ISSN 2409-0239

РКС

РОССИЙСКИЕ КОСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Научно-технический журнал

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ



Том 7. Выпуск 1. 2020

Научно-технический журнал

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Том 7. Выпуск 1. 2020

Учредитель:
АО «Российская корпорация ракетно-космического приборостроения и информационных систем»

Редакционный совет

Председатель:
Тюлин А.Е., д.э.н., к.т.н., член-корр. Российской академии ракетных и артиллерийских наук, АО «Российские космические системы», Москва, Россия
Заместители председателя:
Ерохин Г.А., к.т.н., АО «Российские космические системы», Москва, Россия
Романов А.А., д.т.н., проф., академик Международной академии астронавтики, Москва, Россия
Нестеров Е.А., к.э.н., АО «Российские космические системы», Москва, Россия

Члены редакционного совета:

Артемьев В.Ю., АО «Научно-производственное объединение измерительной техники», Москва, Россия
Ахмедов Д.Ш., д.т.н., член-корр. Национальной инженерной академии Республики Казахстан, ДТОО «Институт космической техники и технологий», Алма-Ата, Казахстан
Батурин Ю.М., д.ю.н., проф., член-корр. РАН, Институт истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова РАН, Москва, Россия
Блинов А.В., к.т.н., член-корр. Российской инженерной академии, АО «Научно-исследовательский институт физических измерений», Пенза, Россия
Габитов И.Р., к.ф.-м.н., проф., Университет Аризоны, США
Жантаев Ж.Ш., д.ф.-м.н., академик КазАЕН, АО «Национальный центр космических исследований и технологий», Алма-Ата, Казахстан
Жмур В.В., д.ф.-м.н., проф., Московский физико-технический институт, Москва, Россия
Кулешов А.П., д.т.н., проф., академик РАН, Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия
Носенко Ю.И., д.т.н., проф., АО «Научно-исследовательский институт точных приборов», Москва, Россия
Перминов А.Н., д.т.н., проф., академик Международной академии астронавтики, Российской инженерной академии, Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского, АО «Российские космические системы», Москва, Россия
Победоносцев В.А., д.т.н., доцент, филиал АО «Объединенная ракетно-космическая корпорация» – «Научно-исследовательский институт космического приборостроения», Москва, Россия
Ступак Г.Г., д.т.н., проф., академик Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского, АО «Российские космические системы», Москва, Россия
Чеботарев А.С., д.т.н., проф., АО «Особое конструкторское бюро Московского энергетического института», Москва, Россия
Чернявский Г.М., д.т.н., проф., член-корр. РАН, АО «Российские космические системы», Москва, Россия
Четыркин А.Н., филиал АО «Объединенная ракетно-космическая корпорация»– «Научно-исследовательский институт космического приборостроения», Москва, Россия

Редакционная коллегия

Главный редактор:
Романов А.А., д.т.н., проф., академик Международной академии астронавтики, Москва, Россия
Заместитель главного редактора:
Федотов С.А., к.т.н., с.н.с., АО «Российские космические системы», Москва, Россия

Члены редакционной коллегии:

Алексеев О.А., д.т.н., проф., АО «Российские космические системы», Москва, Россия
Алыбин В.Г., д.т.н., АО «Российские космические системы», Москва, Россия
Белоконов И.В., д.т.н., проф., Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия
Бетанов В.В., д.т.н., проф., член-корр. Российской академии ракетных и артиллерийских наук, АО «Российские космические системы», Москва, Россия
Бугаев А.С., д.ф.-м.н., проф., академик РАН, Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия
Васильков А.П., к.ф.-м.н., Science Systems and Applications Inc., Мэриленд, США
Ватутин В.М., д.т.н., проф., АО «Российские космические системы», Москва, Россия
Данилин Н.С., д.т.н., проф., академик Международной и Российской инженерных академий, Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского, АО «Российские космические системы», Москва, Россия
Дворкин В.В., д.т.н., проф., АО «Российские космические системы», Москва, Россия
Жодзишский А.И., д.т.н., академик Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского, АО «Российские космические системы», Москва, Россия
Жуков А.А., д.т.н., АО «Российские космические системы», Москва, Россия
Колачевский Н.Н., д.ф.-м.н., проф., член-корр. РАН, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия
Кукушкин С.С., д.т.н., проф., академик Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского, член-корр. Российской инженерной академии, АО «Российские космические системы», Москва, Россия
Михайлов В.Ю., д.т.н., проф., Московский авиационный институт, Москва, Россия
Новиков Д.А., д.т.н., проф., член-корр. РАН, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия
Петрукович А.А., д.ф.-м.н., проф., член-корр. РАН, Институт космических исследований РАН, Москва, Россия
Поваляев А.А., д.т.н., проф., АО «Российские космические системы», Москва, Россия
Пулинец С.А., д.ф-м.н., АО «Российские космические системы», Москва, Россия
Райнер Сандау, д.т.н., адъюнкт-проф., Международная академия астронавтики, Берлин, Германия
Римская О.Н., к.э.н., доцент, АО «Российские космические системы», Москва, Россия
Стрельников С.В., д.т.н., АО «Научно-производственное объединение «Орион», Краснознаменск, Россия
Сычев А.П., к.т.н., АО «Научно-исследовательский институт точных приборов», Москва, Россия
Тисленко В.И., д.т.н., проф., Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия
Токарев А.С. (отв. секретарь), АО «Российские космические системы», Москва, Россия
Тузиков А.В., д.ф.-м.н., проф., член-корр. Национальной академии наук Беларуси, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

Журнал выходит 4 раза в год.
Журнал включен в РИНЦ.
Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК.
Мнение авторов статей может не совпадать с мнением редакции.
ISSN 2409-0239
DOI 10.30894/issn2409-0239.2020.7.1
Подписной индекс 94086
в Объединенном каталоге «Пресса России».

АО «Российские космические системы»
111250, Россия, Москва, ул. Авиамоторная, д. 53
Тел. +7 (495) 673-96-29
www.spacedevice.ru
e-mail: journal@spacecorp.ru

© АО «Российские космические системы»
© ФИЗМАТЛИТ

Москва
ФИЗМАТЛИТ ®
2020

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ
2020, т. 7, вып. 1

Содержание

К 90-летию со дня рождения Е. П. Молотова 3

Космические навигационные системы и приборы. Радиолокация и радионавигация

Фазоразностная радиотомография ионосферы на базе кластера из двух космических аппаратов
Барабошкин О. И., Трусов С. В., Бобровский С. А. 4

Методы применения доверительного интервала локации объекта в задачах обобщения данных от нескольких источников информации
Самсон С. Ю., Новиков А. В., Сорокин А. В. 13

Радиотехника и космическая связь

Микрополосковый делитель мощности с тремя входами и тремя выходами для бортовой аппаратуры космических аппаратов
Алыбин В. Г., Зарапин С. А., Яхутин С. А. 23

Построение многолучевых антенн абонентской радиолинии в *S*- и *Ka*-диапазонах частот
Аджибеков А. А. 30

Малошумящий усилитель приемо-передающего модуля активной фазированной решетки *Ka*-диапазона частот
Буянкин А. В., Поймалин В. Э., Нелин А. А., Рагулина Л. Е., Рыжаков М. В. 36

Приемный канал СВЧ-гиперспектрометра с двумя приемниками для аэрокосмического зондирования Земли
Убайчин А. В. 42

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

Особенности формирования информационно-вычислительной системы для решения измерительных задач в условиях различной степени структуризации
Ларин В. К. 51

Анализ методов обработки информации и координации развития космических систем ДЗЗ гидрометеорологического назначения в рамках международных программ CGMS и GSICS
Гектин Ю. М., Зорин С. М., Трофимов Д. О., Барсуков И. А., Жуковская К. И. 59

Особенности обработки данных сенсора «Геотон-Л1» космического аппарата «Ресурс-П» при формировании бесшовных сплошных покрытий регионов РФ
Марков А. Н., Васильев А. И., Крылов А. В., Евлашкин М. А., Пестряков А. А., Михеев А. А., Алексеевский А. С. 72

Методы аутентификации и шифрования информации в сетях связи на основе динамично изменяющихся матриц ключей и матриц алгоритмов
Пантелеймонов И. Н., Монастыренко А. А., Белозерцев А. В., Боцва В. В., Наумкин А. В. 84

Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

Исследование процессов токопереноса в тонкопленочных магниторезистивных структурах $Ni_{0,76}Fe_{0,18}Co_{0,06}$
Грабов А. Б. 95

ROCKET-SPACE DEVICE ENGINEERING AND INFORMATION SYSTEMS
2020, Vol. 7, Iss. 1

Contents

To the 90th Anniversary of the Birth of E. P. Molotov 3

Space Navigation Systems and Devices. Radiolocation and Radio Navigation

Phase Difference Radio Tomography of the Ionosphere Based on Two Spacecraft Cluster
Baraboshkin O. I., Trusov S. V., Bobrovskiy S. A. 4

Methods of Applying the Confidence Interval of the Object Location in the Tasks of Data Integration from Several Information Sources
Samson S. Yu., Novikov A. V., Sorokin A. V. 13

Radio Engineering and Space Communication

Microstrip Power Divider with Three Inputs and Three Outputs for Spacecraft Onboard Equipment
Alybin V. G., Zarapin S. A., Yakhutin S. A. 23

Building of Multibeam Antennas of a Subscriber Radio Link in *S*- and *Ka*-Frequency Bands
Adzhibekov A. A. 30

Low-Noise Amplifier for the Transceiver Module of a *Ka*-band Active Phased Array
Buyankin A. V., Poimalin V. E., Nelin A. A., Ragulina L. E., Ryzhakov M. V. 36

Receiving Channel of UHF-Hyperspectrometer with Two Receivers for Earth Remote Sensing
Ubaychin A. V. 42

Systems Analysis, Spacecraft Control, Data Processing, and Telemetry Systems

Special Features of Building an Information Computer System for Solving Measuring Problems in Conditions of Varying Degrees of Structuring
Larin V. K. 51

Data Processing Methods and the Coordination of the Development of Hydrometeorological ERS Space Systems as Part of the CGMS and GSICS International Programs
Gektin Yu. M., Zorin S. M., Trofimov D. O., Barsukov I. A., Zhukovskaya K. I. 59

Generation of Seamless Continuous Coverages of the Russian Regions Using Resurs-P Very-High Resolution Data
Markov A. N., Vasilyev A. I., Krylov A. V., Evlashkin M. A., Pestryakov A. A., Mikheev A. A., Alexeevskiy A. S. 72

Methods of Authentication and Encryption of Information in Communication Networks Based on Dynamically Changing Key Matrices and Matrix Algorithms
Panteleymonov I. N., Monastyrenko A. A., Belozertsev A. V., Botsva V. V., Naumkin A. V. 84

Solid-State Electronics, Radio Electronic Components, Micro- and Nanoelectronics, Quantum Effect Devices

Study of Current Transfer Processes in Thin Film Magnetoresistive Structures $Ni_{0,76}Fe_{0,18}Co_{0,06}$
Grabov A. B. 95

К 90-летию со дня рождения Е. П. Молотова

В конце декабря 2019 года ветерану нашего предприятия Евгению Павловичу Молотову исполнилось 90 лет.



Евгений Павлович родился в 1929 году в г. Харькове. После окончания в 1952 году Киевского политехнического института по специальности «Радиотехника» Евгений Молотов пришел на работу в НИИ-885 (сегодня — АО «Российские космические системы»). В настоящее время занимает должность главного научного сотрудника.

Работал в должности инженера, старшего, ведущего инженера, руководителя сектора, начальника лаборатории, начальника отдела, ведущего научного сотрудника.

Широкому кругу специалистов, занимающихся созданием космической техники, имя Е. П. Молотова хорошо известно за его вклад в разработку, создание и испытания наземной аппаратуры ракетно-космической техники. Участник создания и испытаний систем радиоуправления ракетами Р5, Р7, Р9, Р36, Р100. Руководил созданием наземной аппаратуры первого космического спутникового геодезического комплекса «Сфера», комплекса контроля навигационного поля системы ГЛОНАСС, наземной аппаратуры системы «Коспас», радиотехнических комплексов управления пилотируемыми аппаратами «Квант-П», «Квант-СП», «Квант-Р», «Уран-Ц», комплексов управления космическими аппаратами для исследования дальнего космоса «Сатурн-МСД», «Квант-Д».

Е. П. Молотов был техническим руководителем наземного комплекса управления при выполнении космических программ по исследованию Луны и дальнего космоса «Марс-3–7», «Марс-7–16», «Венера-7–16», «Вега», «Фобос», «Прогноз», «Астрон», «Гранат», «Интербол». И это далеко не весь перечень.

За большой вклад в развитие отечественной космической техники Е. П. Молотову присвоено звание «Лауреат Государственной премии СССР», он награжден орденами Октябрьской Революции, «Знак Почета», юбилейной медалью «За доблестный труд. В ознаменование 100-летия со дня рождения В. И. Ленина», нагрудным знаком «Почетный радист» и другими наградами.

Е. П. Молотов — доктор технических наук, профессор, академик Российской академии космонавтики им. К. Э. Циолковского, автор более 400 научных трудов, статей, монографий и изобретений.

В 2004–2008 преподавал на кафедре «Радиосистемы управления и передачи информации» Московского авиационного института.

Является членом научно-технического и диссертационного советов АО «Российские космические системы».

Поздравляем Евгения Павловича с 90-летием и желаем ему крепкого здоровья, творческих успехов, благополучия, удачи и реализации всех планов!

Редакционный совет и редакционная коллегия журнала
«Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы»

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ
2020, том 7, выпуск 1, с. 4–12

КОСМИЧЕСКИЕ НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ. РАДИОЛОКАЦИЯ И РАДИОНАВИГАЦИЯ

УДК 550.388.1 DOI 10.30894/issn2409-0239.2020.7.1.4.12

Фазоразностная радиотомография ионосферы на базе кластера из двух космических аппаратов

О. И. Барабошкин, *baraboshkin_oi@spacecorp.ru*
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация
С. В. Трусов, *к.т.н., trusov_sv@spacecorp.ru*
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация
С. А. Бобровский, *bobrovsky_sa@spacecorp.ru*
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Рассмотрен способ получения двумерных распределений электронной концентрации в ионосфере с помощью кластера из двух космических аппаратов фазоразностным методом по двухчастотным измерениям. Приведено описание алгоритма, позволяющего построить проекционный оператор для рассматриваемой геометрии расположения передатчика и приемника и решить систему линейных уравнений с учетом неравномерного заполнения области реконструкции трассами радиосигналов. Проведено моделирование задачи радиотомографии при наличии неоднородностей в слое максимума электронной концентрации. Показано, что предлагаемый способ позволяет восстанавливать двумерные распределения электронной концентрации, в том числе крупномасштабные структуры и локальные неоднородности.

Ключевые слова: радиотомография, ионосфера, ПЭС, кластер, космический аппарат

Phase Difference Radio Tomography of the Ionosphere Based on Two Spacecraft Cluster

O. I. Baraboshkin, *baraboshkin_oi@spacecorp.ru*
Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation
S. V. Trusov, *Cand. Sci. (Engineering), trusov_sv@spacecorp.ru*
Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation
S. A. Bobrovskiy, *bobrovsky_sa@spacecorp.ru*
Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper studies the method to obtain two-dimensional electron density distributions in the ionosphere by means of a two spacecraft cluster by a phase difference method by double-frequency measurements. An algorithm is described, which allows constructing a projection operator for the considered geometry of location of the transmitter and receiver and solving a linear equation system taking into account non-uniform filling of the reconstruction area with radio signal paths. The task of radiotomography was simulated in the presence of inhomogeneities in the layer of maximum electron concentration. It is shown that the proposed method allows restoring two-dimensional distributions of electron concentration including large-scale structures and local inhomogeneities.

Keywords: radio tomography, ionosphere, total electron content, cluster, spacecraft

Введение

Метод радиотомографии (РТ) ионосферы позволяет получать двумерные распределения электронной концентрации в ионосфере. Широкий пространственный охват, высокая точность, небольшое время накопления измерений позволяют обнаруживать и исследовать данным методом быстропротекающие процессы в ионосфере, которые могут повлиять на работу космических систем связи, навигации и др. Наибольшее распространение получил метод РТ ионосферы сигналами «спутник–Земля» [1, 2], при котором использовались наземные приемные станции и сигналы навигационных спутников первого поколения. Однако ввиду окончания эксплуатации указанных космических аппаратов (КА) для применения данного подхода в будущем требуется запуск новых спутников. Поэтому в настоящее время перспективным представляется переход к РТ ионосферы кластером КА, которая, в отличие от наземной, позволяет осуществлять глобальный мониторинг ионосферы.

Спутниковая РТ ионосферы кластером КА была впервые предложена и рассмотрена в работах [3, 4], в которых определена оптимальная конфигурация кластера, состоящего из четырех КА, а также предложено определять полное электронное содержание на основе фазовых измерений, получаемых четырехчастотным методом [5]; представлен предполагаемый облик аппаратуры для КА нанокласса. При этом не рассмотрены вопросы формирования проекционного оператора в случае радиотрасс «спутник–спутник», выбора метода решения систем линейных уравнений (СЛУ), не проанализирована возможность реализации схемы двухчастотных измерений, применявшегося ранее для РТ ионосферы сигналами «спутник–Земля» [2].

В работе рассматривается способ РТ ионосферы кластером КА, предполагающий использование двух КА в комбинации с двухчастотным фазоразностным методом. Способ обладает меньшей сложностью реализации в связи с тем, что производство и запуск двух КА дешевле, чем четырех, а энергопотребление двухчастотных передатчика и приемника существенно ниже четырехчастотных, что позволяет разместить их на платформах, аналогичных CubeSat 1U или ТНС-1 [6].

Схема эксперимента и построение проекционного оператора

Введем ряд параметров, характеризующих геометрию системы регистрации в полярной системе координат (СК) (рис. 1): (α_1, h_1) — координаты КА передатчика, (α_2, h_2) — координаты КА-приемника, O — центр Земли, OO' — перпендикуляр, опущенный из точки O на траекторию луча. Траекторию луча в полярной СК можно представить в виде

$$h(\alpha) = \frac{P}{\cos(\alpha - \beta)}, \tag{1}$$

где P — длина перпендикуляра OO', β — угол перпендикуляра к траектории луча, отсчитываемый от начала координат. Расстояние l от точки O' до точки на луче с координатами (α, h)

$$l = P\,\mathrm{tg}(\alpha - \beta). \tag{2}$$

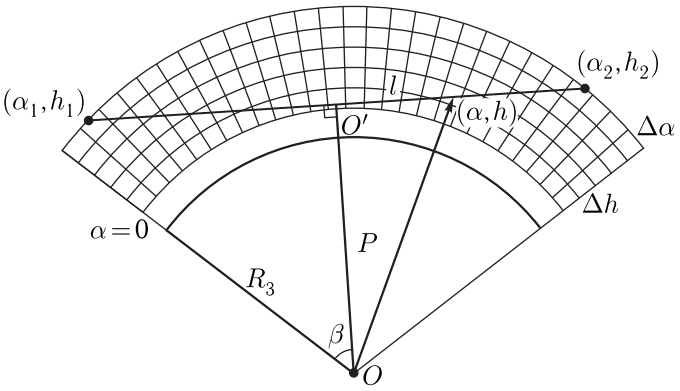


Рис. 1. Схема эксперимента по лучевой РТ кластером из двух КА

Для элемента длины луча справедлива формула

$$\Delta l = \int \frac{P}{\cos^2(\alpha - \beta)}\, d\alpha, \tag{3}$$

тогда линейный интеграл набега фазы сигнала φ, обусловленного влиянием ионосферы, равен

$$\varphi = \lambda r_e \int\limits_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{P\,F(\alpha, h)}{\cos^2(\alpha - \beta)}\, d\alpha = \lambda r_e \int\limits_{\alpha_1}^{\alpha_2} \gamma(\alpha) F(\alpha, h)\, d\alpha, \tag{4}$$

где $F(\alpha, h)$ — двумерная функция распределения плотности электронной концентрации в плоскости

радиопросвечивания, λ — длина волны сигнала, r_e — классический радиус электрона.

Заменим непрерывную функцию $F(\alpha, h)$ на ее кусочно-планарную аппроксимацию на сетке $F_{m,n}$ с дискретом по углу $\Delta\alpha$ и высоте Δh (рис. 2).

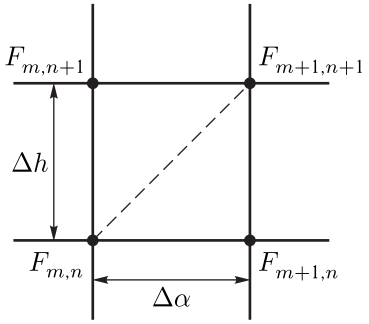


Рис. 2. Кусочно-планарная аппроксимация двумерной функции на сетке реконструкции

В верхнем треугольном элементе

$$F(\alpha,h) = F_{m,n+1} + \frac{F_{m,n+1}-F_{m,n}}{\Delta h}(h-h_{n+1}) + \\ + \frac{F_{m+1,n+1}-F_{m,n+1}}{\Delta\alpha}(\alpha-\alpha_m). \quad (5)$$

В нижнем треугольном элементе

$$F(\alpha,h) = F_{m+1,n} + \frac{F_{m+1,n+1}-F_{m+1,n}}{\Delta h}(h-h_n) + \\ + \frac{F_{m+1,n}-F_{m,n}}{\Delta\alpha}(\alpha-\alpha_{m+1}). \quad (6)$$

В верхнем

$$\int \gamma(\alpha)F\,d\alpha = J_0F_{m,n+1} + J_h(F_{m,n+1}-F_{m,n}) + \\ + J_\alpha(F_{m+1,n+1}-F_{m,n+1}). \quad (7)$$

В нижнем

$$\int \gamma(\alpha)F\,d\alpha = J'_0F_{m+1,n} + J'_h(F_{m+1,n+1}-F_{m+1,n}) + \\ + J'_\alpha(F_{m+1,n}-F_{m,n}). \quad (8)$$

Здесь J_0, J_h, J_α, J'_0, J'_h, J'_α — это интегралы:

$$J_0 = J'_0 = \int \gamma(\alpha)\,d\alpha, \quad (9)$$

$$J_h = \frac{1}{\Delta h}\int \gamma(\alpha)[h(\alpha)-h_{n+1}]\,d\alpha, \quad (10)$$

$$J'_h = \frac{1}{\Delta h}\int \gamma(\alpha)[h(\alpha)-h_n]\,d\alpha, \quad (11)$$

$$J_\alpha = \frac{1}{\Delta\alpha}\int \gamma(\alpha)[\alpha-\alpha_m]\,d\alpha, \quad (12)$$

$$J'_\alpha = \frac{1}{\Delta\alpha}\int \gamma(\alpha)[\alpha-\alpha_{m+1}]\,d\alpha. \quad (13)$$

После интегрирования по всем ячейкам сетки реконструкции, в которые попадает траектория j-го луча, в элемент матрицы $L_{m,n}$ заносятся соответствующие $F_{m,n}$ коэффициенты и т. д.:

$$L_{m,n} = -J_h - J'_\alpha, \quad (14)$$

$$L_{m,n+1} = J_0 + J_h - J_\alpha, \quad (15)$$

$$L_{m+1,n} = J'_0 - J'_h + J'_\alpha, \quad (16)$$

$$L_{m+1,n+1} = J'_h + J_\alpha. \quad (17)$$

Тогда интеграл (4) можно представить в виде суммы

$$\varphi = \lambda r_e \sum_M L_M F_M, \quad (18)$$

где произведена перенумерация $(m,n) \to M$. Таким образом, задача нахождения неизвестных значений электронной концентрации в узлах сетки реконструкции F_M сведена к решению системы линейных уравнений вида

$$\frac{\varphi_j}{\lambda r_e} = L_{jM}F_M. \quad (19)$$

В фазоразностной постановке задачи томографии измеряется не фаза сигнала φ, а ее производная $d\varphi/dt$, поэтому систему (19) необходимо продифференцировать по времени. Это возможно корректно сделать в силу того, что применялась кусочно-планарная аппроксимация функции F, следовательно, производные φ_j не имеют разрывов:

$$\frac{1}{\lambda r_e}\frac{d\varphi_j}{dt} \approx \frac{L_{jM}-L_{j'M}}{\Delta t}F_M = D_{jM}F_M, \quad (20)$$

где $L_{j'M}$ — матрица L_{jM}, построенная для траекторий лучей в момент времени $t_0 - \Delta t$, D_{jM} — проекционный оператор.

Интегрирование (9)–(13) можно сильно упростить путем введения кусочно-линейной аппроксимации траектории луча. Пусть внутри i-й ячейки сетки реконструкции траектория луча задается формулами (рис. 3)

$$h = k_i\alpha + b_i, \quad \alpha_{i1} \leqslant \alpha \leqslant \alpha_{i2}, \quad (21)$$

$$k_i = (h_{i2} - h_{i1})/(\alpha_{i2} - \alpha_{i1}), \quad (22)$$

$$b_i = h_{i2} - k_i\alpha_{i2}, \quad (23)$$

где (α_{i1}, h_{i1}) и (α_{i2}, h_{i2}) — точки пересечения траектории луча с i-й ячейкой сетки реконструкции, найденные по формуле (1) для граничных значений α и h в ячейке.

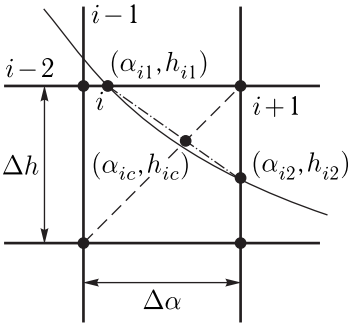


Рис. 3. Аппроксимация луча внутри ячейки сетки реконструкции

Диагональ ячейки сетки реконструкции задается формулой

$$h = \frac{\Delta h}{\Delta\alpha}(\alpha - \alpha_i) + h_i, \quad (24)$$

где (α_i, h_i) — координаты нижнего левого угла i-й ячейки. Тогда координаты пересечения диагонали ячейки и траектории луча

$$\alpha_{ic} = \frac{h_i - b_i - \frac{\Delta h}{\Delta\alpha}\alpha_i}{k_i - \frac{\Delta h}{\Delta\alpha}}. \quad (25)$$

Если $\alpha_{i1} \leqslant \alpha_{ic} \leqslant \alpha_{i2}$, то траектория луча пересекает и нижний, и верхний треугольные элементы i-й ячейки. Координаты α_{i1}, α_{i2} могут быть граничными значениями как для верхнего, так и для нижнего треугольного элемента, поэтому для $\alpha_{i1} < \alpha < \alpha_{ic}$ и $\alpha_{ic} < \alpha < \alpha_{i2}$ необходимо определить, в какой треугольный элемент попадает траектория луча. Пусть в первом случае траектория попадает в верхний элемент, а во втором — в нижний, тогда интегралы (9)–(13) вычисляются по формулам:

$$J_0 = P\,\mathrm{tg}(\alpha - \beta)\big|_{\alpha_{i1}}^{\alpha_{ic}} = P\,\mathrm{tg}(\alpha_{ic} - \beta) - P\,\mathrm{tg}(\alpha_{i1} - \beta), \quad (26)$$

$$J_0' = P\,\mathrm{tg}(\alpha - \beta)\big|_{\alpha_{ic}}^{\alpha_{i2}}, \quad (27)$$

$$J_h = \frac{P}{\Delta h}\big(k(\ln|\cos(\alpha - \beta)| + (\alpha - \beta)\,\mathrm{tg}(\alpha - \beta)) + (k\beta + b_i - h_i - \Delta h)\,\mathrm{tg}(\alpha - \beta)\big)\big|_{\alpha_{i1}}^{\alpha_{ic}}, \quad (28)$$

$$J_h' = \frac{P}{\Delta h}\big(k(\ln|\cos(\alpha - \beta)| + (\alpha - \beta)\,\mathrm{tg}(\alpha - \beta)) + (k\beta + b_i - h_i)\,\mathrm{tg}(\alpha - \beta)\big)\big|_{\alpha_{ic}}^{\alpha_{i2}}, \quad (29)$$

$$J_\alpha = \frac{P}{\Delta\alpha}\big(\ln|\cos(\alpha - \beta)| + (\alpha - \beta)\,\mathrm{tg}(\alpha - \beta) + (\beta - \alpha_i)\,\mathrm{tg}(\alpha - \beta)\big)\big|_{\alpha_{i1}}^{\alpha_{ic}}, \quad (30)$$

$$J_\alpha' = \frac{P}{\Delta\alpha}\big(\ln|\cos(\alpha - \beta)| + (\alpha - \beta)\,\mathrm{tg}(\alpha - \beta) + (\beta - \alpha_i - \alpha)\,\mathrm{tg}(\alpha - \beta)\big)\big|_{\alpha_{i1}}^{\alpha_{ic}}. \quad (31)$$

Если $\alpha_{ic} < \alpha_{i1}$ или $\alpha_{ic} > \alpha_{i2}$, то траектория луча пересекает один треугольный элемент i-й ячейки. Интегралы (26)–(31) рассчитываются на отрезке $\alpha_{i1} < \alpha < \alpha_{i2}$ только для треугольного элемента, в который попадает траектория луча.

Так как расчет интегралов выполняется аналитически, а не численно, процедура построения проекционного оператора эффективна, скорость расчета не влияет на оперативность решения задачи томографии. К тому же при радиопросвечивании спутниками на круговых орбитах относительная конфигурация источников и приемников сигнала неизменна, и проекционный оператор может быть построен единожды и не перестраиваться либо изредка корректироваться.

Решение системы линейных уравнений

В работе [2] приведены результаты анализа различных алгоритмов решения систем линейных уравнений (СЛУ) применительно к задачам РТ — ART, SIRT, MART, DART и др. Эксперименты по наземной РТ ионосферы показали, что однозначно выбрать алгоритм решения СЛУ не предоставляется возможным, так как в разных условиях (метод реконструкции, величина ошибок в исходных данных, наличие определенных структур в ионосфере и др.) лучше работают разные алгоритмы. Преимущества и недостатки алгоритмов в целом распространяются и на случай спутниковой РТ ионосферы.

В настоящей работе для решения СЛУ (20) был выбран алгоритм DART. Однако ввиду неравномерного заполнения области реконструкции трассами

радиосигналов алгоритм был дополнен усредняющим коэффициентом $1/P_j$:

$$x_j^{k+1} = x_j^k \cdot \left(1 + \frac{1}{P_j}\sum_i \lambda_k \frac{m_i - \langle \boldsymbol{A^i}, \boldsymbol{x^k}\rangle}{\langle \boldsymbol{A^i}, \boldsymbol{A^i}\rangle}\right), \quad (32)$$

где $\mathbf{x}$ — вектор-столбец неизвестных x_j, k — номер итерации, P_j — число ненулевых элементов в j-м столбце матрицы A_{ij}, $\boldsymbol{A^i}$ — i-я строка матрицы A_{ij}, m_i (вектор-строка $\boldsymbol{m}$) — данные измерений.

Моделирование решения фазоразностной задачи РТ показало, что в данной геометрии расположений КА при восстановлении небольших локализованных неоднородностей происходит искажение реконструкции, проявляющееся в виде увеличения электронной концентрации в областях пространства, через которые проходят лучи, пересекающие неоднородность. Чтобы минимизировать данный эффект, на каждой итерации после нахождения поправки $\rho_j^k = x_j^{k+1} - x_j^k$ находятся ее максимальное и минимальное значения, и если поправка в j-ю ячейку удовлетворяет неравенству

$$\min_j(\rho_j^k) + \frac{\max_j(\rho_j^k) - \min_j(\rho_j^k)}{4} \leqslant \rho_j^k \leqslant \\ \leqslant \max_j(\rho_j^k) - \frac{\max_j(\rho_j^k) - \min_j(\rho_j^k)}{4}, \quad (33)$$

то ρ_j^k обнуляется. Такая операция позволяет на первых итерациях вносить поправки только в области неоднородности, где ошибка электронной концентрации максимальна, что обеспечивает повышение приоритета восстановления неоднородностей при их наличии и приводит к улучшению качества реконструкции.

Для регуляризации решения СЛУ в задаче РТ ионосферы в конце каждой итерации перед сложением x_j^k с поправкой ρ_j^k целесообразно применять сглаживающий фильтр, что использовалось в ряде работ [2, 7]. Данную процедуру можно интерпретировать как введение в решение априорной информации о гладкости распределения электронной концентрации. В настоящей работе применялся КИХ-фильтр с коэффициентами [0,0236, 0,0927, 0,2324, 0,3026, 0,2324, 0,0927, 0,0236] по обеим координатам.

На малых высотах значение электронной концентрации равно нулю, поэтому поправка для ячеек сетки реконструкции, соответствующих этим высотам, не вносится. Контроль сходимости итерационного процесса производится путем вычисления нормы невязки $\|A\boldsymbol{x} - \boldsymbol{m}\|$ в пространстве l^2. Если $\varepsilon(l^2)$ на следующей итерации больше, чем на предыдущей, то итерационный процесс прерывается:

$$\varepsilon(l^2) = \frac{\sqrt{\sum_i \left(\sum_{j=1}^N A_{ij}x_j - m_i\right)^2}}{\sqrt{\sum_i m_i^2}}. \quad (34)$$

Результаты моделирования и анализ результатов

Моделирование задачи РТ ионосферы кластером КА состояло из следующей последовательности функций.

1. С использованием модели SGP4 [8] и файла TLE спутника с подходящими параметрами орбиты производился расчет положений двух спутников в рассматриваемый отрезок времени и радиотрасс сигналов без учета их преломления в ионосфере.

2. Исходя из крайних положений КА в рассматриваемый отрезок времени и размера ячейки сетки реконструкции формировалась двумерная сетка томографической реконструкции.

3. С использованием модели ионосферы NeQuick [9] формировалось начальное распределение электронной концентрации на сетке реконструкции. При решении модельной задачи это распределение использовалось в качестве начального приближения.

4. Из начального распределения формировалось модельное распределение путем внесения искажений двух типов:

а) случайное гладкое изменение значений электронной концентрации в пределах 20 % вдоль орбиты КА, имитирующее крупномасштабные возмущения в ионосфере в диапазоне погрешностей модели NeQuick;

б) локальная неоднородность с характерным размером 500×50 км и амплитудой, равной фоновому значению в данной точке.

5. По модельному распределению электронной концентрации для каждой радиотрассы по формуле (4) методом трапеций численно рассчитывались фазовая задержка сигнала и ее производная m_i.

6. Для положений КА, полученных из п. 1 и сетки реконструкции из п. 2, рассчитывался проекционный оператор A_{ij}.

7. Итерационно решалась СЛУ $\sum_{j=1}^{N} A_{ij}x_j = m_i$.

8. Производилась оценка ошибки реконструкции путем вычисления норм δ в пространствах l^2 и l^∞, которые характеризуют отклонение реконструируемой функции $\widetilde{F}$ от исходной функции F:

$$\delta(l^2) = \frac{\sqrt{\sum_i (F_i - \widetilde{F}_i)^2}}{\sum_i F_i^2}, \qquad (35)$$

$$\delta(l^\infty) = \frac{\max_i |F_i - \widetilde{F}_i|}{\max_i |F_i|}. \qquad (36)$$

Так как метод фазоразностный и фактически восстанавливается разность между начальным и модельным распределением, показательна норма δ для этой разности — она характеризует качество восстановления добавленных к модели неоднородностей.

При прохождении радиосигнала через ионосферу сигнал преломляется и при низкой частоте сигнала может отразиться. Отклонение от прямолинейного распространения сигнала максимально в области максимума ионосферы, особенно при малых углах падения [10]. Поэтому для стабильности приема сигнала целесообразно расположить КА так, чтобы радиотрассы проходили ближе к поверхности Земли, тогда угол падения на высоте максимума электронной концентрации будет больше. При этом при достаточной высоте орбиты радиотрассами будет охвачен весь необходимый для мониторинга ионосферы диапазон высот.

Расстояние между КА при фиксированном минимальном расстоянии между радиотрассой и поверхностью Земли m зависит от высоты орбиты, и чем высота меньше, тем быстрее формируется набор данных для каждой ячейки сетки реконструкции. Для высоты орбиты 500 км и минимального расстояния $m = 60$ км время накопления данных для каждой ячейки менее 11 мин, что позволяет считать ионосферу квазистационарной.

Моделирование проводилось для двух КА на круговых приполярных орбитах высотой около 500 км, период времени проведения измерений — 30 мин, размер ячейки сетки реконструкции — 25×25 км, ширина области реконструкции — около 17 тыс. км (рис. 4). Исходное (модельное) распределение электронной концентрации и результат его томографической реконструкции представлены на рис. 5, 7.

