



РОССИЙСКИЕ КОСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Научно-технический журнал

**РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ
ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
И ИНФОРМАЦИОННЫЕ
СИСТЕМЫ**

Том 2. Выпуск 3. 2015



Содержание

Том 2, Вып. 3, 2015

Аэрокосмические методы зондирования Земли, планет и других космических объектов. Геоэкология и космические системы поиска и спасания

- Технологии мониторинга подвижных объектов и окружающей среды с использованием малоразмерных космических аппаратов
А. А. Романов, А. А. Романов, А. С. Селиванов, С. В. Трусов, С. А. Бобровский 3
- Дистанционное зондирование Земли с адаптивной компенсацией случайных наклонов волнового фронта
К. Н. Свиридов 12
- Программные технологии создания и распространения базовых продуктов дистанционного зондирования Земли
А. И. Васильев, А. П. Коршунов, Н. А. Ольшевский, А. С. Стремов 23
- Многозональное сканирующее устройство для геостационарного метеоспутника «Электро-Л»
Р. В. Андреев, Н. П. Акимов, К. В. Бадаев, Ю. М. Гектин, А. А. Зайцев, А. В. Рыжаков, М. Б. Смелянский, Н. А. Сулиманов, А. Г. Фролов 33
- Радиолокационные антенные системы дистанционного зондирования Земли для малых космических аппаратов
А. С. Чеботарев, В. А. Пантелеев, Н. М. Фейзулла, Е. М. Митрофанов, А. Н. Пластиков 45
- Экспериментальные исследования возможностей метода малых базовых линий с использованием данных РСА ASAR/ENVISAT и PALSAR/ALOS
А. А. Феоктистов, А. И. Захаров, М. А. Гусев, П. В. Денисов 50

Инновационные технологии в аэрокосмической деятельности

- Высокоточная дозирующая установка ВДУ-65 для заправки разгонных блоков
Ю. Б. Горбаткин, Е. А. Дерденков, А. О. Лобанов, В. А. Чернышев 56
- Экспериментальное исследование и оценка изгибной жесткости вибрационного элемента модулятора электростатического поля
Р. Ю. Дорофеев, Д. В. Козлов, А. С. Корпухин, И. П. Смирнов, А. А. Жуков 62

Системный анализ, управление космическими аппаратами, обработка информации и системы телеметрии

- Информационные технологии робастного телеконтроля изделий РКТ: состояние и перспективы
А. В. Лобан, Д. А. Ловцов 68
- Адаптивный фильтр Калмана для оценки параметров отраженного сигнала
В. П. Кузнецов, Е. П. Чураков 79

Технология приборостроения и производства ЭКБ

- Разработка радиационно стойкой БИС МДМ-преобразователя для датчиков в КМОП КНС-базисе
А. И. Черный, В. Н. Богатырев, З. М. Поварницына, А. Ю. Алямкин 84
- Методы и средства обнаружения скрытых дефектов КМОП-микросхем
И. Ю. Булаев 88

Contents

Vol. 2, Iss. 3, 2015

Aerospace Sensing of the Earth, Planets and Other Celestial Objects. Geocology and Space Systems for Search and Rescue

Russian Technologies of Monitoring and Remote Sensing Using Nanosatellites <i>A. A. Romanov, A. A. Romanov, A. S. Selivanov, S. V. Trusov, S. A. Bobrovsky</i>	3
Earth Remote Sensing with Adaptive Compensation a Casual Tilted of Wave Front <i>K. N. Sviridov</i>	12
Software Technologies for Generation and Distribution of Basic Earth Remote Sensing Data Products <i>A. I. Vasilyev, A. P. Korshunov, N. A. Olshevskiy, A. S. Stremov</i>	23
Multiizone scanning apparatus for geosynchronous meteorological satellite "Electro-L" <i>R. V. Andreev, N. P. Akimov, K. V. Badaev, Yu. M. Gektin, A. A. Zaitsev, A. V. Ryzhakov, M. B. Smeljanskij, N. A. Sulimanov, A. G. Frolov</i>	33
Earth Remote Sensing Radiolocating Antenna Systems Mounted on a Small Spacecraft <i>A. S. Chebotarev, V. A. Panteleev, N. M. Feyzulla, E. M. Mitrofanov, A. N. Plastikov</i>	45
Experimental Studies of Small Baselines Technique with Use of SAR ASAR/ENVISAT and PALSAR/ALOS Data Set <i>A. A. Feoktistov, A. I. Zakharov, M. A. Gusev, P. V. Denisov</i>	50

Innovative Technologies in Aerospace Activity

High-Precision Dosing Unit VDU-65 for Filling Upper Blocks <i>Yu. B. Gorbatkin, E. A. Derdencov, A. O. Lobanov, V. A. Chernyshev</i>	56
Experimental Study and Evaluation of Bending Rigidity of the Vibration Sensor Modulator electric Field <i>R. Yu. Dorofeev, D. V. Kozlov, A. S. Korpuhin, I. P. Smirnov, A. A. Zhukov</i>	62

System Analysis, Spacecraft, Information Processing and Telemetry Systems

Information Technology Robust Telemetry Control Rockets: Status and Prospects <i>A. V. Loban, D. A. Lovtsov</i>	68
Adaptive Kalman Filter for Radar Signal Parameters Estimation <i>V. P. Kuznetsov, E. P. Churakov</i>	79

Instrumentation Technology and Production ECB

Development Radiation Hardened IC MDM of the Converter for Sensors in CMOS SOS basis <i>A. I. Chernyj, V. N. Bogatyrev, Z. M. Povarnitsyna, A. Yu. Alyamkin</i>	84
Ways and Means of CMOS Integrated Circuits Flaw Location <i>I. Yu. Bulaev</i>	88

АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ,
ПЛАНЕТ И ДРУГИХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ.
ГЕОЭКОЛОГИЯ И КОСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПОИСКА И СПАСАНИЯ

УДК 528.837

**Технологии мониторинга подвижных объектов
и окружающей среды с использованием
малоразмерных космических аппаратов**

А. А. Романов¹, А. А. Романов², А. С. Селиванов³, С. В. Трусов⁴, С. А. Бобровский

¹д. т. н., ^{2,3}д. т. н., профессор, ⁴к. т. н.
АО «Российские космические системы»

e-mail: romulas@mail.ru

Аннотация. Первый космический аппарат нанокласса производства АО «Российские космические системы» был запущен с борта МКС в 2005 г., его конструкция в дальнейшем послужила основой целой серии технологических аппаратов. В 2007 г. в АО «Российские космические системы» начала реализовываться программа разработки малоразмерных космических аппаратов различного целевого назначения. Всего рассматривались три основные задачи: регистрация сигналов АИС морских и речных судов в космическом пространстве, мониторинг состояния ионосферной плазмы и затенное зондирование атмосферы.

В 2011 г. в АО «Российские космические системы» был разработан космический аппарат нанокласса с приемником сигналов АИС на борту. Кроме того, на предприятии был проведен ряд научно-исследовательских работ, направленных на развитие технологий мониторинга ионосферной плазмы с использованием метода радиотомографии. Был создан лабораторный образец когерентного передатчика в диапазонах 150–400 МГц для размещения на борту КА нанокласса.

Ключевые слова: наноспутник, радиотомография, АИС, мониторинг

**Russian Technologies of Monitoring
and Remote Sensing Using Nanosatellites**

A. A. Romanov¹, A. A. Romanov², A. S. Selivanov³, S. V. Trusov⁴, S. A. Bobrovsky

¹doctor of engineering science,
^{2,3}doctor of engineering science, professor,
⁴candidate of engineering science
Joint Stock Company "Russian Space Systems"

e-mail: romulas@mail.ru

Abstract. The first nanosatellite developed in JSC "Russian Space Systems" was: The first nanosatellite developed in JSC "Russian Space Systems" was launched in 2005 from ISS and its construction was used as the basis for the whole series of the technological satellites. The nanosatellites development program with different purposes payload onboard has being realized in JSC "Russian Space Systems" since 2007. Three main tasks have been considered in this program: AIS signals registration from marine vessels in outer space, ionosphere plasma state monitoring and atmospheric GLONASS/GPS radio occultation space-based technology.

In 2011 nanosatellite with AIS receiver onboard was developed in JSC "Russian Space Systems". In addition several research works were fulfilled in the area of ionosphere plasma monitoring technologies based on radio tomography method. It was developed laboratory model of 150–400 MHz coherent transceiver for installation onboard of nanosatellite.

Key words: nanosatellite, radio-tomography, AIS, monitoring

I. Введение

В 2005 г. российский космонавт Салижан Шарипов запустил космический аппарат нанокласса ТНС-0 с борта МКС. Этот космический аппарат был первым в АО «Российские космические системы» технологическим наноспутником, разработанным в соответствии с идеологией «спутник-прибор».

Несмотря на скромные габаритные размеры (масса КА была меньше 4 кг), ТНС-0 был создан для решения важных задач: отработки принципов управления космическими аппаратами с использованием глобальных телекоммуникационных систем, а также получения маяком системы КОСПАС–SARSAT летной квалификации. Именно после этого эксперимента маяки системы поиска и спасания стали штатным оснащением всех спускаемых модулей российских пилотируемых космических аппаратов. Успешный полет ТНС-0 показал перспективность использования наноспутников для отработки новых технологических решений.

В 2007 г. в АО «Российские космические системы» была разработана программа создания технологических наноспутников, которые предполагалось строить с использованием технической решенной, апробированных на платформе ТНС-0.

В рамках программы намечается создать несколько типов КА, предназначенных для решения как технологических прикладных, так и фундаментальных научных задач. Платформу ТНС-0 планируется модифицировать, дополнив систему электропитания внешними солнечными панелями и современной системой ориентации и стабилизации, создав платформу ТНС-2.

Линейка спутников ТНС-2 будет состоять из нескольких КА, предназначенных для решения следующих задач: управление КА с использованием телекоммуникационных сетей, исследование способов управления КА нанокласса (в кооперации с ИПМ им. М. В. Келдыша и ZARM (Германия)), испытания микродвигательных установок (в кооперации с НИИПМЭ МАИ и ЕКА), изучение параметров ионосферы над зонами аномальной грозовой активности и структуры ионосферных токовых систем (в кооперации с организациями РАН), а также радиозатменное зондирование атмосферы

и ионосферы сигналами ГЛОНАСС/GPS (в кооперации с ИРЭ РАН).

Кроме того, была разработана уникальная платформа и создан лабораторный образец наноспутника ТНС-1, со стабилизацией аппарата, осуществляемой при помощи вращения, предназначенного для съемки поверхности Земли со средним пространственным разрешением.

Несмотря на богатый опыт специалистов предприятия в создании собственных платформ нанокласса, в 2010 г. АО «Российские космические системы» начал разрабатывать бортовую аппаратуру приема сигналов АИС, предназначенную для размещения на 3-элементной платформе типа CubeSat. В настоящее время КА «КосмоАИС», построенный на базе этой платформы, проходит последние этапы наземной экспериментальной отработки.

В результате проведенных исследований специалистами Общества было показано, что платформе CubeSat можно использовать для решения достаточно широкого круга задач мониторинга подстилающей поверхности и атмосферы Земли. Был проработан облик полезной нагрузки: малоразмерного передатчика когерентных сигналов для восстановления характеристик ионосферной плазмы, а также малоразмерного радиометра, предназначенного для изучения аномалий уходящей длинноволновой радиации на верхней границе атмосферы.

Представленное исследование посвящено обобщению более чем 10-летнего опыта разработки космических аппаратов нанокласса в АО «Российские космические системы».

II. КА ТНС-0 и КА ТНС-1

Первый технологический наноспутник (ТНС-0) [1,2] имел минимальную функциональность и массу около 4,5 кг без устройства отделения. Его основной задачей было проведение эксперимента по изучению возможности использования спутниковой связи «Глобалстар» для управления и получения целевой и телеметрической информации КА на наземном комплексе управления.

На рис. 1 показан внешний вид ТНС-0. Его структура представляет собой цилиндрическую ферму с диаметром 170 мм и длиной 250 мм.



Рис. 1. ТНС-0 в собранном состоянии (слева), ТНС-0 со снятым стальным корпусом (справа)

Структура закрыта металлическим кожухом, покрашенным в разные цвета (белый и черный) для обеспечения пассивной терморегуляции. Соотношение ширины белых и черных полос позволяет поддерживать среднюю температуру внутри корпуса космического аппарата на уровне 20 °С.

Антенные системы для аппаратуры «Глобалстар» и КОСПАС–SARSAT установлены на верхней грани спутника. На противоположной грани аппарата предусмотрена специальная ручка для осуществления запуска ТНС-0 космонавтом с борта МКС. Также предусмотрен специальный тумблер для включения питания КА и соответствующий индикатор готовности.

Для обеспечения возможности независимого контроля состояния КА на орбите в состав аппаратуры был введен маяк системы КОСПАС–SARSAT.

ТНС-0 был оснащен пассивной системой магнитной стабилизации, которая позволяла ему ориентироваться вдоль одной из осей по линии магнитного поля. КА оснащался литий-ионными аккумуляторами совокупной емкостью до 10 А/ч, внешние солнечные панели в системе электропитания не использовались. Расчетный срок активного существования в подобной конфигурации должен был составить порядка 3 мес, что было вполне достаточно для выполнения всей программы летных испытаний.

ТНС-0 был запущен в 2005 г., и вся программа его летных испытаний была успешно завершена. После 4 мес месяцев работы его аккумулятор был полностью разряжен, а еще через пару месяцев он сгорел в плотных слоях атмосферы.

Второй технологический КА — ТНС-1 [1, 2] обладает более сложной конфигурацией и большей массой: 7,5 кг. Конструкция аппарата представляет собой диск диаметром 500 мм. Он спроектирован с учетом того, что штатным режимом его стабилизации будет режим медленного вращения вокруг оси, перпендикулярной плоскости КА, а поверхность, обклеенная панелями, будет направлена на Солнце. На противоположной стороне будет размещена бортовая аппаратура: модем системы «Глобалстар», элементы системы ориентации и стабилизации, две цифровые фотокамеры для наблюдения поверхности Земли, а также цифровая радиолиния, функционирующая на частоте 1,7 ГГц.

Предполагается, что КА будет функционировать в непрерывном режиме с перекрытием кадров съемки стандарта RGB. Пространственное разрешение с низкой орбиты должно составить около 100 м при полосе захвата 259 км. Ожидается, что КА будет запущен на солнечно-синхронную орбиту с высотой порядка 650 км.



Рис. 2. ТНС-1 со стороны солнечных панелей, внешний вид (слева); ТНС-1 со стороны бортовой аппаратуры, внешний вид (справа)

На рис. 2 представлен внешний вид макета КА ТНС-1.

III. КА ТНС-2

Логичное продолжение конструкции платформ технологических наноспутников ТНС-0 — модификация систем электропитания и ориентации. Следующим поколением КА является ТНС-0 № 2, СЭП которого дополнен внешними солнечными панелями для обеспечения циклов зарядки аккумуляторных батарей.

По сути, конструкция аппарата не претерпела серьезных изменений по сравнению с ТНС-0, структура его представляет собой цилиндрическую ферму прежних размеров. Система электропитания может обеспечить среднюю мощность на уровне 5 Вт, а также кратковременную пиковую нагрузку около 18 Вт. Предусматриваются 4 независимые шины питания, 30 входов для различных телеметрических датчиков. Пропускная способность телеметрической радиолинии составляет 6–7 кбит/с.

На рис. 3 приведен внешний вид спутника ТНС-0 № 2.

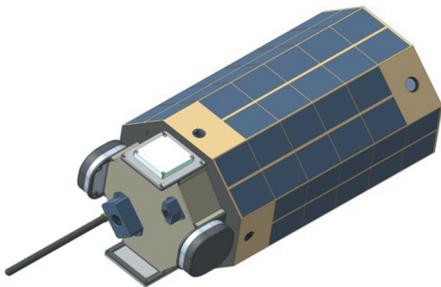


Рис. 3. Внешний вид сборки КА ТНС-0 № 2

Потенциала платформы ТНС-0 № 2 достаточно для продолжения программы экспериментов, направленных на изучение проблем управления космическими аппаратами при использовании глобальных телекоммуникационных сетей, начало которым положил успешный запуск ТНС-0.

С другой стороны, для размещения на борту ТНС-0 № 2 создается прибор для проведения фундаментальных исследований. Совместно с организациями РАН готовится аппаратура и эксперимент по изучению явлений грозовой активности и токов, индуцированных в атмосфере Земли.

Кроме того, совместно с ИПМ им. М. В. Келдыша и институтом ZARM (Германия) на базе ТНС-0 № 2 создается образовательный космический аппарат, который будет использоваться для обучения студентов, а также для проведения исследований по различным алгоритмам управления космическими объектами.

Последующей модернизацией конструкции ТНС-0 № 2 должно стать внедрение активной трехосной системы ориентации и стабилизации (платформа после модернизации получит следующий

индекс — ТНС-2), что позволит существенно расширить область применения технологической платформы.

С учетом улучшенных технических характеристик ТНС-2 может использоваться для решения более серьезных технологических и научно-практических задач. В кооперации с НИИ ПМЭ МАИ и организациями ЕКА предполагается провести эксперимент по отработке базовой функциональности микродвигательных установок для применения на КА подобного класса.

Предварительные исследования, изложенные в работах [3], предлагают рассмотреть применение платформы ТНС-2 в качестве основы для создания космического сегмента системы затененного зондирования атмосферы и ионосферы Земли с использованием сигналов ГНСС.

На борту КА «Радиомет» предполагается использовать перспективную аппаратуру радиозатененного зондирования атмосферы, которая вместе с АФУ весит порядка 1500 г. Как показывает ориентировочная массовая сводка систем КА, общий вес подобного аппарата не превысит 10 кг.

Использование платформы типа ТНС-2 в качестве основной при создании систем мониторинга атмосферы на базе метода радиозатененного зондирования позволит существенно сократить затраты на разработку и развертывание космического сегмента.

IV. КА «RadSat»

С учетом развития технологий производства инфракрасных детекторов в течение последнего десятилетия появилось поколение неохлаждаемых болометрических тепловых приемников, на базе которых может быть построен радиометр космического базирования.

Компанией Ulis серийно производятся ИК-приемники [4] со следующими характеристиками: диапазон регистрируемого излучения — 8–14 мкм, чувствительность (NETD) — 40 мК, потребление — не более 110 мВт. Размер матрицы — 384 × 288 элемента.

С учетом характеристик приемной матрицы был проработан облик перспективного радиометра, предназначенного для размещения на борту КА нанокласса. Особенностью 3-элементной платформы

типа CubeSat в данном случае было ограничение на объем для размещения полезной нагрузки, равное 1 элементу, что составляет $10 \times 10 \times 10$ см (рис. 4).



Рис. 4. Внешний вид КА «RadSat» (проект)

Предварительное проектирование прибора показало, что с учетом необходимости размещения объектива и электроники обработки данных с матрицы внешние габариты подобного устройства не будут более $7,2 \times 7,2 \times 8,5$ см, а общее энергопотребление полезной нагрузки составит не более 3 Вт.

Максимальное пространственное разрешение радиометра на низкой орбите с высотой до 850 км составляет 250–300 м. Для решения задачи мониторинга аномалий уходящей длинноволновой радиации достаточно пространственного разрешения 1–3 км, максимальная полоса захвата составит от 380 до 1200 км в зависимости от пространственного разрешения.

К сожалению, для расчета уходящей длинноволновой радиации с учетом измерений предлагаемого радиометра придется воспользоваться технологиями, применяемыми к информации, получаемой, например, с космических аппаратов серии NPOES [5]. Тем не менее, у компании MDL существуют разработки неохлаждаемых болометрических матриц, которые способны регистрировать излучение в широком диапазоне от 2 до 50 мкм [6]. При условии их потенциальной доступности на коммерческом рынке концепция радиометра может быть пересмотрена для использования этого приемника.

Наиболее сложной проблемой на этапе предварительного проектирования является необходимость сброса информации, полученной с радиометра, на наземную станцию с учетом ограничения по скорости передачи штатной радиолинии КА «RadSat» — 9600 бит/с.

Учитывая размеры матрицы, а также радиометрические разрешение 8 бит, получим, что размер одного кадра не превысит 900 кбит. С учетом среднего времени сеанса связи с космическим аппаратом возможностей радиолинии будет достаточно для передачи 4–5 изображений.

Бесспорно, оценки, представленные в данной работе, достаточно концептуальны. Тем не менее, при условии использования энергоэффективной платформы, оснащенной радиолинией с большой пропускной способностью, КА с радиометром в качестве полезной нагрузки микро- или даже нанокласса может быть разработан в самой ближайшей перспективе.

V. КА «EConSat»

Общеизвестно, что ионосфера является хорошим индикатором процессов, проходящих в атмосфере и литосфере Земли [7]. Ионосферная плазма в том числе существенно влияет на характеристики проходящих через ионосферу радиоволн, поэтому оценка ее состояния важна для решения не только теоретических и фундаментальных, но и практических задач. Существенная изменчивость ионосферы предъявляет дополнительные требования к системам мониторинга, а также к специальным средствам контроля ее состояния с точки зрения пространственного и временного разрешения.

Один из немногих способов изучения вертикальных распределений электронной концентрации ионосферы на основе спутниковых радиосигналов — метод радиотомографии ионосферы. Метод ионосферной радиотомографии предполагает обработку фазовых характеристик когерентных сигналов навигационных спутников первого поколения или специализированных аппаратов в диапазонах 150/400 МГц на размещенных в регионе исследования наземных станциях [8].

В рамках информационной технологии восстановления вертикальных разрезов электронной концентрации ионосферы, разработанной специалистами АО «Российские космические системы», используется модификация томографического подхода, получившая название «метод фазоразностной томографии» [9]. Его эффективность была подтверждена в результате специальных экспериментов, которые были проведены в дальневосточном регионе Российской Федерации [10, 11].

К сожалению, количество спутников, излучающих необходимый сигнал для исследований ионосферы, неуклонно падает, достаточно остро встает вопрос восполнения орбитальной группировки, сигналы которой можно было бы использовать для мониторинга состояния ионосферы Земли.

В результате научных исследований и предварительных проработок специалистами АО «Российские космические системы» был создан прототип когерентного передатчика в диапазоне 150/400 МГц для размещения на платформе типа CubeSat (рис. 5).

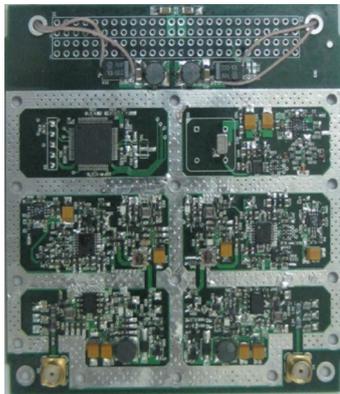


Рис. 5. Внешний вид лабораторного образца передатчика когерентных сигналов

Основные характеристики передатчика: общая потребляемая мощность не более 5 Вт, выходная мощность канала 150 МГц — 0,5 Вт, выходная мощность канала 400 МГц — 1,5 Вт, масса 300 г, габаритные размеры — 100 × 100 × 10 мм. Предусмотрено 8 литер частот для излучения в каждом из частотных каналов.

Предварительный облик КА «EConSat» представлен на рис. 6. В соответствии с представленным составом видно, что используется стандартная

3-элементная структура платформы типа CubeSat со стандартным набором служебных подсистем.



Рис. 6. Внешний вид КА «EConSat» (проект)

В составе спутника не предполагается использования маховичной системы ориентации и стабилизации, поскольку возможностей трехосной магнитной системы стабилизации будет достаточно при условии применения всенаправленной антенны на наземной томографической станции.

В результате предварительных расчетов и проведенного в результате исследований макетирования показано, что возможностей 3-элементной платформы типа CubeSat достаточно для создания аппарата с ионосферным маяком на борту.

В перспективе использование подобных разработок в системах геофизического мониторинга позволит восполнить пробелы, вызванные долгим сроком разработки и изготовления космических аппаратов, предназначенных для исследований состояния ионосферы и магнитосферы Земли.

VI. КА «CosmoAIS»

АИС является системой мониторинга морских и речных судов [11], использующей принцип временного разделения при доступе к каналу связи. Схема Time Division Multiple Access (TDMA) [12] применяется при организации обмена данными между судами для предотвращения столкновений между ними. АИС-стандарт включает в себя 27 сообщений, но наиболее часто используются первые

три типа сообщений, содержащих навигационную информацию. Длина таких сообщений достигает 256 бит, что соответствует величине слота, выделенного для передачи одного сообщения АИС. Скорость передачи сообщений — 9600 бит/с. Информация АИС передается в двух частотных каналах, 161,975 МГц и 162,025 МГц, с использованием модуляции GMSK [13], ширина полосы — 25 кГц.

Специалистами АО «Российские космические системы» был разработан КА «CosmoAIS» (рис. 7) для мониторинга сигналов АИС в космическом пространстве. КА «CosmoAIS» спроектирован на базе 3-элементной структуры CubeSat с размерами $30 \times 10 \times 10$ см и общей массой 3 кг. Платформа включает несколько стандартных подсистем: электропитания, которая состоит из шин питания 3,3 В и 5 В, дополнительных аккумуляторов емкостью 7800 Ач и солнечных панелей; ориентации и стабилизации, трансивер, интерфейсные платы, 3 типа антенн (1× ОВЧ для приемника АИС, 1× ОВЧ для передатчика радиолинии КА, 1× УВЧ для приемника КА) и бортовой компьютер.

Для передачи информации от полезной нагрузки, а также для передачи команд подсистемам используется шина I2C со скоростью передачи данных 100 Кбит/с.

Подсистема определения ориентации состоит из датчика Солнца и магнитометра, система стаби-

лизации построена на магнитных катушках. Спутниковый трансивер может функционировать в полностью дуплексном режиме, скорость передачи со спутника составляет 9600 бит/с, скорость передачи на КА — 1200 бит/с, протокол передачи информации — AX-25.

Бортовая аппаратура приема сигналов АИС может работать в 4 частотных каналах: 156,775 МГц, 156,825 МГц, 161,975 МГц, 162,025 МГц, что делает возможным ее использование с учетом перспективного развития судовых терминалов системы. Общее энергопотребление прибора не превышает 2 Вт, а чувствительность приемника — не менее 117 дБмВт.

Функционально приемник (рис. 8) состоит из частотного селектора с маломощным усилителем, обеспечивающим аналоговый прием информации, а также цифровой части обработки сигналов, построенной на базе ПЛИС Xilinx.



Рис. 7. Внешний вид КА «CosmoAIS»



Рис. 8. Внешний вид бортовой аппаратуры приема сигналов АИС КА «CosmoAIS»

Бортовая аппаратура может работать в двух режимах: записи спектра исходного сигнала и декодирования сообщений АИС. На борту КА нанокласса приемник в основном будет работать в режиме непосредственного декодирования пакетов, поскольку пропускной способности радиолинии, а также возможностей подсистемы электропитания явно недостаточно для передачи записанных спектров большого объема.

Кроме того, предполагается, что КА «CosmoAIS» будет функционировать над заранее определенными акваториями в течение 10–15 мин с последующим сбросом информации на наземные станции в Москве или Южно-Сахалинске.

В 2013 г. была завершена наземная экспериментальная отработка КА «CosmoAIS» и в 2015–2016 гг. предполагается осуществить его запуск совместно с другим космическим аппаратом.

VII. Заключение

В заключение необходимо отметить, что в АО «Российские космические системы» ведется серьезная работа по созданию широкого ряда космических аппаратов нанокласса как на платформе собственной конструкции типа ТНС, так и на базе платформы типа CubeSat.

Платформа ТНС, на базе которой был построен первый КА нанокласса в корпорации, получила летную квалификацию в 2005 г. Был проведен эксперимент, направленный на проведение испытаний маяка системы КОСПАС–SARSAT в условиях космического пространства. Передатчик показал себя с самой лучшей стороны и в настоящее время входит в комплекс штатной аппаратуры на спускаемых модулях пилотируемых кораблей.

Развитие платформы ТНС предполагается в расширении ее функциональных возможностей путем модернизации систем электропитания и ориентации. При условии успешной модернизации платформы будет создан перспективный КА нанокласса ТНС-2, на базе которого уже сейчас предполагается провести несколько технологических экспериментов. В перспективе ТНС-2 может быть использован в космических орбитальных группировках мониторинга атмосферы и ионосферы Земли.

Существенным потенциалом обладает платформа космических аппаратов нанокласса типа CubeSat. Специалистами Общества создан лабораторный образец передатчика когерентного излучения в диапазонах 150–400 МГц, который необходим при исследовании состояния ионосферной плазмы методом томографического зондирования. В результате проработки концепции КА EConSat-1 была показана принципиальная возможность создания спутника для осуществления томографических исследований ионосферы.

На базе разработанных технических решений в перспективе может быть создана орбитальная группировка, которая позволит проводить исследования ионосферы практически без использования наземных томографических станций.

С учетом постоянно растущих технических возможностей в ближайшей перспективе можно говорить о появлении наноспутников для мониторинга одного из важнейших параметров радиационного баланса Земли — уходящей длинноволновой радиации на верхней границе атмосферы.

Был проработан облик перспективного космического аппарата на базе платформы CubeSat с малоразмерным радиометром на борту. Радиометр предполагается разрабатывать на базе неохлаждаемой балометрической матрицы, что существенно снижает требования к эксплуатационным характеристикам несущей платформы КА.

Проблема мониторинга сигналов АИС также может решаться с использованием космических аппаратов нанокласса. В результате реализации специального проекта был разработан КА «CosmoAIS» с бортовой аппаратурой регистрации сигналов от морских и речных судов. Запуск КА «CosmoAIS» запланирован на 2015–2016 гг.

Широкое применение платформ нанокласса при решении различных научных и народнохозяйственных задач предъявляет все более жесткие требования к основным служебным подсистемам платформ ориентации и стабилизации и особенно радиолинии передачи информации. С учетом прошлого опыта АО «Российские космические системы» в создании бортовых подсистем, а также на базе решений, разработанных для платформы ТНС, в ближайшей перспективе может быть создано новое поколение аппаратуры передачи информации

с пропускной способностью до 0,65 Мбит/с и потреблением не более 4–5 Вт.

Адаптация аппаратуры для размещения на платформах типа CubeSat существенно расширит области применения космических аппаратов этого класса и позволит выйти на динамично развивающийся международный коммерческий рынок служебных подсистем.

Список литературы

1. Селиванов А. С., Урличич Ю. М., Хромов О. Е. Семейство технологических наноспутников для экспериментальных исследований. Сб. трудов IV Международной конференции-выставки «Малые спутники. Новые технологии. Миниатюризация», 31 мая–4 июня 2004 г., г. Королев. Росавиакосмос, кн. 3, с. 34–35.
2. Panzyrny O. A. Hard-and software of the technological nanosatellite TNS-0, 5th Symposium on Small Satellites for Earth Observation, April 4–8, Berlin — IAA-B5-1404.
3. Selivanov A., Romanov A., Vishnyakov V., Vinogradov A., Pavelyev A., Yakovlev O. Concept of space system for global radio occultation monitoring of lower atmosphere and ionosphere based on super-small satellites with GLONASS/GPS navigation signal receivers. United Nations/Austria/European Space Agency Symposium on Space Tools and Solutions for Monitoring the Atmosphere and Land Cover. Austria, Graz, 9–12 September (2008).
4. Официальный сайт «Ulis»: <http://www.ulis-ir.com>
5. Hansen J. et al. Earth's energy imbalance: confirmation and implications // Science, 2005, vol. 308, p. 1431–1435.
6. Официальный сайт MDL: <http://microdevices.jpl.nasa.gov/capabilities/superconducting-devices/tes-bolometers.php>
7. Афраймович Э. Л., Перевалова Н. П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: Изд-во НЦ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 480 с.
8. Pulinets S. A., Romanov A. A., Urlichich U. M., Romanov A. A., Doda L. N., Ouzounov D. The first results of the pilot project on complex diagnosis of the earthquakes precursors on Sakhalin Island // Geomagnetism and Aeronomy, 2009, vol. 49, № 1, p. 123–132.
9. Куницын В. Е., Терещенко Е. Д., Андреева Е. С. Радиотомография ионосферы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 336 с.
10. Романов А. А., Трусов С. В., Новиков А. В., Романов А. А. Сравнение данных радиотомографии ионосферы на средних широтах с данными ионозонда, затменного зондирования и моделей ионосферы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Сб. научных статей. Вып. 6. Т. II. М.: ООО «Азбука-2000», 2009, с. 296–303.
11. IEC 62320-1-am1: Amendment 1 — Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems — Automatic identification system (AIS). Part 1: AIS Base Stations — Minimum operational and performance requirements, methods of testing and required test results, Edition 1.0, IEC, October 2008.
12. IEC 62287-1: Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems — Class B shipborne equipment of the automatic identification system (AIS) — Part 1: Carrier-sense time division multiple access (CSTDMA) techniques, Edition 1.0, IEC, March 2006.
13. Murota K., Hirade K. GMSK modulation for digital mobile radio telephony // IEEE Transactions on Communications, 1981, vol. COM-29, № 7, p. 1044–1050.

Благодарности

Авторы выражают искреннюю признательность Ю. М. Гектину за предоставленные материалы и помощь при подготовке статьи.

АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ,
ПЛАНЕТ И ДРУГИХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ.
ГЕОЭКОЛОГИЯ И КОСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПОИСКА И СПАСАНИЯ

УДК 621.396

**Дистанционное зондирование Земли
с адаптивной компенсацией случайных наклонов
волнового фронта**

К. Н. Свиридов

д. т. н., проф., АО «Российские космические системы»

e-mail: sviridovkn@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрены особенности наблюдения Земли из космоса через турбулентную атмосферу. Предложена преддетекторная адаптивная компенсация случайных наклонов волнового фронта, обусловленных турбулентностью атмосферы. Исследована оптическая передаточная функция (ОПФ) и разрешающая способность системы ДЗЗ с адаптивной компенсацией случайных наклонов волнового фронта. Для телескопа с кольцевой апертурой исследована зависимость ОПФ от степени экранирования кольцевой апертуры и показаны преимущества системы ДЗЗ с адаптивной компенсацией случайных наклонов волнового фронта перед системой без адаптации.

Ключевые слова: турбулентная атмосфера, кольцевая апертура, адаптивная компенсация атмосферных искажений, аппаратное достижение высокого разрешения

**Earth Remote Sensing with Adaptive Compensation
a Casual Tiltes of Wave Front**

K. N. Sviridov

*doctor of engineering science, professor,
Joint Stock Company "Russian Space Systems"*

e-mail: sviridovkn@yandex.ru

Abstract. Particularities of observation Earth from the Space are considered. Predetection adaptive compensation a casual tiltes of wave front, generated by atmospheric turbulence, is proposed. Optical Transfer Function (OTF) and resolution ability of ERS system with adaptive compensation a casual tiltes of wave front is investigated. For telescope with annular aperture a dependence OTF from degree screening of annular aperture is investigated and preferences of ERS system with adaptive compensation a casual titles of wave front before system without adaptation are shown.

Key words: turbulent atmosphere, annular aperture, adaptive compensation of atmospheric distortions, apparatus for reaching high resolution

Введение

Наличие турбулентной атмосферы между космическим аппаратом ДЗЗ и земной поверхностью ограничивает информационные возможности системы ДЗЗ по разрешению. Типично задачи ДЗЗ решаются в ближней зоне (зоне Френеля) $D^2 > \bar{\lambda}H$, где D — внешний диаметр апертуры телескопа ДЗЗ, $\bar{\lambda}$ — средняя длина волны солнечного излучения подсвета ($\bar{\lambda} = 0,5$ мкм) и H — высота космического аппарата ДЗЗ над земной поверхностью. От каждой точки земной поверхности в направлении КА ДЗЗ распространяется расходящаяся сферическая волна. При этом искажения волнового фронта, приобретенные ею в пределах турбулентного слоя (нижние $L = 10$ км атмосферы у земной поверхности), по мере ее распространения до высоты H КА ДЗЗ существенно увеличиваются (рис. 1).

В результате величина пространственного радиуса корреляции атмосферных флуктуаций $r_0(\bar{\lambda}, H)$ (так называемый параметр Фрида) на высоте H КА ДЗЗ определяется соотношением [1]

$$r_0(\bar{\lambda}, H) \approx \frac{H}{L} r_0(\bar{\lambda}, L), \quad (1)$$

где $r_0(\bar{\lambda}, L) = 0,1$ м — величина пространственного радиуса корреляции атмосферных флуктуаций волнового фронта на границе турбулентного слоя.

Отсюда нетрудно видеть, что при высоте КА ДЗЗ $H = 350$ км величина $r_0(\bar{\lambda}, H)$ оказывается равной 3,5 м, при $H = 500$ км $r_0(\bar{\lambda}, H) = 5$ м, а при $H = 750$ км величина $r_0(\bar{\lambda}, H)$ оказывается равной 7,5 м. Этот результат, полученный нами ранее [1], свидетельствует о том, что величина $r_0(\bar{\lambda}, H)$ оказывается существенно большей диаметра $D = 1,1$ м зеркальной оптики существующих телескопов ДЗЗ [2] и, в соответствии с условием оптимизации [1] $D \geq 2r_0$, требует увеличения диаметра апертуры телескопа ДЗЗ до величин $D = 7–15$ м. Достижение космических апертур таких размеров возможно в перспективе на базе апертурного синтеза и, в соответствии с проведенными исследованиями [3], может обеспечить достижение предельного разрешения систем ДЗЗ, равного 4,6 см. Сегодня этот подход является технически трудно реализуемым на современном уровне развития

технологий оптического приборостроения. В существующих условиях, когда $r_0(\bar{\lambda}, H) > D$, нами предложен другой подход, а именно адаптивная компенсация случайных наклонов волнового фронта [4]. Действительно, реально атмосферные искажения волнового фронта на приемной апертуре телескопа ДЗЗ представляют собой случайные наклоны волнового фронта, приводящие к случайным сдвигам мгновенных коротко-экспозиционных изображений при их длинно-экспозиционной регистрации за время τ_{Σ} , большее интервала временной корреляции атмосферных флуктуаций τ_A (так называемого времени «замороженности» турбулентности атмосферы). Исследуем предложенную [4] систему ДЗЗ с адаптивной компенсацией случайных наклонов волнового фронта.

Оптическая передаточная функция (ОПФ) системы ДЗЗ с адаптивной компенсацией случайных наклонов волнового фронта

Наличие турбулентной атмосферы Земли ограничивает проникающую и разрешающую способность систем ДЗЗ. Для увеличения проникающей способности и расширения поля зрения системы ДЗЗ осуществляют длинно-экспозиционную регистрацию изображений ДЗЗ. Это приводит к усреднению атмосферных искажений волнового фронта светового излучения от объекта — участка земной поверхности, что существенно ухудшает разрешающую способность системы ДЗЗ и не позволяет различать на земной поверхности детали малых размеров.

Разрешающую способность системы атмосфера-телескоп можно существенно повысить, если в процессе длинно-экспозиционной регистрации изображений ДЗЗ компенсировать за время, меньшее интервала временной корреляции атмосферных флуктуаций τ_A , случайные наклоны волнового фронта светового излучения от объекта, приводящие к случайным сдвигам (дрожанию) регистрируемого изображения.

В настоящее время такие адаптивные системы, устраняющие атмосферное дрожание изображений

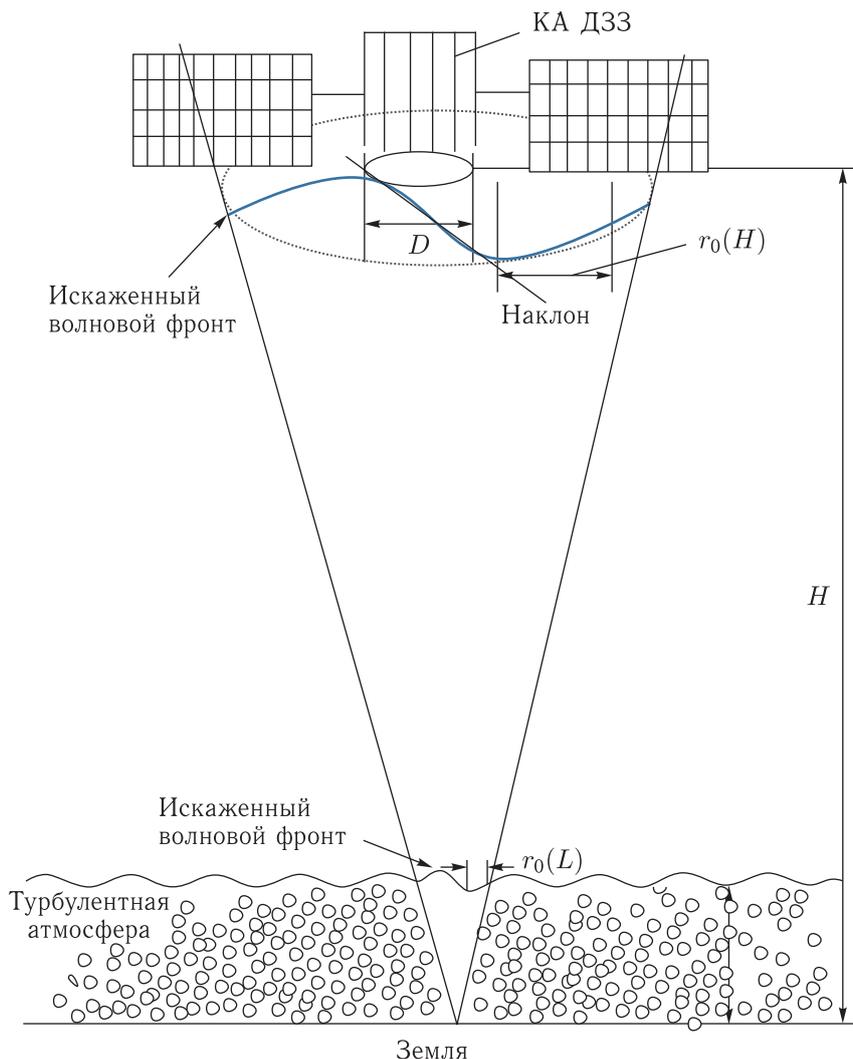


Рис. 1. Атмосферные искажения волнового фронта светового излучения Д33

в процессе их накопления компенсацией случайных наклонов волнового фронта, разрабатываются для ряда наземных астрономических обсерваторий [5, 6]. В связи с этим, а также учитывая принцип взаимности распространения [7], представляет интерес исследование оптических свойств системы Д33 с адаптивной компенсацией случайных наклонов волнового фронта.

