решений и, следовательно, вытеснению с рынка сетей, построенных на синхронных и плейзиохронных иерархиях. Пакетные IP-сети в настоящее время занимают практически весь спектр используемых каналов: от магистральных до абонентских.

Сложность измерений скорости передачи пакетов данных в реально работающей сети обусловлена следующими факторами:

скорость передачи можно найти лишь на конечном интервале времени;

погрешности скорости передачи пакетов данных нельзя определить стандартными методами;

для одного и того же процесса скорости передачи, измеренные на разных уровнях модели OSI, согласно стандарту ГОСТ Р ИСО/МЭК 7498-1-99 «ВОС. Базовая эталонная модель. Часть 1. Базовая модель» будут иметь разные значения;

один и тот же объём данных можно передать пакетами разной величины;

объёмы данных могут не соответствовать кратному количеству пакетов;

из-за несинхронности работы участков сети может быть применена буферизация устройствами приёма и передачи данных [4].

Методы измерений. Для решения многофакторной задачи измерений скорости передачи данных в пакетных сетях авторы предлагают выполнить следующие мероприятия.

1. Выработать единый подход к определению интервала времени измерений, соответствующий размерам пакетов данных.

2. Разработать метод оценки погрешности измерений на основе анализа статистических данных.

3. Установить уровни, на которых целесообразно производить измерения.

4. Ввести стандартный набор размеров пакетов.

Для решения задачи измерений скорости передачи данных в пакетных сетях программно-аппаратная реализация прибора должна основываться на использовании анализатора трафика данных. Анализ проводится для соответствующего уровня модели OSI и должен выполняться на элементарных интервалах времени, соответствующих длительности передачи целого пакета, кадра, фрейма или сессии. При измерениях учитываются только интервалы, где данные были переданы без ошибок.

Процесс измерений скорости на каждом элементарном интервале заключается в определении реального объёма передачи данных и длительности интервала, потребовавшегося для передачи или приёма этого объёма [5]. Погрешность определения элементарной скорости зависит исключительно от погрешности измерений интервалов времени, поскольку объём переданных данных учитывается с нулевой погрешностью. Погрешность определения длительности интервала, в свою очередь, зависит от характеристик опорного генератора.

В традиционных измерителях скорости передачи данных время начала (конца) кадра регистрируют в потоке уровня L1 принимаемого трафика. Для регистрации скорости на уровнях L2–L4 определение интервала времени следует производить по логическому уровню начала (конца) события соответствующего уровня. Возможен и другой подход, когда моменты начала и конца передачи и приёма устанавливаются программно, т. е. по выработке соответствующего сигнала процессором рабочего эталона или коммуникационного маршрутизатора. При таком подходе задержку передачи пакетов и скорость передачи данных можно найти на более высоком уровне модели OSI. Среднюю скорость и её погрешность оценивают из статистики измерений элементарной скорости [6].

Способы решения задачи. Для метрологического обеспечения традиционных измерителей скорости необходимо одновременное применение как эталонного генератора, так и эталонного анализатора трафика. При этом генератор трафика выступает в роли передатчика, а анализатор в качестве приёмника. При генерации трафика следует использовать эталонные файлы фиксированного объёма, гарантирующие передачу данных без возможности сжатия. Кроме того, работа

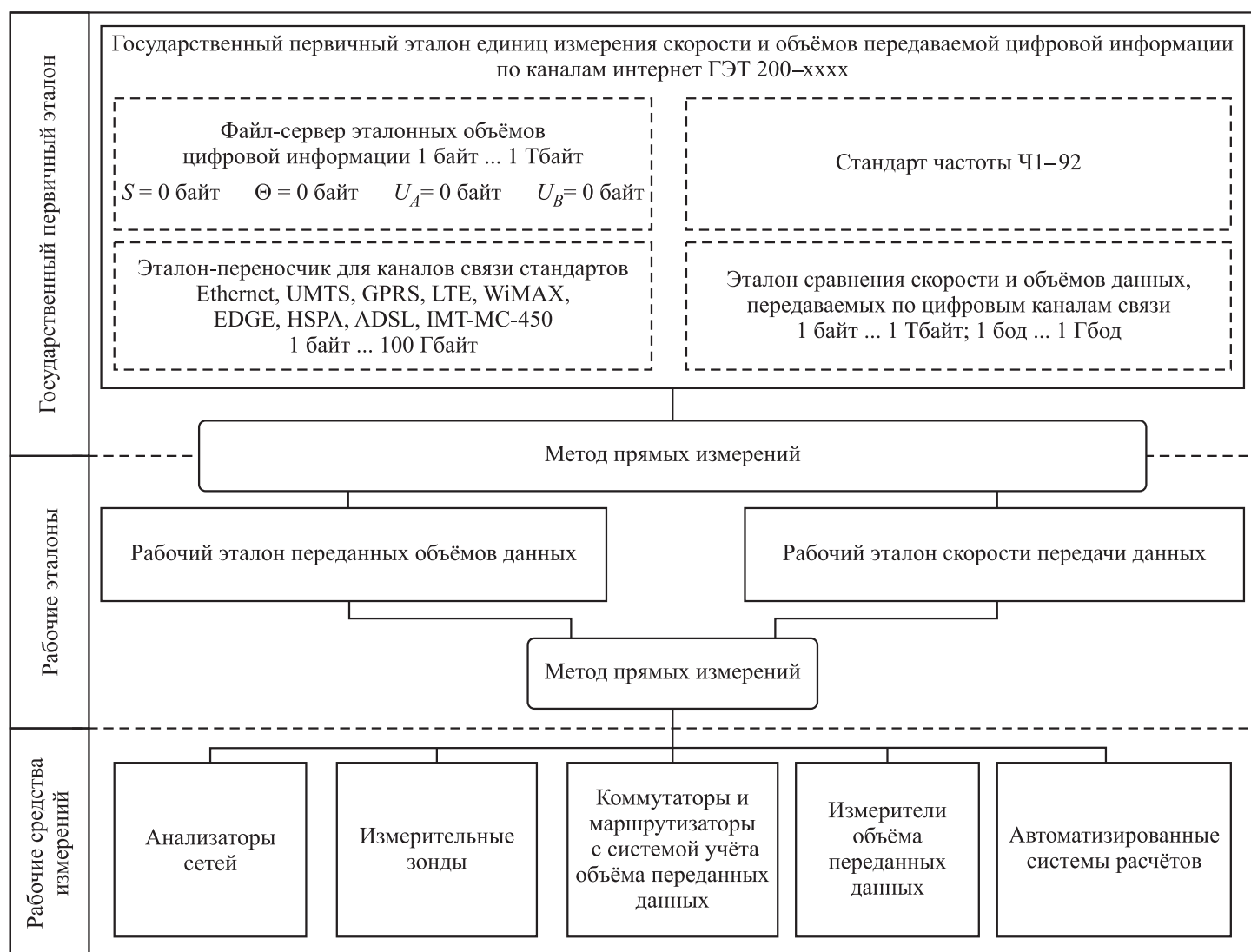


Рис. 1. Проект Государственной поверочной схемы передачи единиц измерения скорости передачи и объёма цифровой информации по каналам интернета и телефонии

Fig. 1. Project of the state verification scheme of measurement units of digital information and volume rate on the Internet and telephony channels

анализатора и генератора трафика должна быть синхронизирована от внешнего стандарта частоты.

Задачу обеспечения прослеживаемости измерителей скорости передачи цифровой информации к государственным первичным эталонам можно решить различными способами. Рассмотрим некоторые из них.

1. Модернизация существующего Государственного первичного эталона единиц измерения объёмов передаваемой цифровой информации по каналам интернет и телефонии ГЭТ 200-2012 путём включения в его состав стандарта частоты и эталона сравнения скорости передачи цифровой информации [7]. Аттестация модернизированного эталона измерений объёмов и скорости передачи передаваемой цифровой информации по каналам интернет

Характеристики рабочего эталона скорости передачи данных

Величина	Диапазон измерения и воспроизведения	Пределы допускаемой погрешности
Скорость передачи данных на уровнях L2–L4	10 Кбит/с – 1 Гбит/с	$\pm 10^{-4}$
Пропускная способность канала	10 Кбит/с – 100 Гбит/с	$\pm 10^{-3}$
Время задержки распространения пакета	1 мс – 3 с	± 10 мкс
Вариации времени распространения пакета	1 мс – 3 с	± 10 мкс
Коэффициент потерь пакетов	10^{-9} до 1	–

и телефонии. Внесение изменений в Государственную поверочную схему.

2. Разработка первичной референтной методики измерений скорости передачи цифровой информации по каналам интернет и телефонии на базе прослеживаемого к первичному эталону ГЭТ 200-2012 средства измерений (СИ) объёмов этой информации. Создание стандарта частоты, прослеживаемого к первичному эталону времени и частоты. Формирование референтных методик измерений скорости передачи цифровой информации по каналам интернет и телефонии для передачи единицы измерения от СИ, реализующих первичную референтную методику, к СИ, которые осуществляют референтные методики.

3. Создание методики калибровки СИ скорости передачи цифровой информации по каналам интернет и телефонии с применением рабочего эталона единиц измерений объёмов передаваемой цифровой информации по каналам интернет и телефонии и стандарта частоты. Разработка локальной поверочной схемы для передачи единицы измерения скорости передачи цифровой информации по каналам интернет и телефонии от откалиброванного СИ другим СИ скорости передачи цифровой информации и СИ пропускной способности цифровых каналов.

Остановимся подробнее на каждом способе.

Модернизация эталона. Для этого способа нужно изменить поверочную схему, представленную в ГОСТ Р 8.873-2014 «Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Государственная поверочная схема для технических систем и устройств с измерительными функциями, осуществляющих измерения объёмов (количества) цифровой информации (данных), передаваемых по каналам Интернет и телефонии». В настоящее время иерархия поверочной схемы содержит только устройства, воспроизводящие и измеряющие величины в единицах измерения объёмов передаваемых данных.

Для обеспечения передачи единиц измерений скорости передачи цифровой информации необходимо модернизировать ГЭТ 200-2012. Для этого в его состав надо добавить эталон сравнения величин скорости передачи и объёма данных, передаваемых по цифровым каналам связи, который состоит из формирователя передачи цифровой информации и стандарта частоты [8]. Для начала можно ограничиться скоростями передачи до 1 Гбит/с, в дальнейшем расширяя диапазон скоростей передачи до 100 Гбит/с и более.

В поверочную схему, показанную на рис. 1, необходимо ввести рабочий эталон скорости передачи данных, который предстоит разработать или же аттестовать в его качестве уже имеющееся техническое средство. Характеристики рабочего эталона скорости передачи данных представлены в таблице.

После реализации всех перечисленных действий появится возможность поверки большого количества различных устройств, не охваченных государственным регулированием до модернизации эталона и изменения поверочной схемы.

Первичная референтная методика. Для реализации второго способа необходимы устройства, подобные описанным в первом способе, но прослеживаемые не к модернизированному, а к существующим ГЭТ 200-2012 и Государственному первичному эталону единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1-2018. Процедура определения погрешностей измерений должна быть описана в первичной референтной методике и референтных методиках, которые необходимо разработать.

Локальная поверочная схема. Для реализации последнего, третьего способа, необходимо разработать устройство, которое будет использоваться в качестве исходного эталона единиц измерений скорости передачи цифровой информации, а также создать методику калибровки этого устройства. Требования к характеристикам исходного эталона должны быть выше, чем рассмотренные характеристики рабочего эталона. После проведения аттестации в качестве исходного эталона такое устройство сможет поверять рабочие эталоны единиц измерений скорости передачи цифровой информации, пропускной способности канала передачи цифровой информации, задержек распространения пакетов и вариации времени распространения пакетов. По приведённой на рис. 2 локальной поверочной



Рис. 2. Локальная поверочная схема для устройств измерения скорости передачи цифровой информации, пропускной способности канала передачи цифровой информации, задержек распространения пакетов и вариации времени распространения пакетов

Fig. 2. Local verification scheme for measuring instruments of digital information, the throughput of the digital information transmission channel, packet propagation delays and packet propagation time variation

схеме с помощью рабочих эталонов можно осуществлять поверку СИ скорости передачи цифровой информации, пропускной способности канала передачи цифровой информации, задержек распространения пакетов и вариации времени распространения пакетов.

Заключение. Вследствие наименьших затрат ресурсов для реализации прослеживаемости измерений скорости передачи данных предпочтительным является разработка локальной поверочной схемы во главе с исходным эталоном, в котором измерения скорости производятся на конечных интервалах времени, соответствующих времени передачи выбранных размеров пакетов. Неопределённость измерений скорости следует вычислять на основе статистики элементарных измерений. Поверочная схема для такого эталона может включать в себя передачу единиц для устройств, регистрирующих задержки распространения цифровых данных, и их вариацию, а также пропускную способность каналов связи на логических уровнях.

Описанные в настоящей статье подходы к решению проблемы метрологического обеспечения измерений скорости и пропускной способности в пакетных сетях передачи данных требуют дальнейшего развития и обсуждения среди заинтересованных лиц и организаций.

Список литературы

1. Деарт В. Ю. Мультисервисные сети связи. Транспортные сети и сети доступа: монография. М.: Брис-М, 2014. 189 с.
2. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение: Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. 1104 с.
3. Спортак М. Высокопроизводительные сети. Энциклопедия пользователя: Пер с англ. Киев: ДиаСофт, 1998. 432 с.
4. Steve Bauer, David Clark, William Lehr. Understanding broadband speed measurements. URL: <https://www.measurementlab.net/publications/understanding-broadband-speed-measurements.pdf> (дата обращения: 01.11.2019).
5. Аджемов А. С., Хромой Б. П. Обеспечение единства измерений длительности соединений и объёма информации // Вестник связи. 2013. № 6. С. 31–33.

6. Бакланов И. Г. Принцип релятивизма в метрологии систем связи: монография. М.: ИРИАС, 2016. 304 с.

7. Жогун В. Н., Шеховцов В. Н. Государственный первичный эталон единиц измерения объёма передаваемой цифровой информации по каналам интернет и телефонии ГЭТ 200-2012 // Измерительная техника. 2015. № 1. С. 24–26.

8. Апрелев А. В., Беляев В. С., Шорин В. Н. Метрология цифровых потоков информации в пакетных сетях передачи данных // Тезисы докладов международной научно-технической конференции «Метрология-2019» / Под общ. ред. к. т. н. Гуревича В. Л. Минск, Республика Беларусь, 27–28 марта 2019. Минск: БелГИМ, 2019. С. 75–79.

References

1. Deart V. Yu., *Multiservice communication networks. Transport networks and access networks: monografiya*, Moscow, Bris-M Publ., 2014, 189 p. (in Russian).
2. Bernard Sklar, *Digital communications. Fundamentals and Applications*. 2nd edition, Prentice Hall, Inc., 2001, 1031 p.
3. Mark A. Sportack, *High-Performance Networking unleashed*, Michigan, University of Michigan, Sams. net, 1997, 622 p.
4. Steve Bauer, David Clark, William Lehr, *Understanding broadband speed measurements*, available at: <https://www.measurementlab.net/publications/understanding-broadband-speed-measurements.pdf> (accessed: 01.11.2019).
5. Adzhemov A. S., Khromoy B. P., *Vestnik Svyazi*, 2013, no. 6, pp. 31–33 (in Russian).
6. Baklanov I. G., *Princip relyativizma v metrologii sistem svyazi: monografiya*, Moscow, IRIAS Publ., 2016, 304 p. (in Russian).
7. Zhogun V. N., Shekhovtsov V. N., *Measurement Techniques*, 2015, vol. 58, no. 1, pp. 34–37. DOI: 10.1007/s11018-015-0659-5
8. Aprelev A. V., Belyaev V. S., Shorin V. N., *Abstracts of International Science-technical Conference "Metrology-2019"*, Minsk, Belorussia, March 27–28, 2019, Minsk, BelGIM Publ., 2019, pp. 75–79.

Дата поступления: 20.10.2019.

Дата принятия: 25.11.2019.

Metrological support of methods of rate and throughput measurements in packet data networks: problems and development prospects

Alexey V. Aprelev, Vladimir S. Belyaev, Ivan M. Malay, Vladimir N. Shorin

Russian metrological institute of technical physics and radio engineering measurements, Mendeleev, Moscow region, Russian Federation, e-mail: aprelev@vniiftri.ru, belyaev@vniiftri.ru, malay@vniiftri.ru, chorin@vniiftri.ru

The main problems of metrological support of speed and throughput measurements in digital packet data networks are considered. The measures for performing data rate measurements are listed. Various ways of ensuring traceability of digital information transmission rate meters are proposed, such as modernization of the existing GET 200-2012, development of the primary reference method of speed measurements and creation of a local verification scheme for digital information transmission rate measurements. Recommendations on the implementation of the chosen method of ensuring traceability of data rate meters and throughput of communication channels are given. The proposed approaches can be applied in the Metrology of digital communication systems.

Key words: throughput, digital packet, transmission rate, packet transmission delay.

Уменьшение погрешности измерений задержек распространения сигнала с помощью оптического рефлектометра с пикосекундным разрешением

О. В. Колмогоров, А. Н. Щипунов, О. В. Денисенко, С. С. Донченко, Д. В. Прохоров,
С. Г. Був, Е. В. Чемесова

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений,
г.п. Менделеево, Московская обл., Российская Федерация, email: kolmogorov32@rambler.ru, schipunov@vniiftri.ru,
denisenko@vniiftri.ru, donchenko_ss@vniiftri.ru, prokhorov@vniiftri.ru, sbuev@rambler.ru, dobro_k@list.ru

Описаны задачи, требующие проведения высокоточных измерений задержек распространения сигнала в волоконно-оптических линиях связи. Рассмотрены особенности конструкции импульсного оптического рефлектометра с пикосекундным разрешением, предназначенного для измерений задержек распространения сигнала. Показано, что погрешность такого рефлектометра включает аддитивную и мультипликативную составляющие. Предложен метод определения аддитивной составляющей погрешности оптического рефлектометра, основанный на измерениях задержек сигнала, вносимых отдельными катушками оптического волокна, и общей задержки, вносимой последовательно включёнными катушками. Сформулированы требования к условиям измерений, приведены результаты оценки погрешности предложенного метода. Для исключения мультипликативной составляющей погрешности рефлектометра предложен метод определения поправок к показаниям рефлектометра. Метод основан на измерении задержек распространения сигнала в катушках оптического волокна сначала с помощью эталонной аппаратуры – установки для измерений задержки распространения сигнала, а затем – с помощью оптического рефлектометра, и последующем расчёте разностей полученных результатов измерений. Представлена схема установки для измерений задержки распространения сигнала в катушке оптического волокна, изложен принцип действия установки. Приведены результаты оценки погрешности определения поправок к показаниям рефлектометра предложенным методом. Показано, что исключение аддитивной и мультипликативной составляющих погрешности позволит уменьшить погрешность оптических рефлектометров до значений менее ± 100 пс.

Ключевые слова: оптический рефлектометр, оптическое волокно, задержка распространения сигнала, аддитивная погрешность, мультипликативная погрешность.

Области применения оптических рефлектометров с пикосекундным разрешением. Задачи проведения высокоточных измерений задержек распространения сигнала в волоконно-оптических линиях связи с погрешностью, не превышающей сотен пикосекунд, возникают при разработке, испытаниях и эксплуатации систем сравнения и синхронизации шкал времени, использующих волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) [1, 2], при контроле характеристик прецизионных волоконно-оптических устройств (например, оптических линий задержки [3], оптических циркуляторов), а также специализированных ВОЛС (ВОЛС для передачи эталонных радиочастотных сигналов [4], ВОЛС радиофотонных систем [5]). Разработка систем синхронизации шкал времени требует ещё более высокой точности измерений (погрешность не более ± 100 пс).

Для измерений задержки распространения сигнала в ВОЛС и соответствующей длины оптического волокна предназначены оптические рефлектометры. Большинство промышленно выпускаемых оптических рефлектометров построены на основе двух основных методов измерений:

импульсного метода (рефлектометры во временной области, OTDR – optical time domain reflectometer) [6–10] и частотного метода (рефлектометры в частотной области, OFDR – optical frequency domain reflectometer) [10, 11]. Однако перечисленные рефлектометры зачастую не позволяют решить вышеуказанные задачи высокоточных измерений задержек распространения сигнала в оптоволоконных элементах и в оптических кабелях систем синхронизации шкал времени. Так, рефлектометры во временной области, используемые для контроля телекоммуникационных ВОЛС, имеют недостаточную точность (их максимальное разрешение при измерениях длины составляет 0,4–0,6 м, что соответствует разрешению в единицы наносекунд при измерениях задержки распространения сигнала). Недостатком высокоточных рефлектометров в частотной области (OFDR) является малый диапазон измеряемых длин оптического кабеля, составляющий не более нескольких километров, а также высокая стоимость таких приборов.

Для решения указанной задачи предложен импульсный оптический рефлектометр [12], построенный на основе

измерителя интервалов времени с пикосекундным разрешением (таймера событий), предназначенный для измерений задержек распространения сигнала как в компактных оптических элементах, так и в оптических кабелях длиной десятки километров.

Особенностью этого прибора является использование многостопового измерителя временных интервалов (ИВИ) – таймера событий EventTimer A033ET/USB с пикосекундным разрешением, а также встроенной катушки оптического волокна для устранения «мертвой зоны» в начале диапазона измерений. Выбранная конструкция прибора позволяет не только достичь высокого разрешения при измерениях задержки в ВОЛС, но и обеспечить требуемый диапазон длин измеряемых оптических кабелей в результате применения импульсного лазера с высокой пиковой мощностью и фотоприёмного устройства с импульсным усилителем.

Высокое разрешение (около 3 пс) встроенного в рефлектометр ИВИ потенциально позволяет достичь заданного уровня точности (погрешности измерений задержек не более ± 100 пс), однако для этого необходимо уменьшить другие составляющие погрешности рефлектометра, которые вносят основной вклад в результирующую погрешность измерений времени задержки. К этим составляющим относится погрешность определения аппаратурной поправки рефлектометра (погрешность установки нуля шкалы прибора, представляющая собой аддитивную погрешность) и погрешность установки частоты опорного генератора прибора (мультипликативная погрешность).

Достичь повышения точности рефлектометра можно, если определить поправки к показаниям рефлектометра для исключения указанных составляющих погрешности.

Определение аддитивной составляющей погрешности оптического рефлектометра. Для определения аддитивной составляющей погрешности оптического рефлектометра предложено использовать суммарно-разностный метод. В этом случае рефлектометром измеряются задержки сигналов в двух катушках оптического волокна, подключенных к прибору сначала по отдельности, а затем вместе, для получения суммарной задержки.

Для измерений требуется комплект катушек оптического волокна ОВ1 и ОВ2, а также ретрорефлектор (съёмный отражающий оптический элемент), размещённый на удалённом торце волокна катушек, подключенных к рефлектометру, и предназначенный для повышения мощности отражаемых от торца волокна оптических импульсов.

Суть предлагаемого метода состоит в следующем. Графики погрешности измерений Δ_t интервала времени (в данном случае – задержки распространения сигнала в оптическом волокне) выражаются соотношением

$$\Delta_t = a + bt,$$

где a – аддитивная составляющая погрешности; b – коэффициент, определяемый погрешностью установки частоты опорного генератора оптического рефлектометра; t – измеряемый интервал времени (задержка распространения сигнала).

Значение коэффициента b зависит от действительного значения частоты опорного генератора f_d и её относительного отклонения от номинального значения f_n :

$$b = (f_d - f_n) / f_n.$$

Для определения коэффициента a выполняются следующие операции: вначале к рефлектометру подключается первая катушка оптического волокна ОВ1 и рефлектометром измеряется задержка распространения сигнала, вносимая первой катушкой. Затем аналогично измеряется задержка во второй катушке оптического волокна ОВ2, далее к рефлектометру подключаются две катушки одновременно и измеряется суммарная задержка сигнала в двух последовательно включённых катушках ОВ1 и ОВ2. Здесь следует заметить, что измеренные значения задержек определяются рефлектометром путём усреднения результатов многократных измерений по последовательности импульсов. Дальнейшие расчёты строятся на соотношениях между измеряемыми величинами – задержками распространения сигнала в катушках ОВ1 и ОВ2.

Для построения системы уравнений, характеризующих зависимости между результатами измерений, введём обозначения: $t_{1д}$, $t_{2д}$ – действительные значения задержек распространения сигнала соответственно в катушках оптического волокна ОВ1, ОВ2; $t_{1и}$, $t_{2и}$ – измеренные значения задержек распространения сигнала соответственно в катушках оптического волокна ОВ1, ОВ2; $t_{12и}$ – измеренное значение задержки распространения сигнала в двух последовательно включённых катушках оптического волокна ОВ1, ОВ2; Δ_1 , Δ_2 – абсолютные погрешности измерений задержек соответственно в катушках ОВ1, ОВ2; Δ_{12} – абсолютная погрешность измерений суммарной задержки в катушках ОВ1, ОВ2.

Выражения для перечисленных погрешностей запишем в виде системы уравнений

$$\left. \begin{aligned} \Delta_1 &= a + bt_{1д}, \\ \Delta_2 &= a + bt_{2д}, \\ \Delta_{12} &= a + b(t_{1д} + t_{2д}). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

С другой стороны, по определению абсолютной погрешности выполняются следующие соотношения:

$$\left. \begin{aligned} \Delta_1 &= t_{1и} - t_{1д}, \\ \Delta_2 &= t_{2и} - t_{2д}, \\ \Delta_{12} &= t_{12и} - (t_{1д} + t_{2д}). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

После подстановки (2) в (1) система уравнений примет вид

$$\left. \begin{aligned} t_{1и} - t_{1д} &= a + bt_{1д}, \\ t_{2и} - t_{2д} &= a + bt_{2д}, \\ t_{12и} - t_{1д} - t_{2д} &= a + bt_{1д} + bt_{2д}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Решив систему уравнений (3) относительно a , получим

$$a = t_{1и} + t_{2и} - t_{12и}.$$

Вычисленное значение a , взятое с противоположным знаком, следует использовать в качестве поправки к показаниям оптического рефлектометра для исключения аддитивной погрешности.

Следует заметить, что предложенный метод основан на предположении о постоянстве значений задержек в катушках оптического волокна за время проведения измерений. Поэтому при использовании данного метода необходимо стабилизировать температуру в лаборатории для минимизации влияния её изменений на задержку распространения сигнала в оптическом волокне. В ходе экспериментальных исследований установлено, что в результате принятия конструктивных мер (размещения катушки волокна в специальном корпусе, выполняющем роль пассивного термостата), а также при поддержании при измерениях в лабораторном помещении постоянной температуры с нестабильностью около ± 2 °С для катушек волокна длиной в несколько километров можно обеспечить нестабильность задержки сигнала за время измерений не более 2–3 пс. Данное обстоятельство позволяет использовать катушки с обычным одномодовым телекоммуникационным волокном (например, SMF-28) без необходимости применения дорогостоящих фазостабильных оптических кабелей.

Проведём оценку точности предложенного метода определения аддитивной составляющей погрешности оптического рефлектометра. Обозначим среднее квадратическое отклонение (СКО) результатов измерений задержки распространения сигнала в катушках оптического волокна ОВ1 и ОВ2 как σ_1 , σ_2 , а СКО результатов измерений суммарной задержки в последовательно включённых катушках ОВ1 и ОВ2 как σ_{12} .

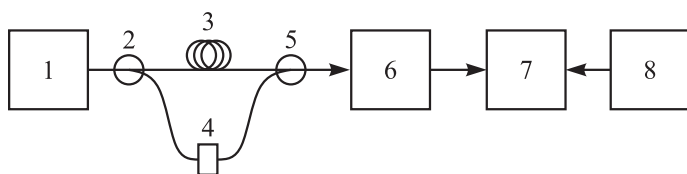


Схема установки для измерений задержки распространения сигнала в катушке волокна:

1 – импульсный лазер; 2 – волоконно-оптический разветвитель; 3 – катушка оптического волокна; 4 – оптический соединитель; 5 – волоконно-оптический объединитель; 6 – фотоприёмник; 7 – измеритель временных интервалов; 8 – стандарт частоты и времени

The scheme of installation for measuring of signal propagation delay in coil of optical fiber

1 – pulse laser; 2 – fiber coupler; 3 – coil of optical fiber; 4 – optical connector; 5 – fiber combiner; 6 – photodetector; 7 – time interval counter; 8 – standard of time and frequency

Неисключённые систематические погрешности (НСП), обусловленные совместным влиянием температурных изменений задержек распространения сигнала в катушках оптического волокна и изменений задержек в входных каналах рефлектометра за время проведения измерений с первой катушкой, второй катушкой и двумя последовательно включёнными катушками, обозначим θ_1 , θ_2 , θ_{12} соответственно.

Выражение для СКО оценки аддитивной составляющей погрешности измерений интервалов времени запишем в виде

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\theta_{\Sigma}^2/3 + \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_{12}^2}, \quad (4)$$

где $\theta_{\Sigma} = \pm 1,1\sqrt{\theta_1^2 + \theta_2^2 + \theta_{12}^2}$.

Проведённые по формуле (4) расчёты показали, что при значениях σ_1 , σ_2 , σ_{12} , θ_1 , θ_2 , θ_{12} , не превышающих 2–3 пс, СКО σ_{Σ} составят не более 4–6 пс, что является пренебрежимо малым значением для приборов с предельно допускаемой погрешностью ± 100 пс.

Определение поправок для исключения мультипликативной составляющей погрешности рефлектометра. Для исключения мультипликативной погрешности рефлектометра авторами статьи предлагается использовать калибровочные поправки к его показаниям, зависящие от значений измеряемой задержки. Определение этих калибровочных поправок основывается на сравнении значений интервалов времени, полученных по результатам измерений рефлектометром и опорных значений, определяемых с помощью эталонов. Отметим, что для градуировки рассматриваемого оптического рефлектометра высокого разрешения непригодны рабочие эталоны, построенные на основе оптических генераторов импульсов, так как они имеют недостаточную точность (их погрешность составляет не менее наносекунды). Для решения данной задачи авторы статьи предлагают проводить градуировку рефлектометра с помощью катушек оптического волокна, задержки сигнала в которых определяются с помощью эталонной аппаратуры (измерителя временных интервалов и стандарта частоты).

