

ВМ 2/2025 (Основан в 2005 году)

ВЕСТНИК МЕТРОЛОГА

Научно-технический журнал
Решением ВАК от 18.12.2017 года
включен в «Перечень рецензируемых
научных изданий, в которых должны
быть опубликованы основные научные
результаты диссертаций на соискание
ученой степени кандидата наук, на
соискание ученой степени доктора наук»
(«Перечень...» от 25.12.2017 г. за № 2210).

Учредитель и издатель

Федеральное государственное
унитарное предприятие «Всероссийский
научно-исследовательский
институт физико-технических и
радиотехнических измерений»

Почтовый адрес:

п/о Менделеево, Солнечногорский
район, Московская область, 141570

Редакционный совет:

И.Ю. Блинов, доктор технических наук.
В.А. Вышков, доктор технических наук
профессор.
С.С. Голубев, кандидат технических наук
О.В. Денисенко, доктор технических наук.
Ю.А. Клейменов, доктор технических наук
Д.А. Кузнецов
И.М. Малай, доктор технических наук.
Б.А. Сахаров, доктор технических наук.
Ф.И. Храпов, доктор технических наук.
В.В. Швыдун, доктор технических наук.
А.Н. Щипунов, доктор технических наук

Главный редактор

В.Н. Храменков, доктор технических
наук, профессор

Заместитель главного редактора

О.В. Надеина, кандидат педагогических
наук

В подготовке номера участвовали:

Адрес редакции: 141006, г. Мытищи
Московской обл., Олимпийский проспект,
здание 12, строение 1, оф. 404

Адрес для переписки, размещения
рекламы и приобретения журнала
«Вестник метролога»:
п/о Менделеево, Солнечногорский
район, Московская область, 141570
Тел./факс (495) 586–23–88; (495) 580-35-66.
E-mail: 32gnii_vm@mail.ru; vm@vniiftri.ru

Отпечатано ООО «ПРИНТ»

Юридический адрес: 125413, Россия,
г. Ижевск,

Сдано в набор 21.04.2025

Подписано в печать 29.04.2025

Тираж 300 экз.

Зарегистрирован ISSN 2413–1806 в Федеральной службе
по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых
коммуникаций. Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС 77- 60016 от 21 ноября 2014 г.

Материалы журнала размещаются на сайте Научной
электронной библиотеки и включаются в национальную
информационно-аналитическую систему РИНЦ

СОДЕРЖАНИЕ

Общие вопросы метрологии

Храменков В.Н., д.т.н., профессор, ФГБУ «ГНМЦ»

Минобороны России, Никитина И.А., к.т.н., ФГБУ «ГНМЦ»
Минобороны России

Цифровизация контрольно-надзорной деятельности в
сфере государственного регулирования обеспечения
единства измерений 3

Кувыкин Ю.А., к.т.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России,
Супрунук В.В., д.т.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России,
Информативность определения параметров акустических
полей объектов 10

Частотно-временные измерения

Фокин А.П., к.т.н., ВУНЦ ВВС «ВВА им. профессора

Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Фокина Н.Е.,

ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России,

Частотная синхронизация базовых станций современных
беспроводных цифровых сетей связи по волоконно-
оптическим линиям связи 16

Мазуркевич А.В., ФГУП «ВНИИФТРИ»

Метод калибровки авиационных лазерных координатно-
измерительных сканирующих систем на основе
использования трёхмерных эталонных построений
(«тест-объектов») 22

Оптические и оптико-физические измерения величин

Шагаев В.Г., научный сотрудник ФГБУ «ГНМЦ»

Минобороны России

Оптимизация характеристик спектрального интервала
монохроматора 29

Михайлов Д.Б., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России

Математическая модель эталонных радиолокационных
отражателей, применяемых для измерений эффективной
площади рассеяния в резонансной области частот 33

Надеина О.В., к.п.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России,

Руденкова Е. Г., к.т.н., доцент, ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны
России

Новые проектные решения и способы их применения на
современном этапе в области лазерной, оптической и
оптоэлектронной техники предприятий России 36

Новинки измерительной техники обложка

VM 2/2025

Research magazine «Vestnik Metrologa»
«Vestnik Metrologa» magazine is published
and extends in Russian since 2005

«Vestnik Metrologa»

Scientific and technical journal

By the solution of VAK of 18.12.2017 it is
included in «The list of the reviewed
scientific

publications in which have to be the main
scientific results of theses for a degree of
the candidate of science, for a degree of the
doctor of science are published» («List»...
of 25.12.2017 for No. 2210).

FSUE VNIIFTRI Russian Metrological
Institute of Technical Physics and
Engineering You are: Publisher

Address: 141570, Moscow region,
Solnechnogorsk district., Township
Mendeleevo

The Editorial advice:

I.Y. Blinov, doctor of the technical sciences.
sciences.

V.A. Vyshlov, doctor of the technical
sciences, professor.

S.S. Golubev, candidate of the technical
sciences

O.V. Denisenko, doctor of the technical
sciences.

Y.A. Kleymentov, doctor of the technical
sciences

D.A. Kuznetsov

I.M. Malai, doctor of the technical sciences.

B.A. Saharov, doctor of the technical
sciences.

F.I. Hrapov, doctor of the technical
sciences.

V.V. SHvydun, doctor of the technical
sciences,

A.N. Shchipunov, doctor of the technical
sciences.

Editor-in-chief

V.N. Khramenkov, doctor of the technical
sciences, professor

Deputy main of the editor

O.V. Nadeina, candidate of the pedagogical
sciences

Address to editings: 141006, Mytisch
Moscow obl., Olympic avenue, possession
12, construction 1

Address: 141570, Moscow region,
Solnechnogorsk district., Township
Mendeleevo

telephone/fax (495) 586-01-00;

(495) 586-23-88.

E-mail: 32gnii_vm@mail.ru

It is Printed by OOO «Print»

Legal address: 426035, Russia, Izhevsk,
Timiryazeva st., 5.

telephone (3412) 56-95-53

The Circulation

300 copies

ISSN 2413–1806 Are Registered

in Federal service on control in sphere relationship, information
technology and mass communication. Certificate about registrations PI
№ FS77–60016 from November 21, 2014 Material of the journal take
seats on put Scientific electronic library and are included in national
information-analytical system RINC

CONTENTS

Common questions of a metrology

Khramenkov V.N., d.t.s., FSBI «MSHC» of Russian Federation

Ministry of Defense, Nikitina I.A., k.t.s., FSBI «MSHC» of the

Ministry of Defense of the Russian Federation

Digitalization of control activities in the state regulation to ensure
uniformity of measurements 3

Kuvykin Yu.A., k.t.s., Suprunyuk V.V., d.t.s.,

FSBI «MSHC» of Russian Federation Ministry of Defense

Informativnosti determinations parameter by acoustic flap object . . . 10

Time-frequency measurements

Fokin A.P., Military and Air academy of Zhukovsky and

Gagarin (VUNTs Air Force «VVA »), Fokina N.E., Senior

Research Officer, Federal State Budgetary Institution «Main

Scientific Metrological Center» of the Ministry of Defense of the
Russian Federation

Frequency synchronization of base stations of modern wireless
digital communication networks over fiber-optic communication

lines 16

Mazurkevich A.V., FSUE «VNIIFTRI» (Russian Metrological

Institute of Technical Physics and Engineering)

A method for calibrating aviation laser coordinate measuring
scanning systems based on the use of three-dimensional

reference constructions («test objects») 22

Optic and optic-physical measurements

Shagaev V.G., research associate of the Federal State

Budgetary Institution «GNMC» of the Russian Ministry of Defense

Suggestions for optimizing the characteristics of the spectral
range of the monochromator 29

Mikhaylov D.B., FSBI «MSHC» of Russia Federation Ministry
of Defense

A mathematical model of reference radar reflectors used to
measure the effective scattering area in the resonant frequency

domain 33

Nadeina O.V., k.p.s., FSBI «MSHC» of the Ministry of Defense

of the Russian Federation, Rudenkova E.G., c.t.s., FSBI

«MSHC» of the Ministry of Defense of the Russian Federation

The new design decisions and ways their efficient using on
modern stage in the field of lazer, optical and optic-physical

technology of the leading enterprise to Russia 36

ЦИФРОВИЗАЦИЯ КОНТРОЛЬНО-НАДЗОРНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В СФЕРЕ ГОСУДАРСТВЕННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

DIGITALIZATION OF CONTROL ACTIVITIES IN THE STATE REGULATION TO ENSURE UNIFORMITY OF MEASUREMENTS

Храменков В.Н., д.т.н., профессор, Никитина И.А., к.т.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России
Khramenkov V.N., d.t.s., professor, Nikitina I.A., k.t.s., FSBI «MSMC» of the Ministry of Defense of the Russian Federation
e-mail: hvn2012@mil.ru
тел. 7(495) 586-23-88 ;
e-mail: nikitina-irina78
тел. 7(495) 223-69-92

Аннотация: В статье приведен обзор основных элементов информационных систем контрольных органов, включая сведения об обязательных требованиях, оценка выполнения которых проводится в рамках федерального государственного метрологического контроля. Анализ формулировок обязательных требований, внесенных в информационную систему, показал отсутствие взаимосвязи с установленным в Федеральном законе об обеспечении единства измерений дифференцированием обязательных требований (выделения из обязательных требований – метрологических) с целью установления границ сферы государственного регулирования, что перспективно расширяет ее на все виды экономической деятельности, а не только определенные в законе.

Annotation: The article provides an overview of information systems elements and information about mandatory requirements related to federal state metrological control. Analysis of mandatory requirements showed no relationship with mandatory metrological requirements establishing the boundaries of state regulation.

Ключевые слова: федеральный государственный метрологический контроль, информационная система, реестр обязательных требований, метрологические требования.

Keywords: federal state metrological control, information system, register of mandatory requirements, metrological requirements.

Начатая в 2019 году реформа контрольно-надзорной деятельности нацелена на создание в России эффективной системы государственного контроля (надзора) на основе риск-ориентированного подхода, при котором частота проверок и используемые ресурсы должны быть пропорциональны уровню риска нанесения ущерба охраняемым законом ценностям.

Принятие в 2020 году двух Федеральных законов [1, 2] обеспечило развитие информационных систем (ИС) контрольных органов, формирование единой модели данных в сфере контроля, систематизации обязательных требований. В 2023 году утверждена Концепция совершенствования контрольной (надзорной) деятельности до 2026 года [3], в которой значительное место отводится развитию цифровизации контрольной деятельности в части совершенствования отдельных функций существующих ИС, перевода цифрового контура ИС на единую цифровую платформу Российской Федерации «Гостех».

В настоящее время функционируют и используются в контрольно-надзорной деятельности сле-

дующие основные ИС: Единый реестр контрольных (надзорных) мероприятий; Единый реестр видов контроля; Реестр обязательных требований.

В статье рассматриваются ИС и их структура (таблица 1) по одному из видов контроля – федеральному государственному метрологическому контролю (надзору) и в части внесенных в Реестр обязательных требований, установленных в области государственного регулирования обеспечения единства измерений Федеральным законом «Об обеспечении единства измерений» [4] и связанных подзаконных актов [5–8].

Во всех ИС для целей осуществления государственного контроля (надзора) используются сведения об обязательных требованиях из Реестра обязательных требований, который содержит, в том числе, информацию об нормативных правовых актах, установивших требование, сроке их действия.

Обязательные требования, в части касающейся, включены в «Руководство по соблюдению обязательных требований, оценка соблюдения которых осуществляется в рамках федерального государственного метрологического контроля (надзора)»¹

¹ Утверждено руководителем Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии 14 августа 2023 г.

разработанного с целью информирования контролируемых лиц и предупреждения нарушений.

Результаты анализа структуры Реестра обязательных требований, оценка выполнения кото-

рых проводится в рамках федерального государственного метрологического контроля (надзора), представлены в таблицах 2, 3.

Таблица 1 – Элементы структуры информационных систем в части государственного регулирования области обеспечения единства измерений

Наименование ИС, официальный сайт в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»
Единый реестр контрольных (надзорных) мероприятий (ЕРКНМ), адрес: https://proverki.gov.ru
Правовая основа, оператор
НПА: Федеральный закон от 31.07.2020 № 248-ФЗ «О государственном контроле (надзоре) и муниципальном контроле в Российской Федерации». Постановление Правительства Российской Федерации от 16.04.2021 № 604 «Об утверждении Правил формирования и ведения единого реестра контрольных (надзорных) мероприятий и о внесении изменения в постановление Правительства Российской Федерации от 28 апреля 2015 г. № 415». Оператор ИС: Генеральная прокуратура Российской Федерации.
Цель создания
Информационное обеспечение государственного контроля (надзора), муниципального контроля.
Наименование ИС, официальный сайт в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»
Единый реестр видов контроля (подсистема федеральной государственной информационной системы «Федеральный реестр государственных и муниципальных услуг (функций)») адрес: https://ervk.gov.ru
Правовая основа и оператор
НПА: Федеральный закон от 31.07.2020 № 248-ФЗ «О государственном контроле (надзоре) и муниципальном контроле в Российской Федерации». Постановление Правительства РФ от 24.10.2011 N 861 «О федеральных государственных информационных системах, обеспечивающих предоставление в электронной форме государственных и муниципальных услуг (осуществление функций)». Оператор ИС: Минэкономразвития России. Оператор в части касающейся: федеральный орган исполнительной власти, осуществляющий функции по выработке государственной политики и нормативно-правовому регулированию в области государственного контроля (надзора) и муниципального контроля (Минпромторг России).
Цель создания
Информационное обеспечение организации и осуществления государственного контроля (надзора), муниципального контроля, систематизации и учета сведений, обмен которыми осуществляется в рамках государственного контроля (надзора), муниципального контроля, обеспечения открытости осуществления указанной деятельности контрольными (надзорными) органами.
Вид и предмет контроля, контрольный (надзорный) орган
Федеральный государственный метрологический контроль (надзор), Росстандарт. Соблюдение юридическими лицами, индивидуальными предпринимателями обязательных требований в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, установленных Федеральным законом об обеспечении единства измерений и принимаемыми в соответствии с ним иными нормативными правовыми актами [4].
Наименование ИС, официальный сайт в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»
Реестр обязательных требований адрес: https://ot.gov.ru

Правовая основа и оператор			
НПА: Федеральный закон от 31.07.2020 № 247-ФЗ «Об обязательных требованиях в Российской Федерации». Постановление Правительства РФ от 06.02.2021 № 128 «Об утверждении Правил формирования, ведения и актуализации реестра обязательных требований» (вместе с «Планом-графиком формирования реестра обязательных требований»).			
Постановление Правительства Российской Федерации от 22.10.2020 № 1722 «О размещении и актуализации на официальных сайтах органов государственной власти, осуществляющих государственный контроль (надзор), предоставление лицензий и иных разрешений, аккредитацию, перечней нормативных правовых актов (их отдельных положений), содержащих обязательные требования».			
Оператор ИС: Минцифры России (осуществляет техническую поддержку). Минэкономразвития России осуществляет методическую поддержку наполнения Реестра данными.			
Цель создания			
Обеспечение систематизации обязательных требований, проверка которых происходит при осуществлении государственного контроля или разрешительной деятельности. Информация, вносимая в Реестр, необходима для формирования мастер-данных при использовании цифровой экосистемы контрольной (надзорной) деятельности и последующего информирования об обязательных требованиях граждан, предпринимателей и представителей органов исполнительной власти.			
Орган, осуществляющий федеральный государственный метрологический контроль; вид государственного контроля (надзора)			
Росстандарт; федеральный государственный метрологический контроль (надзор)			
Общероссийский классификатор видов экономической деятельности (ОКВЭД)			
00 Все виды экономической деятельности (71.12.62 в области метрологии)			
Требование (количество)			
687			
Объект, к которому предъявляется требование			
Деятельность	Результаты деятельности/действий	Лица	Объекты
Требование (количество)			
78	12	9	588
Акт, устанавливающий требование			
Федеральный закон «Об обеспечении единства измерений». Приказ Минпромторга России от 31.07.2020 № 2510 [5]. Приказ Минпромторга России от 28.08.2020 № 2905 [6].	Федеральный закон «Об обеспечении единства измерений». Статьи: 5 (часть 2), 6 (часть 1), 7 (часть 7.1), 8 (часть 2), 12 (часть 3,4,6), 13 (пункт 4)	Федеральный закон «Об обеспечении единства измерений». Постановление Правительства РФ от 16.07.2009 № 584 [7].	Федеральный закон «Об обеспечении единства измерений». Постановление Правительства РФ от 16.11.2020 № 1847 [8].

Таблица 2 – Структура Реестра обязательных требований, оценка выполнения которых проводится в рамках федерального государственного метрологического контроля (надзора)

Реестр обязательных требований адрес: https://ot.gov.ru			
Росстандарт, федеральный государственный метрологический контроль (надзор)			
Общероссийский классификатор видов экономической деятельности (ОКВЭД)			
00 Все виды экономической деятельности (71.12.62 в области метрологии)			
Требование (количество)			
687			

Акт, устанавливающий требование																			
Федеральный закон «Об обеспечении единства измерений»				Постановление Правительства РФ от 16.07.2009 № 584 [7]				Постановление Правительства РФ от 16.11.2020 № 1847 [8]				Приказ Минпромторга России от 31.07.2020 № 2510 [5]				Приказ Минпромторга России от 28.08.2020 № 2905 [6]			
Требование (количество)																			
25*				4				588				62				9			
Объект, к которому предъявляется требование																			
Деятельность (Д). Результаты деятельности/действий (Р). Лица (Л). Объекты (О).																			
Д.	Р.	Л.	О.	Д.	Р.	Л.	О.	Д.	Р.	Л.	О.	Д.	Р.	Л.	О.	Д.	Р.	Л.	О.
Требование (количество)																			
7	12	5	1	0	0	4	0	0	0	0	588	62	0	0	0	9	0	0	0
*Формулировки требований по видам объектов (Д. Р. Л. О.) представлены в таблице 3.																			

Таблица 3 – Обязательные требования Федерального закона «Об обеспечении единства измерений», внесенные в Реестр обязательных требований

№ п/п	Объект, к которому предъявляется требование
	Деятельность (Д.)
Формулировка требования	
1	Применяющие средства измерений в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений юридические лица и индивидуальные предприниматели обязаны своевременно представлять эти средства измерений на поверку.
2	Средства измерений, предназначенные для применения в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, до ввода в эксплуатацию должны подлежать первичной поверке.
3	Измерения, относящиеся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, должны выполняться по первичным референтным методикам (методам) измерений, референтным методикам (методам) измерений и другим аттестованным методикам (методам) измерений, за исключением методик (методов) измерений, предназначенных для выполнения прямых измерений, с применением средств измерений утвержденного типа, прошедших поверку.
4	Средства измерений, предназначенные для применения в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, после ремонта должны подлежать первичной поверке ² .
5	Средства измерений, предназначенные для применения в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, в процессе эксплуатации должны подлежать периодической поверке.
6	Результаты измерений должны быть выражены в единицах величин, допущенных к применению в Российской Федерации
7	При применении средств измерений должны соблюдаться обязательные требования к условиям их эксплуатации
Объект, к которому предъявляется требование	
Результаты деятельности/действий (Р.)	
Формулировка требования	
8	Подтверждение соответствия методик (методов) измерений обязательным метрологическим требованиям к измерениям осуществляется путем аттестации методик (методов) измерений. Сведения об аттестованных методиках (методах) измерений передаются в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений проводящими аттестацию юридическими лицами и индивидуальными предпринимателями.
9	Методики (методы) измерений, предназначенные для выполнения прямых измерений, вносятся в эксплуатационную документацию на средства измерений. Подтверждение соответствия этих методик (методов) измерений обязательным метрологическим требованиям к измерениям осуществляется в процессе утверждения типов данных средств измерений.