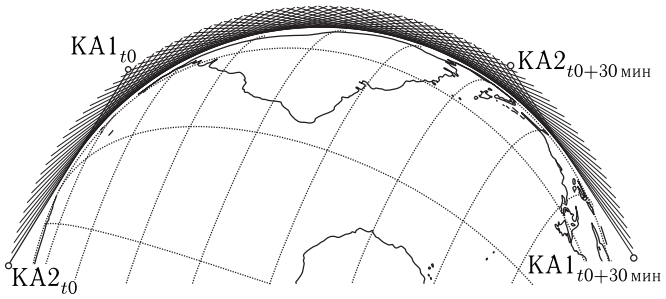


Рис. 4. Область реконструкции и положения КА в начальный и конечный моменты времени

Результат моделирования при наличии крупномасштабных возмущений показан на рис. 5, 6. Ошибки реконструкции для разности модели ионосферы и начального приближения $\delta(l^2) = 0{,}5$, $\delta(l^2) = 0{,}60$. Результат моделирования при наличии дополнительно локальной неоднородности представлен на рис. 7, 8, ошибки реконструкции в этом случае $\delta(l^2) = 0{,}55$, $\delta(l^\infty) = 0{,}67$.

Моделирование решения задачи РТ показало, что предложенный способ позволяет восстанавливать как крупномасштабные возмущения в ионосфере, так и локальные неоднородности. Абсолютные значения амплитуд небольших неоднородностей на реконструкциях в среднем составляют около половины от реальных значений, при этом крупные структуры восстанавливаются практически полностью. Наибольшие искажения в реконструкциях возникают на краях, так как в этих областях шириной, равной расстоянию между КА, недостаточно проекций. Поэтому расчет необходимо производить для реконструкций шириной существенно больше двух расстояний между КА. При этом время между последовательными расчетами реконструкций

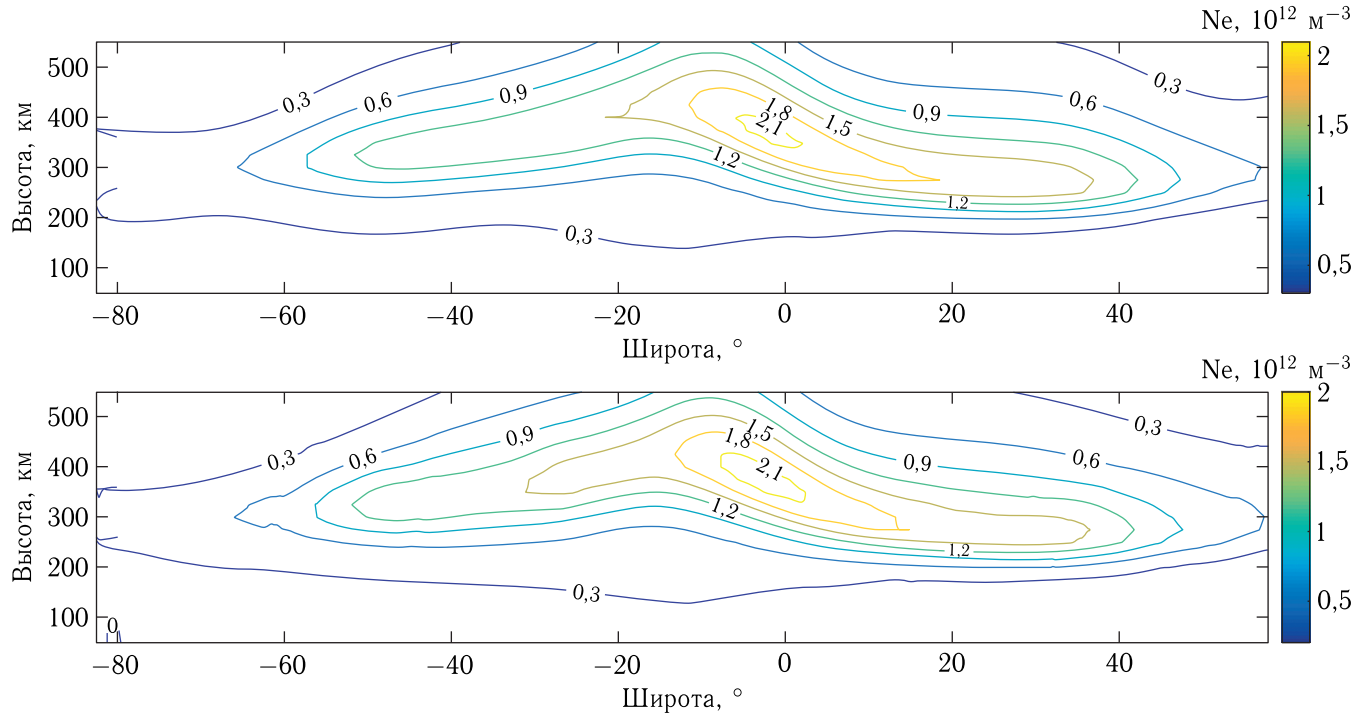


Рис. 5. Модель ионосферы (вверху) и реконструкция модели методом фазоразностной РТ (внизу) при наличии крупномасштабных возмущений

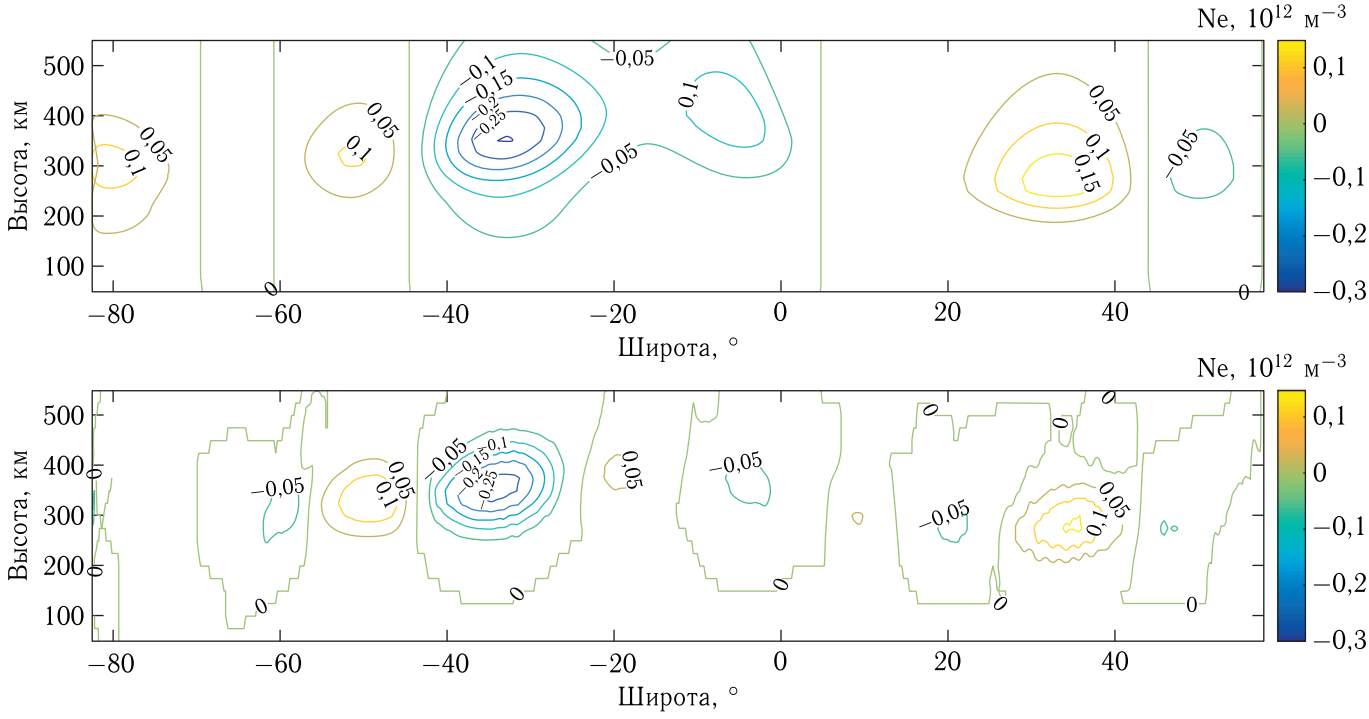


Рис. 6. Разность между моделью ионосферы и начальным приближением (вверху) и разность между реконструкцией модели методом фазоразностной РТ и начальным приближением (внизу) при наличии крупномасштабных возмущений

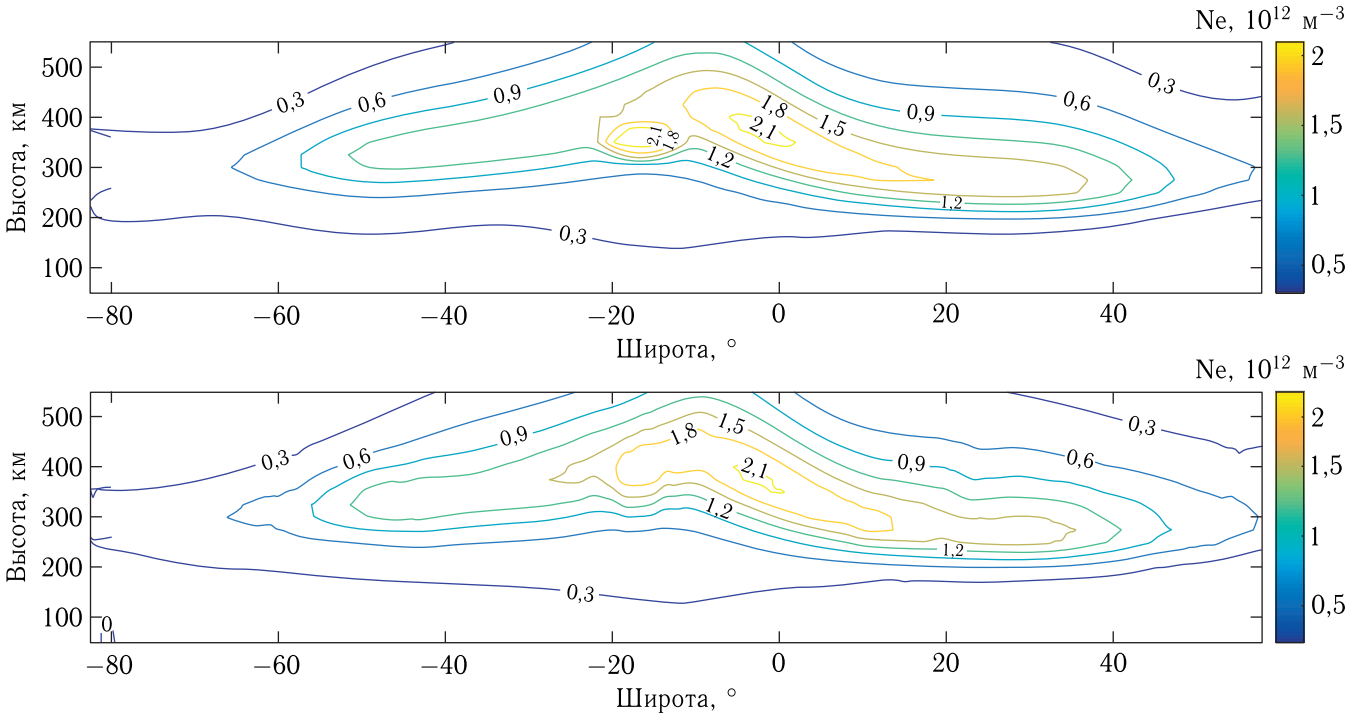


Рис. 7. Модель ионосферы (вверху) и реконструкция модели методом фазоразностной РТ (внизу) при наличии крупномасштабных возмущений и локальной неоднородности

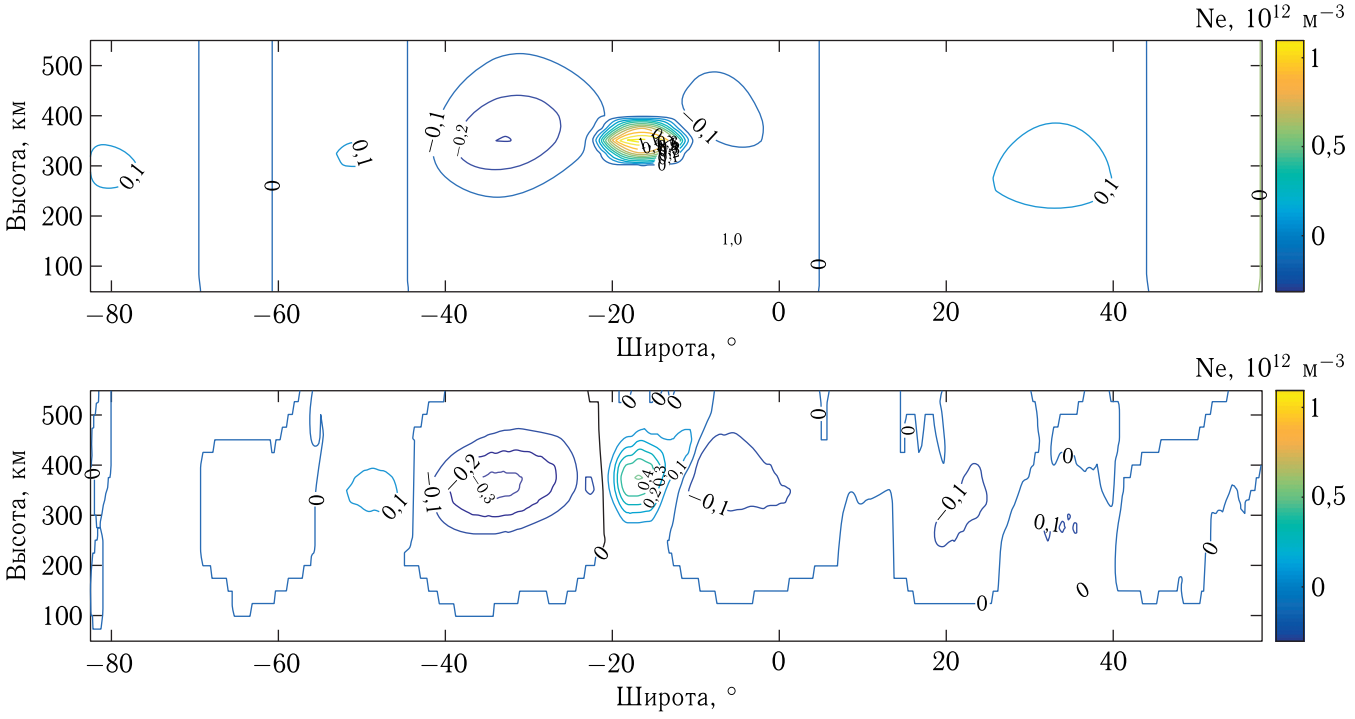


Рис. 8. Разность между моделью ионосферы и начальным приближением (вверху) и разность между реконструкцией модели методом фазоразностной РТ и начальным приближением (внизу) при наличии крупномасштабных возмущений и локальной неоднородности

может быть небольшим, так как измерения могут использоваться в нескольких расчетах, тогда оперативность получения данных после пролета двух КА над исследуемой областью в случае наличия связи с Землей или использовании данных непосредственно на КА будет порядка минуты.

Выводы

Рассмотрен способ получения двумерных распределений электронной концентрации в ионосфере с помощью кластера из двух космических аппаратов фазоразностным методом по двухчастотным измерениям. Такое сочетание количества КА в кластере и выбранного метода является наиболее простым способом получения двумерных распределений электронной концентрации с точки зрения практической реализации. Рассмотренный алгоритм фазоразностной РТ адаптирован к геометрии РТ ионосферы кластером КА, позволяет с минимальными вычислительными затратами построить проекционный оператор и решить систему линейных уравнений с учетом неравномерного заполнения области реконструкции трассами радиосигналов. Проведенное моделирование показало, что предлагаемый способ позволяет восстанавливать двумерные распределения электронной концентрации, в том числе крупномасштабные структуры и локальные неоднородности. Достоинством рассмотренной методики также является возможность применения частот 150 и 400 МГц, которые в данный момент используются в целях мониторинга ионосферы. В этом случае можно использовать сигналы КА-передатчика также для наземной томографии ионосферы на уже развернутых сетях томографических приемников.

Список литературы

1. *Андреева Е. С.*, *Куницын В. Е.*, *Терещенко Е. Д.* Фазоразностная радиотомография ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия, 1992, т. 32, № 1. С. 104–110.
2. *Куницын В. Е.*, *Терещенко Е. Д.*, *Андреева Е. С.* Радиотомография ионосферы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 336 с.
3. *Романов А. А.*, *Трусов С. В.*, *Новиков А. В.*, *Аджалова А. В.*, *Романов А. А.*, *Селин В. А.* Восстановление двумерного распределения электронной концентрации ионосферы в плоскости орбиты низкоорбитальных ИСЗ на основе анализа характеристик когерентного излучения // Вопросы электромеханики, 2009, т. 111, № 4. С. 37–42.
4. *Романов А. А.*, *Романов А. А.*, *Трусов С. В.*, *Урличич Ю. М.* Спутниковая радиотомография ионосферы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. 296 с.
5. *Новиков А. В.*, *Романов А. А.*, *Романов А. А.*, *Селин В. А.* Метод определения абсолютного полного электронного содержания в ионосфере на основе анализа характеристик немодулированных когерентных сигналов // Радиотехника и электроника, 2010, т. 55, № 2. С. 179–183.
6. *Романов А. А.*, *Романов А. А.*, *Селиванов А. С.*, *Трусов С. В.*, *Бобровский С. А.* Технологии мониторинга подвижных объектов и окружающей среды с использованием малоразмерных космических аппаратов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2015, т. 2, вып. 3. С. 3–11.
7. *Нестеров И. А.*, *Падохин А. М.*, *Андреева Е. С.*, *Калашникова С. А.* Моделирование задачи низкоорбитальной спутниковой УФ-томографии ионосферы // ВМУ. Серия 3. Физика. Астрономия. 2016, № 3. С. 90–99.
8. *Hoots F. R.*, *Roehrich R. L.* Spacetrack report No 3. Models for Propagation of NORAD Element Sets, 1980. 87 p.
9. *Leitinger R.*, *Zhang M. L.*, *Radicella S. M.* An improved bottomside for the ionospheric electron density model NeQuick // Annals of Geophysics, 2005, N 48(3). P. 525–534.
10. *Колосов М. А.*, *Арманд Н. А.*, *Яковлев О. И.* Распространение радиоволн при космической связи / Под ред. акад. Б. А. Введенского и проф. М. А. Колосова. М.: Связь, 1969. 155 с.

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ
2020, том 7, выпуск 1, с. 13–22

КОСМИЧЕСКИЕ НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ. РАДИОЛОКАЦИЯ И РАДИОНАВИГАЦИЯ

УДК 621.396 DOI 10.30894/issn2409-0239.2020.7.1.13.22

Методы применения доверительного интервала локации объекта в задачах обобщения данных от нескольких источников информации

С. Ю. Самсон, *к. т. н., samson.sy@spacecorp.ru*
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация
А. В. Новиков, *к. т. н., novikov.av@spacecorp.ru*
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация
А. В. Сорокин, *sorokin.av@spacecorp.ru*
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Обработка координатно-трассовой информации о мобильных объектах от нескольких разнотипных источников на центрах обработки информации требует высокой достоверности формируемых результатов. В статье предлагаются методы расчета доверительного интервала локации объекта, методы расчета экстраполированного доверительного интервала локации объекта, зависящие от маневра объекта, и методы вычислений параметров и коэффициентов алгоритмов обобщения данных от нескольких источников информации. Также предлагаются методы вычисления времени хранения трасс, потерянных источниками сопровождения.

Разработанные методы позволяют гибко использовать данные алгоритмы обобщения, расширяя возможность их применения в условиях разрывного поля видимости источников информации, существенной разноточности измерений и неопределенности гипотез движения объектов.

Ключевые слова: алгоритмы получения обобщенных данных, интервальная оценка, построение доверительного интервала

Methods of Applying the Confidence Interval of the Object Location in the Tasks of Data Integration from Several Information Sources

S. Yu. Samson, *Cand. Sci. (Engineering), samson.sy@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation
A. V. Novikov, *Cand. Sci. (Engineering), novikov.av@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation
A. V. Sorokin, *sorokin.av@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. Processing of coordinate-trace information on mobile objects from several different sources at data processing centers requires high reliability of the results formed. The paper offers methods for calculating the confidence interval of an object location, methods for calculating the extrapolated confidence interval of an object location depending on the object maneuver, and methods for calculating the parameters and coefficients of data integration algorithms from several sources of information. The paper proposes as well the methods for calculating the storage time of traces lost by tracking sources.

The developed methods allow flexible usage of these integration algorithms expanding the possibility of their application in the conditions of a discontinuous field of information sources visibility, significant variability of measurements, and uncertainty of hypotheses of object movement.

Keywords: algorithms for integrated data obtaining, interval estimation, confidence interval construction

Обработка координатно-трассовой информации, предназначенная для оценки текущего состояния объектовой обстановки и формирования в режиме реального времени описания объектовой обстановки в виде единого потока обобщенных трасс объектов, осуществляемая на основе информации от нескольких источников, является задачей третичной обработки информации. Третичная обработка информации применяется на центрах обработки информации, например на центрах обработки радиолокационной информации, принимающих информацию от замкнутых на них радиолокационных станций. Она реализуется путем объединения потоков трасс объектов, поступающих от множества различных источников информации [1, 2], с исключением дублирования информации разных источников и повышением достоверности сформированного описания объектовой обстановки.

Для решения данной задачи привлекаются разнотипные источники информации, работа которых основана на различных физических принципах. Информация, поступающая от них, различается:

– темпом поступления сообщений;

– способом наблюдения объекта — эхолокация, пеленгация, вторичная локация;

– априорной и текущей точностью;

– длительностью сопровождения объекта.

Третичная обработка решает следующие задачи:

– отождествление обобщенной трассы объекта с информацией, приходящей в сообщениях по тому же объекту от нескольких разнородных рассредоточенных источников информации;

– формирование новой обобщенной трассы;

– обновление координат и вектора скорости (оценки положения трассы объекта в пространстве) обобщенной трассы;

– сброс обобщенной трассы в случае прекращения поступления информации по объекту от источников информации.

Цель данной работы — разработка методов третичной обработки информации с использованием интервальных оценок положения объекта, позволяющих повысить достоверность формируемого описания объектовой обстановки в условиях разрывного поля видимости источников информации, их существенной разноточности, а также при неопределенности гипотез движения объектов.

Интервальная оценка положения трассы объекта

В задачах оценки параметров при небольшом объеме выборки, к которым относится задача оценки положения объекта в пространстве по данным локационных измерителей, более предпочтительна интервальная оценка [5–7]. В отличие от **точечной** оценки интервальная оценка (доверительный интервал $\mathrm{trust}_{\mathrm{crd}}$) представляется интервалом значений, внутри которого с задаваемой доверительной вероятностью (β) находится истинное значение (x) оцениваемого параметра:

$$P\left(|x - m_x| < \mathrm{trust}_{\mathrm{crd}}\right) = \beta,$$

где m_x — математическое ожидание величины x.

Из неравенства Чебышева

$$P\left(|x - m_x| \geqslant k \times \sigma\right) \leqslant \frac{1}{k^2},$$

следует, что доверительный интервал приблизительно пропорционален среднеквадратическому отклонению (σ).

Например, для нормального закона это точная пропорция:

$$\Phi\left(\frac{\mathrm{trust}_{\mathrm{crd}}}{\sigma \cdot \sqrt{2}}\right) = \beta,$$

где $\Phi(z)$ — функция Лапласа.

Для $\beta = 0{,}9$

$$\mathrm{trust}_{\mathrm{crd}} = 1{,}7 \cdot \sigma.$$

Неопределенность положения экстраполированной обобщенной трассы можно оценить доверительным интервалом ($\mathrm{trust}_{\mathrm{E_crd}}$), пересчитанным на время экстраполяции.

Экстраполяция доверительного интервала

В случае, когда объект движется прямолинейно и равномерно

$$x = x_0 + V \cdot t$$

и гипотеза движения совпадает с движением объекта, экстраполяция производится по формуле

$$x_E = x_i + \frac{x_i - x_{i-1}}{\Delta t} \cdot t_E = x_i \left(1 + \frac{t_E}{\Delta t}\right) - x_{i-1} \cdot \left(\frac{t_E}{\Delta t}\right),$$

где x_{i-1} и x_i — измеренные координаты на i-й и $(i-1)$-й моменты времени;

Δt — время, за которое производится подсчет скорости (темп измерения источника);

t_E — время, на которое производится экстраполяция.

Дисперсия экстраполированного значения координаты равна сумме дисперсий независимых измерений:

$$D_E = D_i \cdot \left(1 + \frac{t_E}{\Delta t}\right)^2 + D_{i-1} \cdot \left(\frac{t_E}{\Delta t}\right)^2.$$

Дисперсии i-го и $(i-1)$-го измерений равны

$$D_i = D_{i-1}.$$

Тогда

$$D_E = D_i \cdot \left(1 + 2\frac{t_E}{\Delta t} + 2 \cdot \left(\frac{t_E}{\Delta t}\right)^2\right),$$

$$\sigma_E = \sigma_i \cdot \sqrt{\left(1 + 2 \cdot \frac{t_E}{\Delta t} + 2 \cdot \left(\frac{t_E}{\Delta t}\right)^2\right)}.$$

В случае если $\mathrm{trust}_{\mathrm{crd}}$ — доверительный интервал обобщенной трассы на момент последнего ее обновления, то экстраполированный доверительный интервал ($\mathrm{trust}_{\mathrm{E_crd}}$) подсчитывается по формуле

$$\mathrm{trast}_{\mathrm{E_crd}} = \mathrm{trast}_{\mathrm{crd}} \cdot \sqrt{\left(1 + 2 \cdot \frac{t_E}{\Delta t} + 2 \cdot \left(\frac{t_E}{\Delta t}\right)^2\right)}.$$

В случае, когда объект движется прямолинейно и равноускорено:

$$x = x_0 + V \cdot t + U \cdot \frac{t_E^2}{2},$$

экстраполяция должна производиться по формуле

$$x_E = x_i + \frac{x_i - x_{i-1}}{\Delta t} \cdot t_E + U \cdot \frac{t_E^2}{2} = x_i \left(1 + \frac{t_E}{\Delta t}\right) - x_{i-1} \cdot \left(\frac{t_E}{\Delta t}\right) + U \cdot \frac{t_E^2}{2}.$$

Однако ускорение (U) не рассчитывается. Предполагая, что ускорение, с которым может двигаться объект, является случайной величиной, распределенной по нормальному закону с дисперсией D_U и нулевым математическим ожиданием, дисперсия экстраполированного значения координаты будет

$$D_E = D_i \cdot \left(1 + \frac{t_E}{\Delta t}\right)^2 + D_{i-1} \cdot \left(\frac{t_E}{\Delta t}\right)^2 + D_U \cdot \left(\frac{t_E^2}{2}\right)^2.$$

Отсюда экстраполированный доверительный интервал ($\mathrm{trust}_{\mathrm{E_crd}}$) подсчитывается по формуле:

$$\mathrm{trast}_{\mathrm{E_crd}} = \left(\mathrm{trast}_{\mathrm{crd}}^2 \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{t_E}{\Delta t} + 2 \cdot \left(\frac{t_E}{\Delta t}\right)^2\right) + \mathrm{trast}_U^2 \cdot \left(\frac{t_E^2}{2}\right)^2\right)^{1/2}. \quad (1)$$

На рис. 1 приведены результаты расчета значения экстраполированного доверительного интервала в метрах (ось ординат) в зависимости от времени (ось абсцисс) в секундах. Графики построены при параметрах, указанных в табл. 1.

Таблица 1. Параметры зависимостей экстраполированного доверительного интервала от времени

Номер графика	Δ (с)	trust_U (м/с^2)	$\mathrm{trust}_{\mathrm{crd}}$ (м)
1	5	0.0	500
2	5	$5 \cdot 9{,}8$	500
3	5	$3 \cdot 9{,}8$	500
4	5	$2 \cdot 9{,}8$	500

Траектория движения объекта состоит из отрезков, когда объект не маневрирует (прямолинейное равномерное движение), и отрезков, когда объект совершает маневр. Пусть P_M — вероятность того, что объект находится на отрезке траектории маневра. Тогда плотность распределения случайной величины U будет определяться выражением для смеси вероятностных распределений [3]

$$f(U) = (1 - P_M) \cdot f_0(U) + P_M \cdot f_M(U),$$

где $f_0(U)$ — плотность распределения случайной величины U на отрезке траектории без маневра

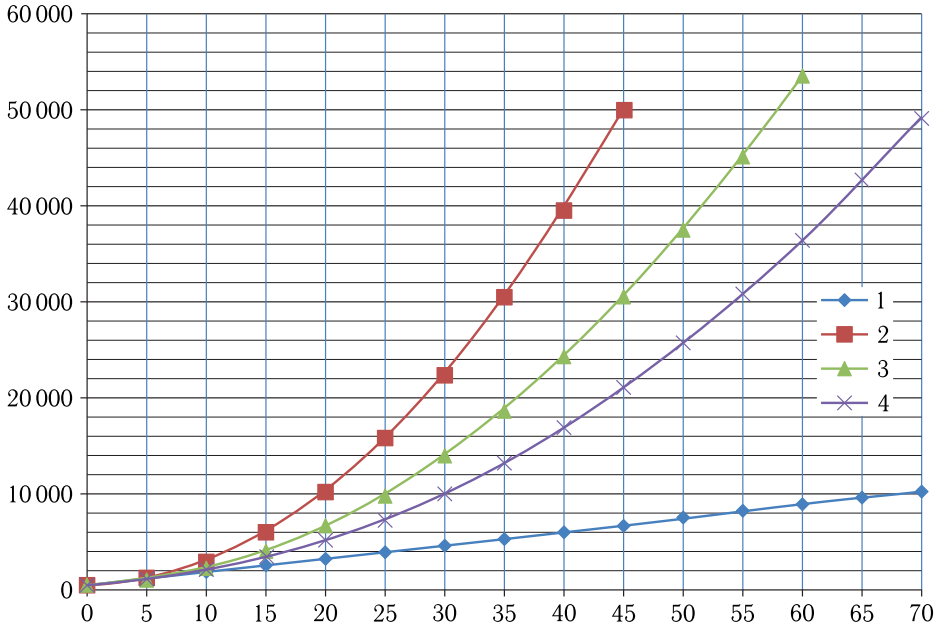


Рис. 1.

с дисперсией D_{U0}, $f_M(U)$ — плотность распределения случайной величины U на отрезке траектории с маневром D_{UM}.

Предполагая, что ускорение, с которым может двигаться объект, как при маневре, так и без маневра является случайной величиной, распределенной по нормальному закону с дисперсией DU и нулевым математическим ожиданием, получим

$$D_U = \int U^2[(1-P_M)\cdot f_0(U) + P_M \cdot f_M(U)]\,dU =$$

$$= \int U^2\left((1-P_M)\cdot f_0(U)\right)dU + \int U^2 P_M \cdot f_M(U)\,dU,$$

$$D_U = (1-P_M)\cdot D_{U0} + P_M \cdot D_{UM}.$$

Подставляя в (2) данные результаты, получим

$$\mathrm{trast}_{\mathrm{E_crd}} = \left(\mathrm{trast}^2_{\mathrm{crd}} \cdot \left(1 + 2\cdot\frac{t_E}{\Delta t} + 2\cdot\left(\frac{t_E}{\Delta t}\right)^2\right) + \right.$$

$$\left. + \left((1-P_M)\cdot \mathrm{trast}^2_{U0} + P_M \cdot \mathrm{trast}^2_{UM}\right)\cdot\left(\frac{t_E^2}{2}\right)^2\right)^{1/2}. \quad (2)$$

Или

$$\mathrm{trast}_{\mathrm{E_crd}} = \left(\mathrm{trast}^2_{\mathrm{crd}} \cdot \left(1 + 2\cdot\frac{t_E}{\Delta t} + 2\cdot\left(\frac{t_E}{\Delta t}\right)^2\right) + \right.$$

$$\left. + \mathrm{trast}^2_{\tilde{U}}\cdot\left(\frac{t_E^2}{2}\right)^2\right)^{1/2},$$

где

$$\mathrm{trast}_{\tilde{U}} = \sqrt{(1-P_M)\cdot \mathrm{trast}^2_{U0} + P_M \cdot \mathrm{trast}^2_{UM}}.$$

На рис. 2 приведены результаты расчета значения экстраполированного доверительного интервала в метрах (ось ординат) в зависимости от времени (ось абсцисс) в секундах в случае обнаружения маневра (manevr = 1) и в случае, когда маневр не обнаружен (manevr = 0).

Расчеты сделаны при следующих значениях параметров: $\mathrm{trast}_{\mathrm{crd}} = 250$, $\mathrm{trast}_{U0} = 0{,}2 \cdot g$, $\mathrm{trast}_{UM} = 3 \cdot g$.

Использование доверительных интервалов в алгоритме отождествления

Идентификация информации источника с обобщенной информацией решается методами отождествления на основе сравнения информации, пришедшей от источника $(x_{\mathrm{msg}}, y_{\mathrm{msg}})$, с информацией обобщенной трассы $(x_{\mathrm{genTrcE}}, y_{\mathrm{genTrcE}})$, экстраполированной на тот же момент времени. В случае, когда гипотеза движения объекта совпадает с реальным его перемещением, отклонение

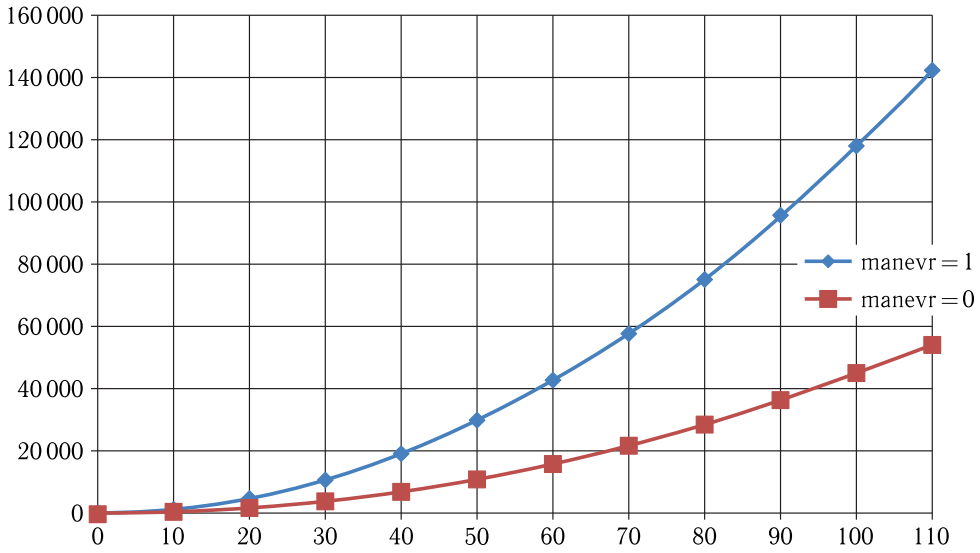


Рис. 2.

информации источника от экстраполированной информации обобщенной трассы зависит только от случайных ошибок измерения источниками информации. В случае, когда гипотеза экстраполяции не соответствует действительному движению объекта, к случайной ошибке измерения прибавляется ошибка экстраполяции, зависящая от динамических характеристик объекта. Это обстоятельство чрезвычайно важно учитывать при отождествлении высокоскоростных, маневренных объектов. Поэтому достоверное решение задачи отождествления возможно лишь в пределах ограниченного времени экстраполяции (t_E), рассчитываемого на основе случайной погрешности измерений, определяемого маневра, скорости и типа объекта и др.

При отождествлении трассы источника, сообщение о котором пришло впервые, в качестве кандидатов на отождествление могут быть отобраны те обобщенные трассы, доверительный интервал которых, экстраполированный на время пришедшего сообщения, имеет пересечение с доверительным интервалом отождествляемой трассы источника. Доверительный интервал отождествляемой трассы источника определяется источником в зависимости от применяемых им методов и приходит в сообщении.

Доверительный интервал отбираемых обобщенных трасс, экстраполированный на время пришедшего сообщения, рассчитывается по формуле (2).

Использование доверительных интервалов в алгоритме обновления координат

Фильтрация

Пусть $x_{\text{msg}}, y_{\text{msg}}$ — координаты объекта, пришедшие в сообщении от источника информации, $x_{\text{genTrcE}}, y_{\text{genTrcE}}$ — координаты обобщенной трассы, экстраполированные на время сообщения источника.

Обновление координат обобщенной трассы x_{genTrc}, y_{genTrc} и параметров движения Vx_{genTrc}, Vy_{genTrc} производится методами фильтрации по формулам:

$$\begin{aligned} x_{\text{genTrc}} &= x_{\text{genTrcE}} + \alpha \times (x_{\text{msg}} - x_{\text{genTrcE}}); \\ y_{\text{genTrc}} &= y_{\text{genTrcE}} + \alpha \times (y_{\text{msg}} - y_{\text{genTrcE}}); \\ Vx_{\text{genTrc}} &= Vx_{\text{genTrcS}} + \frac{x_{\text{msg}} - x_{\text{genTrcE}}}{\Delta t + T_V}; \\ Vy_{\text{genTrc}} &= Vy_{\text{genTrcS}} + \frac{y_{\text{msg}} - y_{\text{genTrcE}}}{\Delta t + T_V}, \end{aligned} \tag{3}$$

где Δt — разница между временем последнего обновления координат обобщенной трассы и временем сообщения источника;

α — коэффициент фильтрации координат (значение зависит от признака наличия маневра объекта);

T_V — коэффициент фильтрации скорости (значение зависит от признака наличия маневра объекта);

Vx_{genTrcS}, Vy_{genTrcS} — параметры движения обобщенной трассы при предыдущем обновлении.