Схема установки для измерений задержки распространения сигнала в катушке оптического волокна представлена на рисунке. Принцип действия установки состоит в следующем. Лазер 1 излучает оптический импульс, который поступает на волоконно-оптический разветвитель 2, направляющий излучение по двум каналам. Оптический импульс по первому каналу поступает через волоконно-оптический объединитель 5 в фотоприёмник 6 и затем на вход ИВИ 7, запуская на ИВИ старт измерений интервала времени. Импульс во втором канале проходит по исследуемому оптическому волокну 3 и через объединитель 5 поступает на фотоприёмник 6 и далее на вход ИВИ, останавливая процесс измерений интервала времени. Затем исследуемая катушка оптического волокна отключается от установки, разветвитель и объединитель соединяются напрямую, с лазера подаётся оптический импульс и с помощью ИВИ повторно проводятся измерения интервала времени между импульсами, поступившими по двум каналам, для определения

значения задержки, вносимой оптическими кабелями установки. Для повышения точности измерений ИВИ использует сигнал опорной частоты, поступающий от стандарта частоты и времени 8. Задержка сигнала τ_3 , вносимая катушкой оптического волокна, определяется как разность интервалов времени, измеренных эталонной аппаратурой (ИВИ и стандартом частоты и времени) при подключении катушки к установке и без неё. Для уменьшения случайной погрешности измерений указанные операции выполняются многократно и полученные результаты усредняются:

$$\bar{\tau}_3 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tau_{3i},$$

где $\bar{\tau}_3$ – среднее значение задержки, вносимой катушкой оптического волокна, определённое с помощью эталонной аппаратуры; N – количество измерений ($i = 1, \dots, N$).

Уменьшение систематической погрешности измерений временных интервалов обеспечивается использованием ИВИ сигнала опорной частоты от стандарта частоты (рубидиевого, цезиевого или водородного генераторов). Проведённые оценки показали, что при использовании промышленно выпускаемых ИВИ с высоким разрешением погрешность измерений задержки сигнала в катушке оптоволокна составит около 50 пс.

Измерения в изложенном порядке производятся для нескольких катушек оптического волокна, используемых для градуировки рефлектометра в нескольких точках диапазона измерений.

Затем время задержки сигнала в каждой катушке измеряется рефлектометром, регистрирующим ряд значений задержек τ_{pi} ($i = 1, \dots, N$). По полученным результатам определяется среднее значение задержки, измеренной оптическим рефлектометром:

$$\bar{\tau}_p = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tau_{pi}.$$

Поправка τ_n к показаниям оптического рефлектометра в данной точке шкалы вычисляется по формуле

$$\tau_n = \bar{\tau}_3 - \bar{\tau}_p.$$

Поправки в остальных точках шкалы рефлектометра определяются аналогично.

Оценим погрешность определения поправки к показаниям рефлектометра. Составляющими этой погрешности являются погрешности определения задержки в катушках оптического волокна с помощью эталонной аппаратуры и случайная погрешность рефлектометра. Для оценки погрешности определения поправки σ_n , выраженной в виде СКО, запишем соотношение

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{\Theta_3^2}{3} + \sigma_3^2 + \sigma_p^2},$$

где σ_3 – СКО результатов измерений задержки эталонной аппаратурой; Θ_3 – погрешность измерений временных

интервалов ИВИ; σ_p – СКО результатов измерений задержки оптическим рефлектометром.

Проведённые расчёты показали, что погрешность определения поправки к показаниям рефлектометра предложенным методом не превышает 30–40 пс, что позволяет использовать предложенный метод для калибровки высокоточных оптических рефлектометров.

Заключение. Применение предложенных методов позволит уменьшить погрешность оптических рефлектометров с пикосекундным разрешением до значений менее ± 100 пс за счёт исключения аддитивной и мультипликативной составляющих погрешности прибора путём использования соответствующих экспериментально определяемых поправок. Предложенные методы можно рекомендовать использовать для определения метрологических характеристик оптических рефлектометров при их испытаниях, калибровке и поверке.

Список литературы

1. Донченко С. С., Колмогоров О. В., Прохоров Д. В. Система одно- и двухсторонних сравнений шкал времени // Измерительная техника. 2015. № 1. С. 14–17.
2. Донченко С. С., Колмогоров О. В., Прохоров Д. В., Бувев С. Г. Система встречных сравнений шкал времени // Альманах современной метрологии. 2017. № 9. С. 110–116.
3. Щербаков В. В., Солодков А. Ф., Шелков Н. В., Озеров Ю. В. Экспериментальное исследование отечественного оптического волокна в составе волоконно-оптической линии задержки // Фотон-Экспресс. 2016. №1 (129). С. 39–40.
4. Колмогоров О. В., Щипунов А. Н., Прохоров Д. В., Донченко С. С., Бувев С. Г., Малимон А. Н., Балаев Р. И., Федорова Д. М. Система передачи эталонных сигналов частоты и времени измерительным средствам наземного комплекса ГЛОНАСС по оптическому кабелю // Измерительная техника. 2017. № 9. С. 29–32. DOI: 10.32446/0368-1025it.2017-9-29-32
5. О практике применения радиофотонных устройств в радиолокации // Перспективы развития РЛС дальнего обнаружения и интегрированных систем и комплексов информационного обеспечения ВКО: доклад на II всероссийской науч.-техн. конф., Москва, 2014, АО «Центр ВОСПИ». URL: <http://www.centervospi.ru/articles/272> (дата обращения: 16.07.2019).
6. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи: Пер. с англ. М.: Техносфера, 2007. 512 с.
7. Листвин А. В., Листвин В. Н. Рефлектометрия оптических волокон. М.: ЛЕСАРпт, 2005. 208 с.
8. Волоконно-оптическая техника: современное состояние и новые перспективы / Под ред. Дмитриева С. А. и Слепова Н. Н. М.: Техносфера, 2010. 608 с.
9. Григорьев В. В., Кравцов В. Е., Митюрёв А. К., Мороз Е. А., Погонишев А. О., Подюкова Л. В., Савкин К. Б., Тихомиров С. В. Современные оптические рефлектометры: вопросы метрологического обеспечения (обзор) // Фотон-экспресс. 2018. № 6 (150). С. 18–26.

10. Иванов А. Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения. М.: Компания Сайрус Системс, 1999. 664 с.

11. Пономарев Р. С., Шевцов Д. И. Применение оптической рефлектометрии в производстве интегрально-оптических схем // Прикладная фотоника. 2018. Т. 5. № 1. С. 102–107.

12. Колмогоров О. В., Щипунов А. Н., Прохоров Д. В., Донченко С. С., Був С. Г. Разработка оптического рефлектометра для высокоточного определения задержек распространения сигнала в волоконно-оптических линиях связи // Вестник метролога. 2018. № 2. С. 3–7.

References

1. Donchenko S. S., Kolmogorov O. V., Prokhorov D. V., *Measurement Techniques*, 2015, vol. 58, no. 1, pp. 18–22. DOI: 10.1007/s11018-015-0656-8

2. Kolmogorov O. V., Prokhorov D. V., Donchenko S. S., Schipunov A. N., Buev S. G., *Al'manac of Modern Metrology*, 2017, no. 9, pp. 110–116 (in Russian).

3. Shcherbakov V. V., Solodkov A. F., Shelkov N. V., Ozerov Y. V., *Foton-Express*, 2016, no. 1 (129), pp. 39–40 (in Russian).

4. Kolmogorov O. V., Shchipunov A. N., Prokhorov D. V., Donchenko S. S., Buev S. G., Malimon A. N., Balaev R. I., Fedorova D. M., *Measurement Techniques*, 2017, vol. 60, no. 9, pp. 901–905. DOI: 10.1007/s11018-017-1290-4

5. *O praktike primeneniya radiofotonnykh ustroystv v radiolokatsii*, Moscow, 2014, Report at the II All-Russian Scientific and Technical Conference, available at: www.centervospi.ru/articles/272 (accessed: 04.12.2019) (in Russian).

6. Roger L. Freeman. *Fiber-Optic Systems for Telecommunications*. Wiley, 2002. 416 p.

7. Listvin A. B., Listvin V. N., *Reflektometriya opticheskikh volokon*, Moscow, LESARart Publ., 2005, 208 p. (in Russian).

8. *Volonno-opticheskaya tekhnika: sovremennoe sostoyanie i novye perspektivy*, Ed. by Dmitriev S. A., Slepov N. N., Moscow, Tekhnosfera Publ., 2010, 608 p. (in Russian).

9. Grigor'ev V. V., Kravtsov V. E., Mityurev A. K., Moroz E. A., Pogonyshv A. O., Podyukova L. V., Savkin K. B., Tikhomirov S. V., *Foton-express*, 2018, no. 6(150), pp. 18–26 (in Russian).

10. Ivanov A. B. *Volononnaya optika: komponenty, sistemy peredachi, izmereniya*, Moscow, Kompaniya Sairus Sistems Publ., 1999, 664 p. (in Russian).

11. Ponomarev R. S., Shevtsov D. I., *Prikladnaya fotonika*, 2018, vol. 5, no. 1, pp. 102–107 (in Russian).

12. Kolmogorov O. V., Schipunov A. N., Prokhorov D. V., Donchenko S. S., Buev S. G., *Vestnik metrologa*, 2018, no. 2, pp. 3–7 (in Russian).

Дата поступления: 04.11.2019.

Дата принятия: 04.12.2019.

Reducing the measurement error of signal propagation delays using an optical reflectometer with picosecond resolution

Oleg V. Kolmogorov, Andrey N. Shchipunov, Oleg V. Denisenko, Sergey S. Donchenko, Dmitriy V. Prokhorov, Sergey G. Buev, Ekaterina V. Chemesova

Russian metrological institute of technical physics and radio engineering (VNIIFTRI), Mendeleev, Moscow Region, Russian Federation, e-mail: kolmogorov32@rambler.ru, shipunov@vniiftri.ru, denisenko@vniiftri.ru, donchenko_ss@vniiftri.ru, prokhorov@vniiftri.ru, sbuev@rambler.ru, dobro_k@list.ru

The problems requiring high-precision measurements of signal propagation delays in optical fibers are considered. Design features of a pulsed optical reflectometer with a picosecond resolution designed for measuring propagation delays of a signal are considered. It is shown that the error of such a reflectometer includes the additive and multiplicative components. A method for determining the additive component of the optical reflectometer error based on measurements of signal delays introduced by individual optical fiber coils and the total delay introduced by series-connected coils is proposed. The requirements to the measurement conditions are formulated and the results of the error estimation of the proposed method are presented. To exclude the multiplicative component of the reflectometer error, a method for determining corrections to the reflectometer readings is proposed. The method is based on measuring the propagation delays of the signal in the coils of the optical fiber, first using reference equipment (installation for measuring the propagation delay of the signal), and then using an optical reflectometer, and then calculating the differences of the obtained measurement results. The scheme of installation for measurements of a propagation delay of signal in a coil of optical fiber is presented, the principle of operation of measuring installation is described. The results of the estimation of the error in determining the corrections to the reflectometer readings by the proposed method are presented. It is shown that the exclusion of the additive and multiplicative components of the error will reduce the error of optical reflectometers to values less than ± 100 ps.

Key words: optical reflectometer, optical fiber, signal propagation delay, additive error, multiplicative error.

Характеристики долговременной нестабильности водородных стандартов частоты и времени нового поколения

С. И. Донченко¹, И. Ю. Блинов¹, И. Б. Норец¹, Ю. Ф. Смирнов¹, А. А. Беляев², Н. А. Демидов²,
Б. А. Сахаров², В. Г. Воронцов²

¹Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений,
г. п. Менделеево, Московская обл., Российская Федерация, e-mail: director@vniiftri.ru,
blinov@vniiftri.ru, norets_igor@vniiftri.ru, yfsmirnov@vniiftri.ru

²ЗАО «ВРЕМЯ-Ч», Нижний Новгород, Российская Федерация, e-mail: beliaev@vremya-ch.com,
demidov@vremya-ch.com, sakharov@vremya-ch.com, vorontsov@vremya-ch.com

Описаны изменения в алгоритме формирования международной шкалы атомного времени TAI в части оценки весовых коэффициентов часов, участвующих в формировании TAI. Проведены исследования характеристик долговременной нестабильности водородных стандартов частоты и времени нового поколения из состава Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1-2018 на основе обработки результатов отклонений частот стандартов относительно TAI. Подтверждено, что в настоящее время водородные стандарты частоты и времени нового поколения показывают существенно меньшую долговременную нестабильность по сравнению с квантовыми стандартами частоты аналогичных и других типов.

Ключевые слова: квантовые стандарты частоты, стандарт частоты и времени водородный, нестабильность частоты, алгоритм взвешивания, международная шкала атомного времени.

Введение. Водородные стандарты частоты по сравнению с другими квантовыми стандартами частоты (КСЧ) имеют наилучшие характеристики хранения шкалы времени несмотря на присущие им систематические изменения (линейный дрейф) частоты [1]. За последние пять лет заметно вырос интерес к водородным стандартам частоты в связи с изменениями, которые ввело Международное бюро мер и весов (BIPM) в алгоритм формирования международной шкалы атомного времени TAI. Эти изменения оказали существенное влияние на соотношение весовых коэффициентов (далее – весов) цезиевых и водородных стандартов частоты, участвующих в формировании TAI.

Среднемесячные значения разности частот КСЧ относительно TAI ежемесячно публикуются BIPM (<ftp://ftp2.bipm.org/pub/tai/other-products/rates/>). Для объективной оценки характеристик нестабильности КСЧ были использованы опубликованные BIPM значения разности частот. Проведённые исследования показали, что на сегодняшний день стандарты частоты и времени водородные (СЧВВ) нового поколения по характеристикам долговременной нестабильности заметно превосходят аналогичные показатели различных КСЧ, участвующих в формировании TAI.

Изменения в алгоритме формирования международной шкалы атомного времени TAI. В соответствии с принятым в конце прошлого столетия алгоритмом оценки весовых коэффициентов КСЧ, участвующих в формировании TAI, в качестве относительного веса часов использовалась величина, обратно пропорциональная дисперсии отклонения частоты часов от TAI в течение одного года.

При этом долговременные характеристики нестабильности частоты ансамбля часов гарантировались за счёт снижения веса атомных часов с частотным дрейфом. Последствием такой процедуры был относительно низкий вклад водородных стандартов в формирование шкалы времени ансамбля часов. Например, типовые значения их относительных весов были в 10 раз меньше, чем для промышленных цезиевых стандартов частоты HP5071A [2].

Современная версия алгоритма взвешивания, реализованная в BIPM с января 2014 г., основана на концепции взвешивания часов в соответствии с их прогнозируемостью [3]. Основная идея заключается в том, что часы, характеризующиеся значительным дрейфом частоты или старением, тем не менее, могут быть эффективно использованы в шкале времени ансамбля часов, если их поведение предсказуемо. В новом алгоритме взвешивания оценивается разница между прогнозируемой и реальной частотой атомных часов. Эти данные на годовом интервале времени наблюдения используются для оценки весов с целью обеспечения характеристик долговременной нестабильности частоты ансамбля часов. При этом достигнуто лучшее распределение весов часов и уменьшение нестабильности частоты ансамбля часов как на коротких, так и на длительных интервалах времени измерений, что позволило повысить роль водородных стандартов частоты при формировании шкалы TAI. С 2014 г. индивидуальные значения относительных весов водородных стандартов увеличились на порядок, достигнув заданного в алгоритме предела, а для промышленных цезиевых стандартов типа HP5071A – соответственно уменьшились почти на порядок. На рис. 1 приведена

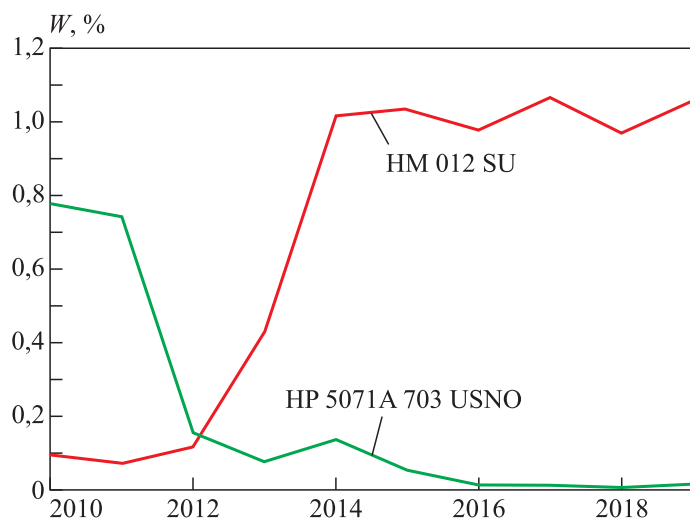


Рис. 1. Динамика изменения относительных весов W цезиевых и водородных стандартов частоты при формировании TAI за последние 10 лет

Fig.1. Changes of the weights cesium clocks and hydrogen masers over the past 10 years

динамика изменения относительных весов цезиевых и водородных стандартов частоты при формировании TAI за последние 10 лет (<ftp://ftp2.bipm.org/pub/tai/other-products/weights/w10.01-w19.09>). Таким образом, с принятием нового алгоритма взвешивания суммарный вклад отдельной лаборатории времени в формирование шкалы TAI стал прямо пропорционален количеству водородных стандартов в лаборатории. В состав Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени (ГЭВЧ) ГЭТ 1-2018 входят 16 водородных стандартов различных типов, а также два цезиевых и четыре рубидиевых стандарта частоты фонтанного типа. В настоящее время ГЭВЧ занимает второе место по относительному вкладу в формирование шкалы TAI, уступая лишь аналогичному вкладу Военно-морской лаборатории США (USNO), которая имеет в своём составе 103 КСЧ, из них 35 являются водородными стандартами частоты [3].

Изменения в алгоритме формирования шкалы TAI оказали существенное влияние на соотношение количества цезиевых стандартов частоты и водородных стандартов, участвующих в формировании TAI. За последние пять лет в лабораториях времени общее количество водородных стандартов увеличилось на 50 %, а цезиевых стандартов уменьшилось на 20 % [3].

Водородные стандарты частоты и времени нового поколения. Стандарт частоты и времени водородный нового поколения был разработан ЗАО «Время-Ч» для обеспечения высокоточного хранения единиц времени и частоты в составе базового комплекса времени и частоты, предназначенного для оснащения эталонной базы Государственной службы времени, частоты

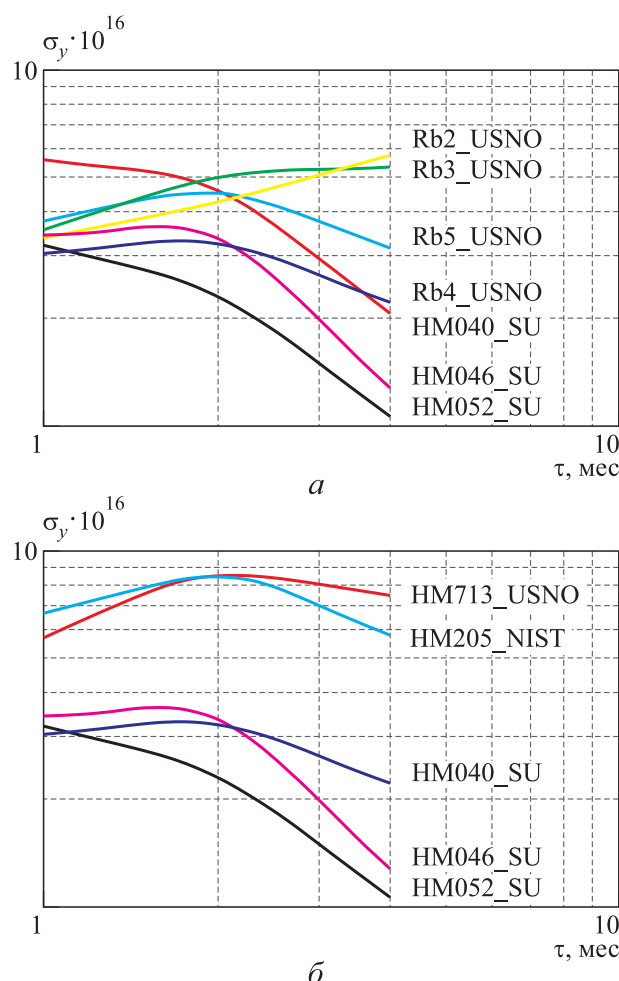


Рис. 2. Нестабильность частоты $\sigma_y(\tau)$ СЧВВ нового поколения (HM040_SU, HM046_SU, HM052_SU) и рубидиевых стандартов фонтанного типа (USNO Rb2, Rb3, Rb4 и Rb5) (а), а также типовых водородных стандартов (HM713_USNO и HM205_NIST) (б) в системе TAI; τ – интервал времени измерения в месяцах

Fig. 2. Frequency instability of new generation hydrogen masers and rubidium frequency standards of fountain type (a) and typical hydrogen masers (b) in TAI

и определения параметров вращения Земли (ГСВЧ). При этом модернизации подверглась конструкция водородного генератора в части улучшения магнитного экранирования путём введения в работу мазера неполяризованного атомного пучка, улучшения системы термостатирования резонатора и оптимизации шумов системы автоматической настройки резонатора [4, 5]. В результате относительное изменение частоты СЧВВ при изменении температуры окружающей среды составило менее $\pm 1 \cdot 10^{-15}/^{\circ}\text{C}$, а при изменении внешнего магнитного поля менее $\pm 5 \cdot 10^{-15}/\text{Эрстед}$. Применение новых умножителей частоты 5–100 МГц и буферных усилителей позволило достичь низкой фазовой температурной чувствительности не более 2 пс/ $^{\circ}\text{C}$.

Особенностью функционирования СЧВВ является его установка в прецизионную термостатированную камеру с пределами изменения температуры $\pm 0,1$ °C в сутки, что стало одним из важнейших факторов достижения наименьшей на сегодняшний день суточной нестабильности частоты СЧВВ, составляющей не более $3 \cdot 10^{-16}$.

Четыре СЧВВ нового поколения №№ 40, 41, 46, 52 введены в состав усовершенствованного ГЭВЧ. По результатам внутренних сличений за истекший период эксплуатации установлено, что нестабильность частоты всех СЧВВ нового поколения в интервалах времени измерения 1–10 сут не превышает $3 \cdot 10^{-16}$, при этом относительный дрейф частоты менее $1 \cdot 10^{-16}$ в сутки. В настоящее время продолжается оснащение эталонов единиц времени и частоты ГСВЧ аналогичными СЧВВ нового поколения.

Анализ характеристик долговременной нестабильности стандартов частоты и времени в системе ТАИ. В соответствии с установленным BIPM регламентом эталоны времени и частоты национального уровня участвуют в международных ключевых сличениях, поэтому для объективной оценки характеристик нестабильности стандартов частоты целесообразно использование полученных результатов этих ключевых сличений.

Начиная с момента ввода СЧВВ нового поколения №№ 40, 41, 46 и 52 в состав ГЭВЧ данные по отклонению их частот относительно ТАИ ежемесячно публикуются в BIPM. На основании этих данных были рассчитаны показатели нестабильности частоты (девиация Аллана) для различных стандартов частоты в одном и том же интервале времени наблюдения с MJD 57869 по MJD 58569. При этом были исключены линейные дрейфы частоты для всех исследуемых временных рядов.

Полученные результаты позволяют провести сравнение характеристик долговременной нестабильности СЧВВ нового поколения из состава ГЭВЧ и рубидиевых стандартов частоты фонтанного типа из состава USNO Rb2, Rb3, Rb4 и Rb5 в системе ТАИ. На рис. 2, а показано, что на наблюдаемых интервалах времени измерения ($\tau=4$ мес) нестабильность частоты СЧВВ нового поколения (HM040_SU, HM046_SU, HM052_SU) существенно меньше, чем для рубидиевых стандартов частоты фонтанного типа из состава USNO (Rb2, Rb3, Rb4 и Rb5). В рассмотренном случае график прерывается, так как нет статистических данных по интервалам измерений более четырёх месяцев из-за конечного интервала времени наблюдений.

Также проведено сравнение характеристик долговременной нестабильности СЧВВ нового поколения и водородных стандартов из состава ведущих лабораторий времени USNO и NIST в системе ТАИ. Следует отметить, что указанные лаборатории времени оснащены серийными водородными стандартами типа NHM2010. На рис. 2, б показано, что нестабильность частоты СЧВВ нового поколения в несколько раз меньше, чем для водородных стандартов типа NHM2010.

Закключение. В результате внесения изменений в алгоритм формирования ТАИ с 2014 г. относительные веса

промышленных цезиевых и водородных стандартов частоты полярно изменились, что подтверждает адекватность модели погрешности хранения шкалы времени водородных стандартов, предложенной авторами в 2007 г. [1]. Проведённый анализ характеристик стандартов частоты и времени в системе ТАИ показал, что на сегодняшний день СЧВВ нового поколения по характеристикам долговременной нестабильности заметно превосходят аналогичные показатели всех типов КСЧ, участвующих в формировании ТАИ.

Ввод СЧВВ нового поколения, а также новых средств воспроизведения и хранения единиц времени и частоты в состав ГЭВЧ, обеспечил улучшение метрологических характеристик эталона. По состоянию на сегодняшний день национальная шкала времени UTC(SU) входит в число лучших реализаций UTC (<ftp://ftp2.bipm.org/pub/tai/Circular-T/cirt/>).

Список литературы

1. Смирнов Ю. Ф. Оценка погрешности хранения шкалы времени водородных стандартов с учётом систематических изменений частоты // Измерительная техника. 2007. № 3. С. 42–45.
2. Panfilo G., Harmegnies A., Tisserand L., *A new prediction algorithm for EAL*, Proc. Joint Meeting of the EFTF and IEEE FCS, 2011, 850–855. DOI: 10.1109/FCS.2011.5977808
3. BIPM Annual Report on Time Activities, 2018, vol. 13, Pavillon de Breteuil, F-92312 SÈVRES Cedex, France, 22 p.
4. Воронцов В. Г., Беляев А. А., Демидов Н. А., Поляков В. А., Сахаров Б. А., Гладильщиков М. Л. Разработка активного водородного стандарта частоты и времени нового поколения для базового комплекса времени и частоты // Метрология времени и пространства: материалы VIII Междунар. симпозиума, 14–16 сентября 2016 г., г. Санкт-Петербург. Менделеево: ВНИИФТРИ, 2016, С. 55–57.
5. Донченко С. И., Блинов И. Ю., Гончаров А. С., Смирнов Ю. Ф., Беляев А. А., Демидов Н. А., Сахаров Б. А., Гладильщиков М. Л. Эталонный комплекс времени и частоты // Метрология времени и пространства: материалы VIII Междунар. симпозиума, 14–16 сентября 2016 г., г. Санкт-Петербург. Менделеево: ВНИИФТРИ, 2016. С. 100–101.

References

1. Smirnov Yu. F., *Measurement Techniques*, 2007, vol. 50, no. 3, pp. 293–297. DOI: 10.1007/s11018-007-0064-9
2. Panfilo G., Harmegnies A., Tisserand L., *A new prediction algorithm for EAL*, Proc. Joint Meeting of the EFTF and IEEE FCS, 2011, 850–855. DOI: 10.1109/FCS.2011.5977808
3. BIPM Annual Report on Time Activities, 2018, vol. 13, Pavillon de Breteuil, F-92312 SÈVRES Cedex, France, 22 p.
4. Vorontsov V., Belyaev A., Demidov N., Polyakov V., Sakharov B., Gladilshchikov M., *Proceedings of the VIII International Symposium Metrology of Time and Space*,

September 14–16, 2016, St. Petersburg, Mendeleevo, VNIIFTRI Publ., pp. 55–57.

5. Donchenko S., Blinov I., Goncharov A., Smirnov Y., Belyaev A., Demidov N., Sakharov B., Gladilshnikov M., *Proceedings of the VIII International Symposium Metrology*

of Time and Space, September 14–16, 2016, St. Petersburg, Mendeleevo, VNIIFTRI Publ., pp. 100–101.

Дата поступления: 25.10.2019.

Дата принятия: 25.11.2019.

The long-term instability of the new generation hydrogen masers

Sergey I. Donchenko¹, Igor Y. Blinov¹, Igor B. Norets¹, Yury F. Smirnov¹, Alexey A. Belyaev², Nikolay A. Demidov², Boris A. Sakharov², Vladislav G. Vorontsov²

¹Russian metrological institute of technical physics and radio engineering (VNIIFTRI), Mendeleevo, Moscow Region, Russian Federation, e-mail: director@vniiftri.ru, blinov@vniiftri.ru, norets_igor@vniiftri.ru, yfsmirnov@vniiftri.ru

²JSC "Vremya-CH", Nizhniy Novgorod, Russian Federation, e-mail: beliaev@vremya-ch.com, demidov@vremya-ch.com, sakharov@vremya-ch.com, vorontsov@vremya-ch.com

The latest changes in the algorithm for the formation of the international atomic time scale TAI are reported in terms of estimating the weights of the clocks involved in the formation of TAI. Studies of the characteristics of the long-term instability of new-generation hydrogen masers based on processing the results of the clock frequency difference with respect to TAI are performed. It has been confirmed that at present, new-generation hydrogen masers show significantly less long-term instability in comparison with quantum frequency standards of similar and other types.

Key words: quantum frequency standards, hydrogen masers, frequency instability, weighting algorithm, temps atomique international (TAI).

Повышение точности определения параметров вращения Земли методом комбинирования результатов измерений различных видов в Главном метрологическом центре Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли

С. Л. Пасынок

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, г. п. Менделеево, Московская обл., Российская Федерация, e-mail: pasynok@vniiftri.ru

Описаны результаты работ по совершенствованию программ и методов совместной обработки (комбинирования) результатов измерений различных видов (радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами, спутниковой лазерной дальнометрии, измерений по результатам приёма сигналов глобальных навигационных спутниковых систем) в Главном метрологическом центре Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли. Рассмотрены методы комбинирования результатов измерений различных видов на уровнях измерений и временных рядов. Повышение точности определения всемирного времени достигнуто в результате учёта и посткорреляционной обработки результатов измерений, полученных с новых тринадцатиметровых антенн двухэлементного радиоинтерферометра на узлах колокации Института прикладной астрономии Российской академии наук. Точность определения комбинированных значений параметров вращения Земли увеличена в результате повышения точности как отдельных рядов, полученных в результате обработки измерений различных видов в разных Центрах обработки и анализа данных, так и совершенствования алгоритмов комбинирования.

Ключевые слова: параметры вращения Земли, всемирное время, комбинирование, служба определения параметров вращения Земли, опорная шкала.

Введение. Параметры вращения Земли (ПВЗ) – величины, определяющие положение земной системы координат относительно небесной системы координат. Поскольку средства измерений расположены на Земле, а уравнения движения наблюдаемых объектов (естественных и искусственных небесных тел) наиболее простой вид имеют в небесной системе координат, то необходимо установить взаимосвязь небесной и земной систем координат, т. е. для всех задач, где рассматриваются движущиеся в околоземном или космическом пространстве тела, необходимо знать ПВЗ.