² С 1 марта 2025 года средства измерений после ремонта подлежат периодической поверке, в соответствии с Федеральным законом от 14 февраля 2024 г. № 18-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об обеспечении единства измерений».

10	Сведения об утвержденных типах стандартных образцов и типах средств измерений, о внесенных в них изменениях включаются в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений в порядке, устанавливаемом федеральным органом исполнительной власти, осуществляющим функции по выработке государственной политики и нормативно-правовому регулированию в области обеспечения единства измерений.
11	В Российской Федерации должны применяться эталоны единиц величин, прослеживаемые к государственным первичным эталонам соответствующих единиц величин. В случае отсутствия соответствующих государственных первичных эталонов единиц величин должна быть обеспечена прослеживаемость средств измерений, применяемых в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, к национальным эталонам единиц величин иностранных государств
12	Утверждение типа стандартных образцов или типа средств измерений подтверждается включением сведений об утвержденных типе стандартных образцов или типе средств измерений в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений
13	Результаты поверки средств измерений подтверждаются сведениями о результатах поверки средств измерений, включенными в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений.
14	В сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений применяются стандартные образцы утвержденных типов
15	Тип средств измерений, применяемых в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, подлежит обязательному утверждению
16	Тип стандартных образцов, применяемых в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, подлежит обязательному утверждению
17	Конструкция эталонов единиц величин должна обеспечивать ограничение доступа к определенным частям эталонов единиц величин (включая программное обеспечение) в целях предотвращения несанкционированной настройки и вмешательства, которые могут привести к искажению воспроизведения, хранения и передачи единицы величины, шкалы величины (шкалы измерений).
18	В Российской Федерации применяются единицы величин Международной системы единиц, принятые Генеральной конференцией по мерам и весам и рекомендованные к применению Международной организацией законодательной метрологии. Правительством Российской Федерации могут быть допущены к применению в Российской Федерации наравне с единицами величин Международной системы единиц внесистемные единицы величин. Наименования единиц величин, допускаемых к применению в Российской Федерации, их обозначения, правила написания, а также правила их применения устанавливаются Правительством Российской Федерации.
19	На каждый экземпляр средств измерений утвержденного типа, сопроводительные документы к указанным средствам измерений и на сопроводительные документы к стандартным образцам утвержденного типа наносится знак утверждения их типа. Конструкция средства измерений должна обеспечивать возможность нанесения этого знака в месте, доступном для просмотра. Если особенности конструкции средства измерений не позволяют нанести этот знак непосредственно на средство измерений, он наносится только на сопроводительные документы.
Объект, к которому предъявляется требование	
Лица (Л.)	
Формулировка требования	
20	В сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений к применению допускаются средства измерений утвержденного типа, прошедшие поверку в соответствии с положениями настоящего Федерального закона, а также обеспечивающие соблюдение установленных законодательством Российской Федерации об обеспечении единства измерений обязательных требований, включая обязательные метрологические требования к измерениям, обязательные метрологические и технические требования к средствам измерений, и установленных законодательством Российской Федерации о техническом регулировании обязательных требований.
21	В случае отсутствия соответствующих государственных первичных эталонов единиц величин должна быть обеспечена прослеживаемость средств измерений, применяемых в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, к национальным эталонам единиц величин иностранных государств

22	Сведения о результатах поверки средств измерений передаются в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений проводящими поверку средств измерений юридическими лицами и индивидуальными предпринимателями в срок, установленный в порядке
23	В Российской Федерации должны применяться эталоны единиц величин, прослеживаемые к государственным первичным эталонам соответствующих единиц величин.
24	Поверку средств измерений осуществляют аккредитованные в соответствии с законодательством Российской Федерации об аккредитации в национальной системе аккредитации на проведение поверки средств измерений юридические лица и индивидуальные предприниматели
Объект, к которому предъявляется требование	
Объекты (О.)	
Формулировка требования	
25	Конструкция средств измерений должна обеспечивать ограничение доступа к определенным частям средств измерений (включая программное обеспечение) в целях предотвращения несанкционированных настройки и вмешательства, которые могут привести к искажениям результатов измерений.

При анализе содержания Реестра обязательных требований (таблица 3), контроль выполнения которых осуществляется в рамках государственного метрологического контроля (надзора), становится понятно, что формулировки требований адаптированы под объект, к которому они предъявляются: деятельность, результаты деятельности (действий), лица, объекты, а из совокупности обязательных требований³ не выделены метрологические требования⁴, которые в соответствии с Федеральным законом «Об обеспечении единства измерений» предъявляются к измерениям, то есть к деятельности.

Так требование № 8 «Результаты измерений должны быть выражены в единицах величин, допущенных к применению в Российской Федерации» больше относится к такому объекту как результат деятельности/действий, чем к самой деятельности – измерению.

По результатам анализа данных ИС, содержания Реестра обязательных требований, положений Федерального закона «Об обеспечении единства измерений», положений Федерального закона «Об обязательных требованиях в Российской Федерации», можно сделать следующие выводы.

Федеральный закон «Об обязательных требованиях в Российской Федерации» при существующей актуальной редакции Федерального закона «Об обеспечении единства измерений» фактически снимает ограничения по установлению сферы государ-

ственного регулирования обеспечения единства измерений, которая, в перспективе, может распространиться на всю предпринимательскую и иную экономическую деятельность, поскольку измерения являются основой отношений, возникающих при осуществлении такой деятельности.

Подтверждением расширения сферы регулирования является увеличение с 1 марта 2025 года [9] перечня форм государственного регулирования в области обеспечения единства измерений дополнительной седьмой формой – «оценкой соответствия эталонов единиц величин обязательным требованиям». При этом такие формы регулирования как: утверждение типа стандартных образцов или типа средств измерений, поверка средств измерений, метрологическая экспертиза, аттестация методик (методов) измерений и есть оценка соответствия или определение соблюдения требований, предъявляемых к объекту.

Расширение сферы государственного регулирования в области обеспечения единства измерений связано с тем, что обязательные метрологические требования в настоящее время существуют де-юре (в Федеральном законе «Об обеспечении единства измерений»), а де-факто устанавливаются обязательные требования без их градации (таблица 3), определённые Федеральным законом «Об обязательных требованиях в Российской Федерации».

³ Обязательные требования – требования, содержащиеся в нормативных правовых актах, которые связаны с осуществлением предпринимательской и иной экономической деятельности и оценка соблюдения которых осуществляется в рамках государственного контроля (надзора), муниципального контроля, привлечения к административной ответственности, предоставления лицензий и иных разрешений, аккредитации, оценки соответствия продукции, иных форм оценки и экспертизы.

⁴ Метрологические требования – требования к влияющим на результат и показатели точности измерений характеристикам (параметрам) измерений, эталонов единиц величин, стандартных образцов, средств измерений, а также к условиям, при которых эти характеристики (параметры) должны быть обеспечены.

Таким образом, все обязательные требования (включая метрологические) Федерального закона «Об обеспечении единства измерений» и связанных подзаконных актов становятся одним из факторов, определяющих сферу государственного регулирования обеспечения единства измерений, причем не только в экономической деятельности. Установленные [4] виды деятельности (например, деятельность в области гражданской обороны), на которые распространяется, при определённых условиях, сфера действия Федерального закона «Об обеспечении единства измерений», не относятся к экономической деятельности.

Попытка корректировки сферы государственного регулирования, реализованная в 2024 году в Федеральном законе «О внесении изменений в Федеральный закон «Об обеспечении единства измерений» [9], ситуацию не прояснила. Пересмотр обязательных требований, проходивший в рамках первого этапа «регуляторной гильотины», затронул только акты правительства и ведомственные нормативные акты. Федеральные законы, содержащие обязательные требования, не стали объектом рассмотрения комиссии по административной реформе.

Для обеспечения эффективной реализации Федерального закона «Об обязательных требованиях в Российской Федерации» и связанной с ним цифровизации контрольно-надзорной деятельности требуется пересмотр положений Федерального закона «Об обеспечении единства измерений» в части целей закона как «охраняемых законом ценностей» [2] и соответствующих обязательных требований, введение которых должно быть направлено на устранение риска причинения вреда (ущерба) охраняемым законом ценностям при осуществлении предпринимательской и иной экономической деятельности. При этом требуется пересмотреть значение обязательных метрологических требований в Федеральном законе «Об обеспечении единства измерений», в том числе, с учетом их распределения в Реестре обязательных требований по объектам (метрологические требования предъявляются к измерениям).

Литература

1. О государственном контроле (надзоре) и муниципальном контроле в Российской Федерации: Федеральный закон от 31 июля 2020 г. № 248-ФЗ (ред. от 28 декабря 2024 г.) [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_358750/ (дата обращения: 20.01.2025).
2. Об обязательных требованиях в Российской Федерации: Федеральный закон от 31 июля 2020 г. № 247-ФЗ (ред. от 8 августа 2024 г.) [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_358670/ (дата обращения: 22.01.2025).
3. Об утверждении Концепции совершенствования контрольной (надзорной) деятельности до 2026 года: распоряжение Правительства Российской Федерации от 21 декабря 2023 г. № 3745-р (ред. от 17 июня 2024 г.) [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_465403/ (дата обращения: 22.01.2025).
4. Об обеспечении единства измерений: Федеральный закон от 26 июня 2008 г. № 102-ФЗ (ред. от 8 августа 2024 г.) [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_77904/ (дата обращения: 22.01.2025).
5. Об утверждении порядка проведения поверки средств измерений, требований к знаку поверки и содержанию свидетельства о поверке: приказ Минпромторга России от 31 июля 2020 г. № 2510 [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_368453/ (дата обращения: 23.01.2025).
6. Об утверждении порядка проведения испытаний стандартных образцов или средств измерений в целях утверждения типа, порядка утверждения типа стандартных образцов или типа средств измерений, внесения изменений в сведения о них, порядка выдачи сертификатов об утверждении типа стандартных образцов или типа средств измерений, формы сертификатов об утверждении типа стандартных образцов или типа средств измерений, требований к знакам утверждения типа стандартных образцов или типа средств измерений и порядка их нанесения: приказ Минпромторга России от 28 августа 2020 г. № 2905 [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_368478/ (дата обращения: 22.01.2025).
7. Об уведомительном порядке начала осуществления отдельных видов предпринимательской деятельности: постановление Правительства Российской Федерации от 16 июля 2009 г. № 584 [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_э89755/f588886de4801865d919003ee9f014cfe46f42be/ (дата обращения: 22.01.2025).
8. Об утверждении перечня измерений, относящихся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений: постановление Правительства Российской Федерации от 16 ноября 2020 г. № 1847 (ред. от 17 июля 2023 г.) [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_68497/ (дата обращения: 22.01.2025).
9. О внесении изменений в Федеральный закон «Об обеспечении единства измерений»: Федеральный закон от 14 февраля 2024 г. № 18-ФЗ [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_469667/ (дата обращения: 22.01.2025).

ИНФОРМАТИВНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ОБЪЕКТОВ INFORMATIVENESS OF DETERMINING THE PARAMETERS OF ACOUSTIC FIELDS OF OBJECTS

Кувыкин Ю.А., к.т.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России
Супрунчук В.В., д.т.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России
Kuvykin Yu.A., k.t.s.,
Suprunyuk V.V., d.t.s.,
FSBI «MSHC» of Russian Federation Ministry of Defense
e-mail: original.rus@mail.ru; e-mail: 3260vvs@mail.ru
tel. +7 (977) 268 75 98;
tel. 8(916)040-79-04

Аннотация: Представлены результаты исследований информативности определения параметров акустических полей объектов путем их измерений или контроля. Обосновано, что информативность определения параметров акустических полей объектов в условиях эксплуатации зависит от погрешности измерений и достоверности контроля параметров в области распространения акустических полей. Показано, что информативность определения параметров акустических полей объектов имеет актуальное значение для обеспечения эффективности защиты объектов от утечки речевой информации, акустической скрытности и акустического обнаружения объектов. Представлены обобщенные сведения о разработанных рекомендациях по совершенствованию и развитию методов и средств измерений (контроля) параметров акустических полей объектов.

Annotation: The article presents the results of studies of the informativeness of determining the parameters of acoustic fields of objects by measuring or monitoring them. It is substantiated that the informativeness of determining the parameters of acoustic fields of objects under operating conditions depends on the measurement error and the reliability of monitoring the parameters in the area of propagation of acoustic fields. It is shown that the informativeness of determining the parameters of acoustic fields of objects is of current importance for ensuring the effectiveness of protecting objects from speech information leakage, acoustic secrecy and acoustic detection of objects. The article presents generalized information on the developed recommendations for improving and developing methods and means for measuring (monitoring) the parameters of acoustic fields of objects.

Ключевые слова: информативность, параметры акустических полей, погрешность измерений, достоверность контроля.

Keywords: information content, acoustic field parameters, measurement error, control reliability.

В современных условиях развития информационных и измерительных технологий и с учетом требований действующих нормативных документов по обеспечению информационной безопасности объектов и единства выполняемых на объектах измерений [1–4], результаты исследований информативности определения параметров акустических полей объектов в условиях сред их применения имеют актуальное и важное значение.

Акустические волны, исходящие от объектов и образующие область возмущенного пространства среды, в которой находятся объекты, являются одним из главных информативных показателей физических полей объектов в условиях среды их применения. Информация, которой обладают поля, необходима для принятия решений в отношении функционирования объектов. Для получения информации об акустических полях необходимо выполнять процесс непрерывных или периодических измерений параметров этих полей, либо контроли-

ровать их изменение в установленных допусковых пределах. Измерения или контроль параметров акустических полей объектов должны обеспечить получение необходимой акустической информации о свойствах объектов и изменчивости окружающей их среды. В этом случае важным аспектом является информативность измерений или контроля параметров акустических полей объектов.

Для определения параметров акустических полей в условиях эксплуатации техники используются измерительные преобразователи (микрофоны, гидрофоны, измерители скорости звука, приемники колебательной скорости, акселерометры и вибропреобразователи), имеющие в настоящее время цифровые выходные сигналы и объединенные в единую распределенную в области акустического поля объекта информационную систему передачи, обработки и отображения измерительной информации об изменении параметров акустического поля, создаваемого объектом.

С точки зрения теории информации [5] измеряемый или контролируемый параметр x до выполнения процедуры его определения обладает неопределенностью информации, которая характеризуется безусловной энтропией информации в пределах интегрирования:

$$H(x) = -\int p(x) \log p(x) dx, \quad (1)$$

где $p(x)$ – плотность распределения вероятностей возможных значений определяемого параметра x .

Энтропию $H(x)$ можно трактовать как среднюю неопределенность информации об акустическом поле объекта до начала процесса определения параметров этого поля.

Количество информации I , получаемое в результате определения выбранного параметра акустического поля, равно разности энтропий информации до и после определения:

$$I = H(x) - H(x/x_u), \quad (2)$$

где $H(x)$ – безусловная энтропия, описываемая плотностью вероятностей $p(x)$ определяемого параметра x до начала процесса измерений или контроля, $H(x/x_u)$ – условная энтропия, то есть энтропия величины x при условии, что получен результат определения выбранного параметра x_u .

Выражение (2) характеризует убыль неопределенности информации в процессе определения выбранного параметра. При этом условная энтропия информации $H(x/x_u)$ выступает в качестве меры неопределенности информации о параметре x после получения результата определения x_u . Следовательно, при изменении точности (погрешности) измерений или достоверности контроля параметра акустического поля количество объективной информации также изменяется.

Если средство измерений или контроля параметров акустического поля объекта имеют диапазон показаний от X_1 до X_2 , в пределах которого ожидается отображение определяемого параметра x_u , то условная энтропия $H(x/x_u)$ акустического поля объекта как источника информации будет равна:

$$H(x/x_u) = -\int f(\Delta) \log f(\Delta) d(\Delta), \quad (3)$$

где Δ – точность (погрешность) измерений или достоверность контроля используемого средства измерений или контроля.

Если погрешность измерений равномерно распределена на интервале $[-\Delta_m, +\Delta_m]$, $p(x) = 1/(X_1 - X_2)$, то условная энтропия равна:

$$H(x/x_u) = -\int_{-\Delta_m}^{+\Delta_m} \frac{1}{2\Delta_m} \log \frac{1}{2\Delta_m} d\Delta = \log 2\Delta_m. \quad (4)$$

При нормальном распределении погрешности измерений условная энтропия равна:

$$H(x/x_u) = \log 2\pi e \sigma, \quad (5)$$

где e – основание натуральных логарифмов; σ – средне-квадратическое отклонение погрешности измерений.

Из выражений (4) и (5) следует, что значение энтропии $H(x/x_u)$ зависит от погрешности измерений, то есть от метрологических характеристик используемого при измерениях средства измерений. Кроме того, сравнение (4) и (5) показывает, что средства измерений, имеющие различные законы распределения погрешности измерений, могут обеспечить при измерении параметра акустического поля получение практически одинакового количества объективной акустической информации.

Вне зависимости от закона распределения погрешностей измерений ее значение, в основном, определяет количество информации, получаемое в результате измерений выбранного параметра акустического поля. Поэтому снижение погрешности измерений или повышение точности измерений имеет преобладающее значение для получения объективной информации о параметрах акустических полей объектов. В практике измерений параметров акустических полей объектов преобладает тенденция на снижение погрешности измерений или поддержание ее на требуемом уровне.

Достоверность контроля определяемого параметра акустического поля D в общем случае определяется вероятностями ошибок первого и второго рода:

$$D = 1 - (\alpha + \beta), \quad (6)$$

где α – вероятность ошибки определения параметра первого рода; β – вероятность ошибки определения параметра второго рода.

Достоверность контроля D_i i -го параметра может быть выражена из общего уравнения вероятностей состояния:

$$P(X_i Y_i) + P(X_{i0} Y_{i0}) + P(X_{i0} Y_i) + P(X_i Y_{i0}) = 1 \quad (7)$$

$$D_i = P(X_i Y_i) + P(X_{i0} Y_{i0}) = 1 - [P(X_{i0} Y_i) + P(X_i Y_{i0})], \quad (8)$$

где X_i – i -й определяемый параметр принимается; Y_i – i -й определяемый параметр оценивается как принимаемый; $P(X_i Y_i)$ – вероятность правильной оценки состояния i -го определяемого параметра; X_{j0} – i -й определяемый параметр – не принимается; Y_{j0} – i -й определяемый параметр оценивается как не принимаемый; $P(X_{j0} Y_{j0})$ – вероятность неправильной оценки состояния i -го определяемого параметра; $P(X_{j0} Y_i)$ – вероятность ошибки определения первого рода по i -му параметру; $P(X_i Y_{j0})$ – вероятность ошибки определения второго рода по i -му параметру.

Для расчета вероятностей α_i и β_i определяемый параметр можно рассматривать как:

$$X_i = X^* - Z_i, \quad (9)$$

где X^* – действительное значение определяемого параметра; Z_i – суммарная ошибка определяемого параметра.