Расчет доверительного интервала при фильтрации обобщенной трассы

Координаты обобщенной трассы (например, x_{genTrc}) можно представить (см. формулы (3)) в виде суммы двух случайных величин x_{genTrcE} и x_{msg}:

$$x_{\text{genTrc}} = x_{\text{genTrcE}} \times (1-\alpha) + x_{\text{msg}} \times \alpha.$$

Тогда дисперсия случайных величин будет вычисляться по формуле

$$D_{\text{genTrc}} = D_{\text{genTrcE}} \times (1-\alpha)^2 + D_{\text{msg}} \times \alpha^2.$$

А доверительный интервал —

$$\text{trast}_{\text{genTrc}} = \sqrt{\text{trast}^2_{\text{genTrcE}} \times (1-\alpha)^2 + \text{trast}^2_{\text{msg}} \times \alpha^2}. \quad (4)$$

Расчет оптимального значения коэффициента фильтрации

Определим значение коэффициента фильтрации координат (α), обеспечивающего наименьшее значение $\text{trast}_{\text{genTrc}}$, рассчитанное по формуле (4).

Для этого найдем производную $d(\text{trast}_{\text{genTrc}})/d\alpha$.

$$d(\text{trast}_{\text{genTrc}})/d\alpha =$$
$$= d\left(\sqrt{\text{trast}^2_{\text{genTrcE}} \times (1-\alpha)^2 + \text{trast}^2_{\text{msg}} \times \alpha^2}\right)/d\alpha =$$
$$= \frac{\text{trast}^2_{\text{msg}} \times \alpha - \text{trast}^2_{\text{genTrcE}} \times (1-\alpha)}{\sqrt{\text{trast}^2_{\text{msg}} \times \alpha^2 + \text{trast}^2_{\text{genTrcE}}(1-\alpha)^2}}.$$

Приравняем нулю полученное выражение для производной и найдем значение α, обеспечивающее данное равенство:

$$\frac{\text{trast}^2_{\text{msg}} \times \alpha - \text{trast}^2_{\text{genTrcE}} \times (1-\alpha)}{\sqrt{\text{trast}^2_{\text{msg}} \times \alpha^2 + \text{trast}^2_{\text{genTrcE}}(1-\alpha)^2}} = 0.$$

Таким образом, наименьшее значение $\text{trast}_{\text{genTrc}}$ обеспечивается при значении α:

$$\alpha = \frac{\text{trast}^2_{\text{genTrcE}}}{\text{trast}^2_{\text{genTrcE}} + \text{trast}^2_{\text{msg}}}.$$

На рис. 3 приведены результаты расчета значения коэффициента фильтрации координат (ось ординат) в зависимости от времени (ось абсцисс) в секундах в случае обнаружения маневра (manevr = 1) и в случае, когда маневр не обнаружен (manevr = = 0). Расчеты сделаны при следующих значениях параметров: $\text{trast}_{\text{crd}} = 250$, $\text{trast}_{U0} = 0{,}2 \cdot g$, $\text{trast}_{UM} = 3 \cdot g$.

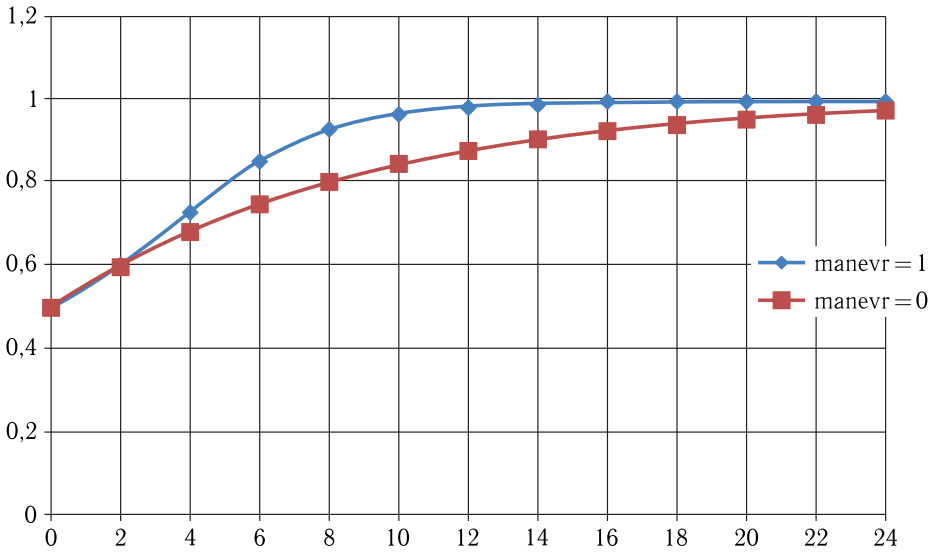


Рис. 3. Результаты расчета значения коэффициента фильтрации координат

Расчет времени хранения трасс, потерянных источниками сопровождения, на основе доверительного интервала

Обобщенная трасса, потерянная источниками сопровождения, должна храниться в системе обработки информации до тех пор, пока значение экстраполированного доверительного интервала по координатам обобщенной трассы не превысит порог, при котором отождествление с вновь поступившей трассой источника станет недостоверным.

В качестве меры неопределенности информации используется понятие информационной энтропии. Тогда, допуская, что оцениваемые величины имеют непрерывные значения и распределены по нормальному закону (характеризующемуся наибольшей энтропией), получаем из [4] следующие выражения: для энтропии экстраполированной обобщенной трассы

$$H_{\text{genTrcE}} = \frac{1}{2}\frac{\ln(2\pi\sigma^2_{\text{genTrcE}}e)}{\ln(2)}$$

и энтропии входного сообщения о трассе источника

$$H_{\text{msg}} = \frac{1}{2}\frac{\ln(2\pi\sigma^2_{\text{msg}}e)}{\ln(2)}.$$

Количественная мера, которую может внести информация обобщенной трассы в процесс отождествления с вновь поступившим входным сообщением о трассе, будет определяться по формуле

$$I = H_{\text{msg}} - H_{\text{genTrcE}} = \\ = \frac{1}{2}\frac{\ln(2\pi\sigma^2_{\text{msg}}e)}{\ln(2)} - \frac{1}{2}\frac{\ln(2\pi\sigma^2_{\text{genTrcE}}e)}{\ln(2)} = \\ = \frac{1}{\ln(2)}\ln\left(\frac{\sigma_{\text{msg}}}{\sigma_{\text{genTrcE}}}\right).$$

Отношение дисперсий можно заменить отношением доверительных интервалов. Тогда

$$I = \frac{1}{\ln(2)}\ln\left(\frac{\text{trast}_{\text{msg}}}{\text{trast}_{\text{genTrcE}}}\right).$$

Учитывая значение экстраполированного доверительного интервала (1), получим:

$$I = \frac{1}{\ln(2)}\ln\left(\text{trast}_{\text{msg}}\Big/\left(\text{trast}^2_{\text{crd}}\times\right.\right. \\ \left.\left.\times\left(1 + 2\cdot\frac{t_E}{\Delta t} + 2\cdot\left(\frac{t_E}{\Delta t}\right)^2\right) + \text{trast}^2_{\widetilde{U}}\cdot\left(\left(\frac{t^2_E}{2}\right)^2\right)^{1/2}\right)\right). \quad (5)$$

На рис. 4 приведена зависимость количественной меры информации $(-I)$, которую может внести информация обобщенной трассы в процесс отождествления с вновь поступившим входным сообщением о трассе, от времени ее необновления (экстраполяции), при значениях $\text{trust}_{\text{crd}} = 500$, $\Delta t = 10$ с и $\text{trust}_{\widetilde{U}} = g$.

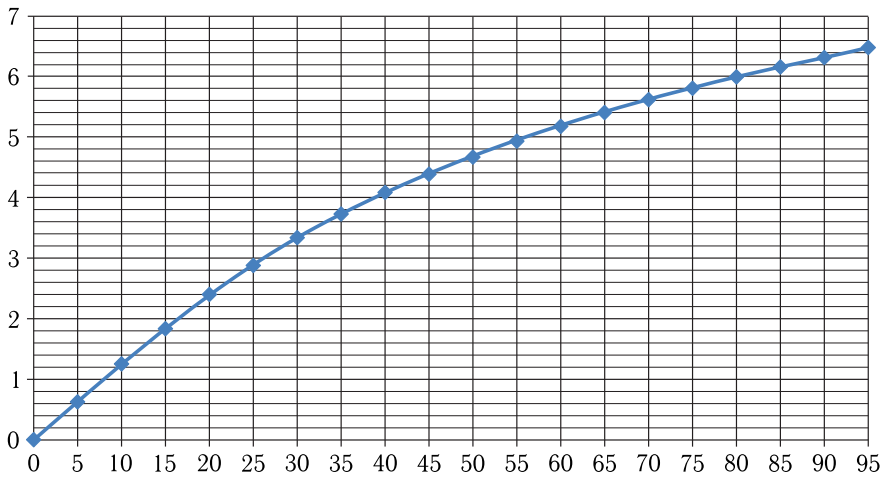


Рис. 4. Зависимость количественной меры информации от времени ее необновления

Задавая критическое значение количественной меры $I = I_C$, можно получить значение порога по доверительному интервалу trust_C, при достижении которого обобщенная трасса не вносит более достоверной информации и сбрасывается с сопровождения.

$$I_C = \frac{1}{\ln(2)} \ln\left(\frac{\mathrm{trast}_{\mathrm{msg}}}{\mathrm{trast}_C}\right). \qquad (6)$$

Таким образом, для каждой обобщенной трассы, потерянной источниками сопровождения, можно рассчитать время ее хранения t_{Hold}, после истечения которого данная трасса сбрасывается.

На рис. 5 приведены результаты табличного расчета значения времени хранения (ось ординат), соответствующего достижению доверительного интервала $\mathrm{trast}_C = 20$ км, в зависимости от доверительного интервала по ускорению (ось абсцисс) и доверительного интервала по координатам обобщенной трассы на момент последнего ее обновления (параметр графиков).

На рис. 6 приведены результаты табличного расчета значения времени хранения, соответствующего достижению доверительного интервала $\mathrm{trast}_C = 40$ км, в зависимости от доверительного интервала по ускорению и доверительного интервала по координатам обобщенной трассы на момент последнего ее обновления.

На рис. 5 и рис. 6 графики построены при значениях параметров доверительного интервала, указанных в табл. 2.

Таблица 2. Доверительный интервал по координатам обобщенной трассы как параметр зависимостей времени хранения от доверительного интервала по ускорению

Номер графика	$\mathrm{trust}_{\mathrm{crd}}$ (м)
1	250
2	500
3	750
4	1000
5	1250
6	1500

Значение времени хранения вычисляется из уравнения

$$I_C = I.$$

Учитывая выражения (5) и (6), получаем

$$\frac{1}{\ln(2)} \ln\left(\frac{\mathrm{trast}_{\mathrm{msg}}}{\mathrm{trast}_C}\right) = \frac{1}{\ln(2)} \ln\left(\mathrm{trast}_{\mathrm{msg}} \Big/ \left(\mathrm{trast}_{\mathrm{crd}}^2 \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{t_{\mathrm{Hold}}}{\Delta t} + 2 \cdot \left(\frac{t_{\mathrm{Hold}}}{\Delta t}\right)^2\right) + \mathrm{trast}_{\widetilde{U}}^2 \cdot \left(\frac{t_{\mathrm{Hold}}^2}{2}\right)^2\right)^{1/2}\right).$$

Или

$$\mathrm{trast}_C = \left(\mathrm{trast}_{\mathrm{crd}}^2 \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{t_{\mathrm{Hold}}}{\Delta t} + 2 \cdot \left(\frac{t_{\mathrm{Hold}}}{\Delta t}\right)^2\right) + \mathrm{trast}_{\widetilde{U}}^2 \cdot \left(\frac{t_{\mathrm{Hold}}^2}{2}\right)^2\right)^{1/2}.$$

Учитывая, что $t_{\mathrm{Hold}} > 1$ и $t_{\mathrm{Hold}} > \Delta t$, упрощаем уравнение

$$\mathrm{trast}_C = \sqrt{\mathrm{trast}_{\mathrm{crd}}^2 \cdot 2 \cdot \left(\frac{t_{\mathrm{Hold}}}{\Delta t}\right)^2 + \mathrm{trast}_{\widetilde{U}}^2 \cdot \left(\frac{t_{\mathrm{Hold}}^2}{2}\right)^2},$$

$$\frac{\mathrm{trast}_{\widetilde{U}}^2}{4} \cdot \left(t_{\mathrm{Hold}}^2\right)^2 + \frac{\mathrm{trast}_{\mathrm{crd}}^2 \cdot 2}{\Delta t^2} \cdot t_{\mathrm{Hold}}^2 - \mathrm{trast}_C^2 = 0.$$

Решая данное биквадратное уравнение, получаем

$$t_{\mathrm{Hold}} = \sqrt{2 \cdot \frac{\left(-\frac{\mathrm{trast}_{\mathrm{crd}}^2 \cdot 2}{\Delta t^2} + \sqrt{D}\right)}{\mathrm{trast}_{\widetilde{U}}^2}}, \qquad (7)$$

где

$$D = \left(\frac{\mathrm{trast}_{\mathrm{crd}}^2 \cdot 2}{\Delta t^2}\right) + \mathrm{trast}_{\widetilde{U}}^2 \cdot \mathrm{trast}_C^2.$$

На рис. 7 приведены результаты расчета по формуле (7) значения времени хранения (ось ординат), соответствующие достижению доверительным интервалам $\mathrm{trast}_C = 20$ км и $\mathrm{trast}_C = 40$ км, в зависимости от доверительного интервала по ускорению (ось абсцисс). Доверительный интервал по координатам обобщенной трассы на момент последнего ее обновления принят равным 250 м.

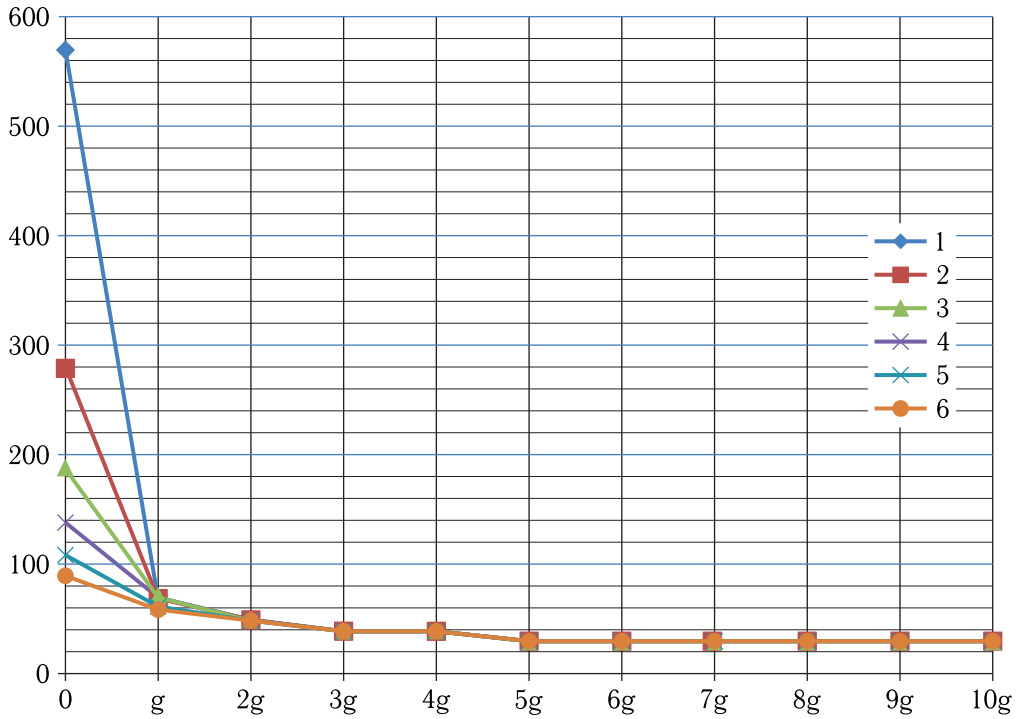


Рис. 5. Результаты табличного расчета значения времени хранения, соответствующего достижению доверительного интервала $\mathrm{trast}_C = 20$ км

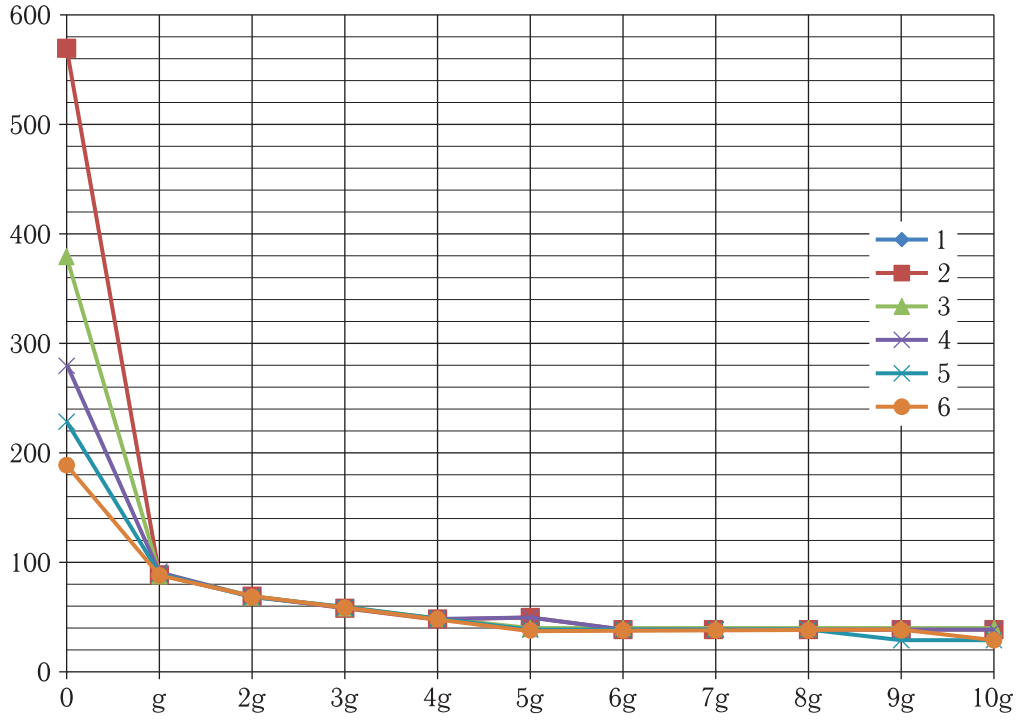


Рис. 6. Результаты табличного расчета значения времени хранения, соответствующего достижению доверительного интервала $\mathrm{trast}_C = 40$ км

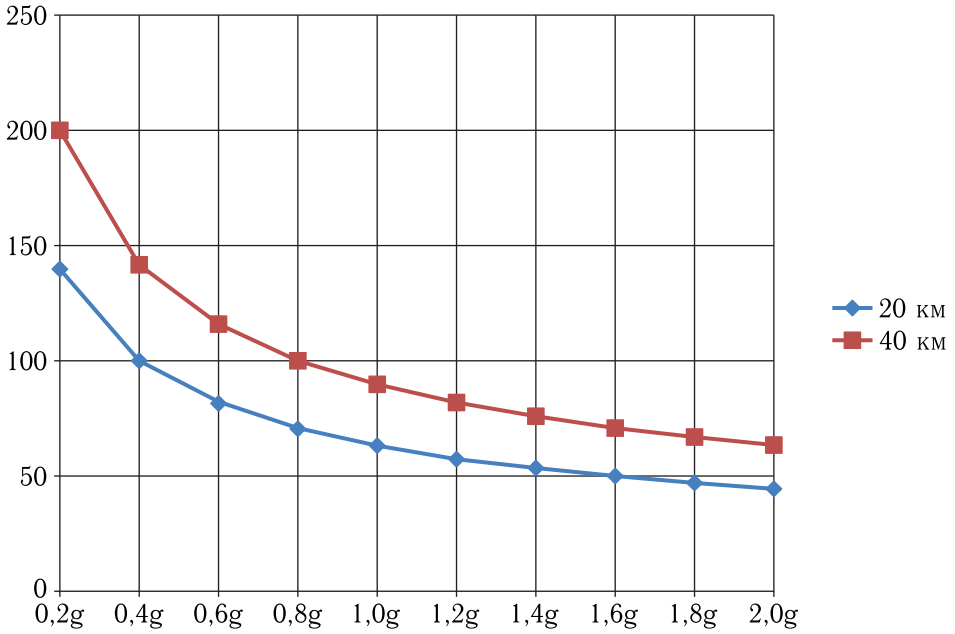


Рис. 7. Результаты расчета по формуле (7) значения времени хранения по достижению доверительного интервала $\mathrm{trast}_C = 20$ км и $\mathrm{trast}_C = 40$ км в зависимости от доверительного интервала по ускорению

Сравнение данных, приведенных на рис. 7 с данными, приведенными на рис. 6 и 5, показывает практическое совпадение результатов, полученных табличным методом и методом приближенных расчетов по формуле (7).

Заключение

Результаты расчетов параметров и коэффициентов программ третичной обработки информации, приведенные в работе, близки к эмпирическим значениям данных параметров и коэффициентов, принятым в реализованных системах обработки информации для частных ограниченных условий применения.

Полученные методы позволяют гибко использовать программы третичной обработки информации, расширяя возможность их применения в условиях разрывного поля видимости источников информации, их существенной разноточности и неопределенности гипотез движения объектов. Использование данных методов в специальном программном обеспечении перспективных центров обработки информации повысит достоверность формируемого описания текущей объектовой обстановки.

Список литературы

1. *Самсон С. Ю.* Принципы разработки алгоритмов, формирующих описание воздушной обстановки на командных пунктах различного уровня иерархии // Вопросы радиоэлектроники. Сер. СОИУ, 2000, вып. 1.

2. Справочник офицера воздушно-космической обороны // Под общей ред. С. К. Бурмистрова. Тверь: ВА ВКО, 2006. 564 с.

3. *Айвазян С. А.*, *Бухштабер В. М.*, *Енюков И. С.*, *Мешалкин Л. Д.* Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности. М.: Финансы и статистика, 1989. 607 с.

4. *Пугачев В. С.* Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Гос. издательство физико-математической литературы, 1960. 883 с.

5. *Fisher R. A.* Statistical Methods and Scientific Inference. N.Y.–L., 1973.

6. *Kendall M. G. and Stuart A.* The Advanced of a Theory of Statistics, vol. 2: Inference and Relationship (3rd Edition). Griffin, London, 1973.

7. *Meeker W. Q.*, *Hahn G. J. and Escobar L. A.* Statistical Intervals: A Guide for Practitioners and Researchers (2nd Edition). John Wiley & Sons, 2017.

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ
2020, том 7, выпуск 1, с. 23–29

РАДИОТЕХНИКА И КОСМИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ

УДК 621.372.413.47.45.99 DOI 10.30894/issn2409-0239.2020.7.1.23.29

Микрополосковый делитель мощности с тремя входами и тремя выходами для бортовой аппаратуры космических аппаратов

В. Г. Алыбин, *д.т.н., otdelenie17@spacecorp.ru*
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация
С. А. Зарапин, *otdelenie17@spacecorp.ru*
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация
С. А. Яхутин, *otdelenie17@spacecorp.ru*
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Представлены устройство, конструкция и экспериментальные электрические параметры микрополоскового делителя мощности с тремя входами и тремя выходами (3×3), содержащее три направленных ответвителя (НО) Ланге, соединенных между собой тремя отрезками микрополосковой линии передачи. Приведены требуемые для достижения оптимальных параметров значения коэффициентов передачи каждого НО и длин отрезка микрополосковой линии передачи. При подаче СВЧ-сигнала на любой из входов делителя мощности 3×3 теоретическое значение коэффициента передачи на каждый из трех его выходов (без учета потерь в НО и в отрезках микрополосковой линии передачи) — не менее −4,78 дБ; при этом обеспечивается развязка между входом и двумя другими входами, а также между выходами не менее 20 дБ в 30-процентной полосе частот.

Ключевые слова: микрополосковый делитель мощности, направленный ответвитель Ланге, коэффициент передачи, развязка между входами и между выходами

Microstrip Power Divider with Three Inputs and Three Outputs for Spacecraft Onboard Equipment

V. G. Alybin, *Dr. Sci. (Engineering), otdelenie17@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation
S. A. Zarapin, *otdelenie17@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation
S. A. Yakhutin, *otdelenie17@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper presents a device, design, and experimental electric parameters of a microstip power divider (3×3) with three inputs and three outputs consisting of three Lange directional couplers connected to each other by three sections of a microstrip transmission line. The article gives the required values of the transmission coefficients of each Lange directional coupler and lengths of a section of a microstrip transmission line to obtain optimum parameters. When sending a microwave signal to any of power divider (3×3) inputs, a theoretical value of the transmission coefficient to each of its three inputs (without including losses in the Lange directional coupler in the sections of a microstrip transmission line) is not less than −4.78 dB. At the same time decoupling between the input and two other inputs is provided, as well as between the outputs, which is not less than 20 dB in a 30% frequency band.

Keywords: microstrip power divider, Lange directional coupler, transmission coefficient, inputs and outputs decoupling

Введение

В бортовой аппаратуре космических аппаратов требуется соединять один из нескольких СВЧ-узлов или приборов с одним или несколькими другими СВЧ-узлами или приборами. Таким образом, обеспечивается, например, резервирование СВЧ-устройств. В качестве устройств перекрестного резервирования применяются делители мощности, чаще всего с двумя или тремя входами и выходами (2×2, 3×2 или 3×3). Для бортовой аппаратуры основными требованиями к делителям мощности являются: максимально возможный коэффицент передачи, равномерность деления мощности между выходами, относительно большая полоса рабочих частот, развязка между входами и между выходами, компактность и удобство интеграции с другими СВЧ-узлами, для чего входы и выходы делителей мощности должны быть обращены к противоположным сторонам диэлектрической подложки. Для ряда применений делителей мощности существенно их малое групповое время запаздывания в рабочем диапазоне частот. Известные делители мощности размерностью 3×2 (2×3) и 3×3 [1, 2] не удовлетворяют по крайней мере одному из перечисленных требований.

Известны делители мощности с различным количеством входов и выходов. Делители мощности 2×2 реализуются на 3 дБ мостах различного типа и имеют теоретический (без учета потерь) коэффициент передачи -3 дБ [1, 2].

Делители мощности 2×3 (3×2) в большинстве строятся на основе каскадного включения 3-децибельного моста и делителя мощности 1×2, подключаемого своим входом к одному из выходов моста [3,4]. Недостаток такого делителя мощности — неравмерность деления: на одном из выходов коэффициента передачи составляет порядка -3 дБ, а на двух других выходах — не менее -6 дБ.

Если необходимо иметь у делителя мощности три входа и три выхода, то рациональным решением считается делитель мощности, изображенный на рис. 1 [5].

Делитель мощности содержит четыре моста Ланге, расположенных таким образом, что они в проекции образуют квадрат. Внутренние концы мостов Ланге соединены между собой, а внешние

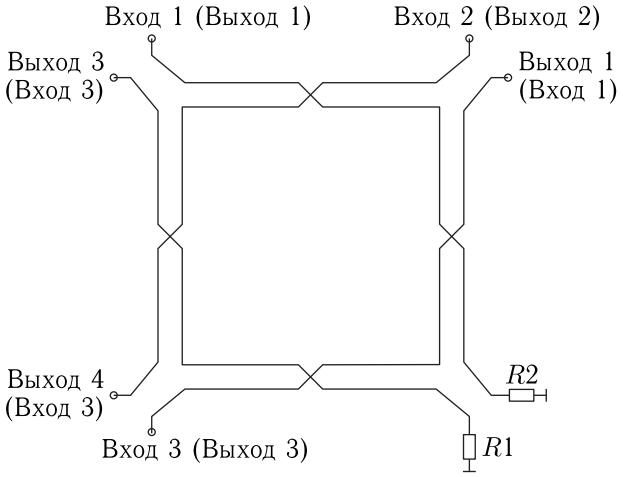


Рис. 1. Схема делителя мощности 4×4 (3×3) [4]

являются соответственно четырьмя входами и четырьмя выходами. Коэффициент передачи с любого входа на любой выход (без учета потерь в мостах Ланге) составляет -6 дБ. Если один из входов и один из выходов нагрузить на согласованную нагрузку в виде резистора (50 Ом), получаем делитель мощности 3×3; при том же коэфициенте передачи, нагружая один из других входов или выходов делителя, можно получить делители мощности 2×3 (3×2).

Недостаток такого делителя мощности — малый коэффициент передачи и то, что входы и выходы делителя мощности не могут быть расположены на противоположных сторонах диэлектрической подложки. Для того чтобы обеспечить требуемое расположение, необходимо ввести на диэлектрической подложке перекрестие входных и выходных отрезков микрополосковой линии, что, как правило, приводит к уменьшению коэффициента передачи.

Предлагается новый микрополосковый делитель мощности 3×3 (2×3) [5], удовлетворяющий перечисленным выше требованиям.

Устройство делителя мощности 3×3

Схема предложенного делителя мощности 3×3 представлена на рис. 2 [6].

Делитель мощности 3×3 выполнен на диэлектрической подложке 1, на которой расположены три микрополосковых НО Ланге (НО1, НО2, НО3)

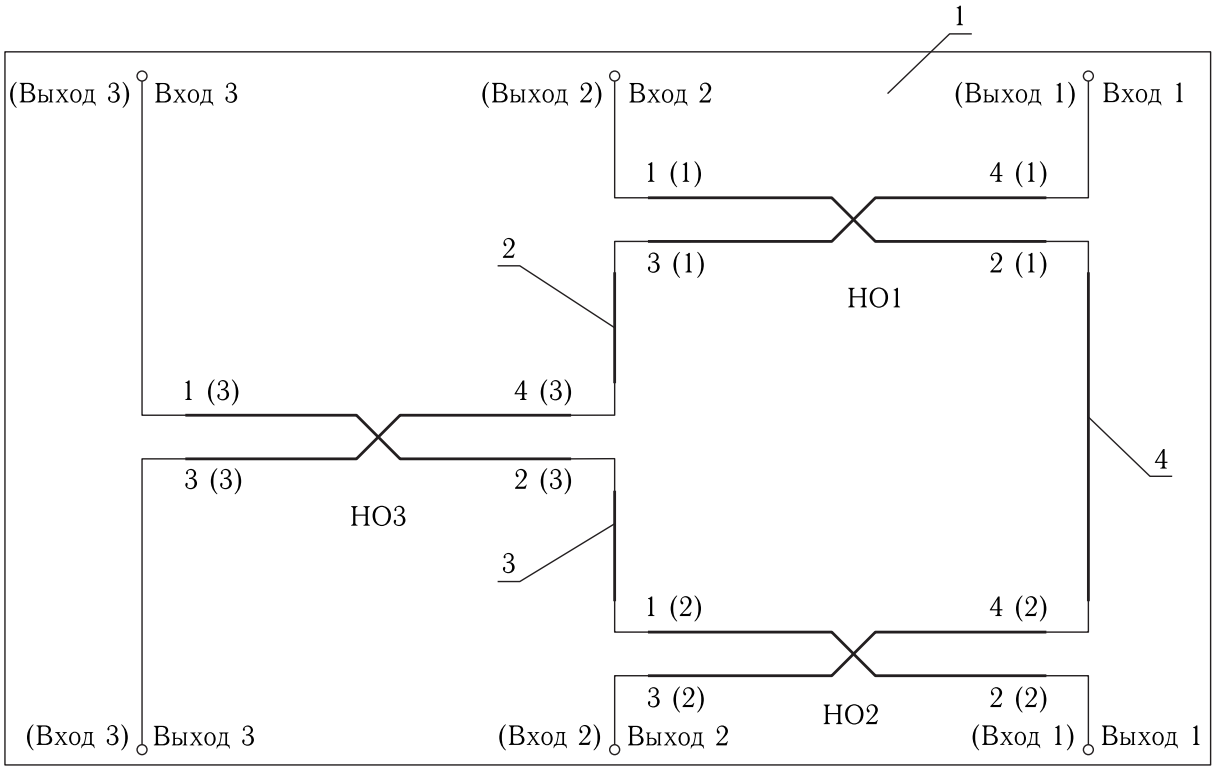


Рис. 2. Схема делителя мощности 3×3

на связанных линиях, однократно перекрещивающихся, и при этом НО1 и НО2 имеют переходное ослабление 3 дБ, а НО3 — 4,78 дБ. Каждый из двух концов связанных линий НО3, 4 (3) и 2 (3) соединен одним из двух одинаковых отрезков микрополосковой линии (МПЛ) 2 и 3 с одним из концов отрезков связанных линий НО1 и НО2 — 3 (1) и 1 (2); концы других отрезков связанных линий, расположенных с другой стороны НО1 и НО2 — 2 (1) и 4 (2), соединены между собой отрезком МПЛ 4, причем отрезки связанных линий НО1 и НО2 соединены с отрезками МПЛ 2, 3, 4 так, что их свободные концы 4 (1), 1 (1) и 2 (2), 3 (2) обращены к противоположным краям диэлектрической подложки. Таким образом, концы 4 (1), 1 (1) и 1 (3) являются входами (выходами), а концы 2 (2), 3 (2), 3 (3) — выходами (входами) делителя мощности 3×3. Входной сигнал подается на одни из входов: Вход 1, или Вход 2, или Вход 3.

С учетом величин модуля и фазы при распространении входного сигнала с одного из входов на выходы обеспечиваются одинаковые коэффициенты передачи. Для этого длина отрезка МПЛ 4 должна быть больше суммарной длины отрезков МПЛ 2 и 3 на величину от 0,19 до 0,21 длины волны на средней частоте рабочего диапазона. Рассмотрены пути прохождения входного сигнала на выходы делителя мощности 3×3. Коэффициент передачи со Входа 2 или со Входа 3 на Выходы 1, 2, 3 имеет то же самое значение.

Коэффициент передачи на средней частоте диапазона с любого из входов на любой из выходов равен $-4{,}78$ дБ без учета потерь в делителе мощности 3×3.

Отрезки МПЛ 2 и 3 вводятся для того, чтобы оптимизировать развязки между входами делителя мощности. Их длина может быть выбрана в пределах от 0,125 до 0,25 длины волны на средней частоте рабочего дипазона. Приведенные параметры делителя мощности 3×3 получены в результате моделирования в программе AWR Design Environment.

Подключение согласованной нагрузки (50 Ом) к одному из входов (выходов) делителя мощности 3×3 превращает его в делитель мощности 2×3 (3×2).

Конструкция и результаты экспериментальных исследований делителя мощности 3 × 3

Макет делителя мощности 3×3, предназначенный для работы в C-диапазоне частот, выполнен на подложке из поликора толщиной 1 мм. Топология макета делителя мощности 3 × 3 представлена на рис. 3.

Габариты подложки делителя мощности 3 × 3 не превышают 24 × 30 мм. Делитель мощности 3 × × 3 может быть выполнен как в виде отдельного прибора, так и в виде функционального узла, интегрированного в один из приборов бортовой аппаратуры, например в резервированный троированный усилитель мощности в качестве узла перекрестного резервирования.