К числу областей производственной деятельности, в которых необходима информация о ПВЗ, относятся: наземная и космическая геодезия; аэрокосмические съёмки; картографирование; космическая, воздушная, наземная и морская навигация; метеорология; мониторинг природных ресурсов; экология; прогноз землетрясений и техногенных катастроф; мониторинг и обеспечение безопасности эксплуатации крупных объектов (плотин, газопроводов и т. д.). Фундаментальные научные исследования на основе ПВЗ – это определение координат небесных объектов, геодинамика, изучение внутреннего строения Земли, геофизических явлений и их влияния на процессы, происходящие на поверхности Земли и в окружающем пространстве, динамика атмосферы, суши, океанов и ледников, исследования физических полей Земли. Особые требования к информации о

ПВЗ, особенно к оперативности и надёжности обеспечения данными, предъявляются со стороны современных средств оборонной техники и Глобальной навигационной спутниковой системы Российской Федерации (ГЛОНАСС).

В настоящей статье рассмотрены результаты совершенствования средств измерений Главного метрологического центра Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли (ГМЦ ГСВЧ), осуществляющих сбор результатов измерений, их обработку, определение и прогнозирование ПВЗ, а также формирование бюллетеней с информацией о ПВЗ. Вследствие модернизации, а также повышения точности исходных данных (измерений и результатов частичной обработки измерений) точность официальных данных о ПВЗ возросла в 1,5–2 раза. Определение и прогнозирование всемирного времени и координат полюсов Земли на основе информации, полученной на пунктах наблюдения за ПВЗ, а также обеспечение потребностей государства в информации о ПВЗ возложено на ГМЦ ГСВЧ Постановлением Правительства РФ от 23 марта 2001 г. № 225 «Об утверждении Положения о Государственной службе времени, частоты и определения параметров вращения Земли».

Общие сведения о совместной обработке. Расхождение значений ПВЗ, определяемых и публикуемых отдельными Центрами обработки и анализа данных (далее – Центры), вызваны следующими причинами:

отличиями массивов исходных измерительных данных (количества данных, точности, временного разрешения, степени охвата земной поверхности пунктами измерительных сетей);

применением разных методов обработки результатов измерений (процедур и критериев отбраковки «плохих» данных, моделей учёта предсказуемой части определяемых параметров и значений незакреплённых стандартами астрономических и геодезических постоянных);

различием систематических и случайных погрешностей разных методов измерения.

Поэтому задача обеспечения единства измерений в области определения ПВЗ решается, с одной стороны, установлением стандартов (ГОСТ или Conventions) на те параметры и виды моделей, которые известны с большой точностью или определены по соглашению [1]. Поскольку методы обработки результатов измерений должны совершенствоваться и уточняться, то стандарты не определяют их строго. С другой стороны, оставшиеся расхождения значений ПВЗ учитывают с помощью совместной обработки (комбинирования) результатов всех видов измерений и Центров. При комбинировании различия учитывают с помощью смещений и весовых коэффициентов, определяемых на основе накопленных ранее данных о случайных и систематических погрешностях и другой априорной информации.

Совокупность ПВЗ, определённых комбинированием уполномоченными на эту деятельность международной или национальными службами, образует принятую опорную шкалу направлений в пространстве. Согласно Международному словарю основных и общих терминов в метрологии (International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM)), принятая опорная шкала – шкала значений величины, установленная официальным соглашением. Такое соглашение закрепляется соответствующим нормативным актом (постановлением, стандартом и т. д.).

В международном масштабе поставленную задачу решают Центры Международной службы вращения Земли и опорных систем отсчёта (МСВЗ). В России таким Центром является ГМЦ ГСВЧ согласно Постановлению Правительства РФ № 225 ГСВЧ – межведомственная организация, объединяющая усилия предприятий различных министерств и ведомств, направленные на определение ПВЗ и обеспечение единства измерений в этой области. Руководит этой деятельностью Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (РОССТАНДАРТ) согласно Постановлениям Правительства РФ № 225 и № 323 от 30 апреля 2008 года «Об утверждении Положения о полномочиях федеральных органов исполнительной власти по поддержанию, развитию и использованию глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС в интересах обеспечения обороны и безопасности государства, социально-экономического развития Российской Федерации и расширения международного сотрудничества, а также в научных целях».

Комбинирование результатов измерений может осуществляться на уровне измерений (на уровнях условных или нормальных уравнений) и на уровне временных рядов [2].

Исходными данными для комбинирования служат либо результаты измерений, либо результаты их частичной обработки. Это зависит от уровня, на котором производится комбинирование. При этом сложность процедуры комбинирования, требования к вычислительной технике и количество учтённых корреляций уменьшаются в этом ряду уровней (уровень условных уравнений, уровень нормальных уравнений, уровень временных рядов). Рассматривается также многоуровневая обработка, когда одна часть измерений или результатов их обработки уравнивается на одном уровне (например, на уровне нормальных уравнений), а вторая – на другом (например, на уровне временных рядов).

Точность комбинирования можно повысить, если внедрить более современные и точные методы измерений ПВЗ, увеличить точность используемых для комбинирования исходных данных, совершенствовать методы комбинирования или перейти к более сложным методам.

В состав средств определения ПВЗ входят измерительные средства (радиоинтерферометрические сети со сверхдлинными базами (РСДБ), сети приёмников сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), сеть лазерных спутниковых дальнометров (СЛД), а также некоторые другие средства), средства сбора и передачи данных в систему обработки и анализа данных, в которую входят Центры. Все эти средства совершенствуются в связи с постоянно растущими требованиями к точности и оперативности определения ПВЗ. Однако важнейшими направлениями совершенствования средств определения ПВЗ в мире являются:

создание РСДБ нового поколения, оборудованных быстроповоротными антеннами малого диаметра (около 13 м) и широкополосной приёмной аппаратурой (в диапазоне 2–13 ГГц);

переход к методам комбинирования на уровне измерений, точнее, на уровне нормальных уравнений, с применением технологии формирования файлов матриц нормальных уравнений для отдельных измерительных сессий в стандартизованном SINEX-формате (Solution INdependent EXchange format).

В Российской Федерации работы по совершенствованию национальной системы ПВЗ проводятся в обоих направлениях. Институтом прикладной астрономии Российской академии наук (ИПА РАН) на основе пунктов РСДБ-сети КВАЗАР-КВО создан радиоинтерферометр на узлах колокации, в состав которого входят быстроповоротные антенны малого диаметра [3]. В настоящее время на антеннах установлены трёхполосные приёмники, также ведутся работы по замене трёхполосной приёмной аппаратуры широкополосной. Двухэлементная часть радиоинтерферометра на узлах колокации, включающая малые антенны, установленные в радиоастрономической обсерватории «Зеленчукская» (Карачаево-Черкессия, Российская Федерация) и радиоастрономической обсерватории «Бадары» (Республика Бурятия, Российская Федерация), образует двухэлементный радиоинтерферометр на узлах колокации (ДРУК), с помощью которого ежедневно (3–5 раз в сутки) измеряют всемирное время.

В Центрах РАН и ГМЦ ГСВЧ разработано специальное программное обеспечение, позволяющее выдавать результаты обработки отдельных сессий РСДБ-измерений, навигационных измерений по результатам приёма сигналов ГНСС и СЛД в виде стандартизованных SINEX-файлов. В Институте прикладной астрономии РАН был разработан программный комплекс SINCom [4], позволяющий уравнивать матрицы нормальных уравнений в SINEX-формате, полученные в результате совместной обработки (комбинирования) результатов измерений различных видов.

Таким образом, предпосылки повышения точности определения комбинированных значений ПВЗ, формируемых в ГМЦ ГСВЧ, были созданы совместными усилиями РАН и Росстандарта.

Комбинирование результатов измерений на уровне временных рядов.

Совместная обработка (комбинирование) результатов измерений на уровне временных рядов проста и предъявляет минимальные требования к быстродействию компьютерной техники и объёму дискового пространства. Наиболее простой вид имеют алгоритмы отбраковки «плохих» данных и визуального просмотра значений ПВЗ отдельных рядов, полученных из обработки результатов измерений различных видов (РСДБ, ГНСС, СЛД) в разных Центрах. Поэтому комбинирование на уровне временных рядов используется в отечественной [5] и международной службах ПВЗ [6] для определения оперативных значений ПВЗ, к которым предъявляются нестрогие требования к точности, но строгие к оперативности и надёжности.

Программное обеспечение ГМЦ ГСВЧ для определения ПВЗ с помощью комбинирования на уровне временных рядов в оперативном ежесуточном режиме было разработано и внедрено М. Б. Кауфманом [5] в 2006 г. Программа совместной обработки была модернизирована в 2016 г. [7] в части опорных рядов для формирования российской системы ПВЗ. Если в исходном алгоритме для этого использовали данные рядов ПВЗ, полученных в результате обработки данных РСДБ-измерений (задержек) и ГНСС-измерений в ГМЦ ГСВЧ, то в новом алгоритме стали использовать соответствующие данные нескольких Центров. Это привело к незначительному (на 5 %) повышению точности и увеличило надёжность.

Начиная с момента получения результатов измерений в ГМЦ ГСВЧ проводится вторичная (посткорреляционная) обработка результатов РСДБ-измерений с учётом ДРУК-измерений и определение значений всемирного времени в экспериментальном режиме. Регулярная обработка РСДБ-измерений в режиме службы начата в 2017–2018 гг. [8]. При этом данные РСДБ-измерений (задержки) поступали в ГМЦ ГСВЧ в оперативном режиме устойчиво и без сбоев 3–5 раз

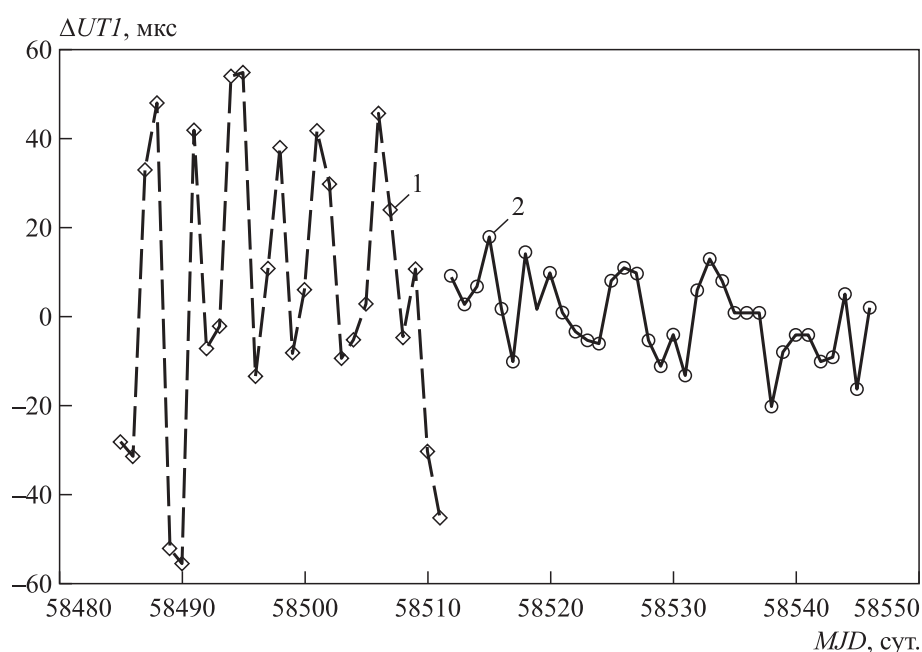


Рис. 1. Разности сводных (комбинированных) данных о всемирном времени $\Delta UT1$ ГСВЧ и МСВЗ с учётом данных ДРУК (2) и без учёта данных ДРУК (1)

Fig. 1. Differences of combined universal time values $\Delta UT1$ of SSTF and IERS with taking into account DRUK data (2) and without taking into account DRUK data (1)

в сутки; в результате обработки ДРУК-измерений за период с ноября 2017 г. по ноябрь 2018 г. получено, что среднеквадратическое отклонение данных о всемирном времени от данных МСВЗ не превышает 20 мкс. Учитывая такую точность измерений, решено включить результаты ДРУК-измерений в состав рядов, используемых при комбинировании с 2019 г., для чего необходимо внести соответствующие изменения в программы. На рис. 1 показаны разности сводных (комбинированных) данных о всемирном времени ГСВЧ и МСВЗ с учётом и без данных ДРУК.

Комбинирование результатов измерений на уровне измерений. Совместная обработка (комбинирование) на уровне измерений является более современным методом, применяемым в основном при определении окончательных значений ПВЗ. Метод комбинирования на уровне измерений применяется в МСВЗ для отдельных видов измерений: так формируются комбинированные ряды Международной ГНСС-службы – IGS (с 2002 г.) и Международной РСДБ-службы – IVS (с 1 января 2007 г.).

Математические и прикладные основы метода комбинирования на уровне измерений были заложены за рубежом [9, 10]. В России математическое обоснование приведено, например, в [11]. В ГМЦ ГСВЧ метод комбинирования орбит GPS и ГЛОНАСС был применён в модификации, рассмотренной в [12].

Для внедрения для этого метода комбинирования результатов измерений различных видов в 2009 г. создана рабочая группа МСВЗ по исследованиям технологий совместного решения на уровне измерений (Working Group on Combination at the Observation Level (COL – WG)) [13].

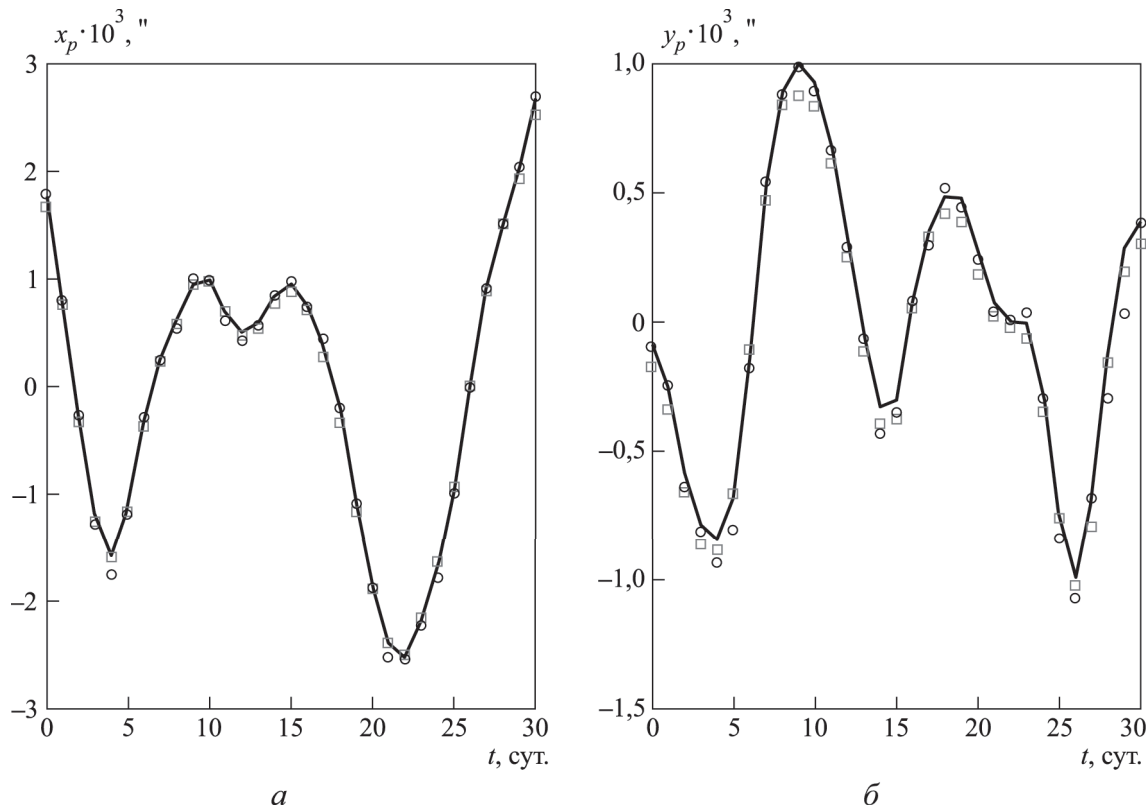


Рис. 2. Результаты определения координат земного полюса x_p (а), y_p (б) в USNO (сплошная кривая) и ГМЦ ГСВЧ ($\square$, $\circ$ – комбинирование на уровне временных рядов и на уровне SINEX-файлов соответственно); отсчёт времени t ведётся с 00:00 1 июля 2019 г.

Fig. 2 Results of evaluation of Earth's pole coordinates x_p (a) and y_p (b) in USNO (solid line) and MMC SSTF ($\square$, $\circ$ – combination on timeraws level and on SINEX-files level respectively); the t countdown starts from 00:00 on July 1, 2019

Модернизация средств ГМЦ ГСВЧ. Программное обеспечение ГМЦ ГСВЧ модернизировано для обеспечения возможности выдавать результаты обработки отдельных сессий РСДБ-, ГНСС- и СЛД-измерений в виде стандартизованных SINEX-файлов, которые являются исходными данными для работы пакета SINCom. Однако на первом этапе в SINEX-формате ежесуточно выдавались только результаты обработки отдельных сессий СЛД-измерений. Для РСДБ-измерений в SINEX-формате выдавались только результаты обработки суточных сессий, которые IVS проводит 2 раза в неделю, а для ГНСС не была проведена автоматизация процесса обработки и выдачи SINEX-файлов. Также в исходном виде версия пакета SINCom, переданная в ГМЦ ГСВЧ, не была автоматизирована для ведения регулярной службы ПВЗ. Кроме того, для формирования бюллетеней необходимо также прогнозирование ПВЗ и формирование бюллетеней в установленной форме. В 2018 г. был разработан управляющий программный комплекс для SINCom, который собирает результаты измерений, сохраняет их копии в базе данных, формирует файлы опций, запускает пакет SINCom, сохраняет результаты, осуществляет прогнозирование ПВЗ и формирует файлы бюллетеней с ПВЗ [14]. Однако недостаточное количество отечественных SINEX-файлов не позволяло в режиме службы выполнять даже

экспериментальные вычисления: ПВЗ в оперативном режиме можно было определять только на основе международных SINEX-файлов. Нередко складывалась ситуация, что при обработке результатов в оперативном режиме не хватало SINEX-файлов для получения всех данных о ПВЗ.

Следующий этап модернизации средств ГМЦ ГСВЧ был проведён в начале 2019 г. Было модернизировано программное обеспечение обработки РСДБ-измерений и автоматизировано формирование SINEX-файлов по ГНСС [15]. Модернизация отечественной программы обработки РСДБ-измерений «Ариадна» [16] вызвана не только необходимостью получать ежесуточно SINEX-файлы по данным часовых сессий РСДБ, но и тем, что IVS кардинальным образом изменила формат представления результатов посткорреляционной обработки РСДБ-измерений. Это потребовало заменить управляющую программу, разработанную ранее. В результате появилась возможность экспериментального определения ПВЗ в режиме службы на уровне нормальных уравнений. В настоящее время из измерений определяют следующие ПВЗ: x_p , y_p – координаты земного полюса; $UT1-UTC$ – разность между международными шкалами всемирного и всемирного координированного времени; $d\psi$, $d\epsilon$ – углы нутации в долготу и наклоне соответственно или координаты небесного полюса X_C , Y_C , связанные с углами нутации известными формулами [1].

Координаты земного полюса и углы нутации описывают изменение в пространстве направления оси вращения Земли в разных частотных диапазонах: $d\psi$, $d\epsilon$ описывают изменения направления оси вращения Земли с периодами от двух суток и более в небесной системе координат, координаты земного полюса – с периодами, несовпадающими с периодами углов нутации; $UT1-UTC$ показывает отличие осевого вращения реальной Земли от идеальной, совершающей полный оборот за 24 часа UTC [1].

На рис. 2 приведены результаты определения координат земного полюса x_p , y_p в Военно-морской обсерватории США (USNO) и в ГМЦ ГСВЧ. Из полных значений x_p , y_p вычли линейную часть, коэффициенты которой определены методом наименьших квадратов. Значения, полученные в ГМЦ ГСВЧ, изображены квадратами (для комбинирования на уровне временных рядов) и кружками (для комбинирования на уровне SINEX-файлов). Сплошная кривая – значения, полученные в USNO.

В настоящее время в ГМЦ ГСВЧ параллельно используют следующие методы комбинирования:

комбинирование на уровне временных рядов с учётом данных ДРУК. На основе такого комбинирования с февраля 2019 г. формируются бюллетени ГСВЧ;

комбинирование на уровне временных рядов без учёта данных ДРУК для проведения сравнительного анализа;

комбинирование на уровне SINEX-файлов в режиме исследований.

Повышение точности сводных (комбинированных) данных о ПВЗ. Точность определения ПВЗ в ГМЦ ГСВЧ увеличилась в результате проведённой модернизации средств ГМЦ ГСВЧ и влияния следующих факторов: учёта результатов ДРУК-измерений, выполненных в ИПА РАН; повышения точности отдельных рядов Центров ГСВЧ (ГМЦ ГСВЧ, ИПА РАН и др.), используемых при комбинировании; совершенствования алгоритма комбинирования.

Точностные характеристики комбинированных значений ПВЗ ГМЦ ГСВЧ до модернизации средств совместной обработки (комбинирования) ГМЦ ГСВЧ и после приведены в таблице. Оценка точности ПВЗ после модернизации средств ГМЦ ГСВЧ проводилась на полугодовом интервале и по доступным на момент вычислений опорным данным МСВЗ. Это связано с тем, что с переходом на новую международную координатную основу ITRF2014 апостериорный опорный ряд ПВЗ пересчитывался МСВЗ и в него вводились систематические поправки. Поэтому опорные значения ПВЗ, рассчитанные до момента введения поправок, отличаются от опорных значений ПВЗ, рассчитанных после их введения. При оценке точности ПВЗ это обстоятельство было учтено.

Опорные значения ПВЗ в моменты времени, близкие к моменту оценки, с течением времени не являются окончательными и будут уточняться. Поэтому при проведении более поздних оценок цифры могут несколько измениться. Предположительно эти изменения вряд ли будут существенными.

Закключение. В результате повышения точности исходных данных для комбинирования (в том числе привлечения

Среднеквадратическое отклонение ПВЗ

ПВЗ	Средства ГМЦ ГСВЧ	
	до модернизации	после модернизации
x_p , 0,001"	0,17	0,07
y_p , 0,001"	0,14	0,07
$UT1-UTC$, мс	0,025	0,019
$d\psi$, 0,001"	0,21	0,16
$d\epsilon$, 0,001"	0,18	0,06

данных ДРУК, созданного в ИПА РАН) и проведённой модернизации средств совместной обработки (комбинирования) ГМЦ ГСВЧ точность комбинированных значений ПВЗ, формируемых в ГМЦ ГСВЧ в 2019 г., повысилась в 1,5–2 раза.

Список литературы

1. *IERS Conventions* (2010). Eds. Gérard Petit and Brian Luzum (IERS Technical Note; 36) Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010. 179 p.
2. Пасынок С. Л. Совместная обработка измерений различных видов для целей определения ПВЗ // Альманах современной метрологии. 2015. № 3 (4). С. 39–53.
3. Ипатов А. В., Иванов Д. В. Сеть радиотелескопов РТ-13 комплекса «Квазар-КВО»: первые результаты // Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение: сборник тезисов докладов Восьмой Всероссийской конференции (КВНО-2019), Санкт-Петербург, 15–19 апреля 2019 г., ИПА РАН, 2019. С. 15.
4. Brattseva O., Gayazov I., Kurdubov S., Suvorkin V., *SINCom – the new program package for combined processing of space geodetic observations, Proceedings of the Journées 2014 “Systèmes de Référence Spatio-Temporels”*, eds. Z. Malkin and N. Capitaine, 22–24 September, 2014, Pulkovo observatory, 2015, pp. 250–251.
5. Кауфман М. Б. Точные методы измерения параметров вращения Земли в интересах навигационно-временных определений // Точные измерения для высоких технологий. Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ». 2008. С. 80–118.
6. McCarthy D. D., Luzum B. J., *Bulletin Géodésique*, 1991, no. 65, p. 22.
7. Пасынок С. Л., Безменов И. В., Игнатенко И. Ю., Цыба Е. Н. Современное состояние методов и средств оперативного определения параметров вращения Земли в ГМЦ ГСВЧ // Метрология времени и пространства: Материалы VIII международного симпозиума, Санкт-Петербург, 14–16 сентября 2016 г., Менделеево: ВНИИФТРИ, 2016. С. 193–196.
8. Синёв А. Н., Жаров В. Е., Пасынок С. Л. Определение ПВЗ в ГМЦ ГСВЧ по РСДБ-измерениям // Тезисы всероссийской радиоастрономической конференции ВРК-2018, Санкт-Петербург, ИПА РАН, 17–21 сентября 2018 г., 2018. С. 77.
9. Koch K. R. *Parameter estimation and hypothesis testing in linear models*, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1988.
10. Beutler G., Brockmann E., Hugentobler U., Mervart L., Rothacher M., Weber R., *Journal of Geodesy*, 1996, vol. 70, no. 5, pp. 287–299. DOI: 10.1007/BF00867349

11. Golubtsov P., *Automatic Documentation and Mathematical Linguistics*, 2018, vol. 52, no. 1, pp. 38–43.

12. Безменов И. В., Пасынок С. Л. Формирование опорных значений координат и поправок часов КА ГЛОНАСС // Альманах современной метрологии. 2015. № 2. С. 143–158.

13. IERS Annual Report 2008–2009. Ed. Wolfgang R. Dick, Bernd Richter, *International Earth Rotation and Reference Systems Service, Central Bureau*. Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2012, pp. 203–204.

14. Пасынок С. Л., Безменов И. В., Игнатенко И. Ю., Цыба Е. Н. Оперативное определение ПВЗ в ГМЦ ГСВЧ // Известия Главной астрономической обсерватории в Пулкове. 2019. № 225. С. 91–96.

15. Пасынок С. Л., Безменов И. В., Игнатенко И. Ю., Цыба Е. Н., Жаров В. Е. Определение ПВЗ и совершенствование аппаратно-программных средств в ГМЦ ГСВЧ // Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение (КВНО-2019): сборник тезисов докладов Восьмой Всероссийской конференции, Санкт-Петербург, 15–19 апреля 2019 г., ИПА РАН, 2019, С. 88–89.

16. Жаров В. Е. Основы радиоастрометрии. М: Физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, 2011. С. 208–224.

References

1. *IERS Conventions* (2010). Eds. Gérard Petit and Brian Luzum (IERS Technical Note; 36) Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010. 179 p.

2. Pasynok S. L., *Al'manac of Modern Metrology*, 2015. № 3 (4), pp. 39–53 (in Russian).

3. Ipatov A. V., Ivanov D. V., *Fundamental'noye i prikladnoye koordinatno-vremennoye i navigatsionnoye obespecheniye (KVNO-2019)*, in book of abstracts of 8th All-Russian conference, St. Petersburg, 15–19 April, 2019, IAA RAS, 2019, p. 15 (in Russian).

4. Brattseva O., Gayazov I., Kurdubov S., Suvorkin V., *SIN-Com – the new program package for combined processing of space geodetic observations, Proceedings of the Journées 2014 "Systèmes de Référence Spatio-Temporels"*, eds. Z. Malkin and N. Capitaine, 22–24 September, 2014, Pulkovo observatory, 2015, pp. 250–251.

5. Kaufman M. B., *Tochnyye izmereniya dlya vysokikh tekhnologiy*, Mendeleevo, VNIIFTRI Publ., 2008. pp. 80–118 (in Russian).

6. McCarthy D. D., Luzum B. J., *Bulletin Géodésique*, 1991, no. 65, p. 22.

7. Pasynok S. L., Bezmenov I. V., Ignatenko I. Yu., Tsyba E. N., *Proceedings of the VIII International Symposium "Metrologiya vremeni i prostranstva"*, 14–16 September, 2016, St. Petersburg, Mendeleevo, VNIIFTRI Publ., 2016, pp. 193–196 (in Russian).

8. Synev A. N., Zharov V. E., Pasynok S. L., *Abstracts of Papers all-Russian radioastronomical conference VRK-2018*, St. Petersburg, IAA RAS, 17–21 September, 2018, p. 77 (in Russian).

9. Koch K. R. *Parameter estimation and hypothesis testing in linear models*, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1988.

10. Beutler G., Brockmann E., Hugentobler U., Mervart L., Rothacher M., Weber R., *Journal of Geodesy*, 1996, vol. 70, no. 5, pp. 287–299. DOI: 10.1007/BF00867349

11. Golubtsov P., *Automatic Documentation and Mathematical Linguistics*, 2018, vol. 52, no. 1, pp. 38–43.

12. Bezmenov I. V., Pasynok S. L., *Al'manac of Modern Metrology*, 2015, no. 2, pp. 143–158 (in Russian).

13. IERS Annual Report 2008–2009. Ed. Wolfgang R. Dick, Bernd Richter, *International Earth Rotation and Reference Systems Service, Central Bureau*. Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2012, pp. 203–204.

14. Pasynok S. L., Bezmenov I. V., Ignatenko I. Yu., Tsyba E. N., *Izvestiya Glavnoy astronomicheskoy observatorii v Pulkove*, 2019, no. 225, pp. 91–96 (in Russian).

15. Pasynok S. L., Bezmenov I. V., Ignatenko I. Yu., Tsyba E. N., Zharov V. E., *Collection of reports of the 8th All-Russian conference "Fundamental'noye i prikladnoye koordinatno-vremennoye i navigatsionnoye obespecheniye" (KVNO-2019)*, St. Petersburg, 15–19 April, 2019, IAA RAS, 2019, pp. 88–89 (in Russian).

16. Zharov V. E., *Osnovy radioastrometrii*, Moscow, Fizicheskii fakul'tet MGU im. M. V. Lomonosova Publ., 2011, pp. 208–224 (in Russian).

Дата поступления: 10.09.2019.

Дата принятия: 10.10.2019.

Increase of the Earth's orientation parameters combination accuracy in Main Metrological Center of State Service for time, frequency and Earth's orientation parameters evaluation

Sergey L. Pasynok

Russian metrological institute of technical physics and radio engineering (VNIIFTRI), Mendeleevo, Moscow Region, Russian Federation, e-mail: pasynok@vniiftri.ru

The results of improvement of programs and methods of Earth's orientation parameters (EOP) combination of very long baseline interferometry (VLBI), global navigation satellite systems (GNSS) and satellite laser ranging (SLR) in Main Metrological Center of State Service for Time, Frequency and Earth's orientation parameters evaluation are considered. Nowadays, the combination of different geodetic thecnics measurements in Main Metrological Center of State Service for time, frequency and Earth's orientation parameters evaluation is provided both at the time raws level, and on the observations level. The increasing accuracy of Universal time UT1 was caused by using in combination observational data from new thirteen-meter antennas of the two-element very long base interferometer which was created in Institute of Applied Astronomy of Russian Academy of Science. In general, increase in accuracy of combination values of the Earth's orientation parameters was caused both by the increase in accuracy of the separate time raws, and by the improving of the combination algorithms.