При известной плотности вероятности суммарной ошибки $f(Z_i)$ условную плотность вероятности определяемого параметра представляют, как:

$$f(X_i/X^*) = f_z(X_i - X^*), \quad (10)$$

где $f(X_i/X^*)$ – условная плотность вероятности определяемого параметра, $f(X^*)$ – априорная плотность вероятности определяемого параметра.

По совместной плотности вероятности параметра (11) представляется возможным определить вероятности ошибок первого и второго рода определения i -того параметра акустического поля.

По результатам известных в литературе оценок достоверности контроля можно сделать вывод, что достоверность контроля параметров акустического поля зависит от ошибки их определения. Снижение ошибки определения выбранного параметра акустического поля обусловит уменьшение вероятностей ошибок первого и второго рода, особенно это будет характерно для ошибок второго рода, которые допускают к принятию результатов контроля за пределами допускаемых значений отклонения параметра от его действительного значения.

Применение контроля параметров акустического поля должно использоваться в тех его областях (зонах), где нет необходимости использования средств измерений с высокой точностью измере-

ний. Это необходимо для установления границ активности возмущения колебаний среды вокруг объекта. Градация зон акустического поля может быть распределена от самого активного излучения (распространения) до слабо уловимых колебаний среды, обуславливающих области акустического поля, параметры которых не требуют точных измерений и применения для этих целей высокоточных средств измерений акустических величин.

Для передачи цифровой информации от измерительных преобразователей о параметрах акустического поля представляет интерес ее трансформация с помощью дискретно-косинусного преобразования [6], которое является разновидностью преобразования Фурье. Дискретное косинусное преобразование может позволить переходить от пространственного представления параметра акустического поля к его спектральному представлению и обратно. При этом в спектральном представлении параметра акустического поля, состоящего из гармоник, отбрасывая наименее значимые из них, можно балансировать между качеством воспроизведения информации и степенью сжатия информации о параметрах акустического поля. Дискретное косинусное преобразование переводит матрицу измерительной информации о параметре в матрицу частотных коэффициентов соответствующего размера. В матрице коэффициентов низкочастотные компоненты расположены ближе к левому верхнему углу, а высокочастотные – справа и внизу. Например, если представляют интерес компоненты низкочастотной информации, а высокочастотные компоненты не так важны для передачи и представления информации. Поэтому дискретное косинусное преобразование определяет, какую часть информации можно безболезненно выбросить, не внося серьезных искажений в передачу информации.

Для целей передачи цифровой информации и ее фильтрации может быть применена и теория вейвлетов (всплесков) [7], как теория эффективных алгоритмов обработки больших потоков цифровой информации. В данном случае понимают экономное (с точки зрения экономии ресурсов памяти и времени обработки) разложение потока информации на составляющие так, чтобы можно было выделить основной информационный поток, уточняющий информацию и информационный поток с несущественной информацией. Как

правило, основной информационный поток значительно менее плотный, чем исходный поток информации, поэтому его можно передать быстро, и при этом не требуется использовать линии связи с широкой полосой пропускания и с большим количеством проводников. Уточняющий информационный поток не во всех случаях необходим, его можно передавать фрагментарно в зависимости от потребностей. Поток с несущественной информацией вообще может быть отброшен. Какая информация является основной, какая уточняющей, а какая – несущественной, определяется для каждого конкретного параметра акустического поля. Теория вейвлетов предполагает достаточно широкий арсенал средств для обработки (разложения на составляющие) интересующего потока измерительной информации. Такими средствами в теории вейвлетов являются наборы вложенных (основных) пространств функций и их представлений в виде прямой или ортогональной суммы вейвлетных пространств. Весьма важными являются базисы основных пространств, а также базисы вейвлетов. В общем случае трансформация измерительной информации производится с помощью числового потока. При этом исходный поток заменяется двумя новыми потоками (нулевой и вейвлетный), количество чисел в этих потоках совпадает с исходным потоком. Однако если некоторые фрагменты первого потока не дают достаточной точности, то можно использовать соответствующие фрагменты (с теми же диапазонами индексов) второго потока и произвести соответствующие расчеты. Это позволяет восстановить исходный поток на соответствующих участках передаваемой измерительной информации. Последовательное добавление к нулевому потоку вейвлетных потоков приводит к последовательному уточнению результата сжатия информации вплоть до полного восстановления исходного потока [7].

В настоящее время к основным измеряемым параметрам акустических полей объектов в частотном диапазоне звуковых колебаний среды относятся: звуковое давление, скорость звука и колебательная скорость, интенсивность звука, диаграмма направленности и фазовый угол (угол сдвига фазы).

Получение информации об указанных параметрах определяется результатами их измерений

(контроля) и всецело зависит от метрологических характеристик методов и средств измерений, а также контроля.

Получение объективной и достоверной информации о параметрах акустических полей объектов посредством применяемых методов и средств измерений и контроля необходимо для обеспечения эффективности защиты объектов от утечки речевой информации, обеспечения надежной акустической скрытности и правильности акустического обнаружения объектов.

В этой связи совершенствование и развитие методов и средств измерений и контроля параметров акустических полей с целью повышения информативности их определения осуществляется по трем основным направлениям:

- обеспечение эффективности защиты объектов от утечки речевой информации;
- обеспечение акустической скрытности объектов;
- обеспечение акустического обнаружения объектов.

В настоящее время в этих направлениях разработан ряд новых методических рекомендаций.

В вопросе обеспечения эффективности защиты от утечки речевой информации представляют практический интерес следующие предложения по:

- использованию широкополосной случайной вибрации для определения частотных характеристик вибропреобразователей [8-10];
- определению частотных характеристик микрофонов измерительных конденсаторных по давлению с применением широкополосного сигнала возбуждения электростатического возбудителя [11, 12];
- определению частотных характеристик микрофонов по полю с применением широкополосных сигналов возбуждения в условиях, отягощённых реверберацией звука [13].

По обеспечению акустической скрытности объектов интересны для практического применения следующие рекомендации по:

- повышению частотного разрешения при градуировке первичных источников измерительной информации из состава гидроакустических информационно-измерительных систем [14];
- проведению проверки информационно-измерительных систем акустических величин без разъединения цепей измерительных каналов и

отключения (демонтажа) первичных измерительных источников информации [15];

- выполнению поверки и тестового контроля измерительных каналов информационно-измерительных систем с использованием цифрового представления измерительной информации [16, 17].

В части обеспечения акустического обнаружения объектов могут представлять интерес предложения по акустическому детектированию объектов.

Приведенные выше рекомендации реализованы в новых методах проведения измерений при поверке средств измерений, учтены при разработке требований к новым образцам средств измерений акустических величин, а также в новых программных продуктах и моделях, обеспечивающих повышение точности измерений параметров акустических полей объектов и поддержание требуемого уровня точности измерений в условиях эксплуатации объектов при отсутствии или разрыве связей с эталонами, в том числе при зашумленных условиях, отягощенных реверберацией звука.

Повышение эффективности защиты объектов от утечки речевой информации обеспечивается:

- в методе определения частотных характеристик вибропреобразователей с применением широкополосной случайной вибрации путем снижения погрешности расчета профиля сигнала возбуждения с нелинейным (ступенчатым) энергетическим спектром, где спектральная плотность мощности виброускорения сигнала представляется кусочно-линейной функцией, которая рассчитывается на основе решения системы уравнений методом Гаусса, а также с применением комбинации алгоритмов быстрого преобразования Фурье при обработке измерительных сигналов;
- в методе определения частотных характеристик по давлению микрофонов измерительных конденсаторных с применением широкополосного сигнала возбуждения электростатического возбудителя путем снижения погрешности измерений за счет учета нелинейности амплитудно-частотной характеристики спектра и продолжительности частотно-модулированного сигнала возбуждения электростатического возбудителя;
- в методе определения частотных характеристик микрофонов по полю с применением широкополосных сигналов возбуждения в условиях,

отягощенных реверберацией звука, путем повышения точности измерений за счет селекции прямого и отраженных широкополосных сигналов при спектрометрии временных задержек с применением фильтра алгоритма Гёрцеля и скользящего комплексного взвешенного усреднения при комбинации результатов измерений в свободном поле и поле давления;

В вопросе обеспечения акустической скрытности объектов повышение информативности измерений параметров акустических полей обусловлено:

- методом повышения частотного разрешения градуировки первичных виброакустических преобразователей посредством сглаживания частотной характеристики преобразователей в третьоктавных полосах частот за счет снижения погрешности измерений узкополосных уровней сигнала (на 2–4 дБ) с применением кусочно-линейной регрессии;
- методом низкочастотной градуировки вибропреобразователей на синусоидальном и широкополосном сигналах возбуждения за счет повышения точности измерений в расширенном диапазоне частот от 5 до 0,5 Гц путем использования лазерного триангуляционного измерителя в составе поверочной виброустановки без применения длинноходовых вибростендов;
- методом обоснования выбора способа поверки за счет подтверждения метрологических характеристик измерительных преобразователей с требуемой точностью измерений на основе полумарковского моделирования процесса эксплуатации измерительных комплексов.

Представленные рекомендации реализованы в практике:

- при организации и проведении поверки микрофонов, вибропреобразователей (акселерометров), виброметров и шумомеров, анализаторов шума и вибрации, программно-аппаратных комплексов и систем для проведения акустических измерений;
- в эксплуатационной документации (методики поверки) на гидроакустические информационно-измерительные системы и комплексы, гидрофоны, микрофоны, акселерометры, измерители скорости звука;
- при формировании, обосновании и реализации основных направлений развития методов и средств измерений акустических величин.

От реализации рекомендаций ожидается повышение уровня информативности определения параметров акустических полей объектов и снижение затрат на обеспечение сохранности акустической информации об объектах.

Таким образом, информативность определения параметров акустических полей объектов в условиях эксплуатации зависит от погрешности измерений и достоверности контроля параметров в области распространения акустических полей. Информативность определения параметров акустических полей объектов имеет актуальное значение для обеспечения эффективности защиты объектов от утечки речевой информации, акустической скрытности и акустического обнаружения объектов. Рассмотренные в статье вопросы направлены на повышение уровня информативности определения параметров акустических полей объектов.

Литература

1. Указ Президента Российской Федерации от 5.12.2016 № 646 «Доктрина информационной безопасности Российской Федерации».
2. Указ Президента РФ от 02.07.2021 № 400 «О стратегии национальной безопасности Российской Федерации».
3. Федеральный закон от 27.07.2006 № 149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и о защите информации».
4. Указ Президента РФ от 22.05.2015 № 260 «О некоторых вопросах информационной безопасности Российской Федерации».
5. Дмитриев В.И. Прикладная теория информации / Москва, Высшая школа, 1989. – 326 с.
6. Патент № 2573248 С2. Способ измерения спектра информационных акустических сигналов телерадиовещания и устройства для его осуществления / Абрамов В.А., Попов О.Б. – 2016.
7. Давыдов А.В. Вейвлетные преобразования сигналов. УГТУ. Екатеринбург, 2005. – 17 с.
8. Кувыкин Ю.А., Соколов И.Н., Кулак В.А. Исследование метода определения частотной характеристики вибропреобразователей с применением широкополосной случайной вибрации // Вестник метролога, 2018, № 2. – С. 8–12.
9. Кувыкин Ю.А., Соколов И.Н., Кувыкина О.А. Исследование алгоритма расчета неравномерного профиля широкополосного сигнала возбуждения электродинамического вибростенда при проверке вибропреобразователей [Текст] // Материалы XIV Всероссийской научно-технической конференции «Метрологическое обеспечение обороны и безопасности в Российской Федерации». Мытищи, 2022. – С. 129–133.
10. Кувыкин Ю.А., Ольховский А.Н., Супрунук В.В. Реализация низкочастотной градуировки вибропреобразователей с применением электродинамического вибростенда и измерителя лазерного триангуляционного [Текст] // Вестник метролога, 2023, № 2. – С. 21–26.
11. Кувыкин Ю.А., Соколов И.Н., Тумшайс Ф.А. Реализация низкочастотной градуировки вибропреобразователей на широкополосном случайном сигнале возбуждения с применением измерителя лазерного триангуляционного сигнала // Материалы VIII Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Акустика среды обитания», 2023, МГТУ им. Н.Э. Баумана. – С. 167–175.
12. Кувыкин Ю.А., Соколов И.Н., Ольховский А.Н. Исследование метода определения частотной характеристики конденсаторных микрофонов с применением частотно-модулированного сигнала [Текст] // Вестник метролога, 2021, № 2. – С. 25–31.
13. Кувыкин Ю.А., Супрунук В.В., Кувыкина О.А. Результаты исследований отечественных электростатических возбудителей для использования в рабочих эталонах звукового давления взамен зарубежных // Материалы IX Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов: «Акустика среды обитания». – 2024. – С. 237–246.
14. Кувыкин Ю.А., Супрунук В.В., Максак А.Г., Горбачев А.А. Способы оценки метрологических характеристик пьезоэлектрических измерительных преобразователей механических колебаний без демонтажа с объектов эксплуатации // Измерения и испытания в судостроении и смежных отраслях. Материалы 8 Всероссийской научно-технической конференции «Судометрика 2022». – 2022. – С. 42–48.
15. Кувыкин Ю.А., Супрунук В.В., Ольховский А.Н., Данильченко Н.Н. Повышение частотного разрешения градуировки первичных виброакустических преобразователей для снижения погрешности измерений узкополосных уровней сигнала // Материалы VIII Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов: «Акустика среды обитания». – 2023. – С. 255–260.
16. Супрунук В.В., Кувыкин Ю.А., Максак А.Г., Горбачев А.А. Проверка измерительных систем на объекте установки с использованием цифровой информации // Вестник метролога. – 2024. – № 1. – С. 9 – 13.
17. Кувыкин Ю.А., Супрунук В.В., Храменков В.Н., Хайруллин Р.З. Оценка эффективности контроля стабильности метрологических характеристик источников измерительной информации в процессе эксплуатации с использованием теории полумарковских моделей // Вестник метролога. – 2024. – № 4. – С. 8 – 11.

ЧАСТОТНАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ СОВРЕМЕННЫХ БЕСПРОВОДНЫХ ЦИФРОВЫХ СЕТЕЙ СВЯЗИ ПО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМ ЛИНИЯМ СВЯЗИ FREQUENCY SYNCHRONIZATION OF BASE STATIONS OF MODERN WIRELESS DIGITAL COMMUNICATION NETWORKS OVER FIBER-OPTIC COMMUNICATION LINES

Фокин А.П., к.т.н., ВУНЦ ВВС «ВВА им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»
Фокина Н.Н., ФГБУ «ГНМЦ» Министерства обороны Российской Федерации
Fokin A.P., Military and Air academy of Zhukovsky and Gagarin (VUNTs Air Force «VVA»)
fox_314@mail.ru, tel. 8(905)569-54-17
Fokina N.N., Senior Research Officer, Federal State Budgetary Institution
«Main Scientific Metrological Center» of the Ministry of Defense of the Russian Federation
E-mail: n-fokina@bk.ru
tel.+7 (905) 706-10-42

Аннотация: Рассмотрены причины ухудшения качества связи в беспроводных цифровых сетях связи поколения 4G и выше из-за нарушения частотно-временной синхронизации при применении средств радиоэлектронной борьбы. Предложен метод временной синхронизации базовых станций существующих и перспективных беспроводных сетей связи, описан эксперимент по временной синхронизации территориально разнесенных объектов с применением аппаратуры распределения сигналов времени.

Annotation: The reasons for the deterioration of communication quality in wireless digital communication networks of the 4G generation and higher due to time-frequency synchronization violations when using electronic warfare equipment are considered. A method of temporary synchronization of base stations of existing and prospective wireless communication networks is proposed, and an experiment on temporary synchronization of geographically separated objects using time signal distribution equipment is described.

Ключевые слова: волоконно-оптические линии связи, тактовая сетевая синхронизация, 4G, 5G, ARCB.
Keywords: fiber-optic communication lines, clock network synchronization, 4G, 5G, ARSV.

При построении беспроводных цифровых сетей связи на территории Российской Федерации массово применялась аппаратура импортного производства, так как отечественная аппаратура на начальном этапе отсутствовала, а позже сильно уступала по стоимости и техническим параметрам. С развитием сетей связи, увеличением пропускной способности, ужесточались требования к частотно-временной синхронизации базовых станций [1].

Архитектура построения беспроводных сетей связи для получения синхросигналов подразумевает использование технологий, основанных на использовании сигналов, передаваемых глобальными навигационными спутниковыми системами (ГНСС).

В рекомендациях МСЭ-Т приведены требования по частотной ($\pm 1 \times 10^{-12}$) и временной (± 30 нс) синхронизации для улучшенных устройств первичных эталонных генераторов, что приводит к требованию по синхронизации для абонентских станций по частоте $\pm 5 \times 10^{-8}$ и времени ± 150 нс [2]. Существующие частотно-временные приемники сигналов, передаваемых спутниковыми радионавигационными системами, полно-

стью удовлетворяют указанным требованиям. Дешевизна, простота в использовании и высокие метрологические характеристики частотно-временной навигационной аппаратуры на долгие годы определили ее лидирующую позицию в области источников синхросигналов при построении беспроводных цифровых сетей связи.

Но частотно-временные приемники ГНСС имеют уязвимые места, такие как, низкий, на уровне шумов, уровень сигнала, невозможность оперативно изменить кодовую последовательность сигнала космического аппарата. Следовательно, их сигналы можно «заглушить» или подделать.

Массовое применение средств радиоэлектронной защиты, основанное на постановке преднамеренных помех сигналам ГНСС, для защиты различных объектов от атак ударных дронов, особенно в крупных городах, ухудшает качество беспроводной связи или совсем делают ее не работоспособной. Также фиксируется массовое применение непреднамеренных помех сигналам ГНСС водителями междугородних перевозок или пользователями различных шеринговых (sharing) систем для обмана систем взимания платы (ПЛАТОН, аренда машин или

самокатов). Данные устройства (помеховые излучатели), позволяющие совершить данную атаку, популярны, имеются в свободном доступе и очень широко представлены на рынке. Стоимость таких устройств около 100 долларов США. Данное явление получило широкое распространение в последнее время и называется GPS спуфинг (GPS Spoofing) [3].

GPS спуфинг может применяться преднамеренно с целью атаки на ту или иную инфраструктуру, например банковскую сферу или логистику, или может иметь место не преднамеренная спуфинговая атака, например работа служб безопасности или противодействие различным каршеринговым системам. Подавление помеховыми излучателями сигналов ГНСС оказывает воздействие на все навигационные приемники, находящиеся в радиусе действия. GPS спуфинг становится серьезной проблемой в различных сферах народного хозяйства.

Вторым слабым местом аппаратуры частотно-временной синхронизации, основанной на приеме сигналов ГНСС GPS, является возможность включения селективного доступа к системе. То есть в сигнал, передаваемый с радионавигационного спутника, могут быть преднамеренно внесены искажения, которые приводят к значительному ухудшению выходных сигналов аппаратуры.

Таким образом, дальнейшее развитие телекоммуникационных сетей связи требует решения задачи по частотно-временной синхронизации, основанной не только на использовании сигналов, передаваемых спутниковыми радионавигационными системами, но и на альтернативных источниках частотно-временной информации.