На рис. 4–8 приведены основные экспериментальные характеристики делителя мощности 3 × 3

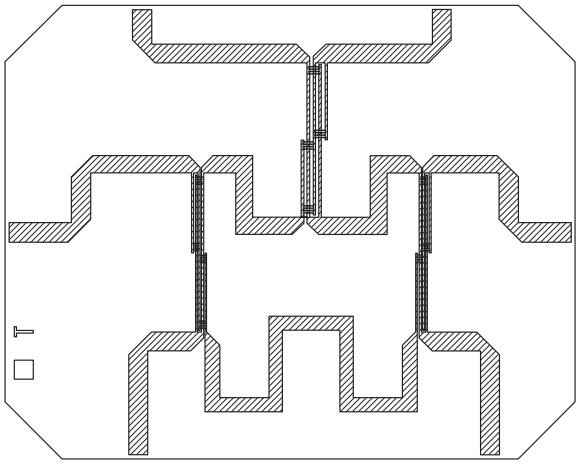


Рис. 3. Топология макета делителя мощности 3 × 3

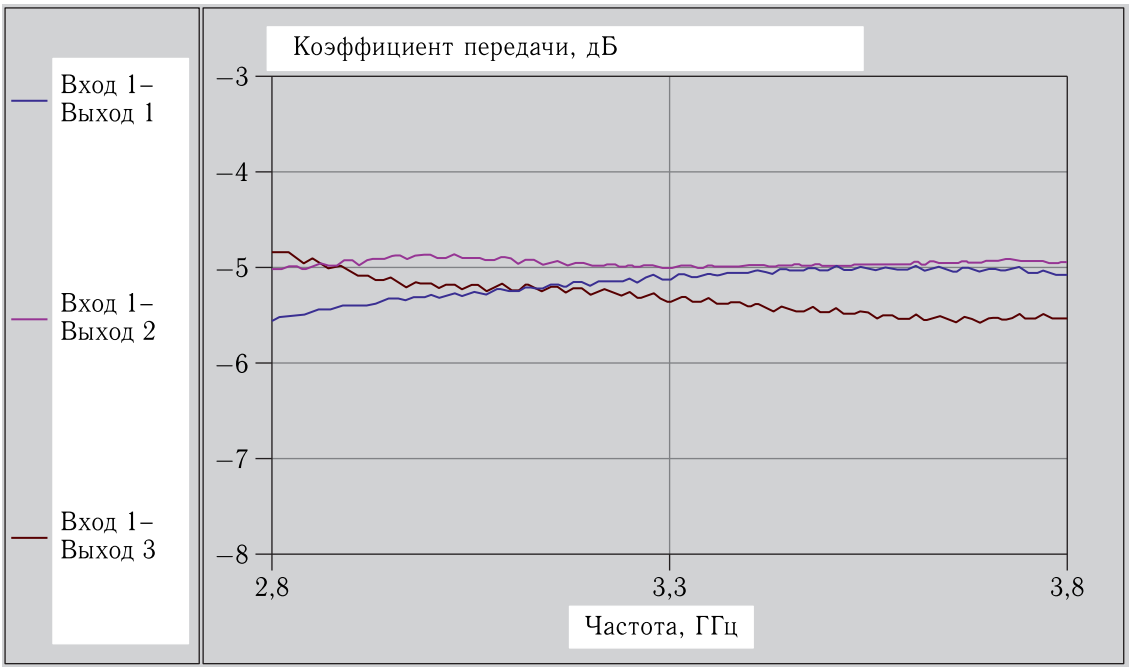


Рис. 4. Зависимость коэффициента передачи делителя мощности 3 × 3 со Входа 1 на Выходы 1, 2, 3 от частоты

C-диапазона частот, полученные в нормальных условиях: зависимости коэффициента передачи с одного из входов на каждый из трех выходов, развязки между входами, коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) входов и выходов и группового времени запаздывания от частоты. Как видно из рис. 4, вносимые потери делителя мощности 3×3 находятся в диапазоне от 4,9 до 5,5 дБ.

Развязка между входами (рис. 5) находится в диапазоне от 19 до 32 дБ.

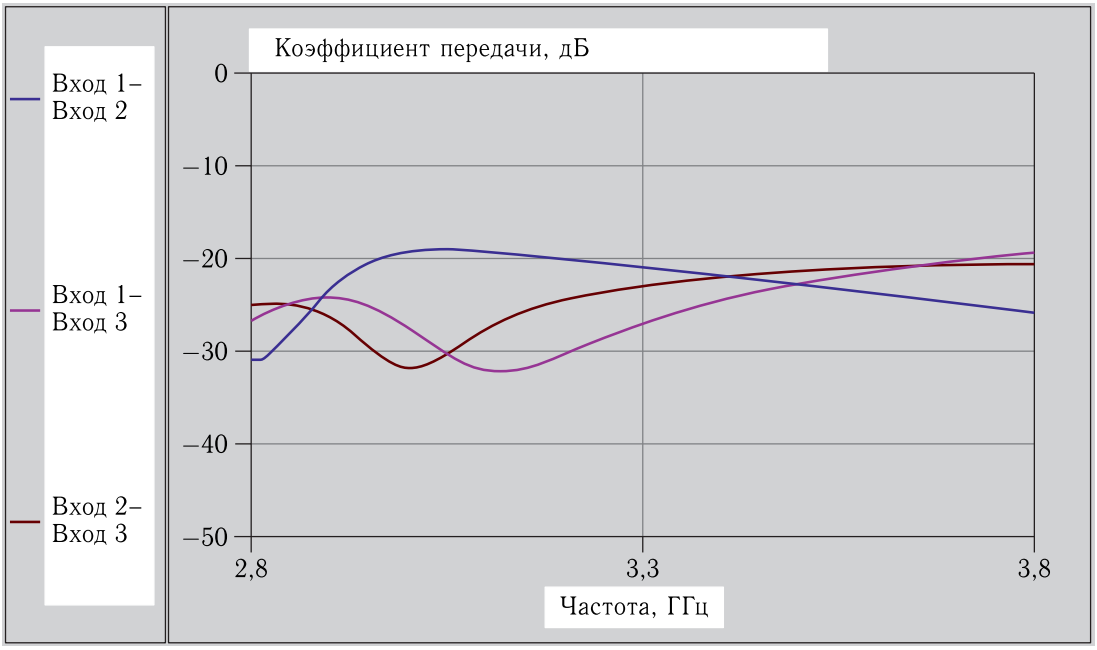


Рис. 5. Зависимость коэффициента передачи делителя мощности 3×3 со Входа 1 на Входы 2 и 3 и со Входа 2 на Вход 3 от частоты

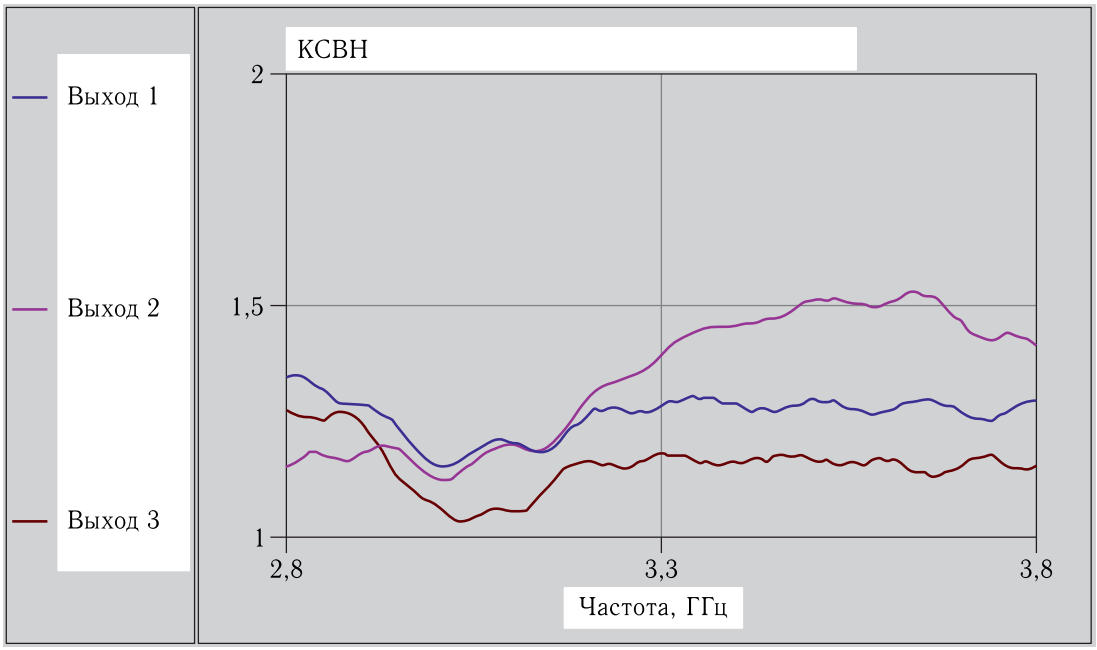


Рис. 6. Зависимость КСВН Входов 1, 2 и 3 делителя мощности 3×3 от частоты

КСВН входов и выходов (рис. 6 и 7) не превышает 1,5 дБ.

Групповое время запаздывания находится в диапазоне от 0,5 до 0,58 нс в полосе частот от 2,8 до 3,8 Гц (рис. 8).

Заключение

Представленный микрополосковый делитель мощности 3 × 3 имеет коэффициент передачи на 1,2 дБ выше, чем у ближайшего аналога [4].

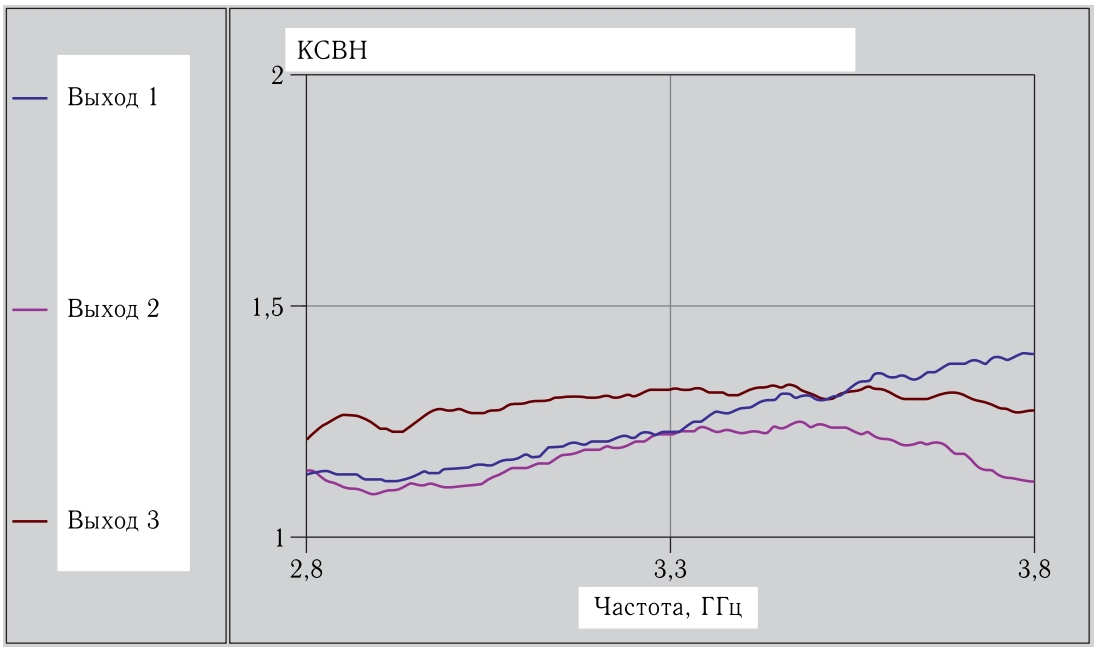


Рис. 7. Зависимость КСВН Выходов 1, 2 и 3 делителя мощности 3 × 3 от частоты

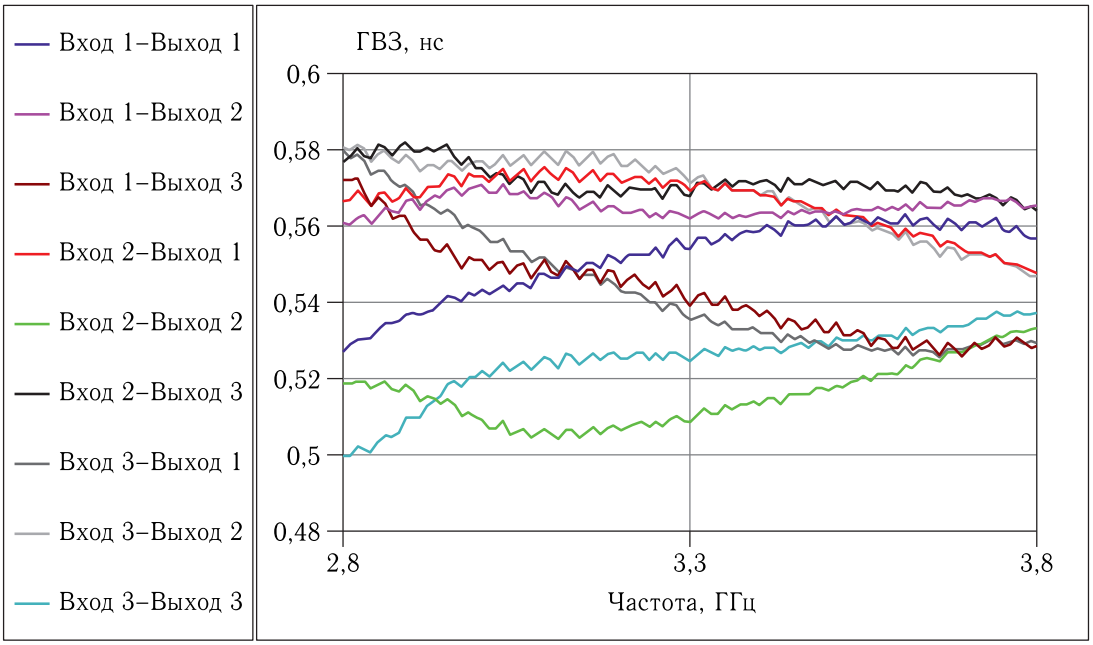


Рис. 8. Зависимость группового времени запаздывания делителя мощности 3 × 3 с каждого из входов на каждый из выходов от частоты

Делитель мощности является компактным устройством перекрестного резервирования с удобным расположением входов и выходов на противоположных сторонах делителя мощности 3×3. Он найдет применение в бортовой аппаратуре командно-измерительной системы космического аппарата, будучи установленным между выходами приемо-передающего устройств и входами усилителей мощности.

Список литературы

1. *Сазонов Д.М.*, *Гридин А.Н.*, *Мишустин Б.А.* Устройства СВЧ / Под ред. проф. Д.М. Сазонова. Москва: Высшая школа, 1981. 259 с.
2. *Chen A.C.*, *Pham A. and Leont R.E.* A 6–18 GHz Push-Pull Power Amplifier with Wideband Even-Oder Direction Cancellation in LCP Module. IEEE MTI-S Iht. Microwave Symp. Digest 2007, June 3–8, 2007. P. 1079–1082.
3. *Lange J.* Interdigitaled Stripline Quadrature Hybrid // IEEE Trans.inc. Microwave Theory and Techniques, 1969, vol. 17, no. 12. P. 1150–1151.
4. *Antsos D.R.*, *Crist R. and Sukamto L.* A Novel Wilkinson Power Divider with Pradictable Performance at K and Ka-Band // IEEE MTT-SDigest, 1994. P. 907–910.
5. *Алыбин В.Г.*, *Зарапин С.А.*, *Яхутин С.А.*, *Авраменко С.В.* Патент № 2608978 Российской Федерации. Делитель мощности для бортовой аппартуры космического аппарата: № 2015139377: заявл. 17.09.2015: 30.01.2017.
6. *Алыбин В.Г.*, *Зарапин С.А.*, *Яхутин С.А.* Патент № 2693877 Российской Федерации. Делитель мощности 3×3 для бортовой аппаратуры космических аппаратов: № 2018141772: заявл. 27.11.2018: опубл. 05.06.2019.

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ
2020, том 7, выпуск 1, с. 30–35

РАДИОТЕХНИКА И КОСМИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ

УДК 621.396.676 DOI 10.30894/issn2409-0239.2020.7.1.30.35

Построение многолучевых антенн абонентской радиолинии в *S*- и *Ka*-диапазонах частот

А. А. Аджибеков, *contact@spacecorp.ru*
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Работа посвящена разработке концепции построения многолучевых антенно-фидерных устройств абонентской радиолинии в *S* и *Ka*-диапазонах частот. Путем построения многолучевой антенны в виде цифровой антенной решетки обеспечивается формирование множества лучей и достигается плотное покрытие подспутниковой зоны в секторе углов ±50°. Диаграммообразование осуществляется цифровыми методами, что обеспечивает возможность гибкого оперативного изменения формы и направления главного максимума ДН каждого луча без изменения архитектуры антенной решетки.

В статье показано, что для удовлетворения заданным исходным данным, антенны целесообразно построить в виде цифровых антенных решеток: приемопередающей со 108 элементами в S-диапазоне частот, приемной и передающей со 108 элементами в *Ka*-диапазоне частот. При этом каждая антенная решетка формирует 61 луч в секторе ±50° с коэффициентом усиления 25,5 дБ и уровнем боковых лепестков менее −20 дБ.

Ключевые слова: антенно-фидерное устройство, многолучевая антенна, диаграмообразующая схема, антенная решетка, диаграмма направленности, коэффициент усиления

Building of Multibeam Antennas of a Subscriber Radio Link in *S*- and *Ka*-Frequency Bands

A. A. Adzhibekov, *contact@spacecorp.ru*
Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper is devoted to the development of the concept for building multibeam antenna-feeder devices of a subscriber radio link in S- and Ka-frequency bands. By building a multibeam antenna in the form of a digital antenna array, multiple beams are formed and tight coverage of a subsatellite zone is achieved in the angle sector ±50°. Beam formation is performed by digital methods, which provides possibility of flexible operational change of shape and direction of the principal maximum of radiation pattern of each beam without change in antenna array architecture.

The article shows that to meet the specified initial data, antennas are advisable to build in the form of digital antenna arrays: transceiver with 108 elements in the S-band, receiving and transmitting with 108 elements in the *Ka*-band. Each antenna array forms 61 beams in the sector ±50° with the 25.5 dB gain and the side lobe level not less than −20 dB.

Keywords: antenna-feeder device, multibeam antenna, beam-forming network, antenna array, radiation pattern, antenna gain

В настоящее время в наиболее развитых странах мира активизировались работы по созданию глобальных спутниковых систем связи на основе низкоорбитальных космических аппаратов (КА). Использование спутниковых группировок в низкоорбитальном сегменте для построения систем передачи данных имеет ряд преимуществ по сравнению с аналогичными системами на основе КА, размещенных на геостационарных орбитах, в том числе низкие задержки, возможность обеспечить устойчивую работу в области полюсов, менее жесткие требования к энергетическому потенциалу аппаратуры потребителя [1–3]. Тем не менее построение таких систем требует создание антенно-фидерных устройств (АФУ) абонентской радиолинии, обеспечивающих формирование нескольких десятков (сотен) лучей, обеспечивающих плотное покрытие в секторе углов до ± 50–60°. Многолучевые зеркальные антенны, широко применяемые при построении спутниковых систем связи в высокоорбитальном и среднеорбитальном сегментах, затруднительно применять на низких орбитах ввиду зависимости сектора сканирования от ширины диаграммы направленности (ДН) [4–6]. Согласно [6] при применении таких антенн может быть достигнут сектор сканирования до 10–20 ширин ДН, однако для обеспечения широкого сектора обзора вспомогательный рефлектор двухзеркальной антенны должен быть увеличен практически до размера основного зеркала, что приведет к увеличению массогабаритных параметров. Кроме того, в этом случае ширина луча по уровню -3 дБ на краю сектора обзора увеличивается практически в два раза.

Целью работы являлась разработка концепции построения бортовых многолучевых антенн абонентской радиолинии, работающих как на прием, так и на передачу, формирующих 61 луч в секторе $\pm 50^\circ$ в S и Ka-диапазонах частот.

Синтез пассивной многолучевой антенной решетки

Рассмотрим возможности построения бортовой многолучевой антенны, удовлетворяющей приведенным выше исходным данным. Для этого исследуем возможности ее построения в виде многолучевой антенной решетки (АР) с пассивной диаграммообразующей схемой (ДОС) без потерь [7, 8]. Известно, что АР с пассивной ДОС без потерь может сформировать несколько лучей одновременно, если диаграммы направленности (ДН) этих лучей удовлетворяют условию ортогональности [7, 8]:

$$\int F_i(\theta) \cdot F_j(\theta)\, d\theta = \delta_{ij}, \qquad (1)$$

где $F_i(\theta)$, $F_j(\theta)$ — нормированные ДН лучей; δ_{ij} — символ Кронекера.

Таким образом, в многолучевой АР с пассивной ДОС без потерь ДН лучей не могут иметь произвольную форму. Каждому ортогональному лучу при этом соответствует свое ортогональное амплитудно-фазовое распределение полей и, соответственно, направление главного максимума ДН, а также уровень боковых лепестков (УБЛ). Среди ортогональных амплитудных распределений есть как равномерное распределение, так и распределения, спадающие к краям. Для линейных и квадратных АР, к примеру, семейство ортогональных распределений имеет вид косинуса целой неотрицательной степени. При этом наибольший уровень пересечения соседних лучей составляет около -4 дБ при УБЛ около -13 дБ, что не всегда является приемлемым с точки зрения электромагнитной совместимости [9]. Использование косинусного распределения позволяет снизить УБЛ до величины -23 дБ, однако при этом уровень пересечения соседних лучей снижается до величины -9 дБ [8].

Снижение УБЛ с сохранением (или минимальным снижением) уровня пересечения соседних лучей возможно при построении АР с контуром апертуры, отличным от квадратного [10–13]. Для определения вида контура апертуры и шага излучателей решетки, формирующих ортогональные лучи с заданным набором направлений, воспользуемся методикой, изложенной в работах [10–13]. Суть этой методики в том, что в пространстве направляющих косинусов u, v ($u = \cos(\theta)\sin(\varphi)$, $v = \sin(\theta)\sin(\varphi)$, где θ и φ — полярный и азимутальный углы сферической системы координат) определяется область, которую необходимо накрыть лучами. В этом пространстве выбирается сетка, в узлах которой будут расположены направления лучей, а также, исходя из их необходимого количества,

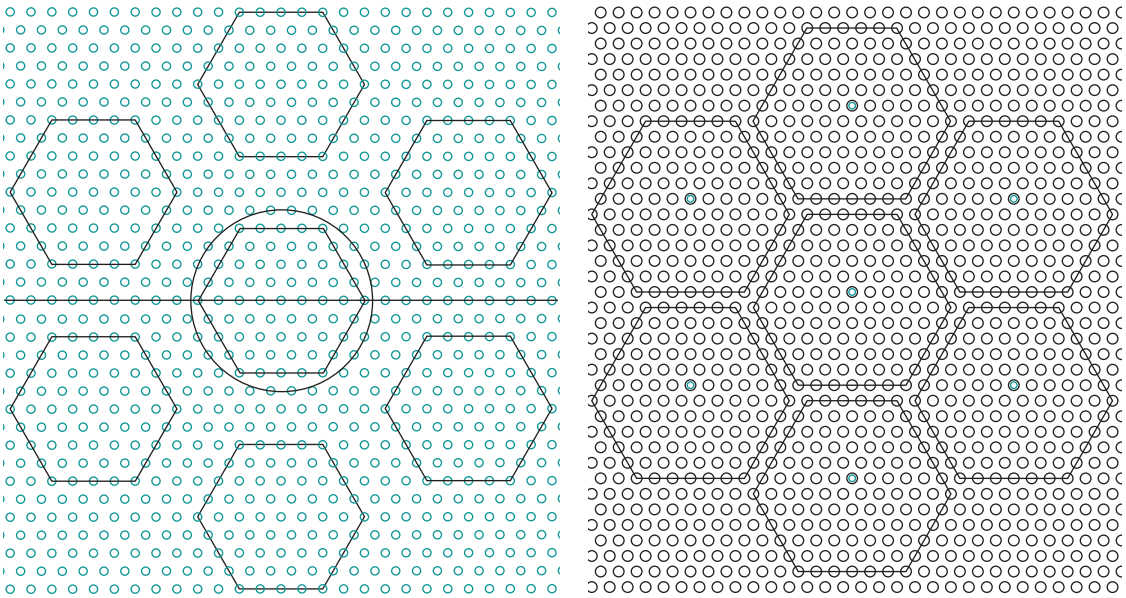


Рис. 1. Расположение лучей в пространстве направляющих косинусов (слева) и расположение излучателей (справа)

Таблица. Характеристики бортовых антенн *S*- и *Ka*-диапазонов частот

	S-диапазон. Прием, передача	*Ka*-диапазон	
		передача	прием
Количество лучей	61	61	61
Количество элементов АР	108	108	108
Расстояние между элементами, мм	93	9,3	6,2
Тип сетки	Треугольная	Треугольная	Треугольная
Поперечные габаритные размеры АР, мм	1116 × 966	111,2 × 96,6	74,4 × 64,4

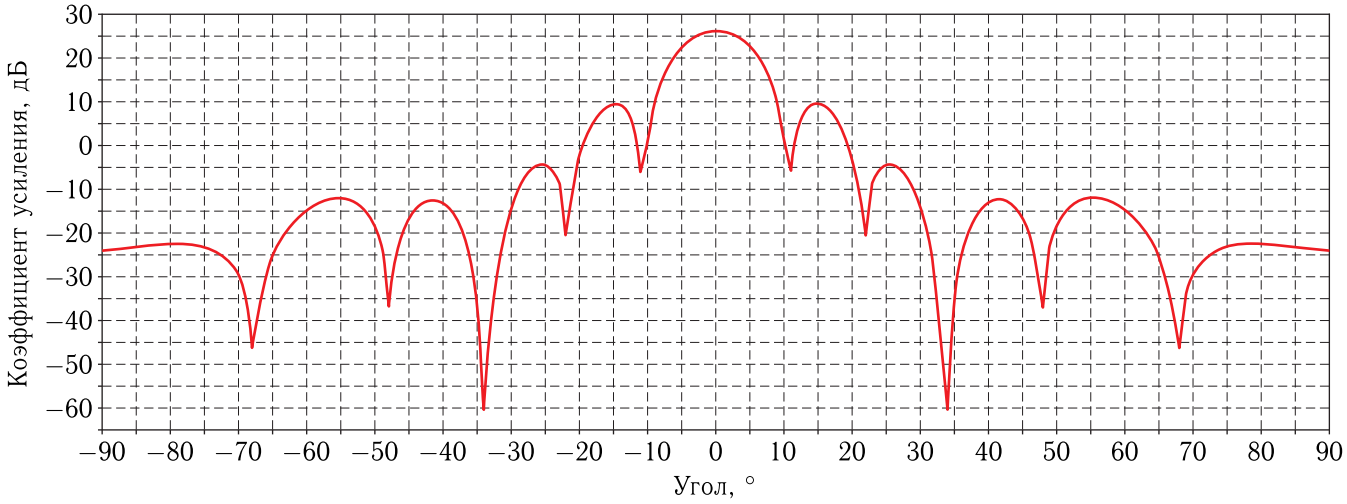


Рис. 2. Рассчитанная диаграмма направленности центрального луча антенных решеток *S*- и *Ka*-диапазонов частот

определяются угловые расстояния между соседними лучами. С использованием следующих ниже соотношений определяются: линейные размеры апертуры в плоскости xy; параметры сетки, в узлах которых располагаются излучатели антенной решетки; расстояния между ними:

$$D_x = \frac{\lambda}{\delta_u}, \quad (2)$$

$$D_y = \frac{\lambda}{\delta_v}, \quad (3)$$

$$d_x = \frac{\lambda}{\Delta_u}, \quad (4)$$

$$d_y = \frac{\lambda}{\Delta_v}, \quad (5)$$

где D_x — линейный размер апертуры по оси x;

D_y — линейный размер апертуры по оси y;

d_x — шаг решетки вдоль оси x;

d_y — шаг решетки вдоль оси y;

δ_u, δ_v — расстояния между соседними лучами по осям u и v в пространстве направляющих косинусов;

Δ_u, δ_v — параметры определяющие угловые направления дифракционных максимумов антенной решетки.

Геометрия контура апертуры выбирается из следующего правила: при многократной трансляции в плоскости xy этот контур может покрыть всю эту плоскость без пустот и пересечений. На рис. 1 проиллюстрированы положения максимумов ДН АР в пространстве направляющих косинусов (круг на рисунке слева соответствует области углов $\pm 50°$), формирующей 61 ортогональный луч; а также расположение излучателей в плоскости xy и контур апертуры АР.

В таблице приведены рассчитанные по методике [10–13] характеристики АР в *S*и *Ka*-диапазонах частот.

Рассчитанная диаграмма направленности центрального луча антенной решетки представлена на рис. 2.

Коэффициент усиления (КУ) антенной решетки составил 26,2 дБ, ширина ДН по уровню -3 дБ — 8,9°.

Как видно из рис. 2, УБЛ составляет -16–-17 дБ при уровне пересечения соседних лучей — $-4{,}5$ дБ [10–13]. При этом, согласно известной теореме из теории многолучевых антенн [7, 8], снижение УБЛ в АР с пассивной ДОС без потерь (при неизменной конфигурации АР) возможно только при соответствующем снижении уровня пересечения соседних лучей. Таким образом, возникает противоречие: невозможно одновременно получить плотное покрытие заданной области лучами при низком УБЛ.

Построение облика многолучевой антенной решетки с цифровым диаграмообразованием

Разрешить возникшее противоречие возможно путем использования цифровых методов диаграммообразования [14, 15]. Сформулированная для многолучевых антенн с пассивными ДОС без потерь теорема к АР с цифровым диаграммообразованием неприменима [8, 14, 15] (ввиду того, что цифровые ДОС пассивными не являются), так что при использовании цифровых методов диаграммообразования возможно формирование лучей практически с любым сочетанием уровней пересечения соседних лучей и УБЛ. Функциональные схемы приемного и передающего модулей АР с цифровым диаграммообразованием представлена на рис. 3. Приемный модуль состоит из малошумящего усилителя МШУ, преобразователя частоты ПЧ, квадратурного демодулятора КДМ и аналого-цифровых преобразователей АЦП. Передающий модуль состоит из усилителя мощности УМ, квадратурного модулятора КМ и цифро-аналогового преобразователя ЦАП.

Рассмотрим возможности формирования ДН с пониженным УБЛ в АР с параметрами, приведенными в таблице 1. Для этого аналитически построим ДН АР с помощью следующего соотношения [7]:

$$f(\theta,\varphi) = f_0(\theta,\varphi) \cdot \sum A_i \times \\ \times e^{j\cdot k\cdot(x_i\cdot\sin(\theta)\cdot\cos(\varphi)+y_i\sin(\theta)\cdot\sin(\varphi))-j\cdot\psi_i}, \quad (6)$$

где θ — полярный угол сферической системы координат;

φ — азимутальный угол сферической системы координат;

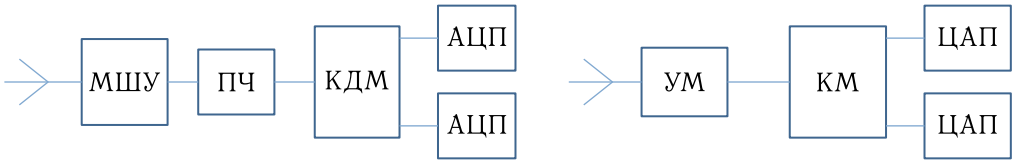


Рис. 3. Функциональные схемы приемного (слева) и передающего (справа) модулей антенной решетки с цифровым диаграммообразованием [14]

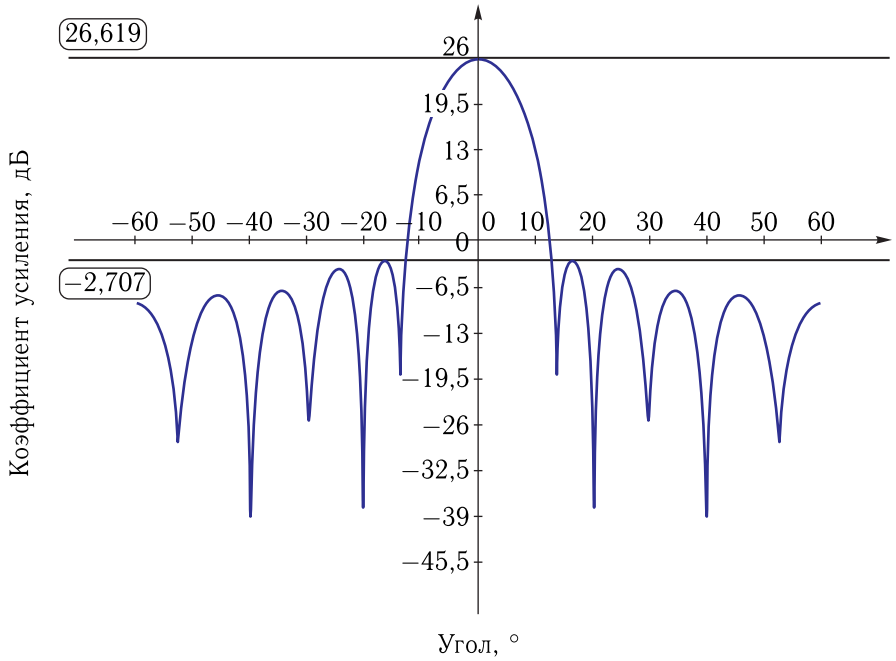


Рис. 4. Рассчитанная диаграммы направленности центрального луча антенной решетки с распределением Хансена

$f_0(\theta, \varphi)$ — ДН слабонаправленного излучателя;

A_i — амплитуда возбуждения i-го излучателя;

ψ_i — фаза возбуждения i-го излучателя;

x, y — координаты i-го излучателя;

k — волновое число;

j — мнимая единица.

В качестве амплитудного распределения выберем однопараметрическое распределение Хансена [8]. На рис. 4 представлено сечение рассчитанной с помощью (6) ДН АР. Как видно из рисунка, КУ составляет 25,6 дБ, при УБЛ −28 дБ и ширине ДН по уровню −3 дБ 9–10°. При этом могут быть обеспечены направления лучей, определенные ранее при синтезе АР, представленые на рис. 1, что позволяет сохранить уровень пересечения лучей, полученный для АР с пассивной ДОС.

Выводы

В статье дано обоснование способа формирования облика бортовых антенн абонентской радиолинии в S и Ka-диапазонах частот. Показано, что для удовлетворения заданным исходным данным эти антенны целесообразно построить в виде цифровых антенных решеток: приемопередающей со 108 элементами в S-диапазоне частот; приемной и передающей со 108 элементами в Ka-диапазоне частот. При этом каждая АР формирует 61 луч в секторе ±50° с коэффициентом усиления 25,5 дБ и УБЛ менее −20 дБ.

Список литературы

1. *Томаси У.* Электронные системы связи. М.: Техносфера, 2007. 1360 с.

2. *Бертенев В.А.*, *Болотов Г.В.*, *Быков В.Л. и др.* Под ред. Л.Я. Кантора. Спутниковая связь и вещание: Справочник. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1997. 528 с.

3. Наблюдение искусственных спутников Земли. Гл. 2: Какие орбиты и ИСЗ бывают. http://www.sat.belastro.net/glava2/glava2.php (Дата обращения 15.04.18).

4. *Калошин В.А.*, *Фролова Е.В.* Моделирование офсетной двухзеркальной апланатической антенны типа Грегори // Журнал радиоэлектроники, 2007, вып. 6.

5. *Калошин В.А.*, *Фролова Е.В.* Моделирование офсетной двухзеркальной апланатической антенны типа Кассегрена // Журнал радиоэлектроники, 2007, вып. 7.

6. *Бахрах Л.Д.*, *Галимов Г.К.* Зеркальные сканирующие антенны. М.: Наука, 1981. 293 с.

7. *Воскресенский Д.И.*, *Гостюхин В.Л.*, *Максимов В.М.*, *Пономарев Л.И.* Устройства СВЧ и антенны. М.: Радиотехника, 2006. 376 с.

8. *Хансен Р.С.* Фазированные антенные решетки. Пер. с англ. под ред. А.И. Синани. М.: Техносфера, 2012. 560 с.

9. *Пономарев Л.И.*, *Вечтомов В.А.*, *Милосердов А.С.* Под редакцией Л.И. Пономарева. Бортовые цифровые многолучевые антенные решетки для систем спутниковой связи. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. 197 с.

10. *Skobelev S.P.* A general approach to the design of planar array antennas for forming of multiple orthogonal beams, in Proc. Int. Conf. Electromagn. Adv. Appl. (ICEAA), Cape Town, South Africa, Sep. 2–7, 2012. P. 454–457.

11. *Skobelev S.P.* Determination of dimensions and shape of a planar aperture fo forming of orthogonal beams // IEEE Trans. Antennas Propag., Aug. 2008, vol. 56, no. 8. P. 2755–2757.

12. *Skobelev S.P.* On one more property of the ideal array element patterns // IEEE Trans. Antennas Propag., Mar. 2009, vol. 57, no. 3. P. 631–637.

13. *Skobelev S.P.* On the Forming of Orthogonal Beams by Planar Array Antennas // IEEE transactions on antennas and propagation, Apr. 2014, vol. 62, no. 4.

14. *Григорьев Л.Н.* Цифровое формирование диаграммы направленности в фазированных антенных решетках. М.: Радиотехника, 2010. 144 с.

15. *Воскресенский Д.И.*, *Овчинников Е.В.*, *Шмачилин П.А.* Бортовые цифровые антенные решетки и их элементы. М.: Радиотехника, 2013. 208 с.

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ
2020, том 7, выпуск 1, с. 36–41

РАДИОТЕХНИКА И КОСМИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ

УДК 621.3.049.7 DOI 10.30894/issn2409-0239.2020.7.1.36.41

Малошумящий усилитель приемо-передающего модуля активной фазированной решетки *Ka*-диапазона частот

А. В. Буянкин, *buyankin.av@spacecorp.ru*
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация
В. Э. Поймалин, *poimalin.ve@spacecorp.ru*
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация
А. А. Нелин, *к. воен. н., innovation@spacecorp.ru*
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация
Л. Е. Рагулина, *к. ф.-м. н., ragulina.le@mipt.ru*
Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Московская область, Российская Федерация
М. В. Рыжаков, *mryzhakov@applmech.mipt.ru*
Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Московская область, Российская Федерация

Аннотация. В рамках разработки опытного образца приемо-передающего модуля (ППМ) активной фазированной антенной решетки (АФАР) на основе комбинирования технологии многослойных печатных СВЧ-плат и управляющей системы на кристалле был разработан монолитный малошумящий усилитель (МШУ) для диапазона частот 30–36 ГГц, созданный по технологии pHEMT GaAs с топологической нормой 0,15 мкм. Разработка выполнена с помощью современных систем автоматического проектирования и моделирования. Проведены исследования по оптимизации топологии усилителя для ППМ АФАР. Результаты расчетов были использованы для проектирования схемы и топологии усилителя в средах Microwave Office и Advanced Design System.