Key words: Earth's orientation parameters, Universal Time, combination, Earth's orientation parameters service, conventional reference scale.

Установка относительной акустической газовой термометрии в диапазоне низких температур от 4,2 до 80 К

В. Г. Кытин^{1,2}, М. Ю. Гавалян¹, Б. Г. Потапов¹, Э. Г. Асланян¹, А. Н. Щипунов¹

¹Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, г. п. Менделеево, Московская область, Российская Федерация, e-mail: kyt35@mail.ru, ghavalyan@vniiftri.ru, potapov@vniiftri.ru, aslanyan@vniiftri.ru, schipunov@vniiftri.ru

²Московский Государственный Университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация

Разработана и испытана установка относительной акустической газовой термометрии, предназначенная для воспроизведения и передачи единицы термодинамической температуры – кельвина в диапазоне низких температур 4,2–80 К. Разработанная установка отличается от разработанных ранее установок относительной акустической газовой термометрии размерами основного узла – резонатора. Уменьшение размеров резонатора (диаметра полости) позволило в несколько раз уменьшить массу охлаждаемых частей установки по сравнению с массой таких частей ранее используемой установки. Это значительно сокращает расход жидких гелия и азота, необходимых для охлаждения резонатора, а также уменьшает время стабилизации температуры и, соответственно, время измерений. Представлены результаты проверки работы основных систем разработанной установки.

Ключевые слова: термодинамическая температура, акустическая газовая термометрия, акустический резонанс, электромагнитный резонанс.

Введение. Метод акустической газовой термометрии основан на зависимости скорости звука в идеальном газе от его термодинамической температуры [1, 2]. Основным преимуществом метода является применение резонансного метода измерения скорости звука. Для реализации метода акустической термометрии используют резонаторы со сферической и цилиндрической полостями [3, 4]. Резонаторы с цилиндрической полостью более просты в изготовлении, чем резонаторы со сферической полостью. При этом в резонаторах со сферической полостью реализуется наибольшая добротность акустического резонанса из-за наименьшего отношения площади поверхности полости к её объёму. Для определения радиуса резонатора определяют частоту электромагнитного резонанса в резонаторе, откачанном до высокого вакуума [5, 6]. Для этого стенки резонатора изготавливают из металла, полость резонатора выполняют квазисферической, т. е. с небольшим отклонением от сферической формы [7, 8]. В этом случае снимается вырождение мод электромагнитного резонанса (в сферической полости вырождение как минимум трёхкратное).

Акустическую газовую термометрию разделяют на абсолютную и относительную. В последнем случае термодинамическая температура определяется по отношению частот акустического резонанса при измеряемой и известной (в реперной точке) температуре [1, 7]. Это значительно упрощает анализ и избавляет от необходимости детального анализа формы резонатора. Изменение размеров резонатора при изменении температуры определяется из отношения частот электромагнитного резонанса [1, 7, 8]. В работах

[5–7, 9] описаны квазисферические резонаторы с полостью радиусом не менее 50 мм. Установка относительной акустической термометрии на основе резонатора с полостью радиусом 50 мм была создана в 2016 г. во ВНИИФТРИ [10]. Данная установка предназначена для измерения отклонения температуры, определённой по шкале МТШ-90 от термодинамической температуры. Резонаторы, радиус полости которых составляет не менее 50 мм, достаточно массивны. Для прецизионной стабилизации температуры резонатора, находящегося внутри герметичной камеры, его располагают внутри медного экрана. В результате общая масса охлаждаемых частей установки превышает 10 кг. Для охлаждения резонатора требуется значительное количество жидких азота и гелия. Время стабилизации температуры резонатора после заполнения газообразным гелием превышает 1,5 ч. Для уменьшения времени измерения и расхода жидких азота и гелия разработана установка относительной акустической газовой термометрии на основе резонатора с полостью радиусом 30 мм.

Конструкция и принцип работы установки относительной акустической газовой термометрии с устройством для реализации акустического резонанса на основе резонатора с полостью радиусом 30 мм. Установка (рис. 1) содержит криостат 1, представляющий собой сосуд Дьюара с погружённым в него устройством для реализации акустического резонанса, векторный анализатор цепей 5 для определения частоты электромагнитного резонанса, персональный компьютер 6 и аппаратуру для измерения частотных зависимостей акустического сигнала 2, контроля

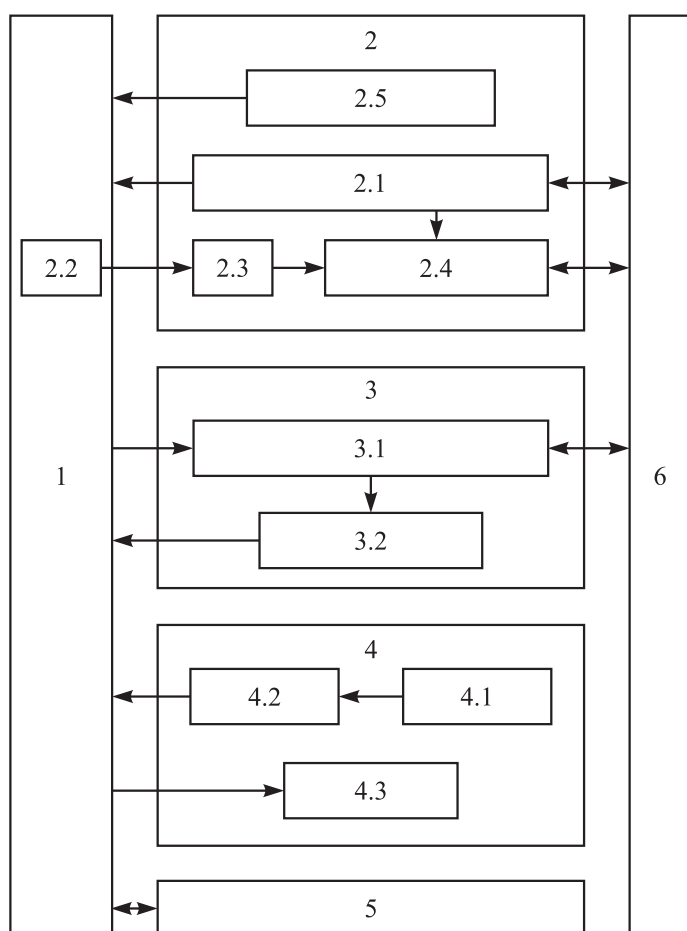


Рис. 1. Блок-схема установки относительной газовой термометрии: 1 – криостат; 2 – блок аппаратуры для измерения частотных зависимостей акустического сигнала; 2.1 – генератор; 2.2 – буфер; 2.3 – предусилитель; 2.4 – синхронный усилитель; 2.5 – источник напряжения микрофонов; 3 – блок аппаратуры для контроля и стабилизации температуры; 3.1 – контрольно-измерительная система АК-9.02; 3.2 – усилитель мощности; 4 – система для контроля и измерения давления гелия; 4.1 – баллон с газообразным гелием; 4.2 – криоловушка; 4.3 – цифровой манометр PACE 1000; 5 – векторный анализатор цепей; 6 – персональный компьютер

Fig. 1. Block diagram of developed setup:

1 – cryostat; 2 – equipment for the measurement of frequency dependencies of acoustic signal; 2.1 – generator; 2.2 – buffer; 2.3 – preamplifier; 2.4 – lock in amplifier; 2.5 – microphone power supply; 3 – equipment for temperature stabilization; 3.1 – measurement system AK-9.02; 3.2 – power amplifier; 4 – system for control and measurement of helium pressure; 4.1 – helium gas cylinder; 4.2 – cryogenic trap; 4.3 – digital manometer PACE 1000; 5 – network analyzer; 6 – personal computer

и стабилизации температуры 3, а также контроля и измерения давления гелия 4.

Аппаратура 2 для измерения частотных зависимостей акустического сигнала состоит из генератора 2.1, синхронного усилителя 2.4, источника напряжения микрофонов 2.5,

буфера 2.2 и предусилителя 2.3. Переменное напряжение (сигнал синусоидальной формы) от генератора по коаксиальному кабелю через разделительный конденсатор поступает в микрофон-излучатель. Для работы конденсаторного микрофона на его электрод подаётся постоянное напряжение источника 120–150 В. Электрический сигнал, возбуждаемый в микрофоне-приёмнике звуковой волной через разделительный конденсатор, согласующий буфер и предусилитель, поступает на вход синхронного усилителя, который преобразует переменный электрический сигнал в комплексное напряжение. Частотная зависимость акустического сигнала регистрируется поточно под управлением компьютерной программы.

Аппаратура 3 для контроля и стабилизации температуры состоит из контрольно-измерительной системы АК-9.02 3.1 и усилителя мощности 3.2. Система АК-9.02 через равные промежутки времени измеряет сопротивление термометра, расположенного на теплообменнике камеры давления, и напряжение на дифференциальной термопаре, включённой между теплообменниками камеры давления и теплового экрана. Измеренные значения передаются на персональный компьютер 6. Программа стабилизации температуры вычисляет температуру термометра по измеренному сопротивлению и напряжению на термопаре и вычисляет напряжения, которые необходимо подать на нагреватели камеры давления и теплового экрана. По команде персонального компьютера вычисленные напряжения поступают на соответствующие нагреватели от системы АК-9.02 через усилитель мощности.

Система 4 контроля и стабилизации давления гелия состоит из баллона 4.1 с газообразным гелием марки 7.0, оснащённого редуктором, криоловушки 4.2 для очистки гелия, дросселей и цифрового манометра PACE 1000 4.3. Газообразный гелий поступает из баллона через криоловушку и дроссель в резонатор. Давление гелия измеряется манометром PACE 1000. При работе установка подключается к системе откачки, включающей пластинчато-роторный, турбомолекулярный и сорбционный насосы.

Для измерения частотных зависимостей комплексного коэффициента пропускания резонатором электромагнитного излучения используется векторный анализатор цепей 5, порты которого подключаются к антеннам резонатора через коаксиальные кабели.

Устройство для реализации акустического резонанса.

На рис. 2 показаны трёхмерная модель и внешний вид устройства с открытыми вакуумной камерой 4, тепловым экраном 3 и камерой давления 1, внутри которой находится акустический резонатор 2 (радиус полости 30 мм). Резонатор состоит из нижней и верхней частей. Для возбуждения и регистрации акустического сигнала в стенках нижней части резонатора закреплены два конденсаторных микрофона – излучатель 12 и приёмник 13. Мембраны микрофонов находятся на одном уровне с поверхностью полости резонатора. Микрофон-излучатель расположен в центре нижней части резонатора (на «южном полюсе»), а микрофон-приёмник – под углом $39,2^\circ$ к микрофону-излучателю для минимизации

вклада моды (3,1) акустического резонанса в регистрируемый акустический сигнал моды (0,2) [1]. Для определения термодинамической температуры используют невырожденные радиальные моды акустического резонанса (0, n), где n – целое число. Для данных мод реализуется максимальная добротность [1].

В стенках резонатора размещены две кольцевые антенны (на рис. 1 не показаны) для измерения частотных зависимостей комплексного коэффициента пропускания резонатором электромагнитного излучения и определения частот электромагнитного резонанса. Одна антенна находится в нижней части резонатора под углом 45° к «южному полюсу», а вторая – в верхней части резонатора и повернута по отношению к нижней антенне на углы 90° вокруг горизонтальной и вертикальной осей резонатора. Такое расположение антенн позволяет наблюдать моды TM_{1n} , TE_{1n} электромагнитного резонанса. В резонаторе имеются два отверстия для ввода и вывода инертного газа (гелия). Отверстие 10 для ввода газа расположено в верхней части резонатора под углом 45° к вертикальной оси и под углом 90° по отношению к антенне. В отверстие плотно вставлена трубка с внутренним диаметром 1,6 мм, выведенная через герметичные соединения в вентиль на верхнем фланце 5 устройства. Отверстие для вывода газа (на рис. 1 не показано) расположено в нижней части резонатора под углами 45° и 90° к вертикальной оси и антенне соответственно. В отверстие плотно вставлена трубка с внутренним диаметром 0,8 мм и длиной 30 мм. Такие размеры трубки минимизируют изменение частоты акустического резонанса, обусловленное выходом акустического сигнала через трубку. В верхней и нижней частях резонатора расположены также отверстия для крепления термометров сопротивления.

Основной частью камеры давления 1 является герметичный цилиндрический сосуд из нержавеющей стали, окружённый цилиндрическим медным экраном 11 для уменьшения градиентов температуры. В верхней части экрана расположен теплообменник 8 с резистивным нагревателем. В крышку 14 камеры давления герметично впаян медный теплопровод 9 для обеспечения хорошего теплообмена между резонатором и теплообменником на крышке. Это одно из существенных отличий разработанной установки от установки, описанной в работе [10], обеспечивающее уменьшение времени регулирования и стабилизации температуры резонатора. Через крышку камеры давления герметично выведены трубки для ввода

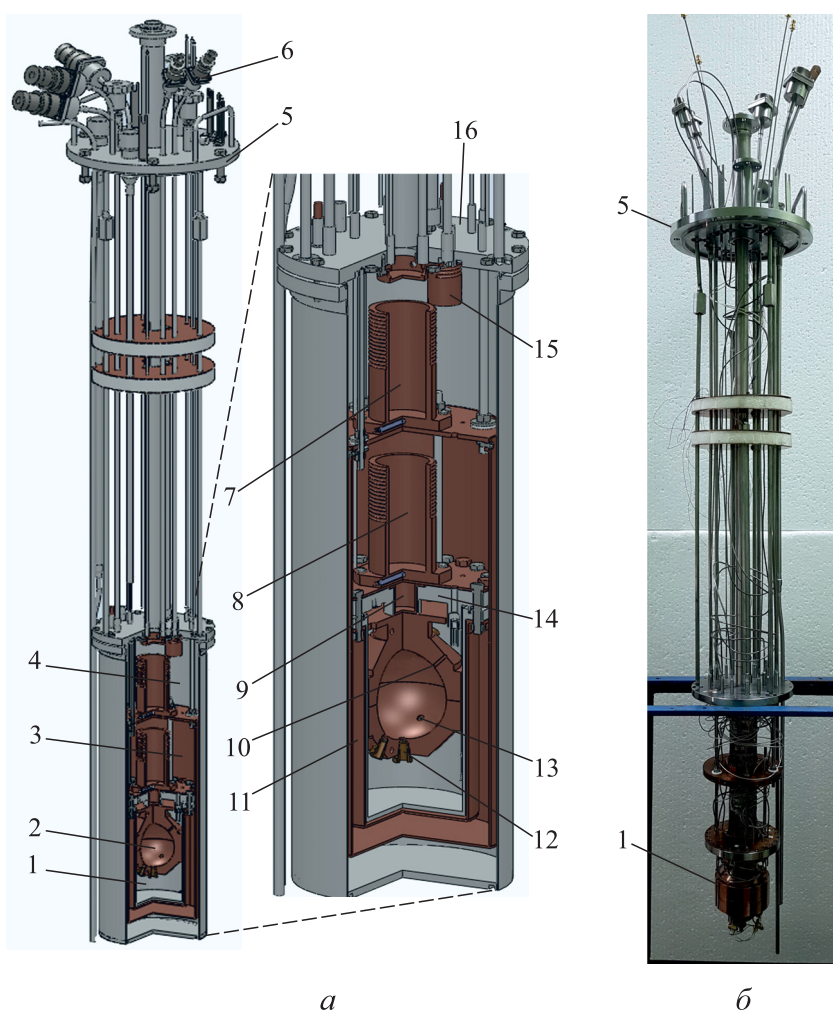


Рис. 2 Устройство для реализации акустического резонанса – трёхмерная модель (а) и внешний вид устройства с открытыми вакуумной камерой, тепловым экраном и камерой давления (б):

1 – камера давления; 2 – резонатор; 3 – тепловой экран; 4 – вакуумная камера; 5 – верхний фланец; 6 – герметичный разъём фланца; 7, 8 – теплообменник теплового экрана и камеры давления соответственно; 9 – медный теплопровод; 10 – отверстие для ввода газа; 11 – экран камеры давления; 12 – микрофон; 13 – антенна; 14 – крышка камеры давления; 15, 16 – теплообменник и крышка вакуумной камеры соответственно

Fig. 2. System for realization of acoustic resonance – 3D model (a) and picture of the system (b):

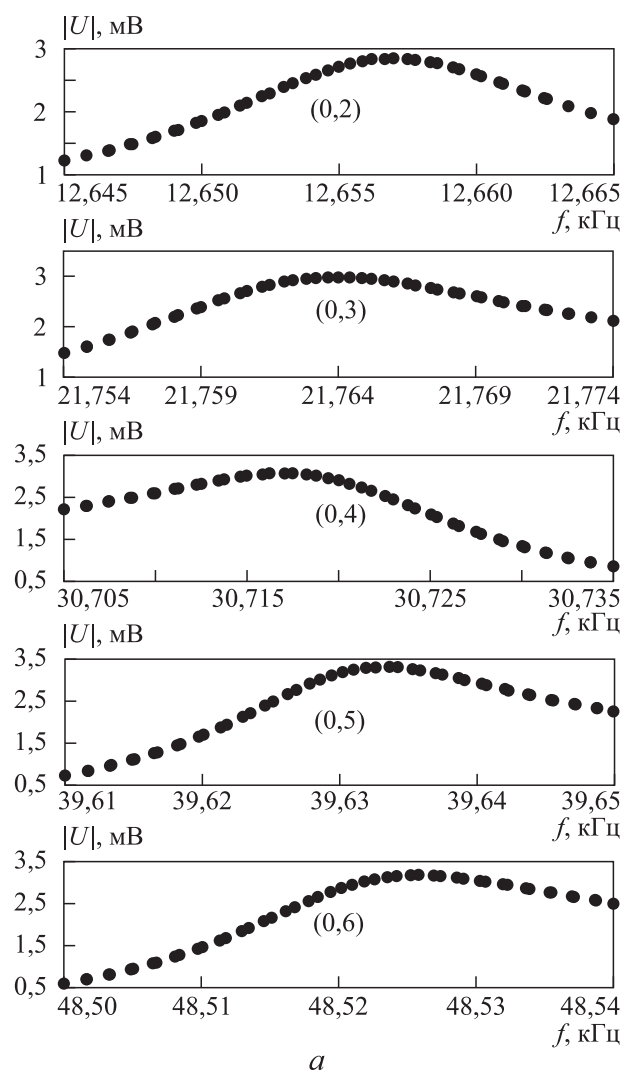
1 – pressure chamber; 2 – resonator; 3 – heat shield; 4 – vacuum chamber; 5 – top flange; 6 – sealed connector; 7 – heat exchanger of heat shield; 8 – heat exchanger of pressure chamber; 9 – heat conductor; 10 – gas inlet; 11 – heat shield of pressure chamber; 12 – microphone; 13 – antenna; 14 – cover of pressure chamber; 15 – heat exchanger of vacuum chamber; 16 – cover of pressure chamber

и вывода газообразного гелия, провода для измерения сопротивления термометров и трубки для ввода коаксиальных кабелей, по которым поступают электромагнитные и акустические сигналы. Внутри камеры давления трубки для ввода и вывода коаксиальных кабелей оканчиваются

Таблица 1

Частоты акустического резонанса и их неопределённость по типу А при различных температурах и давлениях гелия

T, K	P_{He}, kPa	Мода	$f, kГц$	$\Delta f, mГц$
80,055	50	(0,2)	12,656567	7,5
		(0,3)	21,762276	10,9
		(0,4)	30,719213	9,1
		(0,5)	39,630105	6,7
		(0,6)	48,521331	10,6
4,8	5	(0,2)	3,0689621	53,0
		(0,3)	5,2771258	30,0
		(0,4)	7,4490087	51,0
		(0,5)	9,6095541	41,0
		(0,6)	11,7647200	30,0



гермовводами и разъёмами для соединения с микрофонами и антеннами. Такая конструкция камеры давления позволяет значительно уменьшить десорбцию газообразных примесей по сравнению с десорбцией в ранее разработанной установке [10]. Теплообменник камеры давления обеспечивает выравнивание температуры коаксиальных кабелей, проводов и резонатора. Помимо нагревателя на теплообменнике смонтирован железо-родиевый термометр сопротивления, откалиброванный в соответствии со шкалой МТШ-90.

Камера давления закреплена внутри медного цилиндрического теплового экрана 11, в верхней части которого расположен второй теплообменник, по конструкции идентичный теплообменнику камеры давления. В тепловом экране смонтированы два резистивных нагревателя. Основной нагреватель расположен на теплообменнике теплового экрана.

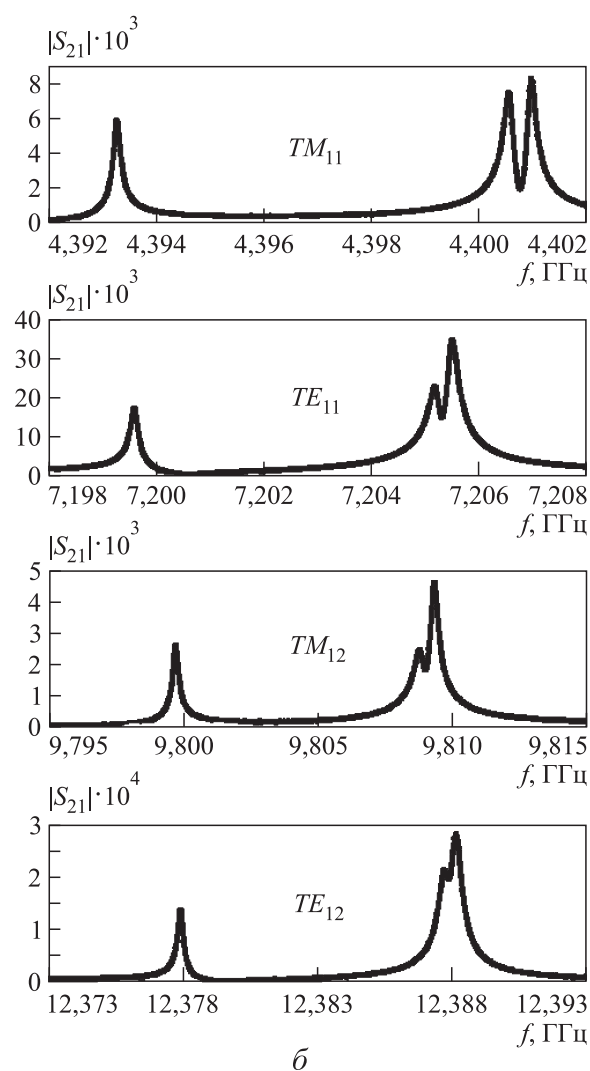


Рис. 3. Частотные зависимости модуля акустического сигнала $|U|$, полученные при температуре 80,055 K и давлении гелия 50 кПа (а), и комплексного коэффициента пропускания $|S_{21}|$ резонатором электромагнитного излучения при температуре 80,055 K и давлении гелия менее 10 Па (б)

Fig. 3. Frequency dependencies of acoustic signal $|U|$ at 80,055 K and 50 kPa helium pressure (a), and the resonator transmission of microwave radiation at 80,055 K and helium pressure less than 10 Pa (b)

В нижней части теплового экрана размещён дополнительный резистивный нагреватель, предназначенный для выравнивания градиентов температуры. Между теплообменниками теплового экрана и камеры давления включена дифференциальная термopара. Тепловой экран позволяет регулировать температуры камеры давления и резонатора в квазиadiaбатическом режиме, когда разность температур камеры давления и теплового экрана не превышает 1 К. При этом значительно уменьшаются нежелательные тепловые потоки и градиенты температуры в камере давления и резонаторе.

Основной частью вакуумной камеры 4 является герметичный цилиндрический сосуд из нержавеющей стали. При работе установки вакуумная камера откачивается до остаточного давления не более 10^{-2} Па. Это обеспечивает изменение температуры камеры давления и резонатора в широких пределах с помощью резистивных нагревателей. В крышку вакуумной камеры герметично впаяны два дополнительных медных теплообменника, имеющих непосредственный контакт с жидкими азотом или гелием, заливаемыми в криостат. Данные теплообменники предназначены для выравнивания температуры коаксиальных кабелей и проводов с температурой соответствующей криогенной жидкости. Коаксиальные кабели и провода выведены из вакуумной камеры и проведены через верхний фланец 5 через трубки. Трубки оканчиваются герморазъёмами для вывода проводов и гермовводами для вывода коаксиальных кабелей. Герморазъёмы и гермовводы находятся на расстоянии 15 см от верхнего фланца криостата и практически не охлаждаются при работе установки. Таким образом провода и кабели располагаются в вакууме, что предохраняет кабели от конденсации влаги и намерзания льда в холодной зоне криостата и таким образом защищает электрические цепи от утечек.

Результаты испытаний установки относительной акустической газовой термометрии. Работа установки была проверена при комнатной температуре (292 К), а также при температурах близких к 80 и 5 К. Для измерения температуры резонатора по шкале МТШ-90 на нём были установлены два железо-родиевых термометра сопротивления. Сопротивление данных термометров измерялось относительно внутренней меры измерителя МИТ-8.20. Перед проверкой камера давления установки была откачана до остаточного давления менее 1 Па, заполнена газообразным гелием до давления 120 кПа и снова откачана до остаточного давления менее 1 Па. Цикл откачки–заполнения был выполнен три раза. Затем резонатор был заполнен газообразным гелием под давлением 120 кПа, и измерены частотные зависимости $U(f)$ акустического сигнала вблизи резонансных максимумов мод (0,2), (0,3), (0,4), (0,5), (0,6). Затем камера давления была вновь откачана до остаточного давления менее 1 Па и измерены зависимости $S_{21}(f)$ в окрестности максимумов мод TM_{11} , TE_{11} , TM_{12} , TE_{12} электромагнитного резонанса.

Для охлаждения резонатора сосуд Дьюара криостата заполнен жидким азотом. На охлаждение резонатора от

292 до 80 К израсходован 21 л жидкого азота, что почти в три раза меньше количества жидкого азота, требуемого для охлаждения резонатора установки, которая описана в [10]. После охлаждения резонатора до температуры менее 80 К он был заполнен газообразным гелием под давлением 50 кПа и включена система стабилизации температуры. После уменьшения дрейфа температуры резонатора до 0,5 мК/мин измерены зависимости $U(f)$ в окрестности максимумов мод (0,2), (0,3), (0,4), (0,5), (0,6) акустического резонанса (рис. 3, а). Время измерения каждой зависимости 40 с. В табл. 1 представлены частоты f акустического резонанса, полученные аппроксимацией данных зависимостей, и их стандартная неопределённость по типу А u_A .

В результате использования буфера отношение сигнал–шум в разработанной установке более чем в 60 раз превышало соответствующее отношение для установки, разработанной ранее [10], при таком же времени и тех же условиях измерения.

Далее резонатор был откачан до остаточного давления менее 10 Па и измерены зависимости $S_{21}(f)$ в окрестности максимумов мод TM_{11} , TE_{11} , TM_{12} , TE_{12} электромагнитного резонанса (рис. 3, б). В табл. 2 представлены частоты f электромагнитного резонанса и их стандартные неопределённости по типу А u_A .