Альтернативным источником для частотно-временной синхронизации может стать синхронизация пунктов цифровой сети связи по волоконно-оптическим линиям связи. [4, 5]

В крупных городах, в настоящее время, уже имеются развитые волоконно-оптические линии связи, по которым можно доставлять синхросигналы до базовых станций, с минимальными финансовыми затратами. Необходимо только установить приемное оборудование и проложить небольшой отрезок волоконно-оптической линии.

Одним из самых простых в реализации способов, это использование аппаратуры синхронизации на основе РТР серверов, которые уже доступны в крупных городах.

Синхронизация базовых станций беспроводных цифровых сетей связи через существующую разветвленную волоконно-оптическую сеть на основе РТР серверов позволит обеспечить требуемый уровень частотно-временной синхронизации существующих и перспективных беспроводных сетей связи.

Передача синхросигналов времени и эталонных частот с использованием волоконно-оптических линий связи получила широкое распространение в отрасли связи. Основными международными документами, регламентирующими излучения (передачу) сигналов времени и стандартных частот, являются Рекомендации Международного Союза Электросвязи (МСЭ) – Рекомендации МСЭ-R.TF. Кроме того, Рекомендацией МСЭ-R.TF.686–1 введены единообразные термины для однозначной спецификации и описания систем стандартных частот и времени.

Следует отметить, что в РФ также ведутся активные исследования в области передачи сигналов времени по ВОЛС. Разработан и практически опробован комплект аппаратуры распределения сигналов времени (APCB), позволяющий реализовать передачу сигналов времени по ВОЛС. Внешний вид APCB представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Внешний вид аппаратуры APCB.

Передача синхросигналов точного времени с использованием волоконно-оптических линий связи осуществляется по цифровым каналам, организованным на сетях связи. Аппаратура включается в цепи передачи дуплексных (двунаправленных) каналов связи с пропускной способностью 2048 кбит/с (поток E12) для обмена информацией с аналогичной на приемной стороне аппаратурой. Передаваемая информация содержит данные о шкале времени и служебные данные на передающей стороне для коррекции шкалы времени и сигнала 1pps в принимающей аппаратуре. Данные передаются на одной из позиций национальных бит $S_{a4} - S_{a8}$ в нечетном цикле нулевого канального интервала.

Для обеспечения двунаправленной передачи и приема сигналов времени и секундной метки (1pps) между двумя абонентскими пунктами в аппаратуре используется метод дистанционного сличения шкал времени для передающей и приемной сторон линии передачи.

Особенностью метода является двунаправленная передача информации о времени между источником и приёмником сигналов времени, т. е. между ведущими и ведомыми часами, реализующая алгоритм измерения круговой задержки прохождения сигнала. В результате задержка сигнала в волоконно-оптической линии связи от источника к приёмнику компенсируется полностью, если нет асимметрии задержки сигнала или её случайных изменений по направлениям передачи данных в одном из направлений.

Основная идея метода заключается в том, чтобы передавать информацию о моментах (метках) времени получения и отправления информационных сообщений передаваемых, например, в потоке E12. Таким образом, сигнал 1 pps не передаётся, а передаётся оцифровка шкалы времени и метки, отражающие моменты фиксирования времени прихода и отправления известного бита, содержащегося в определенном месте передаваемых данных. В результате ведомая аппаратура корректирует собственную шкалу времени и положение 1pps исходя из расчёта положения четырёх оцифрованных меток времени (с точностью шага коррекции).

Алгоритм работы данного метода аналогичен основному алгоритму протокола SNTP. Ведомая аппаратура передает на ведущую информацию о

статусе (запрос), представляющую собой восемь бит. Первые семь бит являются известным кодовым словом, последний бит – нулевой (маркер-бит). Аппаратура фиксирует момент его формирования относительно шкалы времени комплекта ведомой аппаратуры. Таким образом, формируется первая метка времени TM_1 , представляющая собой состояние шкалы времени ведомой аппаратуры в момент формирования метки. Биты статуса вставляются на одну из позиций служебной части слова в биты $S_{a4} - S_{a8}$ в нечетном цикле нулевого канального интервала в поток E12 и передаются в этом же потоке E12 по волоконно-оптической линии связи от ведомой к ведущей аппаратуре, которая фиксирует момент прихода нулевого бита статуса (маркер-бита) по собственной шкале времени. Таким образом, формируется вторая метка времени TM_2 , представляющая собой состояние шкалы времени ведущей аппаратуры в цифровом виде в момент фиксирования получения маркер-бита. Далее ведущая аппаратура формирует информационное сообщение, начинающееся с 8-го бита статуса. Первые семь бит содержат служебную информацию о наличии опорного сигнала и потока E12 на ее входах. Последний (8) бит нулевой. В момент его появления ведущая аппаратура формирует метку TM_3 (аналогично TM_1), вставляет ее после бит статуса оцифровку меток времени TM_2 , TM_3 (32 бита) и оцифровку шкалы времени (56 бит). Информация передается на одной из позиций бит $S_{a4} - S_{a8}$ в нечетном цикле нулевого канального интервала в потоке E12 от ведущей к ведомой аппаратуре. Ведомая аппаратура фиксирует момент прихода маркер-бита по ШВ и формирует метку времени TM_4 (аналогично TM_2). Таким образом, ведущая аппаратура обладает всеми данными, необходимыми для расчёта круговой задержки распространения сигнала в волоконно-оптической линии связи: метки TM_1 , TM_2 , TM_3 и TM_4 . Иллюстрация описанного алгоритма представлена на рисунках 2 и 3.

Значение круговой задержки (T_0) распространения сигналов в волоконно-оптической линии связи с учётом времени между фиксированием моментов времени TM_2 и TM_3 , которое является внутренней задержкой, вносимой аппаратурой рассчитывается по формуле:

$$T_0 = TM_2 - TM_1 + TM_4 - TM_3.$$

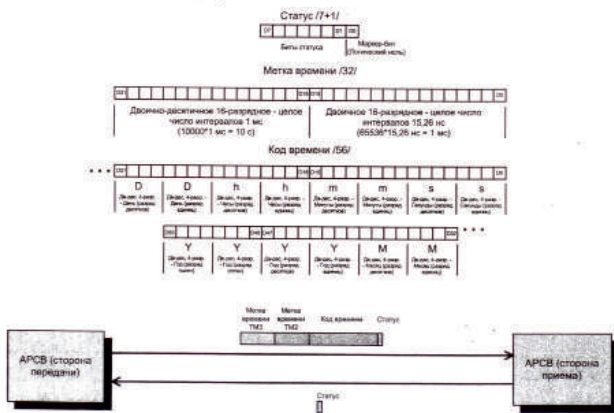


Рисунок 2 – Алгоритм работы метода дистанционного сличения

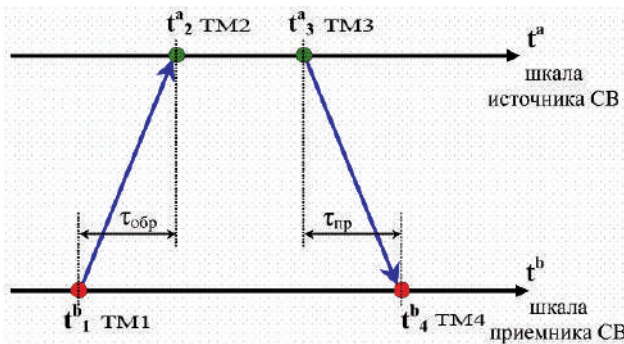


Рисунок 3 – Расчет временных соотношений между ведущей и ведомой аппаратурой

Если исходить из предположения, что задержка в прямом направлении равна задержке в обратном направлении, то задержка в каждом направлении в отдельности равна половине круговой задержки:

При наличии расхождения шкал времени передающего и приемного комплектов ($t^a = t^b \pm \Delta T$), то время прохождения сигнала в прямом направлении и обратном направлении будут различным ($TM_2 - TM_1 \neq TM_4 - TM_3$).

Пусть шкала времени приемника отличается от шкалы времени передатчика на ΔT , то есть:

$$TM_4 = TM_3 + TM_{3-4} \pm \Delta T, \text{ где } \Delta T = \frac{TM_{3-4} - TM_{1-2}}{2}.$$

ΔT – величина разницы шкал времени передатчика и приемника, то есть величина, на которую необходимо скорректировать шкалу времени приемного комплекта. Величина ΔT называется поправкой к шкале времени t^b относительно шкалы времени t^a .

Значение ΔT рассчитывается для каждого цикла обмена данными. Коррекция положения секундной метки осуществляется на основании усреднения значений ΔT за N измерений. Для текущего момента времени i .

Аппаратура включается в цепи передачи дуплексных каналов связи с пропускной способностью 2048 кбит/с (E12) для обмена вышеописанной информацией с аналогичной аппаратурой. Точность подстройки напрямую зависит от точности определения времени формирования меток и асимметрии задержки в цепи передачи сообщений от ведомой аппаратуры к ведущей и обратно. Блуждание фронтов сигналов на выходе оборудования, выделяющего синхросигнал из волоконно-оптической линии связи, как показали результаты испытаний, обычно составляет не менее 5 нс. Исходя из данной величины, точность определения времени во всех устройствах аппаратуры была принята в 15 нс с тем, чтобы имелся хотя бы трехкратный запас относительно шумов оборудования [6].

Достоинством описанного метода является отсутствие необходимости в синхронной работе ведущей и ведомой аппаратур.

Экспериментальные исследования сличения двух эталонов при помощи волоконно-оптической линии связи были проведены на Военном эталоне ВЭ-31-97. В эксперименте были задействованы стандарт частоты и времени Ч1-75, перевозимые квантовые часы на основе стандарта частоты и времени Ч1-1007, частотомеры Agilent 53132A и CNT-90 из состава эталона и аппаратура АРСВ, предоставленная ООО «АЛТО». Схема подключения аппаратуры представлена на рисунке 4.

Со стандарта частоты и времени Ч1-75 на АРСВ-Э-3000 поступает сигнал 5 МГц, который является опорой для формирования АРСВ сигнала 1 pps.

Также со стандарта частоты и времени Ч1-75 сигнал 5 МГц поступает на синхронизатор кварцевый Ч7-37, на основе которого синхронизатор формирует эталонную шкалу времени (эталонный 1 pps) и код времени. Шкала времени эталона и код времени с синхронизатора поступают на АРСВ для передачи по цифровой сети удаленному абоненту (второму эталону).

Со стандарта частоты и времени Ч1-1007 сигнал 5 МГц поступает на опорный вход АРСВ-Э-2100, из него формируется выходной сигнал 1 pps, подстроенный по фазе к сигналу с передающей АРСВ.

Комплекты аппаратуры АРСВ-Э-3000 и АРСВ-Э-2100 были соединены кабелями напрямую, то есть измерения проходили без задействования канала связи.

Предварительно сигналы 1 pps с АРСВ-Э-3000 (первый эталон) и АРСВ-Э-2100 (второй эталон) были сведены и расхождение сигналов составило 6 нс (рисунок 5).

Для удобства обработки информации в АРСВ-Э-2100 была введена дополнительная задержка в 30 нс и расхождение составило 36 нс (рисунок 6).

На рисунке 7 представлены расхождения выходных сигналов 1 pps АРСВ-Э-2100 и Ч1-1007, измеренные частотомером CNT-90 (линия 1), измерение характеристики отклонения временных интервалов прибором ИВО-2 на выходах потоков Е1 направления передачи блоков передачи сигналов времени АРСВ-Э2100 (линия 2) и АРСВ-Э-3000 (линия 3) и график введенных коррекций ведомой АРСВ, записанных программой обмена с аппаратурой АРСВ (линия 4).

Из рисунка 7 видно, что ШВ АРСВ за время эксперимента разошлись примерно на $45 \div 48$ нс (линии 2, 3), что как раз соответствует поведению ведущей АРСВ-Э-2100 (линия 4). На 4-ой линии четко видно, что за все время проведения эксперимента на ведущей АРСВ произошло 4 коррекции выходной ШВ.

Анализируя линии 1 и 4, можно сделать вывод, что они инвертны по отношению друг к другу относительно нуля. На основании этого можно аппроксимировать линию 1 и понять, что линия 3 будет огибающей линии 1. Таким образом, в комплексе аппаратура АРСВ позволяет сличать удаленные эталоны с погрешностью не более 15 нс.

На рисунке 8 представлена осциллофонограмма расхождения двух сигналов 1 pps с АРСВ-Э-3000 (первый эталон) и АРСВ-Э-2100 (второй эталон) в конце эксперимента.

Из рисунка 8 видно, что расхождение двух сигналов не превысило 15 нс (с учетом введенной задержки в 30 нс в ведомую АРСВ).

Таким образом, по результатам измерений можно сделать следующие выводы:

- предлагаемый метод может быть использован для сличения ШВ удаленных эталонов единиц времени и частоты;
- в существующей аппаратуре АРСВ реализован метод, обеспечивающий точность сличения ШВ с погрешностью не более 15 нс (без учета влияния канала передачи).
- Также необходимо отметить достоинства ВОЛС:
- высокая надежность аппаратуры;

- низкая стоимость в обслуживании;
- использование на разных расстояниях;
- постоянная готовность к использованию.

АРСВ обеспечивает [7]:

- сохранение информационной составляющей дуплексного канала связи с пропускной способностью 2048 кбит/с. Выбор любого из региональных бит Sa4... Sa8 для передачи сигналов времени;
 - ручную компенсацию асимметрии задержки дуплексного канала в прямом и обратном направлениях в диапазоне 1 с, с шагом ± 15 нс;
 - возможность расширения аппаратуры АРСВ без потери качества сигналов времени с помощью двух выходов формирователей сигналов времени, т.е. передача сигналов времени дополнительно на два картера аппаратуры АРСВ, что позволит увеличить количество направлений и выходов сигналов времени.
- Результаты предварительных исследований АРСВ показали, что метод передачи информации о точном времени для синхронизации шкал времени территориально разнесенных объектов (базовых станций цифровых сетей связи) на основе волоконно-оптических линиях связи, позволяет добиться синхронизации их опорных генераторов с погрешностями на уровне $10 \div 30$ нс, что позволяет обеспечить тактовую сетевую синхронизацию в сетях 5G различных стандартов связи. [8]

Применение методов частотно-временной синхронизации по волоконно-оптическим линиям связи для сетей сотовой связи, в условиях присутствия постоянных радиопомех навигационным сигналам, станет серьезной альтернативой получения синхросигналов базовыми станциями и позволит улучшить качество сотовой связи, как в существующих, так и в перспективных сетях.

Литература

1. Фокин А.П. Проблемы частотной и временной синхронизации в современных цифровых сетях связи поколения 4G и выше / Вестник метролога № 1, Менделеево, 2025. – С. 12–16.
2. Рыжков А.В., Шварц М.Л. Современные тенденции развития систем сетевой синхронизации в сетях электросвязи. От плезиосинхронных до когерентных сетей. / Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов № 4 – 2021 г.
3. Электронный ресурс: <https://www.kaspersky.ru/blog/gps-spoofing-protection/22674/> (дата обращения 20.01.2022).
4. Власов И.И., Птичников М.М. Измерения в цифровых сетях связи. / М.: Постмаркет, 2005. – 432 с.

5. Фокин А.П. Метод передачи эталонных сигналов времени по волоконно-оптическим линиям связи. / Тезисы докладов VI Всероссийской конференции «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2015) / С-Пб, 2015. – С. 103–104.

6. Протокол приемочных испытаний аппаратуры АРСВ на объекте заказчика, утвержденный Старшим вице-президентом Руководителем Департамента технического развития Павловым А.В. от 04.02.2009 г.

7. Аппаратура распределения сигналов времени. АРСВ. Руководство по эксплуатации. ИФМП.465275.020 РЭ / С-Пб. 2008 г. – 49 с.

8. Фокин А.П., Гришаев М.Г. Фокина Н.Н. Частотная и временная синхронизации цифровых сетях связи поколения 4G и выше в условиях противодействия сигналам ГНСС / i-methods/ Т. 15. № 4, С-Пб, 2024. – С. 1–14.

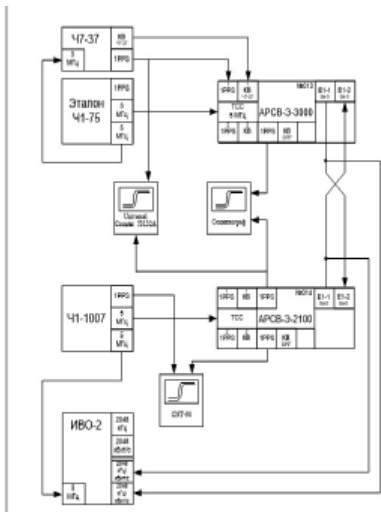


Рисунок 4 – Расчет временных соотношений между ведущей и ведомой аппаратурой

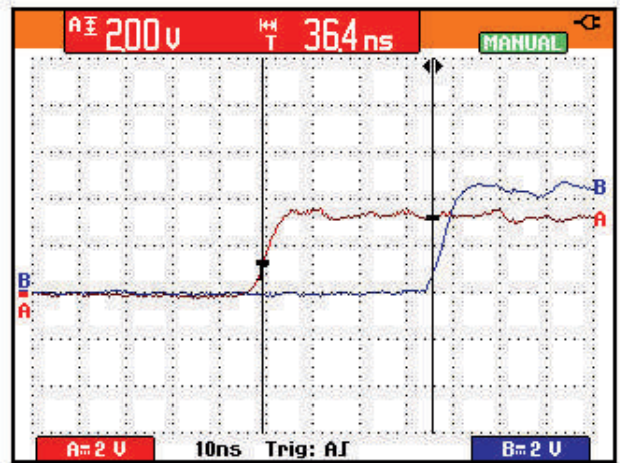


Рисунок 6 – Расхождение сигналов 1 pps после введения дополнительной задержки.

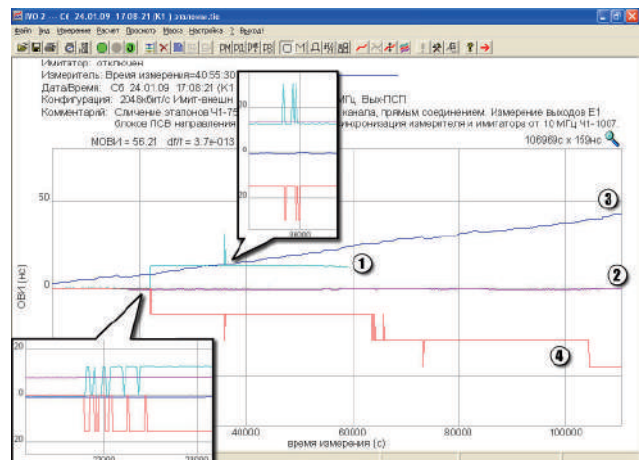


Рисунок 7 – Расхождения сигналов 1 pps и корректировка ведомой АРСВ

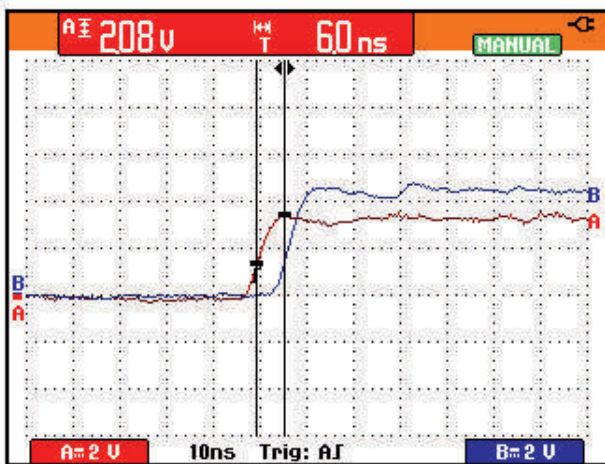


Рисунок 5 – Расхождение сигналов 1 pps до начала эксперимента.