В статье показано, что на частоте 33 ГГц коэффициент усиления МШУ достигает 15 дБ при коэффициенте шума не более 3 дБ.

Ключевые слова: монолитная интегральная схема, малошумящий усилитель, pHEMT, активная фазированная решетка

Low-Noise Amplifier for the Transceiver Module of a *Ka*-band Active Phased Array

A. V. Buyankin, *buyankin.av@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation
V. E. Poimalin, *poimalin.ve@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation
A. A. Nelin, *Cand. Sci. (Mil.), innovation@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation
L. E. Ragulina, *Cand. Sci. (Phys.-Math.), ragulina.le@mipt.ru*
Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow region, Russian Federation
M. V. Ryzhakov, *mryzhakov@applmech.mipt.ru*
Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow region, Russian Federation

Abstract. A monolithic low-noise amplifier (LNA) for the 30–36 GHz frequency band with the implementation of pHEMT GaAs technology with a 0.15 μm layout rule was created as part of the process of designing a prototype transceiver module (TM) for an active phased array antenna (APAA) based on the combination of multilayer microwave (MW) printed circuit boards and control system-on-chip technologies. The development was carried out with the help of present-day systems of automated design and simulation. Research on optimizing the amplifier layout for the APAA TM was carried out. Results of calculations were used to design the circuit and layout of the amplifier in the Microwave Office and Advanced Design System environments.

The article demonstrates that LNA gain reaches 15 dB with a noise figure of no more than 3 dB at a frequency of 33 GHz.

Keywords: monolithic integrated circuit, MIC, low-noise amplifier, LNA, pHEMT, active phased array antenna, APAA, AESA

Введение

В настоящее время наблюдается стремительное развитие космических систем радиолокации и связи, что влечет за собой существенное увеличение количества космических аппаратов (КА) и увеличение объемов передаваемой информации по каналам связи. При этом частотный ресурс в разрешенных диапазонах *P*, *L*, *S*, *C*, *X* весьма ограничен и в большинстве случаев занят существующими системами. В связи с этим перед разработчиками перспективных космических систем связи стоит задача освоения миллиметровых диапазонов *K*- и *Ka*- для связи как между КА, так и между КА и наземными станциями [1]. При этом одной из современных тенденций является широкое применение активных фазированных антенных решеток (АФАР) в космических радиолиниях.

Актуальность работы подтверждается проводимыми в настоящее время комплексными проектами по созданию высокотехнологичных производств, в том числе и приемо-передающих модулей с активной фазированной антенной решеткой на основе современных технологий. Проект от 31.05.2018 № 074-11-2018-014, выполняемый в рамках соглашения с Минобрнауки России и кооперации с вузами (Постановление Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218), — тому подтверждение. Решаемая комплексная задача при этом является сложной как с научной, так и с производственной и технологической точек зрения.

Одна из главных задач при создании приемо-передающих модулей *Ka*-диапазона частот — увеличение чувствительности приемника [2]. Для решения данной задачи требуется создание монолитной интегральной схемы (МИС) МШУ с достаточно малым коэффициентом шума. Наиболее подходящей для создания МШУ *Ka*-диапазона частот является технология pHEMT GaAs с топологической нормой 0,15 мкм [3]. В связи с необходимостью интеграции МШУ непосредственно в антенну к блоку МШУ могут быть предъявлены более жесткие требования по внешним воздействующим факторам (ВВФ), в особенности по спецфакторам. Поэтому технология создания МИС должна быть в наименьшей степени подвержена воздействию космических излучений и др. [4].

Таблица. Требуемые параметры МШУ

№ п/п	Наименование параметра, единица измерения	Буквенное обозначение параметра	Норма параметра	
			не менее	не более
Параметры				
1	Диапазон рабочих частот, ГГц	f	30	36
2	Коэффициент усиления, дБ	$K_{у}$	15	–
3	Коэффициент шума, дБ	$K_{ш}$	–	3,1
4	Максимальная выходная мощность, дБмВт	$P_{вых}$	10	
5	КСВН входа/выхода	$K_{ст}U$		2,0
6	Ток потребления, мА	I		80

Требуемые параметры МШУ представлены в таблице.

На основе процесса pHEMT 0,15 мкм разработан 2-каскадный МШУ с напряжением питания 5 В и напряжением смещения 0,7 В (рис. 1).

Принципиальная схема МШУ при реализации на микрополосковых линиях представлена на рис. 2.

На основе принципиальной схемы сгенерирована топология усилителя (рис. 3). Размер МИС МШУ 2500 × 1000 мкм. Расчетный ток потребления — менее 80 мА.

В процессе разработки МШУ проведено моделирование выходной мощности. В результате достигнуто значение выходной мощности МШУ на уровне 15 дБм. На рис. 4 представлен гармонический сигнал усилителя при максимальной мощности на выходе.

Моделирование топологии было произведено методом косимуляции (рис. 5), смысл которого состоит в том, что электромагнитное моделирование производится без транзисторов. Модели транзисторов при получениии характеристик МШУ подгружаются из схемотехнического редактора.

Результаты моделирования максимального коэффициента усиления МИС МШУ в схемотехническом и топологическом редакторах представлены на рис. 6.

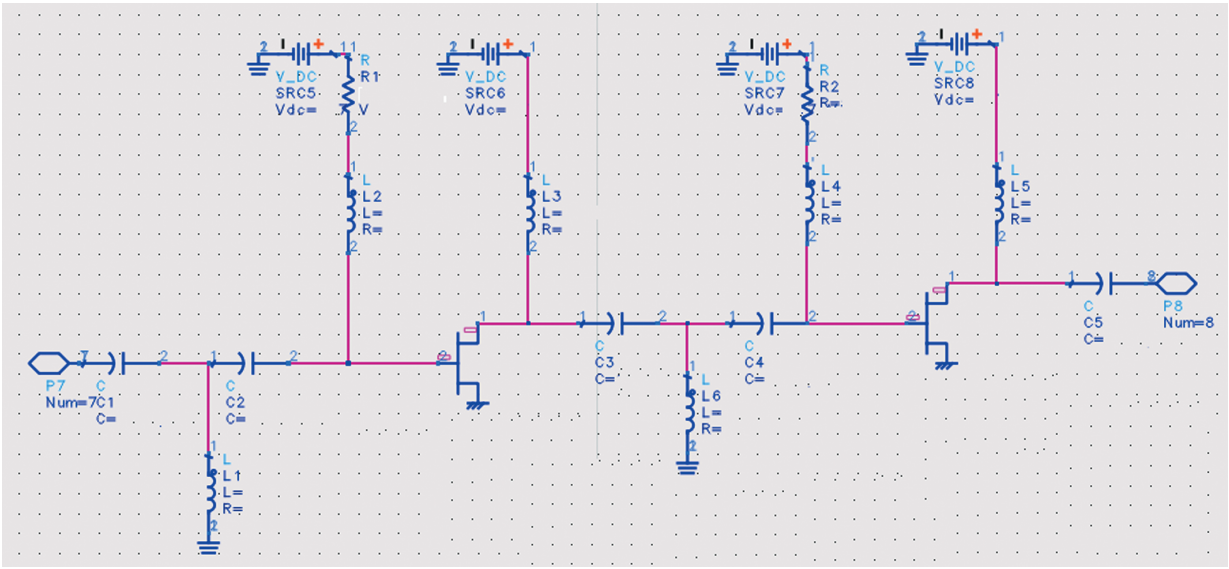


Рис. 1. Принципиальная схема МШУ

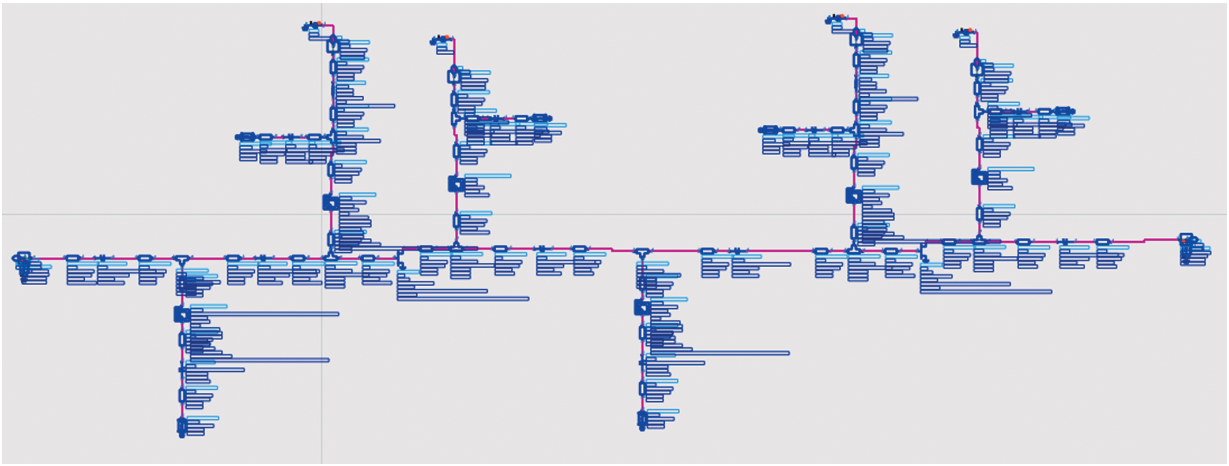


Рис. 2. Принципиальная схема МШУ при реализации на микрополосковых линиях

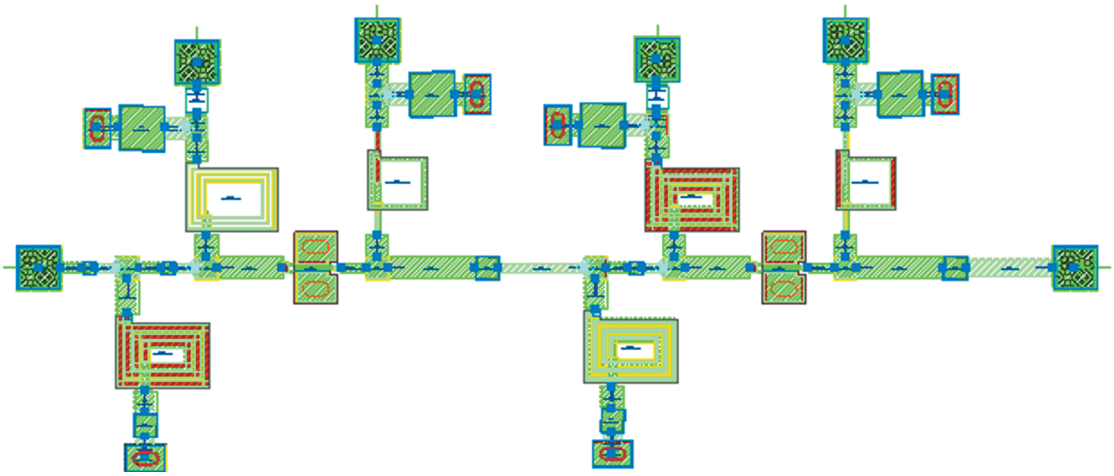
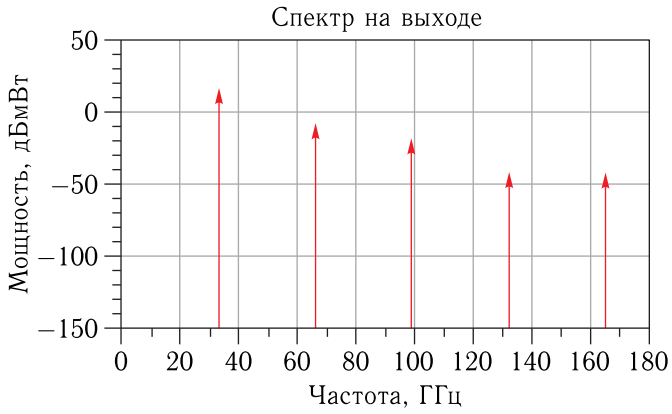


Рис. 3. Топология МИС МШУ



Частота несущей, ГГц	Мощность входного сигнала, дБм	Мощность несущей на выходе, дБм	Коэффициент преобразования
33,00	0,0000	15,296	15,296

Вторая гармоника, дБн	Третья гармоника, дБн	Четвертая гармоника, дБн	Пятая гармоника, дБн
−23,48	−35,52	−57,58	−59,34

Рис. 4. Значение максимальной выходной мощности МИС МШУ и ближайших гармоник

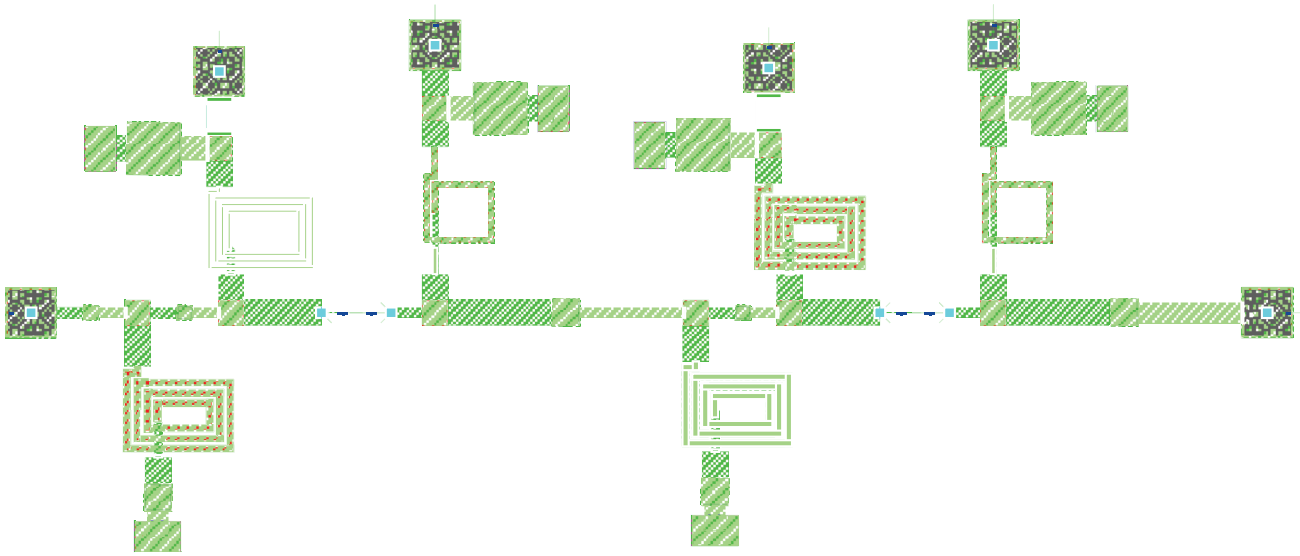


Рис. 5. Режим косимуляции МИС МШУ

Результаты топологического моделирования соответствуют предварительным оценкам. Усиление, полученное в топологии, в среднем на 2 дБ меньше, чем результаты схемотехнического проектирования. На рис. 7 даны результаты моделирования частотной зависимости коэффициентов отражения по входу и выходу.

Результаты топологического моделирования в части коэффициента отражения по входу оказались лучше, чем результаты схемотехнического

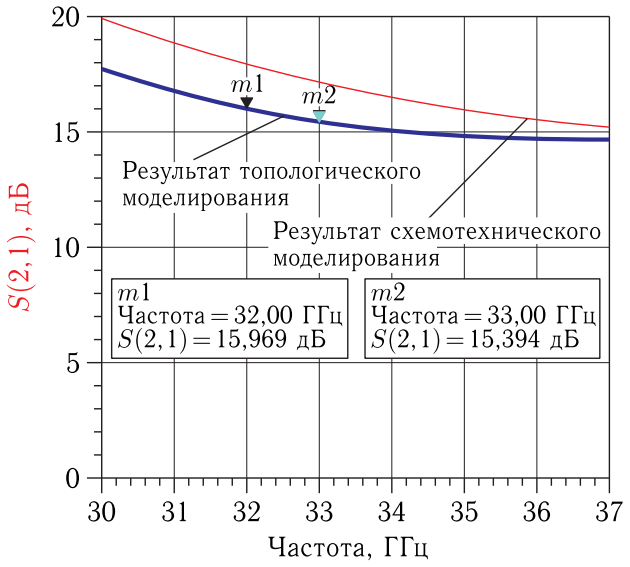


Рис. 6. Сравнение результатов моделирования коэффициента усиления (S21) МИС МШУ

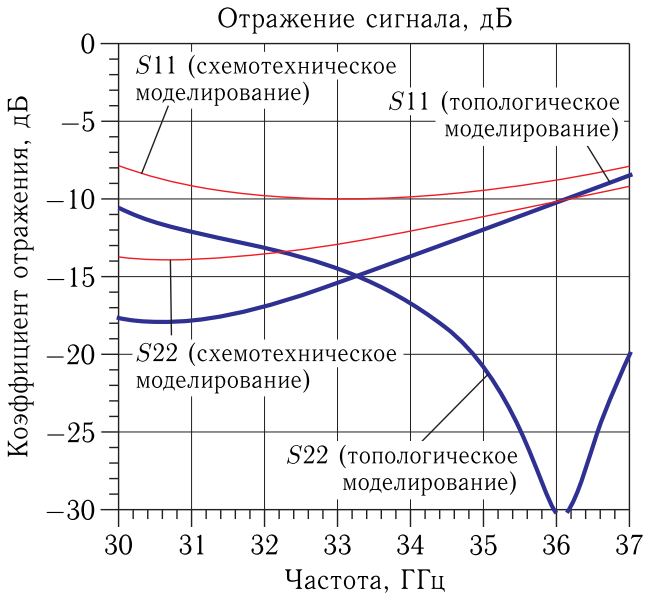


Рис. 7. дБ МШУ

моделирования. Результаты топологического моделирования в части коэффициента отражения по выходу частично не соответствуют результатам схемотехнического моделирования, однако не выходят за границы требований в частотном диапазоне 30–34 ГГц.

На рис. 8 приведены результаты моделирования коэффициентов шума МИС МШУ.

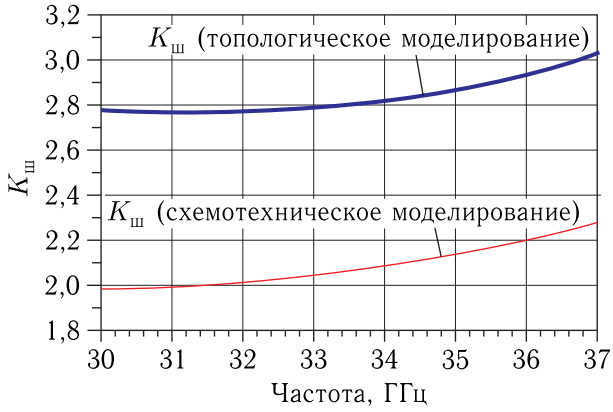


Рис. 8. Сравнение результатов моделирования коэффициентов шума МИС МШУ

По результатам топологического моделировния значение коэффициента шума не превышает 3 дБ, а в диапазоне частот 30–33 ГГц коэффициент шума составляет 2,8 дБ.

Выводы

Исходя из результатов проведенного моделирования можно прийти к выводу, что прогноз по наиболее оптимальному использованию технологии pHEMT 0,15 мкм для создания МШУ *Ka*-диапазона частот был подтвержден. Разработанная топология МИС МШУ может быть использована с необходимыми конструктивными изменениями для создания приемного тракта кор-чипа ППМ АФАР *Ka*-диапазона частот.

Статья подготовлена в рамках соглашения АО «Российские космические системы» с Минобрнауки России от 31.05.2018 № 074-11-2018-014. Соглашение заключено на основании Постановления Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских образовательных организаций высшего образования, государственных учреждений и организаций» для реализации комплексных проектов по созданию высокотехнологичного производства в рамках подпрограммы «Институциональное развитие научно-исследовательского сектора» государственной программы Российской Федерации «Развитие науки и технологий на 2013–2020 годы».

Список литературы

1. *Гнатюк Д. Л.*, *Федоров Ю. В.*, *Галиев Г. Б.*, *Галиев Р. Р.*, *Щербакова М. Ю.* Монолитные интегральные схемы малошумящих усилителей КВЧ-диапазона на GaAs pHEMT-гетероструктурах // Доклады ТУСУРа, 2010, № 2 (22), ч. 1. С. 49–55.

2. *Yang Hou*, *Ruming Wen*, *lingyun Li et al*. Analysis and optimum design of impedance matching for Ka-band cryogenic low noise amplifiers [C] // Asia Pacific Microwave Conference. Singapore, 2009. P. 1593–1596.

3. *Wang Gang*, *Chen Wei*, *Liu Jiarui*, *Mo Jiongjiong*, *Chen Hua*, *Wang Zhiyu*, *Yu Faxin et al*. Design of a broadband Ka-band MMIC LNA using deep negative feedback loop // IEICE Electronics Express, 2018, vol. 15, iss. 10.

4. *Wei-Tsung Li*, *Jeng-Han Tsai*, *Hong-Yuan Yang*, *Wei-Hung Chou*, *Shyh-Buu Gea*, *Hsin-Chia Lu*, *Tian-Wei Huang et al*. Parasitic-Insensitive Linearization Methods for 60-GHz 90-nm CMOS LNAs // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Aug. 2012, vol. 60, no. 8. P. 2512–2523.

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ
2020, том 7, выпуск 1, с. 42–50

РАДИОТЕХНИКА И КОСМИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ

УДК 621.317.08 DOI 10.30894/issn2409-0239.2020.7.1.42.50

Приемный канал СВЧ-гиперспектрометра с двумя приемниками для аэрокосмического зондирования Земли

А. В. Убайчин, *к. т. н., с. н. с., доцент, ubaychin@tpu.ru*
Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Российская Федерация

Аннотация. Приведена разработанная структурная схема приемного канала СВЧ-гиперспектрометра на основе нового СВЧ-радиометра с двумя приемниками. Описан алгоритм функционирования приемного канала СВЧ-гиперспектрометра. Показанный вариант использования двух полупроводниковых генераторов шума для построения передаточной характеристики СВЧ-радиометра позволяет уменьшить зависимость результатов измерений от дестабилизирующих факторов радиометрических измерений в виде дрейфа собственных шумов и коэффициента передачи радиометрического приемника.

Предложен способ формирования опорного генератора низкотемпературного шума из собственных шумов малошумящего усилителя. Способ основывается на реализации низкотемпературного шума, обусловленного шумовой волной на входе малошумящего усилителя, работающего в согласованном режиме, при постоянных шумовых параметрах. Данный способ позволяет осуществить перенос направленного ответвителя из антенного канала СВЧ-радиометра в канал опорного генератора шума, что обусловливает повышение флуктуационной чувствительности за счет снижения потерь на входе системы.

Представлена математическая модель оценки погрешности измерений как функции точности термостатирования, температурных коэффициентов и величины потерь в элементах и узлах входной высокочастотной части. Показана возможность повышения разрешающей способности по частоте в два раза при заданной флуктуационной чувствительности, длительности одного измерения и уровне шумов за счет использования двух работающих параллельно радиометрических приемников. На основании разработанной математической модели приведены результаты численного эксперимента по оценке точности измерений при различных технических параметрах входной высокочастотной части.

Использование предложенного СВЧ-радиометра позволяет уменьшить зависимость результатов измерений от точности термостатирования по сравнению с существующими СВЧ-радиометрами, использующими пассивные генераторы шума.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, научное приборостроение, температурная стабильность, СВЧ-гиперспектральные исследования, погрешность измерений

Receiving Channel of UHF-Hyperspectrometer with Two Receivers for Earth Remote Sensing

A. V. Ubaychin, *Cand. Sci. (Engineering), senior researcher, associate professor, ubaychin@tpu.ru*
Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

Abstract. The developed block diagram of the receiving channel of a microwave hyperspectrometer based on a new microwave radiometer with two receivers is presented. An algorithm for the functioning of the receiving channel of the microwave hyperspectrometer is described. The presented method of using two semiconductor noise generators for building the transfer characteristic of a microwave radiometer makes it possible to reduce the dependence of the measurement results on the destabilizing factors of radiometric measurements in the form of a drift of self-noise and the transmission coefficient of the radiometric receiver.

A method of forming a reference generator of low-temperature noise from the self-noise of a low-noise amplifier is proposed. The method is based on the implementation of low-temperature noise caused by a noise wave at the input of the low-noise amplifier operating in a coordinated mode with constant noise parameters. This method allows the transfer of the directional coupler from the antenna channel of the microwave radiometer to the channel of the reference noise generator, which leads to an increase in fluctuation sensitivity by reducing losses at the input of the system.

A mathematical model for estimating the measurement error as a function of thermostating accuracy, temperature coefficients, and losses in the elements and nodes of the high-frequency input is presented. The possibility of increasing the frequency resolution by a factor of two at a given fluctuation sensitivity, duration of one measurement and noise level due to the use of two radiometric receivers operating in parallel is presented. Based on the developed mathematical model, the results of a numerical experiment to assess the accuracy of measurements at various technical parameters of the high-frequency input are presented.

Using the proposed microwave radiometer makes it possible to reduce the dependence of the measurement results on the accuracy of temperature control compared to existing microwave radiometers using passive noise generators.

Keywords: remote sensing, scientific instrumentation, temperature stability, microwave hyperspectral studies, measurement error

Введение

Неуклонный рост потребности к повышению качества и количества информации, получаемой при дистанционном зондировании, приводит к необходимости поиска новых методов и подходов к его проведению. Одним из наиболее перспективных является гиперспектральный метод исследований, позволяющий получить информацию об объекте путем измерения его излучения в различных участках спектра. Повышение объема данных о спектральном составе излучения приводит к улучшению эффективности решения обратных задач характеризации исследуемого объекта.

Наибольшее распространение гиперспектральные методы получили в оптическом и ИК-диапазонах. Это связано с технологической простотой реализации большого числа сенсоров, работающих в различных спектральных диапазонах [1].

Прогресс развития и миниатюризации СВЧ-техники позволил реализовать гиперспектральные исследования в СВЧ-диапазоне. СВЧ-гиперспектрометры состоят из нескольких СВЧ-радиометров. Один или несколько СВЧ-радиометров, работающих на близких частотах, образуют приемный канал СВЧ-гиперспектрометра. Современные СВЧ-гиперспектрометры обладают десятками и сотнями приемных каналов и перекрывают диапазон частот от единиц до сотен гигагерц [2].

Повышение информативности при СВЧ-гиперспектральных исследованиях обусловливает требование по увеличению разрешающей способности по частоте. Это требование приводит к необходимости уменьшения рабочей полосы частот в применяемых СВЧ-радиометрах. Уменьшение рабочей полосы частот при заданной шумовой температуре радиометрического приемника приводит к ухудшению флуктуационной чувствительности и увеличению длительности измерений.

Бортовое базирование СВЧ-гиперспектрометров определяет повышенные требования по устойчивости к изменяющимся факторам внешней среды. Современные СВЧ-гиперспектрометры, как правило, выполняются на классических СВЧ-радиометрах. Такие СВЧ-радиометры требуют дополнительной стабилизации радиометрического приемника, что в случаях аэрокосмического базирования является фактором, ограничивающим их эффективное применение.

В связи с упомянутыми выше особенностями реализации СВЧ-гиперспектральных измерений актуальной является задача разработки нового подхода к реализации приемных каналов на основе СВЧ-радиометров нового типа, позволяющих реализовать совокупность повышенного спектрального разрешения и устойчивости к изменяющимся факторам внешней среды при заданном уровне шумов радиометрического приемника, флуктуационной чувствительности и длительности одного измерения.

В статье описан приемный канал СВЧ-гиперспектрометра, выполненный на основе нового СВЧ-радиометра, обладающего повышенными разрешающей способностью по частоте и устойчивостью к изменяющимся факторам внешней среды.

Теория

В соответствии с описанными выше требованиями предложен приемный канал СВЧ-гиперспектрометра, основанный на новом типе СВЧ-радиометров. Разработанный СВЧ-радиометр обладает двумя радиометрическим приемниками и использует активные генераторы шума в качестве опорных точек передаточной характеристики. Структурная схема разработанного СВЧ-радиометра представлена на рис. 1.

Структурная схема разработанного СВЧ-радиометра состоит из приемной антенны А с шумовой температурой $T_{\text{А}}$, термостата ТС с поддерживаемой температурой $T_{\text{СТ}}$ и размещенными в нем генератором шума ГШ с шумовой температурой $T_{\text{ГШ}}$, высокочастотным ключом КЛ, направленным ответвителем НО с коэффициентом связи C, опорным малошумящим усилителем ОМШУ, согласованной нагрузки СН, высокочастотным переключателем ПК, управляемого гетеродина Гет, цифрового блока управления ЦБУ, двухканального аналого-цифрового преобразователя АЦП, двух идентичных радиометрических приемников РП1 и РП2 с шумовой температурой $T_{\text{Ш}}$, коэффициентом усиления G, шириной рабочей полосы частот Δf, состоящих из малошумящего усилителя МШУ, полосно-пропускающего фильтра ППФ,

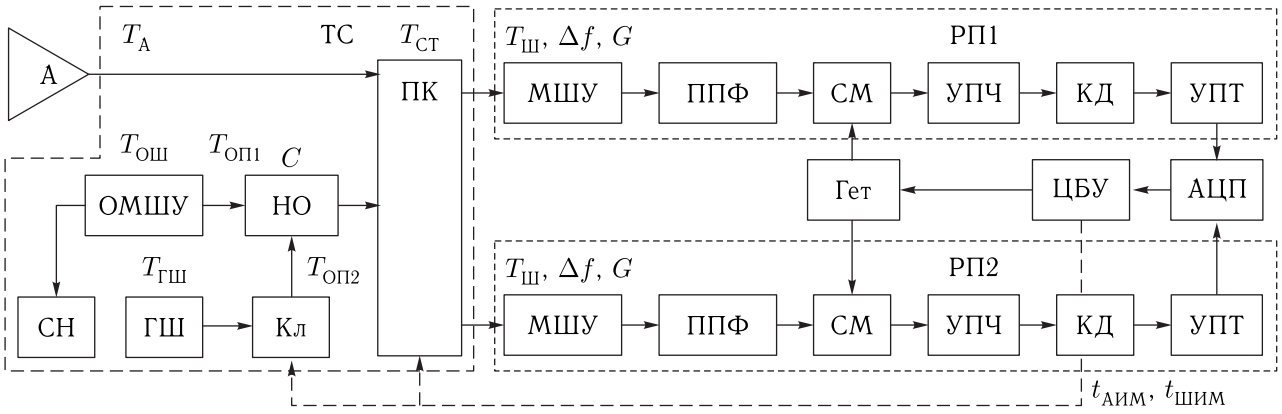


Рис. 1. Структурная схема разработанного СВЧ-радиометра

смесителя СМ, усилителя промежуточной частоты УПЧ, квадратичного детектора КД, усилителя постоянного тока УПТ.

Одной из ключевых особенностей предложенного СВЧ-радиометра является использование двух активных опорных полупроводниковых генераторов шума для построения передаточной характеристики. Сигнал первого опорного генератора шума формируется из собственных шумов опорного малошумящего усилителя. Для реализации этого вход опорного малошумящего усилителя подключен к входу радиометрического приемника. Таким образом, вход ОМШУ согласован с входом радиометрического приемника. Это обеспечивает отсутствие интерференции и постоянные шумовые параметры ОМШУ. При этом на вход радиометрического приемника поступает низкотемпературный шум, обусловленный шумовой волной на входе ОМШУ. Уровень формируемого на входе ОМШУ шума пропорционален его собственным шумам. Этот факт позволяет использовать ОМШУ в качестве опорного генератора шума с шумовой температурой $T_{\text{ОП1}}$ [3].

Второй генератор шума реализован на лавинно-пролетном диоде в режиме обратного пробоя и формирует в антенном канале шумовой сигнал $T_{\text{ОП2}}$.

Функционирование предложенного СВЧ-радиометра осуществляется следующим образом. В радиометрических приемниках происходят последовательные операции усиления, полосовой фильтрации, переноса по частоте, усиления по промежуточной частоте, квадратичного детектирования и усиления детектированного сигнала.

ЦБУ формирует сигналы амплитудно-импульсной модуляции $t_{\text{АИМ0}}$, $t_{\text{АИМ1}}$ и $t_{\text{АИМ2}}$. На рис. 2 представлены временные диаграммы, поясняющие принцип работы предложенного СВЧ-радиометра. На рис. 2, *а* изображены сигналы $t_{\text{АИМ1}}$, $t_{\text{АИМ1}}$ и $t_{\text{АИМ0}}$ соответственно. На рис. 2, *б* и рис. 2, *в*

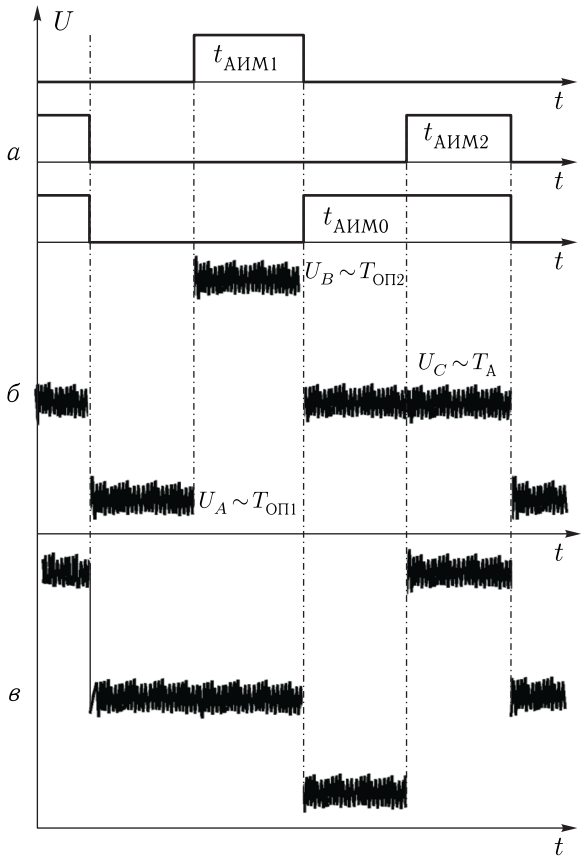


Рис. 2. Временные диаграммы работы СВЧ-радиометра

изображены сигналы на выходах РП1 и РП2 соответственно. Под действием низкого уровня сигнала $t_{\text{АИМ0}}$ посредством ПК осуществляется подключение антенны на вход РП2 и входа ОМШУ на вход РП1, под действием высокого уровня сигнала $t_{\text{АИМ0}}$ антенна подключается на вход РП1, а вход ОМШУ подключается на вход РП2. При высоком уровне $t_{\text{АИМ1}}$ или $t_{\text{АИМ2}}$ Кл переходит в режим низкого ослабления, что приводит к передаче сигнала ГШ к дополнительному каналу НО. При низком уровне $t_{\text{АИМ1}}$ или $t_{\text{АИМ2}}$ Кл переходит в режим высокого ослабления. Последовательное переключение на входах радиометрических приемников сигналов антенны, ОМШУ и комбинации ОМШУ и ГШ приводит к появлению на их выходе импульсно-модулированной последовательности.

Величина шумов первого опорного генератора шума $T_{\text{ОП1}}$ на входе ПК в соответствии со структурной схемой (рис. 1) равна

$$T_{\text{ОП1}} = T_{\text{ОШ}}, \tag{1}$$

где $T_{\text{ОШ}}$ — величина собственных шумов ОМШУ на его входе. Величина шумов второго опорного генератора шума $T_{\text{ОП2}}$ на входе ПК равна

$$T_{\text{ОП2}} = CT_{\text{ГШ}}, \tag{2}$$

где C — коэффициент связи направленного ответвителя.

Обозначим уровни сигналов на выходе первого радиометрического приемника, соответствующие подключению на его вход антенны ОМШУ и комбинации ОМШУ и ГШ через U_A, U_B и U_C соответственно. Уровни U_A, U_B пропорциональны шумовым температурам опорных генераторов шума и остаются неизменными (теоретически) в процессе эксплуатации.

Уровень U_C определяется величиной шумовой температуры антенны. Для его измерения используются различные методики [4]. В представленной реализации используется непосредственное измерение уровней U_A, U_B и U_C путем оцифровки. По сравнению с использованием компаратора и уравнивания вольт-секундных площадей [4] этот способ обладает потенциалом по увеличению динамики измерений при скачкообразных изменениях шумовой температуры антенны [5].