Наиболее полной характеристикой систем, формирующих изображение, является их оптическая передаточная функция (ОПФ).

Мгновенная (коротко-экспозиционная) ОПФ системы атмосфера–телескоп с компенсацией атмосферных наклонов волнового фронта определя-

ется [1, 8] как

$$\tau(\mathbf{f}) = c \int d\mathbf{r} W(\mathbf{r}) W(\mathbf{r} - \bar{\lambda} F \mathbf{f}) \times \exp\{[\chi(\mathbf{r}) + \chi(\mathbf{r} - \bar{\lambda} F \mathbf{f})] + i[(\theta(\mathbf{r}) - \mathbf{a}(\mathbf{r}) - (\theta(\mathbf{r} - \bar{\lambda} F \mathbf{f}) - \mathbf{a}(\mathbf{r} - \bar{\lambda} F \mathbf{f})))]\}, \quad (2)$$

где \mathbf{r} — координаты в плоскости апертуры телескопа Д33, $\mathbf{f} = (\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)/\bar{\lambda} F$ — пространственно-частотный вектор, $W(\mathbf{r})$ — безабберационная апертурная функция, равная единице в пределах апертуры и нулю вне ее, F — фокусное расстояние телескопа, $\bar{\lambda}$ — средняя длина волны солнечного излучения, $\theta(\mathbf{r})$ — случайное фазовое искажение,

а $\chi(\mathbf{r})$ — случайное изменение логарифма амплитуды в точке \mathbf{r} , причем $\theta(\mathbf{r})$ и $\chi(\mathbf{r})$ выбираются так, что они равны нулю, если нет искажений, c — нормирующий множитель, выбираемый так, чтобы $\tau(0) = 1$, и \mathbf{a} — обусловленный атмосферными фазовыми флуктуациями случайный вектор наклона волнового фронта, определяющий сдвиг изображения.

Средняя по ансамблю ОПФ $\langle \tau(\mathbf{f}) \rangle$ имеет вид

$$\langle \tau(\mathbf{f}) \rangle = c \int d\mathbf{r} W(\mathbf{r}) W(\mathbf{r} - \bar{\lambda} F \mathbf{f}) \times \\ \times \langle \exp\{[\chi(\mathbf{r}) + \chi(\mathbf{r} - \bar{\lambda} F \mathbf{f})] + i[(\theta(\mathbf{r}) - \mathbf{a}\mathbf{r}) - \\ - (\theta(\mathbf{r} - \bar{\lambda} F \mathbf{f}) - \mathbf{a}(\mathbf{r} - \bar{\lambda} F \mathbf{f}))]\} \rangle. \quad (3)$$

Усреднение экспоненты в (3) проведено с учетом трех предположений Фрида [9]:

(I) — распределение \mathbf{a} , подобно распределению θ и χ , гауссово;

(II) — распределение $[\theta(\mathbf{r}) - \mathbf{a}\mathbf{r}]$ не зависит от распределения \mathbf{a} ;

(III) — распределение $[\theta(\mathbf{r}) - \mathbf{a}\mathbf{r}] - [\theta(\mathbf{r} - \bar{\lambda} F \mathbf{f}) - \mathbf{a}(\mathbf{r} - \bar{\lambda} F \mathbf{f})]$ не зависит от распределения $[\chi(\mathbf{r}) + \chi(\mathbf{r} - \bar{\lambda} F \mathbf{f})]$, и в результате усреднения получено

$$\langle \exp\{[\chi(\mathbf{r}) + \chi(\mathbf{r} - \bar{\lambda} F \mathbf{f})] + i[(\theta(\mathbf{r}) - \mathbf{a}\mathbf{r}) - \\ - (\theta(\mathbf{r} - \bar{\lambda} F \mathbf{f}) - \mathbf{a}(\mathbf{r} - \bar{\lambda} F \mathbf{f}))]\} \rangle = \\ = \exp \left\{ -\frac{1}{2} D_\chi(\bar{\lambda} F f) - D_\theta(\bar{\lambda} F f) + \frac{1}{2} \langle (\mathbf{a} \bar{\lambda} F \mathbf{f})^2 \rangle \right\}, \quad (4)$$

где $D_\theta(r) = \langle [\theta(\mathbf{r}_1) - \theta(\mathbf{r}_1 + \mathbf{r})]^2 \rangle$ — структурная функция флуктуаций фазы, а $D_\chi(r) = \langle [\chi(\mathbf{r}_1) - \chi(\mathbf{r}_1 + \mathbf{r})]^2 \rangle$ — структурная функция флуктуаций логарифма амплитуды (уровня).

Тогда средняя ОПФ $\langle \tau(\mathbf{f}) \rangle$ преобразуется к виду

$$\langle \tau(\mathbf{f}) \rangle = \tau_0(\mathbf{f}) \exp \left\{ -\frac{1}{2} [D(\bar{\lambda} F f) - \langle (\mathbf{a} \bar{\lambda} F \mathbf{f})^2 \rangle] \right\}, \quad (5)$$

где $D(r) = D_\chi(r) + D_\theta(r)$ — волновая структурная функция, $\tau_0(\mathbf{f}) = c \int W(\mathbf{r}) W(\mathbf{r} - \bar{\lambda} F \mathbf{f}) d\mathbf{r}$ — ОПФ идеального телескопа.

Определим величину наклона волнового фронта, обусловленного турбулентностью атмосферы.

Оценка случайных наклонов волнового фронта

В оптической астрономии, как и в наземных системах контроля космического пространства, определение случайного наклона волнового фронта возможно двумя путями. Во-первых, величина корректируемого наклона может быть оценена непосредственно по самому измеренному волновому фронту, и, во-вторых, эта оценка может быть определена по величине смещения координат центра тяжести формируемого телескопом короткоэкспозиционного изображения объекта.

В задачах дистанционного зондирования Земли реализация второго пути достаточно сложна, в связи с чем рассмотрим и исследуем адаптивную оптическую систему, реализующую первый из указанных путей.

Фрид [9] предложил определять \mathbf{a} по $\theta(\mathbf{r})$ путем минимизации по апертуре квадрата отклонения $\mathbf{a}\mathbf{r}$ от $\theta(\mathbf{r})$, то есть из условия

$$\int d\mathbf{r} W(\mathbf{r}) [\theta(\mathbf{r}) - \mathbf{a}\mathbf{r}]^2 = \min. \quad (6)$$

Следуя Фриду [9], при усреднении в (5) получаем следующее выражение

$$\langle (\mathbf{a} \bar{\lambda} F \mathbf{f})^2 \rangle = \\ = (\bar{\lambda} F f_1)^2 \langle a_1^2 \rangle + (\bar{\lambda} F f_2)^2 \langle a_2^2 \rangle + 2(\lambda F)^2 f_1 f_2 \langle a_1 a_2 \rangle, \quad (7)$$

где компоненты наклона определяются

$$a_1 = \frac{\int d\mathbf{r} W(\mathbf{r}) \theta(\mathbf{r}) r_1}{\int d\mathbf{r} W(\mathbf{r}) r_1^2}, \quad (8) \\ a_2 = \frac{\int d\mathbf{r} W(\mathbf{r}) \theta(\mathbf{r}) r_2}{\int d\mathbf{r} W(\mathbf{r}) r_2^2}.$$

Очевидно, что наклон \mathbf{a} определяется по $\theta(\mathbf{r})$ однозначно.

Чтобы установить конкретный вид ОПФ (5), необходимо конкретизировать зависимость $D(r)$. Часто используют аппроксимацию [9]

$$D(r) = 6,88(r/r_0)^{5/3}, \quad (9)$$

где r_0 — пространственный радиус корреляции атмосферных флуктуаций светового излучения (1).

Таким образом, мы полностью определили выражение (5) для ОПФ $\langle \tau(\mathbf{f}) \rangle$ и можем перейти к ее анализу.

Анализ ОПФ системы ДЗЗ с адаптивной компенсацией случайных наклонов волнового фронта

Исследуем среднюю ОПФ системы атмосфера-телескоп с адаптивной компенсацией случайных наклонов волнового фронта для различных соотношений пространственного радиуса корреляции атмосферных флуктуаций — r_0 , внешнего диаметра приемной апертуры телескопа — D и степени ее экранирования — ξ .

Рассмотрим зеркальный телескоп-рефлектор с кольцевой апертурой, у которого внешний диаметр равен D , а внутренний — ξD . Его ОПФ для нормированной пространственной частоты $x = \frac{\lambda F f}{D}$ определяется выражением [10]

$$\tau_\xi(x) = \frac{1}{1 - \xi^2} \left[G_1(x) + \xi^2 G_1\left(\frac{x}{\xi}\right) + G_2(x) \right], \quad (10)$$

где

$$G_1(x) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \left[\arccos x - x(1 - x^2)^{\frac{1}{2}} \right], & \text{при } 0 \leq x \leq 1 \\ 0, & \text{при } 1 < x \end{cases},$$

$$G_2(x) = \begin{cases} -2\xi^2, & \text{при } 0 < x < \frac{1 - \xi}{2} \\ \frac{2\xi}{\pi} \sin \phi + \left(\frac{1 + \xi}{\pi} \right) 2\phi - \frac{2(1 - \xi^2)}{\pi} \times \\ \times \arctg \left[\frac{1 + \xi}{1 - \xi} \operatorname{tg} \frac{\phi}{2} \right], & \text{при } \frac{1 - \xi}{2} \leq x \leq \frac{1 + \xi}{2}, \\ 0, & \text{при } \frac{1 + \xi}{2} < x \end{cases},$$

$$\text{а } \phi = \arccos \frac{1 + \xi^2 - 4x^2}{2\xi}.$$

На рис. 2 изображены графики $\tau_\xi(x)$ для $\xi = 0, 0,3, 0,5, 0,7, 0,9$. Возрастание $\tau_\xi(x)$ для высоких частот x при увеличении ξ можно легко объяснить.

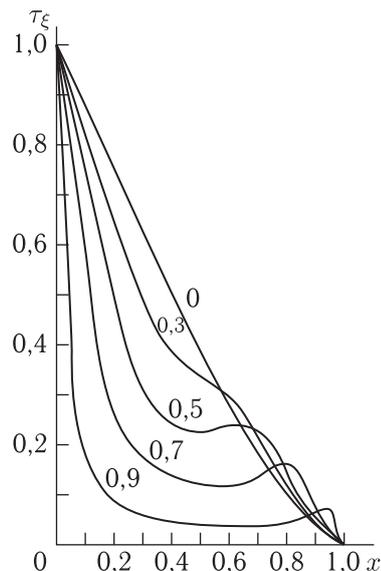


Рис. 2. ОПФ кольцевой апертуры телескопа ДЗЗ для различной степени ее экранирования $\xi = 0,0; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9$

Величина полученного с помощью оптической системы сигнала на частоте x равна площади пересечения апертуры системы с такой же апертурой, смещенной относительно первой на величину xD .

В силу этого, блокируя для кольцевой апертуры центральную часть ξD , мы не уменьшаем сигнал на частотах, превышающих $x = \frac{1 + \xi}{2}$. В то же время полученная суммарная энергия (сигнал на нулевой частоте) уменьшается на множитель $[1 - \xi^2]$. Поскольку ОПФ нормируется так, что она равна 1 на нулевой частоте, то $\tau_\xi(x)$ соответственно выше на множитель $[1 - \xi^2]^{-1}$ на частотах, превышающих $\frac{1 + \xi}{2}$.

Таким образом, для больших ξ и, соответственно, больших x увеличение может быть существенным.

Средняя коротко-экспозиционная ОПФ системы ДЗЗ с адаптивной компенсацией случайных наклонов волнового фронта в соответствии с (5) определяется выражением

$$\langle \tau(x) \rangle = \tau_\xi(x) \times \exp \left\{ -3,44 \left(\frac{D}{r_0} \right)^{5/3} x^{5/3} \left[1 - x^{1/3} \frac{2^{10/3}}{\pi} E(\xi) \right] \right\}, \quad (11)$$

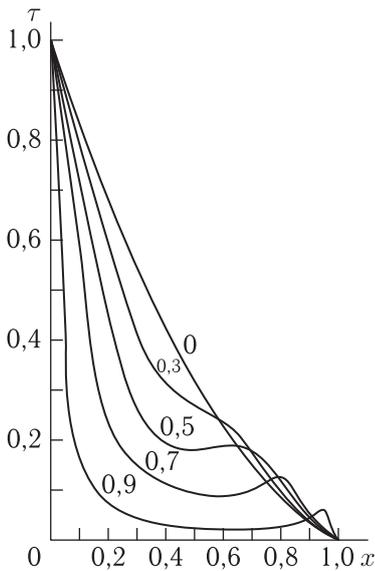


Рис. 3. Средняя ОПФ системы ДЗЗ с адаптивной компенсацией случайных наклонов волнового фронта для $D/r_0 = 1$

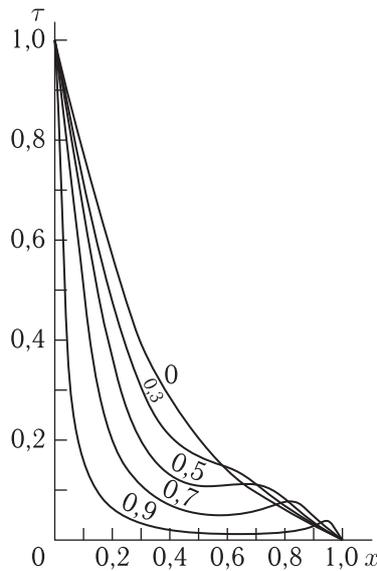


Рис. 4. Средняя ОПФ системы ДЗЗ с адаптивной компенсацией случайных наклонов волнового фронта для $D/r_0 = 2$

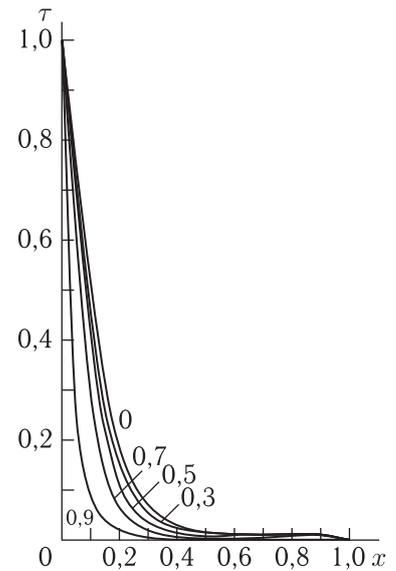


Рис. 5. Средняя ОПФ системы ДЗЗ с адаптивной компенсацией случайных наклонов волнового фронта для $D/r_0 = 5$

где

$$E(\xi) = -\frac{1}{(1-\xi^4)^2} \int_{\xi}^1 \times \int_{\xi}^1 du \int_0^{2\pi} dz u^2 |u|^2 \cos z [u^2 + |u|^2 - 2uu \cos z]^{5/6}. \quad (12)$$

Прежде чем перейти к анализу поведения функции $\langle \tau(x) \rangle$ (11), сделаем одно замечание. Величина $(2^{10/3}/\pi)E(0) \approx 1,043$. Поэтому при $x \rightarrow 1$ показатель экспоненты в (11) станет больше нуля, что практически абсурдно. Такой результат обусловлен приближенностью предположения (II), сделанного при выводе (11). Для устранения этой нефизичности можно заменить 1,043 на 1 [9], оставаясь в тех же пределах точности. В соответствии с таким подходом получаем для $\langle \tau(x) \rangle$ следующее выражение:

$$\langle \tau(x) \rangle = \tau_{\xi}(x) \times \exp \left\{ -3,44 \left(\frac{D}{r_0} \right)^{5/3} x^{5/3} [1 - x^{1/3} S(\xi)] \right\}, \quad (13)$$

где $S(\xi) = E(\xi)/E(0)$. Значения функции $S(\xi)$ приведены в таблице.

Т а б л и ц а

ξ	$S(\xi)$	ξ	$S(\xi)$	ξ	$S(\xi)$
0,00	1,00000	0,35	0,99748	0,70	0,97404
0,05	0,99998	0,40	0,99591	0,75	0,96832
0,10	0,99997	0,45	0,99379	0,80	0,96211
0,15	0,99990	0,50	0,99109	0,85	0,95544
0,20	0,99996	0,55	0,98776	0,90	0,94840
0,25	0,99929	0,60	0,98379	0,95	0,94100
0,30	0,99858	0,65	0,97921		

Из таблицы видно, что при увеличении ξ значения $S(\xi)$ все более отклоняется от 1. Хотя это отклонение на первый взгляд кажется не очень значительным, оно приводит к тому, что высокие пространственные частоты для кольцевой апертуры с компенсацией случайных наклонов волнового фронта теперь также будут подавляться, хотя и менее значительно, чем при длинно-экспозиционной регистрации без адаптивной компенсации наклонов. Это подавление тем заметнее, чем больше ξ и чем больше отношение D/r_0 . Сказанное иллюстрируется рис. 3, 4, 5, на которых изображена $\langle \tau(x) \rangle$ соответственно для $D/r_0 = 1, 2$ и 5.

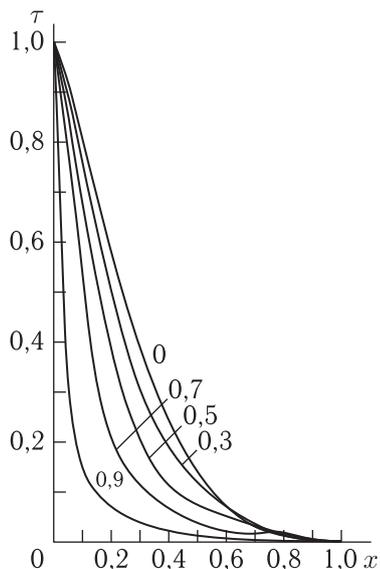


Рис. 6. Средняя ОПФ системы ДЗЗ без адаптивной компенсации случайных наклонов волнового фронта для $D/r_0 = 1$

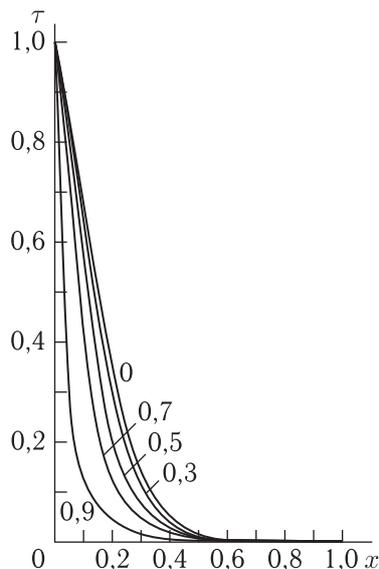


Рис. 7. Средняя ОПФ системы ДЗЗ без адаптивной компенсации случайных наклонов волнового фронта для $D/r_0 = 2$

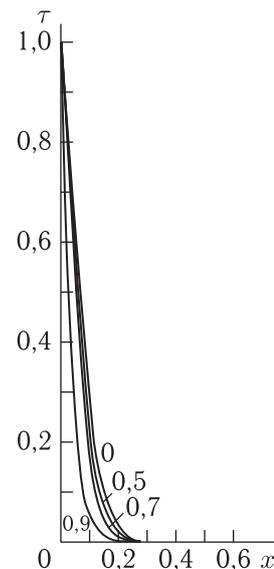


Рис. 8. Средняя ОПФ системы ДЗЗ без адаптивной компенсации случайных наклонов волнового фронта для $D/r_0 = 5$

Аналогичные средние ОПФ для системы ДЗЗ без компенсации наклонов приведены на рис. 6, 7 и 8 (для $D/r_0 = 1, 2$ и 5 соответственно). Различие значительное.

Обычно считают, что при $D/r_0 \leq 1$ влиянием атмосферы на качество оптической системы атмосфера–телескоп можно пренебречь. Из сравнения рис. 3 и рис. 6 с рис. 2 видно, что это справедливо лишь для оптических систем с адаптивной компенсацией случайных наклонов волнового фронта, в то время как для систем без компенсации наклонов при $D/r_0 = 1$ влияние атмосферы довольно существенно.

Анализ разрешающей способности системы ДЗЗ с адаптивной компенсацией случайных наклонов волнового фронта

Качество оптической системы традиционно оценивается ее разрешающей способностью. Существует довольно много подходов к ее определению. Мы, следуя Фриду [9], примем в качестве меры разрешающей способности системы атмосфера–

телескоп величину

$$R = \langle \tau(\mathbf{f}) \rangle d\mathbf{f}. \quad (14)$$

Кратко остановимся на ее характеристике. По своей сути эта величина определяет корреляционное качество системы и является мерой непосредственного сходства между наблюдаемым участком земной поверхности и его формируемым на борту КА изображением. В соответствии с проведенными выше исследованиями для оптической системы ДЗЗ без компенсации наклонов волнового фронта и системы ДЗЗ с адаптивной компенсацией наклонов волнового фронта мы имеем соответственно величины $R_{\text{б.к}}$ и $R_{\text{с.к}}$, определяемые соотношениями:

$$R_{\text{б.к}} = 2\pi \frac{D^2}{(\lambda F)^2} \int_0^1 x \tau_{\xi}(x) \exp \left\{ -3,44 \left(\frac{D}{r_0} \right)^{5/3} x^{5/3} \right\} dx, \quad (15)$$

$$R_{\text{с.к}} = 2\pi \frac{D^2}{(\lambda F)^2} \times \int_0^1 x \tau_{\xi}(x) \exp \left\{ -3,44 \left(\frac{D}{r_0} \right)^{5/3} x^{5/3} [1 - x^{1/3} S(\xi)] \right\} dx. \quad (16)$$

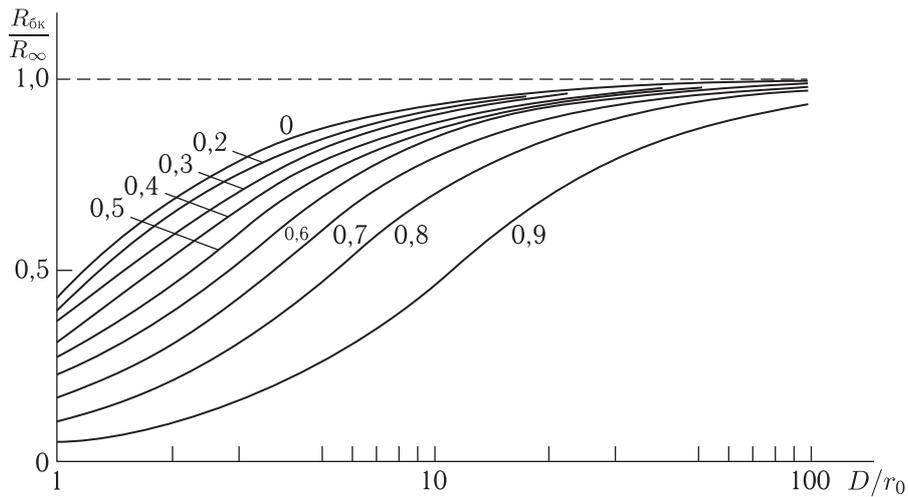


Рис. 9. Зависимость нормированного разрешения от нормированного диаметра в системах ДЗЗ без адаптивной компенсации случайных наклонов волнового фронта

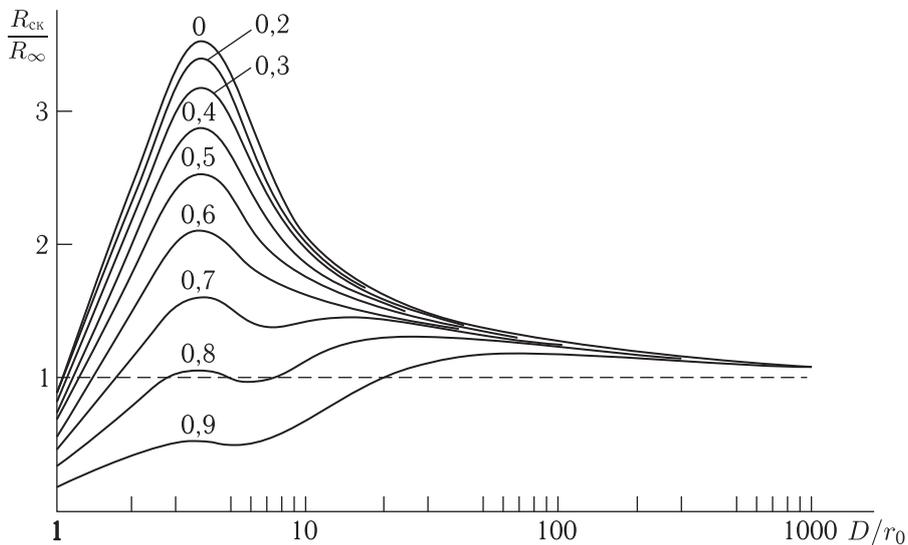


Рис. 10. Зависимость нормированного разрешения от нормированного диаметра в системах ДЗЗ с адаптивной компенсацией случайных наклонов волнового фронта

Устремив D к бесконечности с учетом соотношения $3,44 \approx \left[\frac{24}{5} \Gamma \left(\frac{6}{5} \right) \right]$, легко установить, что существует предел разрешения R_∞ , определяемый выражением

$$R_\infty = \lim_{D \rightarrow \infty} R_{6,k} = \lim_{D \rightarrow \infty} R_{с,к} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{r_0}{\lambda F} \right)^2. \quad (17)$$

Отсюда видно, что в случае бесконечно большой апертуры атмосферой устанавливается один и тот же предел разрешения как для систем без

коррекции случайных наклонов волнового фронта, так и для систем с их адаптивной компенсацией. Но приближение к этому пределу в указанных системах происходит существенно различным образом, о чем свидетельствуют рис. 9 и рис. 10, где представлены, соответственно, зависимости нормированного разрешения от нормированного диаметра: $R_{6,k}(D/r_0)/R_\infty$ и $R_{с,к}(D/r_0)/R_\infty$.

На основании полученных зависимостей видно, что если в системах без компенсации наклонов волнового фронта мы имеем простое монотонное

стремление $R_{\text{б.к.}}/R_{\infty} \rightarrow 1$, то в системах с компенсацией наклонов волнового фронта имеются максимумы разрешения, то есть существует некоторое оптимальное значение D/r_0 , при котором достигается довольно существенное увеличение разрешения по сравнению с системами без адаптивной компенсации наклонов. Для круглой апертуры этот результат впервые был получен Фридом [9]. Интересно отметить, что для кольцевых апертур с большими значениями ξ появляется второй максимум разрешения, который может существенно превышать по своему значению первый, достигаемый, как и для круглой апертуры, при $D/r_0 \approx 3,5$. На рис. 11 показано уменьшение значения абсолютного максимума разрешения телескопа с кольцевой апертурой и компенсацией наклонов волнового фронта при увеличении ξ . Излом на рис. 11 при $\xi \approx 0,7$ объясняется тем, что значение второго максимума начинает превышать значение первого.

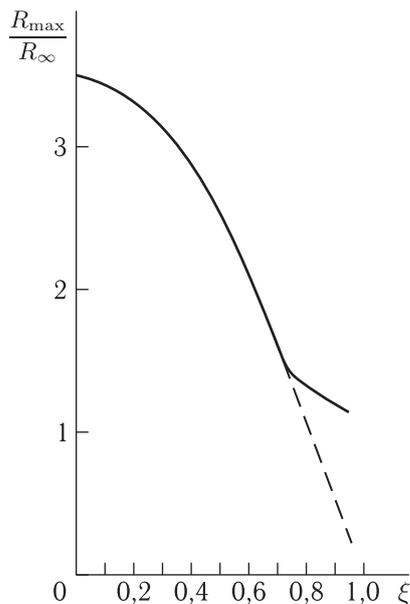


Рис. 11. Зависимость абсолютного максимума разрешения телескопа ДЗЗ с адаптивной компенсацией случайных наклонов волнового фронта от степени экранирования кольцевой апертуры телескопа

Заметим, что кривая, изображенная на рис. 11, практически совпадает с кривой $\text{const}[1 - \xi^2]$, то есть вплоть до $D/r_0 = 3,5$ для систем с компенсацией наклонов волнового фронта атмосфера практически одинаково влияет на разрешение те-

лескопа с кольцевой апертурой произвольной величины экранирования ξ , что объясняется малым отклонением $S(\xi)$ от 1 даже для больших ξ (см. таблицу).

Практически важным является вопрос о максимально допустимом значении ξ , при котором ухудшение характеристик системы с адаптивной компенсацией наклонов волнового фронта при кольцевой апертуре еще не очень существенно по сравнению с круглой апертурой. При решении этого вопроса берем за основу критерий Штреля, в соответствии с которым допустимым считается уменьшение разрешения $R_{\text{с.к}}$ на 20% от максимального значения. Максимальное различие в разрешении достигается при $D/r_0 = 3,5$ (рис. 10), поэтому из анализа рис. 11 получаем, что максимально допустимое значение ξ равно 0,43, а достигаемое при этом разрешение по сравнению с системой без компенсации наклонов увеличивается \sim в 4 раза, как и для круглой апертуры.

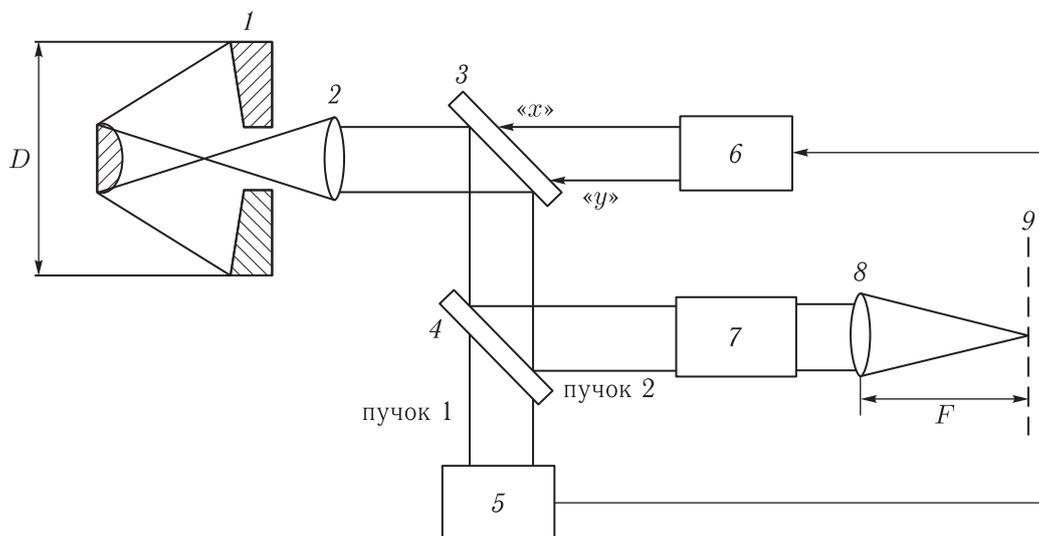
Пример аппаратурной реализации предложенной нами системы ДЗЗ с адаптивной компенсацией случайных наклонов волнового фронта дан на рис. 12, а–в.

Здесь канал формирования изображений ДЗЗ и канал детектирования и регистрации изображений ДЗЗ находятся на борту космического аппарата ДЗЗ, а канал обработки изображений ДЗЗ находится на Земле и связан с ними по радиолинии.

Выводы

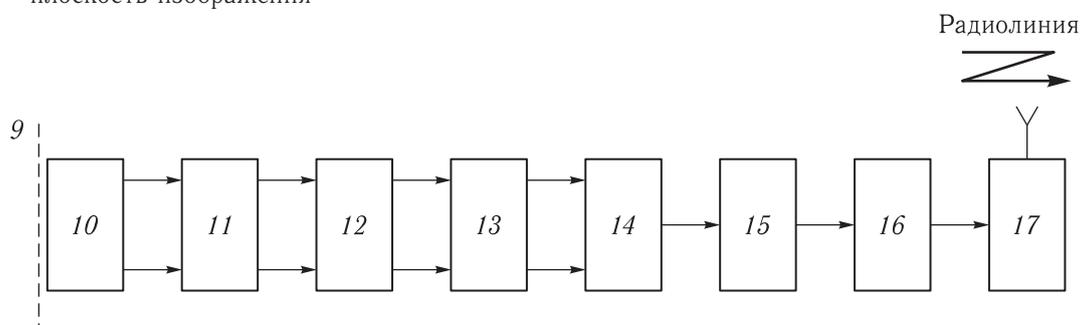
В результате проведенного анализа характеристик системы ДЗЗ с адаптивной компенсацией случайных наклонов волнового фронта для телескопа с кольцевой апертуры можно сделать следующие выводы:

- 1) высокочастотный выигрыш кольцевой апертуры по сравнению с круглой сохраняется при $D/r_0 \leq 4$, характерных для задач ДЗЗ, а при $D/r_0 > 4$, характерных для наземных наблюдений космоса, круглая апертура лучше кольцевой для всех пространственных частот;
- 2) максимально допустимая степень экранирования кольцевой апертуры ξ составляет 0,43;



а. Структурная схема канала адаптивного формирования изображений ДЗЗ:

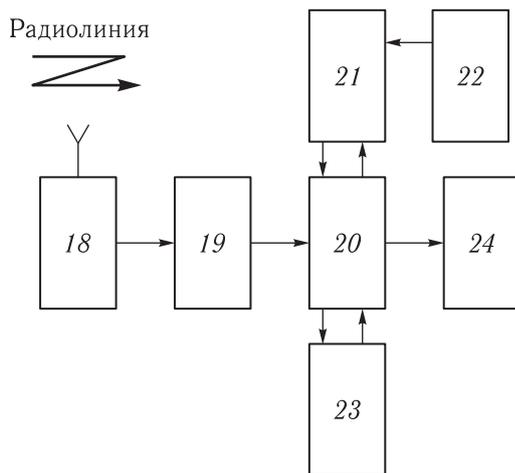
- 1 — зеркальный телескоп космического аппарата ДЗЗ;
- 2 — коллимирующая оптика;
- 3 — плоское адаптивное качающееся зеркало-компенсатор случайных наклонов волнового фронта;
- 4 — полупрозрачное светоделительное зеркало;
- 5 — детектор волнового фронта и оценки случайных наклонов — сдвиговый интерферометр;
- 6 — блок адаптивного управления качающимся зеркалом;
- 7 — светофильтры;
- 8 — фокусирующая оптика;
- 9 — плоскость изображения



б. Структурная схема канала детектирования и регистрации изображений ДЗЗ:

- 10 — электромеханический затвор;
- 11 — усилитель яркости изображения;
- 12 — оптика переноса;
- 13 — квадратичный детектор;
- 14 — цифровая система обработки видеосигнала;
- 15 — бортовой компьютер;
- 16 — кодирующее устройство;
- 17 — бортовая РЛС

Рис. 12.



в. Структурная схема канала обработки изображений ДЗЗ:

- 18 — наземная РЛС;
 19 — декодирующее устройство;
 20 — вычислительные средства;
 21 — программное обеспечение;
 22 — алгоритмическое обеспечение обработки изображений ДЗЗ;
 23 — АРМ оператора;
 24 — потребители изображений ДЗЗ высокого разрешения

Рис. 12. Окончание

3) оптимальный диаметр апертуры равен $D_{\text{опт.}} = 3,5r_0$. При этом максимальный выигрыш в разрешении системы с компенсацией по сравнению с системой без компенсации случайных наклонов волнового фронта равен 4.

Список литературы

1. Свиридов К.Н. О предельном разрешении аэрокосмических систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2014, т. 1, вып. 1, с. 34–40.
2. Лавров В.В. Космические съемочные системы сверхвысокого разрешения // Геоинформационный портал ГИС-Ассоциации, 2010, № 2.
3. Fried D.L. Limiting Resolution Looking Down Through the Atmosphere // Journal of The Optical Society of America, 1966, vol. 56, p. 1380–1384.
4. Свиридов К.Н., Волков С.А. Способ дистанционного зондирования Земли, авторская заявка на изобретение ОАО «Российские космические системы», №2015129353 от 17.07.2015.
5. Свиридов К.Н. и др. Методы обработки световых полей при наблюдении объектов через турбулентную среду, часть 3. «Адаптивные методы формирования изображений» // Зарубежная радиоэлектроника, 1977, № 1, с. 3.
6. Адаптивная оптика, сборник статей. М.: Мир, 1980.
7. Shapiro J.H. Reciprocity of the Turbulent Atmosphere // Journal of The Optical Society of America, 1971, vol. 61, p.492–495.
8. Свиридов К.Н. Технологии высокого разрешения оптических систем атмосферного видения, изд. LAP(LAMBERT Academic Publishing) GmbH, 2005.
9. Fried D.L. Optical Resolution Through a Randomly Inhomogeneous Medium for Very Long and Very Short Exposures // Journal of The Optical Society of America, 1996, vol. 56, p. 1372–1379.
10. O'Neill. Journal of The Optical Society of America, 1956, vol. 46, p. 285.

АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ,
ПЛАНЕТ И ДРУГИХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ.
ГЕОЭКОЛОГИЯ И КОСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПОИСКА И СПАСАНИЯ

УДК 621.396

**Программные технологии создания
и распространения базовых продуктов
дистанционного зондирования Земли**

А. И. Васильев¹, А. П. Коршунов², Н. А. Ольшевский, А. С. Стремов

¹к. ф.-м. н., ²к. т. н.

АО «Российские космические системы»

e-mail: a.vasilyev@ntsomz.ru

Аннотация. В статье рассматривается облик разрабатываемого единого комплекса программно-аппаратных средств формирования и ведения банка базовых продуктов (БП) дистанционного зондирования Земли межведомственного использования. Приводится технологическая модель функционирования и компоненты комплекса. Подробно рассматриваются особенности технических, программных и алгоритмических решений компонент создания и распространения БП.

Ключевые слова: банк базовых продуктов ДЗЗ, алгоритмы создания базовых продуктов ДЗЗ, технологии распространения данных ДЗЗ, ЕК ББП

**Software Technologies for Generation
and Distribution of Basic Earth
Remote Sensing Data Products**

A. I. Vasilyev¹, A. P. Korshunov², N. A. Olshevskiy, A. S. Stremov

¹candidate of physical and mathematical science, ²candidate of engineering science,
Joint Stock Company "Russian Space Systems"

e-mail: a.vasilyev@ntsomz.ru

Abstract. The outline of the integrated complex of automated soft- and hardware tools designed for generating and maintaining the basic Earth remote sensing data products bank of interagency application being developed is considered in the paper. The technological functioning model of the complex and its components are described. Features of technical, software and algorithmic solutions for basic products generation and distribution are considered.

Key words: basic Earth remote sensing data products bank, algorithms for basic Earth remote sensing data products generation, technologies of Earth remote sensing data distribution, EK BBP

Введение

Базовые продукты дистанционного зондирования Земли (БП ДЗЗ) являются общей основой для многоцелевой тематической интерпретации в интересах решения задач ведомственных и региональных потребителей и представляют собой наборы данных, на основе которых могут быть получены различные физические (или псевдофизические) характеристики наблюдаемых территорий, явлений и/или объектов, и обеспечивают решение следующих задач:

- слежение за долговременной изменчивостью контролируемых объектов;
- построение карты восстанавливаемых по дистанционным данным физических параметров подстилающей поверхности;
- сопоставление данных, полученных различными сенсорами;
- валидация восстановленных по дистанционным наблюдениям геофизических параметров, описывающих физические объекты;
- получение исходной устойчивой информации для моделирования развития различных явлений и процессов.