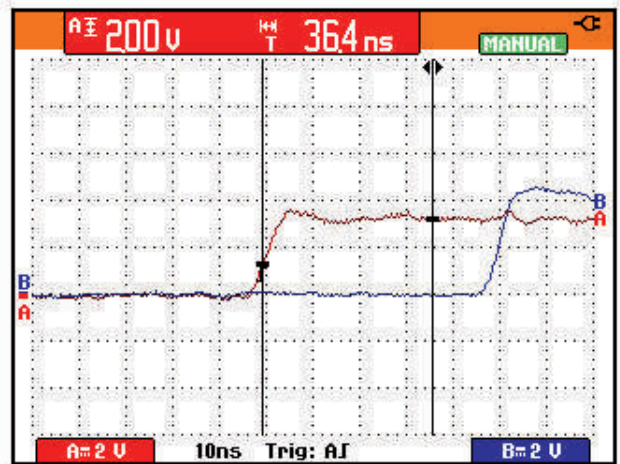


Рисунок 8 – Расхождение сигналов 1 pps по завершению эксперимента.

МЕТОД КАЛИБРОВКИ АВИАЦИОННЫХ ЛАЗЕРНЫХ КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СКАНИРУЮЩИХ СИСТЕМ, НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТРЁХМЕРНЫХ ЭТАЛОННЫХ ПОСТРОЕНИЙ («ТЕСТ-ОБЪЕКТОВ») A METHOD FOR CALIBRATING AVIATION LASER COORDINATE MEASURING SCANNING SYSTEMS BASED ON THE USE OF THREE-DIMENSIONAL REFERENCE CONSTRUCTIONS ("TEST OBJECTS")

Мазуркевич А.В., ФГУП «ВНИИФТРИ»
Mazurkevich A.V., FSUE «VNIIFTRI» (Russian Metrological
Institute of Technical Physics and Engineering).
E-mail: avm@vniiftri.ru
tel. +7 (495) 526-63-85, (24-30)

Аннотация: В статье предложен метод калибровки авиационных лазерных координатно-измерительных сканирующих систем на основе использования трёхмерных эталонных построений («тест-объектов»). Целью проведения калибровки, является уменьшение погрешности измерений высокоточных авиационных лазерных координатно-измерительных сканирующих систем в части определения координат точек отражения и измерений геометрических размеров наземных объектов. Разработанный метод позволяет уменьшить погрешность измерений авиационных сканирующих систем на величины от 10 до 30%, в зависимости от высоты полёта.

Annotation: The article proposes a method for calibrating aviation laser coordinate measuring scanning systems based on the use of three-dimensional reference structures ("test objects"). The purpose of the calibration is to reduce the measurement error of high-precision aviation laser coordinate measuring scanning systems in terms of determining the coordinates of reflection points and measuring the geometric dimensions of ground objects. The developed method makes it possible to reduce the measurement error of aviation scanning systems by values from 10 to 30%, depending on the flight altitude.

Ключевые слова: лазерная локация, авиационное лазерное сканирование, уменьшение погрешности геодезических измерений, построение трёхмерных моделей местности.

Keywords: laser location, aviation laser scanning, reduction of the error of geodetic measurements, construction of three-dimensional terrain models.

Современные авиационные лазерные координатно-измерительные сканирующие системы (далее – авиационные ЛКИС), реализующие принципы лазерного сканирования, позволяют проводить высокоточные относительные геодезические измерения земной поверхности площадью в несколько тысяч квадратных километров в течении одной недели, в то время как при использовании классического подхода на эту же работу ушло бы несколько месяцев или даже лет [1].

Соответственно, такие технологии в геодезии обладают возможностями, позволяющими быстро и эффективно выполнять оценку состояния измеряемых объектов, точно определять их геометрические размеры и пространственное положение в заданной системе координат. Одновременно, необходимо заметить, что совмещение технологий цифровой аэрофотосъемки и воздушного лазерного сканирования позволяют создавать цифровые модели и карты в рекордно короткие сроки с высокой точностью, которые в дальнейшем можно использовать в таких критических к срокам отраслях как прогнозирование или устра-

нение последствий чрезвычайных происшествий, природных катаклизмов, мониторинг опасных объектов, а также в интересах сферы обороны и безопасности.

Результатом лазерного сканирования является облако точек отражений лазерного луча от измеряемого объекта, полученное в условной системе координат авиационной ЛКИС (рисунок 1).

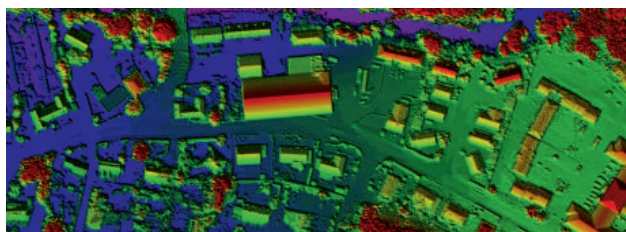


Рисунок 1 – Результат измерений авиационной ЛКИС.

Постобработка измерительных данных осуществляется с помощью специализированного программно-математического обеспечения (СПМО) с использованием синхронных измерительных данных, полученных от наземной базовой ГНСС станции, стоящей на пункте с известными коор-

динатами, в районе проведения работ авиационной ЛКИС. Что в свою очередь, позволяет после обработки результатов измерений определить координаты точек отражения ЛКИС в заданной геоцентрической системе координат. Такой подход качественно снизил как временные, так и физические затраты на камеральные работы [2].

В соответствии с Государственной поверочной схемой (ГПС) координатно-временных средств измерений, утвержденной приказом Росстандарта № 1374 от 07.06.2024 года, авиационные ЛКИС относятся к средствам измерения длины и приращений координат [3].

Основные метрологические характеристики авиационных ЛКИС приведены в таблице 1.

Таблица 1

Тип ЛКИС	Диапазон измерений	Погрешность измерений
Системы лазерные координатно-измерительные сканирующие авиационные	0÷10000 м	$\Delta_L = 0,01 \div 0,5$ м $\Delta_{пр} = 0,01 \div 10$ м

Примечание: – Предел допускаемой абсолютной погрешности измерений.

Исходя из анализа утвержденных типов авиационных ЛКИС, за последние десять лет, с использованием открытых данных из Федерального информационного фонда по обеспечению единства измерений (<https://fgis.gost.ru/>) [4], можно сделать вывод о том, что погрешность утвержденных типов данного вида СИ уменьшилась за указанный период в два и более раза. Что в свою очередь требует разработки новых методов и средств для их метрологического обеспечения. Кроме того, для обеспечения в дальнейшем данной динамики уменьшения погрешности измерений авиационными ЛКИС, необходимо обеспечить учет дополнительных составляющих погрешности измерений, которые ранее были пренебрежительно малы относительно основных метрологических характеристик авиационных ЛКИС, выраженных в виде погрешностей измерений длины и плоских углов, а в настоящее время уже обеспечивают значительный вклад в общий бюджет погрешности измерений таких СИ. Соответственно, обеспечив уменьшение таких дополнительных составляющих погрешности, возможно добиться заметного

уменьшения погрешности измерений современных высокоточных авиационных ЛКИС в целом.

При проведении измерений авиационными ЛКИС, значительный вклад в общий бюджет погрешности, помимо погрешности дальномера, оптического энкодера (угломера) и бортовой инерциально-спутниковой навигационной системы, вносит погрешность, обусловленная алгоритмами преобразования первичных измерительных данных в координаты точек отражения от земной поверхности в заданной системе координат (далее погрешность преобразования координат). Максимальное влияние данная погрешность оказывает на точность измерения координат в плане, т.к. погрешность по высоте частично компенсируется измерениями бортового лазерного дальномера авиационной ЛКИС. Для уменьшения погрешности преобразования координат, необходимо обеспечить проведение калибровки с применением высокостабильных трехмерных эталонов («тест-объектов»), например зданий с ровными покатыми крышами в форме тетраэдра или зданий, имеющих правильные геометрические формы, в виде куба или параллелепипеда и контурные линии, образованные прямыми углами между поверхностями, которые хорошо определяются на «сканах» (облаках точек) после постобработки результатов измерений ЛКИС. Так как измерения ЛКИС выполняются многократно с разных направлений и в условиях высокой динамики, то координаты точек отражения, полученные от поверхностей одного и того же объекта, трехмерную модель которого необходимо построить, после обработки результатов измерений, из-за влияния меняющейся во времени погрешности измерений ЛКИС, на каждом «скане» отличаются друг от друга. Построенные в программе модели объекта, полученные из разных измерительных пролётов как бы «троятся». Это следствие использования угломерно-дальномерного метода в измерениях и в результате чего получается нелинейная зависимость погрешности определяемых трёхмерных координат от углов ориентации луча авиационной ЛКИС в момент измерений, даже при сканировании в условно одной плоскости поперек вектору скорости ЛА. Эти составляющие погрешности возможно учесть с использованием штатного СПМО постобработки ЛКИС, но для этого требуется использовать корректные мето-

ды калибровки. Соответственно, для уменьшения погрешности измерений авиационной ЛКИС, необходимо обеспечить точное определение этих смещений трёхмерных моделей, полученных из разных полётов, относительно друг друга и эталонных значений координат. Для решения этой проблемы, в рамках статьи предложена методика проведения калибровки с использованием «тест-объектов», замаркированных специальными марками центры которых по каждой координате заранее измерены с необходимым запасом метрологической точности с помощью средств из состава ГЭТ 199–2024 и ГЭТ 218–2022. Что в свою очередь, после проведения измерений авиационной ЛКИС в ходе калибровки перед измерительным полетом, позволит определить отклонения на каждом «скане» по каждой координате относительно более точных координат центров марок в заданной системе координат. В дальнейшем, использование поправок, полученных в ходе калибровки, позволит, например, уточнить плановое и высотное положение объектов на трехмерных моделях (планах) городов с погрешностью менее 10 см.

Перед началом проведения калибровки углы зданий, линии перегибов, коньки крыш (контурные точки и линии), выбранные в качестве тест-объектов, равномерно маркируются с помощью черно-белых марок (рисунок 2), координаты центров которых можно точно определить на «сканах», полученных в каждом измерительном полёте авиационной ЛКИС. Координаты центров марок так же заранее определяются в заданной системе координат относительно геодезических пунктов эталонного пространственного полигона с помощью средств из состава государственного первичного эталона единицы длины ГЭТ 199–2024 и координат местоположения ГЭТ 218–2022.



Рисунок 2 – Специальная марка для авиационной ЛКИС.

Использование объёмных фигур («тест-объектов») обеспечивает выполнение измерений и калибровку ЛКИС одновременно по трем координатам X, Y и Z (Н). Кроме того, проведение калибровки на

плоской поверхности эталонного пространственного полигона, вносит дополнительную погрешность измерений в бюджет погрешности современных авиационных ЛКИС, вызванную значительной погрешностью самого полигона, используемого в качестве эталона координат. Что в свою очередь не всегда позволяет определить с необходимым запасом метрологической точности калибровочные поправки для авиационной ЛКИС на конкретный измерительный полет. Калибровочные поправки зависят от текущих (на момент измерительного полета) значений составляющих погрешности измерений авиационной ЛКИС, вызванных различными воздействующими факторами, внешних условий атмосферы, погрешностей навигационной системы, бортового стандарта частоты, лазерного дальномера, базовой станции и т.п. Измерения по плоской поверхности не позволяют определить погрешность преобразования координат для современных авиационных ЛКИС с необходимым запасом метрологической точности, т.к. плоская поверхность полигона отличается от идеальной плоскости. Построение трехмерной модели поверхности поля размером 1000 на 1000 метров, для создания специализированного полигона с необходимостью обеспечить субсантиметровую точность требует значительных разовых трудозатрат и кроме того, построение такого полигона не всегда возможно обеспечить в районе проведения измерений авиационной ЛКИС. Ранее, когда погрешность измерений авиационных ЛКИС была не менее 0,5 метров, погрешностью, обусловленной неровностью полигона, можно было пренебречь, или ее погрешность можно было определить с помощью геодезических СИ технического класса точности [5]. В данный момент погрешность авиационного сканера может составлять значения единиц сантиметров, соответственно, эталонная модель плоскости полигона со сторонами не менее километра должна быть построена (определена) с погрешностью порядка десяти миллиметров, что, в свою очередь, требует значительного времени на подготовку к проведению калибровки прецизионного дорогостоящего оборудования и высокой квалификации персонала. Кроме того, на плоской поверхности полигона сложнее выделять центры контурных точек из-за шумовой составляющей погрешности измерений, т.к. такие точки не имеют ярко выраженных трехмерных поверхностей, как, например, у здания правильной геометрической

формы в виде куба. По сути, из-за разности погрешностей измерений в части высотной составляющей и плановых координат, на ровной поверхности полигона получается усредненная плоская проекция по каждой координате, что в свою очередь приводит к большей погрешности при расчёте калибровочных поправок для авиационных ЛКИС. Для решения этой проблемы предлагается использовать «тест-объекты», которые представляют собой здания (сооружения) правильной формы, координаты характерных (углов, изгибов скатов крыш и т.п.) точек заранее измерены с необходимым запасом метрологической точности относительно высокостабильных геодезических пунктов с помощью средств из состава государственных первичных эталонов единицы длины ГЭТ 199–2024 и координат местоположения ГЭТ 2018–2022. Для определения погрешности сканера в части координатных измерений проводится калибровка до и после проведения измерений по назначению. Одновременно, «тест-объекты» с плоскими крышами позволяют определить погрешность бортового лазерного дальномера, за счет известной высоты здания. Вычитая значения расстояний, полученных дальномером от поверхности крыши и земной поверхности, мы получаем расстояние, которое возможно сравнить с заранее измеренной высотой здания с помощью средств из состава ГЭТ 199–2024 с необходимым запасом метрологической точности.

Калибровка авиационного сканера выполняется в следующей последовательности:

Измерения «тест-объектов» проводятся сериями, с изменением каждый раз курса на 90 градусов. Таким образом, каждый «тест-объект» измеряется со всех четырёх сторон. Такая серия повторяется не менее пяти раз. Таким образом, после обработки результатов с помощью штатного программного обеспечения авиационной ЛКИС получаем набор «сканов» (облаков точек лазерного отражения от поверхности тест объектов), координаты которых отличаются от координат характерных точек тест-объекта, измеренных в заданной системе координат. Высота полета при калибровке выбирается исходя из высоты полета, заложенной в ТЗ на проект, в интересах которого выполняется калибровка. Для оценки погрешности измерений авиационной ЛКИС, полученных с разных курсов несколькими сериями, требуется на поверхности «тест-объекта» выбрать не менее четырех харак-

терных точек (рисунок 3), и присвоить этим точкам в программе постобработки статус «эталон», и ввести координаты, полученные заранее с помощью средств из состава ГЭТ 199–2024 и ГЭТ 218–2022. Точки лазерного отражения, полученные при калибровочном полете, в проекте СПМО определить в качестве контролируемых.

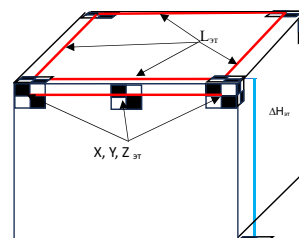


Рисунок 3 – Схема маркировки «тест-объекта».

Вычисление погрешности координат точек лазерного отражения выполняется средствами специального программного обеспечения относительно эталонных координат точек, расположенных на поверхности измеряемого тест-объекта. СКО и абсолютная погрешность измерений не должны превышать значений, нормируемых в описании типа для конкретного типа авиационной ЛКИС. Формулы расчёта погрешностей приведены далее по тексту.

Определение абсолютной погрешности измерений (значений калибровочных поправок) авиационной ЛКИС при определении пространственных координат производится по формуле (1):

$$\Delta_{\text{коорд}_j} = \left\{ \begin{array}{l} X_i - X_{\text{эт}_j} \\ Y_i - Y_{\text{эт}_j} \\ Z_i - Z_{\text{эт}_j} \end{array} \right\}, \quad (1)$$

где $\{X_i, Y_i, Z_i\}$ – значения пространственных координат j -й эталонной точки на поверхности тест-объекта, полученные с помощью калибруемого СИ при i -ом пролёте, m ;

$\{X_{\text{эт}_j}, Y_{\text{эт}_j}, Z_{\text{эт}_j}\}$ – эталонные значения пространственных координат j -й эталонной точки на поверхности тест-объекта.

Модуль погрешности измерений пространственных координат авиационной ЛКИС для i -го измерительного пролета (вектор пространственного смещения измеренной трёхмерной модели от эталонных значений тест-объекта) вычисляется по формуле (2):

$$\Delta V_i = \sqrt{\Delta X_i^2 + \Delta Y_i^2 + \Delta Z_i^2}, \quad (2)$$

где ΔX_i , ΔY_i , ΔZ_i – значения абсолютной погрешности измерений пространственных координат, м.

Определение случайной составляющей погрешности измерений, выраженной в виде среднего квадратического отклонения результата измерения (далее – СКО) пространственных координат калибруемого СИ, проводится по приведённому ниже алгоритму.

Определить СКО результата измерения пространственных координат калибруемым СИ по формуле (3), например, для координаты X:

$$S_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_{\text{изм}i} - \bar{X})^2}{n-1}}, \quad (3)$$

где $X_{\text{изм}i}$ – значения координаты X, полученные с помощью калибруемого СИ в i-ом измерительном пролёте, м;

n – количество измерений;

$\bar{X}$ – среднее арифметическое значение координаты X из серии измерений j-й эталонной точки, вычисляемое по формуле (4), например, для координаты X, м:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_{\text{изм}i}}{n}, \quad (4)$$

где $X_{\text{изм}i}$ – значения координаты X, полученные с помощью калибруемого СИ в i-ом измерительном пролёте, м;

n – количество измерений.

Аналогичным образом вычисляется среднее арифметическое значение из серии измерений для координат Y и Z.

Аналогично определяются СКО измерений координат Y и Z.

Для определения шумовой составляющей измерений авиационной ЛКИС определить СКО модуля погрешности местоположения для каждой j-й точки по формуле (5):

$$S_{\Delta V} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta V_i - \overline{\Delta V})^2}{n-1}}, \quad (5)$$

где ΔV_i – значения модуля погрешности измерений пространственных координат в i-ом измерительном пролёте, м;

n – количество измерений;

$\overline{\Delta V}$ – среднее арифметическое значение модуля погрешности измерения пространственных координат, вычисляемое по формуле (6), м:

$$\overline{\Delta V} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta V_i}{n}, \quad (6)$$

где ΔV_i – значения модуля погрешности местоположения, м;

n – количество измерений.