В соответствии с описанным выше алгоритмом переключения источников сигнала на входе РП1 уровни U_A, U_B и U_C с учетом (1), (2) равны

$$\begin{aligned} U_A &= [T_{\text{ОШ}} + T_{\text{Ш}}] \cdot G \cdot \Delta f \cdot k = \\ &= [T_{\text{ОП1}} + T_{\text{Ш}}] \cdot G \cdot \Delta f \cdot k, \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} U_B &= [T_{\text{ОШ}} + T_{\text{Ш}} + T_{\text{ГШ}} \cdot C] \cdot G \cdot \Delta f \cdot k = \\ &= [T_{\text{ОП1}} + T_{\text{ОП2}} + T_{\text{Ш}}] \cdot G \cdot \Delta f \cdot k, \end{aligned} \tag{4}$$

$$U_C = [T_{\text{А}} + T_{\text{Ш}}] \cdot G \cdot \Delta f \cdot k, \tag{5}$$

где $T_{\text{ОШ}}$ — низкотемпературный шум, пропорциональный собственным шумам ОМШУ, $T_{\text{Ш}}$ — шумовая температура РП1, $T_{\text{А}}$ – шумовая температура антенны, G — полный коэффициент передачи РП1, Δf — рабочая полоса частот РП1, k — постоянная Больцмана, C — коэффициент связи направленного ответвителя.

Последовательная оцифровка в аналого-цифровом преобразователе позволяет измерить уровни сигналов U_A, U_B и U_C. Результаты измерений передаются в ЦБУ, где осуществляется расчет шумовой температуры антенны. Расчет шумовой температуры антенны происходит исходя из следующего. Для описанных выше уровней сигналов U_A, U_B и U_C справедливо равенство

$$\frac{T_{\text{ОП2}} - T_{\text{А}}}{T_{\text{А}} - T_{\text{ОП1}}} = \frac{U_B - U_C}{U_C - U_A}. \tag{6}$$

Выражая из (6) $T_{\text{А}}$, получим

$$T_{\text{А}} = \frac{T_{\text{ОП2}} \cdot [U_C - U_A] + T_{\text{ОП1}} \cdot [U_B - U_C]}{U_B - U_A}. \tag{7}$$

Выражение (7) связывает измеренные уровни сигналов U_A, U_B и U_C со значениями шумовых температур опорных источников. Важным следствием формулы (7) является отсутствие в ней параметров приемника G и $T_{\text{Ш}}$. Этот факт обусловливает теоретическое отсутствие влияния на результаты измерений изменений коэффициента передачи и дрейфа собственных шумов радиометрического приемника [4]. Численные значения параметров $T_{\text{ОП1}}$ и $T_{\text{ОП2}}$ определяются при калибровке СВЧ-радиометра по двум эталонным источникам шумового излучения путем установления соответствия измеренного уровня сигналов U_A, U_B заданным шумовым температурам на входе СВЧ-радиометра. Второй радиометрический приемник функционирует аналогично РП1.

В аспектах применения предложенного СВЧ-радиометра в качестве приемного канала СВЧ-гиперспектрометра преимуществом является возможность уменьшения рабочей полосы частот в два раза по сравнению с классическими СВЧ-радиометрами с одним радиометрическим приемником. Этот эффект обусловлен следующим. В работе [6] показано, что чувствительность СВЧ-радиометров с двумя приемниками в корень квадратный из двух выше чувствительности СВЧ-радиометра с одним приемником. Аналитически это следует из увеличения числа измерений в два раза на заданном временном интервале за счет параллельной работы двух радиометрических приемников. Увеличенное в два раза число измерений приводит к уменьшению дисперсии измеряемой величины в корень квадратный из двух. Минимальная чувствительность СВЧ-радиометров, использующих два опорных источника шума и один радиометрический приемник, при верхней границе динамического диапазона не превышающей $T_{\text{ОП2}}$, описывается выражением [4]

$$\Delta T_{\text{А1}} = \sqrt{\frac{1}{df_{\text{1ПР}}\tau}} \cdot \sqrt{\frac{4(T_{\text{ОП1}} + T_{\text{Ш}})^2 + T_{\text{ОП2}}^2}{8}}, \qquad (8)$$

где $df_{\text{1ПР}}$ — рабочая полоса частот СВЧ-радиометра с одним приемником, τ — постоянная времени интегратора, характеризующая длительность одного измерения.

Учитывая (8), выражение для оценки рабочей полосы частот принимает вид

$$df_{\text{1ПР}} = \frac{1}{\Delta T_{\text{А1}}^2 \tau} \cdot \frac{4(T_{\text{ОП1}} + T_{\text{Ш}})^2 + T_{\text{ОП2}}^2}{8}. \qquad (9)$$

В соответствии с теорией ошибок и исследованиями, проведенными в [6], чувствительность СВЧ-радиометров с двумя радиометрическими приемниками увеличивается в корень квадратный из двух. В этом случае справедливо равенство

$$\Delta T_{\text{А2}} = \frac{\Delta T_{\text{А1}}}{\sqrt{2}}, \qquad (10)$$

где $\Delta T_{\text{А2}}$ — флуктуационная чувствительность СВЧ-радиометра с двумя приемниками.

Выражая из (10) $\Delta T_{\text{А1}}$ и подставляя в (9), запишем выражение для оценки рабочей полосы частот предложенного СВЧ-радиометра с двумя приемниками

$$f_{\text{ПР2}} = \frac{f_{\text{1ПР}}}{2} = \frac{1}{\Delta T_{\text{А1}}^2 \tau} \cdot \frac{4(T_{\text{ОП1}} + T_{\text{Ш}})^2 + T_{\text{ОП2}}^2}{16}. \qquad (11)$$

Анализ совокупности выражений (8)–(11) позволяет сделать вывод, что в предложенном СВЧ-радиометре в случае сохранения длительности измерений на заданном уровне и флуктуационной чувствительности на уровне СВЧ-радиометра с одним радиометрическим приемником рабочая полоса частот сокращается в два раза.

В процессе эксплуатации СВЧ-гиперспектрометра важным с точки зрения сохранения стабильности измерений на заданном метрологическом уровне является точность поддержания уровня шумов опорных генераторов шума. В работе [7] показано, что использование в качестве опорного генератора шума согласованной нагрузки позволяет достигнуть минимальной точности измерений, равной величине ошибки поддержания температуры термостата. Очевидно, что для улучшения точности измерений необходимо применение генераторов шума, обеспечивающих меньшей зависимостью от изменяющейся температуры по сравнению с пассивными генераторами шума.

В разработанном СВЧ-радиометре, по сравнению с [8], температурная стабильность выше при одинаковой точности поддержания температуры термостата за счет использования активных генераторов шума. Для подтверждения этого проведен анализ погрешностей радиометрических измерений, результаты которого приведены ниже.

Основными факторами, приводящими к погрешности измерений в разработанном СВЧ-радиометре, являются: погрешность поддержания температуры термостата $\delta T_{\text{СТ}}$, температурная нестабильность шумов ОМШУ $\delta T_{\text{ОШ}}$, температурная нестабильность шумов генератора шума $\delta T_{\text{ГШ}}$, величина потерь в линии передачи между ОМШУ и НО $l_{\text{ОМШУ}}$, величина потерь в линии передачи между НО и ПК $l_{\text{ГШ}}$.

Для проведения анализа приняты следующие условия. Полные потери в линии передачи между ОМШУ и ПК равны сумме $l_{\text{ОМШУ}}$ и $l_{\text{ГШ}}$. Величиной потерь в линии передачи между антенной и ПК можно пренебречь, так как вклад этих

потерь не поддается контролю и свойствен всем СВЧ-радиометрам. Потери в ПК и линии передачи между ПК и входом радиометрического приемника не влияют на результаты измерений ввиду их взаимного вычитания при использовании выражения (9).

Обозначим через δU_A и δU_B погрешности измерения уровней сигналов U_A, U_B опорных генераторов шума. Учитывая потери в линиях передачи и погрешности поддержания температуры термостата (формулы (3)–(5), (7)), получим выражения для оценки величин δU_A и δU_B:

$$\delta U_A = [\delta T_{\text{ТОШ}} \cdot |\delta T_{\text{СТ}}| \cdot (1 - [l_{\text{ОШ}} + l_{\text{ГШ}}]) + \\ + |\delta T_{\text{СТ}}| \cdot (l_{\text{ОШ}} + l_{\text{ГШ}}) + T_{\text{Ш}}] \cdot G \cdot \Delta f \cdot k, \quad (12)$$

$$\delta U_B = [\delta T_{\text{ТОШ}} \cdot |\delta T_{\text{СТ}}| \cdot (1 - [l_{\text{ОШ}} + l_{\text{ГШ}}]) + \\ + \delta T_{\text{ТГШ}} \cdot |\delta T_{\text{СТ}}| \cdot l_{\text{ГШ}} + \delta T_{\text{СТ}} \cdot (l_{\text{ОШ}} + l_{\text{ГШ}}) + T_{\text{Ш}}] \times \\ \times G \cdot \Delta f \cdot k, \quad (13)$$

где $\delta T_{\text{ТОШ}}$, $\delta T_{\text{ТГШ}}$ — модули максимального отклонения шумовой температуры ОМШУ и ГШ в пределах, обусловленных погрешностью поддержания температуры термостата.

Запишем выражение (7) с учетом погрешностей измерения уровней сигналов U_A, U_B:

$$T_{\text{А}} = \\ = \frac{T_{\text{ОП2}} \cdot [U_C - (U_A + \delta U_A)] - T_{\text{ОП1}} \cdot [U_C - (U_B + \delta U_B)]}{(U_B + \delta U_B) - (U_A + \delta U_A)}. \quad (14)$$

Выражение (14) с учетом (12) и (13) позволяет аналитически оценить погрешность измерений при известных параметрах $\delta T_{\text{СТ}}$, $\delta T_{\text{ОШ}}$, $\delta T_{\text{ГШ}}$, $l_{\text{ОМШУ}}$ и $l_{\text{ГШ}}$.

Результаты моделирования

Для оценки абсолютной точности измерений разработанного СВЧ-радиометра проведено численное моделирование на основе заданных параметров входной высокочастотной части. В качестве ОМШУ выбран малошумящий усилитель *HMC*517 с номинальной шумовой температурой 170 K и температурным коэффициентом собственных шумов порядка 0,77 K/°C, для моделирования ГШ использован лавинно-пролетный диод $NW402$ с температурным коэффициентом собственных шумов порядка 2100 K/°C при шумовой температуре $T_{\text{ГШ}} = 9{,}17 \cdot 10^5$ K.

Анализ температурной нестабильности уровня шумов ГШ и схемы его подключения позволяет сделать вывод о следующем. Использование направленного ответвителя, обеспечивающего направленный перенос в основной канал сигнала ГШ, равного верхнему динамическому диапазону СВЧ-радиометра, позволяет понизить значение тепловой нестабильности пропорционально коэффициенту связи C. Для рассмотренного примера тепловая нестабильность сигнала ГШ при верхней границе динамического диапазона, равной $T_{\text{МАКС}} = 300$ K, в основном канале направленного ответвителя составляет

$$\delta T_{\text{ТГШ}} = C \cdot \delta T_{\text{ТГШНОМ}} = \frac{T_{\text{МАКС}}}{T_{\text{ТГШНОМ}}} \cdot \delta T_{\text{ТГШНОМ}} = \\ = \frac{300}{9{,}17 \cdot 10^5} \cdot 2{,}1 \cdot 10^3 = 0{,}69 \text{ K/°C}.$$

Для проведения численного эксперимента использованы различные точности термостатирования входной высокочастотной части и величины потерь $l_{\text{ОМШУ}}/l_{\text{ГШ}}$. Результаты численного эксперимента на разработанной модели представлены в табл. 1.

Для оценки влияния температурной нестабильности опорных генераторов шума на погрешность измерений проведено исследование разработанной модели при следующих параметрах: точность термостатирования $\delta T_{\text{СТ}} = \pm 1$ K, величина потерь $l_{\text{ОМШУ}} = 0{,}1$, $l_{\text{ГШ}} = 0{,}1$, шумовая температура антенны $T_{\text{А}} = 300$ K. Результаты исследования приведены в табл. 2.

Для оценки распределения погрешности измерений по динамическому диапазону проведено моделирование изменения погрешности измерений как функции шумовой температуры антенны при различных величинах температурной нестабильности генераторов шума и заданных параметрах точности термостатирования $\delta T_{\text{СТ}} = \pm 1$ K, величине потерь $l_{\text{ОМШУ}} = 0{,}1$, $l_{\text{ГШ}} = 0{,}1$. Результаты моделирования представлены в табл. 3.

Таблица 1. Модуль максимальной погрешности измерений как функции точности термостатирования и потерь во входной высокочастотной части

№	$\delta T_{СТ}$, К	Погрешность измерений, К					
		Величина потерь, $l_{ОМШУ}$/ $l_{ГШ}$					
		0,5/0,5	0,33/0,33	0,25/0,25	0,2/0,2	0,125/0,125	0,1/0,1
1	±1	1,341	1,151	1,056	0,999	0,913	0,885
2	±0,5	0,672	0,576	0,528	0,500	0,457	0,442
3	±0,33	0,448	0,384	0,352	0,333	0,305	0,295
4	±0,25	0,336	0,288	0,264	0,250	0,228	0,221
5	±0,2	0,269	0,231	0,211	0,200	0,183	0,177
6	±0,125	0,168	0,144	0,132	0,125	0,114	0,111
7	±0,1	0,134	0,115	0,106	0,100	0,091	0,088

Таблица 2. Модуль максимальной погрешности измерений как функция изменяющейся температурной стабильности $T_{ОП1}$ и $T_{ОП2}$

№	$\delta T_{ОП1}$	Погрешность измерений, К											
		$\delta T_{ОП2}$											
		±0,1	±0,6	±0,7	±0,8	±0,9	±1	±1,1	±1,2	±1,3	±1,4	±1,5	±2
1	±0,1	0,09	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,28
2	±0,3	0,25	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,36	0,37	0,38	0,39	0,44
3	±0,5	0,41	0,46	0,47	0,48	0,49	0,50	0,51	0,52	0,53	0,54	0,55	0,60
4	±0,7	0,57	0,62	0,63	0,64	0,65	0,66	0,67	0,68	0,69	0,70	0,71	0,76
5	±0,9	0,73	0,78	0,79	0,80	0,81	0,82	0,83	0,84	0,85	0,86	0,87	0,92
6	±1,1	0,89	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1,00	1,01	1,02	1,03	1,08
7	±1,3	1,05	1,10	1,11	1,12	1,13	1,14	1,15	1,16	1,17	1,18	1,19	1,24
8	±1,5	1,21	1,26	1,27	1,28	1,29	1,30	1,31	1,32	1,33	1,34	1,35	1,40
9	±1,7	1,37	1,42	1,43	1,44	1,45	1,46	1,47	1,48	1,49	1,50	1,51	1,56
10	±1,9	1,53	1,58	1,59	1,60	1,61	1,62	1,63	1,64	1,65	1,66	1,67	1,72

Обсуждение результатов

Применение в разработанном СВЧ-радиометре малошумящего усилителя, подключенного входом к входу радиометрического приемника, позволяет использовать его в качестве опорного генератора низкотемпературного шума.

Вследствие сравнительно низкого температурного коэффициента в примененных опорных генераторах шума, выполненных на основе малошумящего усилителя и лавинно-пролетного диода, разработанный СВЧ-радиометр обладает повышенной устойчивостью к изменяющимся факторам внешней среды при заданной точности термостатирования входной высокочастотной части по сравнению с СВЧ-радиометрами, использующими пассивные опорные генераторы шума.

Таблица 3. Модуль максимальной погрешности измерений как функция изменяющейся шумовой температуры антенны и температурной стабильности $\delta T_{\text{ОП1}}$ и $\delta T_{\text{ОП2}}$

№	$T_{\text{А}}$	Погрешность измерений, К											
		Температурная стабильность опорных генераторов шума											
		±0,5	±0,6	±0,7	±0,8	±0,9	±1	±1,1	±1,2	±1,3	±1,4	±1,5	±2
1	0	0,18	0,22	0,26	0,29	0,33	0,37	0,40	0,44	0,48	0,51	0,55	0,73
2	30	0,21	0,25	0,29	0,34	0,38	0,42	0,46	0,50	0,55	0,59	0,63	0,84
3	60	0,24	0,28	0,33	0,38	0,43	0,47	0,52	0,57	0,62	0,66	0,71	0,95
4	90	0,26	0,32	0,37	0,42	0,47	0,53	0,58	0,63	0,68	0,74	0,79	1,05
5	120	0,29	0,35	0,41	0,46	0,52	0,58	0,64	0,70	0,75	0,81	0,87	1,16
6	150	0,32	0,38	0,44	0,51	0,57	0,63	0,70	0,76	0,82	0,89	0,95	1,27
7	180	0,34	0,41	0,48	0,55	0,62	0,69	0,75	0,82	0,89	0,96	1,03	1,37
8	210	0,37	0,44	0,52	0,59	0,67	0,74	0,81	0,89	0,96	1,04	1,11	1,48
9	240	0,40	0,48	0,56	0,63	0,71	0,79	0,87	0,95	1,03	1,11	1,19	1,58
10	270	0,42	0,51	0,59	0,68	0,76	0,85	0,93	1,01	1,10	1,18	1,27	1,69
11	300	0,45	0,54	0,63	0,72	0,81	0,90	0,99	1,08	1,17	1,26	1,35	1,80

В отличие от существующих СВЧ-радиометров [4], в представленном решении минимизированы потери в антенном канале. Это достигается за счет переноса направленного ответвителя в канал второго опорного генератора шума. Уменьшение потерь в антенном канале повышает чувствительность в предложенном СВЧ-радиометре.

Использование двух параллельно работающих радиометрических приемников позволяет на заданном временном интервале накапливать в два раза больше результатов измерений. В соответствии с приведенными аналитическими соотношениями это уменьшает рабочую полосу частот в два раза при заданных длительности измерения и флуктуационной чувствительности.

Разработанная математическая модель оценки абсолютной точности измерений позволяет на этапе проектирования СВЧ-радиометра оценить уровень погрешности измерений при известных параметрах точности термостатирования, потерь во входной высокочастотной части и температурных коэффициентах опорных генераторов шума.

Результаты численного моделирования показывают, что при температурных коэффициентах первого и второго опорных генераторов шума 0,77 и 069 К/°С соответственно и потерях во входной высокочастотной части $l_{\text{ОМШУ}}$, $l_{\text{ГШ}}$, не превышающих суммарно уровень 0,2, величина максимальной погрешности измерений не превышает точности термостатирования.

Результаты исследований влияния изменяющегося уровня температурных коэффициентов опорных генераторов шума показывают, что для разработанного СВЧ-радиометра наибольшее влияние оказывает температурный коэффициент ОМШУ.

Исследование распределения погрешности измерений по динамическому диапазону, составляющему 0–300 К, показало, что величина изменения погрешности измерений не превышает двух раз при равных величинах температурных коэффициентов опорных генераторов шума, величине потерь во входной высокочастотной части 0,1 и величине погрешности поддержания температуры термостата не более ±1 К.

Заключение

Разработана схема приемного канала СВЧ-гиперспектрометра, использующая два радиометрических приемника и два опорных полупроводниковых генератора шума.

В качестве опорных генераторов шума применены активные полупроводниковые генераторы шума — лавинно-пролетный диод в режиме обратного пробоя и малошумящий усилитель, подключенный входом к входу радиометрического приемника.

Подключение малошумящего усилителя входом к входу радиометрического приемника позволяет формировать на входе радиометрического приемника низкотемпературный шум, пропорциональный собственным шумам малошумящего усилителя.

Использование двух опорных генераторов шума позволяет минимизировать влияние дестабилизирующих факторов радиометрических измерений, а именно дрейфа собственных шумов и коэффициента передачи радиометрического приемника. Это позволяет упростить калибровку в гиперспектральном режиме и повысить устойчивость к изменяющимся факторам внешней среды, в первую очередь температуры.

Перенос направленного ответвителя из антенного канала уменьшает потери на входе системы и приводит к повышению чувствительности.

Использование двух приемников позволяет увеличить разрешающую способность по частоте при проведении СВЧ-гиперспектральных исследований в два раза за счет пропорционального увеличения времени наблюдения за сигналом антенны по сравнению с приемными каналами, выполненными на основе классических СВЧ-радиометров с одним радиометрическим приемником.

Разработанная математическая модель оценки погрешности радиометрических измерений позволит на этапе проектирования оценить точность измерений в зависимости от технических параметров входной высокочастотной части.

Результаты численного эксперимента на разработанной модели показали, что влияние точности термостатирования на результаты измерений снижено по сравнению СВЧ-радиометрами, использующими пассивные опорные генераторы шума.

В разработанном СВЧ-радиометре основной вклад в погрешность измерений обусловлен температурной нестабильностью уровня собственных шумов опорного малошумящего усилителя.

Проведенные в статье результаты являются основой для последующих практических экспериментальных исследований технических характеристик разрабатываемого двухприемникового СВЧ-гиперспектрометра для дистанционного зондирования природных сред.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (*проект № 18-79-00045*).

Список литературы

1. *Smith Sr. W. L.*, *Revercomb H.*, *Bingham G.*, *Larar A.*, *Huang H.*, *Zhou D.*, *Li J.*, *Liu X. and Kireev S.* Evolution, current capabilities, and future advances in satellite nadir viewing ultraspectral IR sounding of the lower atmosphere // Atmosphere Chemical Physics, 2009, vol. 9. P. 5563–5574.

2. *Blackwell J. W.*, *Leslie R. V.*, *Pieper M. L.*, *Samra J. E.* All-Weather Hyperspectral Atmospheric Sounding // Lincoln laboratory journal, 2010, vol, 18, № 2. P. 28–46.

3. *Frater R. H.*, *Williams D. R.* An Active “Cold” Noise Source // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1981, vol. 29, is. 4. P. 344–347.

4. *Убайчин А. В.*, *Филатов А. В.* Многоприемниковые микроволновые радиометрические системы на основе модифицированного метода нулевых измерений. Томск: Изд. ТУСУР, 2014. 154 с.

5. *Абдирасул уулу Т.*, *Алексеев Е. В.*, *Данилов Д. Н.*, *Жук Г. Г.*, *Ташходжаев А. С.*, *Убайчин А. В.*, *Филатов А. В.* Бортовая микроволновая радиометрическая система с высокой динамикой измерения // Динамика систем, механизмов и машин, 2016, № 4. С. 62–65.

6. *Filatov A. V.*, *Ubaichin A. V.*, *Bombizov A. A.* A two-receiver microwave radiometer with high transfer characteristic linearity // Measurement Techniques, 2013, vol. 55, is. 11. P. 1281–1286.

7. *Убайчин А. В.* Линейность передаточной характеристики нулевых радиометров с комбинированной импульсной модуляцией при высоком динамическом диапазоне измеряемых шумовых температур // Известия высших учебных заведений. Физика, 2012, т. 55, № 9–3. С. 130–133.

8. *Убайчин А. В.* Инвариантность нулевых радиометров с цифровым управлением подшумливанием к нелинейности уравнивающего генератора шума на лавинно-пролетном диоде // Доклады ТУСУР, 2012, № 2(26), ч. 1. С. 87–91.

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ
2020, том 7, выпуск 1, с. 51–58

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

УДК 004.9: 629.78 DOI 10.30894/issn2409-0239.2020.7.1.51.58

Особенности формирования информационно-вычислительной системы для решения измерительных задач в условиях различной степени структуризации

В. К. Ларин, *к. т. н., с. н. с., contact@spacecorp.ru*
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы формирования информационно-вычислительной системы (ИВС) для решения измерительных задач в условиях различной степени структуризации. Решение задачи основано на принципах структурного анализа, центральным из которых является разделение сложной системы на простые составляющие с определением функциональных связей между ними. Вид решения может быть представлен как в графической, так и в аналитической формах. В работе сформулирована последовательность этапов решения поставленной задачи.

Приводится общая структурная схема ИВС для решения технических задач. В соответствии с указанными принципами решение разбивается на методическую и технологическую части. Даны структурные схемы этих частей. Выделен фрагмент решения измерительной задачи, отражающий специфику перехода решения от предыдущего блока к последующему в зависимости от выполнения «условий перехода». Показана зависимость «условий перехода» от значений информационных параметров. На примере задачи определения параметров движения КА рассмотрено применение сформированной ИВС для ее решения. Итогом исследований является структурная схема универсальной ИВС для решения технических задач различного типа.

Ключевые слова: информационно-вычислительная система, измерительная задача, структура, условия перехода, информационные параметры

Special Features of Building an Information Computer System for Solving Measuring Problems in Conditions of Varying Degrees of Structuring

V. K. Larin, *Cand. Sci. (Engineering), senior researcher, contact@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. The article considers the creation of an information computer system (ICS) for solving measuring problems in conditions of different degrees of structuring. The solution is based on the principles of structural analysis. The key principle is the division of a complex system into simple constituents and the definition of functional relationships between them. The solution type can be given in both graphical and analytical form. The paper formulates a sequence of stages for solving the problem.

A general block diagram of the ICS for solving technical problems is given. In accordance with the aforementioned principles, the solution is divided into a methodological and a technological part. Block diagrams of these parts are presented. A fragment of the solution to the measuring problem, which reflects the particular nature of solution transition from the previous block to the next depending on the fulfillment of the "transition conditions", is highlighted. The dependence of the "transition conditions" on the values of information parameters is shown. The problem of determining the motion parameters of a spacecraft is considered as an example of implementing the developed ICS for its solution.

Keywords: information computer system, measuring task, structure, transition conditions, information parameters

Введение

Объектом исследования является некоторая измерительная задача, в которой определены входные данные, вид результата и подход к решению данной задачи.

Измерительная задача — это задача обработки измерений с целью определения физических свойств (или характеристик) измеряемого объекта [1].

Примером может служить задача определения параметров движения КА, где объектом является орбита КА.

В основу исследований положены принципы структурного анализа [2].

Решение любой инженерной задачи можно разделить на две части: методическую, состоящую из постановки задачи и алгоритма, и технологическую, включающую программу, информационно-вычислительную систему (ИВС) и процедуру реализации программы на вычислительных средствах ИВС.

Согласно ГОСТ Р 53622-2009 термин **информационно-вычислительная система** означает совокупность данных (или баз данных), систем управления базами данных и прикладных программ, функционирующих на вычислительных средствах как единое целое для решения определенных задач [3].

Решение задачи зависит от **степени ее структуризации**. Согласно классификации, предложенной в [4], проблемы (к ним относятся и измерительные задачи) можно разделить по степени структуризации на три типа: структурированные (СЗ) — имеющие численное решение; неструктурированные (НСЗ) — не имеющие решения; и слабоструктурированные (ССЗ), имеющие на фоне формального (численного) решения качественное решение, а в пределе — не имеющие решения.

Решение задач различной степени структуризации

На основе вышесказанного можно предположить, что слабоструктурированные задачи занимают пространство между структурированными и неструктурированными задачами. Очевидно, что степень структуризации задач на границе массива структурированных задач будет максимальной (примем равной 1) и минимальной — на границе массива неструктурированных задач (примем равной 0).

С большой долей вероятности можно предположить, что задачи со значением степени структуризации, близким к 1, должны иметь количественное или качественное решение, задачи со значением степени структуризации, близким к 0, должны иметь качественное решение, а в пределе — не иметь его.

Для достаточно большого диапазона, в который попадают ССЗ, и неопределенной корректности их решения, в [5] было предложено разделить массив слабоструктурированных задач на две части: задачи, примыкающие к массиву структурированных задач, названные квазиструктурированными задачами (КСЗ); и собственно слабоструктурированные задачи.

С учетом вышесказанного, а также приведенных выше значений степени структуризации (обозначим через К) массив КСЗ приближенно характеризуется диапазоном К от 1,0 до 0,5, массив ССЗ — соответственно диапазоном К от 0,5 до 0. В табл. 1 приведены в общем виде данные взаимосвязи вида решения задачи и степени структуризации.

Таблица 1. Соответствие вида решения задачи и степени структуризации

Типы задач	Степень структуризации (К)	Методы решения	Примечание
СЗ	1	Аналитические методы	Численное решение
КСЗ	1–0,5	Аналитические методы	Численное решение с отклонением точности результата
ССЗ	0,5–0	Эвристические методы	Качественное решение
НСЗ	0	Нет решения	—

Практически все измерительные задачи изначально имеют численное решение. При реализации задачи на ИВС возможно получение результата с различной степенью точности. Это объясняется ошибками, допущенными при разработке алгоритма и программы, а также при формировании отдельных частей ИВС. Примем, что решение, полученное с ошибкой больше заданного предела, является непригодным для дальнейшего рассмотрения.

Таким образом, цель настоящих исследований заключается в формировании ИВС, которая позволяла бы получить оптимальный результат для измерительных задач квазиструктурированного типа в виде численного решения, так как качественное решение для измерительных задач не имеет практического значения.

В статье рассмотрена технология построения ИВС для решения данной проблемы.

Решение поставленной задачи заключается в последовательном выполнении следующих этапов.

Этап 1. Определение структуры ИВС. На первом этапе определяется структура ИВС, используемая для решения информационных задач общего типа. Состав такой ИВС определен в ГОСТ Р 53622-2009.

Этап 2. Определение методической и технологической частей решения измерительных задач. На этом этапе определяется структура методической и технологической частей решения измерительных задач, проводится анализ структур с целью выделения блоков, несущих наибольшую нагрузку некорректности в элементах, и определяется влияние изменения характеристик элементов некорректных блоков на точность решения задачи в заданной предметной области.

Этап 3. Формирование основной структуры ИВС. На третьем этапе формируется основная структура ИВС с блокировкой решений, полученных с ошибками, превышающими предельные значения.

Этап 1. Определение структуры ИВС

В соответствии с требованиям ГОСТ Р 53622-2009 ИВС включает следующие виды обеспечения: информационное, программное, алгоритмическое и техническое. С учетом сказанного структурная схема ИВС общего типа для решения технических задач в технологическом варианте будет иметь следующий вид (рис. 1).

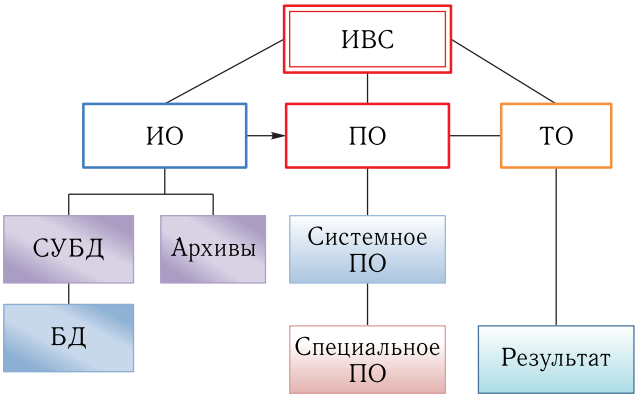


Рис. 1. Структурная схема ИВС

На рис. 1 введены сокращения: ИО — информационное обеспечение, ПО — программное обеспечение, ТО — техническое обеспечение, БД — база данных, СУБД — система управления БД.

Алгоритмическое обеспечение не включено в схему, так как оно отнесено к методической части и рассматривается отдельно.

Этап 2. Определение методической и технологической частей решения измерительных задач

Специфика измерительных задач (ИЗ) характеризуется следующими свойствами:

– большим объемом входных данных (измерений), ошибки которых имеют в основном случайный характер;

– используемыми методами обработки — фильтрация измерений по критериям с последующей обработкой статистическими методами (метод наименьших квадратов, метод Монте-Карло);

– строгим соблюдением правил формирования и решения условных и нормальных уравнений поправок к измерениям (соответствие числа уравнений числу неизвестных);

– заданием оптимальных значений пределов внутренней сходимости в процедурах решения с использованием метода последовательных приближений (согласование быстродействия и точности решения).

Указанные свойства измерительных задач значительно усложняют поиск решения. Во-первых, необходимостью формализации свойств для их учета и, во-вторых, определением возможного диапазона их значений. Для решения этих вопросов целесообразно использовать методы структурного анализа, а также подход, используемый в [6], где рекомендуется предварительно разделить процедуру решения на методическую и технологическую части, представив каждую часть в виде структурной схемы. Структурные схемы методической и технологической частей решения представлены на рис. 2 и 3 соответственно.

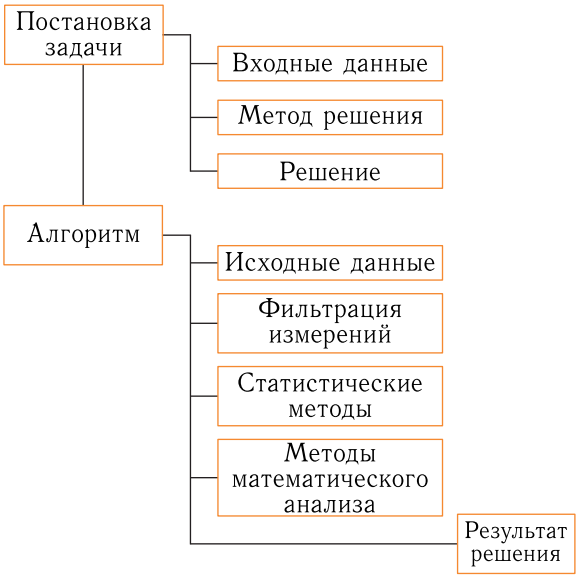
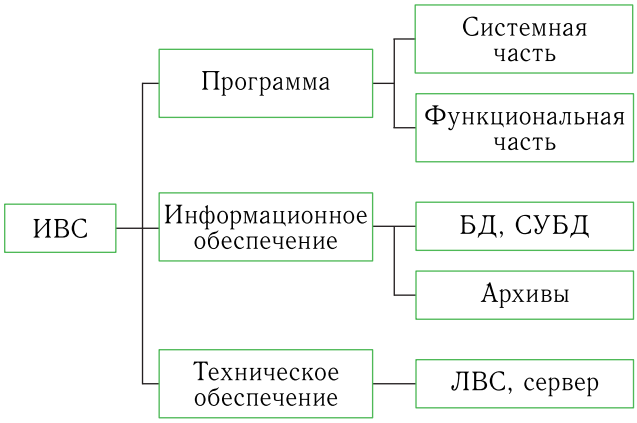


Рис. 2. Структура методической части решения



ЛВС — локальная вычислительная сеть

Рис. 3. Структура технологической части решения

Сам по себе термин «слабоструктурированная проблема (задача)» говорит о «слабых» структурных связях частей системы или об их отсутствии. Аналитически связи можно описать с помощью **условий перехода** между соседними блоками программы. По аналогии со структурными связями условия могут отсутствовать или быть не точно сформулированными. В таком случае либо может произойти сбой решения, либо получен отличающийся по точности результат.

Возможны следующие варианты «сбоя» на некотором шаге программы:

– остановка расчета вследствие невыполнения условия перехода к очередному блоку программы (команда «Останов»);

– получение неверных данных в очередном блоке программы вследствие влияния критического значения информационного параметра (ИП) и переход к следующему блоку программы на очередном шаге за счет изменения условий перехода.

Структурная схема фрагмента «сбойного» варианта решения при возможном нарушении условий перехода между соседними блоками программы представлен на рис. 4.

На рис. 4: $U(k_n)$ — номинальное условие перехода от блока n к блоку $n+1$; I_n — ИП блока n; $U(k_n, I_n)$ — измененное условие перехода от блока n к блоку $n+1$; N — номинальное значение

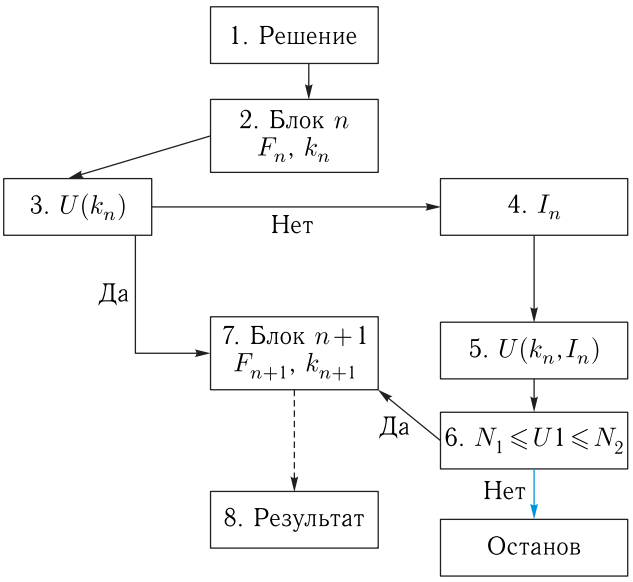


Рис. 4. Схема фрагмента перехода расчетов между соседними блоками программы n, $n+1$

условия перехода; N_1–N_2 — диапазон значений условия перехода для конкретного блока; $U1 = U(k_n, I_n)$ (в блоке 6); F_n, F_{n+1} — функциональное содержание блоков n, $n+1$.

В алгоритмической форме этот фрагмент может быть представлен в следующем виде:

1. F_n — расчет блока n.

2. $U(k_n) = N > F_{n+1} \neq \rightarrow I_n$.

3. $U(k_n, I_n) = U1$ — коррекция условия перехода (УП) как функции информационного параметра.

4. $N_1 \leqslant U1 \leqslant N_2 \rightarrow F_{n+1}, \geqslant\rightarrow$ Останов,

где U_n — номинал условия перехода блока n;

I_n — информационный параметр блока n;

k_n — критерий расчета F_n;

k_{n+1} — критерий расчета F_{n+1};

δ — поправка к УП.

Для анализа условий перехода представим программу в виде набора замкнутых математических процедур, где переход между ними осуществляется по выполнению условий.