Для дальнейшего охлаждения резонатора из криостата был удалён жидкий азот и сосуд Дьюара заполнен жидким гелием. После понижения температуры резонатора менее 5 К резонатор был заполнен газообразным гелием под давлением 5 кПа. На охлаждение резонатора от 80 до 5 К израсходовано 25 л жидкого гелия, что более чем в три раза меньше количества этого вещества, необходимого для охлаждения резонатора в установке, описанной в [10]. После включения системы стабилизации температуры и уменьшения дрейфа температуры резонатора до значения

Таблица 2
Частоты электромагнитного резонанса и их неопределённость по типу А при различных температурах

Мода	f , ГГц	u_A , Гц
$T=80,055$ К, $P_{\text{He}} < 10$ Па		
TM_{11x}	4,4009453	56
TM_{11y}	4,4005497	102
TM_{11z}	4,3932568	78
TE_{11x}	7,2054167	74
TE_{11y}	7,2051324	172
TE_{11z}	7,1995664	106
TM_{12x}	9,8091837	617
TM_{12y}	9,8086682	1920
TM_{12z}	9,7996454	880
TE_{12x}	12,388163	1820
TE_{12y}	12,387712	3770
TE_{12z}	12,377882	2090
$T=4,8$ К, $P_{\text{He}} < 100$ Па		
TM_{11x}	4,4015812	28
TM_{11y}	4,4011846	53
TM_{11z}	4,3938894	39
TE_{11x}	7,2064459	37
TE_{11y}	7,2061627	86
TE_{11z}	7,2005933	54
TM_{12x}	9,8105903	518
TM_{12y}	9,8100804	1560
TM_{12z}	9,8010463	714
TE_{12x}	12,389906	1690
TE_{12y}	12,389465	4180
TE_{12z}	12,379643	1900

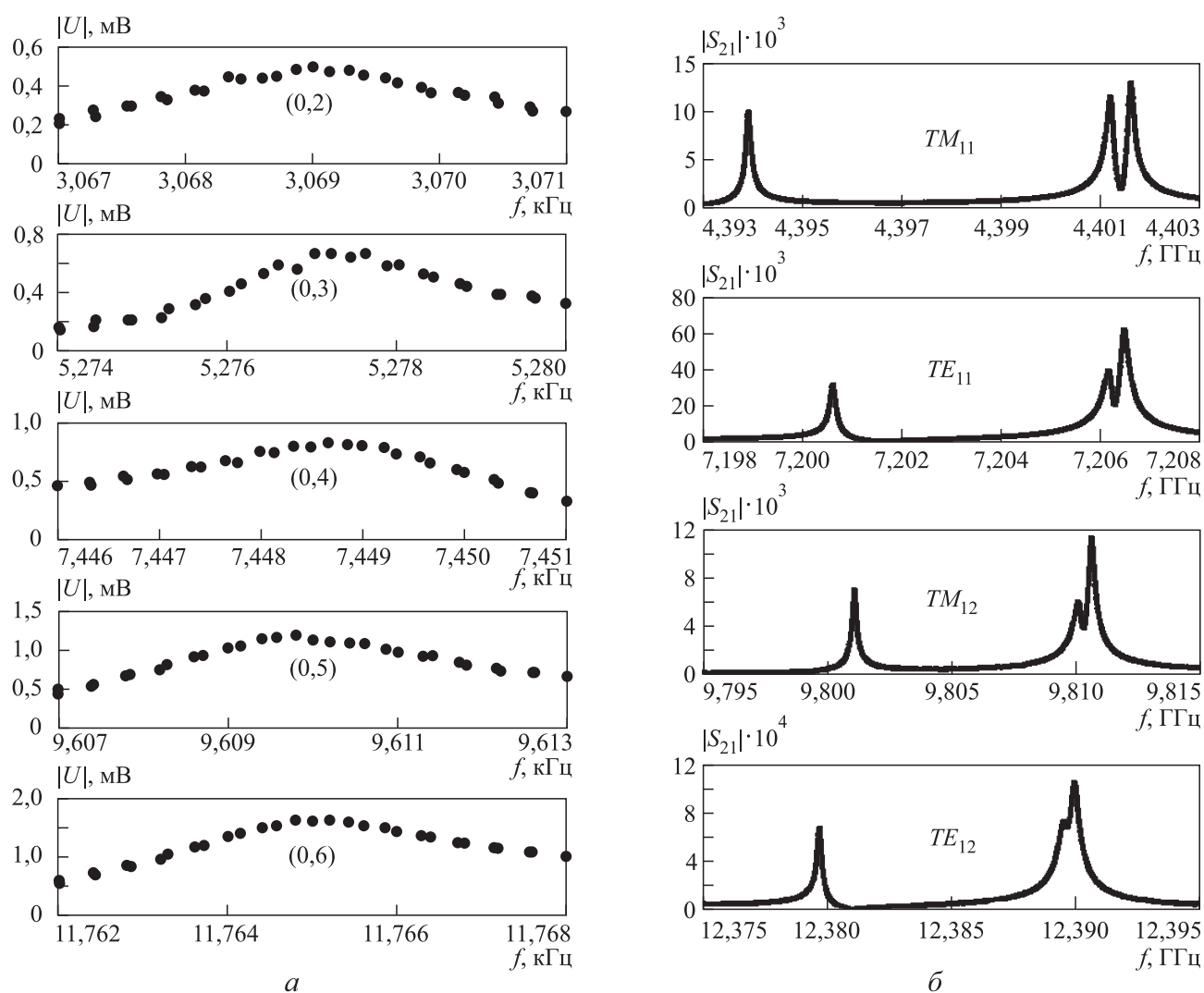


Рис. 4. Частотные зависимости модуля акустического сигнала $|U|$, полученные при температуре 4,8 К и давлении гелия 5 кПа (а), и комплексного коэффициента пропускания $|S_{21}|$ резонатором электромагнитного излучения при температуре 4,8 К и давлении гелия менее 100 Па (б)

Fig. 4. Frequency dependencies of acoustic signal $|U|$ at 4,8 K and 5 kPa helium pressure (a), and the resonator transmission of microwave radiation at 4,8 K and helium pressure less than 100 Pa (b)

менее 0,5 мК/мин были измерены частотные зависимости $U(f)$ акустического сигнала (рис. 4, а). Частоты акустического резонанса, определённые аппроксимацией данных зависимостей, и их стандартная неопределённость по типу А представлены в табл. 1. Время измерения для мод (0,2), (0,3), (0,4) составило 10 мин, для мод (0,5), (0,6) – 5 мин. Затем резонатор был откачан до остаточного давления менее 100 Па и измерены частотные зависимости $S_{21}(f)$ комплексного коэффициента пропускания электромагнитного излучения резонатора (рис. 4, б). Частоты электромагнитного резонанса, определённые аппроксимацией данных зависимостей, представлены в табл. 2.

Закключение. Разработана установка относительной газовой термометрии с акустическим резонатором, радиус

полости которого равен 30 мм. Для охлаждения резонатора от 292 до 80 К (от 80 К до 4,8 К) требуется 21 л жидкого азота (25 л жидкого гелия), что в три раза меньше, чем необходимо для охлаждения резонатора с полостью диаметром 50 мм из состава применяемой ранее установки [10]. Работа установки проверена при температурах около 292, 80 и 5 К. Применение резонатора меньшего радиуса и согласующего буфера в аппаратуре регистрации частотных зависимостей акустического сигнала позволило увеличить отношение сигнал–шум разработанной установки более чем в 60 раз по сравнению с этим отношением установки [10]. В результате более чем в 60 раз уменьшена стандартная неопределённость по типу А частоты акустического резонанса при том же времени измерения.

Список литературы

References

1. Moldover M. R., Gavioso R. M., Mehl J. B., Pitre L., Podesta M., Zhang J. T., *Metrologia*, 2014, vol. 51, pp. R1–R19. DOI: 10.1088/0026-1394/51/1/R1
2. Moldover M. R., Trusler J. P. M., Edwards T. J., Mehl J. B., Davis R. S., *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, 1988, vol. 93, pp. 93–173. DOI: 10.1103/PhysRevLett.60.249
3. Pitre L., Sparasci F., Truong D., Guillou A., Risegari L., Himbert M. E., *Int. J. Thermophys.*, 2011, vol. 32, pp. 1825–1886. DOI: 10.1007/s10765-011-1023-x
4. Lin H., Feng X. J., Gillis K. A., Moldover M. R., Zhang J. T., Sun J. P., Duan Y. Y., *Metrologia*, 2013, vol. 50, pp. 417–432. DOI: 10.1088/0026-1394/50/5/417
5. Pitre L., Risegari L., Sparasci F., Plimmer M. D., Himbert M. E., A Giuliano Albo P. A., *Metrologia*, 2015, vol. 52, pp. S263–S273. DOI: 10.1088/0026-1394/52/5/S263
6. Gaviosso R. M., Ripa D. M., Steur P. P. M., Gaiser C., Truong D., Guianvarc'h C., Tarizzo P., Stuart F. M., Dematteis R., *Metrologia*, 2015, vol. 52, pp. S274–S304. DOI: 10.1088/0026-1394/52/5/S274
7. Pitre L., Moldover M. R., Tew W. L., *Metrologia*, 2006, vol. 43, pp. 142–162. DOI: 10.1088/0026-1394/43/1/020
8. Mehl J. B., *Metrologia*, 2009, vol. 46, pp. 554–559. DOI: 10.1088/0026-1394/46/5/020
9. Podesta M., Underwood R., Sutton G., Morantz P., Harris P., Mark D. F., Stuart F. M., Vargha G., Machin G., *Metrologia*, 2013, vol. 50, pp. 354–376. DOI: 10.1088/0026-1394/50/4/354
10. Кытин Г. А., Кытин В. Г., Гавалян М. Ю., Асланян Э. Г., Щипунов А. Н. Установка для измерения термодинамической температуры методом относительной акустической газовой термометрии в диапазоне (4,2–273,16) К // Альманах современной метрологии. 2017. № 12. С. 43–64.

1. Moldover M. R., Gavioso R. M., Mehl J. B., Pitre L., Podesta M., Zhang J. T., *Metrologia*, 2014, vol. 51, pp. R1–R19. DOI: 10.1088/0026-1394/51/1/R1
2. Moldover M. R., Trusler J. P. M., Edwards T. J., Mehl J. B., Davis R. S., *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, 1988, vol. 93, pp. 93–173. DOI: 10.1103/PhysRevLett.60.249
3. Pitre L., Sparasci F., Truong D., Guillou A., Risegari L., Himbert M. E., *Int. J. Thermophys.*, 2011, vol. 32, pp. 1825–1886. DOI: 10.1007/s10765-011-1023-x
4. Lin H., Feng X. J., Gillis K. A., Moldover M. R., Zhang J. T., Sun J. P., Duan Y. Y., *Metrologia*, 2013, vol. 50, pp. 417–432. DOI: 10.1088/0026-1394/50/5/417
5. Pitre L., Risegari L., Sparasci F., Plimmer M. D., Himbert M. E., A Giuliano Albo P. A., *Metrologia*, 2015, vol. 52, pp. S263–S273. DOI: 10.1088/0026-1394/52/5/S263
6. Gaviosso R. M., Ripa D. M., Steur P. P. M., Gaiser C., Truong D., Guianvarc'h C., Tarizzo P., Stuart F. M., Dematteis R., *Metrologia*, 2015, vol. 52, pp. S274–S304. DOI: 10.1088/0026-1394/52/5/S274
7. Pitre L., Moldover M. R., Tew W. L., *Metrologia*, 2006, vol. 43, pp. 142–162. DOI: 10.1088/0026-1394/43/1/020
8. Mehl J. B., *Metrologia*, 2009, vol. 46, pp. 554–559. DOI: 10.1088/0026-1394/46/5/020
9. Podesta M., Underwood R., Sutton G., Morantz P., Harris P., Mark D. F., Stuart F. M., Vargha G., Machin G., *Metrologia*, 2013, vol. 50, pp. 354–376. DOI: 10.1088/0026-1394/50/4/354
10. Kytin G. A., Kytin V. G., Ghavalyan M. Yu., Aslanyan E. G., Schipunov A. N., *Almanach sovremennoy metrologii*, 2017, no. 12, pp. 43–64 (in Russian).

Дата поступления: 25.10.2019.

Дата принятия: 25.11.2019.

Relative acoustic gas thermometry setup for low temperature range from 4,2 to 80 K

Vladimir G. Kytin^{1, 2}, Mamikon Yu. Ghavalyan¹, Boris G. Potapov¹, Eduard G. Aslanyan¹, Andrey N. Shchipunov¹

¹Russian metrological institute of technical physics and radio engineering measurements, Mendeleev, Moscow region, Russian Federation, e-mail: kyt35@mail.ru, ghavalyan@vniiftri.ru, potapov@vniiftri.ru, aslanyan@vniiftri.ru, schipunov@vniiftri.ru

²M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

Relative acoustic gas thermometry setup is described. Described setup was developed and tested in VNIIFTRI. The setup is designed for the measurement of thermodynamic temperature in low temperature range down to 4,2 K. Main part of the setup is resonator with reduced cavity diameter. Reduction of resonator dimension lead to several times reduction of cooled parts of the setup with respect to the setup previously developed in VNIIFTRI. This decreases liquid nitrogen and liquid helium consumption required for cooling of resonator. Moreover, reduction of the mass of cooling parts reduces time required for temperature stabilization and thus measurement time. In the work the tests' results of operation of main parts of the setup are presented.

Key words: thermodynamic temperature, acoustic gas thermometry, acoustic resonance, microwave resonance.

Рабочий эталон единицы мощности электромагнитных колебаний в диапазоне частот 37,5–220 ГГц

А. В. Коудельный, И. М. Малай, В. А. Перепёлкин, И. П. Чирков

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, г. п. Менделеево, Московская область, Российская Федерация, e-mail: akou@vniiftri.ru, malay@vniiftri.ru, prpl@vniiftri.ru, chirkov@vniiftri.ru

Показана возможность применения болометрических преобразователей сверхвысокочастотной мощности из состава Государственного первичного эталона единицы мощности электромагнитных колебаний в волноводных и коаксиальных трактах ГЭТ 167-2017 в расширенном до 220 ГГц диапазоне частот. Проведённые исследования полупроводниковых болометрических преобразователей сверхвысокочастотной мощности в расширенном диапазоне частот подтвердили хорошее согласование и гладкие частотные характеристики коэффициента эффективности преобразователей. На основе полученных результатов исследований аттестован Государственный рабочий эталон единицы мощности электромагнитных колебаний 0,1–10 мВт в диапазоне частот от 37,5 до 220 ГГц 3.1.ZZT.0288.2018. Приведены технические характеристики рабочего эталона единицы мощности электромагнитных колебаний, полученные при его аттестации на аппаратуре ГЭТ 167-2017 в диапазоне частот 37,5–220 ГГц.

Ключевые слова: мощность, ваттметр, эталон, сверхвысокая частота.

Введение. Технологии производства средств измерений (СИ) электромагнитных величин динамично развиваются, что позволяет улучшить как функциональные, так и метрологические характеристики СИ. Применение новых технологий и материалов сформировало техническую возможность значительного увеличения верхней частоты ваттметров, анализаторов спектра и сигналов, векторных анализаторов цепей, генераторов сигналов.

Основными параметрами, характеризующими качество приборов, работающих в сверхвысокочастотном диапазоне (СВЧ) диапазоне, являются мощность СВЧ, спектральная плотность мощности шумового радиоизлучения и частота. От этих параметров в значительной степени зависит дальность и устойчивость приёма радиосигналов, качество связи, контроль качества используемых приёмо-передающих устройств, определение характеристик применяемых приборов.

До 2005 г в миллиметровой области спектра частот система государственного обеспечения единства измерений перечисленных величин опиралась на созданные в 1968–1991 гг. первичные эталоны спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения и мощности электромагнитных колебаний: ГЭТ 21-91 «Государственный первичный эталон единицы спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения в диапазоне частот 0,002–178,3 ГГц», ГЭТ 46-73 «Государственный специальный эталон единицы мощности электромагнитных колебаний в волноводных трактах в диапазоне частот от 37,5 до 53,57 ГГц», ГЭТ 115-77 «Государственный специальный эталон единицы мощности электромагнитных колебаний в волноводных трактах в диапазоне частот от 53,57 до 78,33 ГГц» и

ГЭТ 146-85 «Государственный специальный эталон единицы мощности электромагнитных колебаний в волноводных трактах в диапазоне частот от 78,33 до 178,4 ГГц». Данные эталоны обеспечивали воспроизведение и передачу единиц мощности СВЧ и спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения в волноводах в диапазоне частот до 178,4 ГГц [1–3].

В 2005 г. в Российской Федерации был разработан и утверждён Государственный первичный эталон единицы мощности СВЧ в диапазоне частот от 37,5 до 53,57 ГГц ГЭТ 167-2005, хранящийся во ВНИИФТРИ [4]. В период 2013–2016 гг. во ВНИИФТРИ проведён цикл работ по совершенствованию указанного эталона с целью улучшения его технических характеристик в части увеличения точности измерений и расширения частотного диапазона. По завершению указанных работ был утверждён Государственный первичный эталон единицы мощности электромагнитных колебаний в диапазоне частот от 37,50 до 78,33 ГГц ГЭТ 167-2017 [5]. Однако этого оказалось недостаточно для решения задач метрологического обеспечения разработок в области СВЧ на частотах до 220 ГГц [6–8].

Целью настоящей работы является создание рабочего эталона (РЭ) единицы мощности СВЧ в диапазоне частот до 220 ГГц на основе проведённых исследований возможностей эталона ГЭТ 167-2017.

Результаты исследования возможностей ГЭТ 167-2017 в расширенном диапазоне частот. В основу воспроизведения единицы мощности электромагнитных колебаний ГЭТ 167-2017 положен метод замещения, при котором измеряемая поглощённая мощность СВЧ замещается известной мощностью постоянного тока [9]. Воспроизведение единицы

мощности СВЧ осуществляется с помощью эталонного ваттметра. Эталонный ваттметр состоит из комплекта тепловых эталонных преобразователей поглощаемой мощности и системы, обеспечивающей автоматическое замещение мощности СВЧ мощностью постоянного тока. Значение мощности замещения рассчитывается на основе измерений напряжения и сопротивления постоянному току.

В основе тепловых преобразователей мощности могут использоваться термопары или болометры [10, 11]. Применение термопарных преобразователей для прецизионных измерений требует поддержания температуры преобразователя и рассеиваемой в нём мощности для исключения нелинейности термопары, что, одновременно со снижением согласования таких преобразователей с ростом частоты, осложняет их использование. Болометры в виде термисторов имеют узкий диапазон частот, в котором удаётся обеспечить удовлетворительное согласование.

Как показали проведённые исследования, полупроводниковые болометрические преобразователи в составе ГЭТ 167-2017 имеют исключительно гладкие частотные характеристики коэффициента эффективности и хорошее согласование в диапазоне частот волновода [12, 13]. В настоящей работе авторы выполнили дополнительные исследования с целью определения возможности применения болометрических преобразователей на частотах, значительно превышающих верхнюю частоту 78,33 ГГц.

Качественное рассмотрение работы преобразователя при одномодовом режиме свидетельствует о плавной зависимости коэффициента эффективности от частоты падающей электромагнитной волны. Однако в расширенном диапазоне частот в волноводе возбуждаются высшие типы волн. Такие волны при взаимодействии с чувствительным элементом преобразователей мощности СВЧ могут приводить к появлению немонотонной зависимости вносимых потерь от частоты падающей электромагнитной волны. При этом вид частотной зависимости коэффициента эффективности может иметь более сложную форму. Характер данной частотной зависимости определяется перераспределением энергии между модовыми составляющими электромагнитной волны, которая распространяется в области волновода, частично заполненного полупроводником.

Следовательно, необходимо экспериментально оценить частотные коэффициенты исследуемых преобразователей мощности. Ваттметр поглощаемой мощности на частоте измерений характеризуется калибровочным коэффициентом K_k , который определяется

как отношение показаний ваттметра N к действительному значению мощности $P_{\text{СВЧ}}$ на входе этого ваттметра:

$$P_{\text{СВЧ}} = N / K_k.$$

Для тепловых ваттметров справедливо равенство [2]:

$$K_k = K_3 (1 - |\Gamma|^2),$$

где $|\Gamma|$ – коэффициент отражения входа приёмного преобразователя на данной частоте; K_3 – коэффициент эффективности, определяющий степень эквивалентности реакции преобразователя на воздействие одинаковой мощности СВЧ и мощности постоянного тока или тока низкой частоты.

Для измерений коэффициента эффективности K_3 полупроводниковых болометрических преобразователей в расширенном диапазоне частот авторы предложили использовать установку калориметрическую, входящую в состав ГЭТ 167-2017. Калориметрическую установку дополнили генератором СВЧ, работающим в миллиметровом диапазоне длин волн, и соответствующим волноводным переходом. Блок-схема установки приведена на рис. 1.

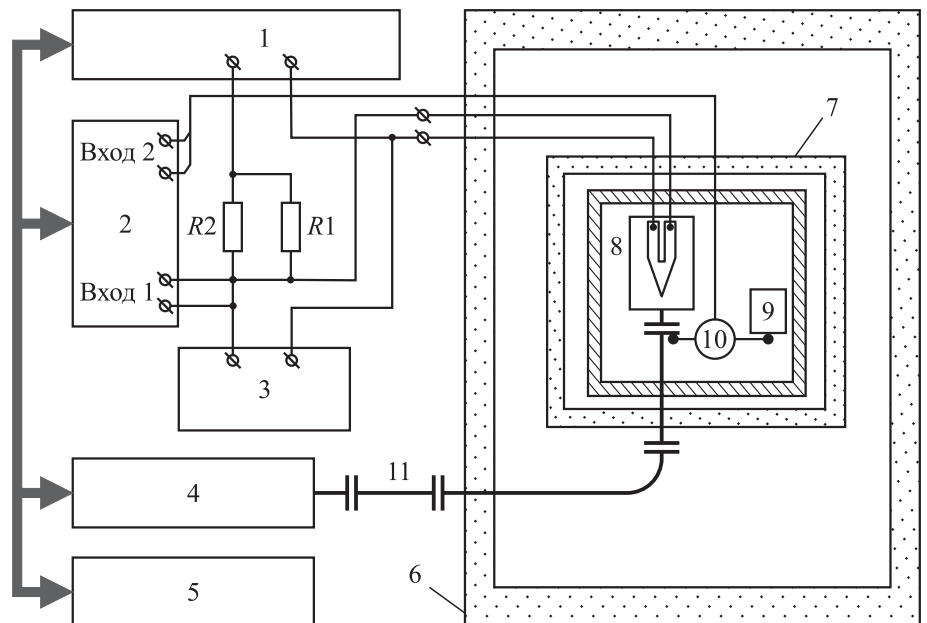


Рис. 1. Схема калориметрической установки:

1 – калибратор постоянного напряжения; 2 – нановольтметр; 3 – магазин сопротивлений; 4 – генератор сигналов СВЧ; 5 – компьютер; 6 – теплоизолированная камера; 7 – микрокалориметрический компаратор; 8 – полупроводниковый болометрический преобразователь; 9 – тело сравнения; 10 – чувствительный детектор разности температур; 11 – волноводно-волноводный переход на сечение 3,6×1,8 мм

Fig. 1. Calorimetric setup diagram:

1 – constant voltage calibrator; 2 – nanovoltmeter; 3 – resistance store; 4 – microwave signal generator; 5 – computer; 6 – thermally insulated chamber; 7 – microcalorimetric comparator; 8 – semiconductor bolometric converter; 9 – body comparison; 10 – sensitive temperature difference detector; 11 – waveguide-waveguide transition to a section of 3,6×1,8 mm

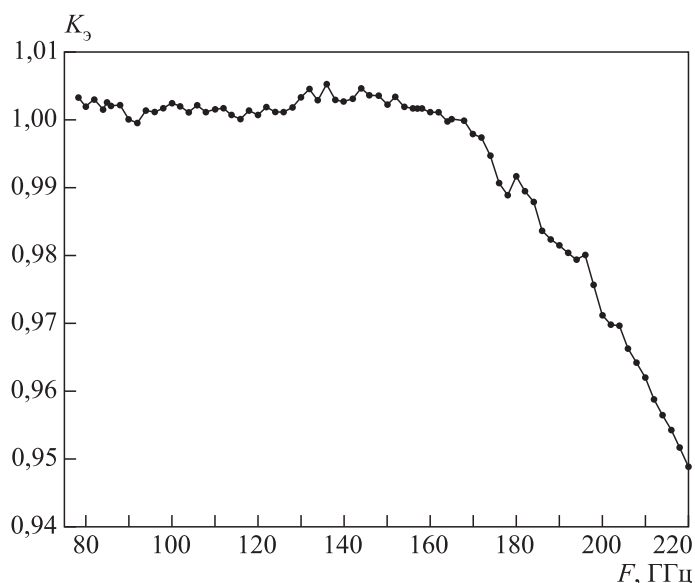


Рис. 2. Частотная зависимость K_3 приёмного преобразователя в диапазоне частот 78,33–220 ГГц

Fig. 2. The frequency dependence of the K_3 of the receiving converter in the frequency range from 78,33 to 220 GHz

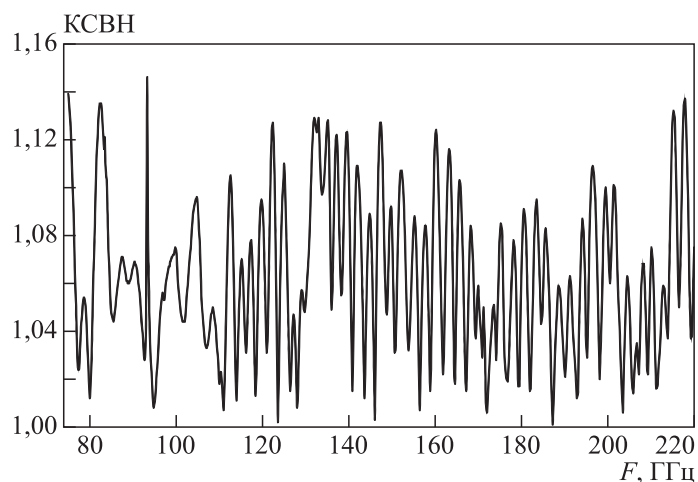


Рис. 3. Коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) преобразователя в расширенном диапазоне частот

Fig. 3. Voltage standing wave ratio (VSWR) in an extended frequency rang

Автоматическое замещение мощности СВЧ, рассеянной в болометре преобразователя, реализуется с помощью мостовой схемы, которая образована прецизионными резисторами R_1 , R_2 , магазином сопротивлений 3 и чувствительным элементом (болометром) преобразователя мощности СВЧ 8. Постоянное напряжение на питающую диагональ моста подаётся с прецизионного источника. Напряжение сигнальной диагонали моста подаётся на вход Вход 1 нановольтметра 2. Управление калибратором напряжения 1 и нановольтметром осуществляется с помощью

компьютера 5 через USB-интерфейс. Микрокалориметрический компаратор 7 размещён в теплоизолированной камере 6. Регистрирующая аппаратура и генератор сигналов СВЧ 4 находятся вне этой камеры для минимизации тепловых воздействий на компаратор. Процесс автоматического замещения мощности СВЧ мощностью постоянного тока производится под управлением компьютерной программы. Во время работы микрокалориметра программа, кроме автобалансировки мостовой схемы, осуществляет непрерывные измерения сигнала с чувствительного детектора разности температур 10, включённого между фланцем полупроводникового болометрического преобразователя и телом сравнения 9.

Измерения производили микрокалориметром с сечением волновода $3,6 \times 1,8$ мм. Такой микрокалориметр применяется в ГЭТ 167-2017 в диапазоне частот 53,57–78,33 ГГц. К входу микрокалориметра с помощью переходов 11 присоединяли высокочастотные генераторы сигналов с сечениями волноводных трактов $2,4 \times 1,2$ и $1,6 \times 0,8$ мм, а также волновод типа WR5 сечением $1,295 \times 0,648$ мм. Диапазоны частот указанных приборов составили соответственно 78,33–118,1; 118,1–178,4; 140–220 ГГц.

Потери мощности СВЧ в тепловой развязке микрокалориметра приводят к дополнительному нагреву исследуемого преобразователя мощности и не могут учитываться микрокалориметром. Введение поправки на влияние потерь мощности СВЧ в тепловой развязке микрокалориметра уменьшает погрешность измерений. В уравнении измерений используется коэффициент тепловой развязки. Этот коэффициент связывает мощность, падающую на вход аттестуемого болометрического преобразователя, с той частью выделившейся в развязке мощности, которая вносит вклад в отклик микрокалориметра. Для экспериментального определения влияния коэффициента тепловой развязки применяют метод короткого замыкания выхода тепловой развязки с одновременным контролем падающей на короткозамыкатель мощности СВЧ [14–16]. Контроль падающей мощности при измерениях потерь в тепловой развязке осуществляли ваттметром, подключённым к боковому плечу направленного ответвителя. При этом точность измерений была ограничена эффективным коэффициентом отражения выхода направленного ответвителя.

Использование микрокалориметра в расширенном диапазоне частот с учётом проведённых дополнительных исследований влияния потерь в тепловой развязке на результаты измерения K_3 на частотах до 220 ГГц позволили внести поправки в результаты измерений и найти коэффициент эффективности преобразователя мощности в расширенном диапазоне частот.

На рис. 2 показана экспериментально определённая частотная зависимость коэффициента эффективности приёмного преобразователя мощности в диапазоне частот 78,33–220 ГГц. На рис. 3 приведены результаты измерения коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) входа болометрического преобразователя, выполненного в тракте $3,6 \times 1,8$ мм, в расширенном диапазоне частот с применением волноводных пирамидальных переходов « $3,6 \times 1,8 > WR10$ »,

«WR10>WR6» и «WR10>WR5». Для оценки влияния переходов на результаты измерений КСВН определили коэффициенты отражения S_{11} и передачи S_{21} пары переходов, соединённых между собой со стороны сечения $3,6 \times 1,8$ мм.

Таким образом, на основе измеренных значений коэффициента эффективности K_3 , коэффициентов отражения S_{11} , S_{22} и коэффициентов передачи S_{12} , S_{21} переходов, используемых при измерениях в трактах сечений $2,4 \times 1,2$ мм, $1,6 \times 0,8$ мм и WR5, можно определить калибровочный коэффициент преобразователя:

$$K_K = K_3 (1 - |\Gamma|^2) \frac{|S_{21}|^2}{|(1 - S_{22})\Gamma|^2} \cong K_3 (1 - |\Gamma|^2) |S_{21}|^2,$$

где $|\Gamma|$ – коэффициент отражения преобразователя с переходом.

Проведённые авторами исследования подтвердили возможность применения полупроводниковых болометрических преобразователей мощности СВЧ в расширенном диапазоне частот. Измеренные технические характеристики полупроводниковых болометрических преобразователей, аналогичных по конструкции преобразователям из состава ГЭТ 167-2017, такие как слабая частотная зависимость коэффициента эффективности K_3 , хорошее согласование с трактом СВЧ, отсутствие потерь на излучение и приемлемое время установления показаний, позволяют измерять мощность СВЧ на любой произвольной частоте в диапазоне частот 53,57–220 ГГц.

Метрологические характеристики РЭ единицы мощности СВЧ в диапазоне частот 37,5–220 ГГц. На основании выполненных исследований был разработан и аттестован РЭ единицы мощности электромагнитных колебаний 0,1–10 мВт в диапазоне частот 37,5–220 ГГц, регистрационный номер 3.1.ZZT.0288.2018.

Метрологические характеристики
РЭ 3.1.ZZT.0288.2018 в диапазоне частот
37,5–220 ГГц

Диапазон измерения мощности.....	0,1–10 мВт
Диапазон частот	37,5–220 ГГц
Модуль коэффициента отражения.....	не более 0,10
Доверительные границы относительной погрешности результатов измерений при доверительной вероятности 0,95 в поддиапазонах частот	
37,5–78,33 ГГц.....	$\pm 0,8$ %
78,33–118,1 ГГц.....	$\pm 3,0$ %
118,1–178,4 ГГц.....	$\pm 4,0$ %
178,4–220 ГГц.....	$\pm 5,0$ %

Проанализировав данные характеристики РЭ 3.1.ZZT.0288.2018, можно сделать вывод, что в расширенном диапазоне частот точность измерений снижается в 4–6 раз. Основные источники погрешности связаны с измерениями коэффициента эффективности в микрокалориметре и измерением коэффициента передачи использованных переходов.

Заключение. Проведённые исследования болометрических преобразователей мощности позволили оценить их метрологические характеристики в расширенном диапазоне частот, а также разработать рабочий эталон единицы мощности электромагнитных колебаний в диапазоне частот 37,5–220 ГГц РЭ 3.1.ZZT.0288.2018. Рабочий эталон обеспечивает поверку и калибровку таких СИ, как ваттметры, анализаторы спектра, генераторы сигналов. Однако полученные результаты не могут в полной мере обеспечить потребности в метрологическом обеспечении измерений СВЧ-мощности предприятий, выпускающих продукцию в области сверхвысоких частот с длинами волн 2–3 мм, что связано с заметным снижением точности измерений мощности с ростом частоты. В связи с этим разработка высокоточных СИ мощности электромагнитных колебаний в диапазоне частот до 220 ГГц является актуальной задачей, решение которой позволит:

обеспечить единство измерений мощности электромагнитных колебаний в этом диапазоне частот при решении задач метрологического обеспечения существующих и перспективных радиотехнических систем, а также при контроле параметров изделий электронной компонентной базы;

создать технологический задел в области производства ваттметров миллиметрового диапазона длин волн в целях обеспечения электронной промышленности СИ мощности отечественного производства;

обеспечить в Российской Федерации единую методическую основу в области измерений мощности электромагнитных колебаний в диапазоне частот до 220 ГГц.