С помощью полученных данных проводится оценка погрешностей измерений авиационной ЛКИС требуемой точности измерений, рассчитанные калибровочные поправки по каждой координате, для конкретного сканера в конкретном измерительном проекте используются при обработке с помощью штатной СПМО. В результате при обработке основных измерительных данных, с учетом выявленных систематических погрешностей (используя полученные калибровочные поправки, каждую со своим знаком, по каждой координате), обеспечивается уменьшение погрешности измерений в части определения координат воздушным сканером от 10 до 30%, в зависимости от высоты полёта.

Калибровка авиационных ЛКИС для уменьшения погрешности измерений геометрических размеров объектов проводится с использованием «тест-объектов», эталонные длины на поверхности которых между центрами марок предварительно измерены с помощью средств из состава Государственного первичного специального эталона единицы длины ГЭТ 199–2024. Для определения погрешности измерений авиационной ЛКИС в части длины используются вычисленные с помощью штатной программы расстояния между центрами марок на «сканах».

Используя набор длин, полученный с помощью измерений с разных «сканов» авиационной ЛКИС, по которым по формуле (7) рассчитывается абсолютная погрешность измерений длины авиационными ЛКИС:

$$\Delta L_{i(j)} = L_{i(j)} - L_{\text{эт},j}, \quad (7)$$

где $L_{\text{эт},j}$ – значение длины, полученное на j – ом эталонном отрезке длины «тест-объекта» полигона с помощью средств из состава ГЭТ 199–2024, м;

$L_{i(j)}$ – значение длины, полученное в i – м измерительном полёте, на j – ом контрольном отрезке длины «тест-объекта» с помощью калибруемой авиационной ЛКИС, м.

При проведении анализа полученных значений погрешности выбираются максимальные значения абсолютной погрешности, полученные на эталонных отрезках длины между центрами марок на

поверхности «тест-объекта», которые считаются значениями абсолютной погрешности измерения геометрических размеров объектов (длины между точками на земной поверхности) авиационной ЛКИС.

СКО определяется как случайная составляющая результата измерения длины авиационной ЛКИС по формуле (8).

$$S_{Li} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (\Delta Li(j) - \overline{\Delta Li(j)})^2}{n(N-1)}}, \quad (8)$$

где $\overline{\Delta Li(j)}$ – среднее значение длины, полученное в i – ый измерительный пролёт, на j – ой эталонной длине «тест-объекта» с помощью калибруемой авиационной ЛКИС, m ;

j – номер эталонной линии на поверхности «тест-объекта»;

N – количество измерений, выполненных с помощью авиационного лазерного сканера на j – ой эталонной линии на поверхности «тест-объекта».

Среднее квадратическое отклонение измерений длины авиационной ЛКИС рассчитывается для каждого контрольного отрезка длины тестового полигона.

СКО и абсолютная погрешность измерений не должна превышать значений, нормируемых в описании типа для конкретного типа авиационной ЛКИС. В противном случае необходимо обеспечить коррекцию с помощью штатной программы коррекции параметров геометрических пропорций измеряемых объектов.

Погрешность измерений высоты наземных объектов с помощью авиационной ЛКИС проводится с использованием «тест-объекта» с ровной плоской крышей. Также должно соблюдаться условие, что вокруг «тест-объекта» должна располагаться плоская ровная твердая поверхность (автомобильная парковка с асфальтовым покрытием и т.п.). Перед проведением измерений крыша и поверхность асфальта (земля) маркируется специальными марками. Эталонная высота $\Delta H_{эт}$ между центрами марок, расположенными на крыше и земле, измеряется заранее, с необходимым запасом метрологической точности с помощью средств из состава ГЭТ 199–2024. После проведения измерений, для каждого «скана» (облака точек), полученного из разных пролетов, выделяется линейный участок шириной, равной удвоенному среднему расстоянию между

точками лазерного отражения, но не менее 1 метра [6], как показано на рисунке 4.

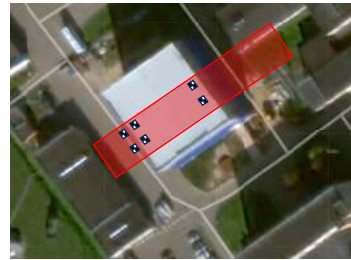


Рисунок 4 – Маркировка и схема линейного участка на поверхности «тест-объекта» для определения высотной составляющей погрешности авиационной ЛКИС.

В профиле сечения, в штатном ПО постобработки авиационной ЛКИС, точкам лазерных отражений от марок с меньшей высотой присваивается класс «земля», а точкам с большей высотой – класс «контрольные».

Погрешность измерений высоты с помощью авиационной ЛКИС рассчитываются аналогично по формулам (7–8).

В заключении хотелось бы обратить внимание, что в результате калибровки обеспечивается определение погрешностей авиационной ЛКИС по аналогии с координатно-измерительными машинами. С той лишь разницей, что в данной методике не эталон вращается под разными углами в поле зрения координатно-измерительной машины (КИМ), а исследуемая авиационная ЛКИС выполняет измерения с разных направлений трёхмерного эталонного объекта («тест-объекта»). Соответственно, на выходе имеется не облако точек на ровной поверхности полигона, а трехмерный объект и отклонение от его строго известных геометрических пространственных параметров точки с известными координатами, полученные из разных измерительных полетов. Что в свою очередь позволяет выделить дополнительные систематические составляющие погрешности в части измерения длины и координат авиационных ЛКИС с целью исключить их при обработке проекта [7], и за счёт этого уменьшить погрешность построения трёхмерных моделей местности с привязкой при необходимости к геоцентрическим системам координат. Таким образом, можно сделать вывод, что использование «тест-объекта» эквивалентно наблюдению меры масштаба высоты рельефа измеряемой поверхности. При адекватном использовании эта информация по-

звolyет уменьшить погрешность определения координат, особенно при использовании измерений авиационной ЛКИС, оснащённой лидарами с относительно большими углами отклонения от вертикали.

Разработанные методики прошли апробацию на эталонной базе ФГУП «ВНИИФТРИ». Полученные результаты приведены далее по тексту.

Результаты натурных измерений по разработанной методике приведены на графике 1. Результаты измерений представлены для калибровки, выполненной на двух типах полигонов. Измерения координат точек выполнялись авиационным сканером Leica в диапазонах высот до 6000 метров.

Из графика 1 видно, что погрешность измерений практически во всём диапазоне высот меньше после использования калибровочных поправок, полученных на полигоне, оснащённом «тест-объектами». Погрешность измерений приращений координат (координат) не превышает значений 10 см. Из чего можно сделать вывод, что для более корректного проведения испытаний и калибровок авиационных ЛКИС необходимо определять и учитывать систематическую погрешность, значение которой актуально только для конкретного измерительного (тестового) полета, что, в свою очередь, позволит уменьшить погрешность авиационных ЛКИС при проведении измерений за счёт уменьшения систематической составляющей погрешности. Для более точного определения погрешности в части плановой составляющей координат точек отражения необходимо использовать специализированные эталонные построения, выполненные в виде «тест-объектов».

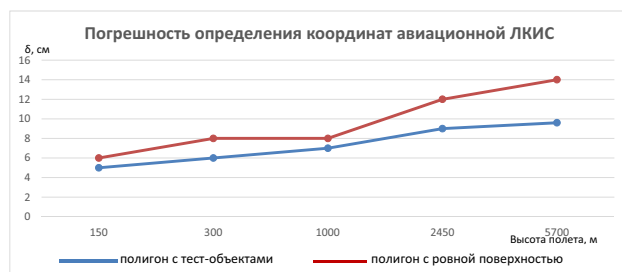


График 1

В результате проделанной работы, сотрудниками института разработаны и экспериментально исследованы методики калибровки, обеспечивающие уменьшение погрешностей измерений длины, приращений координат, определения координат точек лазерного отражения авиационными ЛКИС на основе использования эталонных геодезических построений («тест-объектов»), что, в свою очередь, обеспечивает оперативное построение трёхмерных моделей городов и участков местности с погрешностью менее 10 см.

Литература

1. Жуков А.И. Возможности и преимущества лазерного сканирования. Сборник Научное обеспечение агропромышленного комплекса. Сборник статей по материалам 76-й научно-практической конференции по итогам НИР за 2020 год. В 3-х частях. Отв. за выпуск А.Г. Кощаев. – Краснодар. – 2021. – С. 409 – 410.
2. Егоров А.В., Ядрихинская Ю.С. Применение данных воздушного лазерного сканирования при картографировании городов. Материалы международной научно-технической конференции «Цифровая реальность: космические и пространственные данные, технологии обработки». – Иркутск, 2021. – С. 25–26.
3. Приложение к приказу Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (Ростандарта) от «07» июня 2024 г. № 1374 «Об утверждении Государственной поверочной схемы для координатно-временных измерений». Государственная поверочная схема для координатно-временных измерений. – Москва. – 2024. – С. 12.
4. Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений (ФИФ). <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry>.
5. Комиссаров А.В. Лазерное сканирование и трехмерное моделирование. Учебно-методическое пособие. – Новосибирск. – СГУТиТ, 2020. – С. 16.
6. Ульрих А.А. Информационное наполнение облака точек при воздушном лазерном сканировании. Журнал «Геоматика», № 1. – Москва. – Компания «Совзонд», 2016. – С. 38–53.
7. И.В. Безменов. Быстрый алгоритм очистки от выбросов измерительных данных: поиск оптимального решения с минимальным количеством отбракованных результатов измерений. Научный журнал «Альманах современной метрологии», № 4(36). – Менделеево. – 2023. – С. 96.

ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СПЕКТРАЛЬНОГО ИНТЕРВАЛА МОНОХРОМАТОРА SUGGESTIONS FOR OPTIMIZING THE CHARACTERISTICS OF THE SPECTRAL RANGE OF THE MONOCHROMATOR

Шагаев В.Г., научный сотрудник ФГБУ «ГНМИЦ» Минобороны России
Shagaev V.G., research associate of the Federal State Budgetary Institution «GNMC» of the Russian Ministry of Defense
E-mail: shagaev.volodya@inbox.ru, тел. +7 (930) 979-89-97
E-mail: shagaev.volodya@inbox.ru, tel. +7 (930) 979-89-97

Аннотация: проанализировано влияние параметров монохроматора изображения на ширину и положение выделяемого спектрального интервала. Предложены подходы к оптимизации характеристик спектрального интервала.

Annotation: The effect of image monochromator parameters on the width and position of the selected spectral interval is analyzed. Approaches to optimizing the characteristics of the spectral range are proposed.

Ключевые слова: спектральный интервал, монохроматор, длина волны, полоса пропускания.

Keywords: spectral range, monochromator, wavelength, bandwidth.

При различных видах испытаний существует необходимость определения спектрального интервала оптико-электронных приборов. В связи с этим применение спектроскопии с пространственным разрешением (СПР) становится более востребованной для сферы обороны и безопасности. Актуальной темой является разработка монохроматора изображения – прибора для дисперсионной спектральной фильтрации. Известен метод получения изображения пространственной области в ограниченном спектральном диапазоне, основанный на вычитании дисперсии при обратном прохождении через оптическую систему. В плоскости промежуточного изображения дисперсионной оптической системы формируется совокупность смещенных друг относительно друга спектральных изображений протяженного входного окна. Выделенная из нее посредством щелевой маски часть пучков направляется обратно через эту же оптическую систему, формируя на выходе изображение входного окна в ограниченном спектральном диапазоне. Достоинствами данного метода являются повышенный спектральный контраст, взаимная независимость пространственного и спектрального разрешения (благодаря чему даже широкое входное окно не влияет на ширину спектральной полосы пропускания), при разработке схемных решений используются простые оптические элементы: сферические и плоские зеркала, плоская отражательная дифракционная решетка. При этом допускается вариация спектрального разрешения в широких пределах, в том числе оно может

быть относительно невысоким (для рутинных задач мультиспектральной съемки достаточным можно считать предел разрешения на уровне 10 нм – современные мультиспектральные сенсоры обеспечивают от 20 до 75 нм в видимом диапазоне) [1, 2].

По результатам проведенных ранее исследований получены выражения для спектральной полосы пропускания $\Delta\lambda$ и максимального спектрального охвата системы с дифракционной решеткой. В то же время, остался не затронутым ряд вопросов о влиянии параметров системы на положение границ интервала и об оптимальных вариантах реализации оптической системы. Последующие выводы основаны на полученном в [3] выражении, описывающем положение спектрального интервала, в котором изображается точка объекта:

$$\frac{b}{kq} \left(x'_1 + \frac{q}{p} x'' + qC \right) \leq \lambda \leq \frac{b}{kq} \left(x'_2 + \frac{q}{p} x'' + qC \right).$$

Здесь $p = \frac{f_{\text{col}}}{\cos \alpha}$, $q = \frac{f_{\text{cam}}}{\cos \beta}$, $C = \sin \alpha + \sin \beta$, x' – координата в плоскости промежуточного изображения (индексы 1 и 2 соответствуют краям осуществляющего пространственную фильтрацию отверстия в маске), x'' – координата в плоскости изображения, b – постоянная решетки, k – порядок дифракции, f_{col} , f_{cam} – фокусное расстояние, соответственно, коллиматорного и камерного объективов монохроматора, α – угол падения светового пучка на решетку, β – угол дифракции. Из этого выражения рассчитывается ширина выделяемой спектральной полосы в каждой точке поля изображения

$$\Delta\lambda = \frac{b \cos \beta}{k f_{cam}} \Delta d, \quad (1)$$

где Δd – диаметр отверстия в маске, а также смещение спектрального интервала на протяжении изображения

$$\Delta\lambda_{shift} = \frac{b \cos \alpha}{k f_{col}} \Delta x'', \quad (2)$$

где $\Delta x''$ – ширина изображения (выходного окна). Спектральный интервал, присутствующий в полосе пропускания на всем протяжении поля изображения, можно оценить как

$$\frac{b}{kq} \left(x'_1 + \frac{q}{p} x''_2 + qC \right) \leq \lambda \leq \frac{b}{kq} \left(x'_2 + \frac{q}{p} x''_1 + qC \right),$$

где x''_1, x''_2 – координаты краев поля изображения, а его ширина равна

$$\Delta\lambda_c = \frac{b \cos \beta}{k f_{cam}} \Delta d - \frac{b \cos \alpha}{k f_{col}} \Delta x''. \quad (3)$$

Из (1) и (2) следует, что характеристики выделяемого спектрального интервала зависят как от условно фиксированных параметров (ширины апертуры и отверстия в маске, фокусного расстояния объективов, периода решетки), так и от параметров, изменяющихся при сканировании рабочего спектрального диапазона (угол падения на дифракционную решетку и угол дифракции). При дальнейшем изложении используются допущения о малости размеров отверстия в маске, поля объекта и поля изображения по сравнению с фокусным расстоянием, так что вариацией углов α и β в пределах пучка будем пренебрегать.

Обозначим ψ угол между падающим и дифрагированным пучками. «Снизу» он ограничен апертурой оптических элементов и размерами системы, «сверху» – эффективностью дифракции при скользящих углах падения и габаритами системы. Примем, что $\alpha > 0$ и $\psi > 0$. Тогда при $\beta < \alpha$ угол $\psi = \alpha - \beta$ и (1) приобретает вид:

$$\Delta\lambda = \frac{b \cos(\alpha - \psi)}{k f_{cam}} \Delta d,$$

из чего следует, что с увеличением α ширина полосы возрастает при $\alpha < \psi$, убывает при $\alpha > \psi$ и максимальна при $\alpha = \psi$ (пучок с длиной волны $\lambda = b \sin \alpha$ дифрагирует нормально к решетке). Минимальная вариация $\Delta\lambda$ в рабочем спектральном диапазоне достигается при симметричном относительно $\alpha = \psi$ угле падения на решетку на его краях ($\alpha \pm \Delta\alpha$).

Оценка численного значения вариации $\Delta\lambda$ проведена на примере такого симметричного относи-

тельно $\alpha = \psi$ отклонения решетки ($\alpha > \beta$). Уравнения решетки для краевых длин волн

$$\begin{cases} \frac{\lambda_1}{b} = \sin \alpha_1 + \sin(\alpha_1 - \psi), \\ \frac{\lambda_2}{b} = \sin \alpha_2 + \sin(\alpha_2 - \psi), \\ \alpha_1 = \alpha - \Delta\alpha, \quad \alpha_2 = \alpha + \Delta\alpha. \end{cases}$$

Отсюда угол поворота решетки, обеспечивающий охват половины диапазона $[\lambda_1, \lambda_2]$,

$$\sin \Delta\alpha = \frac{(\lambda_2 - \lambda_1)}{2b(1 + \cos \alpha)} = \frac{(\lambda_2 - \lambda_1)}{2b(1 + \cos \psi)}.$$

Здесь и далее оценку будем проводить на примере оптической системы, близкой к описанной в [4] (дифракционная решетка 1200 штр./мм, фокусное расстояние объективов 333,5 мм, спектральный охват 400 нм, $\alpha = \psi = 39^\circ$). Тогда $\Delta\alpha = 7,76^\circ$, то есть, для охвата всего спектрального диапазона необходим поворот решетки на $15,5^\circ$: от $31,2^\circ$ до $46,76^\circ$ (что соответствует диапазону от 319,6 до 719,6 нм с центральной длиной волны 524,4 нм).

Относительное изменение ширины спектральной полосы можно оценить, подставив в (1) значения β для точек, в которых $\Delta\lambda$ достигает экстремума в рабочем спектральном диапазоне. В случае симметричного поворота решетки относительно $\alpha = \psi$ максимум ширины полосы достигается при $\beta = \alpha - \psi = 0$ и будет равен

$$\Delta\lambda_{max} = \frac{b \Delta d}{k f_{cam}}. \quad (4)$$

На краю диапазона $\Delta\lambda$ минимальна и составляет

$$\Delta\lambda_{min} = \frac{b \cos \beta}{k f_{cam}} \Delta d = \frac{b \cos \Delta\alpha}{k f_{cam}} \Delta d. \quad (5)$$

Из (4) и (5) получаем

$$\frac{\Delta\lambda_{max}}{\Delta\lambda_{min}} = \frac{1}{\cos \Delta\alpha}. \quad (6)$$

К примеру, при $\Delta\alpha = 7,76^\circ$ отношение равно 1,01, то есть, вариация $\Delta\lambda$ на протяжении рабочего спектрального диапазона составляет около 1%.

Поскольку смещение спектральной полосы пропускания на протяжении поля изображения пропорционально $\cos \alpha$ (2), то при $\alpha = 0$ оно максимально, а при увеличении α уменьшается (рассматриваем случай $\alpha > 0$). Иными словами, при постоянном шаге поворота решетки расстояние между «соседними» спектральными каналами будет отличаться на разных участках рабочего спектрального диапазона.

Относительное смещение полосы при переходе от одного края диапазона к другому изменяется в

$$\frac{\Delta\lambda_{shift1}}{\Delta\lambda_{shift2}} = \frac{\cos \alpha_1}{\cos \alpha_2} \quad (7)$$

раз. В частном случае симметричного относительно $\alpha = \psi$ диапазона

$$\frac{\Delta\lambda_{shift1}}{\Delta\lambda_{shift2}} = \frac{\cos(\alpha - \Delta\alpha)}{\cos(\alpha + \Delta\alpha)} = 1 + \frac{2}{\frac{1}{\operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \Delta\alpha} - 1}. \quad (8)$$

Вид данной зависимости для $\alpha \in [20^\circ; 70^\circ]$ приведен на рисунке 1. Для приближения отношения (8) к 1 необходимо уменьшать α (при фиксированной величине $\Delta\alpha$).