В работе [1] авторы определяют свойства БП ДЗЗ и предлагают уровни представления БП, адаптированные к классификации CEOS:

БП уровня 1 — продукты, содержащие «обобщенные физические», привязанные к одному сеансу (сцене) данные, этот уровень является подмножеством уровня 2G CEOS;

БП уровня 2 — привязанные к фиксированному времени (временные) композиты, полученные на основе наблюдений за некоторый период времени и аппроксимированные на фиксированную пространственную сетку (соответствуют подмножеству продуктов уровня 3T CEOS);

БП уровня 3 — производные продукты, которые получают на основе продуктов уровня 2 путем аппроксимации данных на различные временные и пространственные сетки (соответствуют подмножеству продуктов уровня 3D CEOS).

В рамках данной работы предлагается расширить классификацию путем введения БП уровня 0,

более того, для рассматриваемых БП будут использоваться следующие обозначения: БП уровня 0 — *первичные БП*, БП уровня 1 — *вторичные БП*, БП уровня 2 — *композитные изображения*. Под первичным БП будем понимать продукт стандартной обработки данных ДЗЗ уровня 1С (1D) CEOS и представленный в следующих физических величинах:

- 1) для оптико-электронной аппаратуры это физические величины энергетической яркости (ЭЯ) на зрачке сенсора (спектральная плотность энергетической яркости);
- 2) для радиолокационной аппаратуры это амплитуда откликов сигнала.

Кроме того, в работе для композитных изображений используется следующее ограничение: композитные изображения формируются только на основе первичных базовых продуктов уровня, соответствующего уровню 1D CEOS.

Целесообразность создания набора технологий для создания и ведения банка базовых продуктов межведомственного использования обусловливается возможностью экономии бюджетных средств [2].

Далее в работе рассматривается облик разрабатываемого единого комплекса автоматизированных программно-аппаратных средств формирования и ведения банка базовых продуктов (ЕК ББП) ДЗЗ межведомственного использования, реализующий SaaS (software as a service) бизнес-модель (см. рис. 1). Подробно рассматриваются особенности программных и алгоритмических решений компонент создания и распространения БП. В заключении сформулированы основные результаты работы.

Облик ЕК ББП

Структурно-функциональная модель ЕК ББП представлена на рис. 2. В этой модели выделены следующие основные компоненты:

- компонента администрирования ресурсами (АР) — реализует взаимодействие между другими компонентами ЕК ББП и обеспечивает масштабирование системы на уровне создания новых центров обработки и новых типов

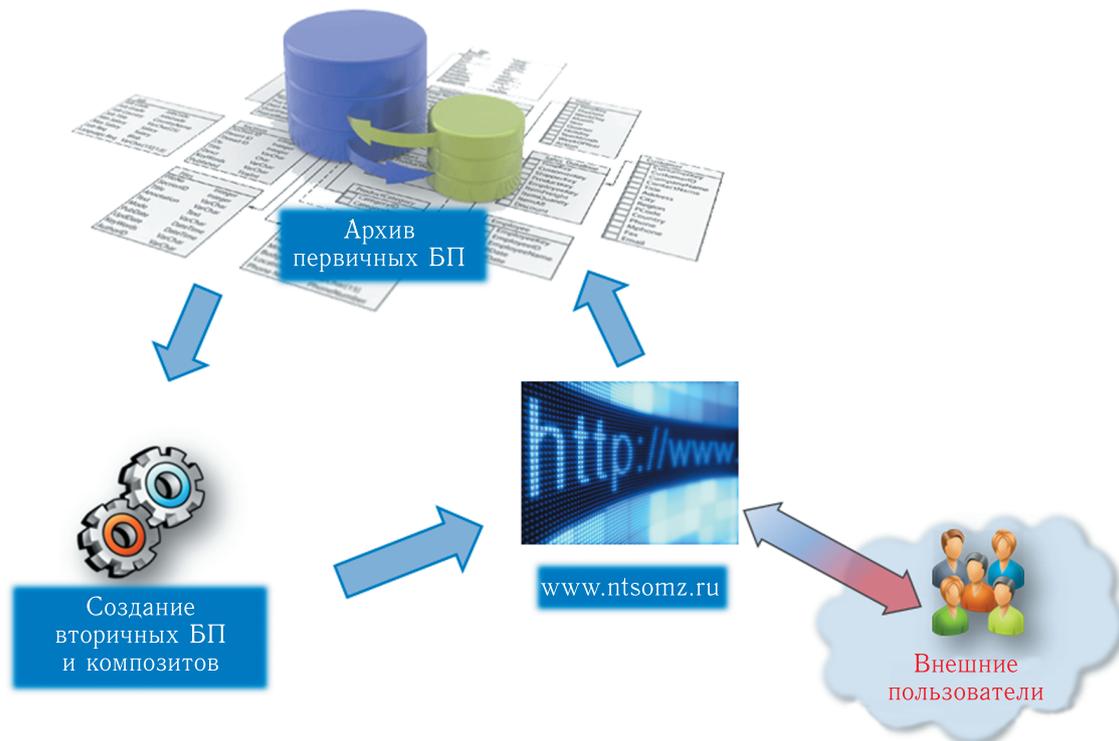


Рис. 1. Бизнес-модель web-сервиса ЕК ББП

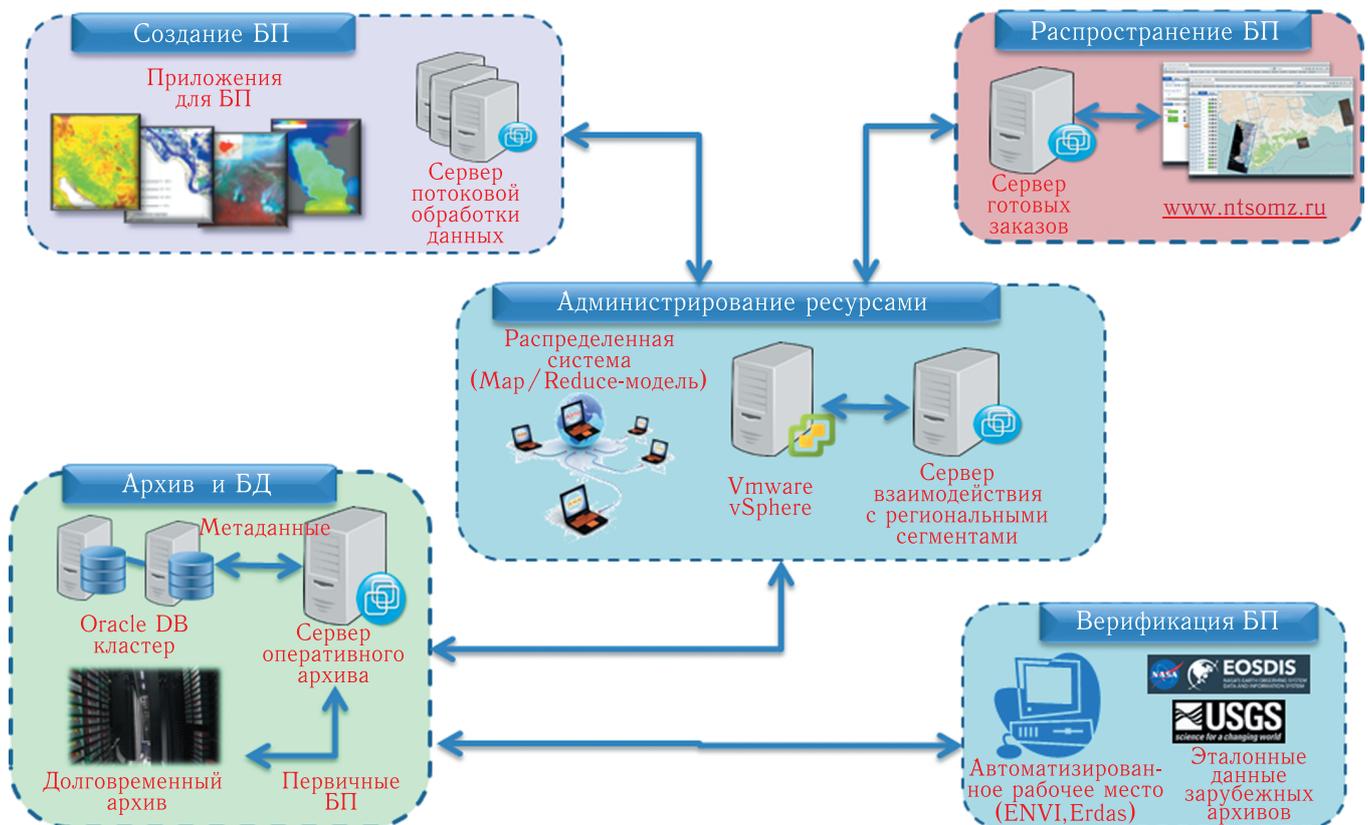


Рис. 2. Структурно-функциональная модель ЕК ББП

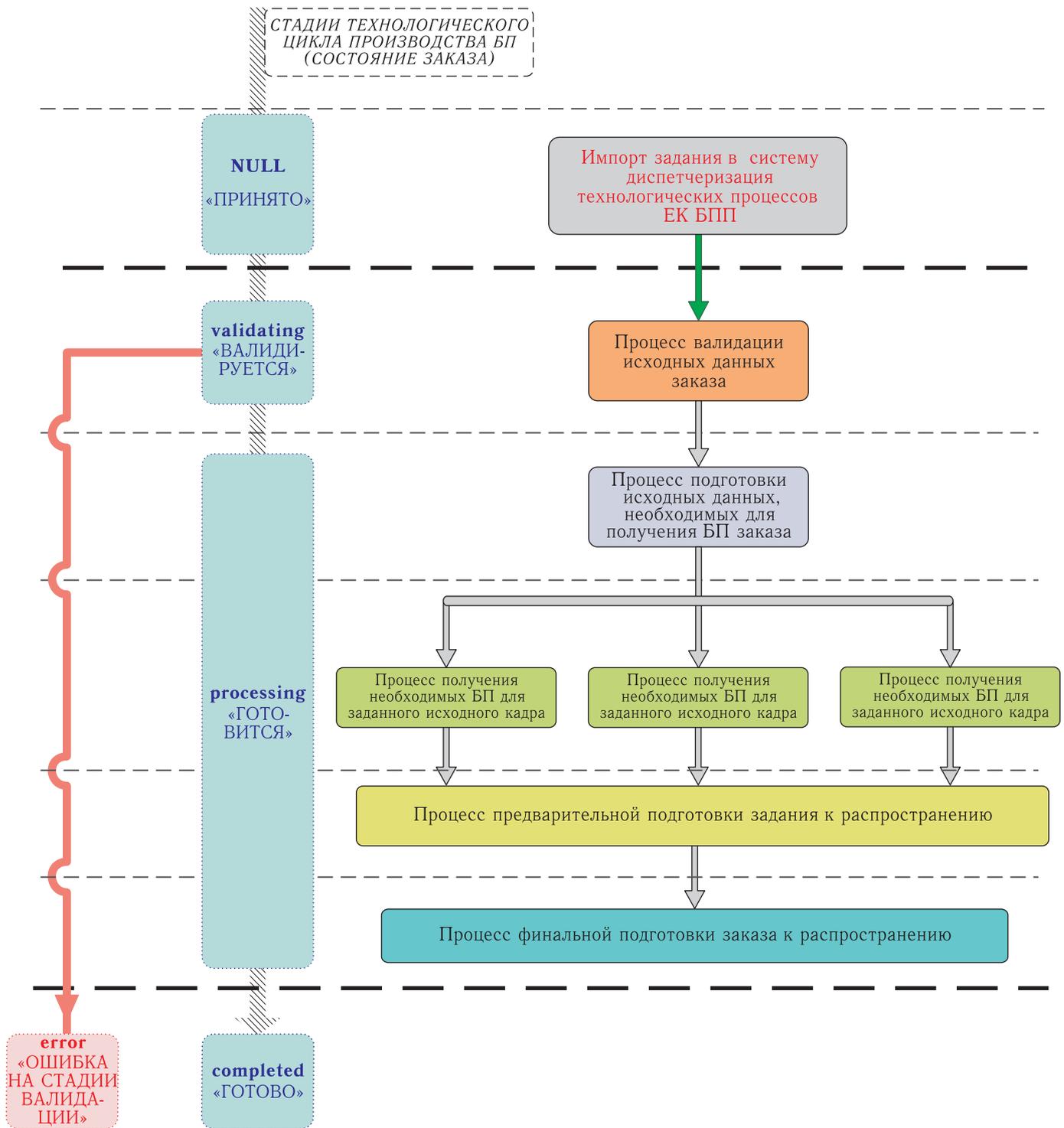


Рис. 3. Технологическая схема выполнения заказа по формированию БП ДЗЗ

базовых продуктов посредством реализованной в рамках компоненты программной модели Map/Reduce;

- программно-аппаратные средства архивирования и каталогизации (ПАС АК) осуществляют ведение структуры каталога и доступ к архи-

ву первичных БП, база данных БП ДЗЗ спроектирована на основе СУБД Oracle и развернута на аппаратных средствах ЕК ББП с использованием технологии Oracle Real Application Clusters. Долговременное хранилище первичных БП содержит множество zip-архивов, внутри которых хранятся растровые данные и метаданные в формате xml;

- автоматизированное рабочее место верификации БП поддерживает набор технологий верификации БП ДЗЗ на основе техник сопоставления данных ДЗЗ российских и зарубежных КА, таких как Landsat 7, Landsat 8, Terra/Aqua, EO-1 (доступ к открытым архивам зарубежных данных ДЗЗ реализуется по каналам Интернета);
- компонента создания БП включает набор приложений для формирования вторичных БП и приложение для формирования композитных изображений;
- компонента распространения БП включает Web-API и web-интерфейс для программного и персонального доступа к сервису соответственно.

Технологическая схема выполнения заказа продемонстрирована на рис. 3 и включает следующие основные этапы:

- 1) формирование заказа авторизованным клиентом/пользователем на основе Web-API (запись параметров заказа в БД ЕК ББП);
- 2) импорт заказа в систему АР;
- 3) проверка корректности исходных данных заказа;
- 4) подготовка исходных данных для выполнения заказа;
- 5) формирование БП заказа;
- 6) подготовка выполненного заказа к распространению;
- 7) экспорт заказа из системы администрирования;
- 8) доступ к выполненному заказу авторизованным клиентом/пользователем на основе HTTP-ссылки.

Программная компонента создания БП ДЗЗ

Компонента создания БП обеспечивает создание БП следующих тематических групп:

- 1) расчет спектрального коэффициента отражения (СКО) на верхней границе атмосферы (ВГА) по данным оптико-электронной аппаратуры;
- 2) расчет спектральных индексов по данным оптико-электронного оборудования;
- 3) формирование композитных изображений по данным мультиспектральных изображений.

Поскольку способ хранения базовых продуктов в долговременном архиве подразумевает наличие растровых данных в 8- или 16-битном представлении целочисленных значений, определим правила перехода к физическим величинам для растровых данных, представленных в цифровых отсчетах. Для этого будем использовать линейное преобразование в виде (1):

$$PV = \text{gain} \cdot DN + \text{offset}, \quad (1)$$

где:

PV — значение некоторой физической величины;
 DN — значение цифрового отсчета;
 $\{\text{gain}, \text{offset}\}$ — пара параметров перехода к физическим величинам, указанным в сопроводительной информации, поставляемой совместно с БП.

Приложение для расчета СКО на ВГА по данным оптико-электронного оборудования

Расчет СКО по данным ОЭА реализуется в соответствии с соотношением (2):

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda} \cdot D^2}{S_{\lambda} \cdot \cos \theta}, \quad (2)$$

где:

ρ_{λ} — СКО на ВГА для заданного канала сенсора;
 L_{λ} — значение величины СПЭЯ, фиксируемой датчиком для заданного канала, Вт/(м²·ср·мкм);
 D — расстояние от Земли до Солнца в а.е. на дату съемки;

Таблица 1. КА ДЗЗ, оборудованные мультиспектральными сенсорами

Космический аппарат	Мультиспектральный сенсор	Разрешение, м	Актуальные каналы			
			Red	Green	Blue	NIR
«Метеор-М» № 2	КМСС	60	+	+	-	+
«Ресурс-П» № 1	КШМСА-СР	120	+	+	+	+
Landsat-7	ETM+	30	+	+	+	+
Landsat-8	OLI	30	+	+	+	+

Таблица 2. Спектральные индексы, рассчитываемые по данным мультиспектральных изображений

Название	Формула	Диапазон
Normalized Difference Vegetation Index (Нормализованный разностный вегетационный индекс)	$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}}$	[-1; 1] Растительность — [0,2; 0,8]
Simple Ratio (Простое соотношение инфракрасный/красный)	$SR = \frac{\rho_{NIR}}{\rho_{RED}}$	[0; 30] Растительность — [2; 8]
Simple Ratio Red/Green (Простое соотношение красный/зеленый)	$RGR = \frac{\rho_{RED}}{\rho_{GREEN}}$	[0,1; 8] Растительность — [0,7; 3]
Atmospherically Resistant Vegetation Index (Вегетационный индекс, устойчивый к влиянию атмосферы)	$ARVI = \frac{\rho_{NIR} - 2\rho_{RED} - \rho_{BLUE}}{\rho_{NIR} + 2\rho_{RED} - \rho_{BLUE}}$	[-1; 1] Растительность — [0,2; 0,8]
Enhanced Vegetation Index (Усовершенствованный вегетационный индекс)	$EVI = \frac{\rho_{NIR} - 2\rho_{RED}}{\rho_{NIR} + 6\rho_{RED} - 7,5\rho_{BLUE} + 1}$	[-1; 1] Растительность — [0,2; 0,8]

S_{λ} — средняя солнечная внеатмосферная энергетическая освещенность (солнечная постоянная), Вт/(м²·ср·мкм);

θ — зенитное расстояние Солнца (рассчитывается для заданных пространственно-временных координат в соответствии с [3]).

Солнечная постоянная для конкретного спектрального канала вычисляется на основе формулы (3):

$$S_{\lambda} = \frac{\int f_s \cdot f_{\lambda} \cdot d\lambda}{\int f_{\lambda} \cdot d\lambda}, \quad (3)$$

где f_{λ} — функция чувствительности заданного канала сенсора;

f_s — функция спектра Солнца [4].

Формирование новых растровых изображений целесообразно только для широкозахватных сенсоров типа КМСС КА «Метеор-М». Для узкозахватных сенсоров (ширина захвата менее 200 км) расчет СКО сводится к коррекции параметров перехода к физическим величинам {gain, offset}.

Приложение для расчета спектральных индексов по данным оптико-электронного оборудования

Расчет спектральных индексов для оптико-электронной аппаратуры реализуется на основе данных в физических величинах СКО на ВГА. Индексы вегетации, рассчитываемые по данным мультиспектральной аппаратуры (см. табл. 1), представлены в табл. 2. Индексы вегетации, рассчитываемые по данным гиперспектральной аппаратуры КА «Ресурс-П», представлены в табл. 3.

По результатам работы приложения расчета спектральных индексов формируется растровое изображение в 16-битном представлении целочисленных значений, сопровождаемое параметрами перехода к актуальным диапазонам вторичных БП. Примеры вторичных БП, соответствующих спектральным индексам, рассчитанных на основе данных сенсора КМСС КА «Метеор-М» № 2, представлены на рис. 4.

Таблица 3. Отдельные рассматриваемые спектральные индексы, рассчитываемые по данным гиперспектральных изображений КА «Ресурс-П» № 1

Название	Формула	Диапазон
Red Edge Normalized Difference Vegetation Index (Нормализованный разностный вегетационный индекс 750/705)	$NDVI_{705} = \frac{\rho_{750} - \rho_{705}}{\rho_{750} + \rho_{705}}$	[-1; 1] Растительность [0,2; 0,9]
Modified Red Edge Simple Ratio Index (Модифицированное простое отношение 750/705)	$mSR_{705} = \frac{\rho_{750} - \rho_{445}}{\rho_{705} + \rho_{445}}$	[0; 30] Растительность [2; 8]
Modified Red Edge Normalized Difference Vegetation Index (Модифицированный нормализованный разностный вегетационный индекс 750/705)	$mNDVI_{705} = \frac{\rho_{750} - \rho_{705}}{\rho_{750} + \rho_{705} - 2 * \rho_{445}}$	[-1; 1] Растительность [0,2; 0,7]
Vogelmann Red Edge Index 1 (Индекс 1 Вогельмана для области ближнего инфракрасного)	$VOG1 = \frac{\rho_{740}}{\rho_{720}}$	[0; 20 >] Растительность [4; 8]
Vogelmann Red Edge Index 2 (Индекс 2 Вогельмана для области ближнего инфракрасного)	$VOG2 = \frac{\rho_{734} - \rho_{747}}{\rho_{715} + \rho_{726}}$	[0; 20] Растительность [4; 8]
Photochemical Reflectance Index (Нормализованный разностный индекс фотохимического отражения волн)	$PRI = \frac{\rho_{531} - \rho_{570}}{\rho_{531} + \rho_{570}}$	[-1; 1] Растительность [-0,2; 0,2]
Structure Insensitive Pigment Index (Индекс поглощения основными пигментными структурами)	$SIPi = \frac{\rho_{800} - \rho_{445}}{\rho_{800} - \rho_{680}}$	[0; 2] Растительность [0,8; 1,8]



Рис. 4. Примеры БП (слева направо — NDVI, SR, RGR), рассчитанных по данным КМСС КА «Метеор-М» (крайний справа)

Формирование композитного изображения по данным мультиспектральных сенсоров

С целью формирования композитных изображений на основе двух мультиспектральных изображений был разработан следующий алгоритм:

1. Приведение растровых данных к самому крупному разрешению (из рассматриваемых данных).
2. Выбор опорного первичного БП (в качестве опорного выбирается тот, съемка которого была произведена раньше).
3. Проецирование изображений (каналов) первичных БП в картографическую проекцию опорного первичного БП (соответствующую зону проекции UTM).

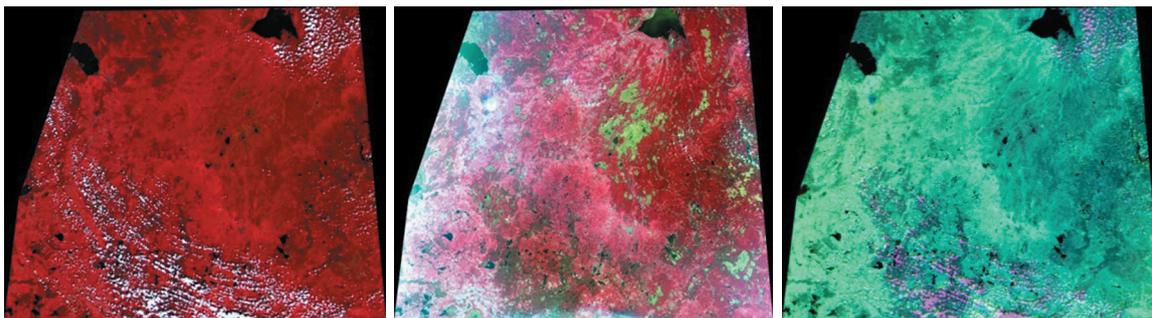


Рис. 5. Примеры сформированного композитного изображения (справа) с использованием разработанного приложения. Исходные данные: MODIS (слева), КМСС «Метеор-М» № 1 (в центре)

4. Приведение к цифровым отсчетам опорного изображения (радиометрическая коррекция):

$$DC_2 = \frac{gain_1}{gain_2} DC_1 + \frac{offset_1 - offset_2}{gain_2}, \quad (4)$$

где $\{gain_1, offset_1\}$ — пара параметров перехода к физическим величинам опорного изображения (для соответствующего канала); $\{gain_2, offset_2\}$ — пара параметров перехода к физическим величинам неопорного изображения (для соответствующего канала).

5. Формирование композитного изображения в формате RGB (на основе комбинации, представленной в табл. 4).

Таблица 4. Комбинация каналов для построения композитного изображения

Red	Green	Blue
Red ₂	NIR ₂	NIR ₁

На рис. 5 показан результат формирования композитного изображения по данным MODIS КА Terra/Aqua и КМСС КА «Метеор-М» (съемка выполнена в июне 2012 г.). В качестве опорного изображения был выбран снимок MODIS. Наиболее заметным объектом является облачность на композитном изображении, она подсвечивается розовым цветом.

Программная компонента распространения БП ДЗЗ

Программная компонента распространения включает два основных модуля доступа к сервисам банка базовых продуктов: программный доступ

на основе Web-API и персональный доступ пользователей по средствам web-интерфейса. Следует отметить, что доступ к сервисам из web-интерфейса реализуется также на основе обращений к Web-API.

На рис. 6 представлена архитектура web-приложения компоненты распространения при обращении пользователей к сервисам ЕК ББП посредством Web-API. Ключевыми особенностями предложенной архитектуры является:

- 1) доступ к сервисам по протоколу HTTPS (поддерживает шифрование), обеспечивающему доступ к сервисам только авторизованных клиентов/пользователей;
- 2) система, масштабируемая с учетом увеличения количества клиентов/пользователей.

Web-интерфейс системы распространения реализует следующий основной функционал (скриншот web-интерфейса представлен на рис. 7):

- 1) задание области интереса с использованием картографической основы;
- 2) задание критериев поиска, таких как диапазон дат, процент облачности, углы съемки КА для центра кадра, углы Солнца для центра кадра и другие;
- 3) просмотр уменьшенных копий изображений (quicklook) найденных кадров;
- 4) выбор вторичных БП для отобранных кадров;
- 5) выбор пар кадров для формирования композитных изображений БП для отобранных кадров;
- 6) возможность мониторинга состояния готовности заказа в «личном кабинете»; возможность

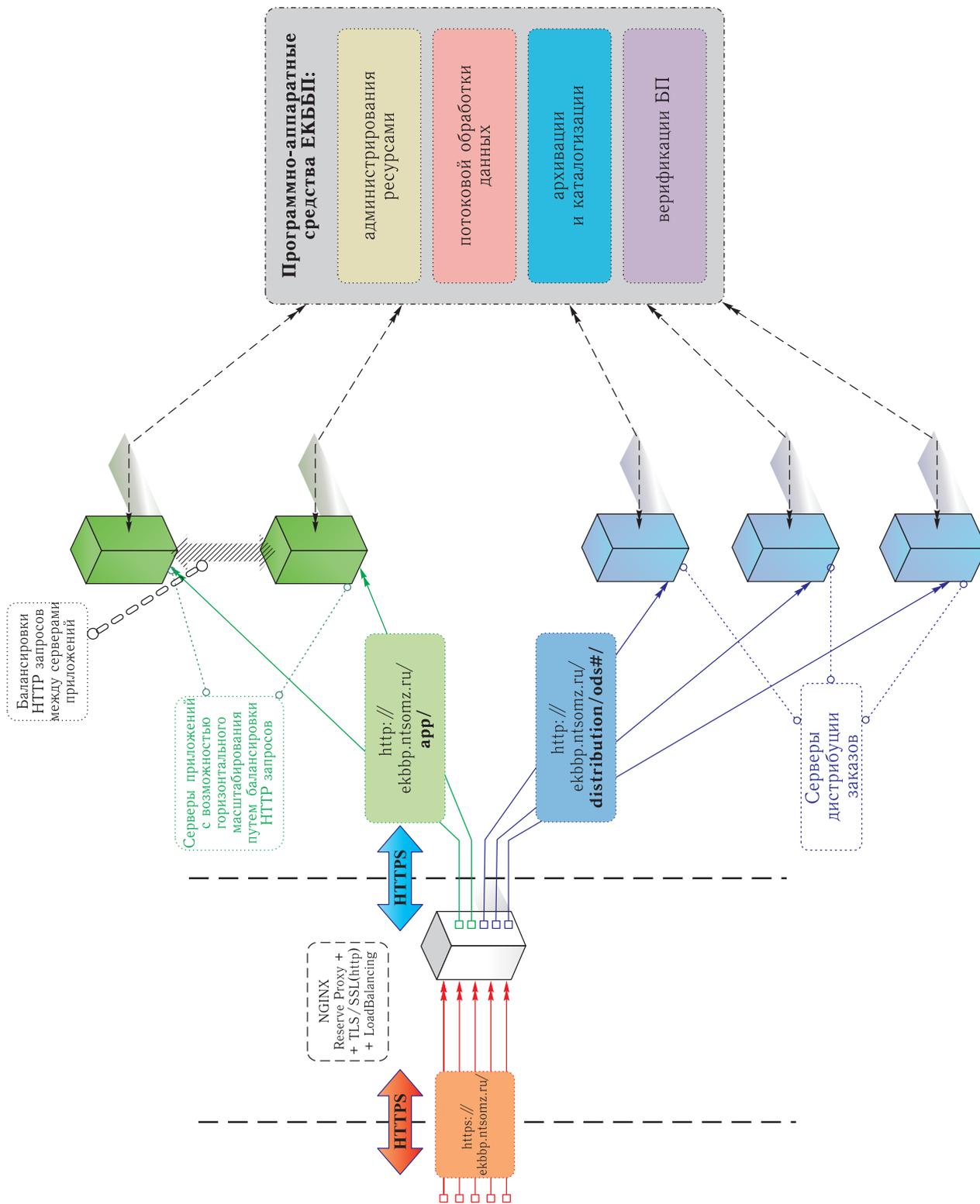


Рис. 6. Архитектура web-приложения компоненты распространения БП ДЗЗ

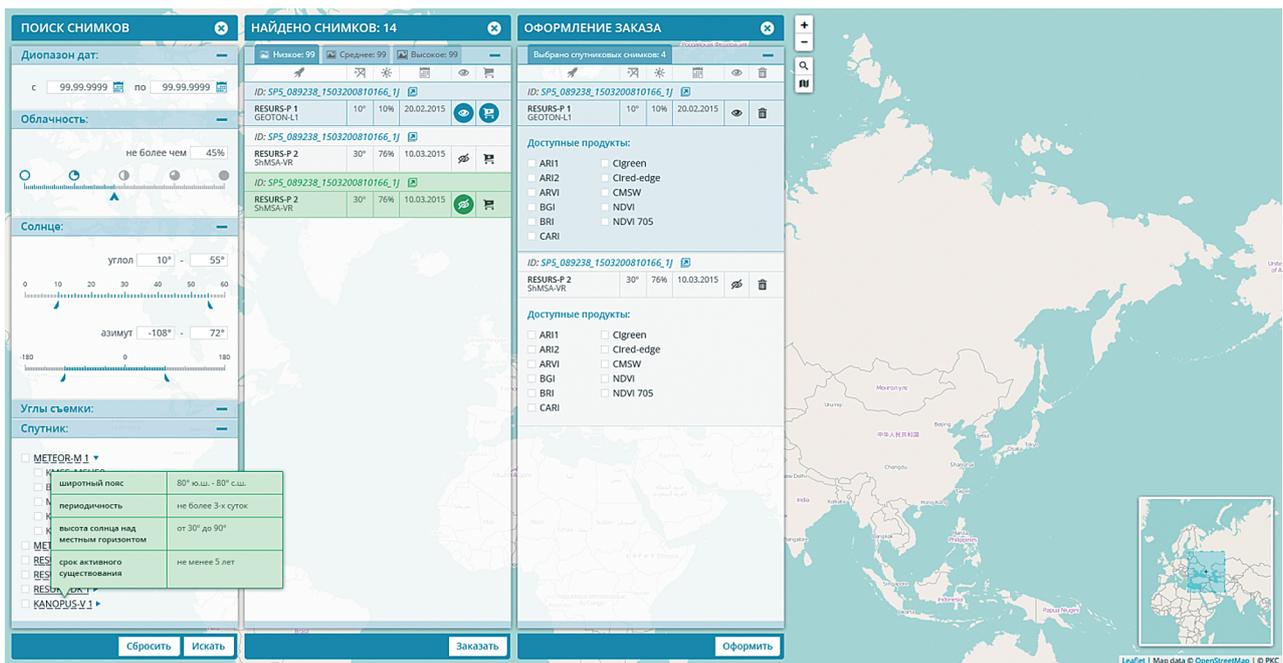


Рис. 7. Скриншот web-интерфейса компоненты распространения БП ДЗЗ

скачивания выполненного заказа в течение регламентированного промежутка времени (не более 14 дней).

Заключение

В рамках статьи рассмотрен создаваемый ЕК ББП как геоинформационный web-сервис. Доступ к различным базовым продуктам реализован посредством компоненты распространения, обеспечивающей персональный и абонентский доступ. Для формирования БП (по данным оптико-электронной аппаратуры) были разработаны приложения: расчет СКО на ВГА; расчет спектральных индексов; формирование мультивременных композитов. Доступ к банку базовых продуктов планируется организовать после его введения в эксплуатацию в начале 2016 г.

Список литературы

1. *Лурия Е.А., Саворский В.П.* Базовые продукты обработки данных дистанционного зондирования Земли // *Современные проблемы ДЗЗ из космоса*, 2012, т. 9, № 2, с. 87–96.
2. *Урличич Ю.М., Селин В.А., Емельянов К.С.* О приоритетах практической реализации развития космической системы дистанционного зондирования Земли // *Наука и технологии в промышленности*, 2012, № 1, с. 71–80.
3. *Blanco-Muriel M. et al.* Computing the Solar Vector // *Solar Energy*, 2001, vol. 70, № 5, p. 431–441.
4. *Thuillier G. et al.* The Solar Spectral Irradiance from 200 to 2400 nm as Measured by the SOLSPEC Spectrometer from the ATLAS and EURECA Missions // *Solar Physics*, 2003, 214:1–22.

АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ,
ПЛАНЕТ И ДРУГИХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ.
ГЕОЭКОЛОГИЯ И КОСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПОИСКА И СПАСАНИЯ

УДК 621.396

**Многозональное сканирующее устройство
для геостационарного метеоспутника «Электро-Л»**

**Р. В. Андреев, Н. П. Акимов, К. В. Бадаев, Ю. М. Гектин¹, А. А. Зайцев, А. В. Рыжаков,
М. Б. Смелянский, Н. А. Сулиманов, А. Г. Фролов²**

^{1,2}*к. т. н., АО «Российские космические системы»*

e-mail: petrov_sv@spacecorp.ru

Аннотация. Рассматриваются принцип действия, конструктивные особенности и направления развития приборов МСУ-ГС, предназначенных для эксплуатации в составе геостационарных метеоспутников «Электро-Л» № 1 и № 2. Созданная аппаратура обеспечивает полный обзор полушария Земли за 5 мин с периодичностью до 15 мин. Наблюдение поводится в десяти спектральных каналах. Три диапазона видимой области спектра с пространственным разрешением в надире 1 км и семь каналов инфракрасного диапазона с пространственным разрешением 4 км.

Ключевые слова: геостационарные метеоспутники; спектральнозональная съемка Земли; сканирующее устройство

**Multiizone scanning apparatus for geosynchronous
meteorological satellite «Electro-L»**

**R. V. Andreev, N. P. Akimov, K. V. Badaev, Yu. M. Gektin¹, A. A. Zaitsev, A. V. Ryzhakov,
M. B. Smeljanskij, N. A. Sulimanov, A. G. Frolov²**

^{1,2}*candidate of engineering science,
Joint Stock Company «Russian Space Systems»*

e-mail: petrov_sv@spacecorp.ru

Abstract. The principle of operation of MSU-GS apparatus, construction details and the primary way of its development are described in this paper. These apparatuses are intended for exploitation at the board of geostationary meteorological satellites “Electro-L” № 1, 2. It provides full observation of Earth semi-sphere during 5 minutes every 15–30 minutes. There are ten spectral bands at the apparatus. Three of there are at the visible range of spectrum with the spatial resolution of 1 km, other seven bands are infrared with the spatial resolution of 4 km.

Key words: geostationary meteorological satellites, spectral-bands Earth observation, scanning system

Введение

20 января 2011 г. на геостационарную орбиту Земли был успешно выведен метеорологический спутник «Электро-Л» № 1, созданный в НПО им. С. А. Лавочкина. Основной и наиболее сложный по конструктивному исполнению прибор этого аппарата — многозональное сканирующее устройство (МСУ-ГС № 1), разработанное и изготовленное АО «Российские космические системы». Задачей этого прибора является регулярное наблюдение всего диска Земли в нескольких спектральных диапазонах видимой и инфракрасной областях спектра для решения прежде всего ряда важных гидрометеорологических и природоведческих задач [1, 2]. Эффективность использования получаемой информации непосредственно связана с ее высокой радиометрической точностью, которая обеспечивается бортовыми системами калибровки МСУ-ГС № 1.

Приборы подобного назначения, но с более низкими характеристиками, разрабатывались и ранее, первый российский геостационарный метеоспутник был разработан ВНИИЭМ и запущен в 1994 г. [3]. Современное поколение спутников, имеющее трехосную стабилизацию в пространстве, потребовало разработки более сложных устройств наблюдения, обладающих двухкоординатными сканирующими системами. Наиболее близкий современный аналог МСУ-ГС № 1 — прибор Imager спутника GOES-12 [4].

Несмотря на технические проблемы, связанные со стабилизацией платформы космического аппарата (КА), прибор МСУ-ГС № 1 продолжает успешно функционировать [5] и предоставляет снимки диска Земли, один из которых приведен на рис. 1.

В настоящее время создан и готовится к запуску КА «Электро-Л» № 2, имеющий в составе модернизированный МСУ-ГС № 2 с абсолютно новым ИК-модулем.

(Далее в тексте будем приводить номер прибора в случае, если существуют принципиальные отличия между первым и вторым вариантом и, соответственно, номер не указывать, если описываемые характеристики или принципы работы общие для двух приборов.)

Основные тактико-технические характеристики аппаратуры

Штатная периодичность съемки составляет 30 мин, однако возможна и удвоенная частота получения снимков для наблюдения за динамическими природными процессами, такими как тайфуны, цунами, ураганы и т. п. В отличие от европейских и американских аналогов, аппаратура МСУ-ГС во всех режимах работы формирует изображение полного диска Земли, а не определенных фрагментов поверхности.

МСУ-ГС имеет два независимых оптико-механических модуля, жестко связанных между собой: МСУ-ГС-ИК и МСУ-ГС-ВД, формирующие изображения в инфракрасной и видимой областях спектра соответственно. Тактико-технические характеристики прибора приведены в табл. 1.

В одном сеансе съемки МСУ-ГС формируется семь изображений Земли в инфракрасных диапазонах спектра с разрешением по поверхности 4 км и три в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах, с разрешением 1 км (рис. 2).

Далее будут рассмотрены принцип действия МСУ-ГС № 1 и 2, а также их различия, обусловленные конструктивными доработками, направленными на повышение тактико-технических характеристик прибора.

Принцип работы МСУ-ГС № 1

Модуль МСУ-ГС-ВД, входящий в состав МСУ-ГС № 1, обеспечивает съемку в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. В МСУ-ГС № 2 принцип действия модуля остался прежним. Оптическая схема, реализованная как в МСУ-ГС № 1, так и в МСУ-ГС № 2, приведена на рис. 3.