Вид условия зависит от содержания очередной процедуры (блока).

Для измерительных задач возможны следующие условия перехода:

– полученные данные на очередном шаге должны быть больше, меньше или равны некоторому значению;

– полученные данные должны находиться в заданном диапазоне значений;

– единицы измерений полученных данных должны соответствовать единицам измерений величин, используемых на следующем шаге решения (проверка на идентичность единиц измерения должна проходить на каждом шаге программы).

В качестве примера рассмотрим задачу определения параметров движения космического аппарата (ОПД КА), условиями перехода в которой могут служить следующие соотношения рассчитываемых параметров:

– при формировании двойных разностей измерений фазы длина базовой линии должна находиться в заданном диапазоне;

– при фильтрации измерений (кода или фазы) значение сигнал/шум каждого измерения не должен быть меньше заданной величины;

– при фильтрации измерений (кода или фазы) по углу места, при котором производилось измерение, его значение не должно быть меньше заданного;

– при формировании сеанса количество измерений не должно быть меньше заданного;

– при формировании математической модели движения (ММД) КА учитываемые возмущающие ускорения должны обеспечивать заданную точность параметров орбиты КА;

– при формировании математической модели измерений (ММИ) учитываемые составляющие должны соответствовать заданному набору поправок;

– при оценке решения «краевой задачи» по данным определения местоположения отличия полученных значений координат от расчетных не должны превышать заданной величины.

В соответствии с [7] ИП зависят от значений функций и процедур, составляющих основу решения, и могут совпадать с условиями перехода и влиять на точность результата. Ниже представлен перечень основных ИП ОПД КА.

Как и в предыдущем случае, ИП целесообразно разделить по их влиянию на две части: методическую (постановка и алгоритм) и технологическую (информационное обеспечение и программа).

ИП элементов методической части решения и их критические значения

Постановка задачи

1. Цель решения (неоднозначно сформулирована).

Алгоритм

1. Количество измерений в сеансе (меньше нормы).

2. Учет возмущающих сил в модели движения (недостаточно).

3. Учет поправок в модели измерений (недостаточно).

4. Критерии фильтрации измерений (не соответствуют нормам).

5. Диапазон базовых линий (задан неверно).

6. Величина разрядки измерений (задана неверно).

ИП элементов технологической части решения и их критические значения

Информационное обеспечение

1. Координаты измерительных станций (заданы неверно).

Таблица 2. Перечень ИП и их значения

№ п/п	Наименование	Символ	Соотношение текущего и номинального значений ИП	Примечание
Методическая часть				
1	Цель решения	Zl	$\neq 0$	Неоднозначность
2	Количество измерений в сеансе	n_i	$n_i < n_s$	Число измерений меньше заданного
3	Возмущающие силы в ММД	F_v	$F_v \neq f_v$	Недостаток учета возмущающих сил
4	Поправки в модель измерений	δI_z	$\delta I_z \neq \Delta I_z$	Недостаток учета поправок в ММИ
5	Критерии фильтрации	F_j	$F_j \neq F_N$	Критерий не соответствует норме
6	Диапазон базовых линий	ΔL_b	$\Delta L_b \neq N$	Базовые линии вне диапазона
7	Величина разрядки измерений	Δt_r	$\Delta t_r \neq \Delta t_N$	Разрядка не соответствует норме
Технологическая часть				
8	Измерительные станции	B_s, L_s	$B_s, L_s \neq B_n, L_n$	Координаты ИС заданы неверно
9	Выбор данных из таблиц (по транзакции)	Tr	$\mathrm{Tr}_i = 0$	Откат транзакции
10	Таблицы	q_i	$q_i \neq q_n$	Данные в ячейках имеют ошибки
11	Настройки	N_i	$N_i \neq N_z$	Настройки не равны заданному значению
12	Выбор исходных данных из архива	I_D	$I_D \neq I_z$	ИД с ошибками
13	Цикл	Z_t	$Z_t \neq Z_n$	Параметры цикла заданы неверно
14	Условие	If_t	$\mathrm{If}_t \neq \mathrm{If}_n$	Условие задано неверно
15	Стандартная программа	Sp	$\mathrm{Sp} \neq \mathrm{Sp}_n$	Несоответствие норме выбранной стандартной программы
16	Формирование результата	R	$R \neq R_n$	Формирование неверного результата

2. Формирование таблиц (с ошибками).

3. Выбор данных из таблиц (откат транзакций).

Программа

1. Настройки (с ошибками).

2. Выбор исходных данных из архивов (с ошибками).

3. Циклы (с ошибками).

4. Условия (с ошибками).

5. Выбор и использование стандартных подпрограмм (с ошибками).

6. Формирование результата (с ошибками).

В табл. 2 приведен перечень ИП и их значений, приводящих решение к одному из сбойных вариантов.

Как показывает опыт работы, два случая могут привести к невозможности получить решение:

– неопределенность цели решения, что соответствует ИП в постановке задачи;

– ошибки при настройке программы, что соответствует ИП в программе.

Все остальные случаи приводят к неточному результату.

Результаты отбора ИП второго случая, в соответствии с [8], представлены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты отбора ИП

№ п/п	Название ИП	Критическое условие ИП	Примечание
Архив			
1	Диапазон базовых линий	$\delta l_i < \Delta l$	Базовые линии вне диапазона
2	Координаты измерительных станций	$B_s, L_s \neq B_n, L_n$	Координаты ИС заданы неверно
3	Исходные данные из архивов	$I_D \neq I_z$	ИД заданы неверно
БД, СУБД			
4	Заполнение таблиц БД	$q_i \neq q_n$	Ошибки в ячейках
5	Выбор данных из таблиц БД	$\mathrm{Tr}_i = 0$	Откат транзакций
Программа			
6	Возмущающие силы в ММД	$F_v \neq f_v$	Недостаток учета возмущающих сил
7	Поправки в модель измерений	$\delta I_z \neq \Delta I_z$	Недостаток учета поправок
8	Критерии фильтрации	$F_j \neq F_N$	Критерий не соответствует норме
9	Величина разрядки измерений	$\Delta t_r \neq \Delta t_N$	Разрядка не соответствуют норме
10	Циклы	$Z_t \neq Z_n$	Параметры цикла заданы неверно
11	Логические условия	$\mathrm{If}_t \neq \mathrm{If}_n$	Условие задано неверно
12	Стандартные подпрограммы	$\mathrm{Sp} \neq \mathrm{Sp}_n$	Несоответствие норме выбранной стандартной подпрограммы

Этап 3. Формирование основной структуры ИВС

С учетом схемы фрагмента программы (рис. 4) и данных табл. 3 можно сформировать ИВС для измерительной задачи определения параметров движения КА, учитывающую степень ее структуризации. Структурная схема ИВС представлена на рис. 5.

ИПА 1, 2, 3 — информационные параметры блока «Архив»; ИПД 1, 2 — информационные параметры блока БД, СУБД; блок $1, 2, \ldots, n-1, n$ — блоки программы; фрагмент $1, 2, \ldots, n-1, n$ — подпрограмма перехода между блоками, индекс соответствует номеру блока (рис. 4); σ_r — среднеквадратическая ошибка результата; N_3 — предельное значение ошибки результата.

ИПА и ИПД могут оказать влияние на решение задачи при выполнении команд считывания информации.

Безусловный переход от блока через фрагмент i к очередному блоку обеспечивается скорректированным «условием перехода» за счет ИП.

Таким образом, на рис. 5 представлена ИВС, сформированная с учетом возможной некорректности отдельных элементов составных частей, выраженных в формате ИП. Конкретное содержание блоков и фрагментов ИВС должно соответствовать функциональному назначению задачи.

Из материалов статьи следует, что точность решения задачи зависит от величины отклонения условий перехода от нормы, что аналогично степени структуризации составных частей ИВС.

Заключение

1. Разработана технология формирования ИВС для решения измерительных задач с различной степенью структуризации.

2. В основу решения проблемы положены принципы структурного анализа, позволяющие значительно упростить процесс решения подобных задач.

3. В качестве примера рассмотрена задача определения параметров движения КА, где показано

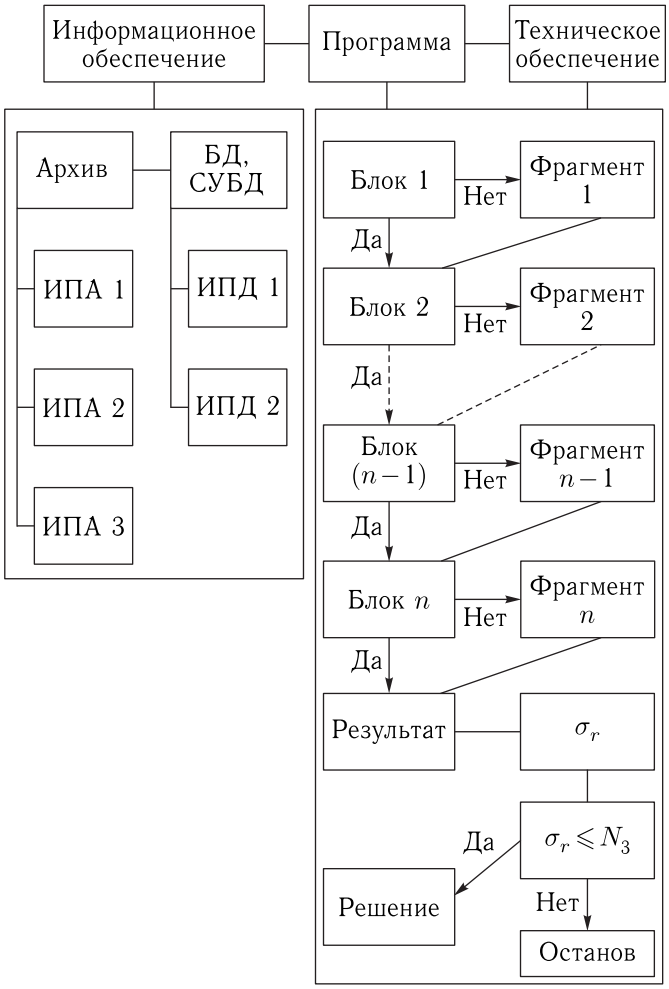


Рис. 5. Структурная схема ИВС

влияние «условий перехода» на точность решения задачи.

4. Предложенная структура ИВС имеет универсальный характер и может использоваться для решения измерительных задач различного типа.

Список литературы

1. ГОСТ 24453-80 Измерения параметров и характеристик лазерного излучения. Термины, определения и буквенные обозначения величин.
2. ГОСТ Р 53622-2009 Информационные технологии. Информационно-вычислительные системы. Стадии и этапы жизненного цикла, виды и комплектность документов.
3. *Йордан Э.* Современный структурный анализ. Йордан Пресс Computing Series, 1989. ISBN 0-13-598624-9.
4. *Рассел С.*, *Норвиг П.* Искусственный интеллект: современный подход. 2-е изд. М.: Вильямс, 2007. 1408 с.
5. *Бетанов В. В.*, *Ларин В. К.* Использование системного подхода к решению проблемных вопросов функционирования АКП БНО полетов КА ГНСС // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2016, т. 3, вып. 1. С. 3–10.
6. *Бетанов В. В.*, *Ларин В. К.* Концепция построения технологической модели решения слабоструктурированных задач на основе теории множеств // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2019, т. 6, вып. 2. С. 59–67.
7. *Ларин В. К.* Построение прототипа экспертно-диагностической системы анализа траекторной измерительной информации // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2017, т. 4, вып. 1. С. 53–60.
8. *Бетанов В. В.*, *Ларин В. К.*, *Позяева З. А.* К вопросу анализа причин возникновения сбоев в аппаратно-программном комплексе уточнения эфемеридно-временной информации ГНСС // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2014, т. 1, вып. 1. С. 55–60.

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ
2020, том 7, выпуск 1, с. 59–71

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

УДК 629.78 DOI 10.30894/issn2409-0239.2020.7.1.59.71

Анализ методов обработки информации и координации развития космических систем ДЗЗ гидрометеорологического назначения в рамках международных программ CGMS и GSICS

Ю. М. Гектин, *к. т. н., gektin_um@spacecorp.ru*
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация
С. М. Зорин, *к. т. н., zorin_sm@spacecorp.ru*
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация
Д. О. Трофимов, *trofimov_do@spacecorp.ru*
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация
И. А. Барсуков, *barsukov_ia@spacecorp.ru*
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация
К. И. Жуковская, *zhukovskaya_ki@spacecorp.ru*
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Международная координация работ по калибровке и валидации гидрометеорологических спутниковых данных привела к формированию под эгидой ВМО (Всемирная метеорологическая организация, WMO) двух основных международных программ — CGMS и GSICS, в рамках которых ежегодно проводятся заседания с участием представителей нескольких стран, включая Российскую Федерацию (Росгидромет, Роскосмос). В работе представлен анализ основных направлений развития систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) гидрометеорологического назначения по результатам рассмотрения докладов и участия представителей АО «Российские космические системы» в международных мероприятиях CGMS-47 и GSICS-EP-20 (Россия, г. Сочи, 16–24 мая 2019 г.).

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), космический аппарат (КА), калибровка, валидация, Всемирная метеорологическая организация, координационная группа по метеорологическим спутникам, Глобальная система интеркалибровки спутниковых данных

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ
2020, том 7, выпуск 1, с. 59–71

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

Data Processing Methods and the Coordination of the Development of Hydrometeorological ERS Space Systems as Part of the CGMS and GSICS International Programs

Yu. M. Gektin, *Cand. Sci. (Engineering), gektin_um@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

S. M. Zorin, *Cand. Sci. (Engineering), zorin_sm@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

D. O. Trofimov, *trofimov_do@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

I. A. Barsukov, *barsukov_ia@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

K. I. Zhukovskaya, *zhukovskaya_ki@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. The international coordination of efforts in hydrometeorological satellite data calibration and validation has led to the organization of two main international programs under the auspices of the World Meteorological Organization (WMO) — CGMS and GSICS. Within the programs, annual meetings are held with participants from several countries, including the Russian Federation (Roshydromet, Roscosmos). The paper presents an analysis of the key focus areas of development of hydrometeorological Earth Remote Sensing (ERS) systems in accordance with reports and results of the participation of representatives of Joint Stock Company "Russian Space Systems" in the CGMS-47 and GSICS-EP-20 international meetings (Sochi (Russia), May 16–24, 2019).

Keywords: Earth Remote Sensing (ERS), spacecraft, calibration, validation, WMO — World Meteorological Organization, CGMS — Coordination Group for Meteorological Satellites, GSICS — Global Space-based Inter-Calibration System

Введение

Координационная группа по метеорологическим спутникам CGMS была образована в 1972 году. Росгидромет присоединился к CGMS в 1973 году. В настоящее время членами CGMS также являются Госкорпорация по космической деятельности «Роскосмос», Китайская метеорологическая администрация (CMA), Китайское национальное космическое управление (CNSA), Европейская организация по эксплуатации метеорологических спутников (EUMETSAT), Европейское космическое агентство (ESA), Французское космическое агентство (CNES), Индийская организация космических исследований (ISRO), Индийский метеорологический департамент (IMD), Японское агентство аэрокосмических исследований (JAXA), Японское метеорологическое агентство (JMA), Корейская метеорологическая администрация (KMA), Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства США (NASA), Национальное управление океанических и атмосферных исследований США (NOAA), Всемирная метеорологическая организация (WMO), Межправительственная океанографическая комиссия ЮНЕСКО (IOS-UNESCO)

Кроме того, в состав CGMS со статусом наблюдателей входят Канадское космическое агентство (CSA), Глобальная система наблюдений за климатом (GCOS), Корейский институт аэрокосмических разработок (KARI), Корейский институт океанических исследований и развития (KORDI), Государственное океанологическое управление Китая (SOA).

Международная рабочая группа по Глобальной системе интеркалибровки спутниковых данных GSICS была образована совместно ВМО и CGMS в 2005 году с целью мониторинга и улучшения качества наблюдений с оперативных метеорологических спутников Глобальной системы наблюдений ВМО.

Росгидромет и Роскосмос имеют своих представителей в CGMS и GSICS, используют участие в работе этих международных мероприятий для выработки общих подходов к формированию данных космической съемки, более эффективного проведения работ по калибровке/валидации информационных данных отечественных метеоспутников и совершенствования аппаратуры с целью повышения точности и стабильности радиометрических измерений, а также точности их геопривязки.

Основные принципы организации работ метеорологических агентств, космических агентств и операторов КА ДЗЗ по калибровке/валидации спутниковых данных

Спутниковые данные для мониторинга климата и других задач гидрометеорологии требуют точной калибровки, согласованной для различных однотипных приборов и обеспечивающей в течение длительного времени штатной эксплуатации КА хорошее соответствие с данными референсного (эталонного) прибора. Работы в рамках Международной системы калибровки и валидации спутниковых приборов, координируемых CGMS и GSICS, имеют важное значение как для исследования климатических процессов, так и для совершенствования организационных, аппаратурных, технологических и методических аспектов всех видов калибровок.

Основная идея интеркалибровки заключается в том, что два КА проводят съемку одной и той же территории в одно и то же время, с одинаковыми пространственными характеристиками и геометрией обзора. В результате интеркалибровки нужно количественно определить относительную погрешность измерений между проверяемым и эталонным приборами для конкретной тандемной съемки, найти причины несоответствия данных, скорректировать или устранить их.

Как показано в работе [1] на примере аппаратуры МСУ-МР, интеркалибровка двух приборов разных космических аппаратов требует точного согласования в 8-мерном пространстве, включающем время, широту, долготу, высоту, солнечный зенитный угол, угол обзора по азимуту, зенитный угол наблюдения и спектральный диапазон. Значительные погрешности в любой из перечисленных составляющих могут привести к случайным и систематическим ошибкам, что впоследствии приведет к неточностям измерения.

Выбор эталонного прибора также вызывает сложности — ключевой его характеристикой должна являться радиометрическая стабильность, но нужно учитывать и другие важные факторы (орбиты спутников должны позволять проводить съемку одних и тех же территорий, приборы должны иметь схожие спектральные характеристики и др.). Кроме того, эталонный прибор выбирается путем проверки качества и признания его таковым странами — членами международного сообщества в рамках CGMS и GSICS с учетом малых погрешностей радиометрических измерений, долговременной стабильности измерительных характеристик, а также условий и точности наземной радиометрической калибровки и наличия высокостабильной системы бортовой калибровки.

Например, как показано в [1, 2], для аппаратуры МСУ-МР и МСУ-ГС видимого диапазона в качестве опорных радиометров использовались соответственно AVHRR (КА MetOp, Евросоюз) и VIIRS (КА Suomi NPP, США).

А для интеркалибровки спутниковой ИК-аппаратуры в настоящее время в рамках GSICS в качестве основного эталонного прибора используется интерферометр IASI (КА MetOp, Евросоюз). Кроме того, для интеркалибровки могут использоваться данные инфракрасного (ИК) зондировщика AIRS (КА Aqua, США).

Помимо IASI и AIRS в качестве промежуточных эталонов для ИК-диапазона спектра используется ряд приборов, стабильность и точность радиометрических характеристик которых была подтверждена в ходе различных интеркалибровок целевой аппаратуры (ЦА):

– ИК-зондировщик CrIS/SNPP (работы по проверке качества абсолютной калибровки завершились в 2013 г.);

– сканирующий радиометр MODIS/EOS Terra, Aqua;

– сканирующий радиометр AVHRR/NOAA;

– сканирующий радиометр VIIRS/SNPP;

– сканирующий радиометр SEVIRI/Meteosat 10.

Данные измерений перечисленных приборов (регионального и глобального покрытия) имеются в открытом доступе или могут быть получены из спутниковых архивов, поддерживаемых NOAA, NASA, EUMETSAT и используются для интеркалибровки данных космической съемки ЦА, установленной на КА серий «Метеор-М», «Электро-Л», «Канопус-В-ИК» [1–3].

Опыт разработки и эксплуатации целевой аппаратуры микроволнового диапазона (например, микроволновых сканеров/зондировщиков температурно-влажностного зондирования атмосферы МТВЗА и МТВЗА-ГЯ для КА «Метеор-3М» №1 и КА серии «Метеор-М») подтверждает необходимость создания процедур интеркалибровки и внешней калибровки спутниковых данных. В настоящее время микроволновый сканер/зондировщик МТВЗА-ГЯ является одним из основных видов целевой аппаратуры на метеорологических спутниках серии «Метеор-М». По информационным характеристикам и области применения МТВЗА-ГЯ соответствует зарубежным аналогам — зондировщикам AMSU-A и AMSU-B (КА NOAA, США и MetOp, Евросоюз), ATMS (КА Suomi NPP, США) [4], сканерам AMSR-E (КА Aqua, США), AMSR2 (КА GCOM-W1, Япония) [4] и сканеру/зондировщику SSMIS (КА DMSP F16–F19, США).

Для внешней калибровки микроволновых сканеров/зондировщиков выполняются сопоставления измеренной антенной температуры (отсчетов) и расчетной яркостной температуры над протяженными однородными «холодными» и «горячими» участками океана и земной поверхности [4, 5]. В качестве «горячей» области используются широколиственные леса бассейна Амазонки, при этом выбираются измерения на витках, когда над участком со сплошным лесным покровом отсутствует мощная облачность и осадки. «Холодные» области выбираются над отдельными районами Антарктиды и над районами океана с температурой поверхности воды от 0 до +12 °С, слабым ветром, отсутствием облаков и низкими значениями паросодержания атмосферы [4].

Для интеркалибровки пассивных измерений микроволновых приборов типа сканера/зондировщика МТВЗА-ГЯ в качестве зарубежных референсных приборов можно использовать прежде всего аппаратуру с коническим режимом сканирования — сканеры/зондировщики SSMIS (КА DMSP F16–F19, США), AMSR-E/EOS (КА Aqua, США), AMSR2 (КА GCOM-W1, Япония). При отсутствии доступа к информации указанных приборов для интерка-

либровки данных в отдельных каналах МТВЗА-ГЯ с определенными ограничениями можно использовать измерения микроволновых зондировщиков AMSU-A и AMSU-B (КА NOAA, США и MetOp, Евросоюз) и ATMS (КА Suomi NPP и JWSS, США) с поперечным режимом сканирования.

Краткий обзор состояния зарубежных спутниковых группировок и целевой аппаратуры гидрометеорологического назначения по результатам докладов на заседаниях CGMS-47 и GSICS-EP-20 (г. Сочи, Россия, 16–24 мая 2019 г.)

Лидирующее положение в вопросах координации и организации международного сотрудничества в вопросах глобальных спутниковых систем наблюдения за метеорологическими (и смежными с ними) параметрами в целях анализа и прогноза состояния окружающей среды, в том числе опасных явлений погоды и их заблаговременного предупреждения, занимают США, Евросоюз, Япония и Китай.

Соответственно важен анализ состояния спутниковых группировок и ЦА гидрометеорологического назначения в первую очередь указанных стран.

США (NASA, NOAA)

На рис. 1, 2 представлен состав действующей и перспективной группировок гидрометеорологических спутников США из доклада NASA [6].

По состоянию на май 2019 г. США имеют 23 действующих гидрометеорологических спутника (NASA), без учета геостационарной космической системы GOES (NOAA). С момента прошлого заседания CGMS-46 было запущено 10 новых миссий, включающих: ICESat-2, GRACE-FO, OSO-3, ECOSTRESS, GEDI и пять ультракомпактных КА (типа CubeSat): RainCube, Cube RRT, CSIM-FD, TEMPTEST-D, MinXSS-2. В период 2019–2025 гг. NASA планирует запустить еще 15 миссий, в их числе TEMPO, Landsat-9, 10, Sentinel-6A/B, SWOT, PACE, CLARREO-PF и др. (рис. 1). Таким

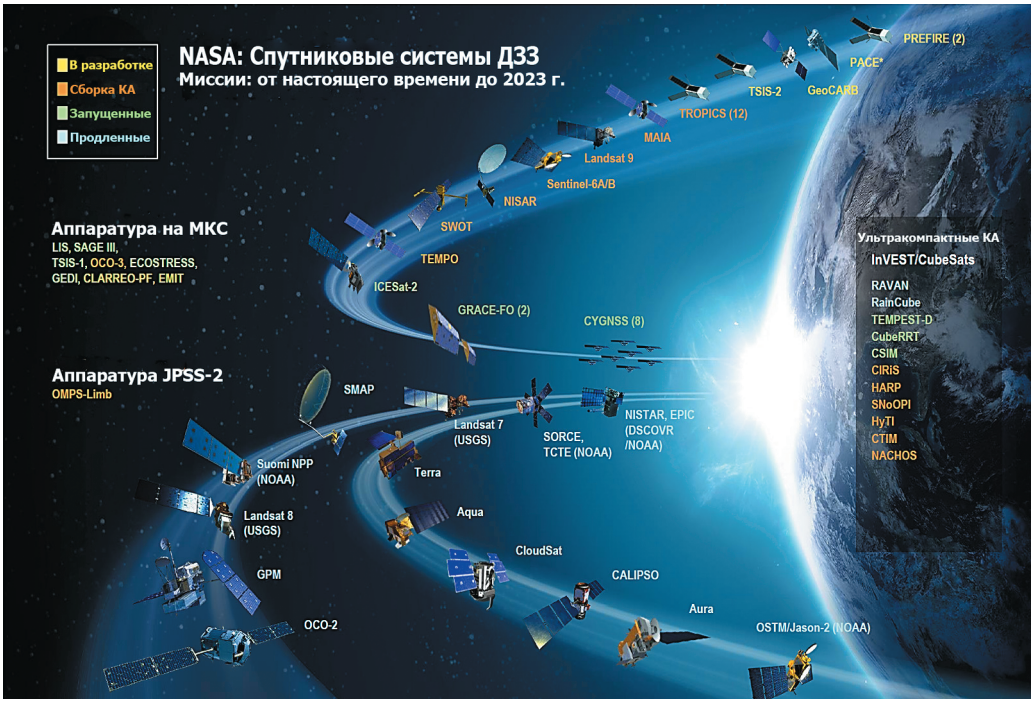


Рис. 1. Группировка гидрометеорологических спутников ДЗЗ США [6]

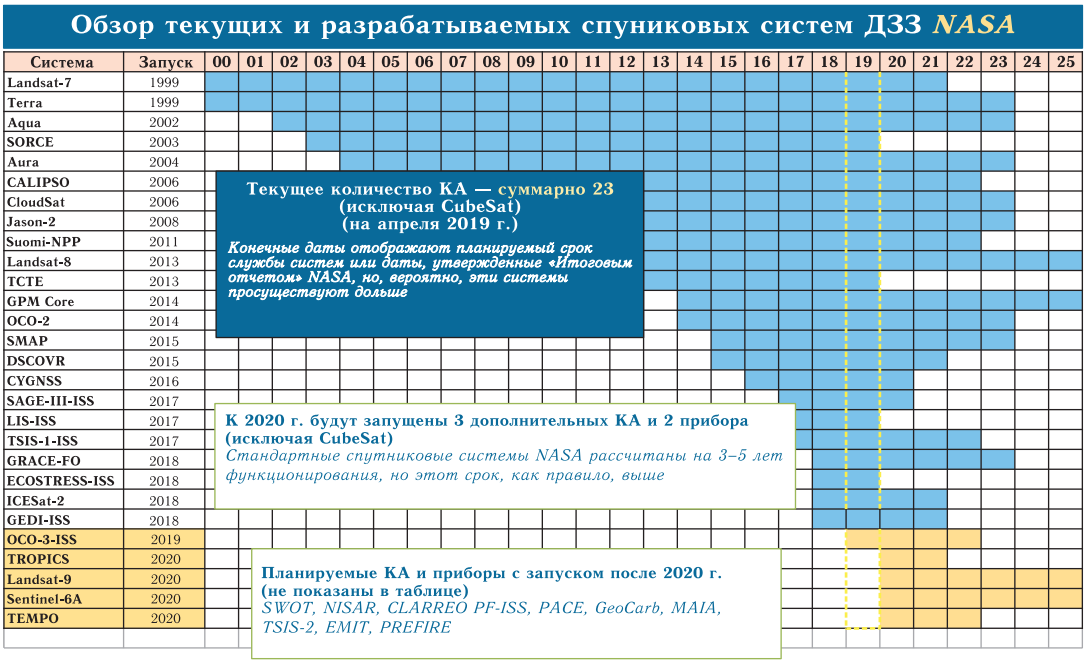


Рис. 2. Состав действующей и перспективной группировок спутников ДЗЗ США [6]

образом, суммарный состав группировки гидрометеорологических спутников США превысит 30 КА.

При этом на данный момент в составе группировки спутников ДЗЗ США есть значительное число КА со сроком службы 15–20 лет, которые продолжают успешно функционировать (рис. 2).

Также увеличивается количественный и качественный состав аппаратуры ДЗЗ США (LIS, SAGE III, TSIS-1, OCO-3, ECOSTRESS, GEDI, CLARREO-PF, EMIT) на международной космической станции (МКС) (рис. 3) [7].

Необходимо отметить, что в 2017–2019 гг. были запущены и введены в эксплуатацию ультракомпактные КА (типа CubeSat), такие как MiRaTA, HARP, RAVAN, IceCube, RainCube, TEMPEST-D, CubeRRT, CIRiS, которые подтвердили перспективность развития данного направления ДЗЗ в США.

Кроме того, в NASA и NOAA явно обозначены тенденции по коммерциализации всех звеньев создания и функционирования КС от разработки техники до распространения данных ДЗЗ, формирования прогнозов погоды и климата.

По состоянию на сентябрь 2018 г. были заключены контракты в рамках пилотных коммерческих программ по созданию многоспутниковых систем на основе малых КА:

– DigitalGlobe, 5 спутников наблюдения Земли с разрешением до 30 см (GeoEye-1, WorldView-1, WorldView-2, WorldView-3, WorldView-4);

– Planet (ранее Planet Labs), три спутниковые системы (SkySat, Dove, RapidEye) с группировкой более 150 спутников наблюдения Земли со средним и высоким разрешением и высокой частотой обновления данных;

– SPIRE, более 60 спутников с приборами радиозатменного зондирования, определения координат летательных аппаратов и судов.

Евросоюз (ESA, EUMETSAT)

Спутниковая группировка Евросоюза по состоянию на май 2019 г. содержит 15 действующих спутников, 25 находятся в разработке, 12 готовятся к запуску. За последнее время можно отметить успешный запуск и ввод в эксплуатацию КА Sentinel-5P (октябрь 2017 г.), Sentinel-3B (апрель 2018 г.), Aeolus (август 2018 г.), MetOp-C (ноябрь 2018 г.).

На рис. 4 представлен план-график развития спутниковой группировки ESA до 2040 г. [8]. Следует отметить представленные согласованные планы NASA и ESA (программа Copernicus) по развитию



Рис. 3. Состав аппаратуры ДЗЗ США на МКС [7]

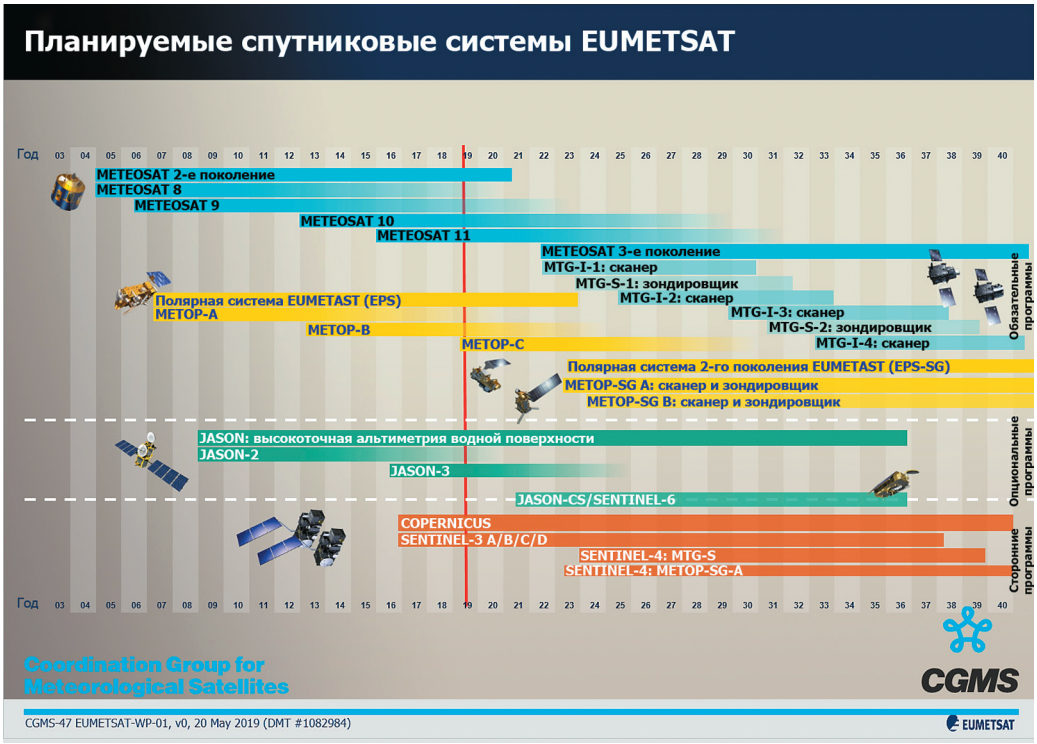


Рис. 4. Спутниковая группировка ДЗЗ Евросоюза [8]

научной составляющей программ наблюдения Земли из космоса, которые предполагают создание новых приборов, нацеленных на изучение качества атмосферного воздуха, состава атмосферы, определение содержания углекислого газа, озона, метана и других парниковых газов, а также на изучение интенсивности процессов фотосинтеза и роста растений.

Перечисленные задачи требуют создания принципиально новых приборов, таких как спектрометры сверхвысокого спектрального разрешения FLEX (Fluorence Explorer), OCO (Orbiting Carbon Observatory), GeoCarb (Geostationary Carbon Cycle Observatory), а также ИК-радиометры и спектрометры с чувствительностью в дальнем ИК- и микроволновом диапазонах, такие как CORSAIR (Calibrated Observations of Radiance Spectra in the Far-Infrared), CLARREO (Climate Absolut Radiance and Refractivity Observatory), ECOSTRESS (ECOsystem Spaceborne Thermal Radiometer Experiment on Space Station), ICESat-2 (Ice, Cloud and land Elevation Satellite 2), GEDI (Global Ecosystem Dynamics Investigation), а также ряд приборов в рамках программы MeTop-SG — MWI, MWS, ICI и др.

Япония (JAXA, JMA)

Основные КА японской программы наблюдения Земли из космоса представлены на рис. 5 [9].

Японская аппаратура гидрометеорологического назначения, помимо приборов видимого, ближнего ИК- и ближнего УФ-диапазонов (SGLI), включает также ИК-радиометры (IRS, VNR, AHI), ИК-фурье спектрометры (TANSO-FTS), приборы наблюдения за парниковыми газами (КА Ibuki, 7 приборов) и микроволновые радиометры (GMI, AMSR). Необходимо отметить тесное сотрудничество японских агентств JAXA и JMA с соответствующими агентствами США и Евросоюза. На заседаниях рабочих групп GSICS и CGMS часто обсуждаются вопросы интеркалибровки ИК-радиометров AHI (Advanced Himawari Imager), которые изготовлены с участием США (аналоги ABI), установлены на КА Himavari-8, 9 и хорошо себя зарекомендовали при длительной эксплуатации, подтвердив сличения с данными, полученными с приборов IASI и CrIS/SNPP (США). На заседаниях WGII со стороны представителя США была выражена особая заинтересованность в данных микроволнового сканера с коническим сканированием и обеспечении запуска AMSR-3 в 2022–2023 гг.

Китай (CMA, CNSA)

На рис. 6 представлены история и стратегия запусков гидрометеорологических КА китайской программы наблюдения Земли из космоса [10].