В частности, при $\alpha = 39^\circ$ и $\Delta\alpha = 7,76^\circ$ отношение приближенно равно 1,25, то есть, смещение ширины полосы на протяжении детектора изменяется на 25% на всем рабочем спектральном диапазоне. А именно, при полуширине пропускаемой спектральной полосы 2,5 нм (ширина отверстия в маске 1,0 мм, ширина поля изображения 5,32 мм) ее охват на коротковолновом краю диапазона будет изменяться от 312,7 нм до 324,1 (сдвиг на 11,4 нм на протяжении поля изображения), а на длинноволновом краю от 713,8 до 722,9 нм (сдвиг на 9,1 нм).

Интерес представляет и такая характеристика системы, как смещение спектральной полосы на протяжении поля изображения относительно ее ширины:

$$\frac{\Delta\lambda_{shift}}{\Delta\lambda} = \Gamma_g \frac{\Delta x''}{\Delta d} = \frac{\cos \alpha}{\cos(\alpha - \psi)} \frac{\Delta x''}{\Delta d} = \frac{1}{\cos \psi + \sin \psi \operatorname{tg} \alpha} \frac{\Delta x''}{\Delta d}, \quad (9)$$

где Γ_g – увеличение дифракционной решетки. Вид функции (9) для $\alpha \in [20^\circ; 70^\circ]$ при $\Delta x''/\Delta d = 1$ приве-

ден на рисунке 2. В частности, для $\alpha \sim 38^\circ$ варьирование угла ψ практически не сказывается на величине отношения. С другой стороны, для больших ψ угол α желательно увеличивать, для меньших ψ – уменьшать, то есть, стремиться к минимальному углу дифракции. Негативными факторами при увеличении α могут являться уменьшение дифракционной эффективности, габаритов системы, а также описанная вариация смещения полосы на протяжении детектора. Более существенным фактором в данном случае является величина отношения $\Delta x''/\Delta d$. Размер изображения $\Delta x''$ диктуется компромиссом между размером охватываемой пространственной области и увеличением абберационных искажений изображения на периферии поля. Ширина отверстия в маске в направлении дисперсии Δd определяется необходимой шириной полосы пропускания при заданной дисперсии решетки, а также допустимым количеством рассеянного света (чем меньше ширина, тем меньше рассеянного света). Уменьшение ширины кадра относительно ширины отверстия в маске ведет к уменьшению пространственного охвата системы и увеличению количества рассеянного света в системе, поэтому не всегда целесообразно. В таких условиях основным фактором, допускающим вариацию, является Γ_g .

Указанные особенности полосы пропускания монохроматора изображения необходимо учитывать как при единовременной съемке (регистрация всей картины в ограниченном спектральном диапазоне при фиксированном положении решетки), так и при регистрации полного куба

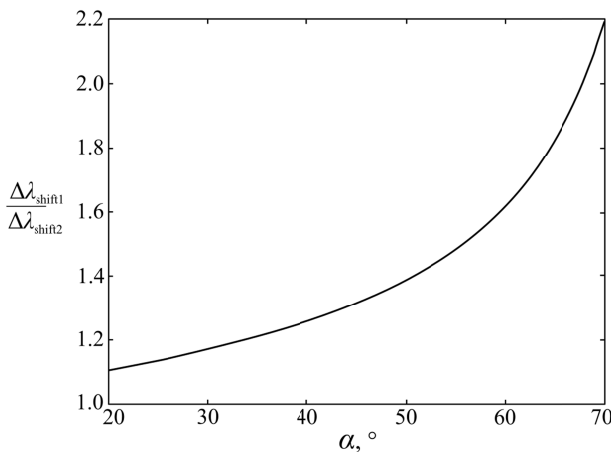


Рисунок 1 – Относительное смещение пропускаемой спектральной полосы при различных углах α падения пучка на дифракционную решетку ($\Delta\alpha = 7,76^\circ$)

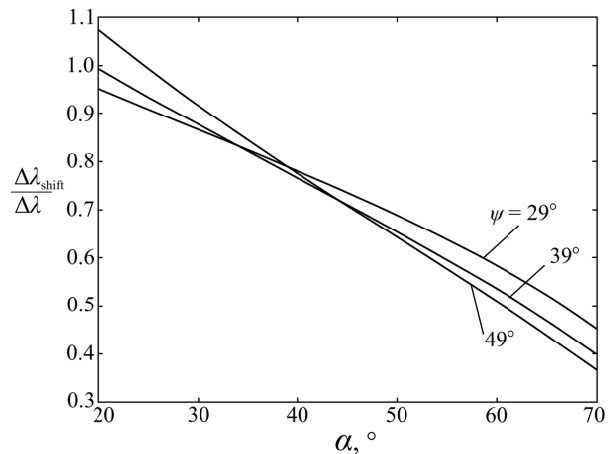


Рисунок 2 – Отношение смещения спектральной полосы пропускания на протяжении детектора к ее ширине при различных углах ψ

данных. При единовременной съемке необходимо обеспечить:

- минимальное ослабление интересующей спектральной полосы на всем протяжении поля изображения;
- максимальное ослабление сигнала в «посторонних» спектральных полосах, который может исказить получаемую информацию.

Из этого следует, что

- параметры системы должны обеспечивать «падение» искомой спектральной полосы в интервал $\Delta\lambda_c$ (3), либо интенсивность искомой спектральной полосы не должна существенно изменяться в пределах полосы пропускания на всем протяжении поля изображения;
- отношение (9) необходимо уменьшать, чтобы понизить вероятность регистрации побочных спектральных полос;
- при планировании измерений необходимо учитывать в наблюдаемой картине возможное наличие излучения с полосой, отстоящей от искомой менее чем на $\Delta\lambda_{\text{shift}}$ (убедиться, что его интенсивность незначительна или обеспечить фильтрацию).

При регистрации полного объема данных теряет актуальность фактор смещения границ регистрируемого спектрального интервала на протяжении поля изображения, поскольку «пропущенный» интервал $\Delta\lambda_{\text{shift}}$ может быть зарегистрирован при другом положении диспергирующего элемента (для этого шаг поворота решетки должен обеспечивать полное перекрытие спектрального диапазона). Однако в данном случае могут сказываться факторы изменения ширины полосы пропускания (6) и смещения полосы пропускания на протяжении поля изображения (7) при повороте дифракционной решетки. Как показано выше, первый из них по величине составляет единицы процента от ширины спектральной полосы, так что его влияние на процесс измерения можно считать малосущественным. Второй имеет большую величину. Например, в про-

делированной системе при повороте решетки с шагом, достаточным для полного перекрытия спектрального диапазона на длинноволновом краю, на коротковолновом краю наблюдается «выпадение» из зарегистрированного куба данных спектральных элементов с шириной полосы порядка от 8 до 10% от $\Delta\lambda$. Для значительной части рутинных лабораторных измерений, в которых регистрируются спектральные элементы с полушириной не менее $\Delta\lambda$, это представляется малосущественным, для остальных можно увеличить количество шагов поворота решетки. Перспективным подходом к минимизации данного фактора является регистрация куба данных непрерывным поворотом диспергирующего элемента, что может быть предпочтительнее и с точки зрения упрощения технической реализации.

Таким образом, изучение влияния параметров системы на положение границ спектрального интервала, а также определение оптимальных вариантов реализации оптической системы, являются актуальными в контексте улучшения метрологических характеристик спектральной полосы пропускания монохроматора изображения.

Литература

1. Гулис И.М., Купреев А.Г., Костюкевич А.Г. Двойной монохроматор изображения с вычитанием дисперсии // Вестник Белорусского государственного университета. Серия 1. – 2011. – № 2. – С. 19–23;
2. Markham B.L., [et al.] The landsat data continuity mission operational land imager (OLI) radiometric calibration // Proc. IEEE Geosci. Remote Sens. Symp., 25–30 July 2010, Honolulu, USA. – IEEE, 2010. – P. 2283–2286;
3. Гулис И.М., Купреев А.Г. Спектральная селекция в монохроматоре изображения с вычитанием дисперсии // Вестник Белорусского гос. ун-та. Серия 1. – 2014. – № 3. – С. 3–7;
4. Гулис И.М., Купреев А.Г. Малоабберрационный монохроматор изображения с вычитанием дисперсии на основе осесимметричной схемы // Журнал прикладной спектроскопии. – 015. – Т. 82, № 1. – С. 135–140.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭТАЛОННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ РАССЕЯНИЯ В РЕЗОНАНСНОЙ ОБЛАСТИ ЧАСТОТ A MATHEMATICAL MODEL OF REFERENCE RADAR REFLECTORS USED TO MEASURE THE EFFECTIVE SCATTERING AREA IN THE RESONANT FREQUENCY DOMAIN

Михайлов Д.Б.,
Mikhaylov D.B., FSBI «MSHC» of Russia Federation Ministry of Defense
E-mail: nmetrolog@yandex.ru; mailto:32gnii@mil.ru,
tel. +7 985 681 23 01

Аннотация: представлена математическая модель эталонных радиолокационных отражателей, проверена ее сходимость с аналитическим расчетом и экспериментальными данными в резонансной области частот.

Annotation: a mathematical model of reference radar reflectors is presented, and its convergence with analytical calculations and experimental data in the resonant frequency domain is verified.

Ключевые слова: метрологическое обеспечение, радиолокационный отражатель, эффективная площадь рассеяния.

Keywords: metrological support, radar reflector, effective scattering area.

Измерение эффективной площади рассеяния (ЭПР) занимает одно из ведущих мест среди основных видов радиоизмерений в области сверхвысоких частот. Точность измерений ЭПР в значительной степени определяет возможность получения (за счет системы мер, включающих увеличение количества и улучшения качества) информации при решении задач идентификации и классификации объектов.

Анализ методов измерений радиолокационных характеристик рассеяния, наиболее обобщенной из которых является эффективная площадь рассеяния, позволяет сделать вывод, что наибольшее распространение получил метод замещения. Это связано с тем, что при данном методе измерений устраняется влияние многих источников погрешностей. В тоже время возрастает влияние нестабильности параметров радиотехнической и измерительной аппаратуры в процессе измерений и калибровки, и появляется особенный источник, связанный с принципом определения действительных значений калибровочных и эталонных радиолокационных отражателей (мер ЭПР).

Передача единицы ЭПР заключается в сравнении откликов сигналов, излучаемых поочередно, на измеряемый объект и на калибровочную (эталонную) меру с известным значением ЭПР, полученным расчетным методом.

Расчет ЭПР в большинстве случаев заключается в решении соответствующей дифракционной задачи эвристическими методами с последующим

определением поляризационных составляющих рассеянного поля и дальнейшим вычислением ЭПР по формуле [1]:

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \left| \frac{E_r}{E_i} \right|^2, \quad (1)$$

где R – расстояние до объекта; E_r , E_i – напряженность рассеянного и падающего и падающего поля соответственно.

Точность расчета ЭПР мер, а также наличие строгого решения дифракционной задачи во всех областях частот (низкочастотной, резонансной, высокочастотной) дает удовлетворительные результаты лишь для ограниченного набора отражателей, в частности сферического и дискового. Для цилиндрических, уголкового и линзовых отражателей используемые методы расчета могут обеспечить приемлемые погрешности лишь при определенных условиях, в тоже время используемые аналитические выражения применимы только для высокочастотной области, их определяют с рядом допущений и упрощений, что как следствие приводит к дополнительным составляющим погрешности измерений ЭПР.

Более того, в настоящее время не разработаны методики, позволяющие передавать единицу ЭПР в резонансной области частот (где характерные размеры меры ЭПР сравнимы с длиной волны $0,1 < 2\pi a/\lambda < 10$, где a – наибольший размер тела, λ – длина волны) от существующего эталона единиц эффективной площади рассеяния средствами измерений ЭПР, к которым относятся радиолока-

ционные измерительные комплексы различного назначения. Актуальность разработки таких методик связана с необходимостью передачи единицы ЭПР некоторым радиолокационным измерительным комплексам, однако существующие в составе эталона меры ЭПР не позволяют в полном объеме решить данную задачу в связи с их разработкой под высокочастотный диапазон [2].

Применение современного уровня развития вычислительных и программных средств позволяет для решения дифракционных задач использовать методы математического моделирования отражательных характеристик объектов [3]. Таким образом, предлагается эталонные меры ЭПР представить в виде их геометрических моделей, каждая из которых будет состоять из уникального набора электрофизических параметров, характеризующих ее как радиолокационный объект. Внешнюю поверхность меры ЭПР предлагается представить в виде совокупности простейших геометрических примитивов (фасетов). Общий вид геометрических моделей мер ЭПР (сферы, цилиндра, углового отражателя) представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Геометрические модели мер ЭПР

Следующим этапом предлагаемого метода является создание математической модели мер ЭПР с учетом электродинамических и статистических свойств фасетов для расчёта рассеянного поля. Постановка задачи отражения электромагнитной волны от участка протяженной выпуклой поверхности меры представлена на рисунке 2.

Фасеты (треугольники) $A'B'C'$ и $A'C'D$ состоят из образующих их вершин, средних точек, нормалей к их плоскостям, площадей и индексов, определяющих принадлежность по отношению

к элементу рассматриваемой меры. Падающая на фасеты плоская волна характеризуется вектором поляризации $\vec{e}_i$ и направлением распространения $\vec{r}_i$. Отраженная от фасетов волна имеет локальный вектор поляризации $\vec{e}_s$, характеризуется направляющим вектором $\vec{r}_s$, который проводится из средней точки треугольника в точку расположения приемной антенны.

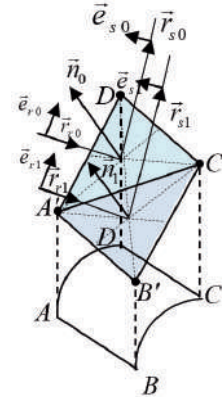


Рисунок 2 – Представление участка выпуклой поверхности меры ЭПР в виде двух треугольников

Расчет результирующего электромагнитного поля рассеяния для одного фасета может быть сформулирован как сумма трех компонентов (физической оптики, физической теории дифракции, метода краевых волн) с учетом их векторной природы (направления поляризации):

$$E_{\text{расс}} = E_{\text{ФО}} + E_{\text{ФТД}} + E_{\text{МКВ}}, \quad (2)$$

где $E_{\text{ФО}}$ – поле, рассчитанное методом физической оптики (основное отражение от поверхности),

$E_{\text{ФТД}}$ – поле, обусловленное дифракцией на ребрах треугольника (физическая теория дифракции),

$E_{\text{МКВ}}$ – поле, связанное с краевыми волнами (метод краевых волн).

Первая компонента соотношения (2) представляет собой величину результирующего поля для всех плоских элементов фасетов [4, 5]:

$$E_{\text{ФО}} = \left(\frac{ike^{-ikr}}{4\pi r} \cdot (\hat{k} \times J_s) \times \hat{r} \cdot A \cdot \text{sinc} \left(\frac{ka}{2} (\hat{k} - \hat{r}) \cdot d_1 \right) \cdot \left(\frac{kb}{2} (\hat{k} - \hat{r}) \cdot d_2 \right), \quad (3)$$

где k – волновое число;

J_s – поверхностный ток;

$\hat{k}$ и $\hat{r}$ – направления падающей и рассеянной волн;

a и b – длины сторон треугольника, связанные с его геометрией;

d_1 и d_2 – векторы сторон треугольника.

$\text{sinc}(x)$ – учет интерференции в пределах рассматриваемого фасета.

E_0 – вектор поляризации приемной антенны.

Вторая компонента учитывает поле дифракции на ребрах (в случае расчета меры в форме цилиндра).

дра или двугранного уголкового отражателя). Так, для каждого ребра треугольника длиной $A'C'$:

$$E_{ФТД} = \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} \cdot D \cdot (E_{над} \cdot e^{jk\hat{r}r_c}) \cdot A'C', \quad (4)$$

где D – дифракционный коэффициент, зависящий от углов падения и отражения;

r_c – центр ребра $A'C'$.

Третья компонента используется для учета вклада от ползущих волн ребер фасеты:

$$E_{МКВ} = \sum_{m=1}^3 \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} C_m \cdot (E_{над} \cdot e^{jk\hat{r}r_m}) \cdot \Delta L_m, \quad (5)$$

где C_m – коэффициент возбуждения краевой волны для m -го ребра, определяемый через дифракционные коэффициенты Уфимцева;

ΔL_m – эффективная длина взаимодействия, зависящая от длины волны.

Тогда итоговое поле для фасетной модели эталонной меры ЭПР будет иметь вид:

$$\sigma_{эм} = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{\left| \sum_{n=1}^N (E_{FO}^{(n)} + E_{ФТД}^{(n)} + E_{МКВ}^{(n)}) \right|^2}{|E_i|^2} \quad (6)$$

В связи с тем, что для меры ЭПР в форме сферы есть строгое решение дифракционной задачи с высокой точностью строгими методами, предлагается ее использовать при проверке адекватности результатов цифрового моделирования.

Для подтверждения работоспособности предлагаемого метода проведено моделирование эталонной меры (сфера радиусом 18 мм в диапазоне частот от 1 до 4 ГГц), а также аналитического расчета (строгими методами), которые предлагается сравнить с натурным экспериментом, проведенным на радиолокационном измерительном комплексе.

Результаты аналитического расчета, математического моделирования и натурального эксперимента представлены на рисунке 3.

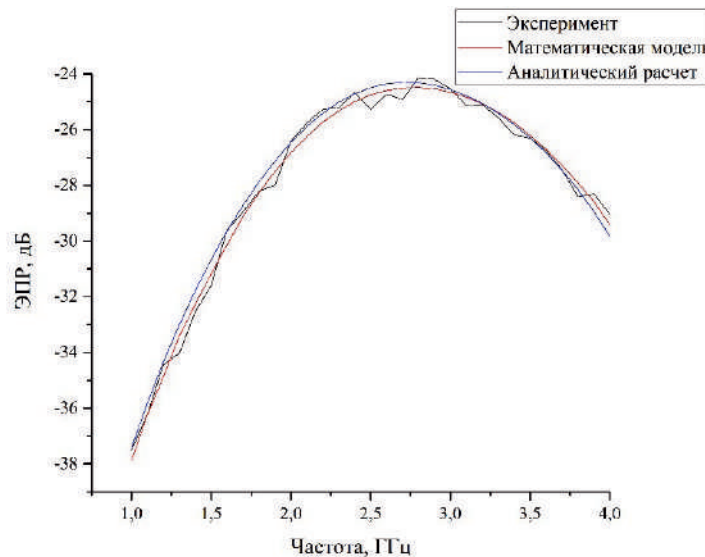


Рисунок 3 – Результаты расчетов и моделирования мер ЭПР

Полученные результаты позволяют сделать вывод о сходимости результатов в пределах 0,5 дБ, что соответственно свидетельствует о правильности предложенного метода и возможности проведения дальнейших исследований для эталонных мер других форм (цилиндров, двугранных уголкового отражателей и т.д.)

Список литературы

1. Методы исследования радиолокационных характеристик объектов. Монография / Под ред. С. В. Ягольникова. – М.: Радиотехника, 2012. – 296 с.