Список литературы

1. Тищенко В. А., Балаханов М. В., Лукьянов В. И., Перепёлкин В. А., Чирков И. П., Колотыгин С. А., Мильников А. В. Создание и совершенствование эталонной базы в области радиочастотных электромагнитных измерений. Менделеево: ВНИИФТРИ, 2013. С. 112–135.
2. Билько М. И., Томашевский А. К., Шаров П. П., Баймуратов Е. А. Измерение мощности на СВЧ. М.: Советское Радио, 1976. 168 с.
3. Ахизер А. Н., Данильченко В. П., Сенько А. П., Терехов М. В., Гордеев К. К., Калиберда Л. Г., Терзова В. П. Государственный специальный эталон единицы мощности электромагнитных колебаний в волноводных трактах в диапазоне частот 53,57–78,33 ГГц // Измерительная техника. 1979. № 7. С. 3–5.
4. Российская Метрологическая Энциклопедия. Второе издание / Под редакцией В. В. Окрепилова. В двух томах. Том 1. СПб.: Лики России, 2015. 565 с.
5. Перепёлкин В. А., Семёнов В. А., Чирков И. П., Павлов А. В., Жогун М. В., Коудельный А. В. Государственный первичный эталон единицы мощности электромагнитных колебаний в диапазоне частот от 37,5 до 78,33 ГГц ГЭТ 167-2017 // Измерительная техника. 2018. № 10. С. 3–6. DOI: 10.32446/0368-1025it.2018-10-3-6
6. Малай И. М. Задачи развития системы метрологического обеспечения в области радиотехнических измерений //

Сборник докладов XI Всероссийской научно-технической конференции «Метрология в радиоэлектронике». В 2-х томах, Менделеево, 19–21 июня 2018. Менделеево: ВНИИФТРИ, 2018. С. 5–18.

7. Семёнов В. А., Коудельный А. В., Перепёлкин В. А., Чирков И. П. Перспективы развития эталонов в области измерений мощности СВЧ в радиочастотных трактах // Альманах современной метрологии. 2019. № 2. С. 46–64.

8. Ronald A. Ginley., *Traceability for microwave power measurements: Past, present, and future*, Proceedings of the 16th Annual Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON-2015), Cocoa Beach, FL, USA, April 13–15, 2015, Cocoa Beach, IEEE, 2015, pp. 1–5. DOI:10.1109/WAMICON.2015.7120431

9. Fantom A. E., *Radio frequency and Microwave Power Measurements*, ed. A. E. Bailey, Dr. O. C. Jones, Dr. A. C. Lynch, London, Peter Peregrinus Ltd., 1990, 278 p. DOI: 10.1049/pbel007e

10. By Xiaohai Cui, Yu Song Meng, Yueyan Shan and Yong Li, *Microwave Power Measurements: Standards and Transfer Techniques*, URL: <https://www.intechopen.com/books/new-trends-and-developments-in-metrology/microwave-power-measurements-standards-and-transfer-techniques> (дата обращения: 05.12.2019). DOI: 10.5772/60442

11. Rolf H. Judaschke, Karsten Kuhlmann, Thomas M. Reichel and Werner Perndl, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2013, vol. 64, no. 12, pp. 3440–3450. DOI: 10.1109/TIM.2015.2454632

12. Коудельный А. В., Мыльников А. В., Перепёлкин В. А. Разработка и исследование полупроводниковых болометрических преобразователей мощности СВЧ оконечного типа. Исследования в области радиотехнических измерений // Сборник научных трудов. М.: ВНИИФТРИ, 1987. С. 27–34.

13. Chirkov I. P., Perepyolkin V. A., Semyonov V. A. *Pervichnyj etalon moshchnosti elektromagnitnykh kolebanij Rossii*, Proceedings of the Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM-2014) "Improvement in the Evaluation of a Rectangular Waveguide Microcalorimeter Correction Factor", Rio de Janeiro, Brazil, August 24–29, 2014, Rio de Janeiro, Brazil IEEE, 2014, pp. 166–167. DOI: 10.1109/CPEM.2014.6898311

14. Weihai Fang, Growley T. R., *Improvement in the Evaluation of a Rectangular Waveguide Microcalorimeter Correction Factor*, Proceedings of the Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM-2014) "Improvement in the Evaluation of a Rectangular Waveguide Microcalorimeter Correction Factor", Rio de Janeiro, Brazil, August 24–29, 2014, Rio de Janeiro, Brazil, IEEE, 2014, pp. 746–747. DOI: 10.1109/CPEM.2014.6898601

15. Rolf Judaschke, J. Urgan Ruhaak, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2009, vol. 58, no. 4, pp. 1104–1108. DOI 10.1109/TIM.2008.2012381

16. Xiaohai Cui, T. P. Crowley, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 60(7). 2011, vol. 60, no. 7, p. 2690–2695. DOI: 10.1109/TIM.2011.2130990

References

1. Tishchenko V. A., Balakhanov M. V., Luk'yanov V. I., Perepelkin V. A., Chirkov I. P., Kolotygin C. A., Myl'nikov A. V., *Sozдание i sovershenstvovanie etalonnnoy bazy v oblasti radiochastotnykh elektromagnitnykh izmerenii*, Mendeleevo, VNIIFTRI Publ., 2013, pp. 112–135 (in Russian).

2. Bil'ko M. I., Tomashevskii A. K., Sharov P. P., Baimuratov E. A., *Izmerenie moshchnosti na SVCh*, Moscow, Sovetskoe Radio Publ., 1976 (in Russian).

3. Akhiezer A. N., Danil'chenko V. P., Sen'ko A. P., Terekhov M. V., Gordeev K. K., Kaliberda L. G., Terzhova V. P., *Measurement Techniques*, 1979, vol. 22, no. 7, pp. 767–771.

4. *Rossiiskaya Metrologicheskaya Entsiklopediya*, ed. V. V. Okrepilov, T. 1, Sankt-Peterburg, Liki Rossii Publ., 2015, 565 p. (in Russian).

5. Perepelkin V. A., Semenov V. A., Chirkov I. P., Pavlov A. V., Zhogun M. V., Koudel'nyi A. V. *Measurement Techniques*, 2018, vol. 60, no. 7, pp. 973–978. DOI: 10.1007/s11018-018-1303-y

6. Malai I. M. *Zadachi razvitiya sistemy metrologicheskogo obespecheniya v oblasti radiotekhnicheskikh izmerenii*, Proceedings of the All-Russian XI Scientific and Technical Conference "Metrology in radio electronics", Mendeleevo, Russia, June, 19–21, 2018. Mendeleevo, FGUP "VNIIFTRI", 2018. pp. 5–18.

7. Semenov V. A., Koudel'nyi A. V., Perepelkin V. A., Chirkov I. P., *Al'manakh sovremennoi metrologii*, 2019, no. 2, pp. 46–64 (in Russian).

8. Ronald A. Ginley, *Traceability for microwave power measurements: Past, present, and future*, Proceedings of the 16th Annual Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON-2015), Cocoa Beach, FL, USA, April 13–15, Cocoa Beach, IEEE, 2015, pp. 1–5. DOI:10.1109/WAMICON.2015.7120431

9. Fantom A. E., *Radio frequency and Microwave Power Measurements*, ed. A. E. Bailey, Dr. O. C. Jones, Dr. A. C. Lynch, London, Peter Peregrinus Ltd., 1990, 278 p. DOI: 10.1049/pbel007e

10. By Xiaohai Cui, Yu Song Meng, Yueyan Shan and Yong Li, *Microwave Power Measurements: Standards and Transfer Techniques*. available at: <https://www.intechopen.com/books/new-trends-and-developments-in-metrology/microwave-power-measurements-standards-and-transfer-techniques> (accessed: 05.12.2019). DOI: 10.5772/60442

11. Rolf H. Judaschke, Karsten Kuhlmann, Thomas M. Reichel and Werner Perndl, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2013, vol. 64, no. 12, pp. 3440–3450. DOI: 10.1109/TIM.2015.2454632

12. Koudel'nyi A. V., Myl'nikov A. V., Perepelkin V. A., *Razrabotka i issledovanie poluprovodnikovyykh bolometricheskikh preobrazovatelei moshchnosti SVCh okonechnogo tipa*, Issledovaniya v oblasti radiotekhnicheskikh izmerenii. Collection of proceedings, Mendeleevo, VNIIFTRI, 1987, pp. 27–34 (in Russian).

13. Igor Chirkov, Vladimir Perepelkin, Vadim Semenov, *Russian Primary standards of microwave power*, Proceedings of

the Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM-2014), "Improvement in the Evaluation of a Rectangular Waveguide Microcalorimeter Correction Factor", Rio de Janeiro, Brazil, August 24–29, 2014, Rio de Janeiro, Brazil IEEE, 2014, pp. 166–167. DOI: 10.1109/CPEM.2014.6898311

14. Weihai Fang, Growley T. R., *Improvement in the Evaluation of a Rectangular Waveguide Microcalorimeter Correction Factor*, Proceedings of the Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM-2014) "Improvement in the Evaluation of a Rectangular Waveguide Microcalorimeter Correction Factor", Rio de Janeiro, Brazil, August 24–29, 2014,

Rio de Janeiro, Brazil, IEEE, 2014, pp. 746–747. DOI: 10.1109/CPEM.2014.6898601

15. Rolf Judaschke, J. Urgan Ruhaak, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2009, vol. 58, no. 4, pp. 1104–1108. DOI 10.1109/TIM.2008.2012381

16. Xiaohai Cui, T. P. Crowley, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 60(7). 2011, vol. 60, no. 7, pp. 2690–2695. DOI: 10.1109/TIM.2011.2130990

Дата поступления: 20.10.2019.

Дата принятия: 25.11.2019.

The working standard of the unit of power of electromagnetic waves in the frequency range from 37,5 to 220 GHz

A. V. Koudelny, I. M. Malay, V. A. Perepelkin, I. P. Chirkov

Russian metrological institute of technical physics and radio engineering measurements, Mendeleev, Moscow region, Russian Federation, e-mail: akou@vniiftri.ru, malay@vniiftri.ru, prpl@vniiftri.ru, chirkov@vniiftri.ru

The possibility of using bolometric converters of microwave power from the State primary standard of the unit of power of electromagnetic waves in waveguide and coaxial paths GET 167-2017, which has a frequency range from 37,5 to 78,33 GHz, in an extended frequency range up to 220 GHz, is shown. Studies of semiconductor bolometric converters of microwave power in an extended frequency range have confirmed good agreement and smooth frequency characteristics of the effective efficiency factor of the converters. Based on the research results, the State working standard of the unit of power of electromagnetic waves of 0,1–10 mW in the frequency range from 37,5 to 220 GHz 3.1.ZZT.0288.2018 was approved. The technical characteristics of the working standard of the unit of power of electromagnetic oscillations in an extended frequency range from 37,5 to 220 GHz are given.

Key words: power, power meter, standard, ultrahigh frequency.

Методика определения метрологических характеристик эталонных мер единицы комплексного коэффициента отражения в волноводных трактах миллиметрового диапазона длин волн

А. С. Бондаренко, А. С. Боровков, И. М. Малай, В. А. Семёнов

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений,
г. п. Менделеево, Московская обл., Российская Федерация,
e-mail: bondarenko@vniiftri.ru, alex101787@mail.ru, malay@vniiftri.ru, smnv@vniiftri.ru

Проанализировано текущее состояние измерений комплексного коэффициента отражения в волноводных трактах миллиметрового диапазона длин волн. Предложен подход к решению задачи воспроизведения шкалы измерений комплексного коэффициента отражения. Получены математические выражения, являющиеся основой уравнения измерений комплексного коэффициента отражения. Разработана методика определения метрологических характеристик мер единицы комплексного коэффициента отражения. Проведено сравнение результатов электродинамического моделирования и аналитических расчётов по разработанной методике. Показано, что предложенная методика может использоваться для воспроизведения единицы комплексного коэффициента отражения при создании государственного первичного эталона.

Ключевые слова: комплексный коэффициент отражения, набор калибровочных мер, волновод.

Введение. Развитие систем связи, телекоммуникаций, радиовидения и радиолокации различного назначения способствует освоению миллиметрового диапазона длин волн. В публикациях [1–3] показано, что миллиметровый диапазон длин волн находит широкое применение в различных радиотехнических системах как в Российской Федерации, так и за рубежом. Освоение новых технологий производства твердотельных усилительных и мощных электровакуумных приборов, а также антенно-фидерных устройств позволяет перейти от экспериментальных образцов устройств миллиметрового диапазона к их серийному производству.

Испытание устройств миллиметрового диапазона – сложная задача, для решения которой требуется проводить измерения с использованием современных средств измерений (СИ). Одним из основных измеряемых параметров является комплексный коэффициент отражения (ККО). Этот параметр определяет степень согласования отдельных частей устройств. Определение параметров согласования осуществляется с помощью скалярных и векторных анализаторов цепей (ВАЦ) [4].

Парк радиотехнических СИ, для которых требуется контролировать параметры согласования, с каждым годом увеличивается. На сегодняшний день в нашей стране единство измерений ККО в стандартизованных волноводных трактах от 2,14 до 37,5 ГГц обеспечивает Государственный эталон единиц комплексного коэффициента отражения (коэффициента стоячей волны в диапазоне от 1,01 до 4,5 и фазы коэффициента отражения в диапазоне от 0° до 360°) электромагнитных волн в волноводных трактах в диапазоне частот от 2,14 до 37,5 ГГц (УВТ 33-А-89) ГЭЕ 3.1.ZZT.0020.2015.

Этот эталон не в полной мере соответствует современным метрологическим требованиям в части диапазона частот и уровня автоматизации. Поэтому разработка государственного первичного эталона единицы ККО в волноводных трактах в настоящее время крайне актуальна и необходима. В основу создаваемого эталона положен метод сравнения с мерой. В указанном методе измеряемую величину сравнивают с эталонной мерой с помощью компаратора. В качестве компаратора применяется ВАЦ. Волноводные меры представляют собой отрезки волноводных линий передачи, короткозамыкатели и согласованные нагрузки.

Подход к решению задачи воспроизведения шкалы измерений ККО. В рамках данной статьи авторы провели оценку метрологических характеристик эталонных мер, предназначенных для воспроизведения единицы ККО. Значения ККО эталонных мер являются исходными для градуировки шкалы СИ ККО [5] на комплексной плоскости. В терминах, используемых при работе с ВАЦ, под градуировкой понимается процедура калибровки. Калибровка ВАЦ заключается в определении и корректировке собственных составляющих систематической погрешности измерений ККО. Погрешность калибровки ВАЦ зависит от точности определения комплексных коэффициентов отражения калибровочных мер, численные значения которых напрямую связаны с точностью определения их геометрических размеров и параметров материалов токоведущих поверхностей. Рассчитать эти характеристики можно методом электродинамического моделирования. Однако этот метод не позволяет получить уравнение измерений, необходимое для проведения анализа составляющих погрешности измерения ККО. В настоящей статье предложена методика,

позволяющая аналитически определить значения ККО эталонных мер. При этом расчётные значения мер ККО применяются для калибровки ВАЦ.

Погрешность воспроизведения шкалы измерений ККО зависит от выбора комбинации мер, используемых при калибровке. Наименьшая погрешность достигается выбором мер, значения ККО которых максимально удалены друг от друга на комплексной плоскости в рабочем диапазоне частот волновода, т. е. являются близкими к комплексно-сопряжённым. Парой таких мер могут быть:

короткозамыкатели плоский и смещённый на $\lambda_B/4$, где λ_B – длина волны в волноводе;

два короткозамыкателя, смещённых на $\lambda_B/8$ и $3\lambda_B/8$.

Центр комплексной плоскости определяется согласованной нагрузкой с переменной фазой, которая должна иметь точные геометрические размеры канала волновода и подвижный поглотитель для исключения влияния остаточного рассогласования.

При сравнении типов калибровок, проведённом в работе [6], установлено, что одной из лучших для обеспечения необходимой точности градуировки является калибровка типа RRM (от англ. Reflect, Reflect, Match). Расчёт характеристик мер этого типа калибровки будет рассмотрен далее.

На рис. 1 показан набор мер для проведения калибровки типа RRM. В этот набор входят:

мера коэффициента отражения № 1 Reflect 1 – волноводный короткозамкнутый отрезок длиной $l_{\text{Reflect 1}} \approx \lambda_B/8$;

мера коэффициента отражения № 2 Reflect 2 аналогичная первой мере, но длиной $l_{\text{Reflect 2}} \approx 3\lambda_B/8$;

мера Match, т. е. подвижная согласованная нагрузка.

Длины первой и второй мер выбираются таким образом, чтобы на средней геометрической длине волны в волноводе разница фаз ККО составляла 180° . Частотные характеристики мер на комплексной плоскости имеют вид, представленный на рис. 2, где f_H , f_K – соответственно начальная и конечная частоты рабочего диапазона.

Методика определения метрологических характеристик мер ККО. Проведём математический расчёт значений ККО $\dot{\Gamma}$ первой и второй мер, так как именно эти значения являются исходными для воспроизведения шкалы измерений ККО в соответствии с алгоритмом калибровки типа RRM.

Комплексный коэффициент отражения нагрузки, подключённой к волноводной линии передачи с характеристическим

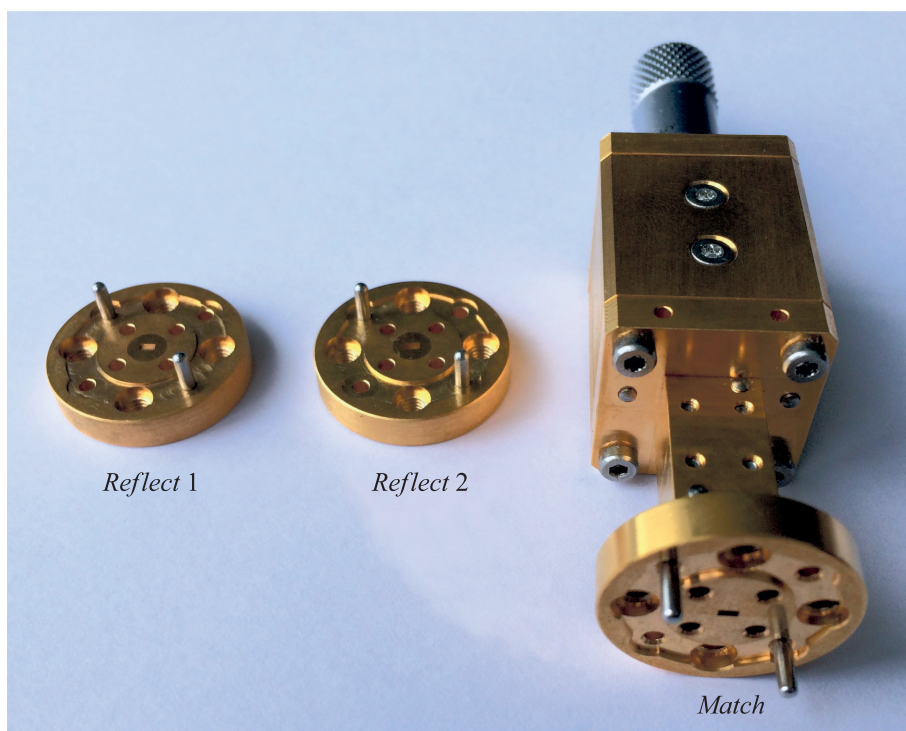


Рис. 1. Состав набора мер для проведения калибровки типа RRM

Fig. 1. RRM calibration kit standards

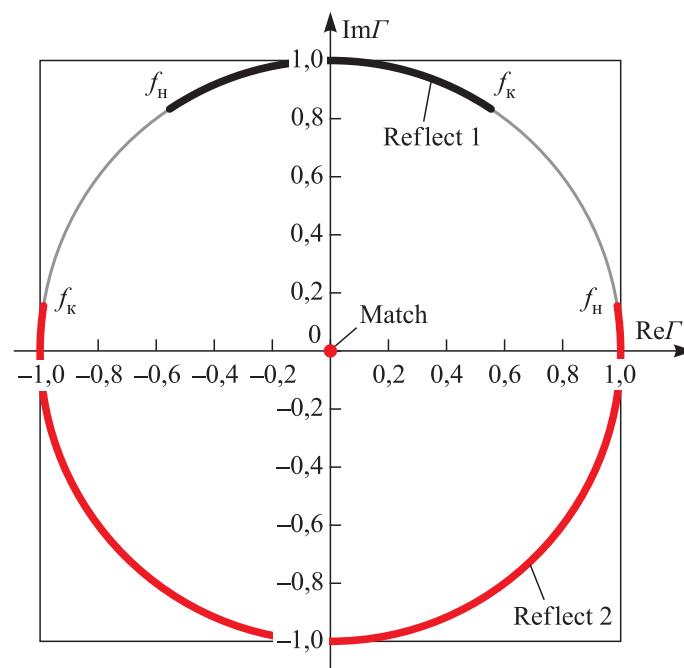


Рис. 2. Комплексные частотные характеристики мер из состава набора мер типа RRM

Fig. 2. Complex frequency characteristics of the RRM calibration kit standards

сопротивлением $\dot{r}$, связан с импедансом $\dot{Z}_H$ нагрузки уравнением

$$\dot{\Gamma} = (\dot{Z}_H - \dot{r}) / (\dot{Z}_H + \dot{r}). \quad (1)$$

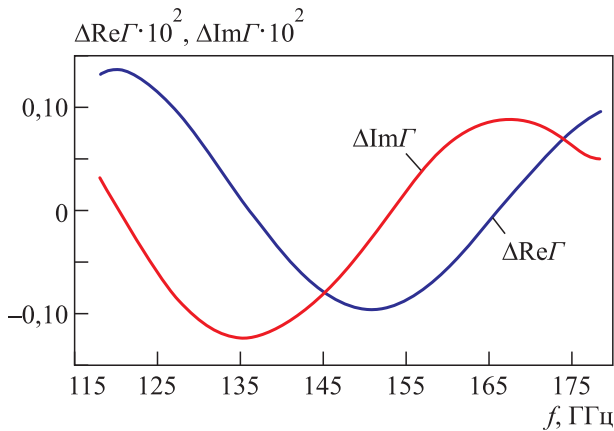


Рис. 3. Графики зависимости $\Delta\text{Re}\Gamma$, $\Delta\text{Im}\Gamma$ от частоты в волноводном тракте $1,6 \times 0,8$ мм

Fig. 3. Frequency dependences $\Delta\text{Re}\Gamma$, $\Delta\text{Im}\Gamma$ in the waveguide $1,6 \times 0,8$ mm

Характеристическое сопротивление $\dot{r}$ – комплексная величина и характеризуется активной $\text{Re}r$ и реактивной $\text{Im}r$ составляющими, т. е.

$$\dot{r} = \text{Re}r + i\text{Im}r.$$

В модели воспроизведения единицы ККО принимается, что волноводная линия передачи идеальна и, следовательно, $\dot{r}$ имеет только активную составляющую

$$\dot{r} = \text{Re}r. \quad (2)$$

В то же время нагрузка неидеальна и должна быть определена. Уравнение для определения сопротивления нагрузки имеет вид

$$\dot{Z}_H = \text{Re}Z_H + i\text{Im}Z_H. \quad (3)$$

Подставив формулы (2), (3) в выражение (1), получим

$$\dot{r} = \frac{\text{Re}Z_H + i\text{Im}Z_H - \text{Re}r}{\text{Re}Z_H + i\text{Im}Z_H + \text{Re}r}. \quad (4)$$

Из формулы (4) следуют выражения:

$$\left. \begin{aligned} \text{Re}\Gamma &= \frac{\text{Re}Z_H^2 - \text{Re}r^2 + \text{Im}Z_H^2}{(\text{Re}Z_H + \text{Re}r)^2 + \text{Im}Z_H^2}, \\ \text{Im}\Gamma &= \frac{2\text{Im}Z_H \text{Re}r}{(\text{Re}Z_H + \text{Re}r)^2 + \text{Im}Z_H^2} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Далее представим формулы для расчёта $\text{Re}r$, $\text{Re}Z_H$, $\text{Im}Z_H$.

Сопротивление волновода определим по формуле [7, 8]:

$$r = \frac{b}{a} \sqrt{\frac{\mu_a}{\epsilon_a} \left[1 - (\lambda_0 / (2a))^2 (\epsilon\mu)^{-1} \right]^{-1}}, \quad (6)$$

где a , b – номинальные размеры соответственно широкой и узкой стенок волновода; ϵ_a , μ_a , ϵ , μ – абсолютные и относительные диэлектрические и магнитные проницаемости среды соответственно; $\lambda_0 = c / (f\sqrt{\epsilon})$ – длина волны в свободном пространстве; c – скорость света в вакууме; f – частота электромагнитных колебаний.

Уравнение (6) характеризует только активную составляющую, т. е. $\text{Re}r = r$.

Активное сопротивление нагрузки определим следующим образом. В качестве модели нагрузки выберем последовательную резистивную цепь. Сопротивление однородного проводника постоянного сечения зависит от свойств вещества проводника, его длины, сечения и вычисляется по формуле

$$R = \rho_y l / S, \quad (7)$$

где ρ_y – удельное сопротивление вещества проводника; l – длина проводника; S – площадь сечения проводника.

В рассматриваемом случае проводник имеет длину

$$l = 2(kl_{k3} + 2l_{г.п})b_H, \quad (8)$$

где $k = \sqrt{2}$ – поправочный множитель, введённый для учёта шероховатости поверхности [9]; l_{k3} – длина отрезка волноводного короткозамыкателя; $l_{г.п}$ – глубина проникновения поля в металл из-за скин-эффекта; b_H – измеренный размер узкой стенки волновода.

Глубина проникновения поля в металл определяется выражением [7]:

$$l_{г.п} = \sqrt{2 / (\omega \mu_m \mu_0 \sigma_m)},$$

где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота; σ_m – активная проводимость материала, из которого изготовлены стенки волновода; μ_m – относительная магнитная проницаемость материала; μ_0 – магнитная постоянная.

Площадь поперечного сечения проводника определим как

$$S = l_{г.п} a_H, \quad (9)$$

где a_H – измеренный размер широкой стенки волновода.

Подставив формулы (8), (9) в (7), получим выражение для определения активного сопротивления нагрузки

$$\text{Re}Z_H = \rho_y [2(kl_{k3} + 2l_{г.п}) + b_H] / (l_{г.п} a_H). \quad (10)$$

Реактивное сопротивление нагрузки рассчитаем следующим образом: [10]:

$$\text{Im}Z_H = r_H \text{tg}(2\pi l_{к3} / \lambda_B), \quad (11)$$

где r_H – волновое сопротивление.

Волновое сопротивление определим из выражения

$$r_H = \frac{b_H}{a_H} \sqrt{\frac{\mu_a}{\epsilon_a} \left[1 - (\lambda_0 / (2a_H))^2 (\epsilon\mu)^{-1} \right]^{-1}}. \quad (12)$$

Выражение (12) отличается от (6) тем, что вместо номинальных геометрических размеров a , b при расчёте используются измеренные значения $a_{и}$, $b_{и}$.

Длину волны в волноводе вычислим по формуле

$$\lambda_{в} = \lambda_0 / \sqrt{1 - (\lambda_0 / (2a))^2}.$$

Подставим в $\text{Re}\Gamma(l_{кз}, a_{и}, b_{и}, \sigma_{м}, k, f)$, $\text{Im}\Gamma(l_{кз}, a_{и}, b_{и}, \sigma_{м}, k, f)$ (см. (5)) следующие величины: $\text{Re}\Gamma(f)$ из (6); $\text{Re}\Gamma(l_{кз}, a_{и}, b_{и}, \sigma_{м}, k, f)$, из (10); $\text{Im}Z_{н}(l_{кз}, a_{и}, b_{и}, f)$ из (11). В результате совершенных действий можно получить уравнения для нахождения действительной и мнимой частей ККО первой и второй мер (не приводится из-за громоздкости).

Для подтверждения достоверности результатов расчётов с применением выбранной модели авторы настоящей статьи провели математическое моделирование мер ККО в среде HFSS Ansoft. Частотная зависимость разности между вычисленными значениями действительной и мнимой частей ККО ($\Delta\text{Re}\Gamma$, $\Delta\text{Im}\Gamma$) и результатами моделирования для одной из двух мер в волноводном тракте размерами $1,6 \times 0,8$ мм представлены на рис. 3. Из графика следует, что эти разности малы и находятся в пределах $\pm 0,0015$, что удовлетворяет современным требованиям.

Заключение. В результате проведённой работы получено математическое выражение, являющееся основой уравнения измерений ККО. Это уравнение определяет связь геометрических размеров и свойств материалов волноводных мер, используемых при градуировке ВАЦ, с измеряемыми значениями $\dot{\Gamma}$ и может применяться для определения погрешностей результатов измерений ККО. Кроме того, разработан алгоритм расчёта для определения значений $\dot{\Gamma}$ калибровочных мер, предназначенных для воспроизведения единицы ККО. Достоверность алгоритма подтверждена результатами электродинамического моделирования. Разность между значениями $\dot{\Gamma}$ меры ККО, рассчитанными по разработанному алгоритму и полученными в результате моделирования, находится в пределах $\pm 0,0015$.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности использования предложенной авторами методики расчёта характеристик мер для воспроизведения единицы ККО при создании государственного первичного эталона.

Список литературы

1. Изюмов Д. Б., Кондратюк Е. Л. Зарубежный опыт использования терагерцового частотного диапазона при создании образцов вооружения, военной и специальной техники // Инноватика и экспертиза. 2018. Вып. 1 (22). С. 153–168.
2. Кузнецов И. В., Малай И. М., Семёнов В. А. Состояние и перспективы развития методов воспроизведения единиц комплексного коэффициента отражения и передачи

в волноводных трактах // Материалы XI Всероссийской научно-технической конференции «Метрология в радиоэлектронике», Менделеево, 19–21 июня 2018. Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2018. Т. 2. С. 75–82.

3. Гибин И. С., Котляр П. Е. Приёмники излучения терагерцового диапазона. Обзор // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 2. С. 117–129.

4. Дансмор Джозель П. Настольная книга инженера. Измерения параметров СВЧ-устройств с использованием передовых методик векторного анализа цепей. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2018. 736 с.

5. Дойников А. С. Лекции по метрологии. Менделеево: ВНИИФТРИ, 2018. 292 с.

6. Губа В. Г., Ладур А. А., Савин А. А. Классификация и анализ методов калибровки векторных анализаторов цепей // Сборник докладов Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Томск: ТУСУР. 2011. № 2 (24). Ч. 1. С. 149–155.

7. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ / Под. ред. академика Н. Д. Девяткова. Учебник для студентов вузов по специальности «Электронные приборы», М.: Высшая Школа, 1970. 440 с.

8. Чернушенко А. М., Меланченко Н. Е., Малорацкий Л. Г., Петров Б. В. Конструкции СВЧ устройств и экранов. Учебное пособие для вузов. М.: Радио и связь, 1984. 400 с.

9. Семёнов Н. А. Техническая электродинамика. Учебное пособие для вузов. М.: Связь, 1973. 480 с.

10. Шаров Г. А. Волноводные устройства сантиметровых и миллиметровых волн. М.: Горячая линия – Телеком, 2016. 640 с.

References

1. Izyumov D. B., Kondratyuk E. L., *Innovatika i ehkspertiza*, 2018, no. 1 (22), p. 153–168 (in Russian).
2. Kuznetsov I. V., Malai I. M., Semenov V. A., *Abstracts of XI All-Russian Scientific and Technical Conference "Metrology in radio electronics"*, Mendeleevo, June 19–21, 2018, Mendeleevo, VNIIFTRI, 2018, ch. 2, pp. 75–82.
3. Gibin I. S., Kotlyar P. E., *Uspekhi prikladnoi fiziki*, 2018, vol. 6, no. 2, p. 117–12 (in Russian).
4. Dansmor Dzhoel' P., *Nastol'naya kniga inzhenera. Izmereniya parametrov SVCh-ustroystv s ispol'zovaniem peredovykh metodik vektornogo analiza tsepei*, Moscow, TEKHNOСFERA, 2018. 736 p. (in Russian).
5. Doinikov A. S., *Lektsii po metrologii*, Mendeleevo, VNIIFTRI, 2018, 292 p. (in Russian).
6. Guba V. G., Ladur A. A., Savin A. A., *Klassifikatsiya i analiz metodov kalibrovki vektornykh analizatorov tsepei, Doklady Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*, Tomsk, TUSUR Publ., 2011, № 2 (24), Ch. 1, pp. 149–155 (in Russian).
7. Lebedev I. V., *Tekhnika i pribory SVCh. Ed. by akademika N. D. Devyatкова. Uchebnik dlya studentov vuzov po spetsial'nosti "Ehlektronnye pribory"*, Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1970. 440 p. (in Russian).

8. Chemushenko A. M., Melanchenko N. E., Maloratskii L. G., Petrov B. V., *Konstruktsii SVCh ustroystv i ehkranov*. Textbook for universities, Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1984. 400 p. (in Russian).

9. Semenov N. A., *Tekhnicheskaya ehlektrodinamika*. Textbook for universities, Moscow, Svyaz' Publ., 1973. 480 p. (in Russian).

10. Sharov G. A., *Volnovodnye ustroystva santimetrovykh i millimetrovykh voln*, Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2016. 640 p. (in Russian).

Дата поступления: 20.10.2019.

Дата принятия: 25.11.2019.

The method of determining the metrological performance of unit reference standards of reflection coefficient in waveguides at millimeter waves

Alexander S. Bondarenko, Alexander S. Borovkov, Ivan M. Malay, Vadim A. Semyonov

Russian metrological institute of technical physics and radio engineering measurements, Mendeleevo, Moscow region, Russian Federation, e-mail: bondarenko@vniiftri.ru, alex101787@mail.ru, malay@vniiftri.ru, smnv@vniiftri.ru

The analysis of the current state of the reflection coefficient measurements in waveguides at millimeter waves is carried out. An approach for solving the problem of reproducing the reflection coefficient measurement scale is proposed. Mathematical equations, which are the basis of the reflection coefficient measurement equation are obtained. The method of determining the metrological performance of reflection coefficient unit's reference standards is developed. The results of electrodynamic modeling and analytical calculations by the developed method are compared. It is shown that this method can be used for reproducing the reflection coefficient unit in the development of the State primary standard.

Key words: reflection coefficient, calibration kit, waveguide.

Передача единицы звукового давления гидрофонам с учётом условий их применения

А. Е. Исаев, С. Ф. Некрич, И. В. Черников

*Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений,
г. п. Менделеево, Московская обл., Российская Федерация, e-mail: isaev@vniiftri.ru, iii@vniiftri.ru*

Описана измерительная установка для воспроизведения единицы звукового давления в воде на частотах 1–500 Гц в диапазоне температур 0,5–35 °С при избыточных статических давлениях до 60 МПа. Цель создания установки – расширение функциональных возможностей Государственного первичного эталона единиц звукового давления и колебательной скорости в водной среде ГЭТ 55-2017. Показана целесообразность моделирования в ГЭТ 55-2017 рабочих условий применения гидрофона. Рассмотрены принципы функционирования и метрологические характеристики созданной установки. Приведены особенности измерительной процедуры калибровки гидрофона.

Ключевые слова: подводная акустика, калибровка гидрофона, камера высокого давления, акустическая гибкость.

Введение. Метрологическое обеспечение гидроакустических измерений является одним из основных направлений научно-технической деятельности ВНИИФТРИ как Государственного научного метрологического центра РФ. Поверочную схему в области измерений подводного звука возглавляет созданный и хранимый во ВНИИФТРИ Государственный первичный эталон единиц звукового давления и колебательной скорости в водной среде ГЭТ 55-2017. Для расширения функциональных возможностей ГЭТ 55-2017 с 2017 по 2019 гг. была разработана установка Э-6. Измерительная установка обеспечивает воспроизведение единицы звукового давления в воде на частотах 1–500 Гц в диапазоне температур 0,5–35 °С при избыточных статических давлениях до 60 МПа. Таким образом решена проблема низкочастотной калибровки гидрофонов, применяемых на больших глубинах.

Целесообразность моделирования в ГЭТ 55-2017 условий применения измерительного гидрофона. Традиционно первичный эталон воспроизводит единицу в условиях, обеспечивающих наивысшую точность. Калибровка средств измерений (СИ) с учётом влияющих факторов – задачи вторичного и рабочих эталонов. Однако в области гидроакустических измерений сложилась ситуация, когда несколько ступеней передачи единицы приводят к неоправданной потере точности калибровки измерительного гидрофона.

В настоящее время единственным методом исследования зависимости чувствительности гидрофонов от статического давления и температуры является абсолютный метод калибровки – метод взаимности. Таким образом, наиболее рациональное решение проблемы – дополнение ГЭТ 55-2017 установкой, позволяющей воспроизводить единицу в диапазоне статических давлений и температур, охватывающем диапазон реальных условий применения измерительного гидрофона.

Научная задача государственных первичных эталонов – воспроизведение единицы с наивысшей точностью, техническая задача – обеспечение поверки существующего парка СИ. В последние десятилетия происходит бурное развитие гидроакустических технологий. Освоение огромных запасов природных богатств Арктики и обеспечение судоходства по Северному морскому пути требует калибровки гидрофонов при низких температурах. Активное участие нефтегазодобывающих компаний РФ в освоении месторождений в тропических широтах обуславливает необходимость калибровки при повышенных температурах. При охране прибрежных зон, защите гаваней, портов, надводных и придонных буровых станций от террористических угроз гидрофон находится в условиях малых глубин и статических давлений. Большая часть месторождений минеральных ископаемых (полиметаллические сульфидные руды, железо-марганцовые конкреции, кобальто-марганцевые корки) залегает в северо-западной части Тихого океана на глубинах 3600–5400 м. Без проведения активных исследований на таких глубинах Россия не сможет полноправно участвовать в формировании международной политики в использовании и квотировании добычи минеральных ресурсов открытого океана и не получит к ним необходимого доступа. Таким образом, измерительные гидрофоны работают при различных сочетаниях температур и давлений, и это необходимо учитывать при калибровке.

Чтобы обеспечить взаимодействие государств в области мониторинга подводного шума и сертификации по шуму судов коммерческого флота необходимо обеспечить взаимное признание результатов калибровок. Это потребовало, например, расширения диапазона частот калибровок гидрофонов в низкочастотную область. План ключевых сличений Международного комитета по мерам и весам (МКМВ) предусматривает сличение национальных

эталонов по результатам калибровок гидрофонов на низких частотах. Для обеспечения калибровок рабочих СИ на заседании Технического комитета ТК87 Международной электротехнической комиссии (МЭК), состоявшемся в рамках 83-го Генерального заседания МЭК в Шанхае в октябре 2019 г., принято решение о привлечении экспертов Рабочих групп Технических комитетов МЭК IEC/TC87/WG15 и Международной организации по стандартизации (ИСО) ISO/TC43/SC3 к разработке стандарта на низкочастотную калибровку цифровых гидрофонов и рекордеров подводного звука. Следующим шагом, обеспечивающим взаимное признание сертификатов калибровок, неизбежно будет сравнение результатов калибровок при избыточных статических давлениях и в диапазоне температур. Эталонные установки, способные воспроизводить единицу в широких диапазонах избыточных давлений и температур активно используются в таких странах, как США, Китай, Великобритания [1].

Установка Э-6. Проведённые исследования выявили существенную зависимость чувствительности пьезокерамических измерительных гидрофонов от температуры и гидростатического давления. При изменении температуры в диапазоне 0,5–35 °С чувствительность гидрофона может изменяться на 0,7–1,0 дБ, а с увеличением гидростатического давления от 0,5 до 50 МПа – до 3 дБ. Использование в

реальных условиях применения гидрофона значений чувствительности, полученных при малых статических давлениях и комнатной температуре, приводит к погрешности передачи единицы, соизмеримой с современными требованиями к погрешности гидроакустических измерений. Как следствие, погрешность натурных измерений оказывается недопустимо большой. Изменение чувствительности при совместном воздействии температуры и гидростатического давления не носит аддитивного характера, что не позволяет оценить общее изменение чувствительности от совокупного воздействия этих факторов как сумму вкладов каждого из них. Отечественный и зарубежный опыт указывает, что величины и взаимное сочетание гидростатического давления и температуры при калибровке гидрофона в лабораторных условиях должны воспроизводиться такими же, как при использовании гидрофона по назначению в натурных условиях [2].

Конструктивно установка Э-6 состоит из измерительного комплекса, камеры тепла и холода, стенда высокого давления. В состав стенда входят заполняемая водой измерительная камера и гидропресс. Внешний вид камеры тепла и холода 1 и стенда высокого давления представлен на рис. 1. Статическое давление в измерительной камере 3 создают поршневым гидропрессом 2, визуально контролируя

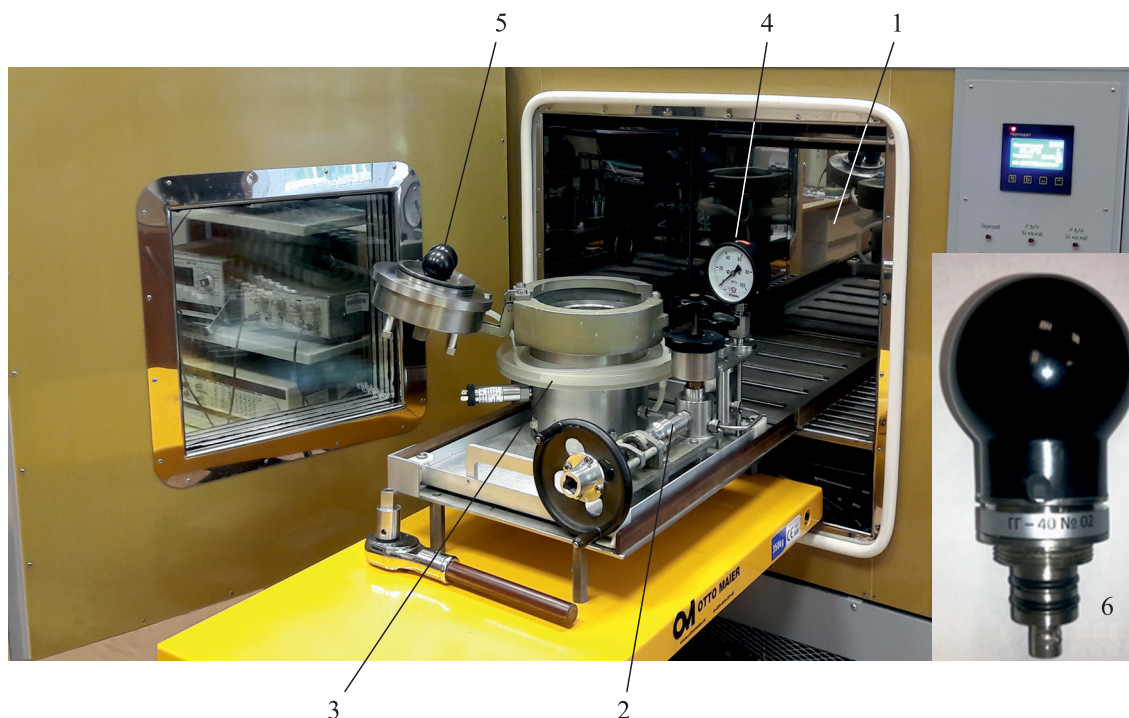


Рис. 1. Установка Э-6:

1 – камера тепла и холода, 2 – гидропресс, 3 – измерительная камера, 4 – манометр визуального контроля статического давления, 5 – крышка камеры с установленными в ней калибруемом гидрофоном и излучателем; 6 – калибруемый гидрофон

Fig. 1. Appearance of facility equipment:

1 – chamber of heat and cold; 2 – hydro press; 3 – small volume measuring coupler; 4 – static pressure gauge; 5 – calibrated hydrophone and projector mounted in the coupler cap; 6 – calibrated hydrophone

давление по манометру 4. Чтобы установить требуемую температуру воды в измерительной камере, стенд высокого давления помещают в камеру тепла и холода, которую включают в режим нагрева либо охлаждения. Температуру воды контролируют с помощью встроенного в корпус измерительной камеры датчика температуры. По достижении заданной температуры воды статическое давление в измерительной камере подстраивают до требуемого значения, контролируя его по встроенному в корпус камеры датчику давления. Информация о текущих значениях статического давления и температуры воды автоматически поступает с выходов датчиков в компьютер измерительной системы установки.

Метрологические характеристики установки Э-6.

В результате исследования метрологических характеристик установки Э-6 были выявлены основные источники погрешности. Оценки вкладов, вносимых этими источниками в погрешность, приведены в таблице.

Неисключённую систематическую погрешность (НСП) и среднее квадратическое отклонение (СКО) воспроизведения и передачи размера единицы звукового давления оценивали в соответствии с ГОСТ 8.381-2009.

Метрологические характеристики измерительной установки Э-6

Частотный диапазон воспроизведения и передачи размера единицы звукового давления.....	1–500 Гц
Диапазон воспроизводимых звуковых давлений в зависимости от частоты.....	10–150 Па
Диапазон изменения температуры	0,5–35 °С
Диапазон изменения статического давления	0,5–60 МПа
СКО результата измерений при воспроизведении единицы звукового давления	не более 2 %
НСП воспроизведения единицы звукового давления в диапазоне частот	не более 3 %
СКО результата измерений чувствительности гидрофона	не более 2 %
НСП результата измерений чувствительности гидрофона	не более 3 %

Результаты выполненных метрологических исследований дают основания для расширения диапазона установки Э-6 в сторону высоких частот до 1 кГц без существенного увеличения погрешности измерений. Для моделирования натурных условий измерений на частотах более 1 кГц требуется дополнить ГЭТ 55-2017 эталонной установкой, обеспечивающей воспроизведение и передачу по полю единицы звукового давления в диапазоне частот 1–200 кГц.

Процедура калибровки гидрофона. Для измерения чувствительности калибруемого гидрофона в установке Э-6 реализована модифицированная процедура метода взаимности в камере малого объёма, стандартизованного в МЭК 60565:2006 «Гидроакустика. Гидрофоны. Калибровка в частотном диапазоне от 0,01 Гц до 1 МГц». Преимущества этой процедуры – возможность определять акустическую гибкость системы и чувствительность гидрофона, выполняя

измерения только электрических величин. Звуковое давление в измерительной камере возбуждают с помощью излучателя либо обратимого преобразователя, установленных соответственно в крышке 5 и дне камеры 3 (см. рис. 1). Чувствительность гидрофона M_f вычисляют по формуле

$$M_f = \sqrt{JA}; \quad (1)$$

$$A = U_{и-г} U_{о.п-г} / (U_{и-о.п} I_{о.п}),$$

где J – параметр взаимности для камеры малого объёма; $U_{и-г}$, $U_{и-о.п}$ – напряжения на выходах гидрофона и обратимого преобразователя при возбуждении звукового давления излучателем; $U_{о.п-г}$ – напряжение на выходе гидрофона при возбуждении звукового давления обратимым преобразователем, $I_{о.п}$ – ток в цепи обратимого преобразователя.

При измерениях методом взаимности в камере малого объёма зависимость от частоты f параметр взаимности J выражается через акустическую гибкость C_a системы, состоящей из измерительной камеры и заполняющей камеру водной среды [4]:

$$J = 2\pi f C_a.$$

Гибкость C_a удобно представить суммой значений гибкости заполняющей камеру воды C_b и общей гибкости камеры C_k – её стенок, дна и крышки с установленными в них излучателем, обратимым преобразователем и калибруемым гидрофоном. Акустическую гибкость воды можно достаточно точно рассчитать по формуле

$$C_b = V / (\rho c^2),$$

где V , ρ – объём и плотность воды; c – скорость звука в воде.

В отличие от расчёта C_b , расчёт акустической гибкости камеры затруднён, поскольку требуемые для него исходные величины не поддаются точному измерению. Гибкость камеры определяют согласно процедуре [4], основанной на допущении, что чувствительность гидрофона сохраняется при изменении гибкости C_a системы, а сама гибкость не зависит от частоты.

Бюджет погрешности калибровки гидрофона на установке Э-6

Источник	Значение, %
Неточность определения акустической гибкости измерительной камеры	2,8
Неточность определения акустической гибкости воды в камере	0,6
Неравномерность звукового давления в измерительной камере	0,5
Измерение отношения напряжений	0,5
Нелинейность измерительного тракта установки	0,4
Отношение сигнал–шум	0,4

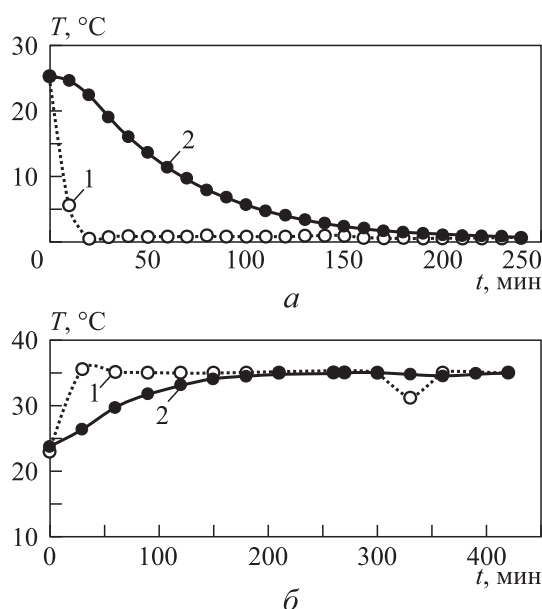


Рис. 2. Установление температуры воды (2) в измерительной камере и температуры камеры тепла и холода (1) при охлаждении (а) и нагреве (б)

Fig. 2. Setting the water temperature (2) in the measuring coupler and the temperature in the chamber of heat and cold (1) during cooling (a) and heating (b)

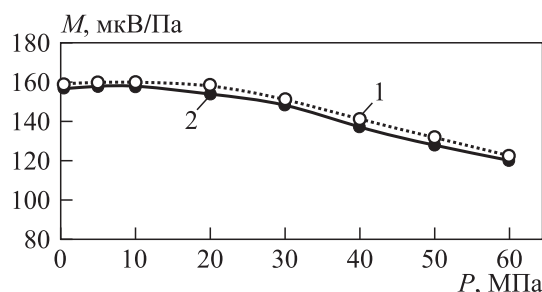


Рис. 3. Зависимость чувствительности глубоководных пьезокерамических обратимого преобразователя (1) и гидрофона (2) от статического давления

Fig. 3. The dependence of the sensitivity of deep-sea piezoceramic hydrophone (1) and a reversible transducer (2) on static pressure

Для системы с исходной гибкостью $(C_a)_1$ вычисляют параметр A_1 , выполнив измерения электрических величин U, I . Затем изменяют акустическую гибкость системы на известное значение, помещая в камеру жёсткое тело известного объёма ΔV . Повторяют измерение электрических величин и вычисляют параметр A_2 для системы с изменённой гибкостью $(C_a)_2$. Гибкость C_k определяют по формуле [4]:

$$C_k = A_2 \Delta C_B / (A_2 - A_1) - C_B,$$

где $\Delta C_B = \Delta V / (\rho c^2)$.

По найденному значению C_k определяют гибкость системы C_a и параметр взаимности, который подставляют в

формулу (1) для расчёта чувствительности калибруемого гидрофона.

Особенности выполнения калибровочных работ на установке Э-6. В отличие от низкочастотных камер, используемых при малых статических давлениях, микропузырьки воздуха, увлекаемые в измерительную камеру при её заполнении водой, установке преобразователей и калибруемого гидрофона, а также жёсткого тела, не оказывают влияния на результаты измерений. Причина этого – схлопывание микропузырьков при значительных статических давлениях. Установление заданного статического давления занимает не более нескольких минут, однако установление температуры требует значительно большего времени. На рис. 2 показаны процессы установления предельных низкой 0,5 °C и высокой 35 °C температур воды в измерительной камере установки Э-6. По приведённым зависимостям можно судить о времени, требуемом для подготовки к выполнению измерений. В отличие от камеры тепла и холода, в которой температура устанавливается достаточно быстро (кривая 1), установление заданной температуры воды в измерительной камере (кривая 2) может занимать до четырёх часов. Следует отметить, что камера тепла и холода работает в режиме старт–стоп, т. е. при включении–выключении нагревателя или охладителя. При этом температура колеблется около среднего значения, задаваемого оператором. Циклические изменения температуры воды в измерительной камере приводят к изменению давления, что нарушает условия измерительного эксперимента. Влияние изменений температуры в камере тепла и холода на результат калибровки «сглаживается» благодаря тепловой инерции измерительной камеры. Для оценки этого влияния при достижении в измерительной камере установившейся температуры 35 °C дверцу камеры тепла и холода открывали и оставляли открытой на 10, 20 и 30 минут, при этом температура в камере тепла и холода опускалась. Достаточность тепловой инерции оценивали по изменениям температур в камере тепла и холода и измерительной камере. Заметные изменения температуры воды в измерительной камере наблюдались при открывании дверцы на 30 минут. Температура в камере тепла и холода опускалась на 5 °C (см. рис. 2, а, провал кривой 1), изменение температуры воды в измерительной камере за это время не превысило 0,2 °C.

На рис. 3 представлены зависимости от статического давления чувствительности однотипных гидрофона и обратимого преобразователя с активными элементами в виде пьезокерамической радиально поляризованной сферы диаметром 40 мм и толщиной стенки 3 мм. С увеличением статического давления до 60 МПа изменение чувствительности глубоководного гидрофона может достигать 25–30 %.

Результаты калибровки обратимого преобразователя при различных сочетаниях температуры и давления дают возможность контролировать качество измерительного эксперимента, для чего их накапливают в базе данных.

Из представленных графиков также можно сделать вывод о том, что для однотипных гидрофонов зависимости

чувствительности от статического давления близки настолько, что возможно использовать эталонную установку для определения типовой калибровочной кривой, которая может быть использована, например, для введения поправок на статическое давление, как это принято для микрофонов.

Закключение. На первый взгляд техническая задача эталона – обеспечить калибровку (поверку) любого разрабатанного СИ. Однако такой подход нерационален по ряду причин. С одной стороны, производ в конструировании гидроакустических СИ требует создания большого парка эталонов, которые должны быть прослеживаемы к эталонам, участвующим в ключевых сличениях. С другой стороны, стандартизация методик измерений накладывает свои требования на конструкцию самого СИ. То есть СИ должно обеспечивать возможность прослеживаемой калибровки, удовлетворяя при этом требованиям методик измерений, стандартизованных на международном уровне.

Создание эталонной установки приводит к тому, что на конструкцию СИ накладываются дополнительные ограничения, определяемые как конструкцией эталона, так и реализованными в нём методами воспроизведения единицы. В воздушной акустике это привело к созданию международных стандартов на эталонные и измерительные микрофоны, в которых оговорены как основные электроакустические, так и геометрические параметры микрофонов. В гидроакустике такая работа только предстоит. Например, рекордер подводного звука в настоящее время – «чёрный ящик», у которого доступ к гидрофону и его выходному сигналу крайне затруднён либо невозможен. Другой пример – цифровой гидрофон обязан обеспечивать измерения методом, применённым в эталоне, например, стробирование сигнала при использовании в эталоне тонально-импульсного метода.

Таким образом, вновь создаваемые для работы на больших глубинах гидрофоны должны конструироваться с учётом возможности их калибровки на эталонной установке Э-6. Гидрофоны рекордеров, глубоководных измерительных станций и других подобных устройств должны быть совместимы с измерительной камерой эталона по габаритным размерам, уплотнению и посадочным местам, а выходной сигнал гидрофона при калибровке должен быть доступен с учётом упомянутых выше требований.

Возможность заместить сигнал активного элемента гидрофона сигналом внешнего источника позволит значительно сократить загруженность эталона при калибровке рекордеров и подобных устройств, заменив, где это возможно, акустические измерения более точными и менее трудоёмкими электрическими измерениями.

Список литературы

1. Beamiss G. A., Hayman G., Robinson S. P., Thompson A. D., Improvements in the provision of standards for underwater acoustics at simulated ocean conditions. NPL REPORT DQL-AC 010. December 2004. [Электронный ресурс]. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/f77e/388694f90009b5e3c15295649f1e2b7ef4c5.pdf> (дата обращения: 04.12.2019).
2. Beamiss G. A., Robinson Stephen P., Hayman G., Esward T. J., *Acta Acustica united with Acustica*, 2002, vol. 88, pp. 799–802.
3. Боббер Р. Дж. Гидроакустические измерения; пер. с англ. под ред. А. Н. Голенкова. М.: Мир, 1974. 362 с.
4. Некрасов В. Н., Некрич С. Ф. Модифицированный метод взаимности для градуировки гидрофонов в камерах малого объёма // Измерительная техника. 1988. № 1. С. 43–45.

References

1. Beamiss G. A., Hayman G., Robinson S. P., Thompson A. D., Improvements in the provision of standards for underwater acoustics at simulated ocean conditions // NPL REPORT DQL-AC 010. December 2004, available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/f77e/388694f90009b5e3c15295649f1e2b7ef4c5.pdf> a9 (accessed: 12/04/2019).
2. Beamiss G. A., Robinson Stephen P., Hayman G., Esward T. J., *Acta Acustica united with Acustica*, 2002, vol. 88, pp. 799–802.
3. Bobber R. J., *Underwater electroacoustic measurements*, Washington, U. S. Government Printing Office, 1970.
4. Nekrasov V. N., Nekrich S. F., *Measurement Techniques*, 1988, vol. 31, no. 1, pp. 77–81. DOI: 10.1007/BF00865770

Дата поступления: 25.10.2019.

Дата принятия: 25.11.2019.

Calibration of hydrophones taking into account the conditions of their use

Alexander E. Isaev, Sergey F. Nekrich, Ilya V. Chernikov

Russian metrological institute of technical physics and radio engineering measurements, Mendeleev, Moscow region, Russian Federation, e-mail: isaev@vniiftri.ru., iii@vniiftri.ru

A measuring facility for reproducing a unit of sound pressure at frequencies of 1–500 Hz in the temperature range of 0.5–35 °C with excessive static pressures up to 60 MPa is described. The measuring facility was created in order to expand the functionality of the State primary standard GET 55-2017. The expediency of simulated ocean conditions in GET 55-2017 under hydrophone calibration, the principles of operation and the metrological characteristics of the measuring facility are discussed. Features of the measuring procedure for calibrating the hydrophone are given.

Key words: underwater acoustics, hydrophone calibration, high-pressure coupler, acoustical compliance.

Состояние и перспективы развития эталонных средств воспроизведения единиц объёмной активности радона и торона и плотности потока радона с поверхности грунта

С. Г. Бирюков, О. И. Коваленко, А. А. Орлов

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений», г. п. Менделеево, Московская обл., Российская Федерация, e-mail: sgbir@vniiftri.ru, koi@vniiftri.ru, orlov_aa@vniiftri.ru

Описан подход к созданию эталонных средств воспроизведения единиц объёмной активности радона и торона и плотности потока радона с поверхности грунта на основе физических принципов воспроизведения этих единиц величин и использования в качестве технических средств воспроизведения барботеров с радиоактивным раствором соли радия, референтных емкостей известного объёма, эманионных камер для генерации торона, гамма-спектрометра с полупроводниковым детектором из особо чистого германия и радиометров радона. Воспроизведение заключается в физической реализации единиц в соответствии с их определением применительно к образованию радона и торона в радиоактивных рядах радия и тория. Предложенный подход позволит определить конструктивные, структурные и другие технические решения эталонных средств измерений, а также специфические приёмы и способы работы с ними. Создание эталонных средств и технологий воспроизведения единиц объёмной активности радона и торона и плотности потока радона с поверхности грунта позволит обеспечить единство и достоверность измерений в области ионизирующих излучений, прослеживаемость единиц и приведение характеристик национальных эталонов в соответствие с уровнем мировых достижений.

Ключевые слова: радон, торон, объёмная активность, плотность потока радона, референтная ёмкость, барботер, эманионная камера, герметичный бокс.

Введение. По официальной информации Всемирной организации здравоохранения радон является второй (после курения) по значимости причиной развития рака лёгких (до 14 % всех случаев рака лёгких). Значительные концентрации радона в воздухе помещений могут спровоцировать рост раковых клеток и лейкомию. Риск развития рака лёгких возрастает прямо пропорционально концентрации радона в воздухе. Радон отнесён к основному источнику облучения человека от излучений радионуклидов природного происхождения. Наибольший вклад в радиоактивное облучение человека вносит именно радон. Три четвертых годовой дозы облучения, получаемой людьми от всех возможных источников радиации, составляет доза облучения от радона, а в дозе от всех природных источников радон обуславливает примерно половину [1, 2].

В соответствии с требованиями Санитарных правил и нормативов СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009» в воздухе жилых и производственных помещений требуется контролировать содержание радона ^{222}Rn и торона ^{220}Rn (изотоп радона, который получается в результате распада ^{232}Th). В области использования атомной энергии активность торона, который образуется в результате последовательных α -распадов из долгоживущего изотопа урана ^{238}U в процессе его наработки в активной зоне ядерного реактора, может выступать как технологический показатель при переработке облучённого топлива и контроле герметичности оборудования ядерных установок.