Сканирование проводится зеркалом (1), оптический поток с которого попадает в две идентичные ветви. Объективы (2) каждой из ветвей развернуты на угол $4^{\circ}45'$ к оси визирования, поле зрения объективов 10° , таким образом, каждый объектив обеспечивает получение изображения половины диска Земли за сеанс съемки. Далее, отразившись от зеркал (3, 4), служащих для уменьшения общих габаритов системы, излучение попадает

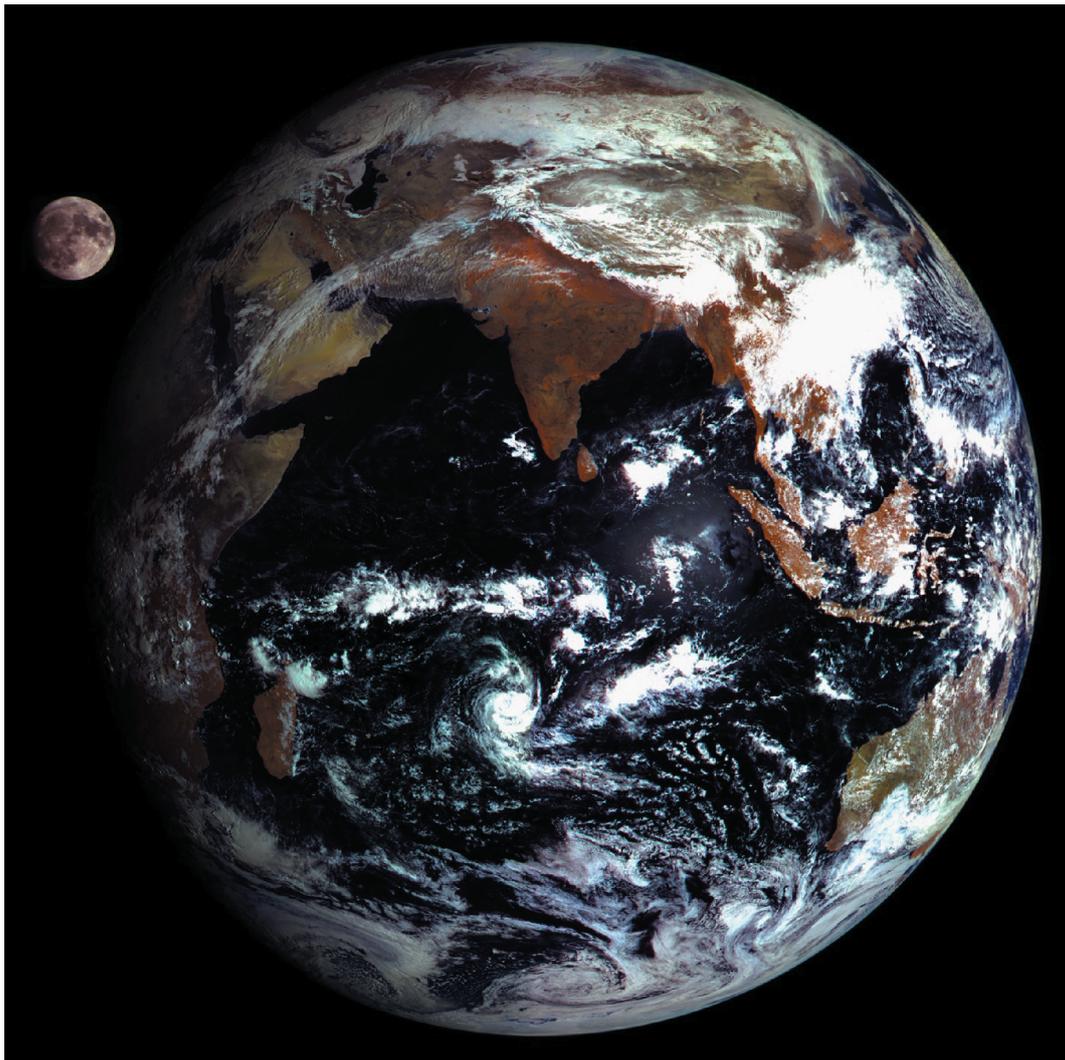


Рис. 1. Один из первых снимков, сделанных прибором МСУ-ГС № 1. Изображение синтезировано из трех спектральных каналов: 0,50–0,65 мкм, 0,65–0,80 мкм и 0,80–0,90 мкм

Таблица 1. Основные тактико-технические характеристики прибора МСУ-ГС

Модуль	№ спектрального канала	Границы спектрального диапазона, мкм	Пространственное разрешение в надири, км ²	Угловое поле зрения
МСУ-ГС-ВД	1	0,50–0,65	1 × 1	19° × 26,1°
	2	0,65–0,80		
	3	0,80–0,90		
МСУ-ГС-ИК	4	3,5–4,0	4 × 4	20° × 20°
	5	5,7–7,0		
	6	7,5–8,5		
	7	8,2–9,2		
	8	9,2–10,2		
	9	10,2–11,2		
	10	11,2–12,5		

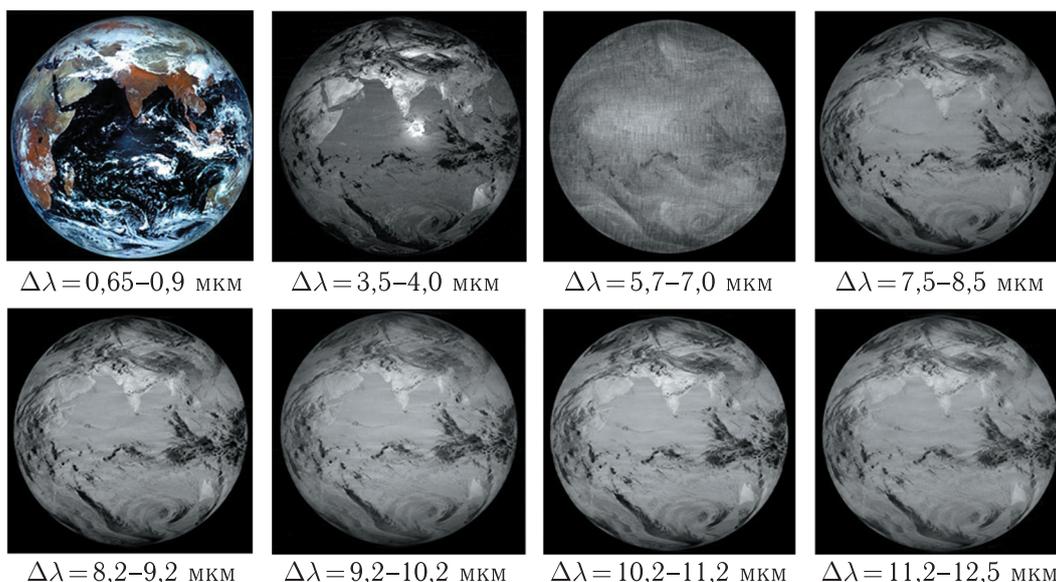


Рис. 2. Визуальное представление информации, получаемое прибором МСУ-ГС за один сеанс съемки

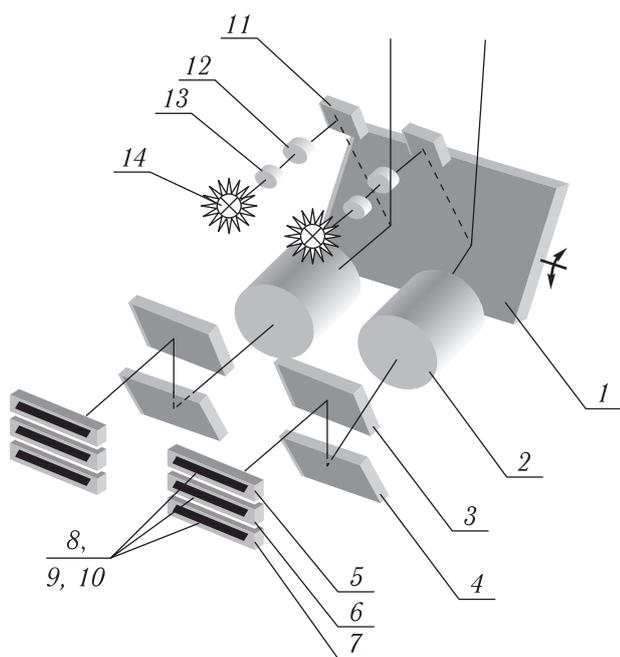


Рис. 3. Оптическая схема модуля МСУ-ГС-ВД:
 1 — однокоординатное сканирующее зеркало; 2 — объектив; 3, 4 — поворотные зеркала; 5 — светофильтр, формирующий диапазон 0,50–0,65 мкм; 6 — светофильтр, формирующий диапазон 0,80–0,90 мкм; 7 — светофильтр, формирующий диапазон 0,65–0,80 мкм; 8, 9, 10 — ПЗС-линейки; 11 — поворотное зеркало; 12 — светофильтр; 13 — объектив; 14 — источник излучения

через светофильтры (5, 6, 7), формирующие требуемые спектральные диапазоны, на линейные фотоприемные устройства с зарядовой связью (ПЗС) (8, 9, 10). В каждой ветви линейки расположены в плоскости изображения и разнесены по полю зрения, чем и определяется увеличенное поле зрения системы по кадру до $26,1^\circ$.

Для повышения радиометрической точности предусмотрен режим калибровки, в процессе которого зеркало (1) разворачивается так, чтобы излучение эталонного источника, пройдя через всю оптическую систему, проецировалось на ПЗС-линейках. Для каждой ветви установлена своя система калибровки, каждая из которых содержит источник излучения (14), объектив (13), светофильтр (12) и поворотное зеркало (11). Во время режима калибровки защитные крышки прибора, установленные перед сканирующим зеркалом, закрываются.

Оптический модуль МСУ-ГС № 1, обеспечивающий съемку в инфракрасном диапазоне спектра, собран в отдельном корпусе. Его принципиальная схема приведена на рис. 4.

Получение изображения обеспечивается за счет сканирования по двум осям зеркалом (1), прецизионное движение которого обеспечивает специальный двигатель, разработанный в СКБ КП ИКИ РАН (г. Таруса), погрешность равномерности его

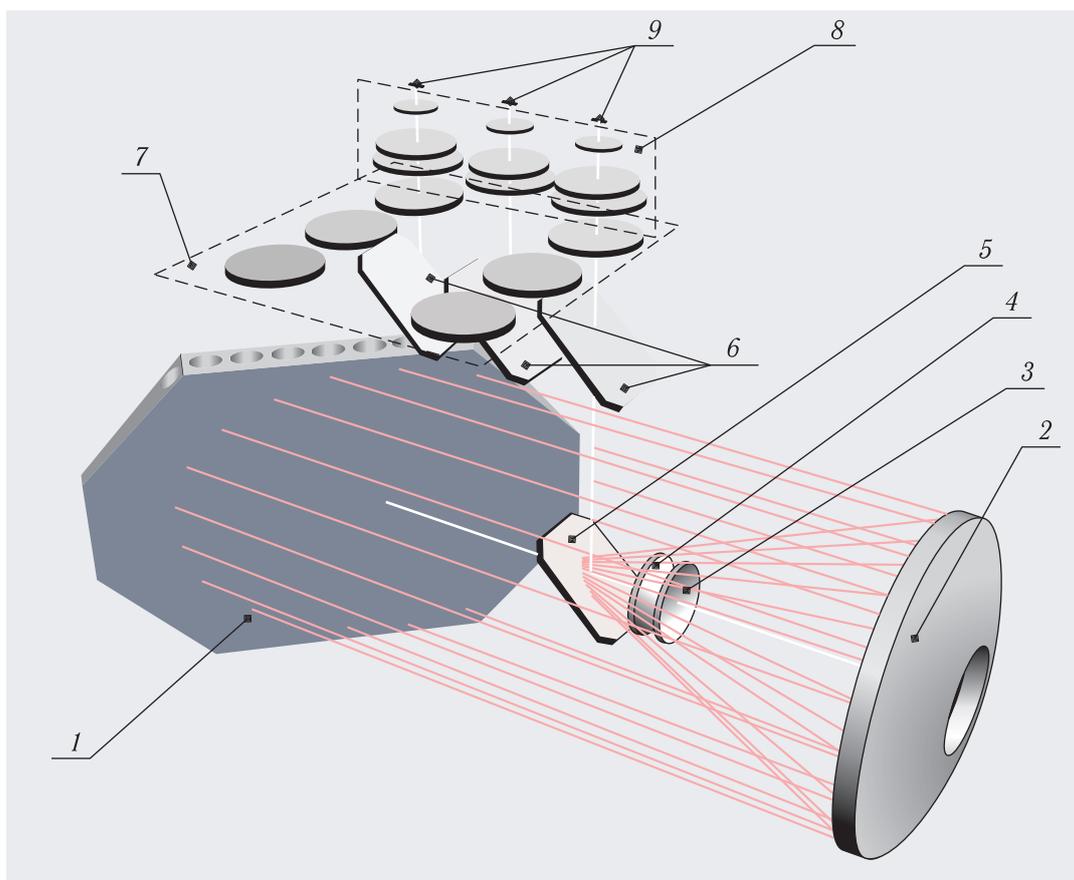


Рис. 4. Оптическая схема ИК-модуля МСУ-ГС № 1:

1 — двухкоординатное сканирующее зеркало; 2, 3, 4 — телескопическая система; 5 — поворотное зеркало; 6 — спектроделительная система; 7 — сменные светофильтры; 8 — объективы; 9 — многоэлементные приемники излучения

движения по траектории не превышает $3,5''$, точность позиционирования — $18''$. От зеркала (1) оптическое излучение попадает в телескопическую систему (2, 3, 4), выполненную по схеме Галилея, состоящую из основного сферического зеркала (2) диаметром 220 мм и двухлинзового объектива (3, 4). Далее, отразившись от поворотного зеркала (5), излучение попадает в спектроделительную систему (6). Она состоит из интерференционных фильтров и выделяет три широких спектральных диапазона. Формирование более узких спектральных диапазонов обеспечивается сменными светофильтрами (7). Затем разделенные оптические потоки фокусируются объективами (8) на многоэлементных приемниках излучения (9) (разработаны ОАО «НПО «Орион»). Рабочая температура приемников — 79 К. Для обеспечения температурного режима приемники устанавливаются

на пассивную систему радиационного охлаждения (РХ), излучающую тепло в космическое пространство (разработано АО «НИИЭМ»).

Приемники излучения изготовлены на основе тройного соединения кадмий–ртуть–теллур и имеют формат 2×96 элементов. Они ориентированы таким образом, что при одном повороте зеркала формируется скан шириной 96 строк. Полное изображение диска Земли формируется за 34 скана.

Процесс формирования изображений поясняется рис. 5 (идентичен для МСУ ГС № 1 и № 2).

Для формирования всех семи спектральных каналов проводится запись трех кадров при различных положениях светофильтров (7). Циклограмма последовательности получения информации в различных спектральных каналах представлена на рис. 6.

Внешний вид МСУ-ГС № 1, установленного на КА «Электро-Л» № 1, показан на рис. 7.

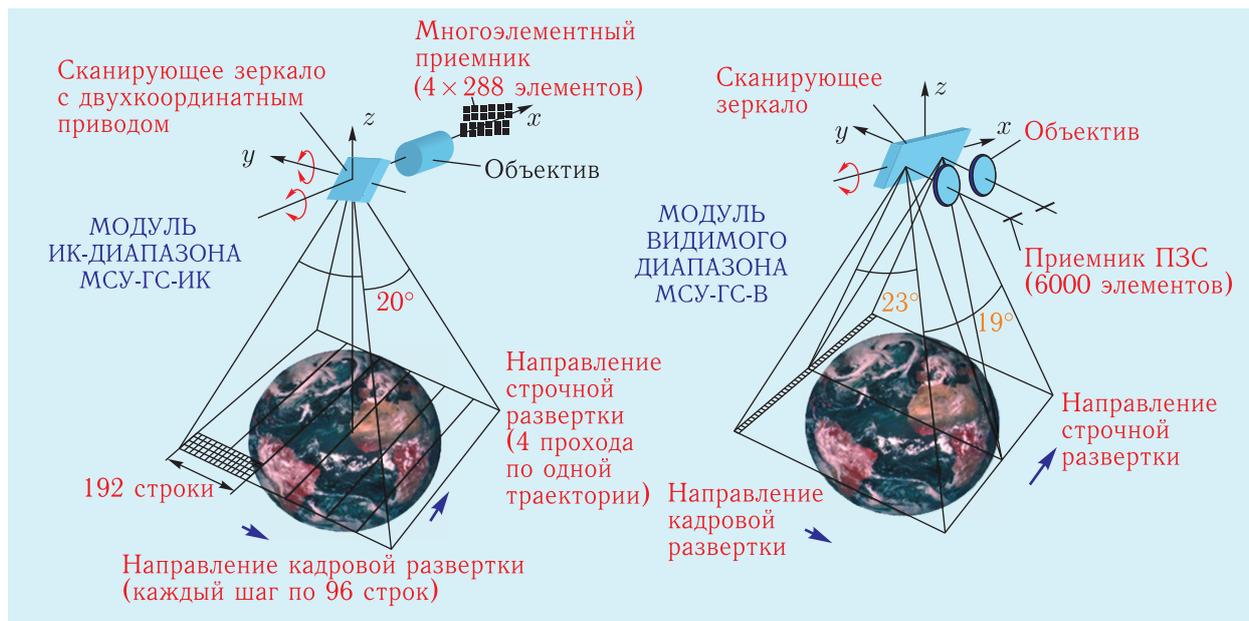


Рис. 5. Принцип построения изображения и геометрия сканирования прибора МСУ-ГС



Рис. 6. Циклограмма работы прибора МСУ-ГС №1

Принцип работы модернизированного ИК-модуля МСУ-ГС № 2

По результатам летной эксплуатации к работе ИК-модуля был выдвинут ряд замечаний в части циклограммы работы и радиометрической точности получаемой информации. Для устранения этих замечаний при создании прибора МСУ-ГС № 2 были выполнены доработки, обеспечивающие повышение радиометрической точности и одновремен-

ное получение изображений во всех спектральных каналах [6]: разработана новая оптическая схема с использованием асферических поверхностей, применены ИК-фотоприемники формата 288 × 4 с улучшенными шумовыми характеристиками и оптимизированной спектральной чувствительностью, одновременно используются 7 приемников, организован режим сканирования с гарантированным получением сигналов, не коррелированных по низкочастотным шумам.

Новая оптическая схема ИК-модуля представлена на рис. 8.

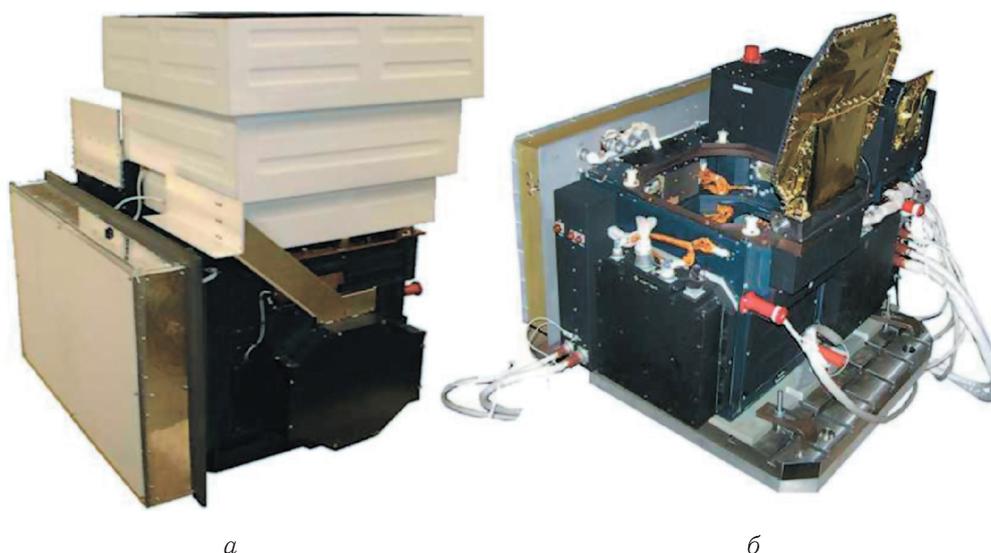


Рис. 7. Внешний вид прибора МСУ-ГС для КА «Электро-Л» № 1.
а — с защитным кожухом, б — без кожуха

Принцип работы системы заключается в следующем: оптическое излучение от земной поверхности направляется сканирующим зеркалом (1) в зеркальный объектив (2, 3) с диаметром главного зеркала 220 мм, затем зеркало (5) делит световой поток на две части так, что образуются две «ветви», поле зрения каждой из которых составляет половину поля зрения зеркального объектива. В результате получают две плоскости промежуточного изображения, в которых располагаются линзы коллективов (6), служащие для уменьшения диаметра оптического пучка. Два полученных потока излучения попадают в две системы спектроделения, состоящие из интерференционных фильтров (7). После спектроделительной системы объективы (9) собирают семь световых потоков на многоэлементных приемниках излучения (11). Спектр полученных потоков не во всех каналах соответствует требуемой полосе пропускания, поэтому перед некоторыми приемниками излучения установлены дополнительные светофильтры (10). Поворотные зеркала (4, 8) обеспечивают требуемое взаимное расположение многоэлементных приемников.

В отличие от первого варианта ИК-модуля, в оптической схеме отсутствуют элементы, работающие на пропускание в широкой области спектра (рис. 7, поз. 3, 4) 3,5–12,5 мкм. Благодаря этим из-

менениям увеличилась величина оптического потока, попадающего на фоточувствительные площадки приемников, и повысилась эффективность преобразования оптического сигнала в электрический (табл. 2).

Таблица 2. Коэффициент пропускания оптической системы ИК-модулей

№ спектрального канала	МСУ-ГС №1	МСУ-ГС №2
4	0,51	0,49
5	0,10	0,4
6	0,22	0,42
7	0,31	0,43
8	0,42	0,45
9	0,32	0,44
10	0,26	0,39

Формирование изображений проводится с помощью сканирующего зеркала, при этом за один скан формируются 192 строки. Это объясняется тем, что в силу особенностей оптической схемы в каждой линейке фотоприемника для построения изображения используются не все 288 элементов, а только 192. На 96 элементов излучение не попадает, уровень темнового сигнала этих элементов используется для компенсации временного «ухода»

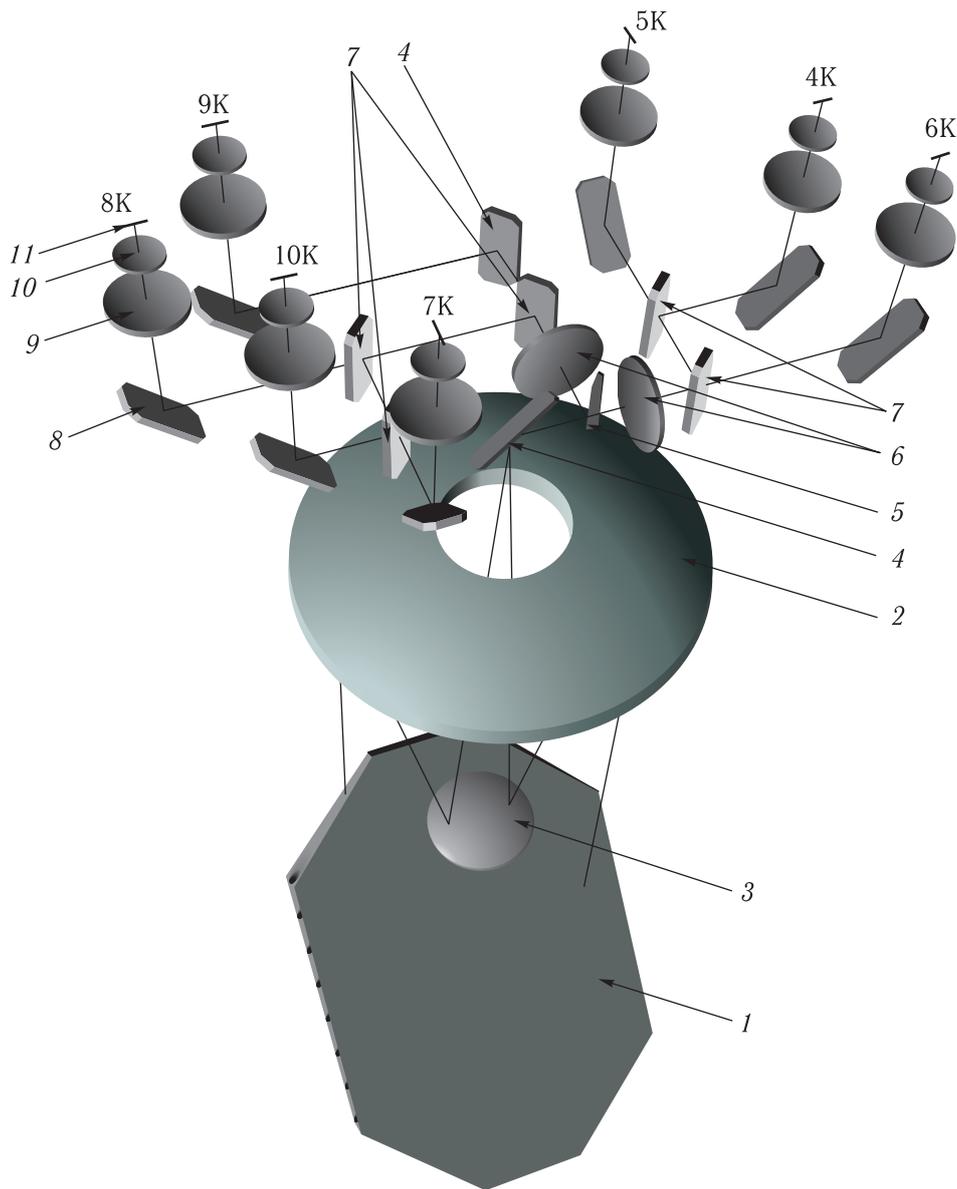


Рис. 8. Оптическая схема ИК-модуля МСУ-ГС № 2:

1 — двух координатное сканирующее зеркало; 2 — основное параболическое зеркало; 3 — вторичное зеркало; 4 — поворотное зеркало; 5 — разделительное зеркало; 6 — линзы коллективов; 7 — дихроическое зеркало; 8 — зеркало поворотное; 9 — объектив; 10 — фильтр; 11 — многоэлементные приемники излучения (4К–10К — номера соответствующих спектральных каналов)

значения выходного сигнала приемника. Приемники излучения ориентированы длинной стороной поперек направления сканирования. Полное изображение состоит из 34 сканов, при этом используется принцип временной задержки и накопления сигнала, т. е. изображение с каждой точки поверхности проецируется последовательно на 4 элемента приемника (в первом варианте МСУ-ГС-ИК — на 2 эле-

мента), значения сигналов с которых затем усредняются. Благодаря увеличенной размерности фотоприемников, при строчном сканировании реализовано 50%-е перекрытие сканов.

В целях повышения радиометрической точности измерений спектральные характеристики фотоприемников были оптимизированы под требуемые спектральные диапазоны (рис. 9).

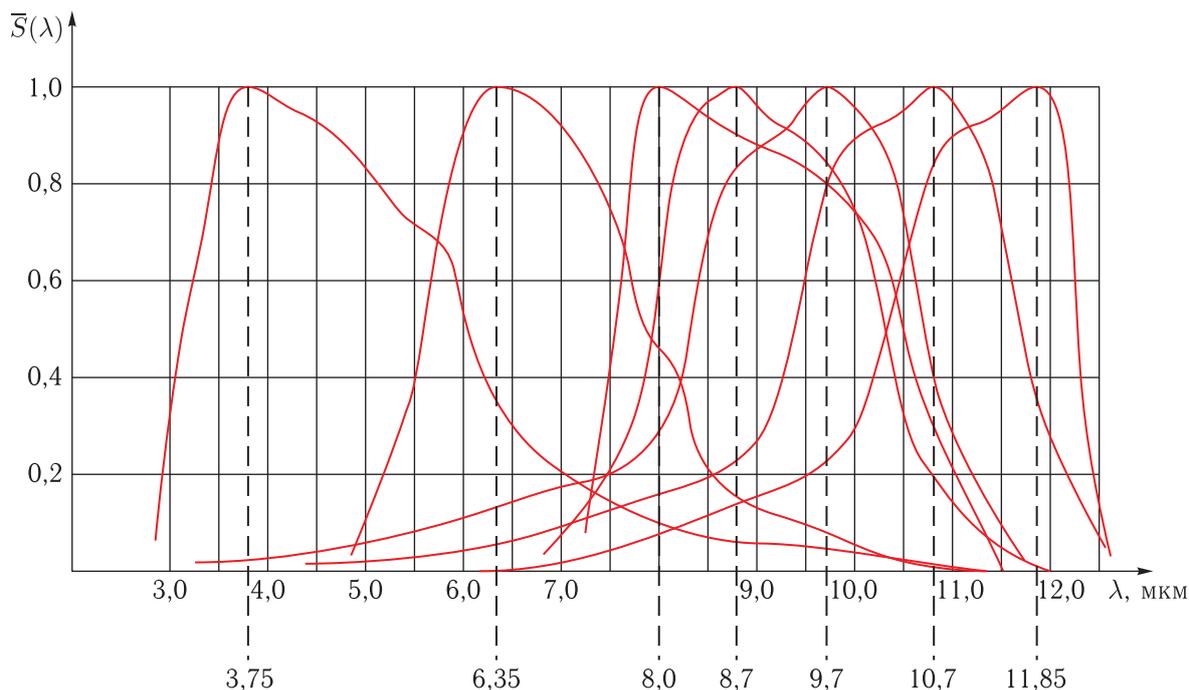


Рис. 9. Спектральные характеристики приемников излучения в каналах 4–10

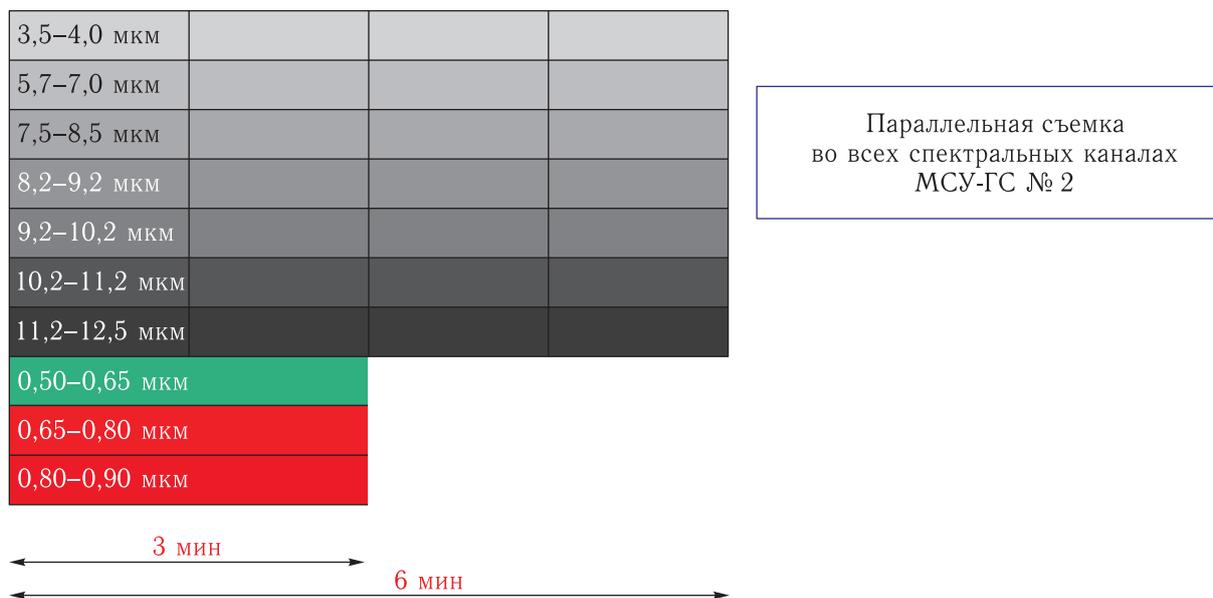
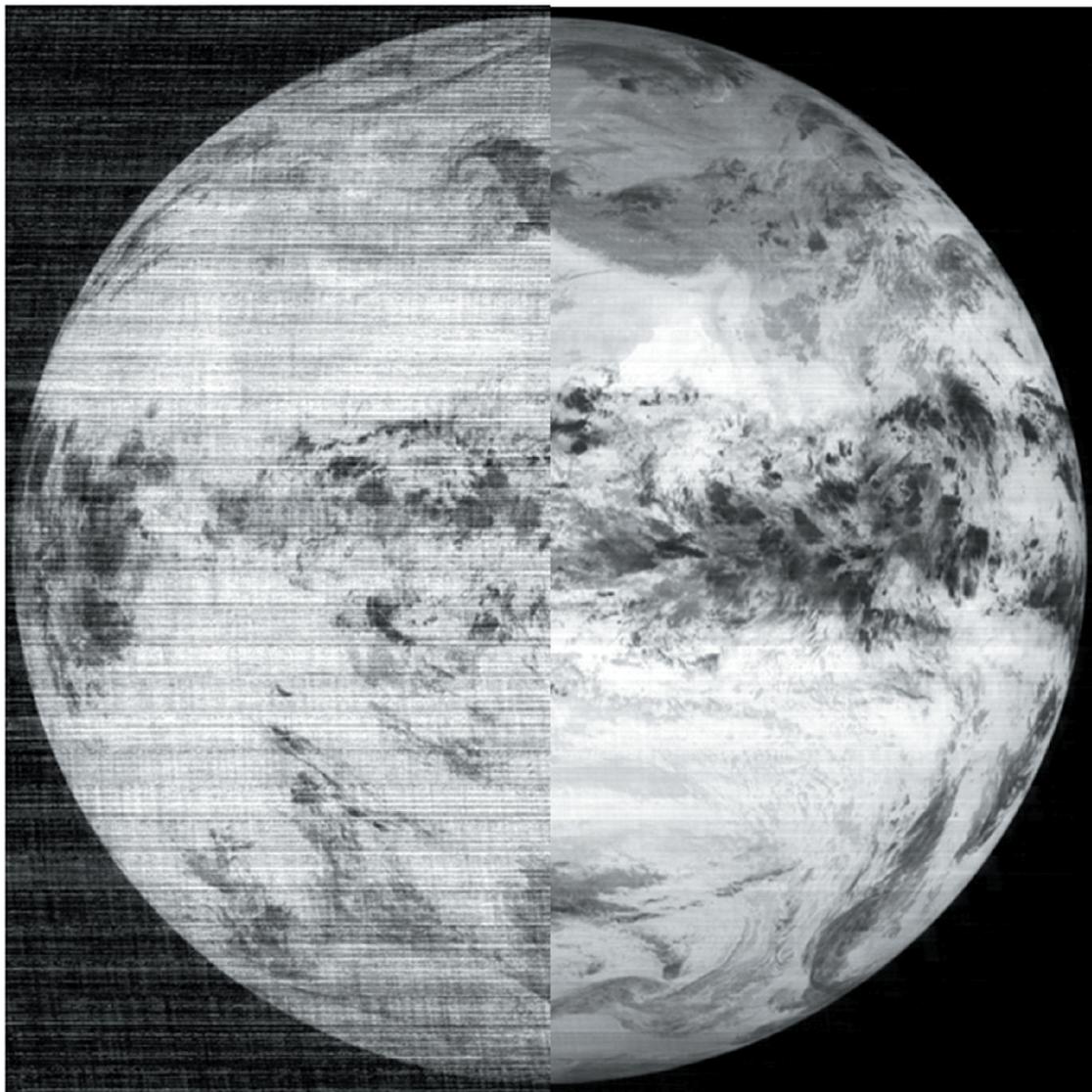


Рис. 10. Циклограмма работы прибора МСУ-ГС №2

В модернизированном модуле было значительно уменьшено время получения изображения полного диска Земли (рис. 10). Образовавшийся резерв времени используется для получения четырех кадров, совершенно не коррелированных по

шумовым составляющим фотоприемников. Данные по этим кадрам усредняются при наземной обработке, что позволяет повысить радиометрическую точность получаемой информации. В случае необходимости наблюдения за особо динамичными



Сеанс 22.10.2011
(до «очистки»)

Сеанс 04.11.2011
(после «очистки»)

Рис. 11. Влияние криоосадков на качество изображения (на примере МСУ-ГС № 1). Слева — до, справа — после работы режима «очистки»

метеорологическими процессами сохранена возможность получения четырех независимых кадров в более короткие временные интервалы.

Все перечисленные доработки позволят значительно повысить радиометрическую точность измерений. Сравнение достигнутого температурного разрешения МСУ-ГС № 1 и МСУ-ГС № 2 приведено в табл. 3.

Одновременное получение изображений в каналах инфракрасной области спектра позволило ре-

ализовать циклограмму работы прибора, представленную на рис. 10.

Увеличение количества приемников с 3 до 7 повлекло увеличение тепловыделения, что, в свою очередь, потребовало значительного увеличения площади системы радиационного охлаждения фотоприемников (рис. 12). Кроме того, были разработаны и внедрены в РХ (радиационный холодильник) методы борьбы с криоосадками, состоящими в основном из кристаллов льда, осаждающихся на

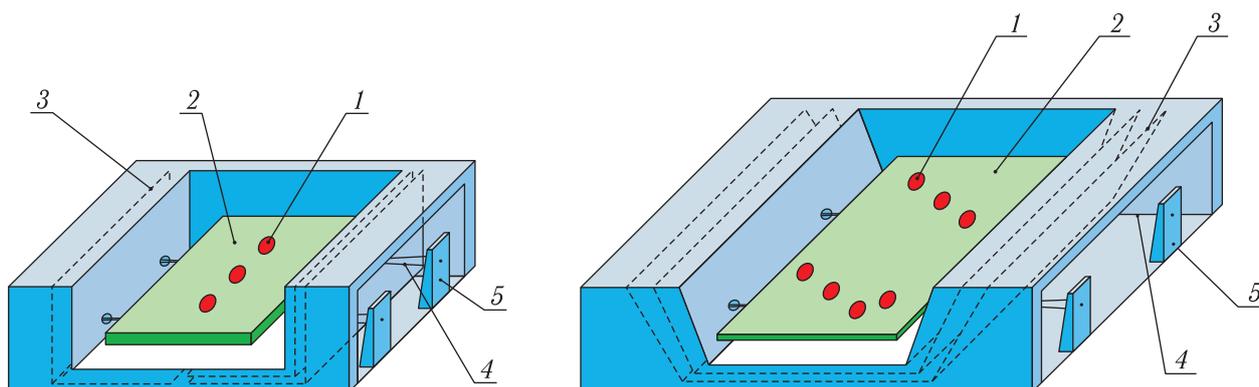


Рис. 12. Конструкция радиационного холодильника прибора МСУ ГС № 1 (слева) и МСУ ГС № 2 (справа). 1 — фотоприемники, 2 — вторая ступень радиатора (78 К), 3 — первая ступень радиатора (150 К), 4 — нити, удерживающие вторую ступень, 5 — стойки крепления нитей

Таблица 3. Радиометрическая точность ИК-модулей МСУ-ГС №1 и №2

№ спектрального канала	МСУ-ГС №1, ΔT , К	МСУ-ГС №2, ΔT , К
4	0,3	0,23
5	1,5	0,11
6	0,3	0,08
7	0,3	0,25
8	0,3	0,20
9	0,3	0,17
10	0,7	0,18

холодных входных окнах фотоприемников. Это явление значительно ухудшает качество получаемых изображений (рис. 11). Для парирования этого процесса разработан режим «очистки РХ»: производится нагрев первой и второй (поверхности с фотоприемниками) ступеней РХ, в результате чего криоосадки испаряются с входных окон приемника.

Испарившаяся вода очень медленно покидает внутренний объем РХ, поэтому через некоторое время качество изображений опять падает. В доработанном приборе конструкция РХ была изменена таким образом, чтобы боковые стенки внутренней теплоизоляции располагались под углом (расходились — рис. 12 (3)). В результате молекулы воды в режиме «очистки», испарившись с оптических поверхностей, улетают в космос после соударения со стенками значительно быстрее, чем при их параллельном расположении. Таким образом, после нескольких сеансов «очистки» большая часть

водяного пара улетает в открытый космос. Эффективность выполненной доработки подтвердилась во время эксплуатации прибора МСУ-МР в составе КА «Метеор-М» № 2, имеющего аналогичную систему охлаждения фотоприемников.

У новой системы охлаждения повышенная холодопроизводительность в результате увеличенной на 30% площади излучающей поверхности, тем самым при тепловыделении 300 мВт обеспечивает температуру приемников 78–80 К. В итоге увеличится радиометрическая точность аппаратуры за счет более низкой температуры работы приемников и меньшего количества криоосадков, влияющих на качество получаемой информации.

Внешний вид модуля приведен на рис. 13.

Заключение

Хотя при создании МСУ-ГС № 2 для КА «Электро-Л» № 2 был достигнут значительный прогресс в повышении качества получаемой информации, работы над совершенствованием приборов продолжают, так, например, для некоторых ИК-каналов есть возможность улучшить радиометрическую точность более чем на 25% по сравнению с МСУ-ГС № 2, что будет реализовано уже в следующем приборе, изготавливаемом для КА «Электро-Л» № 3.

В ближайшие годы планируется дополнить геостационарную группировку спутников «Электро-Л» двумя высокоэллиптическими спутниками



Рис. 13. МСУ-ГС для КА «Электро-Л» № 2

«Арктика-М», что позволит на регулярной основе наблюдать полярные области, играющие важную роль в формировании погоды Северного полушария [6]. Спутники «Арктика-М» будут созданы на аппаратной основе «Электро-Л» с использованием модифицированных приборов МСУ-ГС.

Список литературы

1. *Асмус В. В., Дядюченко В. Н., Загребаев В. А. и др.* Развитие космического комплекса гидрометеорологического обеспечения на базе геостационарных спутников серии «Электро-Л» // Вестник ФГУП НПО им. С. А. Лавочкина, 2012, № 1, с. 3–14.
2. Патент № 2319183 РФ. G02B 26/10. Многозональное сканирующее устройство для дистанционного получения изображения / Новиков М. В., Гектин Ю. М., Акимов Н. П., Сулиманов Н. А., Смелянский М. Б., заявлено 23.06.2006. Опубл. 10.03.2008.
3. *Трифонов Ю. В.* Космические аппараты дистанционного зондирования Земли. М.: ФГУП НПО ВНИИЭМ, 2008. 69 с.
4. Effects of Ice Decontaminaton on GOES-12 Imager Calibration // Geo science and Remote Sensing. IEEE Transactions, 2013, vol. 51, is. 3, p. 1224–1230.
5. *Гектин Ю. М., Киселева Ю. А., Рублев А. Н.* Интеркалибровка данных измерений в ИК-каналах сканера геостационарного метеоспутника «Электро-Л» по данным измерений ИК-зондировщика AIRS // Исследование Земли из космоса, 2015, № 5 (в печати).
6. Доклад «Результаты работы метеорологической аппаратуры МСУ-МР и МСУ-ГС и перспективы ее развития» / Акимов Н. П., Гектин Ю. М., Смелянский М. Б., Сулиманов Н. А., Фролов А. Г. / 6-я Международная научно-техническая конференция «Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика», Рязань, 1–3 октября 2013 г.
7. *Хартов В. В., Мартынов М. Б., Бабышкин В. Е., Москатиньев И. В. и др.* Новая высокоэллиптическая система гидрометеорологического обеспечения на базе геостационарных спутников серии «Электро-Л» // Вестник ФГУП НПО им. С. А. Лавочкина, 2012, № 1(12), с. 3–14.

АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ,
ПЛАНЕТ И ДРУГИХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ.
ГЕОЭКОЛОГИЯ И КОСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПОИСКА И СПАСАНИЯ

УДК 621.396.67

**Радиолокационные антенные системы
дистанционного зондирования Земли
для малых космических аппаратов**

А. С. Чеботарев¹, В. А. Пантелеев, Н. М. Фейзулла, Е. М. Митрофанов, А. Н. Пластик²

¹д. т. н., ²к. т. н.,

АО «Особое конструкторское бюро Московского энергетического института» (АО «ОКБ МЭИ»)

e-mail: secretary@okbmei.ru

Аннотация. Описаны принципы построения антенных систем (АС) радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) для систем дистанционного зондирования Земли, размещаемых на малых космических аппаратах (МКА) и создаваемых на основе раскрывающихся зеркальных антенн ферменной конструкции, разрабатываемых в ОАО «ОКБ МЭИ». Основой рефлекторов является жесткий ферменный каркас, к которому крепится металлическое сетеполотно, играющее роль радиоотражающей поверхности. Возможность электронного переключения луча АС с малым шагом для режима ScanSAR реализуется благодаря использованию сложных облучателей, состоящих из решетки излучателей, СВЧ-переключателей и делителей мощности. Рассмотрены разработанные трансформируемые зеркальные системы для работы в составе РСА S-диапазона, размещаемые на отечественном и китайском МКА.

Ключевые слова: зеркальная антенна, малый космический аппарат, дистанционное зондирование Земли, радиолокатор с синтезированной апертурой

**Earth Remote Sensing Radiolocating Antenna Systems
Mounted on a Small Spacecraft**

A. S. Chebotarev¹, V. A. Panteleev, N. M. Feyzulla, E. M. Mitrofanov, A. N. Plastik²

¹doctor of engineering science, ²candidate of engineering science,

JSC "Special Research Bureau of Moscow Power Engineering Institute" (JSC "OKB MEI")

e-mail: secretary@okbmei.ru

Abstract. The paper describes the principles of constructing antenna systems for Earth remote sensing synthetic aperture radar (SAR) systems mounted on the small spacecrafts and based on the truss-type deployable reflector antennas developed by JSC "OKB MEI". The basis of reflectors is a rigid truss framework. Metallic mesh grid playing the role of reflecting surface is attached to this framework. The possibility of providing electronic beam scanning with a small step for ScanSAR mode is realized by the usage of complex feed, consisting of an array of antennas, microwave switches and power divider. Two S-band SAR deployable reflector systems designed for Russian and Chinese small spacecrafts are presented.

Key words: reflector antenna, small spacecraft, Earth remote sensing, synthetic aperture radar

I. Введение

При создании радиолокационных антенных систем (АС) дистанционного зондирования Земли для малых космических аппаратов (МКА) важными параметрами антенн являются минимально возможные габариты и масса в транспортном положении при условии обеспечения системно требуемых радиотехнических характеристик: наличия нескольких переключаемых лучей в диаграмме направленности, имеющих заданные значения их угловой ширины и угловых расстояний между соседними лучами. Для построения таких АС крайне актуально использование зеркальных антенн, меняющих свои габаритные размеры и форму при переводе из транспортируемого состояния в рабочее [1].

В докладе описаны принципы создания АС радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА), размещаемых на МКА и создаваемых на основе раскрывающихся зеркальных антенн ферменной конструкции, разрабатываемых в ОАО «ОКБ МЭИ». Рассмотрены две трансформируемые зеркальные системы для работы в составе РСА S-диапазона, размещаемых на отечественном и китайском МКА. Благодаря использованию сложных облучателей, в них реализован режим обзорного наблюдения ScanSAR с электронным сканированием лучом антенны с малым дискретным шагом.

II. Основная часть

Основа складных раскрывающихся рефлекторов — жесткий ферменный каркас, к которому крепится металлическое сетеполотно, играющее роль радиоотражающей поверхности. На рис. 1 представлен фрагмент антенны.

Конструкцию каркаса составляют шарнирно соединенные складывающиеся стержни 3 и диагональные стержни 4. Стержни ферменной структуры сходятся в узловых шарнирных соединениях 1, которые расположены на двух криволинейных поверхностях. В каждом таком узлом соединении сходятся по три диагональных стержня, обеспечивающих связь узловых точек вогнутой (рабочей стороны, на которой закрепляется сетеполотно), и выпуклой (тыльной стороны) поверхностей

каркаса, а также по шесть складывающихся стержней, которые образуют пояса поверхностей каркаса. Складывающиеся стержни имеют в середине шарниры с пружинами 2.

При складывании зеркала складывающиеся стержни располагаются между диагональными стержнями, радиоотражающая поверхность также убирается внутрь каркаса. Развертывание антенны происходит автоматически за счет энергии, запасенной в пружинах шарниров при складывании.

ОКБ МЭИ начиная с 1972 г. вложило значительные материальные средства и интеллектуальный потенциал в разработку антенн описанной ферменной конструкции. В процессе выполнения НИР и ОКР были разработаны и испытаны несколько образцов антенн. Впервые антенны концепции ОКБ МЭИ прошли успешные летные космические испытания в составе радиолокационных систем с синтезированной апертурой в 1985 г. на космическом аппарате «Космос-1689» и в 1996 г. на модуле «Природа» пилотируемого космического комплекса «Мир».

Общая задача оптимального проектирования зеркальной антенны для обзорного режима работы РСА заключается в разделении задачи наведения лучей при обзоре на медленную составляющую общего перенацеливания, где возможно наведение электромеханическим приводом, и быструю составляющую, реализуемую с помощью облучающего устройства. Требуемая ширина зоны наблюдения в азимутальной плоскости реализуется путем электронного переключения луча АС с малым шагом, для чего разрабатываются сложные облучатели, состоящие из решетки излучателей, СВЧ-переключателей и делителя мощности (рис. 2). Наличие нескольких узких парциальных лучей обеспечивается перемещением группы активных излучателей (кластера) по всей апертуре облучателя.

На основе описанной апробированной технологии построения ферменных антенн проведена разработка трансформируемой зеркальной системы с многолучевым облучателем S-диапазона для бортового метеорологического радиолокатора Академии наук КНР (рис. 3). Рефлектор антенны имеет размеры 6 м × 2,8 м. В рамках этого международного проекта были обоснованы техниче-

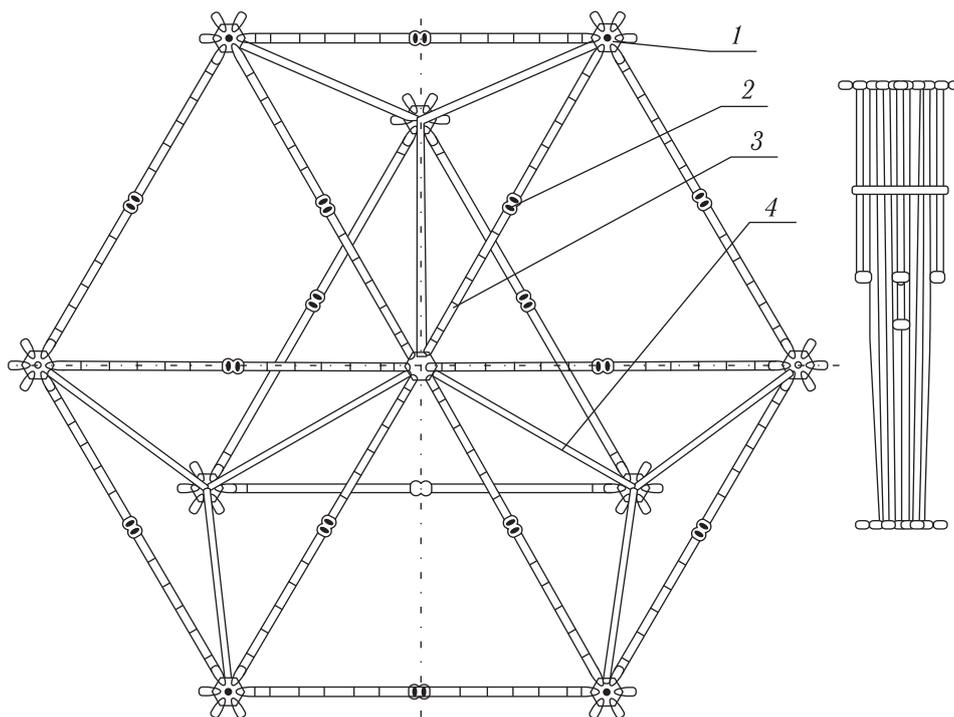


Рис. 1. Фрагмент конструкции фермы рефлектора в развернутом (слева) и сложенном (справа) видах

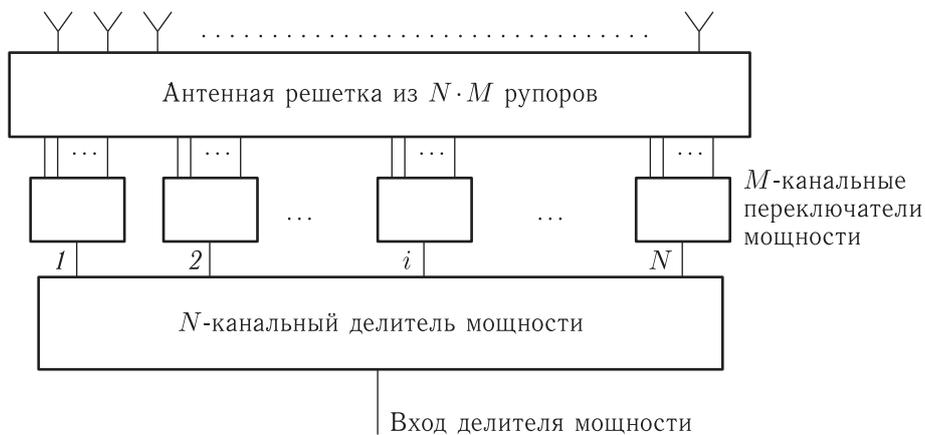


Рис. 2. Схема построения облучателя

ские требования и возможность реализации проекта РСА на малом китайском космическом аппарате. АС поставлялась заказчику в полном составе, содержащем самораскрывающийся рефлектор с замками и устройством расчеховки, многолучевой облучатель с блоком управления переключателем лучей, механизм поворота с блоком управления механизмом поворота, волноводный тракт с вращающимися переходами и с устройством разделения канала

лов приема-передачи. АС в полном составе с дополнительными устройствами, необходимыми для монтажа на МКА и повышения вибрационной жесткости, имеет массу 110 кг.

Характерной особенностью характеристик излучения подобных зеркальных антенн с треугольно-фасетной аппроксимацией радиоотражающей поверхности является наличие в определенных сечениях диаграммы направленности ряда боковых

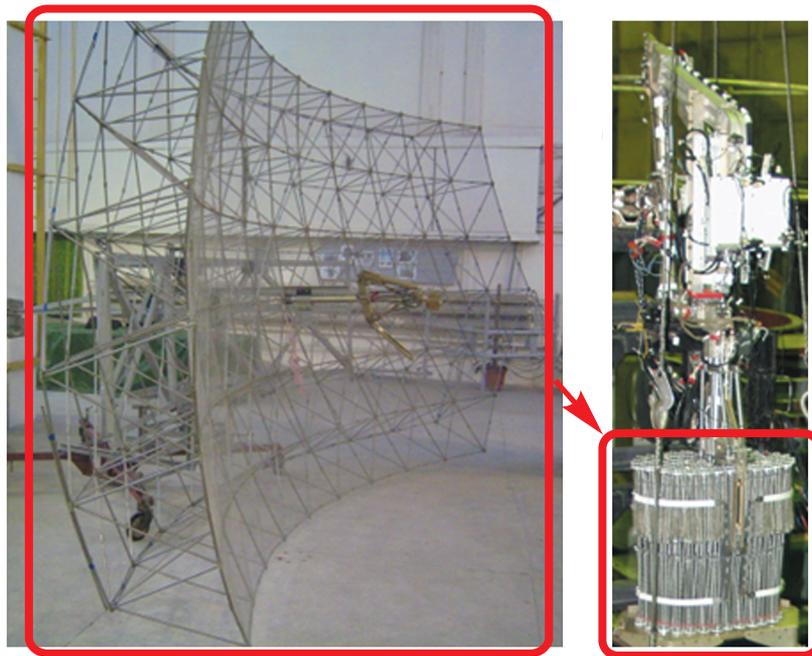


Рис. 3. Антенна для радиолокатора КНР в раскрытом (слева) и сложенном (справа) состояниях

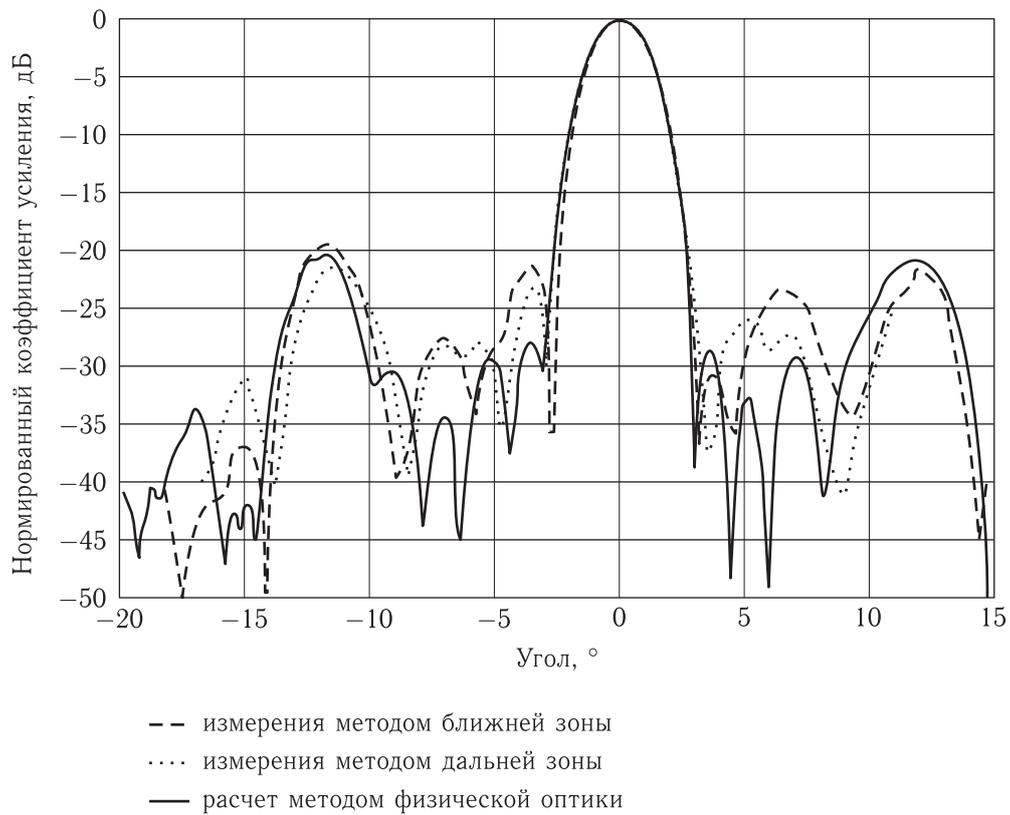


Рис. 4. Сопоставление результатов расчета и измерений диаграммы направленности антенной системы радиолокатора КНР для одного из лучей

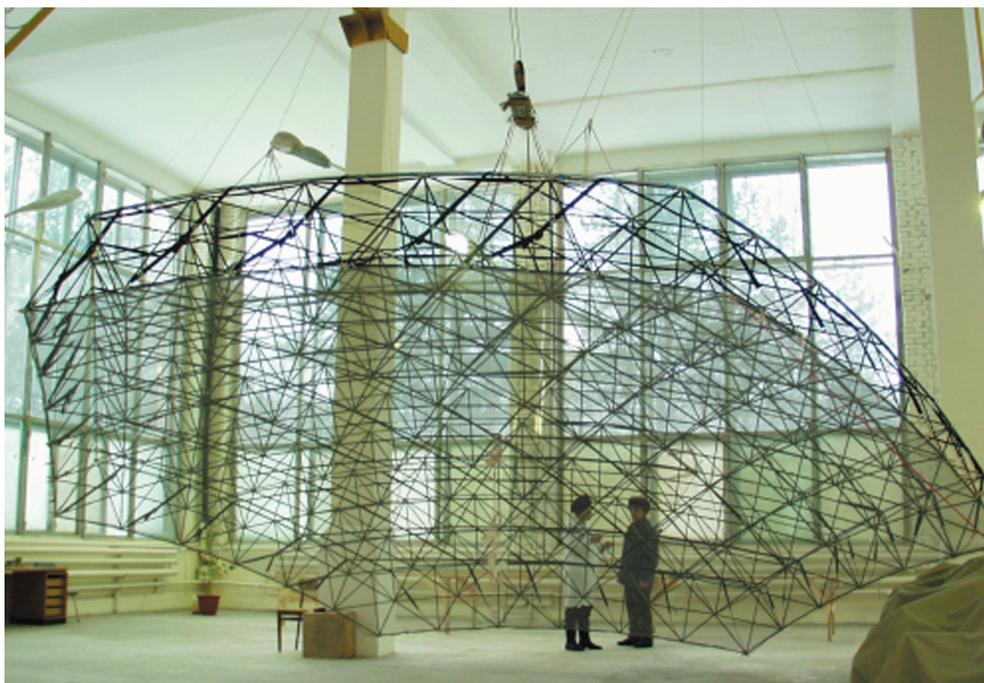


Рис. 5. 7-метровый рефлектор для МКА «Кондор»

лепестков, подобных главному и превышающих уровни соседних апертурных боковых лепестков. Возникновение подобных лепестков связано с наличием в раскрыве квазипериодических фазовых ошибок и должно контролироваться, в т. ч. на этапе проектирования. Для антенны для радиолокатора КНР уровень наибольшего такого лепестка составляет около -20 дБ (рис. 4).

Также разработана раскрывающаяся зеркальная АС с многолучевым облучателем S-диапазона для отечественной радиолокационной системы с синтезированной апертурой «Кондор», запущенной на орбиту в 2013 г. Рефлектор антенны (рис. 5) имеет размеры апертуры $6 \text{ м} \times 7 \text{ м}$. Каркас рефлектора выполнен из углепластиковых стержней, что позволило снизить массу самого зеркала и всей АС в целом. Общая масса рефлектора с устройствами удержания и всеми конструктивными элементами не превышает 50 кг. Среднеквадратическое отклонение радиоотражающей поверхности рефлектора от идеального параболоида вращения составляет около 3 мм

III. Заключение

Используемая концепция создания складных раскрывающихся АС ферменной конструкции позволяет разрабатывать трансформируемые зеркальные антенны с большим коэффициентом укладки и малой массой для РСА, размещаемых на МКА. Режим сканирования ScanSAR обеспечивается за счет использования сложного облучателя. Точность поверхности разрабатываемых рефлекторов позволяет эффективно работать на частотах вплоть до 5 ГГц–6 ГГц. Для обеспечения возможности работы на более высоких частотах (повышения точности радиоотражающей поверхности) применяют дополнительное усложнение ферменной конструкции.

Список литературы

1. Космическая складная антенна / А. Ф. Богомолов, Н. В. Букарев, Г. Н. Важенцев, Ю. А. Кирсанов, И. Ф. Соколов, Н. М. Фейзулла. — В кн.: Антенны / Под ред. А. А. Пистолькорса. Вып. 29. М.: Радио и связь, 1981, с. 10–20.

АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ,
ПЛАНЕТ И ДРУГИХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ.
ГЕОЭКОЛОГИЯ И КОСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПОИСКА И СПАСАНИЯ

УДК 621.396.962

**Экспериментальные исследования возможностей
метода малых базовых линий с использованием
данных PCA ASAR/ENVISAT и PALSAR/ALOS**

А. А. Феоктистов¹, А. И. Захаров², М. А. Гусев³, П. В. Денисов⁴

¹к. ф.-м. н., Научный центр оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ)
АО «Российские космические системы»

²д. ф.-м. н., Фрязинский филиал ИПЭ им. В. А. Котельникова РАН

^{3,4}Научный центр оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ)
АО «Российские космические системы»

e-mail: denisov@ntsomz.ru

Аннотация. Представлено детальное описание ключевых моментов метода малых базовых линий. Отмечены основные особенности алгоритма, реализованного в модуле SBAS пакета SARscape. Сообщается о результатах экспериментальных исследований возможностей метода малых базовых линий, полученных при обработке длинных временных серий изображений PCA ASAR/ENVISAT, PCA PALSAR/ALOS и результатов подспутниковых GPS-измерений с помощью модуля SBAS программного пакета SARscape.

Ключевые слова: метод малых базовых линий, PCA, ASAR/ENVISAT, PALSAR/ALOS, SARscape, граф связи, атмосферный фазовый экран, ЦМР

**Experimental Studies of Small Baselines Technique
with Use of SAR ASAR/ENVISAT
and PALSAR/ALOS Data Set**

A. A. Feoktistov¹, A. I. Zakharov², M. A. Gusev³, P. V. Denisov⁴

¹candidate of physico-mathematical sciences, Research Center for Earth Operative Monitoring
Joint Stock Company "Russian Space Systems"

²Sc.D., Institute of Radio-engineering and Electronics RAS; branch in Fryazino

^{3,4}Research Center for Earth Operative Monitoring,
Joint Stock Company "Russian Space Systems"

e-mail: denisov@ntsomz.ru

Abstract. Detailed description of small baseline technique is presented. Basic features of SBAS algorithm implementation in the SARscape software package are described. Results of experimental studies of small base lines technique are presented. SAR ASAR/ENVISAT and PALSAR/ALOS data set, GPS data set and SBAS module of SARscape software package were used.

Key words: small baseline technique, SBAS, SAR, ASAR/ENVISAT, PALSAR/ALOS, SARscape, connection graph, atmospheric phase screen, DEM

1. Введение

В Научном центре оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ) АО «Российские космические системы», ориентируясь на планы Роскосмоса по созданию перспективных российских радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА), проводятся исследования и отработка технологий обработки радиолокационной информации. Известно, что возможности классических методов интерферометрической [1, 2] и дифференциальной интерферометрической [3, 4] обработки данных радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) при измерении рельефа и подвижек земной поверхности существенно ограничены эффектами атмосферных фазовых искажений и пространственной и временной декорреляции (т.е. потерей когерентности между интерферометрическими парами изображений).

Современные методы постоянных рассеивателей (PS) и малых базовых линий (SBAS), основанные на совместном использовании длинных временных серий изображений РСА (т.е. изображений высокой кратности, полученных в повторяющейся геометрии съемки), позволяют ослабить влияние эффектов пространственной и временной декорреляции и атмосферных искажений и повысить точность измерения рельефа и подвижек отражающей поверхности в создаваемых цифровых моделях рельефа (ЦМР) и цифровых картах смещений (ЦКС).

В рамках метода PS задача выявления подвижек отражающей поверхности и измерения рельефа решается для ограниченного набора пикселей с достаточно сильным устойчивым отраженным сигналом (постоянных рассеивателей), наблюдаемых в большом количестве на территориях типа городской застройки [5, 6]. В [7, 8] представлены результаты исследований возможностей метода на примере модуля PS программного пакета *SARscape* и тестового массива данных (длинная временная серия из 25 фрагментов изображений РСА *ASAR/ENVISAT* размером 16×17 км², полученных в период с 25.10.2002 по 27.01.2006 гг. по одному из районов вблизи Лас-Вегаса, США). Данные входят в комплект поставки пакета *SARscape*. В качестве опорной ЦМР при проведении обработки использована ЦМР *SRTM V4*. Ввиду отсутствия каких-либо результатов подспутниковых наземных

измерений основной акцент сделан на анализе относительных точностных характеристик выходных продуктов модуля PS пакета *SARscape*, включая средние значения и СКО рассчитанных скоростей смещений и остаточных высот.

2. Ключевые моменты метода малых базовых линий

Возможность формирования пространственно «плотных» выходных продуктов реализована в рамках метода SBAS. Ключевые моменты метода SBAS: 1) формирование наборов свернутых интерферограмм (временные и пространственные базовые линии интерферометрических пар изображений должны удовлетворять вводимым пороговым ограничениям); 2) развертка фазы свернутых интерферограмм; 3) матричная формулировка алгоритмов инверсии (оценки векторов смещений \mathbf{p} и остаточной топографии Δh по значениям фазы развернутых интерферограмм) для случаев одного и нескольких несвязанных SBAS-наборов (интерферограммы для пар изображений несвязанных наборов отсутствуют); 4) введение «гладкой» полиномиальной временной модели для изменения фазового сигнала смещений во времени; 5) коррекция атмосферных фазовых искажений с использованием разработанных в рамках метода PS процедур низкочастотной пространственной и высокочастотной временной фильтрации [9, 10].

Основные особенности алгоритма, реализованного в модуле SBAS пакета *SARscape*: 1) фильтрация свернутых интерферограмм с использованием одного из трех фильтров (*Adaptive*, *Boxcar*, *Goldstein*); 2) возможность выбора между методами 2D- и 3D-развертки; 3) дополнительное использование результатов развертки усредненных свернутых интерферограмм, имеющих более низкое пространственное разрешение (вводится специальный параметр — уровень декомпозиции); 4) коррекция орбитальных ошибок методами орбитальной коррекции (*Orbital refinement*) или коррекции остаточной фазы (*Residual Phase refinement*) с использованием опорных точек местности (ОТМ), выбираемых на развернутых интерферограммах; 5) разбиение процедуры инверсии на два этапа (первая

и вторая инверсии; атмосферная коррекция выполняется в рамках второй инверсии). Предусмотрено использование большого объема интерактивных процедур визуально-инструментального анализа промежуточных и конечных результатов обработки с целью обеспечения возможности коррекции сделанного ранее выбора алгоритмов и значений их параметров в ключевых процедурах обработки (с последующим повторным запуском процесса вычислений), а также удаления интерферограмм с высоким уровнем шумов и наличием неустраняемых артефактов [10–12].

3. Экспериментальные результаты

Комплексные экспериментальные исследования возможностей метода *SBAS* выполнены на примере модуля *SBAS* программного пакета *SARscape* и тестового массива (входит в комплект поставки пакета *SARscape*) в составе: 1) длинной временной серии из 34 фрагментов изображений PCA *ASAR/ENVISAT* (размером $16 \times 15,3 \text{ км}^2$), полученных в период с 04.09.2006 по 08.09.2010 гг.; 2) длинной временной серии из 23 фрагментов изображений PCA *PALSAR/ALOS* (размером также $16 \times 15,3 \text{ км}^2$), полученных в период с 26.08.2006 по 22.10.2010 гг. и 3) результатов спутниковых *GPS*-измерений для одной точки, находящейся в пределах области «покрытия земной поверхности изображениями PCA. Территория съемки — префектура Чива (*Chiba*), Япония, на которой расположено несколько участков с проседанием и подъемом почвы. Смещения земной поверхности вызваны добычей газа и закачкой воды [11, 12].

При проведении анализа свернутых интерферограмм выявлялись интерферограммы, характеризующиеся: 1) наличием параллельных интерференционных полос из-за значительных погрешностей в орбитальных параметрах; 2) «размытостью» в направлении наклонной дальности вследствие недостаточно корректной процедуры совмещения для этого направления; 3) низким уровнем когерентности из-за слишком большой временной и/или пространственной базовой линии; 4) наличием характерных признаков атмосферных фазовых искажений. Дополнительно выполнен предварительный поиск зон смещений земной поверхности.

При проведении анализа развернутых интерферограмм выявлялись «плохо развернутые» интерферограммы, характеризующиеся наличием фрагментов с кратными 2π скачками фазы («острова»). Пороговое значение когерентности при проведении развертки фазы интерферограмм равно 0,35. Уровень декомпозиции установлен равным единице.

Коррекция орбитальных ошибок проводилась методом *Residual Phase refinement* с использованием более 40 опорных точек местности (ОТМ), выбранных на файлах развернутой фазы вне зоны деформации земной поверхности.

Предварительная оценка векторов смещений \mathbf{p} и остаточной топографии Δh (первая инверсия) проведена в рамках линейной модели изменения фазового сигнала смещений во времени. Повторно выполнены развертка фазы (уровень декомпозиции увеличен до двух) и анализ развернутых интерферограмм. В общей сложности по результатам анализа удалено 26 *ASAR/ENVISAT*-интерферограмм и 5 *PALSAR/ALOS*-интерферограмм.

После выполнения атмосферной коррекции с использованием процедур низкочастотной пространственной и высокочастотной временной фильтрации рассчитаны уточненные значения векторов смещений \mathbf{p} и временные серии накопленной деформации $d(t_i, x, r)$ (вторая инверсия). Модель изменения фазового сигнала смещений во времени оставлена линейной.

Для всех результатов, полученных в рамках этапов первой и второй инверсии, выполнена процедура орторектификации; размер ячейки для обеих временных серий PCA-изображений установлен равным 25 м. Вектора смещений \mathbf{p} и серии накопленной деформации $d(t_i, x, r)$ спроектированы на вертикальное направление.

На рис. 1, а отображены цифровые карты средней скорости смещения, рассчитанные по данным PCA *PALSAR/ALOS*; на рис. 1, б — по данным PCA *ASAR/ENVISAT*. Среднее значение разности скорости смещения по данным PCA *ASAR/ENVISAT* и PCA *PALSAR/ALOS* (после усреднения по площади изображений) оказалось равным 0,62 мм/год; стандартное отклонение равно 2,8 мм/год. Следует особо подчеркнуть, что рассчитанные цифровые карты были построены с использованием данных разных диапазонов спектра, причем съемки

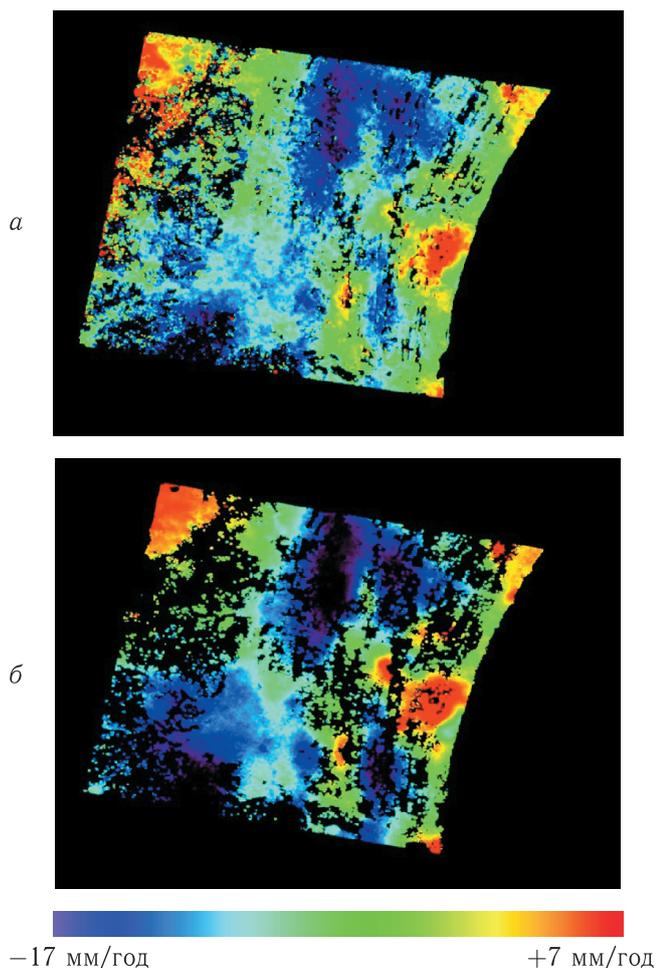


Рис. 1. Средние скорости смещения по данным PCA PALSAR/ALOS(a) и PCA ASAR/ENVISAT (б)

каждым из PCA проводились в разные даты, т.е. при заведомо различающихся атмосферных условиях наблюдения. Это позволяет утверждать, что полученные оценки — достаточно объективная характеристика точности самого метода SBAS.

На рис. 2, а демонстрируются результаты расчетов на основе распределения хи-квадрат (по данным PCA ASAR/ENVISAT), позволяющие проводить анализ результатов не только в терминах величины средней скорости смещения, но также и в терминах типов смещений. Сине-зеленые цвета соответствуют территории с квазилинейным типом смещений; красным цветом выделены два фрагмента с существенно нелинейным типом. В качестве примера на рис. 2, б представлены графики для временных серий накопленной деформации D (в мм)

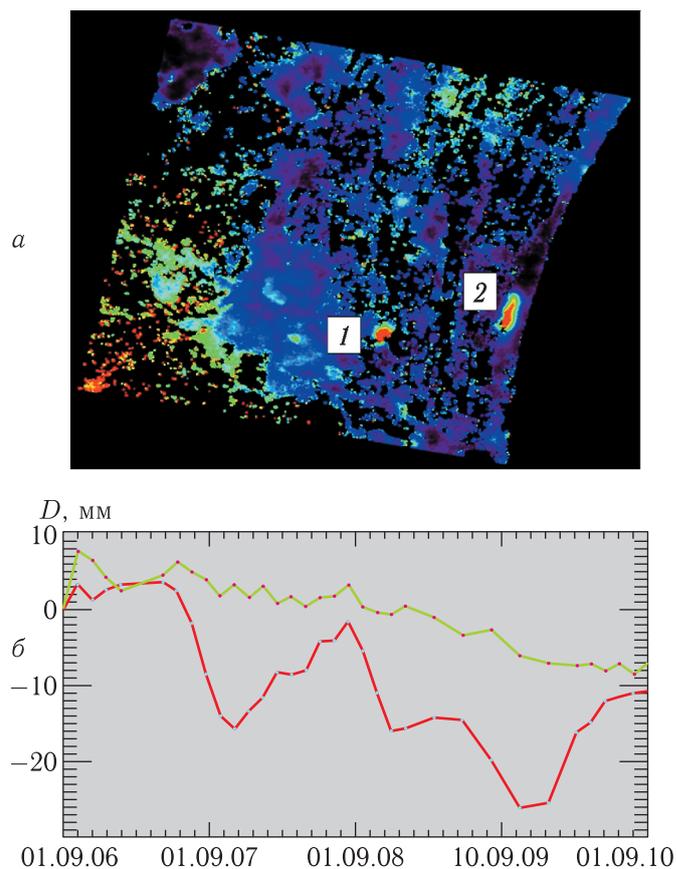


Рис. 2. Два участка с сильной нелинейностью (а) и временные серии накопленной деформации для двух точек с резко различающимися типами движений (б)

для двух точек (из зеленой и красной областей изображений соответственно).

При сопоставлении результатов SBAS-обработки спутниковой информации с результатами наземных GPS-измерений использовались данные единственной доступной GPS-точки, находящейся в пределах области «покрытия» земной поверхности изображениями PCA ASAR/ENVISAT и PALSAR/ALOS. На рис. 3, а показаны временные серии накопленной деформации D по данным PCA ASAR/ENVISAT и PALSAR/ALOS; на рис. 3, б — по данным PCA ASAR/ENVISAT и GPS1; на рис. 3, в — по данным PCA PALSAR/ALOS и GPS2 (GPS1 и GPS2 — временные серии накопленной деформации по данным GPS на несовпадающие даты съемок длинных временных серий изображений ASAR/ENVISAT и PALSAR/ALOS соответственно). Используются следующие цвета: синий —

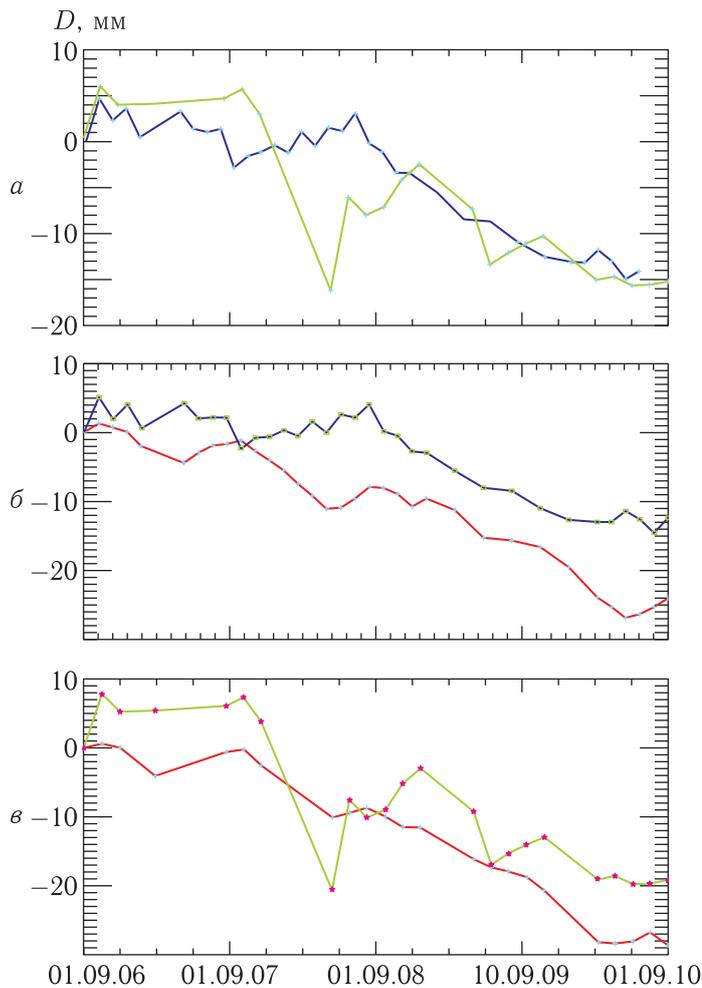


Рис. 3. Временные серии накопленной деформации по данным PCA ASAR/ENVISAT, PCA PALSAR/ALOS, GPS1 и GPS2

для PCA ASAR/ENVISAT; зеленый — для PCA PALSAR/ALOS; красный — для GPS1 и GPS2.

В табл. 1 приведены значения разности средней скорости смещения по данным PCA ASAR/ENVISAT, PCA PALSAR/ALOS, GPS1 и GPS2, которые варьируют между 0,5 и 3 мм/год, что в целом достаточно близко к зафиксированной ранее величине стандартного отклонения

Таблица 1. Значения разности средней скорости смещения

ASAR/ENVISAT и PALSAR/ALOS	1,0 мм/год
ASAR/ENVISAT и GPS1	2,8 мм/год
PALSAR/ALOS и GPS2	2,3 мм/год
GPS1 и GPS2	0,5 мм/год

между значениями скорости смещения по данным ASAR/ENVISAT и PALSAR/ALOS (равной 2,8 мм/год) (рис. 1).

4. Заключение

Представлены результаты комплексных экспериментальных исследований метода малых базовых линий, в рамках которого реализуется возможность формирования пространственно «плотных» выходных продуктов. Необходимо отметить исключительно высокий программно-алгоритмический уровень реализации современных методов интерферометрии, вследствие чего возникают жесткие требования к профессиональной подготовке оператора, который на основе анализа характеристик входного массива и выявленных артефактов должен делать корректный выбор как алгоритмов обработки, так и значений их ключевых параметров. Программный комплекс должен обеспечивать удобный сервис для проведения: 1) визуально-инструментального анализа промежуточных и конечных результатов обработки, 2) корректировки сделанного ранее выбора алгоритмов и значений основных параметров, 3) повторного запуска процесса обработки, а также 4) удаления интерферограмм с высоким уровнем шумов и наличием неустраняемых артефактов.

Список литературы

1. Феоктистов А. А., Захаров А. И., Денисов П. В., Гусев М. А. Перспективы разработки комплекса интерферометрической и дифференциально-интерферометрической обработки данных российских космических радиолокаторов с синтезированной апертурой // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Сб. науч. ст. М.: ООО «ДоМира», 2011. Т. 8, № 2. С. 310–317.
2. Феоктистов А. А., Захаров А. И., Денисов П. В., Гусев М. А. Основные результаты интерферометрической обработки данных космических радиолокаторов с синтезированной апертурой X- и L-диапазонов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Сб. науч. ст. М.: ООО «ДоМира», 2012. Т. 9, № 2. С. 106–110.