2. Борзов А.Б., Сучков В.Б. Анализ полей рассеяния сложных радиолокационных сцен на основе полигональных моделей. Научно-технические ведомости СПбГПУ, 2001. – № 3. т. 2. – с. 13–28.

3. Knott E., Shaeffer J., Tuley M. Radar Cross Section. Second Edition. – SciTech Publishing, 2004. – 611 p.

4. Nilsson M. Iterative Solution of Maxwell's Equations in Frequency Domain. – Uppsala University, Department of Information Technology, 2002. – 104 p.

5. Shyh-Kang Jeng. Near-field scattering by physical theory of diffraction and shooting and bouncing rays // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. –1998. – v. 46, № 4, pp. 551–558.

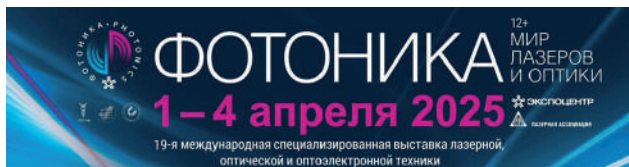
НОВЫЕ ПРОЕКТНЫЕ РЕШЕНИЯ И СПОСОБЫ ИХ ЭФФЕКТИВНОГО ПРИМЕНЕНИЯ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ В ОБЛАСТИ ЛАЗЕРНОЙ, ОПТИЧЕСКОЙ И ОПТОЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ ПРЕДПРИЯТИЙ РОССИИ THE NEW DESIGN DECISIONS AND WAYS THEIR EFFICIENT USING ON MODERN STAGE IN THE FIELD OF LAZER, OPTICAL AND OPTIC-PHYSICAL TECHNOLOGY OF THE LEADING ENTERPRISE TO RUSSIA

Надеина О.В., к.п.н., ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России,
Руденкова Е. Г., к.т.н., доцент, ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России
Nadeina O.V., k.p.s., FSBI «MSHC» of the Ministry of Defense
of the Russian Federation,
Rudenkova E.G., c.t.s., FSBI «MSHC» of the Ministry of Defense
of the Russian Federation,
e-mail: ovnadeina@gmail.com, tel. +79999989015;
e-mail: l654007@yandex.ru, tel. 8(985)923-70-72

Ключевые слова: лазеры, контроль, приборы излучение, оптический элемент, спутниковая аппаратура, оптические изделия.

Keywords: lasers, control, radiation devices, optical element, satellite equipment, optical products.

Разработки предприятий, как уже используемые, так и перспективные, неизменно вызывающие интерес у специалистов и других участников рынка лазерно-оптической отрасли, были представлены на выставке «Фотоника. Мир лазеров и оптики – 2025». Участники увидели самые популярные и передовые устройства собственного производства, играющие сегодня важную роль в модернизации технической инфраструктуры промышленности и науки.



Оборудование для ядерной физики, импульсные лазеры, системы гиперспектрального анализа, оптические интерференционные фильтры и широкий спектр других разработок на выставке «Фотоника. Мир лазеров и оптики-2025»

Выставка «Фотоника. Мир лазеров и оптики» [1] остается ключевым событием для демонстрации инноваций в области лазерных технологий и оптики, значимость которых в науке и промышленности неуклонно растет. Это мероприятие привлекает внимание профессионалов со всего мира, интересующихся применением фотоники в медицине, материаловедении, телекоммуникациях и других областях. «Фотоника-2025» – уникальный шанс оказаться в эпицентре развития фотонических технологий, узнать, как новейшие разработки могут оптимизировать рабочие процессы и открыть новые перспективы в различных сферах деятельности.

Твердотельные лазеры для науки и высокотехнологичных производств

«СЛС Прайм Технолоджи» создает надежные и практичные лазеры, которые позволяют профессионалам сосредоточиться на решении своих задач, а не на рутине, связанной с обслуживанием оборудования», – говорит Евгений Гулевич, председатель Совета директоров компании. – «Разработки специалистов «СЛС Прайм Технолоджи» используются в таких стратегических направлениях, как научные исследования, атомная энергетика и микроэлектроника, что подтверждает их надежность и эффективность. Наша компания стремится к лидерству в производстве лазерных систем для этих отраслей». [1]

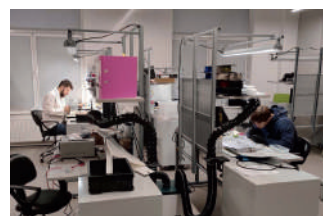


Фото: компания «СЛС Прайм Технолоджи»

На выставке компания представила несколько групп своей продукции.

Компания «СЛС Прайм Технолоджи» предлагает широкий выбор импульсных Nd:YAG лазеров с ламповой и диодной на 4 Дж.

На стенде компании были представлены сразу несколько таких моделей:

AZURITE – предельно практичный и неприхотливый лазер с диодной накачкой, не требующий водяного охлаждения и обеспечивающий гене-

рацию лазерных импульсов с энергией 160 мДж и частотой их следования до 30 Гц.

GRAPHITE – лазеры с ламповой накачкой, обеспечивающие сочетание энергии и частоты следования импульсов наилучшее в своем классе. Линейка включает четыре модели, обеспечивающие выходную энергию от 230 мДж на частоте 100 Гц до 750 мДж на частоте 20 Гц.



Фото: компания «СЛС Прайм Технолоджи»

Все эти лазеры могут использоваться как самостоятельно, так и в составе гибко конфигурируемых лазерных систем на основе ПГС, генерирующих перестраиваемое по длине волны излучение в диапазоне от 0,2 до 20 мкм.

Пикосекундные лазеры

Предложив рынку в течение первого года своей работы широкий модельный ряд наносекундных лазеров, компания «СЛС Прайм Технолоджи» в 2024 году начала разработку лазеров с фемто- и пикосекундной длительностью импульсов.

Представленный на выставке «Фотоника-2025» лазер **OBSIDIAN** – первый шаг в этом направлении.



Фото: компания «СЛС Прайм Технолоджи»

OBSIDIAN – это семейство компактных лазеров, обеспечивающих генерацию лазерных импульсов с длительностью 300–500 пс и энергией ~2 мДж в SLM-режиме на различных длинах волн от ИК до УФ.

Высокая пиковая мощность лазерных импульсов (>2 МВт) при частоте их следования до 100 Гц позволяет использовать лазер для таких применений, как мониторинг загрязнений, анализ ДНК, генерация суперконтинуума и многих других. Малые габариты являются желанным моментом для интеграции лазеров в промышленные и медицинские системы.

Благодаря гибкой конструкции **OBSIDIAN** может быть адаптирован под задачи, требующие более высокой мощности, а также предусматривает возможность активной модуляции добротности.

Индивидуальные решения

Стоит отметить, что «СЛС Прайм Технолоджи» [1] идет дальше выпуска базовых моделей лазеров, представленных в каталоге продукции. Компания активно предлагает своим заказчикам решения, разработанные по индивидуальным спецификациям и требованиям.

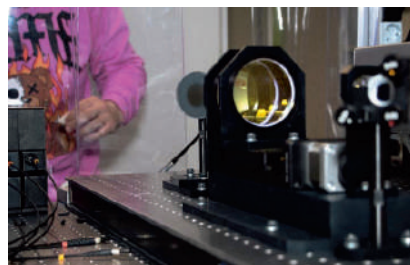


Фото: компания «СЛС Прайм Технолоджи»

В таких проектах «СЛС Прайм Технолоджи» выступает не просто как производитель, но как проектный и технологический партнер, готовый предложить уникальные инженерные решения, которые учитывают все специфические требования заказчиков.

Лазерный интерферометр ФТИ-100 от компании «Дифракция» на выставке «Фотоника-2025»

Российская компания «Дифракция» (г. Новосибирск) [1] производит лазерные интерферометры Физо ФТИ-100 для прецизионного контроля плоских, сферических и асферических оптических поверхностей. Приборы используются в метрологических отделах, лабораториях, оптических производствах, в университетах и научно-исследовательских институтах.

Производимые компанией лазерные интерферометры ФТИ внесены в Государственный реестр средств измерений (ГРСИ РФ).

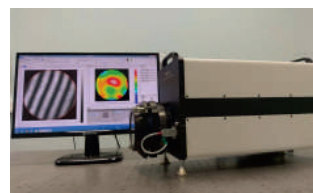


Фото: компания «Дифракция»

Интерферометры совместимы со стандартным байонетным креплением 102 мм (Zygo, MPE, CVI) и могут быть укомплектованы плоскими и сферическими (дифракционными) эталонами, а также корректорами для контроля асферических поверхностей. Также, интерферометр может быть укомплектован оснасткой

для измерения или моторизованной системой измерения радиуса кривизны оптических деталей.

Анализ и компьютерное моделирование показали, что собственные (аппаратные) погрешности измерения формы волнового фронта не превышают 3 нм при поле 102 мм, а дисторсия (геометрические искажения изображения) не превышает 0,002%. Система наведения интерферометра обеспечивает погрешность, не более 1–2 угл. сек.

Разработанный пакет программного обеспечения позволяет дистанционно управлять всеми системами прибора как в ручном, так и в автоматическом режиме для проведения измерений формы поверхности оптических изделий и графического представления информации.

Особенностями ФТИ-100 являются:

- стандартное байонетное крепление эталонов (4-дюймовое);
- работа как в вертикальном, так и в горизонтальном положениях;
- широкоугольная система визуальной настройки и юстировки;
- контроль асферической оптики с помощью синтезированных голограмм;
- дистанционное управление всеми узлами прибора от компьютера;
- комплектация высококачественными дифракционными эталонными объективами для контроля сферических и асферических поверхностей;
- поставка: оптический блок, блок фазового сдвига с узлом крепления и юстировки эталонов, компьютер с предустановленным программным обеспечением.

В условиях современного оптического производства, актуальной является задача быстрого нанометрического бесконтактного контроля формы поверхности изготовленных оптических деталей.

Отечественная промышленность серийно не выпускает универсальные интерферометры, с помощью которых можно контролировать как сферические, так и асферические поверхности оптических деталей, а существующие на рынке образцы интерферометров производства зарубежных фирм, имеют высокую стоимость.

На выставке «Фотоника-2025» компания «Дифракция» представила стенд с универсальным лазерным интерферометром ФТИ-100PS для прецизионного контроля оптических изделий в условиях лабораторий предприятий оптической

промышленности с диаметром выходного пучка 102 мм, источником излучения с длиной волны 632,8 нм (HeNe-лазер), регулируемым увеличением объекта до 6-х, блоком переменного фазового сдвига, управляющим компьютером и программным обеспечением (ПО) для дистанционного управления интерферометром и анализа интерферограмм. ПО поддерживает алгоритмы вычисления фазы волнового фронта по интерферограммам, полученным с фазовым сдвигом и по одной интерферограмме.



Фото: компания «Дифракция»

В дни работы выставки на стенде компании можно было оценить работу интерферометра, а опытный инженер рассказывал обо всех тонкостях работы прибора, специалисты компании проводили предварительные консультации для дальнейшего сотрудничества.

Компания «Азимут фотоникс» [1] представила на стенде образцы детекторов Hamamatsu и камеры машинного зрения



Фото: компания «Азимут фотоникс»

- **Фотоприемники от Hamamatsu Photonics.** Участники выставки познакомились с образцами популярных моделей ФЭУ и SiPM, которые находятся в наличии на складе в Москве.
- **Системы гиперспектрального анализа.** На стенде проводилась демонстрация работы лабораторного сканера с гиперспектральной камерой Specim FX17 (950–1700 нм), а также камеры FigSpec FS23 (400–1000 нм). Данные технологии широко используются для сортировки материалов, спектрального анализа, контроля качества, дистанционного зондирования с помощью БПЛА.
- **Камеры машинного зрения** для производственных и научных приложений, включая идентификацию, считывание маркировки, дефектоскопию, а также робототехнику и биологические исследования.

- **Оптомеханика российского производства.** Также компания «Азимут фотоникс» осуществляет изготовление собственной линейки оптомеханических компонентов, полностью совместимых с продукцией известных мировых производителей оптомеханики. Компоненты подходят для сборки большинства научных и технических стендов с большим диапазоном регулировок.
- **Оптоволоконные компоненты** таких производителей, как Lightcomm, AC Photonics, DK Photonics, Agiltron и другие, которые используются в центрах обработки данных, коммуникационных приложениях, оптоволоконных датчиках и LIDAR.
- **Оптика от российских производителей** – линзы, призмы, фильтры, окна из различных материалов.
- **Оборудование для ядерной физики**, включая усилители и предусилители от Saen и Mesytex, сцинтилляционные детекторы и рентгеновские трубки.

НИИ «Гириконд» демонстрировала успехи в сфере фотоэлектрических и оптоэлектронных технологий.

НИИ «Гириконд» [1] представила результаты полувекровых исследований в области полупроводниковой оптоэлектроники и разработки фотоэлектрических и оптоэлектронных устройств для работы в инфракрасном спектральном диапазоне. Специалисты института занимаются изучением полупроводниковой оптоэлектроники и разработкой различных типов фотоэлектрических и оптоэлектронных устройств для работы в инфракрасном спектре. Результатом этой работы стала технология производства фото- и оптоэлектронных устройств четырех классов: фоторезисторов, фотоэлементов, фотолюминесцентных и электролюминесцентных излучателей.



Фото: НИИ «Гириконд»

НИИ «Гириконд» продемонстрировала фоторезисторы, фотогальванические фотоэлементы и оптические интерференционные фильтры. В 2024 году институт запустил массовое производство оптических инфракрасных фильтров ФОИ-1, необходимых для выделения спектрального диапазона от 2 до 20 мкм. Эти элементы используются в оптической и оптико-электронной аппаратуре и инфракрасных оптоэлектронных компонентах.

Фильтры ФОИ-1 соответствуют техническим условиям ТЦАФ.755410.001ТУ (ОТК), могут быть разработаны с категорией качества «ВП», соответствуют классификационным признакам по ГОСТ Р 59739, устойчивы к механическим и климатическим воздействиям и изготовлены из высококачественных оптических материалов, разработанных в соответствии с международными стандартами.

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений (ФГУП «ВНИИФТРИ») Росстандарта [2], включающий 55 Государственных первичных эталонов, что составляет более 35% всех Государственных первичных эталонов РФ, и более 300 вторичных и рабочих эталонов РФ, лучшие эталоны в мире в области время-частотных, физико-химических и теплофизических измерений, радиотехнических величин, традиционно принимает участие в отраслевой выставке «Фотоника. Мир лазеров и оптики» и представил новейшее оборудование собственного производства, а также принимал участие в мероприятиях деловой программы выставки «Фотоника. Мир лазеров и оптики – 2025».

Заместитель генерального директора ФГУП «ВНИИФТРИ» по радиотехническим измерениям **Малай И.М.:** «ВНИИФТРИ традиционно участвует в отраслевой выставке «Фотоника», демонстрируя последние достижения ученых в области фотонных и оптических технологий, а также приборы, созданные на их основе. В этом году посетители мероприятия смогли познакомиться с нашими новыми разработками, а специалисты института примут активное участие в ключевых мероприятиях деловой программы».



В 2025 году на выставке «Фотоника» впервые была представлена лазерная интерферометрическая измерительная система ВЗ-ИЛТ – инновационное оборудование, разработанное специалистами ВНИИФТРИ для измерения линейных и угловых перемещений

с высокой точностью. Уникальная система предназначена для решения широкого круга задач, включая калибровку и измерение параметров систем с прецизионным позиционированием исполнительных элементов. Сфера применения ВЗ-ИЛТ охватывает, например, машиностроение и станкостроение, где требуется контроль точности механических перемещений, а также научные исследования по изучению геометрических и динамических параметров объектов. Кроме того, она будет востребована в области промышленной метрологии для поверки и калибровки измерительных приборов и при производстве дальнометров и высокоточных измерительных систем длины. «Система ВЗ-ИЛТ – результат многолетних исследований и работы специалистов института, который также обеспечит реальную альтернативу зарубежным аналогам на фоне растущей потребности в импортонезависимых решениях», – отметил начальник лаборатории метрологического обеспечения прецизионных измерительных средств и преобразователей оптического диапазона ФГУП «ВНИИФТРИ» **С.С. Донченко**. Помимо системы ВЗ-ИЛТ на стенде представлены разработанные и серийно изготавливаемые «ВНИИФТРИ» акустооптические частотосдвигатели и модуляторы (приборы, широко применяемые в системах обработки информации, коммутационных устройствах, для оснащения научных лабораторий, а также при создании функциональной электроники), а также устройства для управления акустооптическими устройствами и различные волоконно-оптические компоненты. В рамках деловой программы учеными института был представлен доклад «Текущее состояние и предложения по созданию средств метрологического обеспечения радиофотонных систем и модулей». Выступление затронуло перспективы развития метрологической базы для применения радиофотонных систем, отмечая шаги, которые предпринимаются для обеспечения их точности и надежности.»

В это же время во «ВНИИФТРИ» состоялась XIII конференция молодых ученых и специалистов «Метрология в XXI веке». За два дня конференции было заслушано около 100 докладов по основным направлениям деятельности института. [3] «Конференция для молодых учёных проводится в стенах «ВНИИФТРИ» уже в тринадцатый раз, и с каждым годом растёт как число её участников, так и уровень представляемых работ. Это свидетельствует о высокой заинтересованности нашей молодежи в своей научной деятельности и практическом применении ее

результатов. Мероприятие становится эффективной площадкой для обмена опытом, где не только находят решения актуальные научные задачи, но и рождаются новые идеи и проекты», – отметил первый заместитель генерального директора – заместитель по научной работе **А.Н. Щипунов**. Традиционно в ходе пленарного заседания конференции были представлены доклады, выдвинутые на соискание ежегодной премии им. С.А. Христиановича. В 2025 году на получение премии претендуют 5 докладов, освещающих результаты работ в таких сферах, как метрология ионизирующих излучений, частотно-временные измерения, радиотехнические измерения, координатно-временные измерения, а также акустооптика и лазерная оптоэлектроника. После пленарной сессии состоялись секционные заседания, на которых молодые ученые и специалисты представили доклады о результатах работ в области координатно-временных и частотно-временных измерений, радиотехнических, гидроакустических, физико-химических, акустооптических и других видов измерений по основным направлениям деятельности «ВНИИФТРИ». Конференция молодых ученых, специалистов и аспирантов «Метрология в XXI веке» является ежегодным мероприятием и проходит во ФГУП «ВНИИФТРИ» с 2012 года.

В прошедшей накануне выставки «Фотоника» XXVII Международной научно-технической конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2025» [4], ученые представили ряд докладов, посвящённых вопросам передовых разработок в области обработки сигналов, новых методов и средств измерений, а также их применения для создания высокоточных метрологических систем, обеспечения прослеживаемости измерений и повышения качества данных в современных радиотехнических и измерительных комплексах. Заместитель генерального директора ФГУП «ВНИИФТРИ» по радиотехническим измерениям И.М. Малай стал руководителем одной из ключевых секций конференции – «Обработка сигналов в измерительных системах». В рамках этой секции обсуждались новейшие подходы к применению цифровых методов и алгоритмов в задачах научной и прикладной метрологии. «Цифровизация экономики невозможна без внедрения передовых технологий в области обеспечения единства измерений. «ВНИИФТРИ» активно развивает цифровые методы генерации, управления и обработки сигналов, что позволяет нам обеспечивать прослеживаемость измерений даже в условиях