Все это обуславливает востребованность в измерениях объёмной активности (ОА) радона и торона. Парк средств измерений ОА радона и торона включает более 20 типов средств измерений, зарегистрированных в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений. Измерения ОА радона и торона востребованы в радиоэкологии (в целях оценки дозовой нагрузки на население), разведке полезных ископаемых, медицине (в радоновой терапии), при обследовании территорий на радоноопасность и строительстве производственных и жилых объектов [3, 4].

Создание технологии воспроизведения и передачи единиц ОА радона и торона позволит обеспечить единство и достоверность измерений, прослеживаемость единиц и приведение характеристик Государственного первичного эталона единицы объёмной активности радиоактивных аэрозолей ГЭТ 39-2014 в соответствие с уровнем мировых достижений в измерениях ОА радона и торона [5–7].

Разработка эталонных средств воспроизведения единицы плотности потока радона (ППР) с поверхности грунта позволит избавиться от необходимости разработки методик измерения ППР для каждого типа средств измерений отдельно и обеспечит единство измерений в этой области.

В основу создания соответствующих эталонных средств положены физические принципы воспроизведения единиц ОА радона и торона и ППР с поверхности грунта. Воспроизведение осуществляется как физическая реализация единиц

в соответствии с их определением с использованием закона радиоактивного распада применительно к образованию радона и торона в радиоактивных рядах радия и тория [8].

Воспроизведение единицы объёмной активности радона. Образование радона ^{222}Ra происходит в результате распада радионуклида ^{226}Ra в барботере с радиоактивным раствором соли радия. Радон накапливается до состояния радиоактивного равновесия, при котором активности ^{226}Ra и ^{222}Ra становятся равными. Для проведения высокоточных измерений активности ^{222}Ra в барботере используют гамма-спектрометр с полупроводниковым детектором из особо чистого германия, откалиброванный на Государственном первичном эталоне единиц активности радионуклидов, удельной активности радионуклидов потока альфа-, бета-частиц и фотонов радионуклидных источников ГЭТ 6-2016 [9] с относительной расширенной неопределённостью измерения при коэффициенте охвата $k=2$ не более 4 %.

Перевод радона из барботера в референтную ёмкость объёмом $V_0=0,1 \text{ м}^3$ осуществляется через фильтр для очистки радона от дочерних продуктов его распада. Эффективность перевода радона в референтную ёмкость составляет 99,9 %.

Единица ОА радона воспроизводится в референтной ёмкости в соответствии с определением

$$A_{V_{\text{Rn}}} = A_{\text{Rn}}/V_0, \quad (1)$$

где A_{Rn} – активность радона в барботере.

С учётом неопределённостей измерений активности радона в барботере с помощью гамма-спектрометра (2 %) и объёма референтной ёмкости (1,5 %) относительная расширенная неопределённость воспроизведения единицы ОА радона в референтной ёмкости не превышает $U_{\text{Rn}}=5 \%$.

Диапазон воспроизведения единицы ОА радона $10^{-1} \cdot 10^5 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$ обеспечивается применением трёх барботеров с активностью радия в них $10^3 \text{--} 10^7 \text{ Бк}$.

Воспроизведение единицы плотности потока радона с поверхности грунта. При воспроизведении единицы ППР с поверхности грунта поток радона формируется диффузией радона из референтной ёмкости в наполнительную камеру через имитант грунта, который представляет собой кварцевый песок окатанный с гранулометрическим составом (размер зёрен, фракция) 2,0–5,0 мм. Состояние радоновой среды в референтной ёмкости контролируется с помощью измерительного комплекса Альфарад Плюс или аналогичного, используемого в качестве монитора.

Плотность потока радона φ_{Rn} с поверхности грунта определяется измерением ОА радона в накопительной камере [10] объёмом V_k , экспонируемой в течение времени τ , с помощью радиометра радона AlphaGUARD по формуле

$$\varphi_{\text{Rn}} = A_{V_{\text{Rn}}} V_k / (S \tau),$$

где $A_{V_{\text{Rn}}}$ – ОА радона в накопительной камере, измеренная радиометром AlphaGUARD; S – площадь поверхности грунта в накопительной камере.

С учётом неопределённости измерений $A_{V_{\text{Rn}}}=7 \%$ и мониторингирования радоновой среды в референтной ёмкости относительная расширенная неопределённость воспроизведения единицы ППР с поверхности грунта при $k=2$ не превышает 10 %.

Накопление ^{222}Rn в барботере описывается формулой

$$N_{\text{Rn}} = \frac{\lambda_{\text{Ra}}}{\lambda_{\text{Rn}} - \lambda_{\text{Ra}}} N_{\text{Ra}0} (e^{-\lambda_{\text{Ra}} t} - e^{-\lambda_{\text{Rn}} t}) + N_{\text{Rn}} e^{-\lambda_{\text{Rn}} t}, \quad (2)$$

где N_{Rn} – число атомов ^{222}Rn в барботере в момент времени t ; t – время накопления ^{222}Rn в барботере; $\lambda_{\text{Ra}}=1,37372 \cdot 10^{-11} \text{ с}$, $\lambda_{\text{Rn}}=2,09822 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ – постоянные распада соответственно ^{226}Ra и ^{222}Rn (ГСССД 103-02 «Таблицы стандартных справочных данных. Радионуклиды радия-226 в равновесии с дочерними продуктами распада (радон-222, полоний-218, астат-218, полоний-214, полоний-210), урана-233, плутония-238, плутония-239. Период полураспада, энергия и абсолютная вероятность эмиссии альфа-излучения»); $N_{\text{Ra}0}$, $N_{\text{Rn}0}$ – число атомов ^{226}Ra и ^{222}Rn в начальный момент времени $t=0$ соответственно.

Запишем активности ^{222}Rn , ^{226}Ra :

$$A_{\text{Rn}} = \lambda_{\text{Rn}} N_{\text{Rn}}; \quad (3)$$

$$A_{\text{Ra}} = \lambda_{\text{Ra}} N_{\text{Ra}}. \quad (4)$$

С учётом формул (3), (4) формулу (2) для активностей ^{222}Rn и ^{226}Ra перепишем в виде

$$A_{\text{Rn}} = \frac{\lambda_{\text{Rn}}}{\lambda_{\text{Rn}} - \lambda_{\text{Ra}}} A_{\text{Ra}0} (e^{-\lambda_{\text{Ra}} t} - e^{-\lambda_{\text{Rn}} t}) + A_{\text{Rn}0} e^{-\lambda_{\text{Rn}} t}, \quad (5)$$

где A_{Rn} – активность ^{222}Rn в барботере в момент времени t ; $A_{\text{Ra}0}$ – активность ^{226}Ra в барботере в момент времени $t=0$; $A_{\text{Rn}0}$ – активность ^{222}Rn в барботере в момент времени $t=0$.

Объёмная активность ^{222}Rn в референтной ёмкости вычисляется по формуле (1) при $V_0=0,1 \text{ м}^3$.

Результаты расчётов ОА и ППР с поверхности грунта для разных активностей ^{226}Ra в растворе и времён накопления ^{222}Rn в барботере представлены в табл. 1.

Из результатов расчётов следует, что для обеспечения воспроизведения в референтной ёмкости объёмом $0,1 \text{ м}^3$ единицы ОА ^{222}Rn в диапазоне $10 \text{--} 10^5 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$ при времени накопления ^{222}Rn от 10 мин до 5 сут необходимо использовать растворы с активностью радионуклида ^{226}Ra в растворе в диапазоне $7,5 \cdot 10^2 \text{--} 8,0 \cdot 10^4 \text{ Бк}$. Причём для перекрытия всего диапазона необходимо как минимум два раствора с разной активностью радионуклида ^{226}Ra . Для обеспечения воспроизведения в референтной ёмкости объёмом $0,1 \text{ м}^3$ единицы плотности потока ^{222}Rn в диапазоне $10 \text{--} 10^5 \text{ мБк} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ при времени накопления ^{222}Rn от 10 мин до 5 сут необходимо использовать растворы с активностью радионуклида ^{226}Ra в растворе в диапазоне $7,5 \cdot 10^2 \text{--} 8,0 \cdot 10^6 \text{ Бк}$.

Воспроизведение единицы объёмной активности торона. Вследствие малого периода полураспада торона ^{220}Rn ,

Таблица 1

Результаты расчётов ОА и ППР с поверхности грунта в зависимости от активности ^{226}Ra A_{Ra0} в растворе и времени t накопления ^{222}Rn в барботере

A_{Ra0} , Бк	t , с	A_{Rn} , Бк	$A_{V_{\text{Rn}}}$ (0,1 м ³), Бк/м ³	Φ_{Rn} , мБк/(м ² ·с)
$7,5 \cdot 10^2$	3456000 (40 сут)	$7,494 \cdot 10^2$	$7,494 \cdot 10^3$	$1,250 \cdot 10^4$
	432000 (5 сут)	$7,470 \cdot 10^2$	$7,47 \cdot 10^3$	$1,230 \cdot 10^4$
	86400 (1сут)	$7,244 \cdot 10^2$	$7,244 \cdot 10^3$	$1,145 \cdot 10^4$
	43200 (12 ч)	64,990	$6,499 \cdot 10^2$	$6,250 \cdot 10^3$
	3600 (1 ч)	5,644	56,440	$5,246 \cdot 10^2$
	600 (10 мин)	$9,436 \cdot 10^{-1}$	7,436	12,5
$8,0 \cdot 10^4$	3456000 (40 сут)	$7,994 \cdot 10^4$	$7,994 \cdot 10^5$	$7,687 \cdot 10^6$
	432000 (5 сут)	$4,768 \cdot 10^4$	$7,768 \cdot 10^5$	$7,437 \cdot 10^6$
	86400 (1сут)	$1,326 \cdot 10^4$	$1,326 \cdot 10^5$	$1,113 \cdot 10^6$
	43200 (12 ч)	$6,933 \cdot 10^3$	$6,933 \cdot 10^4$	$6,743 \cdot 10^5$
	3600 (1 ч)	$6,020 \cdot 10^2$	$6,020 \cdot 10^3$	$5,886 \cdot 10^4$
	600 (10 мин)	$1,007 \cdot 10^2$	$1,007 \cdot 10^3$	$8,870 \cdot 10^3$

составляющего 55,6 с, воспроизведение единицы ОА торона должно производиться в динамическом режиме с выполнением измерений непосредственно в процессе генерации торона [11–13]. Торон генерируется как эманация при радиоактивном распаде ^{228}Th , используемого в виде твердотельного радионуклидного источника в эманационной камере.

Среда для воспроизведения единицы ОА торона формируется в потоке воздуха, контролируемо прокачиваемого через эманационную камеру объёмом $V_{\text{э.к}}$ с постоянным объёмным расходом.

Единица ОА торона воспроизводится в соответствии со следующим соотношением:

$$A_{V_{\text{Tn}}} = A(\text{Ra224})\alpha/V_{\text{э.к}},$$

где $A_{V_{\text{Tn}}}$ – объёмная активность торона; $A(\text{Ra224})$ – активность ^{224}Ra в радионуклидом источнике (материнский нуклид для образования торона); α – коэффициент эманирования торона из твердотельного источника.

Для измерения активности ^{224}Ra необходимо применение гамма-спектрометра, откалиброванного с относительной расширенной неопределённостью измерений при $k=2$, не превышающей 4 %.

Для измерения объёмного расхода воздуха необходимо применение цифрового расходомера, откалиброванного с относительной расширенной неопределённостью измерений при $k=2$, не превышающей 1 %.

Коэффициент эманирования определяется по результатам измерений активности радионуклида ^{212}Pb , являющегося продуктом распада торона, по формуле

$$\alpha = \frac{A(\text{Ra224}) - A(\text{Pb212})}{A(\text{Ra224})} = 1 - \frac{A(\text{Pb212})}{A(\text{Ra224})}.$$

С учётом схем распада измерение активностей ^{212}Pb и ^{224}Ra сводится к относительным измерениям, расширенная неопределённость которых не превышает 1 % при $k=2$.

Таким образом, относительная расширенная неопределённость воспроизведения единицы ОА торона в воздушном потоке не должна превышать 5 %.

Накопление ^{220}Rn (Тн) в эманационной камере с источником тория описывается формулой, аналогичной для ^{222}Rn :

$$N_{\text{Tn}} = \frac{\lambda_{\text{Tn}}}{\lambda_{\text{Tn}} - \lambda_{\text{Th}}} N_{\text{Th0}} (e^{-\lambda_{\text{Th}} t} - e^{-\lambda_{\text{Tn}} t}) + N_{\text{Tn0}} e^{-\lambda_{\text{Tn}} t}, \quad (6)$$

где N_{Tn} – число атомов ^{220}Rn (Тн) в эманационной камере в момент времени t ; $\lambda_{\text{Th}} = 1,56997 \cdot 10^{-18}$ с, $\lambda_{\text{Tn}} = 1,24667 \cdot 10^{-2}$ с – постоянные распада ^{232}Th и ^{220}Rn (Тн), соответственно; N_{Th0} , N_{Tn0} – число атомов ^{232}Th и ^{220}Rn (Тн) в начальный момент времени $t=0$; t – время накопления ^{220}Rn (Тн) в герметичном боксе.

Запишем активности ^{220}Rn (Тн) и ^{232}Th :

$$A_{\text{Tn}} = \lambda_{\text{Tn}} N_{\text{Tn}}; \quad (7)$$

$$A_{\text{Th}} = \lambda_{\text{Th}} N_{\text{Th}}. \quad (8)$$

С учётом формул (7), (8) формула (6) для активностей ^{222}Rn и ^{226}Ra преобразуется в

$$A_{\text{Tn}} = \frac{\lambda_{\text{Tn}}}{\lambda_{\text{Tn}} - \lambda_{\text{Th}}} A_{\text{Th0}} (e^{-\lambda_{\text{Th}} t} - e^{-\lambda_{\text{Tn}} t}) + A_{\text{Tn0}} e^{-\lambda_{\text{Tn}} t},$$

где A_{Tn} – активность ^{220}Rn (Тн) в эманационной камере в момент времени t ; A_{Th0} , A_{Tn0} – активности ^{232}Th и ^{220}Rn (Тн) в герметичном боксе в момент времени $t=0$.

Период полураспада ^{220}Rn (Тн) очень мал по сравнению с периодом полураспада ^{222}Rn . Накопление торона из ^{232}Th до равновесного состояния происходит очень быстро, через 10 мин накапливается 99,9 % ^{220}Rn (Тн) от его равновесного количества. Соответственно, быстро происходит и распад ^{220}Rn (Тн): за 2,5 с распадается 3,0 % ^{220}Rn (Тн), а за 10 мин происходит практически его полный распад – 99,9%. Для ^{222}Rn накопление до 99,9% от равновесного количества происходит за 40 сут, но и распадается он медленно, за 4 ч распадается 3,0 % ^{222}Rn , а за 1 ч – менее 1 %.

Для воспроизведения единицы ОА ^{220}Rn (Тн) во всём диапазоне измерений $10-10^5$ Бк·м⁻³ метод воспроизведения, используемый для единицы ОА ^{222}Rn , неприменим из-за малого периода полураспада ^{220}Rn (Тн) и вследствие этого больших погрешностей при воспроизведении единицы. Поэтому для обеспечения воспроизведения единицы ОА ^{220}Rn (Тн) с погрешностью не больше, чем для ^{222}Rn , авторы предлагают метод, описанный далее.

Метод генерирования торона в герметичном боксе. В герметичном боксе для генерации торона с радиоактивным

Таблица 2

Результаты расчётов при активностях ^{232}Th в источнике $7,5 \cdot 10^2$ Бк и $8,0 \cdot 10^6$ Бк и времени накопления $t=10$ мин (600 с)

A_{Th0} , Бк	A_{Th} , Бк	$A_{V_{\text{Tn}}}$, Бк/м ³
$7,5 \cdot 10^2$	$8,976 \cdot 10^{-1}$	5,765
$8,0 \cdot 10^6$	$9,975 \cdot 10^2$	$9,975 \cdot 10^4$

источником с солью тория с радионуклидом ^{232}Th накапливается ^{220}Rn (Тн). Накопление, как было описано выше, происходит очень быстро, в течение 10 мин. Накопленный ^{220}Rn (Тн) прокачивается из герметичного бокса через накопительную камеру радиометра. Прокачка происходит с постоянным и контролируемым объёмным расходом.

Результаты расчётов для разных активностей ^{232}Th в источнике и в герметичном боксе представлены в табл. 2.

Из результатов расчётов следует, что для обеспечения воспроизведения в герметичном боксе единицы ОА ^{220}Rn (Тн) в диапазоне $10\text{--}10^5$ Бк·м⁻³ необходимо использовать источники с активностью радионуклида ^{232}Th $7,5 \cdot 10^2\text{--}8,0 \cdot 10^6$ Бк.

Сравнение современных измерительных возможностей национальных метрологических институтов ведущих стран при измерениях ОА радона представлены в табл. 3, где U_p – относительная расширенная неопределённость измерений.

Закключение. Изложенный в статье подход позволяет определить конструктивные, структурные и другие технические решения, являющиеся основой для создания эталонных средств воспроизведения единиц ОА радона и торона и ППР с поверхности грунта. Создание эталонных средств и технологии воспроизведения и передачи единиц ОА радона и торона и ППР с поверхности грунта позволит обеспечить:

повышение конкурентоспособности российских производителей радиометров радона и торона в сравнении с мировыми аналогами (в основном производства Германии и США) за счёт соотношения цена/качество;

калибровочные и измерительные возможности страны в части воспроизведения единицы ОА альфа-активных газов радона ^{222}Rn и торона ^{220}Rn на уровне национальных эталонов ведущих метрологических институтов мира;

возможность сличения с национальными эталонами других стран, что будет способствовать повышению престижа России в области метрологии;

прослеживаемость результатов измерений ОА радона и торона и ППР с поверхности грунта;

уменьшение систематических погрешностей при измерениях ОА радона и торона и ППР, что напрямую скажется на результатах оценки дозовых нагрузок, обусловленных

Таблица 3

Сравнение измерительных возможностей при измерениях объёмной активности ^{222}Ra

Национальный метрологический институт	Реализуемый метод измерения	Диапазон измерений, Бк/м ³	U_p ($k=2$), %
ВНИИФТРИ, Россия	Радиометр радона	$10^2\text{--}6 \cdot 10^3$	10
BEV (Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen), Austria	Радиометр радона	$10\text{--}10^5$	10
NSC IM (National Scientific Centre «Institute of Metrology»), Ukraine	Ионизационная камера	$10^2\text{--}10^4$	5
LNE (Laboratoire national de métrologie et d'essais), France	Установка с известным телесным углом	$10^6\text{--}10^7$	2,2
PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt), Germany	Установка с известным телесным углом	$10^3\text{--}10^5$	2,5
NMIJ (National Metrology Institute of Japan), Japan	Пропорциональный счётчик	$10^7\text{--}4 \cdot 10^{11}$	3
NIM (National Institute of Metrology), China	Ионизационная камера	$10^7\text{--}4 \cdot 10^{10}$	3
CMI (Czech Metrology Institute), Czech Republic	Раствор с ^{226}Ra	$3 \cdot 10^5\text{--}2 \cdot 10^6$	4
KRISS (Korea Research Institute of Standards and Science), Republic of Korea	Раствор с ^{226}Ra	$5 \cdot 10^3\text{--}5 \cdot 10^6$	2

радоном, на население и будет способствовать обеспечению здоровья граждан, безопасных условий труда персонала и т. п.

Список литературы

1. Турмарш М., Харрисон Дж. Д., Лурье Д., Пак Ф., Бланшардон Е., Марш Дж. В. Риск возникновения рака легкого при облучении радоном и продуктами его распада. Заявление по радону / Под ред. М. В. Жуковского, С. М. Киселева, А. Т. Губина; пер. публикации 115 МКРЗ. М.: ГНЦ ФМБЦ им. А. И. Бурназяна ФМБА России, 2013. 92 с.
2. Лекомте Ж.-Ф., Соломон С., Такала Дж., Юнг Т., Странд П., Мюрит К., Киселев С., Жуо В., Шеннон Ф., Янсенс А. Радиологическая защита от облучения радоном / Под ред. М. В. Жуковского, И. В. Ярмошенко, С. М. Киселева; пер. публикации 126 МКРЗ. М.: ГНЦ ФМБЦ им. А. И. Бурназяна ФМБА России, 2015. 92 с.
3. Маренный А. М. Измерение объёмной активности радона трековым методом // АНРИ. 1995. № 3–4. С. 79–84.
4. Жуковский М. В., Екидин А. А., Грачева А. В. и др. Измерение Rn-220 в атмосфере: метрология и практическая реализация // АНРИ. 2010. № 1 (60). С. 37–42.
5. Kim B. C., Lee K. B., Park T. S., Lee J. M., Lee S. H., Oh P. J., Lee M. K., Ahn J. K., Appl. Radiat. Isot., 2012, vol. 70, pp. 1934–1939. DOI:10.1016/j.apradiso.2012.02.020

6. Dersch R., *Appl. Radiat. Isot.*, 2004, vol. 60, pp. 387–390. DOI:10.1016/j.apradiso.2003.11.046

7. Spring P., Nedjadi Y., Bailat C., Triscone G., Bochud F., *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res.*, 2006, no. A568, pp. 752–759. DOI:10.1016/j.nima.2006.07.055

8. Mostafa M. Y. A., Vasyanovich M., Zhukovsky M., *Appl. Radiat. Isot.*, 2016, vol. 107, pp. 109–112. DOI: 10.1016/j.apradiso.2016.12.012

9. Алексеев И. В., Заневский А. В., Жуков Г. В., Моисеев Н. Н., Сепман С. В., Терещенко Е. Е., Трофимчук С. Г., Харитонов И. А., Шильникова Т. И. Государственный первичный эталон единиц активности радионуклидов, удельной активности радионуклидов, потока альфа-, бета-частиц и фотонов радионуклидных источников ГЭТ 6-2016 // Измерительная техника. 2019. № 8. С. 3–7. DOI: 10.32446/0368-1025it.2019-8-3-7

10. Яковлева В. С. Методы измерения плотности потока радона и торона с поверхности пористых материалов: монография. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. 174 с.

11. Röttger A., Honig A., *Radiat. Prot. Dosimetry*, 2011, vol. 145, no. 2–3, pp. 260–266. DOI: 10.1093/rpd/ncr047

12. Röttger A., Honig A., Dersch R. et al., *Appl. Radiat. Isot.*, 2010, vol. 68, pp. 1292–1296. DOI: 10.1016/j.apradiso.2010.01.004

13. Sabot B., Pierre S., Cassette P. et al., *Radiat. Prot. Dosimetry*, 2015, vol. 167, no 1–3, pp. 70–74. DOI: 10.1093/rpd/ncv221

References

1. ICRP, 2010. Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon. ICRP Publication 115. Ann. ICRP 40 (1). DOI: 10.1016/j.icrp.2011.08.011

2. ICRP, 2014. Radiological protection against radon exposure. ICRP Publication 126. Ann. ICRP 43(3).

3. Marenniy A. M., *ANRI*, 1995, no. 3–4, pp. 79–84 (in Russian).

4. Zhukovsky M.V., Ekidin A.A., Gracheva A.V. et al., *ANRI*, 2010, no. 1 (60), pp. 37–42 (in Russian).

5. Kim B. C., Lee K. B., Park T. S., Lee J. M., Lee S. H., Oh P. J., Lee M. K., Ahn J. K., *Appl. Radiat. Isot.*, 2012, vol. 70, pp. 1934–1939. DOI:10.1016/j.apradiso.2012.02.020

6. Dersch R., *Appl. Radiat. Isot.*, 2004, vol. 60, pp. 387–390. DOI:10.1016/j.apradiso.2003.11.046

7. Spring P., Nedjadi Y., Bailat C., Triscone G., Bochud F., *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res.*, 2006, no. A568, pp. 752–759. DOI:10.1016/j.nima.2006.07.055

8. Mostafa M.Y.A., Vasyanovich M., Zhukovsky M., *Appl. Radiat. Isot.*, 2016, vol.107, pp. 109–112. DOI: 10.1016/j.apradiso.2016.12.012

9. Alekseev I. V., Zanevskii A. V., Zhukov G. V., Moiseev N. N., Sepman S. V., Tereshchenko E. E., Trofimchuk S. G., Kharitonov I. A., Shil'nikova T. I., *Measurement Techniques*, 2019, no. 8, pp. 3–7. DOI: 10.1007/s11018-019-01675-1

10. Yakovleva V. S. *Metody izmereniya plotnosti potoka radona i torona s poverhnosti poristyh materialov: monographiya*, Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2011, 174 p. (in Russian).

11. Röttger A., Honig A., *Radiat. Prot. Dosimetry*, 2011, vol. 145, no. 2–3, pp. 260–266. DOI: 10.1093/rpd/ncr047

12. Röttger A., Honig A., Dersch R. et al., *Appl. Radiat. Isot.*, 2010, vol. 68, pp. 1292–1296. DOI: 10.1016/j.apradiso.2010.01.004

13. Sabot B., Pierre S., Cassette P. et al., *Radiat. Prot. Dosimetry*, 2015, vol. 167, no 1–3, pp. 70–74. DOI: 10.1093/rpd/ncv221

Дата поступления: 25.09.2019.

Дата принятия: 04.10.2019.

Status and development prospects of standard means for reproducing units of volumetric activity of radon and thoron and radon flux density from the soil surface

Sergey G. Birjukov, Oleg I. Kovalenko, Alexandr A. Orlov

Russian metrological institute of technical physics and radio engineering (VNIIFTRI), Mendeleev, Moscow Region, Russian Federation, e-mail: sgbir@vniiftri.ru, koi@vniiftri.ru, orlov_aa@vniiftri.ru

The approach to creating standard means for reproducing units of volumetric activity of radon and thoron and flux density of radon from the soil surface is described based on the physical principles of reproducing these units of quantities and using as technical means for reproducing bubblers with a radioactive solution of radium salt, reference capacities of known volume, emanation chambers for generation of a thoron, a gamma spectrometer with a semiconductor detector from highly pure germanium and radon radiometers. Reproduction consists in the physical realization of units in accordance with their definition as applied to the formation of radon and thoron in the radioactive rows of radium and thorium. The proposed approach will allow to determine the structural, structural and other technical solutions of standard measuring instruments, as well as specific techniques and methods of working with them. The creation of standard tools and technologies for reproducing units of volumetric activity of radon and thoron and the density of radon flux from the soil surface will ensure the unity and reliability of measurements in the field of ionizing radiation, traceability of units and bringing the characteristics of national standards in line with world achievements.

Key words: radon, thoron, volumetric activity, radon flux density, reference capacity, bubbler, emanation chamber, airtight box.

ОРГАНИЗАТОРЫ СИМПОЗИУМА

- Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт)
- Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений (ФГУП «ВНИИФТРИ»)
- ЗАО «Время-Ч»
- ООО Научно-технический центр «НАВИТЕСТ» (Техническое обеспечение и организация проведения симпозиума)

НАПРАВЛЕНИЯ РАБОТЫ СИМПОЗИУМА

1. Службы и эталоны времени и частоты.

- 1.1. Службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли.
- 1.2. Эталоны времени и частоты.
- 1.3. Шкалы времени.
- 1.4. Измерения времени и частоты в оптике.

2. Глобальные навигационные спутниковые системы.

- 2.1. Метрологическое обеспечение ГЛОНАСС и ГНСС.
- 2.2. Бортовые стандарты частоты ГНСС.
- 2.3. Имитаторы сигналов ГЛОНАСС и ГНСС.
- 2.4. Приемники сигналов ГЛОНАСС и ГНСС

3. Средства измерений времени, частоты и длины и их применение.

- 3.1. Метрологическое обеспечение средств измерений времени, частоты, длины, координат, а также специализированной частотно-временной аппаратуры.
- 3.2. Передача сигналов частоты и времени по различным каналам связи.
- 3.3. Калибровка и сертификация средств измерений времени, частоты, длины.
- 3.4. Приложения прецизионных частотно-временных измерений в фундаментальных и прикладных исследованиях.

ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА СИМПОЗИУМА

По результатам работы симпозиума лучшие доклады будут рекомендованы к опубликованию в журналах «Измерительная техника», «Вестник метролога» и «Геопрофи», входящих в перечень ВАК.

АДРЕС ОРГКОМИТЕТА

141570, Московская обл., Солнечногорский р-н, р.п. Менделеево,
ФГУП «ВНИИФТРИ»
e-mail: symposium@vniiftri.ru

WWW.VNIIFTRI.RU

WWW.NTC-NAVITEST.RU



ФОРУМ И ВЫСТАВКА МЕТРОЛЭКСПО 20-22 мая 2020

 **КРОКУС ЭКСПО**
Международный выставочный центр

организаторы

 **МИНПРОМТОРГ
РОССИИ**

 **РОССТАНДАРТ**
Федеральное агентство
по техническому регулированию
и метрологии

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ИННОВАЦИОННЫЙ ФОРУМ И ВЫСТАВКА, ПРИУРОЧЕННЫЕ К ВСЕМИРНОМУ ДНЮ МЕТРОЛОГИИ. 20-22 МАЯ 2020 ГОДА, МВЦ «КРОКУС ЭКСПО»

ОРГАНИЗАТОРЫ - Минпромторг России и Росстандарт
при поддержке **Правительства Российской Федерации**

В ДЕЛОВОЙ ПРОГРАММЕ МЕТРОЛЭКСПО 2020

- Панельная дискуссия с участием руководства Минпромторга России и Росстандарта
- Открытые дискуссии в формате круглых столов по темам метрологического обеспечения нацпроектов, цифровой метрологии, законодательным новациям в области обеспечения единства измерений, импортозамещению
- Всероссийский съезд приборостроителей и метрологов

НА ТЕРРИТОРИИ ВЫСТАВОЧНОЙ ЧАСТИ МЕТРОЛЭКСПО 2020:

- Новейшие отечественные и зарубежные образцы и разработки в области приборостроения
- Уникальные установки, технологии и сервисы, созданные научными метрологическими институтами и центрами стандартизации, метрологии и испытаний системы Росстандарта, а также ведущими отечественными и зарубежными предприятиями

РЕГИСТРАЦИЯ УЧАСТНИКОВ

ПРИЕМ ЗАЯВОК до 1 марта 2020 года по адресу: forum2020@vniims.ru

Информация об участии: **8 (495) 437 40 61**

Подробности на **www.vniims.ru**

Официальный оператор Форума и Выставки ФГУП ВНИИМС

vniims.ru


ВНИИМС