3. Феоктистов А.А., Захаров А.И., Денисов П.В., Гусев М.А. Анализ предельных возможностей оценки деформации земной поверхности в зоне землетрясения в Японии 11.03.2011 г. по данным PCA ASAR/ENVISAT с использованием программного пакета *SARscape* // Материалы V Всероссийской научной конференции «Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред». Муром, 26–28 июня 2012 г. (CD-ROM). С. 258–263.
4. Феоктистов А.А., Денисов П.В., Гусев М.А. Практический опыт интерферометрической и дифференциальной интерферометрической обработки данных PCA COSMO-SkyMed, *PALSAR/ALOS* и *ASAR/ENVISAT* // Материалы IX научно-технической конференции «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли». Геленджик, 17–21 сентября 2012 г. М.: МНТОРЭС им. А.С. Попова, филиал ФГУП «ГНПРКЦ “ЦСКБ-ПРОГРЕСС”». НПП «ОПТЭК», 2012. С. 240–244.
5. Ferretti A., Prati C. and Rocca F. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38, p. 2202–2212.
6. Ferretti A., Prati C. and Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39, p. 8–20.
7. Феоктистов А.А., Захаров А.И., Гусев М.А., Денисов П.В. Исследование зависимости результатов обработки радиолокационных данных ДЗЗ от параметров обработки. Часть 1. Ключевые моменты метода постоянных рассеивателей // *Журнал радиоэлектроники: электронный журнал*, 2014, № 12. <http://jre.cplire.ru/jre/dec14/5/text.html>
8. Феоктистов А.А., Захаров А.И., Гусев М.А., Денисов П.В. Исследование зависимости результатов обработки радиолокационных данных ДЗЗ от параметров обработки. Часть 2. Экспериментальные результаты // *Журнал радиоэлектроники: электронный журнал*, 2014, № 12. <http://jre.cplire.ru/jre/dec14/6/text.html>
9. Bernardino P., Fornaro G., Lanari R., and Sansosti E. 2002. A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40, p. 2375–2383.
10. Феоктистов А.А., Захаров А.И., Гусев М.А., Денисов П.В. Исследование возможностей метода малых базовых линий на примере модуля *SBAS* программного пакета *SARscape* и данных PCA *ASAR/ENVISAT* и *PALSAR/ALOS*. Часть 1. Ключевые моменты метода // *Журнал радиоэлектроники: электронный журнал*, 2015. В печати.
11. Феоктистов А.А., Захаров А.И., Гусев М.А., Денисов П.В. Исследование возможностей метода малых базовых линий на примере модуля *SBAS* программного пакета *SARscape* и данных PCA *ASAR/ENVISAT* и *PALSAR/ALOS*. Часть 2. Экспериментальные результаты // *Журнал радиоэлектроники: электронный журнал*, 2015. В печати.
12. *SBAS workflow*, 2013 // *SBAS tutorial*. Ver. 2.0. ITT Visual Information Solutions. Pearl East Circle. Boulder CO, p. 92.

УДК 681.121 (088.8)

Высокоточная дозирующая установка ВДУ-65 для заправки разгонных блоков

Ю. Б. Горбаткин, Е. А. Дерденков, А. О. Лобанов, В. А. Чернышев

АО «Научно-производственное объединение измерительной техники»

e-mail: gorbatkin.yu@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрены основные результаты использования высокоточной дозирующей установки (дозатора) ВДУ-65 для заправки разгонного блока (РБ) «Бриз-М» ракеты «Ангара-А5». Дозатор ВДУ-65 предназначен для измерения массы на потоке компонентов ракетных топлив с погрешностью $\pm 0,2\%$ в диапазоне от 500 до 999 999 кг при значениях расхода 3,5–24 м³/ч. Высокая точность дозирования обеспечивается использованием в алгоритме измерений в качестве градуировочной характеристики индивидуальной зависимости числа Струхала от числа Рейнольдса $Sh(Re)$, а также применением коррекции показаний по плотности и вязкости компонентов. Приводятся результаты анализа выходной информации дозатора ВДУ-65, зарегистрированной в процессе заправки РБ «Бриз-М» системой документирования заправочного комплекса, который подтвердил его нормальное функционирование. Дозатор ВДУ-65 должен заменить выводимый из эксплуатации устаревший дозатор «Омега-2» зарубежного производства.

Ключевые слова: измерение массы на потоке, точность дозирования, заправочный комплекс, компоненты ракетных топлив

High-Precision Dosing Unit VDU-65 for Filling Upper Blocks

Yu. B. Gorbatkin, E. A. Derdencov, A. O. Lobanov, V. A. Chernyshev

Joint Stock Company “Scientific production association of measuring equipment”

e-mail: gorbatkin.yu@yandex.ru

Abstract. Describes the main results of the using of high-precision dosing unit (dispenser) VDU-65 for filling upper block (UB) “Breeze-M” of the rocket “Angara-A5”. Dispenser VDU-65 is designed to measure the mass flow of the components of rocket fuels with an accuracy of $\pm 0,2\%$ in the range from 500 to 999 999 kg at flow rates of 3,5–24 m³/h. High dosing accuracy is ensured by using the algorithm of measurement as the calibration characteristics of the individual dependence of the Strouhal number on Reynolds number $Sh(Re)$, as well as correction of the density and viscosity of the components. The results of analysis output information install VDP-65, registered in the fueling process of the RB “Breeze-M” system of documentation filling complex, which confirmed its normal functioning. Installing VDU-65 to replace the dismantled obsolete metering installation “Omega-2” foreign production.

Key words: measurement of the mass flow quality, accuracy of dosing, filling complex, components of rocket fuels

В настоящее время для измерения массы компонентов ракетного топлива при заправке разгонных блоков (РБ) ракет-носителей (РН) используется дозатор «Омега-2», разработанный в СССР азербайджанским СКБ «Нефтехимприбор» и выпускавшийся серийно по ТУ 25-02-821132-76 [1,2]. Большинство из находящихся в эксплуатации дозаторов «Омега-2» выработали свой ресурс, и поддержание их в работоспособном состоянии обеспечивается в основном за счет ремонта или замены вышедших из строя блоков исправными, снятыми со списываемых дозаторов.

С 2012 г. ОАО «НПО ИТ» начало поставки на объекты космической инфраструктуры дозатора ВДУ-65, разработанного по техническому заданию ФГУП «КБТХМ» (которое в настоящее время осуществляет техническое обслуживание и ремонт дозаторов «Омега-2»). Как и в дозаторах «Омега», в дозаторе ВДУ-65 определение массы компонента осуществляется путем измерения его объема и пересчета объема в массу умножением на текущее значение плотности. Измерение объема осуществляется с помощью вихревого преобразователя расхода: в измерительном патрубке размещено плохо обтекаемое тело трапециевидального сечения, за которым образуется вихревая дорожка Кармана. Каждый вихрь детектируется с помощью двух симметрично расположенных чувствительных элементов «лопасть в потоке» с оптическими преобразователями колебаний лопасти и преобразуется в электрические импульсы, каждому из которых соответствует определенный объем компонента. Для измерения температуры компонента используются два встроенных термометра сопротивления (ТС); таким образом, дозатор ВДУ-65 имеет два независимых канала измерений массы. Для повышения точности измерений объема в дозаторе ВДУ-65 реализован алгоритм измерений, основанный на вычислении «веса» каждого импульса с использованием табличной зависимости числа Струхалия от числа Рейнольдса и суммировании весов импульсов нарастающим итогом [3]. Для повышения точности измерений температуры на ячейке преобразователя расхода установлен дополнительный интегральный термодатчик, позволяющий калибровать канал измерения температуры по высокостабильному образцовому резистору и измерять температуру

компонента с учетом температурного ухода элементов измерительной схемы. Вся обработка информации и формирование команд осуществляется в цифровом виде с помощью микроконтроллеров.

Дозатор ВДУ-65 функционирует следующим образом. При наличии расхода компонента за плохо обтекаемым телом образуются вихри, частота следования которых F пропорциональна скорости потока, т.е. объемному расходу Q , и выражается формулой

$$F = \frac{Sh \cdot Q}{S \cdot d}, \tag{1}$$

где Sh — число Струхалия;

d — ширина плохо обтекаемого тела;

$S = \frac{\pi D^2}{4} \left(1 - \frac{4\beta}{\pi}\right)$ — площадь сечения потока в месте установки плохо обтекаемого тела;

$\beta = d/D$ — отношение ширины тела к диаметру.

Число Струхалия непостоянно и зависит от числа Рейнольдса Re потока

$$Sh = Sh(Re), \tag{2}$$

где $Re = \frac{4Q}{\pi D \nu}$, ν — кинематическая вязкость КРТ.

В процессе дозирования измеряется частота следования выходных импульсов F , по которой рассчитывается расход Q , а также измеряется температура компонента θ , по которой рассчитывается вязкость $\nu(\theta)$. По расходу и вязкости вычисляется число Re , после чего вычисляется число Sh — подстановкой Re в зависимость $Sh(Re)$. По температуре θ рассчитывается плотность продукта $\rho(\theta)$. По значениям $\nu(\theta)$ и $\rho(\theta)$ определяется весовой коэффициент M_i (масса) i -го импульса:

$$M_i = \frac{K \cdot S \cdot d \cdot \rho(\theta_i)}{Sh \{Re [F_i, \nu(\theta_i)]\}}, \tag{3}$$

где $K \approx 1$ — индивидуальный градуировочный коэффициент преобразователя расхода, F_i — текущее значение частоты, θ_i — текущее значение температуры продукта.

Масса компонента M определяется путем суммирования весовых коэффициентов M_i нарастающим итогом:

$$M = \sum_{i=1}^N M_i, \tag{4}$$



Рис. 1. Блок задания дозы БЗД

где N — общее число выходных импульсов за время дозирования.

После прохождения через преобразователь расхода запрограммированного количества компонента, называемого дозой, суммирование заканчивается и выдается сигнал «Отсечка» на прекращение заправки. Сигнал «Отсечка» формируется «опережающим» каналом, т.е. тем, который раньше наберет запрограммированную дозу. Помимо измерения массы, алгоритм функционирования дозатора предусматривает вычисление текущего значения расхода, а также текущего и среднего за время дозирования значений температуры рабочей жидкости. Основным признаком нормального функционирования дозатора при заправке является совпадение между собой измеренных каналами значений дозы с отклонением не более 0,1 % по абсолютной величине.

Дозатор имеет режим «Контроль», в котором осуществляется имитационная проверка его работоспособности: контрольное значение расхода имитируется путем амплитудной модуляции тока питания светодиода оптического детектора с фиксированной частотой, а контрольное значение температуры имитируется подключением вместо ТС

прецизионного резистора. Проверка заканчивается после набора одним из каналов дозы 2000 кг.

Для обеспечения необходимой метрологической надежности операции дозирования перед отпуском рабочей дозы предусмотрено проведение проверки дозатора в режиме «Контроль», а также проверки расхождения показаний каналов путем имитации выдачи дозы (с пропуском компонента через преобразователь расхода). Кроме того, непосредственно перед заправкой выполняется прокачка компонента до стабилизации измеренного ТС значения температуры, которое свидетельствует о выравнивании температур компонента и корпуса ТС.

В состав комплекта дозатора ВДУ-65 входят: блок задания дозы БЗД (рис. 1), преобразователь расхода окислителя ПРТ-65-О и стабилизатор потока СП-65-О к нему (рис. 2). Комплект рассчитан на последовательную заправку изделия компонентами: при заправке окислителя используются блоки БЗД, ПРТ-65-О и СП-65-О, при заправке горючего — БЗД, ПРТ-65-Г, СП-65-Г.

Габаритно-установочные размеры блока ПРТ-65-О(Г) с присоединенным блоком СП-65-О(Г) и схема подключения дозатора ВДУ-65 к системе

Таблица 1. Сравнительные характеристики дозаторов ВДУ-65 и «Омега-2»

Характеристика	Ед. изм.	Значение	
		«Омега-2»	ВДУ-65
Количество каналов измерений	ед.	2	2
Минимальная измеряемая доза	кг	2000	500
Дискретность задания дозы	кг	1	1
Погрешность отсечки дозы	%	±0,3	±0,2
Допускаемая разность показаний каналов (абсолютное значение)	%	0,3	0,1
Диапазон расходов при дозировании	м ³ /ч	11,3–15,9 15,9–22,4	3,5–24
Вероятность безотказной работы	–	0,985	0,9995
Назначенный ресурс	ч	5000	6000
Гарантийный срок	лет	10	15
Вид взрывозащиты преобразователя расхода	–	Взрыво- непроницаемая оболочка	Искробезопасная электрическая цепь ib
Вывод информации в систему документирования заправочного комплекса	–	Отсутствует	Имеется

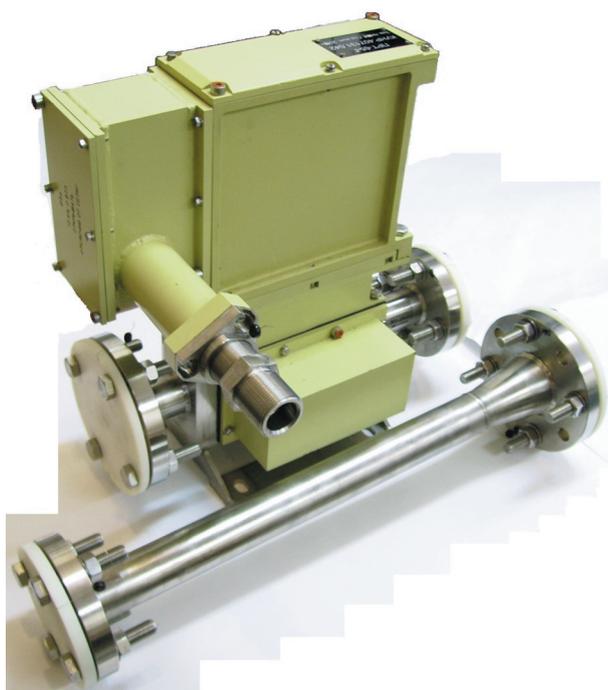


Рис. 2. Преобразователь расхода ПРТ-65-О(Г) и стабилизатор потока СП-65-О(Г)

управления заправочного комплекса идентичны таковым дозатора «Омега-2», что позволяет осуществлять замену дозатора «Омега» на дозатор

ВДУ-65 без доработки агрегатов заправки и существующих кабельных линий и корректировки технологического процесса заправки. Основные характеристики дозатора ВДУ-65 в сравнении с дозатором «Омега-2» приведены в табл. 1.

В настоящее время два штатных образца дозатора ВДУ-65, предназначенных для заправки РБ, введены в опытную эксплуатацию на космодромах «Байконур» и «Плесецк». На место эксплуатации дозаторы поступают в составе агрегата заправки. На заправочных комплексах космодрома «Байконур» и «Плесецк» были выполнены следующие пускаладоочные работы:

- выдача пробных доз окислителя и горючего;
- предусмотренная эксплуатационной документацией дозатора корректировка зависимостей $Sh(Re)$, занесенных в память микроконтроллеров преобразователей расхода при их изготовлении. Необходимость корректировки обусловлена смещением отдельных точек градуировочной характеристики, причиной которого является, по-видимому, неравномерность эпюры скоростей потока на входе в преобразователь расхода, обусловленная наличием поворота входного трубопровода на 180°;
- выдача зачетных (контрольных) доз.

Таблица 2. Горючее, контрольная доза 2000 кг

№	Фактическая масса дозы, кг	Погрешность, %		Температура продукта, °С	Q, м ³ /ч
		1 канал	2 канал		
1	1996,6	0,14	0,13	10,5	10,7
2	1997,6	0,08	0,08	11,0	10,8
3	1998,6	0,03	0,02	12,0	10,6
4	1996,4	0,14	0,13	16,5	10,9
5	1998,4	0,05	0,04	16,5	11,0
6	2000,1	-0,03	-0,05	17,0	11,0

Таблица 3. Окислитель, контрольная доза 4000 кг

№	Фактическая масса дозы, кг	Погрешность, %		Температура продукта, °С	Q, м ³ /ч
		1 канал	2 канал		
1	3993,7	0,18	0,14	13,0	10,2
2	4004,8	-0,10	-0,14	13,5	10,3
3	4004,1	-0,08	-0,12	13,7	10,3
4	4003,3	-0,06	-0,08	18,5	10,3
5	4004,4	-0,08	-0,11	18,7	10,1
6	4002,8	-0,05	-0,08	19,0	10,2

В качестве эталонного средства использовались штатные весы заправочного комплекса с ценой деления 1 кг, имеющие погрешность взвешивания $\pm 0,05\%$.

При выдаче контрольных доз на космодроме «Байконур» были получены максимальные значения погрешности $-0,17\%$ по окислителю и $0,13\%$ по горючему.

Результаты контрольного дозирования на космодроме «Плесецк» приведены в табл. 2 и 3.

В ходе пусконаладочных работ выяснилось, что фактическая продолжительность технологической паузы между окончанием прокачки компонента и началом дозирования (используемой для подготовки технологического оборудования к заправке) составляет 30 мин при регламентированной эксплуатационной документацией дозатора продолжительности 5 мин. При этом в течение технологической паузы наблюдается дрейф показаний термодатчика дозатора в сторону температуры окружающей среды, что может влиять на точность дозирования при малых значениях дозы.

Первая штатная заправка с использованием дозатора ВДУ-65 осуществлена на космодроме

«Плесецк» при заправке РБ «Бриз-М» РН «Ангара-А5» 18-19 декабря 2014 г. При этом были выполнены следующие операции:

- проверка работоспособности в режиме «Контроль» (без пропуска компонента);
- прокачка компонента до стабилизации показаний термодатчиков;
- проверка работоспособности путем сравнения показаний каналов при имитации выдачи дозы 1000 кг;
- заправка;
- анализ разности показаний каналов по завершении заправки.

Во время заправки горючего произошла остановка на дозе 379 кг по причинам, не зависящим от работы дозатора. После возобновления заправка завершилась без остановок. Температура горючего составляла 14 °С; расход: до остановки — 9,8 м³/ч, после остановки — плавное снижение с 9,8 до 4,9 м³/ч. Разность показаний каналов по завершении заправки составила 1 кг (менее 0,02%). Заправка окислителя прошла без остановок. Температура окислителя была 14,5–15 °С, расход — 9,6 м³/ч. Разность показаний каналов по завершении заправки составила

3 кг (менее 0,03 %). Дозатор при заправке отработал штатно, без замечаний.

В заключение следует отметить, что, в отличие от дозатора «Омега-2», какие-либо регулировки дозатора ВДУ-65 в процессе эксплуатации не требуются.

Выводы

1. Проведенные на космодромах «Байконур» и «Плесецк» пусконаладочные работы штатных образцов дозатора ВДУ-65, предназначенных для обеспечения заправки разгонного блока «Бриз-М», подтвердили заявленные метрологические характеристики дозатора. Нормальное функционирование дозатора ВДУ-65 в процессе заправки РБ «Бриз-М» РН «Ангара-А5» подтверждено соответствием разности показаний каналов, зафиксированной по завершении заправки, заданному в эксплуатационной документации требованию (менее 0,1 %), а также результатами пуска ракеты-носителя.

2. Внедрение дозатора ВДУ-65 на объектах космической инфраструктуры для заправки эксплуатируемых и перспективных объектов РКТ позволяет:

– обеспечить продление сроков эксплуатации существующих заправочных комплексов при мини-

мальных затратах на их переоборудование под новые дозаторы;

– повысить точность выдаваемых доз и степень оперативной готовности заправочных комплексов;

– обеспечить серийное изготовление дозаторов на отечественных предприятиях и их гарантийное обслуживание в соответствии с действующими военными стандартами.

3. Опыт работы с дозатором ВДУ-65 выявил необходимость совершенствования его конструктивного решения для повышения метрологической надежности, в частности установки на входе стабилизатора потока дополнительного устройства для выравнивания эпюры скоростей потока и доработки узла термодатчика с целью снижения инерционности.

Список литературы

1. *Киясбейли А.Ш., Перельштейн М.Е.* Вихревые счетчики-расходомеры. М.: Машиностроение, 1974.
2. *Киясбейли А.Ш., Перельштейн М.Е.* Вихревые измерительные приборы. М.: Машиностроение, 1978.
3. *Чернышев В.А., Горбаткин Ю.Б., Дерденков Е.А., Михайлов С.Л.* Вихревой способ измерения объема протекшего вещества. Патент РФ №2515129. БИ №13, 2014.

УДК 621.363

Экспериментальное исследование и оценка изгибной жесткости вибрационного элемента модулятора электростатического поля

Р. Ю. Дорوفеев, Д. В. Козлов¹, А. С. Корпухин², И. П. Смирнов, А. А. Жуков³

^{1,2}к. т. н., ³д. т. н.

АО «Российские космические системы»

e-mail: rdorof@yandex.ru

Аннотация. В работе рассмотрены системные исследования характеристик вибрационного модулятора электрических полей, экспериментально получены зависимости нагрузок, возникающих на экранирующем электроде вибрационного модулятора электрического поля, от угла деформации этого электрода. Проведена расчетная оценка зависимости частотных показателей различных геометрических вариантов электродов вибрационного модулятора электрических полей от силовых характеристик, в частности, от толщины и геометрической формы.

Ключевые слова: вибрационный модулятор электростатических полей, экранирующий электрод, изгибная жесткость, резонансная частота, амплитуда колебания, угол деформации

Experimental Study and Evaluation of Bending Rigidity of the Vibration Sensor Modulator electric Field

R. Yu. Dorofeev, D. V. Kozlov¹, A. S. Korpuhin², I. P. Smirnov, A. A. Zhukov³

^{1,2}candidate of engineering science, ³doctor of engineering science

Joint Stock Company "Russian Space Systems"

e-mail: rdorof@yandex.ru

Abstract. The paper discusses the characteristics of the vibration system studies modulator electric fields, experimentally obtained dependence loads, generated by the screening electrode vibration modulator of the electric field, the angle of deformation of the electrode. Score calculation performed depending frequency indicators of different geometrical embodiments of vibrating electrodes modulator of the electric field strength characteristics, in particular, on the thickness and geometric shape.

Key words: vibrating electric field modulator, shielding electrode, flexural stiffness, resonant frequency, the amplitude of the oscillation, angle deformation

Введение

При эксплуатации отечественной ракетно-космической техники в последнее время наблюдается устойчивая тенденция, указывающая на уменьшение надежности спутников и снижение сроков их активного существования.

Основная причина отказа функционирования спутников нового поколения, выпускаемых российскими производителями, заключается в недостатках электронной компонентной базы (ЭКБ) космической техники. Обширная номенклатура ЭКБ позволяет проектировать сложную аппаратуру различного назначения. Вместе с тем достаточно сложно осуществить эффективную защиту бортовой аппаратуры (БРА) от внешних воздействий, особенно от такого деструктивного влияния, как электростатический разряд [1].

Одно из направлений решения проблемы защиты БРА от ЭСР — создание эффективной датчиковой аппаратуры для контроля электростатических полей, одним из основных элементов которой является вибрационный модулятор. Наиболее перспективные устройства в современной сенсорной технике — вибрационные датчики — это устройства, в которых измерительный или экранирующий электрод совершает возвратно-поступательное движение и колеблется в области неоднородного поля под действием электромагнитного возбудителя.

В основе работы вибрационного модулятора электрического поля (ВМЭП) для миниатюрных измерителей параметров электризации КА на основе микромеханических резонансных систем лежит получение необходимой резонансной частоты и соответствующей ей амплитуды колебаний экранирующего электрода. Вибрационные модуляторы в целом ряде случаев имеют недостаточную чувствительность вследствие того, что размеры электродов в них достаточно малы и не позволяют получить необходимую амплитуду перемещения экранирующего электрода (микробалки) на резонансной частоте.

Основными задачами, которые необходимо решать на этапе его проектирования, в интересах получения максимальной амплитуды колебаний экранирующего электрода ВМЭП, соответствующей резонансной частоте, являются:

– оценка влияния изгибной жесткости микробалки на амплитуду перемещения ее хвостовика;

– оценка влияния материала и геометрии микробалки на резонансную частоту.

В работе представлена методика измерения силовых характеристик экранирующего электрода вибрационного модулятора (рис. 1), выполненного в виде микробалки. Вибрационный модулятор включает в себя экранирующий электрод 3, выполненный из пермаллоевой фольги и жестко закрепленный за один конец и чувствительный электрод 2. Экранирующий электрод расположен между двумя соосно закрепленными катушками 1, которые подключены к генератору переменного напряжения.

Принцип действия ВМЭП основан на возбуждении механических колебаний. Катушки индуктивности, подключенные к генератору, вырабатывающему сигнал синусоидальной формы с определенной частотой, приводящий в колебательное движение электрод 3 на частоте механического резонанса. Так как обмотки катушек включены в противофазе и создают неоднородные магнитные поля, вызывающие магнитные взаимодействия между катушками и экранирующим электродом, то магнитные потоки, создаваемые ими, складываются, благодаря чему вдоль оси между катушками создается магнитное поле, амплитуда которого изменяется по синусоидальному закону. Это поле взаимодействует с экранирующим электродом, выполненным из ферромагнитного материала, заставляя перемещаться электрод с частотой колебаний. При колебаниях экранирующий электрод 3 углубляется по оси чувствительного электрода (экспонирование) или выдвигается над ним (экранирование). При наличии электрического поля это приводит к изменению потенциала чувствительного электрода 2. После усиления и синхронного детектирования на выходе получается напряжение, пропорциональное напряженности электрического поля, имеющее соответствующий знак.

Движение экранирующего электрода с максимальной амплитудой для придания высокой чувствительности устройств детектирования электростатических полей вызывает наибольшие технические трудности и является предметом исследования данной работы.

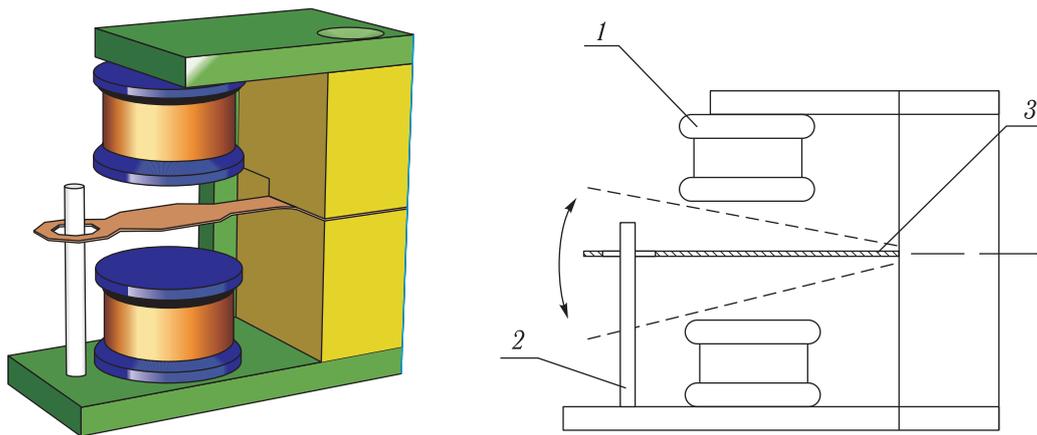


Рис. 1. Конструкция вибрационного модулятора электрических полей

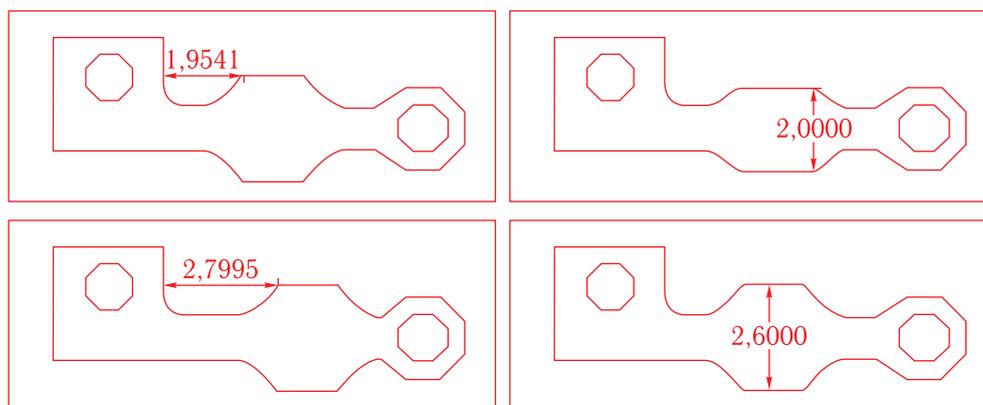


Рис. 2. Примеры 4 из 10 вариантов образцов экранирующего электрода

Для производства реальных образцов экранирующих электродов из фольги магнитомягкой стали 79НМ (толщиной 20 и 50 мкм) были вырезаны заготовки, а затем методами двухсторонней фотолитографии и электрохимического травления из них изготовлены образцы — десять вариантов подвижных пластин различных геометрических конфигураций (рис. 2). На этих образцах были проведены исследования амплитуды перемещения хвостовиков экранирующих электродов, их резонансных частот и изгибной жесткости.

Методика проведения эксперимента

В основе методики измерения жесткостных характеристик экранирующего электрода ВМЭП лежит применение цифровых высокоточных

прецизионных весов, а также элементарной кинематической системы, связывающей образец ВМЭП и предметный столик весов. Благодаря высокой точности измерительного инструмента, которым являются весы, возможно измерение очень малых по величине нагрузок. Максимальный угол отклонения хвостовика микробалки для данной конструкции — угол со значением в 27° (соответствует перемещению 1,7 мм), что удовлетворяет задаче по обеспечению устройства необходимой амплитудой перемещения хвостовика экранирующего электрода с целью обеспечения высокой чувствительности датчика электростатических полей. На максимальном угле отклонения хвостовика диапазон жесткости составлял от 1,63 до 33,94 мН для образцов с различной геометрической формой.

При измерении резонансных частот применялся гониометр и синусоидальный генератор сигналов.

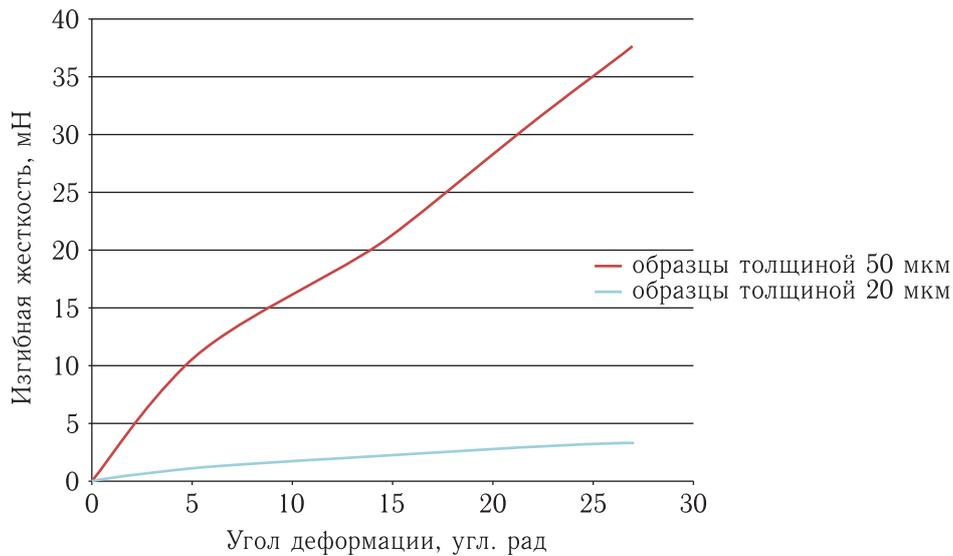


Рис. 3. Силовая характеристика параметров экранирующих электродов толщиной 20 мкм и 50мкм

Путем варьирования частоты колебания микробалки с помощью гониометра осуществлялся поиск наибольшей амплитуды перемещений хвостовика микробалки. Частота, при которой достигалась наибольшая амплитуда перемещений хвостовика в данной конструкции, считалась резонансной для каждого из образцов. При наибольшей амплитуде, составляющей 3,5 мм колебаний хвостовика, диапазон частот составлял от 208 до 752 Гц.

Результаты

Для вариации геометрии образцов экранирующего электрода было создано десять вариантов подвижных пластин различных конфигураций (рис. 2). В ходе эксперимента подтвердилось, что образцы, имеющие наименьшую изгибную жесткость при фиксированной амплитуде перемещения, имели также наименьшую резонансную частоту собственных колебаний микробалки.

Эксперимент по определению зависимости силовых характеристик экранирующих электродов от толщины образца выявил следующее.

Величина нагрузки на хвостовике экранирующих электродов линейно зависит от толщины. Таким образом, при увеличении толщины образца с 20 до 50 мкм происходит увеличение изгибной жесткости экранирующего электрода вибрационного

модулятора, что приводит к увеличению резонансной частоты в среднем в 2,4 раза для геометрически одинаковых образцов. На рис. 3 представлена полученная силовая характеристика в виде зависимости нагрузки, воздействующей на экранирующий электрод, от изгибной жесткости.

Наряду с испытаниями, были проведены расчеты коэффициента формы, чтобы определить зависимость резонансной частоты от геометрической формы экранирующего электрода [5]. При варьировании геометрической формы экранирующего электрода использовались два основных подхода. В первом подходе варьировалось расстояние между эллипсовидным утолщением и основанием крепления электрода. Во-втором — изменялась вертикальная полуось эллипсовидного утолщения экранирующего электрода. Расчет коэффициента формы электрода проводился путем разбиения сложной формы электрода на простейшие геометрические фигуры (прямоугольники, треугольник и др.), ниже приведены формулы расчета геометрической формы прямоугольного треугольника и прямоугольника:

$$K_f = 2ctg^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)ctg\left(\frac{\gamma}{2}\right) = 1 + 2\frac{1 + ctg(\alpha/2)}{1 - tg(\alpha/2)}, \quad (1)$$

где α и γ — углы прямоугольного треугольника.

$$K_f = 2\left(\frac{a}{b} + \frac{b}{a}\right) = 4\left(k + \frac{1}{k}\right), \quad (2)$$

где a и b — стороны прямоугольника, $k = a/b$.

Методика расчета коэффициента формы простейших геометрических фигур изложена в [4].

В большинстве вибрационных устройств имеются встроенные генераторы для возбуждения механических колебаний электрода, что накладывает необходимость обладания экранирующим электродом с резонансной частотой, соответствующей частоте генератора, в нашем случае генератор возбуждения механических колебаний работает на частоте 300 Гц. Рассчитанный коэффициент формы образцов экранирующих электродов, согласно формулам (1), (2), определил диапазон значений коэффициента формы, который составил от 48,15 до 62,39. Расчет образцов экранирующих электродов дал линейную зависимость значения коэффициента формы от значения изгибной жесткости. Зависимость резонансной частоты от коэффициента геометрической представлена на рис. 4. Расчет показал, что при определенном изменении геометрической формы экранирующих электродов в месте крепления возможно моделировать резонансную частоту экранирующих электродов 275 ± 40 Гц.

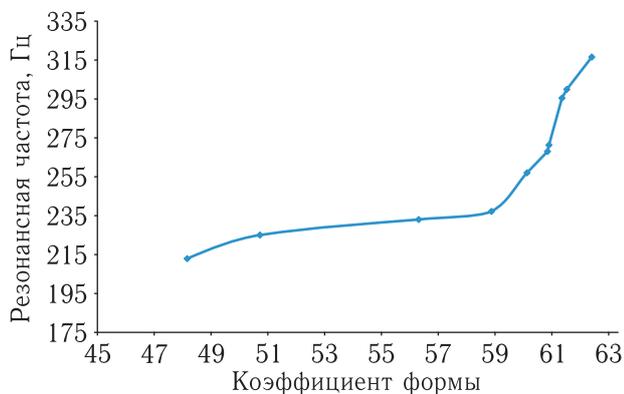


Рис. 4. Зависимость резонансной частоты экранирующего электрода от их геометрической формы

В ходе эксперимента выяснилось, что все образцы имеют достаточно широкую полосу резонансных частот. Ширина полосы составляет порядка 5–6 Гц при максимальной амплитуде колебания экранирующего электрода (рис. 5). Наличие широкой полосы резонансных частот позволяет допускать некую погрешность в точности проектирования геометрической формы экранирующего электрода вибрационного модулятора.

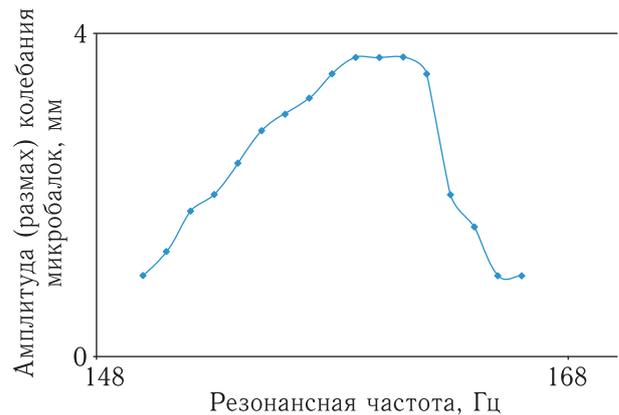


Рис. 5. Амплитудно-частотная характеристика экранирующего электрода

Заключение

Проведенные испытания и расчет позволяют оценить диапазон возможностей ВМЭП, акцентируя при этом внимание на высокой стабильности силовых характеристик подвижных экранирующих электродов и возможности изменения силовых характеристик микроактюаторов геометрическими методами.

Измерения силовых характеристик балок ВМЭП позволили экспериментально получить зависимости нагрузок, возникающих на хвостовике балки модулятора, от угла деформации этой балки. Полученные результаты позволяют судить о линейности силовой характеристики относительно угла перемещения балки электростатического актюатора.

Таким образом, предложена и реализована методика измерения силовых характеристик экранирующих электродов вибрационных модуляторов электростатических полей, подвергнутых воздействию контролируемой нагрузки.

Полученные данные принципиально важны и необходимы для проектирования устройств вибрационного типа, так как дают возможность создавать микроактюаторы с заранее заданными зависимостями нагрузок от амплитуды колебаний, что, кроме того, может позволить расширить спектр применения таких устройств.

Список литературы

1. *Дорофеев Р.Ю., Жуков А.А.* Особенности защиты бортовой аппаратуры космических аппаратов

- от электростатического разряда на этапе ее схемотехнического проектирования. Труды II Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий». 2–4 июня 2009 года. М.: Радиотехника, 2010. С. 140–149.
2. Козлов Д. В., Жуков А. А., Смирнов И. П., Шахнов В. А. Экспериментальное исследование силовых характеристик рабочего элемента тепловых микроактюаторов // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия Приборостроение. №2/2011(РИНЦ), с. 84–94.
 3. Королева В. А., Жуков А. А., Гоголинский К. В., Усеинов А. С. Оценка изгибной жесткости и деформации микроразмерных элементов устройств микросистемной техники // Нано- и микросистемная техника, 2011, № 1, с. 39–42.
 4. Фетисова М. А. Коэффициент формы как геометрическая характеристика [Текст] / М. А. Фетисова, С. С. Володин // Молодой ученый, 2011, т. 1, № 5, с. 105–107.
 5. Коробко А. В. Геометрическое моделирование формы области в двумерных задачах теории упругости. М.: Изд-во АСВ, 1999. 320 с.
 6. Фетисова М. А. Развитие и применение метода интерполяции по коэффициенту формы к решению задач поперечного изгиба пластинок с комбинированными граничными условиями. Дисс. . . . канд. техн. наук: 05.23.17. Орел, 2010. 162 с.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ,
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ

УДК 681.3.06

Информационные технологии робастного телеконтроля изделий РКТ: состояние и перспективы

А. В. Лобан¹, Д. А. Ловцов²

¹к. т. н., АО «Российские космические системы»

²д. т. н., проф., заслуженный деятель науки РФ,

Институт точной механики и вычислительной техники имени С. А. Лебедева
Российской академии наук, Москва

e-mail: ¹aloban@mail.ru, ²dal-1206@mail.ru

Аннотация. Рассматриваются результаты системного анализа ряда существующих информационных технологий (ИТ) телеконтроля и телеуправления изделиями ракетно-космической техники (РКТ). Обсуждается проблемная ситуация, связанная с тем, что для развития космонавтики в XXI в. необходимо обеспечить устойчивое управление изделиями РКТ в различных условиях обстановки в реальном масштабе времени, повышая уровень автоматизации переработки информации. В большей степени это касается космических систем специального назначения, использующих ИТ и программное обеспечение распределенных информационных систем. Несмотря на достигнутые результаты исследований в этой области, общие научные основы анализа и синтеза робастных (устойчивых) ИТ распределенного телеконтроля изделий РКТ в настоящее время не получили должного развития, что сказывается на эффективности и качестве управления существующей группировкой космических аппаратов, а также запуска новых изделий с помощью разгонных блоков. Предлагается подход к реализации оперативной робастной ИТ телеконтроля изделий РКТ, основанной на разработке методологических основ, моделей и комплекса алгоритмов распределенного классифицирования и робастного оценивания результатов автоматизированного телеконтроля объектов управления.

Ключевые слова: алгоритм, робастные оценки, плотность распределения, телеконтроль, дестабилизирующие факторы

Information Technology Robust Telemetry Control Rockets: Status and Prospects

A. V. Loban¹, D. A. Lovtsov²

¹candidate of engineering science, Joint Stock Company "Russian Space Systems"

²doctor of engineering science, prof., honored scientist of the Russian Federation,

Lebedev Institute of Precise Mechanics and Computer Engineering,
Russian Academy of Sciences, Moscow

e-mail: ¹aloban@mail.ru, ²dal-1206@mail.ru

Abstract. Results of the system analysis of a number of the existing information technologies (IT) of remote control and telecontrol are considered, by products of the missile and space equipment (MSE). The problem situation connected by that for development of astronautics in the XXI century it is necessary to ensure sustainable management of MSE products in various conditions of a situation in real time is discusses, increasing the level of information processing. More it concerns the space systems of a special purpose using IT and the software of the distributed information systems. Despite the reached results of researches in this area, the general scientific bases of analysis and synthesis of robust (steady) IT of the distributed remote control of MSE products didn't gain now due development that affects the efficiency and quality of management of the existing group of spacecrafts, and also launch of new products by means of accelerating blocks. The approach to realization of operational robust IT of remote control of MSE products based on development of methodological bases, models and a complex algorithms of the distributed classification and robust estimation of results of the automated remote control of objects of management is offered.

Key words: algorithm, robust estimation, frequency distribution, automated remote control, destabilizing factors

Введение

Научная проблема комплексной автоматизации переработки информации в процессе управления изделиями ракетно-космической техники (РКТ) является объектом суждений людей, занятых практической и теоретической деятельностью в космической отрасли. Генетически предшествующей понятию проблемы выступает проблемная ситуация — противоречие между определенной социальной потребностью и наличными средствами ее адекватного удовлетворения. Принято считать, что для развития космонавтики в XXI в. необходимо обеспечить устойчивое управление изделиями РКТ в различных условиях обстановки в реальном масштабе времени, повышая уровень автоматизации управления объектами [4]. Особенно это актуально при воздействии на операции информационной технологии (ИТ) телеконтроля различных дестабилизирующих факторов.

Космические системы специального назначения, использующие информационно-телекоммуникационные технологии, выделены в Указе Президента Российской Федерации № 899 от 7 июля 2011 г. в качестве приоритетного направления развития науки, технологий и техники в России. Кроме того, технологии и программное обеспечение распределенных информационных систем внесены в перечень критических технологий, т.е. наиболее актуальных для развития государства.

В последнее время в нашей стране и за рубежом значительные усилия направляются на разработку методов, моделей и алгоритмов распределенной переработки контрольно-измерительной информации (КИИ), поступающей от удаленных объектов управления. При этом под переработкой КИИ понимается весь спектр манипуляций с данными от телеизмерений (сбор, преобразование, факторизация, классифицирование, оценивание, идентификация) до телеуправления (контроль технического состояния, выработка рекомендаций по управлению, реализация управления).

Практика использования ИТ телеконтроля показывает, что при возникновении неисправностей, отказов или аварий лица, принимающие решения, из-за сложности интерпретации результатов обработки данных не справляются с оперативным оце-

ниванием больших объемов разнородной информации и, как следствие, не своевременно формируют управляющее воздействие [6–9, 12–16]. А это, в свою очередь, зачастую приводит к необратимым последствиям в работе подсистем КА и даже к потере функциональной пригодности объекта управления.

Так, например, корпорация ОАО «Информационные спутниковые системы» (ИСС) им. М. Ф. Решетнева в последнее 15 лет запустила 15 спутников, из которых 9 (60%) имели отказы бортовых систем и агрегатов, 3 (20%) КА утрачены на орбите и еще 3 (20%) работают с весьма существенными ограничениями по целевому применению (по надежности на 7-м месте в списке ведущих производителей спутников связи и вещания). Еще более убедительно подтверждается важность своевременного реагирования на нештатные ситуации в работе изделий РКТ сведениями о надежности с точки зрения заявленных производителем характеристик (табл. 1, обзор Московского космического клуба [2]).

Следует отметить, что при использовании реальных ИТ телеконтроля оперативность решения задач функционального диагностирования остается низкой, что обусловлено большими объемами перерабатываемой контрольно-измерительной информации от КА и частичной автоматизацией процесса диагностирования [5, 12, 15]. В основном автоматизированы операции сбора, первичной и вторичной обработки ТМИ.

Однако проверка правильности отработки временной программы управления КА, оценивание дестабилизирующих факторов и выработка решений по их компенсации зачастую проводятся традиционными способами с привлечением большого числа специалистов. Это обуславливает низкий уровень достоверности и объективности оценки технического состояния и степени надежности изделий РКТ вследствие ограниченного доступа к имеющейся у потребителей информации о причинах неисправностей, отказов и аварий, а также сказывается на оперативности принятия решения на управление объектом [12, 13].

На повестке дня переход к технологиям на основе методов, свободных от распределений случайных величин сбоев в потоке ТМИ. Применение

Таблица 1. Сведения о запуске и функционировании геостационарных спутников основных мировых производителей с 1963 по 2013 гг. включительно

Компания-производитель спутников	Количество спутников			Общее время работы коммерческих КА на ГСО, лет	Запуск первого КА на ГСО
	всего изготовлено	в том числе геостационарных			
		всего/работает	из них коммерческих всего/работает		
ИСС им. М. Ф. Решетнева	более 1200	142/17	15/10	84	1975
Lockheed Martin	более 930	143/70	101/52	1035	1975
Boeing Satellite Systems	273	225/89	188/67	2120	1963
Space Systems/Loral	240	152/81	112/74	1770	1969
Orbital Sciences Corporation	117	34/32	34/32	170	1997
EADS Astrium	115	79/50	56/46	604	1981
Thales Alenia Space	115	76/52	69/43	502	1982

подобных методов предполагает существенное увеличение эффективности ИТ телеконтроля, прежде всего за счет повышения их помехоустойчивости [9, 11, 16], нечувствительности к малым отклонениям от предположений (*робастности*). Кроме того, практика требует, чтобы методы обеспечения робастности телеконтроля сводились к достаточно простым приемам, чтобы они не нуждались в коренной переделке тех алгоритмов и преобразований, которые сейчас используются.

Анализ информационных технологий телеконтроля

Для анализа ИТ телеконтроля изделий РКТ целесообразно (по Дж. Клиру) провести классификацию систем обработки ТМИ по типам задач и по свойствам отношений. Типы задач логично связать с функциями систем обработки, характеризующимися обобщенными показателями:

- ✓ инвариантностью к типу изделия РКТ;
- ✓ уровнем автоматизации подготовки исходных данных (ИД) для обработки потоков ТМИ;
- ✓ полнотой первичной и вторичной обработки данных;
- ✓ удобством визуализации результатов обработки;
- ✓ многопоточностью обработки данных сеансов;

- ✓ местом в контуре управления объектами (средства: общего назначения, ЦУП, ИВК ГК, испытательных стендов).

Поскольку элементы разных типов требуют разных инструментальных средств для сбора данных, эта классификация по существу имеет практическую (экспериментальную) основу.

Классификация по свойствам отношений дает совершенно другую картину, связанную непосредственно с методами обработки данных, а не с их сбором, преобразованием и визуализацией результатов, и в основе ее лежит преимущественно теоретический компонент. Анализ функциональных задач должен стимулировать стремление к синтезу, к перспективному развитию ИТ телеконтроля изделий РКТ. Какие свойства отношений следует взять, чтобы добиться устойчивости технологий к помехам?

В докладе предлагается подход, основанный на свойствах отношений при реализации функциональных задач обработки, использующих робастные процедуры оценивания технических и функциональных состояний объектов управления.

СПО ОТИ

Обзор состояния ИТ телеконтроля логично начать с технологии, используемой при управлении объектами, создаваемыми ОАО ИСС им. М. Ф. Решетнева (фактически это сейчас 2/3 отечественной орбитальной группировки КА). Корпорация

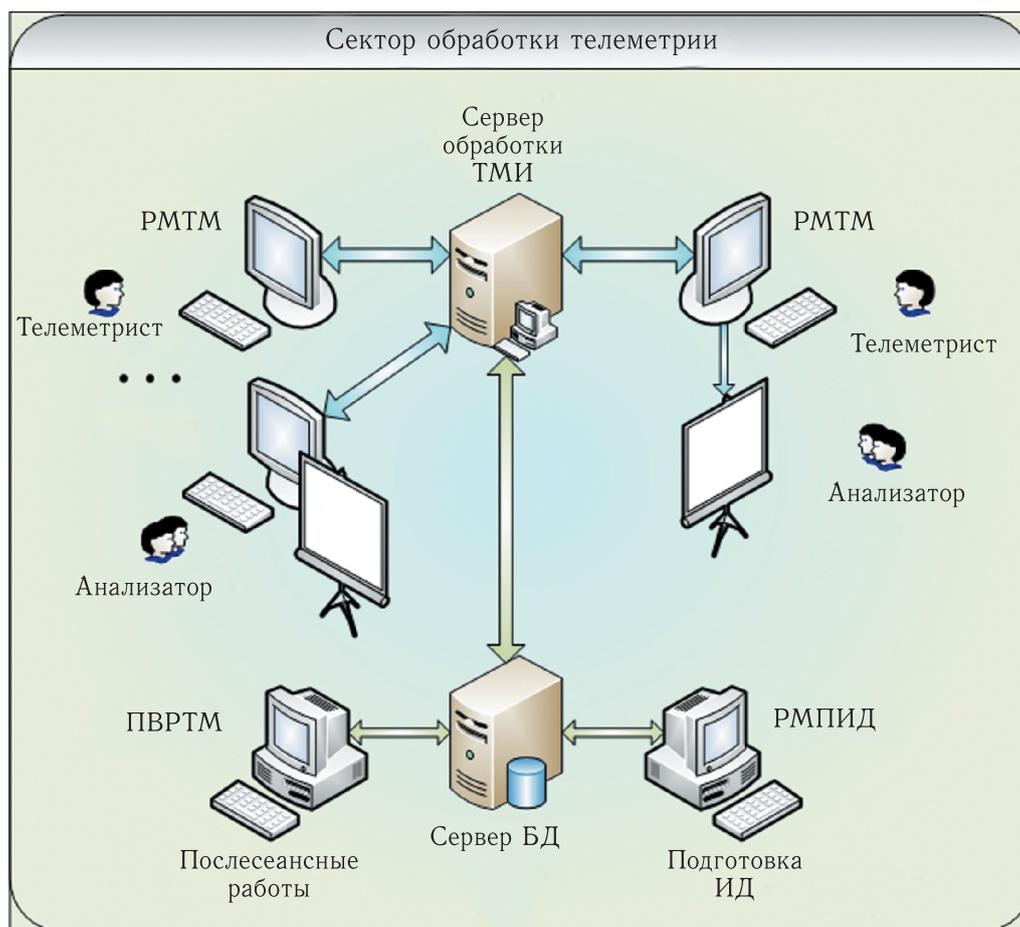


Рис. 1. Структура сектора обработки телеметрии

не только изготавливает спутники, но и предлагает свои ИТ телеконтроля объектов и телеуправления ими. Основные функциональные задачи технологии подробно проанализированы в [14]. Технология используется в ЦУП КА, причем ввиду низкой информативности потоков ТМИ (8000, 32 000 бит/с) вся обработка сосредоточена на средствах ЦУП, а компоненты наземного автоматизированного комплекса управления (НАКУ) используются только для сбора потоков ТМИ с НИП и последующей доставки в ЦУП (рис. 1).

Обработка входных потоков телеметрии осуществляется на сервере обработки ТМИ по исходным данным (ИД), хранящимся на сервере базы данных (БД). Рабочие места телеметристов (РМТМ) и анализаторов предназначены для визуализации результатов обработки данных телеконтроля в шаблонном (табличном, текстовом)

и мнемоническом видах. Ведется архив результатов обработки сеансов на сервере БД. Предусмотрены рабочие места для внесеансных работ (ПВРТМ) и подготовки ИД (РМПД).

Специальное программное обеспечение обработки телеметрической информации (СПО ОТИ) включает следующие компоненты:

- ✓ комплекс программ (КП) подготовки исходных данных;
- ✓ КП сервера обработки телеметрической информации (СОТМ);
- ✓ КП рабочего места телеметриста (РМТМ);
- ✓ КП мнемонического представления телеметрической модели (МПТМ);
- ✓ КП проведения внесеансных работ (ПВР);
- ✓ КП обмена файлами телеметрической информации (ОФТМ).

В ИТ СПО ОТИ реализованы традиционные алгоритмы первичной и вторичной обработки параметров, а также элементы многоуровневого иерархического анализа данных телеконтроля. При визуализации результатов обработки формируются мнемосхемы бортовых систем как результата обработки состояний первичных параметров и параметров алгоритмов обобщенного контроля. Реализована задача выбора потока телеметрии с лучшим качеством. Данная ИТ телеконтроля применима только к изделиям изготовленным в ОАО ИСС им. М. Ф. Решетнева.

КОТ (РКС)

ИТ телеконтроля, разработанная в АО РКС, основана на комплексе обработки телеметрии (КОТ) — базовом программном средстве, на котором построены все секторы центра автоматизированной системы информационно-телеметрического обеспечения (АСИТО) управления изделиями РКТ, комплексы обработки информации НИП, комплексы ЕЦУП РБ и комплексы ЦУП отдельных КА, объединенные между собой глобальной сетью обмена данными (рис. 2).

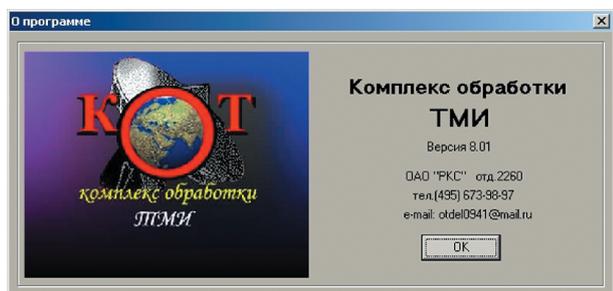


Рис. 2. Комплекс обработки ТМИ

АСИТО управления КА является компонентом общего назначения НАКУ и относится к классу сложных систем, опыт разработки и совершенствования которых длится более 40 лет [7, 8]. Реализованная в системе ИТ телеконтроля, *инвариантная* к типу изделия РКТ, она создавалась в расчете на решение всех классических задач обработки ТМИ (подготовка ИД, первичная и вторичная обработка «приборной» телеметрии, обработка «программной» телеметрии и данных автономных систем навигации и др.). Повторное решение этих задач в ЦУП

и ИВК ГК, по мнению авторов, нецелесообразно экономически. Лучше перейти к широко распространяющемуся в современной инфосфере сервис-ориентированному подходу, согласовав лишь интерфейсные протоколы взаимодействия с АСИТО.

ИТ на базе КОТ (РКС) выполняет операции переработки данных телеконтроля в нескольких основных режимах (рис. 3):

- сектор обработки активный (СОА) — реализует управление процессом обработки сеансов телеконтроля одновременно с несколькими КА и несколькими НИП по директивам, формируемым на основе плана работ на сутки;
- комплекс обработки информации (КОИ) — первичная и вторичная обработка ТМИ на НИП;
- рабочее место оператора (РМО) — для визуализации результатов обработки данных телеконтроля на разнородных (на рис. 3 показана реализация для платформы МСВС) абонентах — получателях АСИТО.

Для взаимодействия комплексов (СОА, КОИ, РМО и др. режимы) используется технология «сокетного» обмена данными. Причем в системе циркулируют файлы результатов обработки потоков телеметрии, которые по своим объемным характеристикам значительно меньше исходного полного потока ТМИ. Это положительно сказывается на оперативности доставки результатов потребителям (в ЦУП). Реализована также возможность упаковки–распаковки потока ТМИ для передачи по каналам наземной связи и передачи данных.

ПАО «Фрегат»

ИТ телеконтроля на основе программно-алгоритмического обеспечения (ПАО) «Фрегат» разработана и используется на средствах ЦУП-Л (ИВК ГК) в НПО им. С. А. Лавочкина при управлении КА «Электро-Л» и при запусках РБ «Фрегат» [1]. ПАО содержит следующие компоненты:

- ✓ средства приема и передачи ТМИ — реализуют взаимодействие с внешним миром (СК, ЕЦУП, МТС), преобразование потока ТМИ в универсальный формат ЦУП-Л (Arpica), ведение архива потоков ТМИ, выбор лучших потоков и отправку в локальную сеть ИВК ГК;

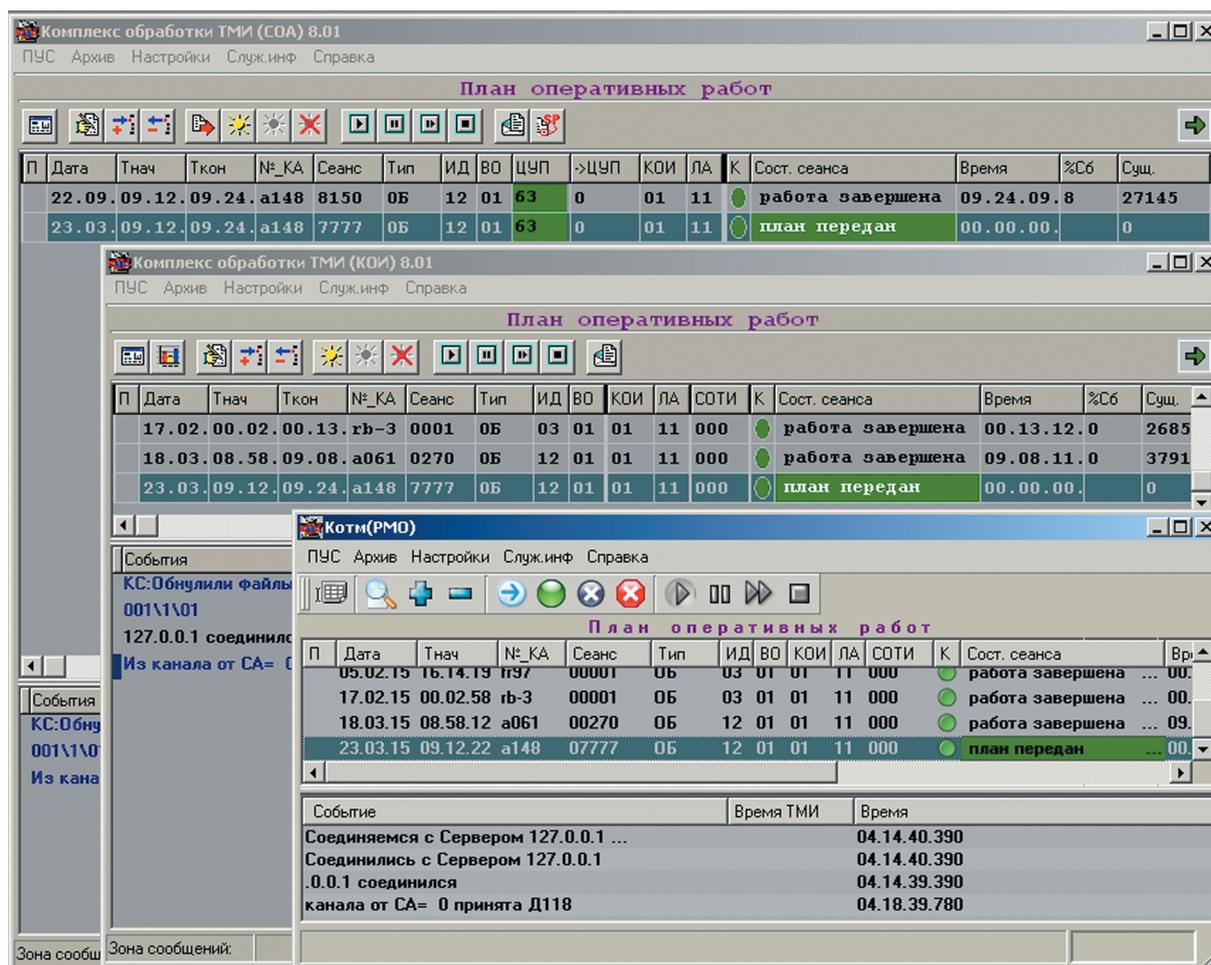


Рис. 3. Режимы работы комплекса обработки ТМИ

- ✓ КП подготовки ИД — формирование на основе текстовой документации двоичных файлов, содержащих сведения об алгоритмах обработки параметров и форматах визуализации результатов обработки;
- ✓ КП обработки ТМИ — для первичной и вторичной обработки потока ТМИ с возможностью работы одновременно с 3 потоками;
- ✓ КП визуализации результатов обработки ТМИ — для формирования телеметрических формуляров по группам анализа (до 100 формуляров), представления значений параметров в шаблонном, табличном, рулонном и графическом видах;
- ✓ КП трехмерного отображения модели полета объекта управления.

Перечисленные компоненты ИТ решают уже обсуждавшиеся выше классические задачи обработки данных телеконтроля. И даже формы визуализации результатов обработки практически совпадают, например, с ИТ КОТ (РКС). На рис. 4 для сравнения представлен шаблонный формуляр результатов обработки контроля работы телеметрической системы (ТМС). Это еще раз подтверждает тезис о целесообразности перехода на сервис-ориентированную технологию интеграции различных комплексов и ИТ телеконтроля объектов.

Разработан также графический формуляр, который облегчает анализ и наглядно демонстрирует фактическое состояние контролируемой бортовой подсистемы. Очевидно, что получить такой формуляр можно было бы и без выполнения задач первичной и вторичной обработки ТМИ на средствах

КА	1022	БШВ	00:04:34	Сеанс	11	Дата ТМ	01.11.10
ТМС	40 2	СЕВ	09:33:02	Режим ТМ	НП256	Начало ТМ	09:32:25
РЕЖИМ НП256 09:32:25,268							
ВРЕМЯ 00:04:34 09:33:02,218							
ПРД ВКЛ 09:32:25,268							
КСЗУ КИЗУ, исходное состояние 09:32:25,268							
ОЛК1 12 ЕД. ТМШ 09:32:25,268							
100ЛК11 228 ЕД. ТМШ 09:32:25,268							
100ЛК12 228 ЕД. ТМШ 09:32:25,268							
ТЛК1 17.0 ГРАД. 09:32:25,268							
Т65 16.5 ГРАД. 09:32:25,608							

КА	Дата	Тначала	Индекс	ИД	ВО	Сев
fr26	24.10.14	16.14.19	Fregat3_26	01	01	00

Документ	Журнал Событий	ФО	Оценка качества	ЦДР	Служ.инф.
2 ТМС					

к.п.ВО:	462	Режим:	НП32	17.02.37.662
Сформ.:	359		в32(НП32+ЗАП32)	02.17.20.155
Существ.:	44218		НП32	17.20.37.785
Время ДМ:	18.15.02	ВРЕМЯ	03.32.21.000	18.15.01.686
КСС:		ПРД	ВКЛ	17.20.37.786
Конец ТМН		КСЗУ	СТОП ЗУ	17.20.37.786
Сбоя:	0	ОЛК11	12 ЕД.	17.20.37.868
		100ЛК11	227 ЕД.	17.20.37.870
		100ЛК12	228 ЕД.	17.20.37.871
		ТЛК1	17.0 ГРАД	18.05.18.692
		Т65	23.60 градус	17.20.39.954

Рис. 4. Пример шаблонного формуляра результатов обработки

ЦУП-Л, воспользовавшись специальным «сервисом» получения результатов обработки с компонента общего назначения — АСИТО.

При запуске РБ «Фрегат» в ЕЦУП поступают полные потоки ТМИ по космическим каналам связи, а также результаты обработки из АСИТО. Суммарное количество потоков данных существенно превышает возможности ИТ телеконтроля, реализованной на средствах ЦУП-Л (до 3 потоков). В таких условиях в ЦУП-Л нет возможности решить нерешенную до сих пор задачу интеграции потоков ТМИ для получения в реальном масштабе времени результатов обработки по «суммарному» потоку. Такой подход к обработке позволил бы компенсировать сбойные участки сеанса обработки от одного НИП, участками сеанса от других комплексов с менее сбойной телеметрией. Особенно это актуально для телеконтроля основных динамических событий, возникающих на этапе выведения и в полете РБ «Фрегат» (сброс головного обтекателя, включение-выключение двигательной установки, отделение КА и др.). Для демонстрации этих событий разработаны специальные обобщенные формуляры (рис. 5).

На формуляре представлены сведения о событиях: название события; расчетное время события (три колонки: от начала отсчета времени,

от контакта подъема и по времени СЕВ) и фактически зафиксированное время события (три колонки справа) по результатам телеконтроля полета РБ. Кроме того, выводятся расчетные параметры (время работы двигательной установки, набранная кажущая скорость и др.). Следует заметить, что вид формуляра (см. рис. 5) используется в ЕЦУП РБ, а в ЦУП-Л разработан аналог такого формуляра.

Сравнительная таблица

Полученная в результате анализа сравнительная таблица (табл. 2) отражает данные по показателям функциональных задач и по месту реализации ИТ телеконтроля.

При этом классификация по существу имеет практическую направленность, а теоретические аспекты (по свойствам отношений робастности) затронуты незначительно. Произошло это потому, что на практике перед ИТ телеконтроля до сих пор ставились задачи в расчете на установленную в требованиях к помехам входной телеметрии в пределах от 10^{-4} до 10^{-3} сбой на бит. Как показала практика телеконтроля, для большинства сеансов обработки с таким качеством входной ТМИ результаты обработки параметров

Архив БВК: Поток (с:\Arx\m\Fregat3_26\ID01\B001\S000201)

Выбор потока: S000001 | S000201 | S340201

Потоки (сеансы)

FO_15 FO_16 FO_17 FO_18 FO_19 FO_20 FO_26 FO_27 FO_31 FO_32 FO_34 FO_35 FO_36 FO_43 FO_44 FO_45 FO_50

СТАРТ (КП)	5.80	0.00	00.00.05/800																
СБРОС ГО	174.10	168.30	00.02.54/100																
ОТДЕЛЕНИЕ ГБ	532.96	527.16	00.08.52/960																
Первый активный участок на МДУ: выход на опорную орбиту																			
ВКЛЮЧЕНИЕ С031	537.96	532.16	00.08.57/960																
ВКЛЮЧЕНИЕ МДУ (К31)	592.96	587.16	00.09.52/960																
ОТКЛЮЧЕНИЕ МДУ (ГК1)	617.57	611.77	00.10.17/570																
Время работы МДУ (с)	24.60																		
10с после ГК1																			
Второй активный участок на МДУ: выход на переходную орбиту																			
ВКЛЮЧЕНИЕ С032	++ 2846.73	2840.93	00.47.26/730	2846.753	2840.953	00.47.26/753													
ВКЛЮЧЕНИЕ МДУ (К32)	+++ 2901.73	2895.93	00.48.21/730	2901.770	2895.970	00.48.21/770													
ОТКЛЮЧЕНИЕ МДУ (ГК2)	++ 3508.97	3503.17	00.58.28/970	3514.106	3508.306	00.58.34/106													
Время работы МДУ (с)	607.20			612.336 с															
10с после ГК2				10.027 с	2549.779 м/с	306 Тц													
Третий активный участок на МДУ: выход на целевую орбиту																			
ВКЛЮЧЕНИЕ С033	++ 8255.80	8250.00	02.17.35/800	8255.799	8249.999	02.17.35/799													
ВКЛЮЧЕНИЕ МДУ (К33)	+++ 8310.80	8305.00	02.18.30/800	8310.817	8305.017	02.18.30/817													
ОТКЛЮЧЕНИЕ МДУ по ОКТ*																			
ОТКЛЮЧЕНИЕ МДУ (ГК3)	+++ 8346.09	8340.29	02.19.06/090	8346.730	8340.930	02.19.06/730													
Время работы МДУ (с)	35.30			35.913 с															
10с после ГК3				10.028 с	2704.940 м/с	306 Тц													
Отделение КА																			
ОТДЕЛЕНИЕ КА (СУ)	+ 8376.09	8370.29	02.19.36/090	8376.713	8370.913	02.19.36/713													
ОТДЕЛЕНИЕ КА (СУ-дубл.)	+ 8435.80	8430.00	02.20.35/800	8435.794	8429.994	02.20.35/794													
30,0 с после ГК3				29.983 с	или	915 Тц													
Четвертый активный участок на ДМТ ДУ С03: увод РБФ																			
ВКЛЮЧЕНИЕ ДМТ ДУ С034	++ 10175.80	10170.00	02.49.35/800	10175.807	10170.007	02.49.35/807													
ОТКЛЮЧЕНИЕ ДМТ ДУ С034	++ 10211.55	10205.75	02.50.11/550	10211.557	10205.757	02.50.11/557													
Время раб. ДМТ ДУ С03	35.80			35.750 с															

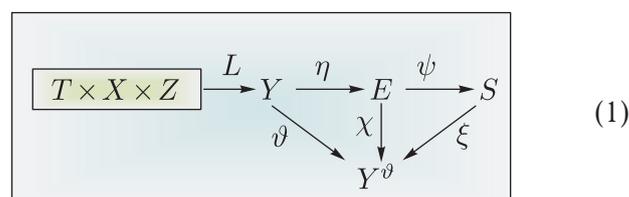
Рис. 5. Обобщенный формуляр динамических операций РБ

получаются достоверными. Однако при ухудшении качества входной ТМИ могут возникать аномальные отсчеты, которые оператор-анализатор может оценить и игнорировать при выработке решения.

Повышение уровня автоматизации обработки ТМИ, разработка алгоритмов диагностирования технических и функциональных состояний объекта управления привели к тому, что аномальные отсчеты начали подаваться на вход алгоритмов диагностирования. Возникла проблемная ситуация, связанная с необходимостью обеспечить достоверность результатов диагностирования. Ведь появление случайных обобщенных событий типа «не норма» вряд ли понравится анализаторам. Поэтому необходимо теоретически и на практике переходить к реализации функциональных задач обработки данных телеконтроля на базе устойчивых к сбоям (робастных) процедур манипулирования данными.

Направления развития ИТ телеконтроля

На теоретико-множественной модели основные функциональные задачи ИТ телеконтроля описываются обобщенной структурой [7]



где T — множество моментов времени, в которые наблюдается КА;

X, Y — множества входных и выходных сигналов КА;

Z — множество состояний КА;

E — множество заданных видов технических состояний КА;

Таблица 2. Классификация ИТ телеконтроля изделий РКТ

Информационные технологии телеконтроля изделий РКТ					
Место Показатели	Общего назначения	ЦУП			ИВК ГК
	АСИТО: СОА; СОП; КОИ; РМО (РКС)	КА ОАО ИИС им. М. Ф. Решетнева	ЦНИИмаш	КА ЦСКБ «Прогресс»	КА и РБ ФГУП НПО им. С. А. Лавочкина
Инвариантность к типу изделия РКТ	+	+	+	+	+
Подготовка ИД для обработки потоков ТМИ	АС ПИД, инвариантная к типу изделия	+	+	+	+
Первичная обработка данных	+	+	+	+	+
Визуализация результатов обработки	Шаблонные, табличные, рулонные, графические формуляры	Шаблонные и табличные формуляры, мнемосхемы	Шаблонные и табличные формуляры, мнемосхемы	Шаблонные, табличные, рулонные формуляры, графики	Шаблонные, табличные, рулонные формуляры, мнемосхемы
Вторичная обработка данных	+	+	+	+	+
Многопоточность	До 10–16 потоков одновременно	До 3–5 потоков	По сеансам с МКС	По числу и времени сеансов	От 3 и более источников ТМИ
Робастность процедур обработки данных	+	Обработка с расчетом на вероятность ошибки входной ТМИ от 10^{-4} до 10^{-3} сбоев на бит данных			

S — множество истинных технических состояний КА;

Y^ϑ — фактор-множество непересекающихся классов выходных сигналов объекта, взаимно однозначно соответствующее множеству E ;

$L, \eta, \vartheta, \chi, \psi, \zeta$ — отображения наблюдения, классифицирования, факторизации, импликации, оценивания и идентификации технических состояний КА соответственно.

Сбои воздействуют на множество Y и далее проникают после отображения классифицирования η в результат обработки, принадлежавший множеству E . Определить истинность полученно-

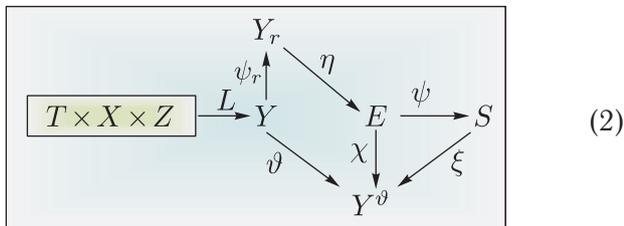
го вида технического состояния предполагается по результату отображения ψ оценивания. Результат оценивания принадлежит множеству S .

Может ли процедура оценивания ψ быть робастной? В принципе, да. Однако надо учитывать два обстоятельства. Во-первых, при реализации алгоритмов анализа данных телеконтроля часто имеют дело с многоуровневой иерархической обработкой параметров. В этом случае аномальный отсчет параметра будет проникать во все последующие уровни обработки.

Второе обстоятельство связано с тем, что по примеру радиотехнических устройств усиления

необходимо бороться с шумами первого каскада. Следовательно, бороться с ошибками следует начинать как можно раньше, например, с множества Y .

В этом случае обобщенная структура телеконтроля имеет вид:



где ψ_r — робастное отображение оценивания параметров $y \in Y$;

Y_r — робастное множество выходных сигналов КА.

А соответствующая логическая структура комплекса моделей и алгоритмов ИТ телеконтроля лишь дополняется компонентами, обеспечивающими формирование робастных результатов обработки параметров и видов технических и функциональных состояний бортовых систем.

Перспектива ИТ телеконтроля изделий РКТ связана с переходом от структуры (1) к структуре (2). При этом ИТ телеконтроля должна обеспечить получение устойчивых к сбоям (робастных) результатов обработки телеметрии и тем самым повысить своевременность принятия решения на управление объектами.

Заключение

На основе проблемно-ориентированного варианта системного подхода проведен анализ современного состояния ИТ телеконтроля изделий РКТ. По реализованным на практике задачам ИТ телеконтроля похожи друг на друга и в основном выполняют известные, ставшие классическими алгоритмы обработки телеизмерений.

Для минимизации экономических затрат при разработке новых изделий РКТ целесообразно шире использовать возможности существующей АСИТО управления КА как элемента общего назначения НАКУ, последовательно переходя к технологии «сервисов» при постановке изделий на обслуживание в систему, проведении робастной об-

работки данных телеконтроля, оценивании технического и функционального состояния бортовых систем и др.

Список литературы

1. Казакевич Ю.В., Зефирова И.В. Центр управления полетами НПО им. С.А.Лавочкина при работе с межорбитальным космическим буксиром «Фрегат» // Вестник ФГУП НПО им. С.А.Лавочкина, 2014, № 1, с. 64–70.
2. Крылов А.М. Производство и эксплуатация спутников связи и вещания. http://mosspaceclub.ru/3part_krilov_3.pdf
3. Козлов Д.И., Аншаков Г.П., Агарков В.Ф. и др. Конструирование автоматических космических аппаратов / Под ред. Д.И.Козлова. М.: Машиностроение, 1996. 448 с.
4. Черток Б.Е., Арин О.А., Аполлонов В.В. и др. Космонавтика XXI века / Отв. редактор Б.Е.Черток. Научн. координатор проекта Ю.М.Батулин. М.: РТСофт, 2010. 864 с.
5. Кравец В.Г. Автоматизированные системы управления космическими полетами. М.: Машиностроение, 1995. 256 с.
6. Кузин В.А., Атаманчук Ю.И., Кравчук Н.В. и др. Автоматизированный комплекс обработки телеметрической информации // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П.Королева, 2003, № 1. <http://www.science63.ru/nauka/142-kompleks-obrabotki-telemetricheskoj-informaczii-chast-1.html>
7. Лобан А.В. Информационная технология распределенного диагностирования космических аппаратов. М.: ДПК Пресс, 2015. 144 с. ISBN 978-5-91976-069-6.
8. Лобан А.В., Ловцов Д.А. Новая эффективная технология распределенной переработки измерительной информации в АСУ космическими аппаратами // Вестник ФГУП НПО им. С.А.Лавочкина, 2014, № 4, с. 81–88.
9. Лидов М.Л. Минимаксные методы оценивания // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша, 2010, № 71, 87 с. <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2010-71>.
10. Матюшин М.М. Модели информационной нагрузки на наземный компонент автоматизированной

- системы управления полетом космического аппарата // Наука и образование, 2011, № 10. <http://technomag.edu.ru/doc/223840.html>
11. *Неволин В.И.* Робастные информационные системы. Методы синтеза и анализа. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 312 с.
 12. *Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.* Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
 13. *Охтилев М.Ю., Кургин В.А., Майданович О.В.* Автоматизированная система управления подготовкой и пуском ракет космического назначения как корпоративная информационная система // Информационно-измерительные и управляющие системы, 2010, № 7, с. 78–83.
 14. *Пакман Д.Н., Некрасов М.В., Антамошкин А.Н.* Проблемы обработки телеметрической информации в контуре автоматизированной системы управления космическими аппаратами // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнева, 2009, вып. 1.
 15. *Соколов Н.Л.* Основные принципы диагностики работоспособности бортовой аппаратуры автоматических КА и выработки рекомендаций по устранению нештатных ситуаций // Успехи современного естествознания, 2007, № 6, с. 16–20.
 16. *Хьюбер П.* Робастность в статистике. М.: Мир, 1984. 304 с.

УДК 681.3.06

Адаптивный фильтр Калмана для оценки параметров отраженного сигнала

В. П. Кузнецов¹, Е. П. Чураков²

¹к. т. н., доцент, ²д. т. н., профессор

Рязанский государственный радиотехнический университет

e-mail: ²e.churakov@yandex.ru

Аннотация. Построен адаптивный фильтр Калмана для оценивания частоты и фазы отраженного гармонического сигнала. Идея подхода состоит в представлении гармонического сигнала в виде решения однородного разностного уравнения второго порядка с единичными корнями.

Ключевые слова: гармонический сигнал, разностное уравнение, переменные состояния, фильтр Калмана

Adaptive Kalman Filter for Radar Signal Parameters Estimation

V. P. Kuznetsov¹, E. P. Churakov²

¹candidate of engineering science, associate professor, ²doctor of engineering science, professor
Ryazan State Radio Engineering University

e-mail: ²e.churakov@yandex.ru

Abstract. Adaptive Kalman filter for estimation of frequency and difference of phases of harmonic signal measuring set is constructed. The approach based on representation of harmonic signal as solving of difference equation with roots on unit circle.

Key words: harmonic signal, difference equation, state variables, Kalman filter

Постановка задачи, идея метода

В радиолокации хорошо известна задача определения координат движущегося объекта на основании отраженной электромагнитной волны, которая принимается несколькими датчиками, распределенными в пространстве. Один из датчиков назначается опорным, остальные — рабочими. Электромагнитная волна создает в датчиках электрические сигналы гармонического вида, которые и являются носителями информации об объекте. Координаты объекта определяются по разности фаз гармонических сигналов, возникающих в рабочих и опорном каналах. Решение задачи осложняется неизвестной вследствие доплеровского эффекта частотой отраженного сигнала.

Рассмотрим типовую реализацию отраженного сигнала и представим основную идею его обработки на основе адаптивного фильтра Калмана (рисунок).

Отраженный сигнал формируется по поясам дальности; на рисунке представлен один из таких поясов. На начальном этапе во входном сигнале присутствует постоянная составляющая и случайная помеха, обработка на этом этапе заключается в выделении постоянной составляющей и вычислении дисперсии сигнала, которая служит критерием появления отраженного сигнала. Как только дисперсия сигнала превысит заданный порог (отсчет 200), включается основной фильтр Калмана, который определяет частоту входного сигнала и выделяет из него гармоническую составляющую. Затем включается дополнительный фильтр Калмана (отсчет 250), который на основе известной частоты оценивает фазу гармонической составляющей относительно момента включения дополнительного фильтра.

Эта идея реализована в виде многоканального фильтра, обрабатывающего всю совокупность измерительных каналов и определяющего разности фаз между рабочими и опорными сигналами, которые поступают затем в алгоритм оценивания координат объекта. Рассмотрим более подробно реализацию этой идеи.

Математическая постановка задачи заключается в следующем. Имеются результаты измерений:

$$\begin{aligned} v_k[n] &= u_{0k} + u_{1k} \sin(\omega n + \varphi_k) + p_k[n], \\ \omega &= 2\pi fT, \quad k = \overline{1, q}, \quad n = \overline{1, N}. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь u_{0k} — неизвестная постоянная составляющая сигнала, u_{1k} — неизвестная амплитуда гармонического сигнала, постоянная в пределах интервала оценивания, f — частота отраженного сигнала, T — период дискретизации, n — номер отсчета, $\varphi_k \in (0, 2\pi)$ — фазы гармонических составляющих, $p_k[n]$ — независимые по пространству и времени гауссовские шумы с нулевыми средними и известной дисперсией σ_p^2 , q — количество каналов, N — временной объем выборки. Диапазон возможных значений частоты f_{\min}, f_{\max} известен. Задача заключается в определении разности фаз между рабочими и опорными сигналами.

Задача определения разности фаз гармонических сигналов неизвестной частоты может быть решена методами спектрального оценивания с последующим выделением фазовых компонент [1]. Классические методы спектрального оценивания основаны на дискретном преобразовании Фурье. Присущие им особенности, связанные с растеканием спектра и пакетной обработкой данных, обусловили появление параметрических методов спектрального оценивания, обладающих более высоким разрешением и возможностью как пакетной, так и последовательной обработки. Первая группа параметрических методов использует авторегрессионные модели представления входных данных, вторая группа (методы Прони) использует детерминированные модели. Данная работа по характеру модели входных данных примыкает к авторегрессионным методам, однако решение задачи найдено на принципах калмановской фильтрации.

Идея подхода состоит в представлении гармонического сигнала как решения линейного разностного однородного уравнения 2-го порядка с постоянными коэффициентами, корни характеристического уравнения которого расположены на окружности единичного радиуса.

Рассмотрим сначала один измерительный канал с сигналом на выходе:

$$v_n = u_0 + u_1 \sin(\omega n + \varphi) + p_n, \quad n = \overline{1, N}.$$

Будем предполагать, что постоянная составляющая u_0 оценивается на начальном этапе интервала наблюдения и может быть устранена из результатов измерений. Для описания гармонической составляющей применим теорию разностных уравнений.

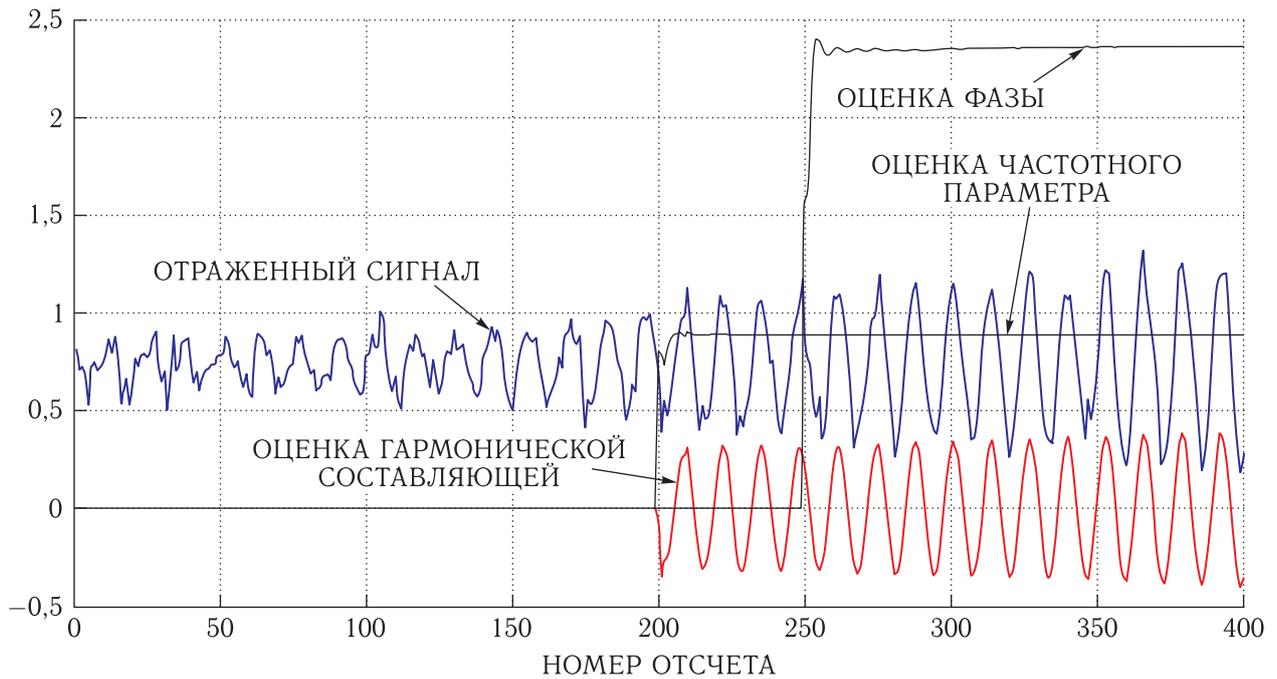


Рисунок. Оценка параметров отраженного сигнала на основе фильтра Калмана

Рассмотрим разностное уравнение

$$b_0 y[n + 2] + b_1 y[n + 1] + b_2 y[n] = 0. \quad (2)$$

Пусть соответствующее ему характеристическое уравнение $b_0 z^2 + b_1 z + b_2 = 0$ имеет пару комплексно-сопряженных корней $z_1 = \alpha + j\beta$, $z_2 = \alpha - j\beta$. Тогда общее решение уравнения (2) имеет вид:

$$y[n] = c_1 |z_1|^n \cos \omega n + c_2 |z_1|^n \sin \omega n, \quad \omega = \arg(z_1).$$

Постоянные c_1, c_2 определяются начальными условиями $y[0], y[1]$. Если корни z_1, z_2 расположены на единичной окружности, причем в правой полуплоскости, то решение примет вид:

$$\begin{aligned} y[n] &= c_1 \cos \omega n + c_2 \sin \omega n = u_1 \sin(\omega n + \varphi), \\ u_1 &= \sqrt{c_1^2 + c_2^2}, \quad \varphi = \arctg(c_1/c_2), \\ \omega &= \arctg(\sqrt{1 - \alpha^2}/\alpha). \end{aligned} \quad (3)$$

Характер расположения корней (левый или правый) определяется периодом дискретизации T . Единичным по модулю корням соответствует разностное уравнение

$$y[n + 2] - 2\alpha y[n + 1] + y[n] = 0.$$

Введем в рассмотрение переменные состояния

$$x_1[n] = y[n], \quad x_2[n] = y[n + 1],$$

которые позволяют записать исходное разностное уравнение в виде системы разностных уравнений первого порядка

$$\begin{cases} x_1[n + 1] = x_2[n], \\ x_2[n + 1] = -x_1[n] + 2\alpha x_2[n] \end{cases}$$

и уравнения выхода $y[n] = x_1[n]$. Представим эти результаты в векторно-матричной форме в виде уравнения состояния

$$\mathbf{X}[n + 1] = \mathbf{A}\mathbf{X}[n], \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1[n] \\ x_2[n] \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 2\alpha \end{bmatrix}$$

и уравнения выхода

$$y[n] = \mathbf{C}\mathbf{X}[n] + p[n], \quad \mathbf{C} = [1 \ 0].$$

Для оценивания вектора состояния применим фильтр Калмана [2], который в данных условиях определяется следующей совокупностью выражений:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{n,n-1} &= \mathbf{A}\mathbf{R}_{n-1}\mathbf{A}^T, \\ \mathbf{K}_n &= \mathbf{R}_{n,n-1}\mathbf{C}^T(\mathbf{C}\mathbf{R}_{n,n-1}\mathbf{C}^T + \sigma_p^2)^{-1}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\widehat{\mathbf{X}}_n &= \mathbf{A}\widehat{\mathbf{X}}_{n-1} + \mathbf{K}_n(v_n - \mathbf{C}\mathbf{A}\widehat{\mathbf{X}}_{n-1}), \\ \mathbf{R}_n &= \mathbf{R}_{n,n-1} - \mathbf{K}_n\mathbf{C}\mathbf{R}_{n,n-1}.\end{aligned}\quad (4)$$

В этих соотношениях $\widehat{\mathbf{X}}_n$ — оценка вектора состояния, вычисленная по наблюдениям v_1, v_2, \dots, v_n , $\mathbf{R}_{n,n-1}$ — априорная ковариационная матрица ошибок оценивания, \mathbf{R}_n — апостериорная ковариационная матрица ошибок оценивания, \mathbf{K}_n — коэффициент усиления калмановского фильтра. Для работы фильтра нужно задать матрицу \mathbf{R}_0 и вектор $\widehat{\mathbf{X}}_0$. Матрицу \mathbf{R}_0 положим единичной, $\mathbf{R}_0 = \mathbf{I}$, вектор $\widehat{\mathbf{X}}_0 = 0$.

Фильтр Калмана для оценивания частоты гармонического сигнала

Векторно-матричная модель наблюдений и соотношения фильтра Калмана предполагают известными параметры модели \mathbf{A} и \mathbf{C} . Однако в данной задаче частота ω гармонического сигнала и связанный с ней параметр α являются неизвестными. Поставим задачу оценивания параметра α одновременно с оцениванием вектора состояния, следуя работе [3].

Считая параметр α постоянным на интервале наблюдения, зададим его решением простейшего разностного уравнения

$$\alpha_{n+1} = \alpha_n.$$

Введем в рассмотрение расширенные векторы и матрицы

$$\begin{aligned}\mathbf{X}_n^* &= \begin{bmatrix} \alpha \\ x_1[n] \\ x_2[n] \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}^* = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 2\alpha \end{bmatrix}, \\ \mathbf{C}^* &= [0 \quad 1 \quad 0].\end{aligned}$$

Расширенный вектор состояния описывается уравнением состояния

$$\mathbf{X}_{n+1}^* = \mathbf{A}^*\mathbf{X}_n^* = \mathbf{F}(\mathbf{X}_n^*),$$

которое теперь принимает нелинейный вид, обусловленный наличием параметра α как в матрице \mathbf{A}^* , так и в векторе \mathbf{X}_n^* . Уравнение выхода остается линейным:

$$v_n = \mathbf{C}^*\mathbf{X}_n^* + p_n.$$

Решение задачи может быть найдено на основе линеаризации вектор-функции \mathbf{F} и последующим применением соотношений (4). Раскроем вектор-функцию \mathbf{F} :

$$\mathbf{F}(\mathbf{X}_n^*) = \mathbf{A}^*\mathbf{X}_n^* = [\alpha; \quad x_2[n]; \quad -x_1[n] + 2\alpha x_2[n]]^T.$$

Найдем матрицу частных производных $\partial\mathbf{F}/\partial\mathbf{X}^*$, используя правило дифференцирования вектор-функции по вектору:

$$\frac{\partial\mathbf{F}}{\partial\mathbf{X}^*} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 2x_2 & -1 & 2\alpha \end{bmatrix}.$$

Первая строка этой матрицы содержит частные производные от первого элемента вектор-функции \mathbf{F} по каждому элементу вектора \mathbf{X}^* . Другие строки матрицы соответствуют остальным элементам вектор-функции \mathbf{F} .

Уравнения фильтра Калмана теперь примут вид:

$$\begin{aligned}\mathbf{R}_{n,n-1} &= \left[\frac{\partial}{\partial\mathbf{X}^*}\mathbf{F}(\mathbf{X}_{n-1}^*) \right] \mathbf{R}_{n-1} \left[\frac{\partial}{\partial\mathbf{X}^*}\mathbf{F}(\mathbf{X}_{n-1}^*) \right]^T, \\ \mathbf{K}_n &= \mathbf{R}_{n,n-1}\mathbf{C}^{*T}(\mathbf{C}^*\mathbf{R}_{n,n-1}\mathbf{C}^{*T} + \sigma_p^2)^{-1}, \\ \widehat{\mathbf{X}}_n^* &= \mathbf{A}^*\widehat{\mathbf{X}}_{n-1}^* + \mathbf{K}_n(v_n - \mathbf{C}^*\mathbf{A}^*\widehat{\mathbf{X}}_{n-1}^*), \\ \mathbf{R}_n &= \mathbf{R}_{n,n-1} - \mathbf{K}_n\mathbf{C}^*\mathbf{R}_{n,n-1}, \\ \mathbf{R}_0 &= \mathbf{I}, \quad \widehat{\mathbf{X}}_0^* = [\alpha_0 \quad 0 \quad 0].\end{aligned}\quad (5)$$

Начальное значение параметра $\alpha = \alpha_0$ целесообразно назначить в середине диапазона изменения круговой частоты отраженного сигнала $\omega_{\min}, \omega_{\max}$.

Применение адаптивного фильтра Калмана к обработке реального входного сигнала показано на рисунке. Здесь первые 200 отсчетов потребовались для предварительной обработки входного сигнала, которая заключалась в вычислении постоянной составляющей и дисперсии входного сигнала с помощью «прыгающего» окна, содержащего 100 отсчетов. Во втором окне дисперсия превысила установленный порог в 0,01 и произошло включение фильтра Калмана (отсчет 200). Подчеркнем еще раз, что частота входного сигнала неизвестна; ее «представителем» является параметр α , который оценивается фильтром одновременно с оценкой гармонической составляющей.

Точность оценивания частоты была найдена путем статистического моделирования на ЭВМ тестового сигнала

$$v[n] = u \sin(\omega n + \varphi) + p[n], \quad n = \overline{1, 200}$$

с параметрами $u = 2$, $\omega = 0,451$ ($\alpha = 0,9$); фаза задавалась случайным равномерным образом в интервале $[0, 2\pi]$. Точность оценивания частоты определялась средней относительной ошибкой MAPE (Mean Absolute Percentage Error):

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\omega - \hat{\omega}_i}{\omega} \right| 100\%.$$

Для числа реализаций $N = 1000$ получены следующие результаты:

- для дисперсии помехи $\sigma_p^2 = 0,01$ $MAPE = 0,12\%$;
- для дисперсии помехи $\sigma_p^2 = 0,05$ $MAPE = 0,82\%$;
- для дисперсии помехи $\sigma_p^2 = 0,1$ $MAPE = 3,37\%$.

Таким образом, адаптивный фильтр Калмана успешно решает задачу оценивания неизвестной частоты входного сигнала и выделения гармонической составляющей.

Фильтр Калмана для оценивания фазы гармонического сигнала

Для определения фазы гармонической составляющей в сигнале представим гармонику уравнением (3), но с учетом того, что $y[n] = x_1[n]$, будем использовать оценку переменной состояния $x_1[n]$, которую выдает калмановский фильтр:

$$\hat{x}_1[n] = c_1 \cos \hat{\omega}n + c_2 \sin \hat{\omega}n + e[n]. \quad (6)$$

Здесь $e[n]$ — погрешность оценивания, дисперсия которой содержится в ковариационной матрице \mathbf{R}_n , $\hat{\omega}$ — оценка частоты гармонического сигнала, вычисляемая по формуле

$$\hat{\omega} = \arctg(\sqrt{1 - \hat{\alpha}^2} / \hat{\alpha}).$$

Представим уравнение (6) совокупностью уравнений состояния и выхода. С этой целью введем пе-

ременные состояния $q_1[n] = c_1$, $q_2[n] = c_2$, поведение которых зададим уравнением состояния

$$\mathbf{Q}[n + 1] = \mathbf{H}\mathbf{Q}[n], \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Уравнение выхода примет вид:

$$\hat{x}_1[n] = \mathbf{C}[n]\mathbf{Q}[n] + e[n], \quad \mathbf{C}[n] = [\cos \hat{\omega}n \quad \sin \hat{\omega}n].$$

Для оценивания вектора состояния $\mathbf{Q}[n]$ будем использовать дополнительный фильтр Калмана, работа которого описывается соотношениями, аналогичными (4). Дополнительный фильтр включается после окончания переходного процесса основного фильтра, а оценка фазы производится в системе координат, совмещенной с моментом включения дополнительного фильтра. Так как в конечном счете нас интересует разность фаз между рабочими и опорным сигналами, то момент включения дополнительного фильтра, одинаковый во всех каналах, оказывается несущественным.

Совместная работа основного и дополнительного фильтров Калмана показана на рисунке. Дополнительный фильтр Калмана был включен через 50 отсчетов после включения основного фильтра и вычислил фазу гармонической составляющей в системе координат, совмещенной с отсчетом 250.

Система многоканальных фильтров Калмана

Полученные результаты обобщаются на совокупность радиолокационных каналов, причем основной и дополнительный фильтры реализуются не в виде набора одноканальных фильтров Калмана, а в виде многомерных фильтров, оперирующих с расширенными векторами состояния.

Список литературы

1. Марпл С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990.
2. Сейдж Э., Мелс Дж. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении. М.: Связь, 1976.
3. Чураков Е. П. Математические методы обработки экспериментальных данных в экономике. М.: Финансы и статистика, 2004.

УДК 621.38.049.771.14

Разработка радиационно стойкой БИС МДМ-преобразователя для датчиков в КМОП КНС-базисе

А. И. Черный, В. Н. Богатырев¹, З. М. Поварницына², А. Ю. Алямкин

^{1,2}к. т. н., ОАО «НПО ИТ»

e-mail: npcsm2@yandex.ru

Аннотация. В ОАО «НПО ИТ» разработан, изготовлен и проведены испытания экспериментального образца большой интегральной схемы (БИС) преобразователя для датчиков (в частности магниторезистивных) на базе инструментального усилителя типа модулятор–демодулятор (МДМ) по КМОП-технологии на отечественных структурах «кремний на сапфире» с толщиной приборного слоя кремния 0,6 мкм. Наряду с МДМ, инструментальным усилителем, БИС включает также выходной нормирующий усилитель, набор резисторов обратных связей и выходной фильтр низкой частоты. Реализованный алгоритм модуляции–демодуляции позволил получить малое напряжение смещения и компенсацию фликкер-шума для обеспечения преобразования низкочастотных сигналов датчиков начиная с постоянного тока. Лабораторными испытаниями произведена предварительная оценка радиационной стойкости БИС к ионизирующему излучению на моделирующем испытательном комплексе при воздействии излучения от ⁶⁰Co путем испытания основного базового элемента — операционного усилителя, стойкость которого составила не менее 500 Крад/Si.

Ключевые слова: магниторезистивный датчик, модулятор–демодулятор, МДМ, инструментальный усилитель, радиационная стойкость, большая интегральная схема, кремний на сапфире

Development Radiation Hardened IC MDM of the Converter for Sensors in CMOS SOS basis

A. I. Chernyj, V. N. Bogatyrev¹, Z. M. Povarnitsyna², A. Yu. Alyamkin

^{1,2}candidate of engineering science,

Joint Stock Company “Scientific-Production Association of Measuring Techniques”

e-mail: npcsm2@yandex.ru

Abstract. On Joint Stock Company “Scientific-Production Association of Measuring Techniques” are developed, made and conducted tests of the experimental sample instrumentation amplifier with modulator–demodulator the IC MDM of the converter for magneto resistive sensors. Is manufactory on CMOS with design norms of an order 3 microns on technology “silicon on sapphire” (SOS) on domestic plates with thickness of a layer of silicon 0,6 microns. IC includes the modulator–demodulator, the first and the second operational amplifiers, the normalization amplifier, resistors of feedback, the filter of low frequency. The realized algorithm of modulation–demodulation has allowed to receive small voltage offset and compensation to flicker noise for low-frequency analogue signals. Radiating hardened to ionizing radiation on a modeling test complex is confirmed by laboratory researches. Resistance of the basic element — the operational amplifier to the saved up dose not less than 500 Krad/Si on ⁶⁰Co.

Key words: magneto resistive sensors, modulator–demodulator, MDM, instrumentation amplifier, radiation hardened, integrated circuits (IC), silicon on sapphire (SOS)

В ОАО «НПО ИТ» разработан, изготовлен и проведены испытания экспериментального образца (ЭО) большой интегральной схемы (БИС) преобразователя для датчиков (в частности магниторезистивных) на базе инструментального усилителя типа модулятор–демодулятор (МДМ). Технология изготовления БИС — КМОП, на отечественных структурах «кремний на сапфире» (КНС) с толщиной приборного слоя кремния 0,6 мкм.

Усилители с модуляцией–демодуляцией сигнала (усилители МДМ) реализуют преобразование медленно меняющегося входного напряжения в переменное напряжение, которое затем усиливается, демодулируется и фильтруется. Данный алгоритм в значительной степени уменьшает погрешности, связанные с температурным и временным дрейфом нуля. Структурная схема БИС МДМ-преобразователя приведена на рис. 1.

Инструментальный усилитель построен по классической схеме на трех операционных усилителях (ОУ). Цель введения в структуру нормирующего выходного усилителя — обеспечить низкое выходное сопротивление, большой выходной сигнал и увеличить общий коэффициент усиления. Если коэффициент усиления инструментального усилителя достаточно велик, то дрейф нуля дифференциального усилителя практически не увеличивает нестабильности начального уровня усилителя в целом. Фильтр нижних частот и нормирующий усилитель могут быть объединены в один узел — активный фильтр. Модулятор и демодулятор управляются частотой, вырабатываемой внутренним генератором. В данной работе блок модуляции и демодуляции построен на основе КМОП транзисторных ключей.

Оценка плотности шума для МДМ ОУ.

Теоретически плотность шума для МДМ ОУ определяется формулой

$$S_{n.vx} = \frac{3,14^2 \cdot 4 \cdot K \cdot T \cdot n_1}{8 \cdot g_{\min}} \left(1 + \frac{F_k}{F_{\text{chop}}} \right), \text{ где:}$$

$S_{n.vx}$ — спектральная плотность входных шумов, K — постоянная Больцмана, T — температура, n_1 — фактор наклона в области слабой инверсии, g_{\min} — крутизна входных транзисторов операционного усилителя, F_k — граничная частота пропускания, F_{chop} — частота выборки.

В нашем случае $T = 300$ °С, $n_1 = 1,4$, $g_{\min} = 30$ мкА/В, $F_k = 200$ Гц, $F_{\text{chop}} = 4000$ Гц, $K = 1,38 \cdot 10^{-23}$, легко показать, что $S_{n.vx} = 31,58$ нВ/Гц.

Оценка величины смещения для МДМ ОУ.

Величина смещения для МДМ ОУ определяется формулой:

$$V_{\text{offset}} = 2 \cdot 3,14 \cdot F_{\text{chop}} \cdot V_q \cdot R_{\text{on}} \times \\ \times \left(2 \cdot 3,14 \cdot F_{\text{chop}} \cdot R_{\text{on}} \cdot C_{\text{in}} + 2Q \cdot e \right),$$

где

$$V_q = \frac{C_{ox}}{2} \left(\left(\frac{dW_i}{W_i} + \frac{dL_i}{L_i} \right) \cdot (V_{dd} - V_t) + \right. \\ \left. + C_{ov} (V_{dd} - V_{ss}) \cdot \frac{dC_{ov}}{C_{ov}} \right),$$

где $i = 1, 2, 3$. $\frac{dW_i}{W_i}$, $\frac{dL_i}{L_i}$, dV_t — относительные рас- согласования параметров, C_{ov} — емкость перекрытия. В нашем случае при $\frac{dW_i}{W_i} = \frac{dL_i}{L_i} = \frac{dC_{ov}}{C_{ov}} = 0,1$, $dV_t = 100$ мВ, $R_{\text{on}} = 50$ кОм, $C_{\text{in}} = 1$ пФ, $Q = 10$, $e = 1\%$.

Теоретическая величина смещения V_{offset} не превышает 1 мкВ [1].

Испытания ЭО проводились согласно разработанной (в рамках этапа 2 СЧ НИР «Датчик-ИТ») «Программе и методике испытаний ЭО» от 30.09.2013 № НПЦМ2/2-85 на измерителе Keithley 2602 и подтвердили достижение следующих параметров:

- коэффициент усиления фиксирован — 135;
- температурный дрейф коэффициента передачи — 300 ppm/°С;
- напряжение смещения «нуля» — не более 20 мкВ;
- температурный дрейф напряжения смещения «нуля» — не более 0,5 мкВ/°С;
- коэффициент ослабления синфазного сигнала и влияния напряжения питания — не менее 80 дБ;

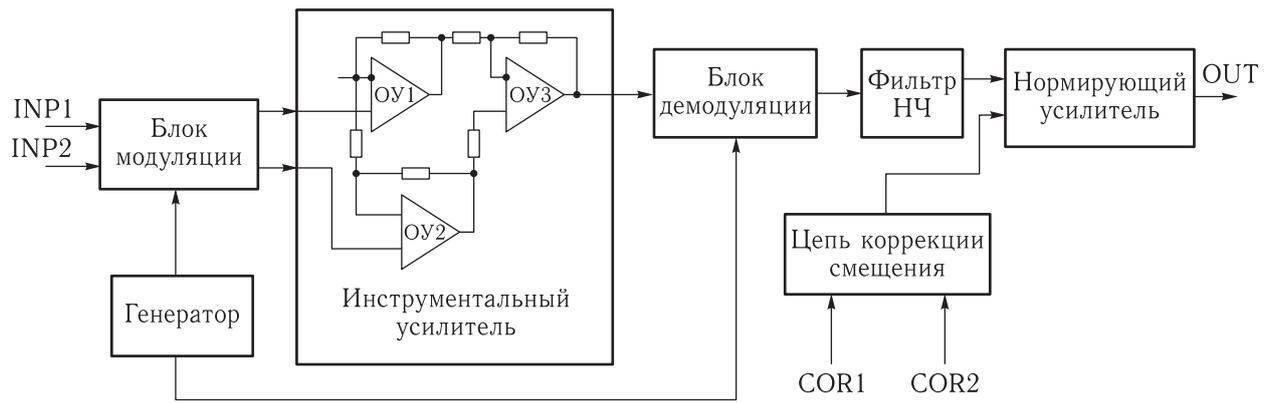


Рис. 1. Структурная схема БИС МДМ-преобразователя

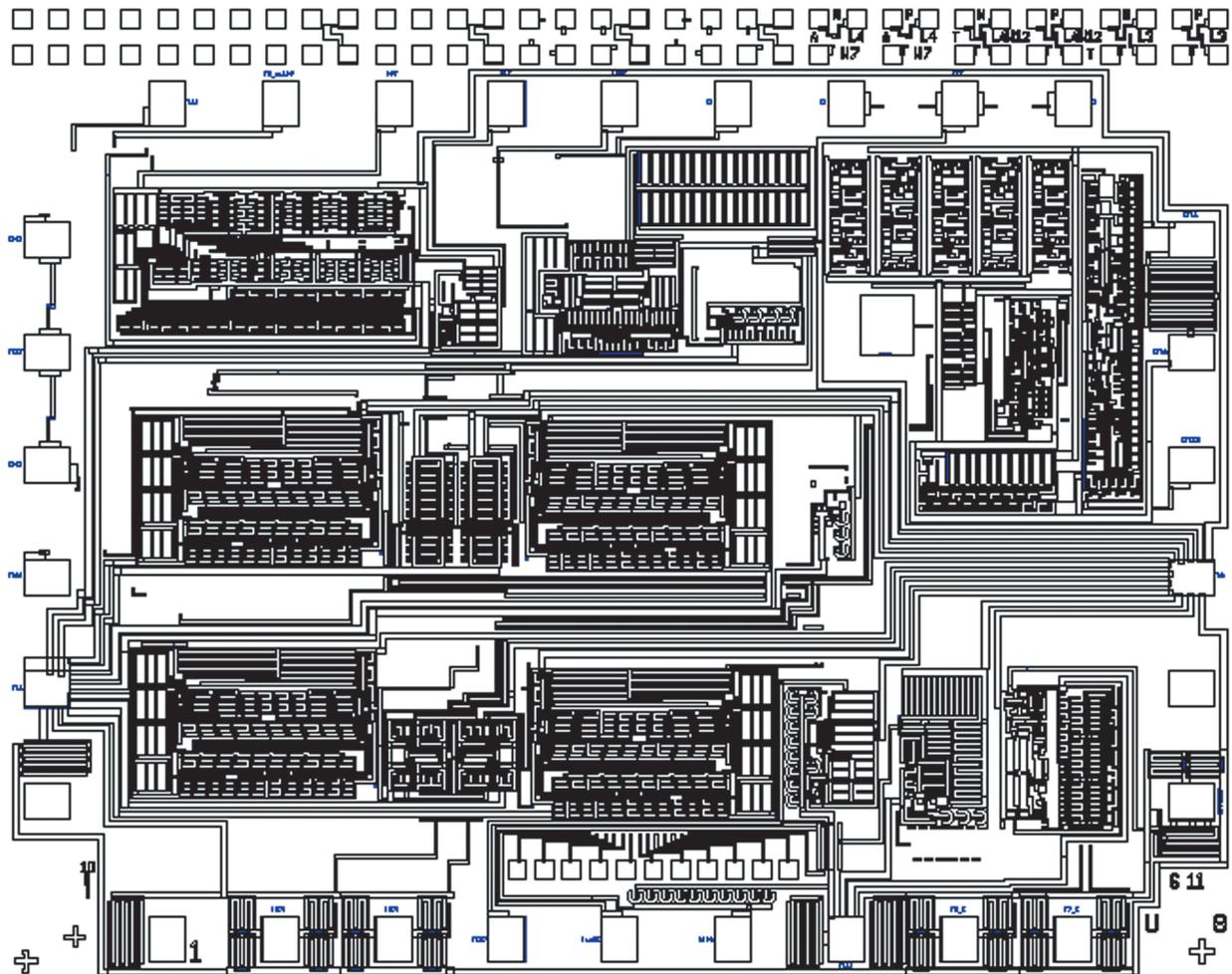


Рис. 2. Топология кристалла БИС МДМ-преобразователя

- входные токи — не более 1 нА;
- потребляемая мощность — не более 50 мВт;
- полоса пропускания по уровню 3дВ — не менее 1,0 кГц;
- диапазон напряжения питания, В — $\pm(2,5-4)$;
- конструктивное исполнение для испытаний — в корпусе 2120.24-11 либо бескорпусное исполнение.

По сравнению с широко известным дифференциальным усилителем постоянного тока на МДП-транзисторах с модуляцией-демодуляцией сигнала 140 УД13 [3] на объемном кремнии достигнуты преимущества по коэффициенту усиления (более 10 раз), полосе сигнала, напряжению смещения нуля (менее 2 раз), расширению функционального исполнения (встроенный генератор, инструментальный ОУ, активный фильтр, нормирующий усилитель), радиационной стойкости за счет КНС-исполнения.

Топология кристалла БИС МДМ-преобразователя показана на рис. 2, размер кристалла $4,5 \times 3,5$ мм.

Лабораторными испытаниями произведена предварительная оценка радиационной стойкости БИС к ионизирующему излучению на моделирующем испытательном комплексе при воздействии излучения от ^{60}Co путем испытания основного базового элемента — операционного усилителя, стойкость которого составила не менее 500 Крад/Si.

Список литературы

1. *Cihsieh K. et al.* A Low-noise chopper-stabilized differential switched-capacitor filtering technique, IEEE J. Solid-State Circuits, Vol.sc — 16, December, 1981, p. 708–715
2. *Топильский В.Б.* Микроэлектронные измерительные преобразователи, 2-е изд. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013.
3. Технические условия БКО. 347.004 ТУ12.

УДК 621.3.049.77

Методы и средства обнаружения скрытых дефектов КМОП-микросхем

И. Ю. Булаев

АО «Российские космические системы»

e-mail: bulaev.ivan@gmail.com

Аннотация. Во избежание монтажа в высоконадежную аппаратуру потенциально ненадежных изделий электронной компонентной базы (ЭКБ), содержащих внутренние скрытые дефекты, необходимо включать в программу испытаний изделий ЭКБ процедуры диагностического неразрушающего контроля (ДНК). В статье рассматриваются методические и аппаратные средства ДНК КМОП интегральных схем.

Ключевые слова: электронная компонентная база, КМОП интегральные схемы, диагностический неразрушающий контроль, критическое напряжение питания, динамические параметры

Ways and Means of CMOS Integrated Circuits Flaw Location

I. Yu. Bulaev

Joint Stock Company "Russian Space Systems"

e-mail: bulaev.ivan@gmail.com

Abstract. In order to avoid installation in highly reliable equipment weak electronic components with internal defects it is necessary to apply the procedures of diagnostic nondestructive testing (NDT). The ways and means of diagnostic nondestructive testing of CMOS integrated circuits are considered in the report.

Key words: electronic component base, CMOS integrated circuits, diagnostic nondestructive testing, very low voltage testing, dynamic parameters

Для комплектования высоконадежной аппаратуры необходимо допускать только те изделия электронной компонентной базы (ЭКБ), которым до этапа монтажа проведен полный функциональный и параметрический контроль.

Особенность проведения испытаний изделий ЭКБ в испытательных центрах заключается в том, что весь информационно-технический материал, содержащий информацию об алгоритмах функционирования и электрических параметрах изделия, сводится к техническим условиям или спецификациям. По причине отсутствия информации о внутренних блоках сложнофункциональных изделий и способах их взаимодействия между собой, несовершенства испытательного оборудования и сжатых сроков на разработку испытательных проектов иногда представляется невозможным провести полноценный функциональный контроль изделия, задействовав все возможные режимы работы каждого внутреннего блока. Ситуацию осложняет то, что степень интеграции и функциональность современных микросхем постоянно растет.

Следующая проблема — наличие скрытых дефектов внутри изделия ЭКБ. На момент проведения испытаний дефект может быть незначительным и не оказывать существенного влияния на характеристики испытываемого объекта. Таким образом, он не будет выявлен при обычном контроле электрических параметров и функционирования. Такой дефект может быть обнаружен при проведении ресурсных испытаний, если такие предусмотрены программой испытаний, однако при формировании выборки «слепым» методом вероятность попадания дефектной микросхемы на ресурсные испытания невелика.

На основании вышесказанного можно сделать заключение, что основными при проведении испытаний ЭКБ являются следующие проблемы:

- незначительная величина внутренних дефектов изделия ЭКБ на момент проведения испытаний не позволяет их выявить при обычном функциональном и параметрическом контроле;
- отсутствие подробной информации об испытываемом объекте не позволяет провести его полноценный функциональный контроль;
- предположение об идентичности изделий в пределах одной партии не всегда верно, на ре-

сурсные испытания могут попасть «не худшие» образцы.

Для решения вышеприведенных проблем в рамках проведения тестирования изделий ЭКБ необходимо проводить так называемый диагностический неразрушающий контроль (ДНК) для всех образцов из применяемой партии изделий. Условия проведения и критерии отбраковки ДНК, как правило, не описаны в документации на изделие, поэтому испытательному центру следует самостоятельно проводить исследовательские работы, результатом которых должны быть методики, позволяющие по некоторому набору измеренных информативных параметров судить о наличии или отсутствии скрытых дефектов внутри изделия.

К сожалению, многие методы ДНК, разработанные в прошлом столетии, показывают свою низкую эффективность при испытаниях современных микросхем по причине высокой степени интеграции последних. Одним из наиболее достоверных методов ДНК современных КМОП-микросхем является метод контроля изделия при пониженном напряжении питания, известный в литературе как метод *критического напряжения питания* (КНП).

Данный метод направлен на поиск паразитных сопротивлений между выводами внутренних выводов микросхемы. Дело в том, что величины резистивных дефектов обычно имеют порядок сотен кОм и более, в то время как выходные сопротивления внутренних транзисторов микросхемы обычно не превышают единиц кОм. Такие дефекты не оказывают заметного влияния на работу микросхемы, однако в дальнейшем могут привести к выходу микросхемы из строя. При понижении напряжения питания выходные сопротивления транзисторов увеличиваются, а сопротивления дефектов остаются неизменными. Таким образом, сопротивления транзисторов становятся сравнимы с сопротивлениями дефектов, что в значительной степени скажется на быстродействии микросхемы.

Существуют два основных подхода к методу КНП. Первый заключается в определении минимального напряжения питания, при котором изделие еще функционирует без сбоев. Микросхемы, имеющие более высокие значения минимального напряжения питания, по сравнению с другими образцами из той же партии, являются менее надежными [1].

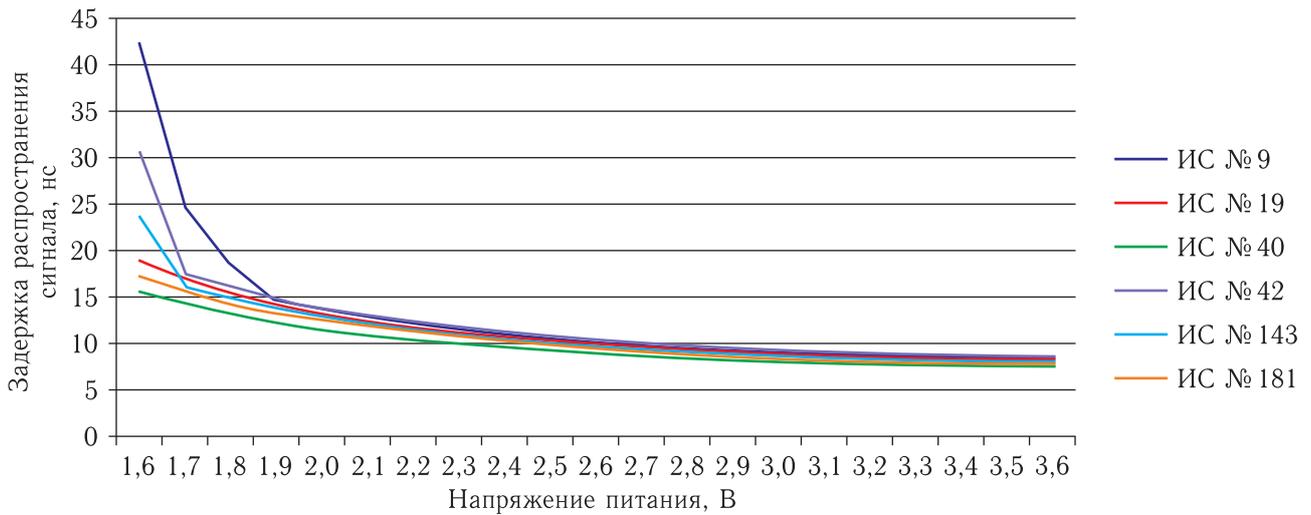


Рис. 1. Зависимость задержки распространения сигнала от напряжения питания микросхемы

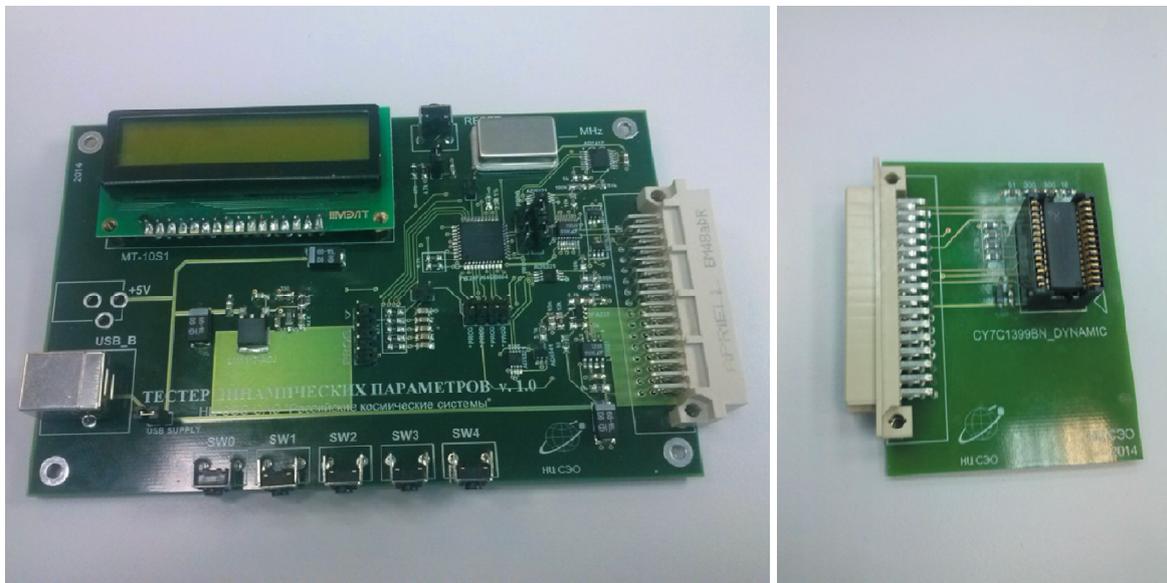


Рис. 2. Тестер динамических параметров и испытательная оснастка

Второй подход заключается в измерении динамических параметров микросхемы при пониженном напряжении питания. Микросхемы с худшими динамическими параметрами наименее надежны. Понижение напряжения питания дает возможность сравнить микросхемы одной партии по их динамическим параметрам. На рис. 1 приведена зависимость задержки распространения сигнала от напряжения питания микросхемы. Видно, что при напряжении питания близком к номинальному (3,3 В) из-за погрешности измерительного

оборудования динамические параметры нескольких микросхем кажутся одинаковыми. Однако при снижении напряжения питания ниже 2 В различия в динамических параметрах становятся хорошо заметны. Для автоматизированного измерения динамических параметров был разработан тестер, позволяющий измерять наносекундные временные интервалы между логическими сигналами [2]. Внешний вид опытного образца тестера и пример испытательной оснастки приведены на рис. 2.

Достоверность метода КНП подтверждается проведением ресурсных испытаний исследуемых партий микросхем.

Заключение

В статье приводится необходимость проведения ДНК, показана малая эффективность популярных методов ДНК, подробно рассматривается метод критического напряжения питания. Общей проблемой всех методов ДНК является процедура выработки критериев отбраковки по результатам проведенных испытаний. Испытательные центры сталкиваются с необходимостью поиска компромисса при принятии решения в пользу ужесточения критериев и повышения надежности аппаратуры или в пользу смягчения критериев

и минимизации затрат на ЭКБ, т.к. провести рекламационные мероприятия по результатам ДНК невозможно и заказчик испытаний несет финансовые потери.

Список литературы

1. Булаев И. Ю. Диагностический неразрушающий контроль ЭКБ. Вариации метода критического напряжения питания // Материалы XII научно-технической конференции «Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА». М.: ОАО «НПП «Пульсар», 2013. С. 256–259.
2. Булаев И. Ю. К вопросу измерения событий малой длительности // Материалы XIII научно-технической конференции «Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА». М.: ОАО «НПП «Пульсар», 2014. С. 79–82.