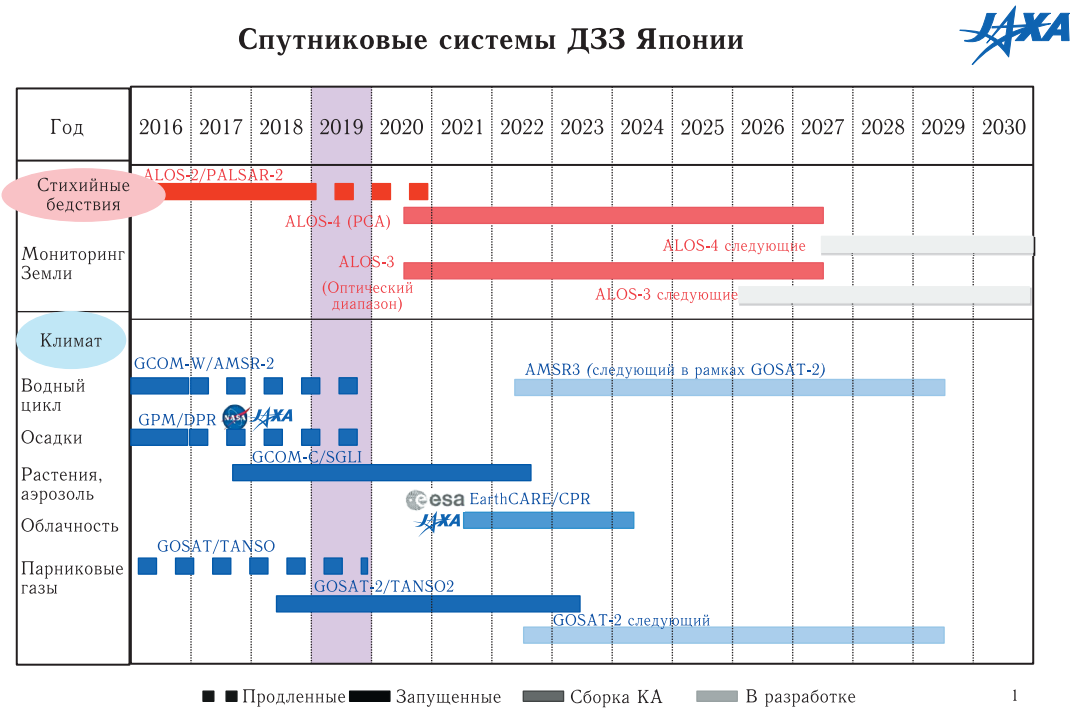


Рис. 5. Японская аппаратура гидрометеорологического назначения [9]



Рис. 6. История и стратегия запусков гидрометеорологических КА по программе КНР Фэнъюнь (Fengyun) [10]

На данный момент на орбите работают 7 КА КНР (4 на геостационарной и 3 на низкой околоземной орбитах). Геостационарный КА FY-2H запущен в июне 2018 г. и принят в эксплуатацию в январе 2019.

В составе ЦА китайской группировки представлен весь спектр приборов мониторинга атмосферы, океана, Солнца и Луны, МСУ, микроволновые сканеры-зондировщики, ИК-фурье-спектрометры (ИКФС), регистраторы молний (lightning mapper) и т. д.

С 2019 по 2023 гг. планируется запустить 6 новых КА (FY-3E, FY-4B, FY-4F, FY-RM, FY-4C, FY-3G) (см. рис. 6) [10].

В докладе CMA на GSICS отмечалось, что КНР планирует масштабные проекты по изучению Луны, которые помогут получить также и необходимые данные для радиометрической калибровки аппаратуры ДЗЗ по лунному диску.

В ряде докладов специалистов КНР сообщается о проекте разработки национального радиометрического эталонного стенда космического базирования (Space-based Radiometric Benchmark) с целью проведения радиометрических калибровок ЦА в абсолютных единицах системы СИ (рис. 7) [10].

Основные исполнители проекта:

– Академия оптоэлектроники (AOE), Китайская академия наук (CAS);

– Национальный спутниковый метеорологический центр (NSMC), CMA;

– Шанхайский институт технической физики (SITP), CAS;

– Хэфэйский институт естественных наук (HIPS), CAS.

Этап Б (2018–2022 гг.) предполагает финансирование 300 млн юаней (около 3 млрд руб.) [10], что говорит о значимости данного направления в планах развития систем ДЗЗ. Данная программа предусматривает такие исследования в области метрологии, как измерения характеристик АЧТ, коэффициентов излучения различных материалов, создание бортовых АЧТ с применением

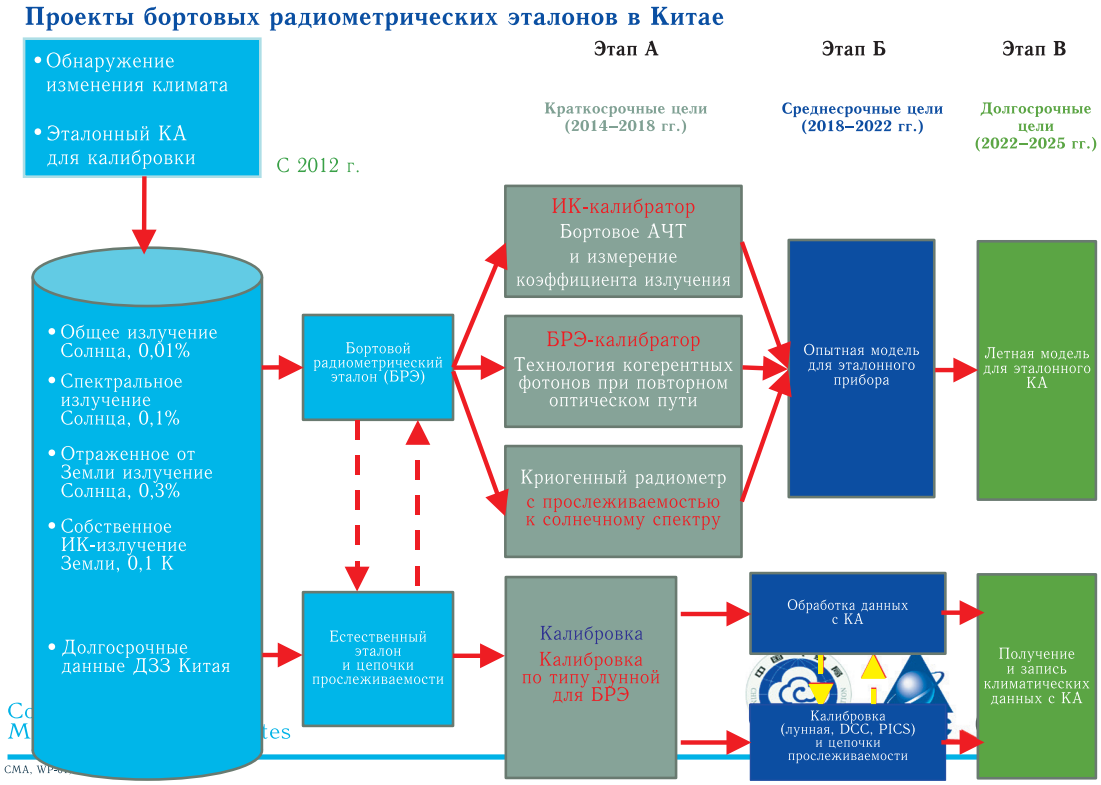


Рис. 7. Радиометрический эталонный стенд космического базирования КНР [10]

калибровочных ячеек на фазовых переходах сплавов галлия, воды и органических веществ, применение лазерной техники.

Данный подход позволит снизить неопределенность калибровки по температуре полостного бортового АЧТ до 10 мК для диапазона температур от 270 до 350 К (коэффициент излучения не менее 0,997 и погрешность воспроизведения температуры не более 0,15 К).

Заключение

Таким образом, можно выделить следующие основные направления развития КС ДЗЗ гидрометеорологического назначения.

1. В части точных радиометрических измерений для прогноза погоды, мониторинга состояния климата, акваторий морей и океанов большое внимание уделяется приборам ИК-диапазона, таким как многозональные сканирующие устройства (МСУ), ИК-фурье-спектрометры (ИКФС), а также микроволновые пассивные сканирующие радиометры. Основные требования к этим приборам состоят в долговременной стабильности измерительных характеристик и минимально достижимых инструментальных погрешностях. Так, например, представленные результаты интеркалибровки Himawari-8/AHI (Япония), проведенной в 2019 г., при сличении с данными эталонных приборов MetOp-A/IASI (США) и SNPP/CrIS (США) показали стандартное отклонение измеренных температур в разных ИК каналах от 0,005 до 0,039 К, а значения систематической погрешности от 0,01 до 0,24 К за год. Эти данные подтверждают очень высокую стабильность и точность измерений радиационной температуры зарубежной ИК-аппаратуры.

2. Признано, что алгоритмы GSICS и эталонные приборы GSICS (IASI, CrIS, L1 Microwave SSMIS, AMSR-E, AMSR-2, MSU/AMSU FCDR) могут быть использованы для мониторинга и рекалибровки соответствующих российских приборов МСУ-ГС, МСУ-МР, ИКФС-2, МТВЗА-ГЯ.

3. В рамках GSICS в период до марта 2019 г. проводились работы по интеркалибровке

следующей ИК аппаратуры: Meteosat-8-11/SEVIRI (EUMETSAT), MTSAT-2 Imager, Himawairi-8-9/AHI (JMA); GOES-11, -12, -15 Imager, GOES-16, -17/ABI (NASA/NOAA); FY-2C,D,E,F,G/VISSR, FY-4A/AGRII/GIIRS (CMA); COMS, KOMPSAT-2A (KMA); INSAT-3D/Imager, INSAT-3D/Sounder/Imager, INSAT-3R (ISRO); «Метеор-М»/ИКФС-2, «Электро-Л»/МСУ-ГС, «Метеор-М»/МСУ-МР (Росгидромет, Роскосмос).

4. Отмечена перспективность проведения работ по использованию лунной калибровки аппаратуры, разработке соответствующих алгоритмов и расчетных моделей.

5. Космическим агентством КНР запланирован масштабный проект разработки национального радиометрического эталонного стенда космического базирования (Space-based Radiometric Benchmark) с целью проведения радиометрических калибровок ЦА от видимого до ИК-диапазона в абсолютных единицах системы СИ с высокой точностью.

6. Современные вызовы, связанные с большим количеством успешных стартапов в области многоспутниковых систем на базе малых КА, существенным образом трансформировали рынок ДЗЗ. Эксперты предполагают, что к 2023 г. на орбитах появится более 1100 новых спутников ДЗЗ. Только четыре компании (Planet (ранее Planet Labs), Maxar, Spire и BlackSky Globe) планируют за этот период запустить более 970 спутников [11]. При этом необходимо отметить, что многоспутниковые системы ДЗЗ на основе малых КА (типа CubeSat) на данном этапе предназначены для высокооперативного наблюдения и не решают задач точных радиометрических измерений характеристик атмосферы, океана и поверхности Земли в различных спектральных диапазонах. Однако, например, NASA выполняет большое количество проектов на основе КА типа CubeSat в рамках программы Earth Science Technology Program Elements (ESTO), которые предполагают создание ультракомпактной ЦА, включая ИК-гиперспектрометры (HyTI), спектрометры солнечного излучения (CTIM), радиолокационные радиометры (SNoOPI, RainCube, TEMPEST-D), гиперспектральные трассовые спектрометры (TACOS) и т. д.

7. Все большее внимание уделяется спутниковым системам ДЗЗ арктической зоны, которые предназначены для обеспечения исследований, контроля и прогнозирования состояния атмосферы, океана, арктических морских льдов, прибрежной зоны, высоты снежного покрова, аномальных явлений в приполярных районах.

8. Следует отметить, что в России большую часть работы по распространению данных ЦА гидрометеорологического назначения, оценке качества полученных данных, проведению интеркалибровки и представлению научно-технических и организационных результатов в рамках GSICS и CGMS проводит Росгидромет, в частности ФГБУ «НИЦ «Планета». Однако, эта работа невозможна без участия предприятий — разработчиков бортовой аппаратуры. Например, АО «Российские космические системы» является разработчиком и изготовителем такой бортовой аппаратуры, как многозональные сканирующие устройства МСУ-МР (КА «Метеор-М»), МСУ-ГС (КА «Электро-Л», «Арктика-М»), МСУ-ИК-СРМ (КА «Канопус-В-ИК»), МСУ-МР-МП (КА «Метеор-МП»), инфракрасный радиометр высокого разрешения (РИВР) для многоцелевого лабораторного модуля «Наука» МКС, сканеров/зондировщиков МТВЗА-ГЯ (КА «Метеор-М») и МТВЗА-ГЯ-МП (КА «Метеор-МП»).

Все вышеперечисленные приборы имеют особенности декодирования и обработки поступающей информации при штатной эксплуатации, особенности измерительных трактов спектральных каналов, особенности наземной и бортовой калибровки, что требует полетного сопровождения данной целевой аппаратуры специалистами разработчика при оценке качества данных космической съемки для исключения систематических ошибок при проведении интеркалибровок.

В докладах, представленных специалистами АО «Российские космические системы» на GSICS-EP-20 и CGMS-47, авторы–разработчики сканеров/зондировщиков МТВЗА-ГЯ (КА серии «Метеор») [5], многозональных сканирующих устройств МСУ-ГС (КА «Электро-Л») [12] и МСУ-ИК-СРМ (КА «Канопус-В-ИК») [13] описывают принципы работы, основные технические характеристики и особенности бортовой калибровки аппаратуры с учетом оценки полученных данных космической съемки, в том числе на основе интеркалибровки.

В частности, в докладе [12] отмечено, что оценка метрологических характеристик радиометра МСУ-ГС в составе КА «Электро-Л» № 2 в сравнении с радиометрами VIIRS (КА Suomi NPP, схема GEO-LEO) и SEVIRI (КА Meteosat-10, схема GEO-GEO), показала хорошее соответствие получаемых этими приборами радиометрических данных, а также возможность построения на основе данных космических съемок МСУ-ГС тематических продуктов, соответствующих мировым стандартам качества.

Результаты интеркалибровки радиометра МСУ-ИК-СРМ (КА «Канопус-В-ИК») [13] с использованием в качестве опорных приборов IASI (КА MetOp-A,B) и ИКФС-2 (КА «Метеор-М» № 2) показали, что относительная разность радиометрических данных в канале 2 МСУ-ИК-СРМ по сравнению с данными IASI (MetOp-B) и ИКФС-2 для спектральной плотности энергетической яркости на эффективной длине волны не превышает 5 %. Это свидетельствует о хорошем качестве абсолютной калибровки МСУ-ИК-СРМ.

Таким образом, интеркалибровка является хорошим инструментом для отслеживания метрологических характеристик космических радиометров при условии минимизации методических ошибок, связанных с согласованием времени, широты, долготы, высоты, солнечного зенитного угла, угла обзора по азимуту, зенитного угла наблюдения и спектрального диапазона при съемке одного объекта двумя различными приборами.

Список литературы

1. *Филей А. А.*, *Рублев А. Н.*, *Зайцев А. А.* Радиометрическая интеркалибровка коротковолновых каналов многоканального спутникового устройства КА «Метеор-М» № 2 по радиометру AVHRR КА «MetOp-A» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2016, т. 13, № 6. С. 251–263.
2. *Филей А. А.*, *Рублев А. Н.*, *Зайцев А. А.* Радиометрическая кросс-калибровка коротковолновых каналов многоканального спутникового устройства КА «Электро-Л» № 2 по данным измерений VIIRS КА Suomi NPP // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2017, т. 14, № 7. С. 31–38.
3. *Rublev A. N.*, *Gorbarenko E. V.*, *Golomolzin V. V.*, *Borisov E. Y.*, *Kiseleva J. V.*, *Gektin Y. M.*, *Zaitsev A. A.* Inter-calibration of Infrared Channels of Geostationary Meteorological Satellite Imagers // Frontiers in Environmental Science, doi: 10.3389/fenvs.2018.00142, November 2018, volume 6, article 142.
4. *Чернявский Г. М.*, *Митник Л. М.*, *Кулешов В. П.*, *Митник М. Л.*, *Чёрный И. В.* Микроволновое зондирование океана, атмосферы и земных покровов по данным спутника «Метеор-М» № 2 // Исследование Земли из космоса, 2018, т. 15, № 4. С. 78–100.
5. *Cherny I. V.*, *Chernyavsky G. M.*, *Barsukov I. A.*, *Streltsov A. M.*, *Egorov A. N.*, *Gavrilov M. I.*, *Yakovlev V. V.* Calibration of microwave imager/sounder MTVZA-GY onboard «Meteor» satellites series // Materials from CGMS-47, Russian Federation, Sochi, 2019, Working Paper CGMS-47-ROSCOSMOS-WP-02, 18 p. // CGMS-47, WGII: Satellite Data and Products, CGMS agency reports on highlights issues in dataset and product generation. http://www.cgms-info.org/agendas/CGMS-47 (Доступ свободный).
6. *Kaye J.* NASA Report on the Status of Current and Future Earth Satellite Systems // Materials from CGMS-47, Russian Federation, Sochi, Working Paper CGMS-47-NASA-WP-01, 23 p. // CGMS-47, Plenary Session. http://www.cgms-info.org/agendas/CGMS-47 (Доступ свободный).
7. *Butler J., Xiong J.* Report from NASA // Materials from GSICS-EP-20, Russian Federation, Sochi, 2019 // GSICS-EP-20 https://www.wmo.int/pages/prog/sat/meetings/ GSICS-EP-20/ documents/ GSICS-EP-20_Doc_5.10p_NASA_agency_report_050819.pdf (Доступ свободный).
8. EUMETSAT development and plans since CGMS-46 // Materials from CGMS-47, Russian Federation, Sochi, 2019, Working Paper CGMS-47 EUM-WP-01 PPT, 11 p. // CGMS-47, Plenary Session. http://www.cgms-info.org/agendas/CGMS-47 (Доступ свободный).
9. *Hitoshi Tsuruma* JAXA Earth Observation Program // Materials from CGMS-47, Russian Federation, Sochi, 2019, Working Paper CGMS-47-JAXA-WP-01 PPT, 15 p. // CGMS-47, Plenary Session. http://www.cgms-info.org/agendas/CGMS-47 (Доступ свободный).
10. *Zhang Peng* Updated report on Fengyun satellite program and development // Materials from CGMS-47, Russian Federation, Sochi, 2019, Working Paper CGMS-47-CMA-WP-01 PPT, 32 p. // CGMS-47,

Plenary Session. http://www.cgms-info.org/agendas/CGMS-47 (Доступ свободный).

11. *Бакланов А.И.* Новые горизонты космических систем оптико-электронного наблюдения Земли высокого разрешения // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2018, т. 5, вып. 4. С. 14–27.
12. *Gektin U.M.*, *Zorin S.M.*, *Trofimov D.O.*, *Zaitsev A.A.* The functional and calibration features of the multispectral scanner MSU-GS onboard Elektro-L No. 2 // Materials from CGMS-47, Russian Federation, Sochi, 2019, Working Paper CGMS-47-ROSCOSMOS-WP-01, 9 p. // CGMS-47, WGII: Satellite Data and Products, CGMS agency reports on highlights issues in dataset and product generation. http://www.cgms-info.org/agendas/CGMS-47 (Доступ свободный).
13. *Zubkova K.I.*, *Kurevleva T.G.*, *Grishantseva L.A.*, *Velikoselskaya D.M.* Intercalibration of MSU-IK-SRM/Kanopus-V-IK with IASI/Metop // Materials from GSICS-EP-20, Russian Federation, Sochi, 2019 // GSICS-EP-20. https://www.wmo.int/pages/prog/sat/meetings/GSICS-EP-20/documents/GSICS-EP-20_Doc_5.11p _ROSCOSMOS.pdf (Доступ свободный).

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ
2020, том 7, выпуск 1, с. 72–83

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

УДК 528.72, 528.8, 004.9 DOI 10.30894/issn2409-0239.2020.7.1.72.83

Особенности обработки данных сенсора «Геотон-Л1» космического аппарата «Ресурс-П» при формировании бесшовных сплошных покрытий регионов РФ

А. Н. Марков, *nova@ntsomz.ru*
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация
А. И. Васильев, *к.ф.-м.н., nova@ntsomz.ru*
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация
А. В. Крылов, *nova@ntsomz.ru*
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация
М. А. Евлашкин, *nova@ntsomz.ru*
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация
А. А. Пестряков, *nova@ntsomz.ru*
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация
А. А. Михеев, *nova@ntsomz.ru*
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация
А. С. Алексеевский, *nova@ntsomz.ru*
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассматриваются особенности обработки данных сверхвысокого разрешения аппаратуры «Геотон-Л1» космического аппарата «Ресурс-П» в обеспечение формирования бесшовных сплошных покрытий (БСП) на регионы Российской Федерации. Приведены методика формирования БСП и требования к опорной информации. Обозначены проблемные вопросы отбора данных и создания продуктов стандартной обработки данных «Геотон-Л1». Приведена технология формирования бесшовных сплошных покрытий, обеспечивающая точность геодезической привязки на опорных точках не хуже 5 м. На примере обработки данных Белгородской области (более 27 тыс. км^2) дано распределение временных затрат по технологическим процессам: 2/3 всего времени занимает обработка данных с участием оператора, при этом 1/2 всего времени — стандартная обработка. В рамках выполнения работ по заказу ГК «Роскосмос» с использованием рассматриваемой технологии сформированы БСП за летние периоды 2013–2018 гг. на 10 регионов РФ: Москва и Московская область, Санкт-Петербург и Ленинградская область, Севастополь и Республика Крым, Белгородская, Брянская, Воронежская, Калининградская, Курская, Самарская, Орловская области.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, космический аппарат «Ресурс-П», сверхвысокое разрешение, бесшовное сплошное покрытие, мозаика, банк базовых продуктов

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ
2020, том 7, выпуск 1, с. 72–83

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

Generation of Seamless Continuous Coverages of the Russian Regions Using Resurs-P Very-High Resolution Data

A. N. Markov, *nova@ntsomz.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation
A. I. Vasilyev, *Cand. Sci. (Phys.-Math.), nova@ntsomz.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation
A. V. Krylov, *nova@ntsomz.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation
M. A. Evlashkin, *nova@ntsomz.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation
A. A. Pestryakov, *nova@ntsomz.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation
A. A. Mikheev, *nova@ntsomz.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation
A. S. Alexeevskiy, *nova@ntsomz.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. The article discusses the ultra-high resolution data processing of the Geoton-L1 equipment installed on the Resurs-P spacecraft to ensure the generation of seamless continuous coverage (SCC) for regions of Russia. The method for achieving SCC and the requirements for supporting information are given. The problematic issues of data selection and the creation of standard data processing Geoton-L1 products are indicated. The technology of achieving seamless continuous coverage, which ensures the accuracy of geodetic reference at ground control points of no worse than 5 m is described. Taking the processing of the Belgorod Region data (more than 27,000 square kilometers) as an example, the time distribution by technological processes is presented: 2/3 of total time is data processing with the operator involvement and 1/2 of total time is standard level processing. As part of the efforts undertaken at the request of the Roscosmos State Corporation for Space Activities, using the above technology, the SCCs were generated for 10 regions of the Russian Federation during summer seasons of 2013–2018: Moscow and Moscow Region, Saint Petersburg and Leningrad Region, Sevastopol and the Republic of Crimea, Belgorod Region, Bryansk Region, Voronezh Region, Kaliningrad Region, Kursk Region, Samara Region, and Orel Region.

Keywords: Earth remote sensing, Resurs-P spacecraft, very-high resolution, seamless continuous coverage, mosaic, basic product bank

Введение

Основные тенденции развития мировой группировки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли высокого (1–10 м) и сверхвысокого (лучше 1 м) пространственного разрешения [1–3] предусматривают: 1) улучшение пространственного разрешения (до 0,1–0,3 м) для новых спутников; 2) повышение частоты съемки за счет создания многочисленных группировок малых спутников. Кроме того, наметился устойчивый тренд оперативного предоставления космической информации и информационных продуктов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) на основе веб-сервисов (например, https://eos.com/ landviewer). При этом существенное увеличение объемов космической информации ДЗЗ высокого разрешения определило еще один тренд — регламентированное формирование и обновление мозаик или бесшовных сплошных покрытий для отдельных регионов и всего мира (например, https://www.planet.com).

Отечественная группировка в период 2013–2018 гг. насчитывала до трех действующих космических аппаратов (КА) ДЗЗ типа «Ресурс-П», оборудованных сенсором «Геотон-Л1» сверхвысокого разрешения [4]. На начало 2020 г. по целевому назначению функционировал только один КА ДЗЗ типа «Ресурс-П». Вместе с тем востребованность в данных и информационных продуктах ДЗЗ неуклонно возрастает. Более того, немалый интерес проявляют потребители к бесшовным сплошным покрытиям больших территорий на основе данных ДЗЗ, технологии формирования которых созданы АО «Российские космические системы» в рамках выполнения опытно-конструкторских работ Федеральной космической программы России на 2016–2025 гг. Примеры применения этих технологий для автоматического формирования бесшовных сплошных покрытий (БСП) на основе данных среднего разрешения КА «Ресурс-П» и «Метеор-М» рассмотрены в работах [5, 6]. Предоставление информационных продуктов и БСП потребителям осуществляется оператором КС ДЗЗ с использованием геоинформационных сервисов «Банк базовых продуктов» (https://bbp.ntsomz.ru) [7, 8] и «Геопортал Роскосмоса» (https://gptl.ru) [9, 10]. В рамках данной статьи рассматриваются особенности обработки данных сверхвысокого разрешения аппаратуры «Геотон-Л1» космического аппарата «Ресурс-П» при формировании бесшовных сплошных покрытий на регионы Российской Федерации.

Методика формирования бесшовного сплошного покрытия

Общая методика формирования бесшовного сплошного покрытия на основе набора сцен данных аппаратуры «Геотон-Л1» КА серии «Ресурс-П» включает следующие основные этапы.

1. Стандартная обработка набора сцен до уровня 4А в соответствии с утвержденным Госкорпорацией «Роскосмос» «Перечнем стандартных продуктов, изготавливаемых по материалам ДЗЗ с КА типа “Ресурс-П”» и поставляемых потребителям [11]:

- геометрическая и радиометрическая коррекции;
- трансформирование на плоскость;
- расчет параметров RPC;
- синтез спектральных RGB-каналов и паншарпенинг на основе данных панхроматического спектрального канала.

2. Фотограмметрическая обработка набора сцен:

- поиск и задание связующих и опорных точек;
- блочное уравнивание набора сцен на основе множества связующих и опорных точек;
- ортотрансформирование набора сцен.

3. Построение БСП:

- построение и редактирование линий порезов;
- расчет параметров яркостного выравнивания;
- формирование единого результирующего изображения БСП.

Определим требования к условиям съемки и опорной информации в обеспечение формирования БСП. Во-первых, с учетом пространственного разрешения (0,7 м) аппаратуры «Геотон-Л1» КА «Ресурс-П» необходимая точность планового положения опорных точек должна составлять не менее половины пикселя — 0,35 м. Во-вторых, на рис. 1

приведена зависимость ошибки задания геодезической высоты наблюдаемой точки местности от углов крена съемочной аппаратуры «Геотон-Л1» КА «Ресурс-П», при которых наблюдается смещение образа точки местности на снимке в пределах половины пикселя. Соответственно для «надирного» снимка точность задания высоты должна быть лучше 10 м, при углах крена менее 30° — не хуже 1 м. Таким образом, для формирования БСП с точностью (среднеквадратическим отклонением (СКО)) до 3–4 м необходимо использовать: 1) снимки с углами визирования/крена не более 10°; 2) опорные точки с точностью 0,35 м в плане и по высоте не хуже 2 м; 3) цифровую модель рельефа (ЦМР) с максимальной ошибкой не более 12 м (3 СКО).

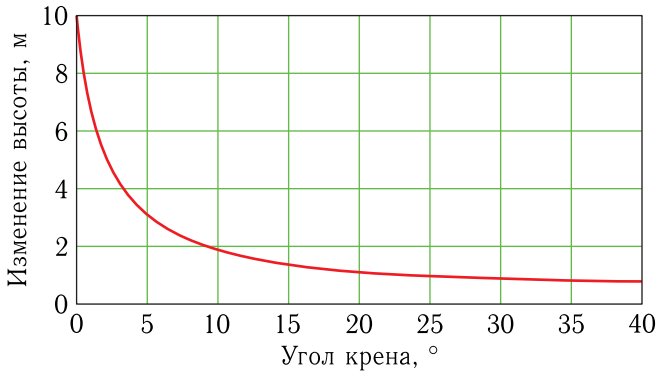


Рис. 1. Зависимость точности задания высоты наблюдаемой точки местности на снимке «Геотон-Л1» КА серии «Ресурс-П» от угла крена КА, обеспечивающая смещение образа точки на снимке в пределах 0,5 пикселя

Далее следует отметить проблему выбора исходных данных аппаратуры «Геотон-Л1» КА «Ресурс-П», связанную с отсутствием планового сплошного покрытия территории РФ. На рис. 2 приведено покрытие Ленинградской области маршрутами (сценами) съемки за летние периоды 2013–2018 гг. с уровнем облачности менее 50 %. Фактически отснято 2/3 региона, однако ввиду отсутствия перекрытия между сценами (с уровнем облачности менее 30 %) представляется возможным формирование сплошного покрытия только для 1/3 региона (граница обозначена желтым цветом на рис. 2). Для увеличения площади бесшовного покрытия необходимо использовать сцены, отснятые в условиях визирования более 20–30° по крену и/или с уровнем облачности 50–100 %, что не всегда целесообразно, поскольку от этого зависит качество результирующего изображения.

Проблемные вопросы стандартной обработки данных «Геотон-Л1» КА серии «Ресурс-П» в обеспечение формирования БСП

На рис. 3 представлена схема расположения ПЗС-матриц в фокальной плоскости сенсора «Геотон-Л1» КА серии «Ресурс-П». Как видно из схемы, спектральные каналы Red (0,61–0,68 мкм), Green (0,52–0,60 мкм) находятся в рамках одной группы ПЗС-матриц, канал Blue (0,45–0,52 мкм) — в рамках другой группы ПЗС-матриц. Каждая из этих групп равноудалена от группы ПЗС-матриц панхроматического канала (0,58–0,80 мкм), находящейся в плоскости оптического центра.

Приведенная оптическая схема расположения различных групп ПЗС-матриц обусловливает проблему RGB-синтеза спектральных каналов, а именно разновременную съемку одной и той же точки местности разными группами ПЗС-матриц. Как следствие, попиксельное сведение спектральных каналов возможно за счет использования высоты наблюдаемой точки местности (на рис. 4 приведена траектория a_1–P_1–b_1). При этом ошибки задания высоты наблюдаемой точки местности приводят к ошибкам синтеза спектральных каналов (на рис. 4 приведена траектория a_1–P_2–b_2). На рис. 5 приведен фрагмент изображения, на котором демонстрируются ошибки синтеза спектральных каналов, связанных с неточностью задания высоты наблюдаемого высотного объекта.

Решение проблем синтеза спектральных каналов возможно в случае реализации следующих конструктивных и технологических задач.

1. Применение светоразделительных оптических систем, обеспечивающих одномоментную съемку в различных спектральных каналах (данный прием реализован для аппаратуры ГСА КА «Ресурс-П»).

2. Минимизация расстояния между группами ПЗС-матриц таким образом, чтобы временной ин-

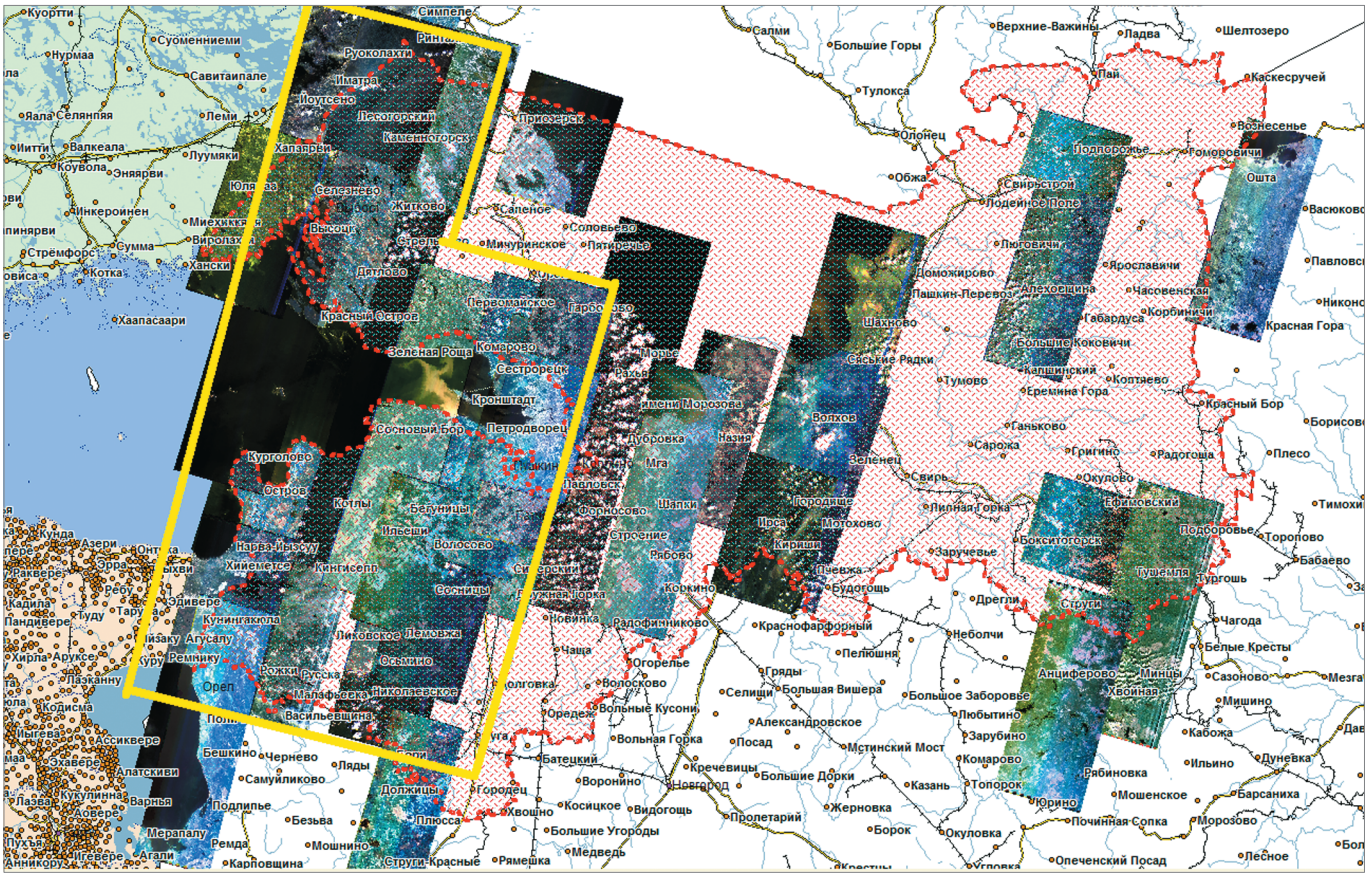


Рис. 2. Набор маршрутов/сцен съемки аппаратуры «Геотон-Л1» КА серии «Ресурс-П» территории Ленинградской области за летние периоды 2013–2018 гг.

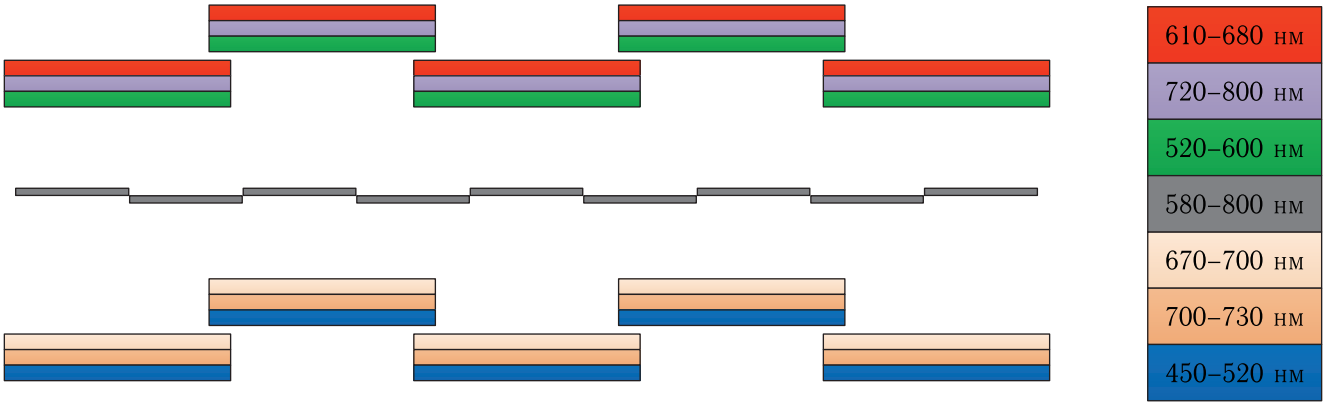


Рис. 3. Схема расположения ПЗС-матриц в фокальной плоскости сенсора «Геотон-Л1» КА серии «Ресурс-П». Справа приведены параметры светофильтров ПЗС

тервал задержки наблюдения одной и той же точки местности был согласован с пространственным разрешением аппаратуры (данное решение реализовано для спектральных каналов Red и Green в рамках одной группы ПЗС-матриц аппаратуры «Геотон-Л1»).

3. Согласование пространственного разрешения аппаратуры с цифровой моделью рельефа

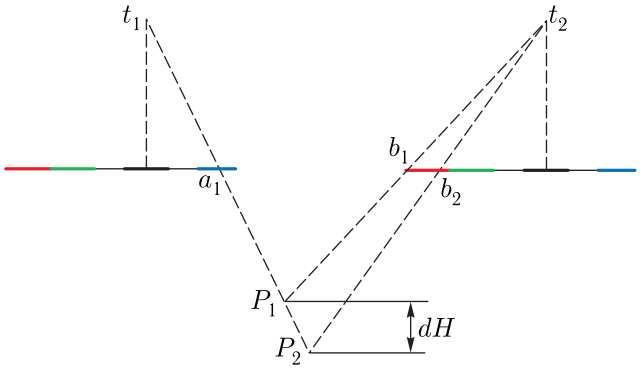


Рис. 4. Схема синтеза спектральных каналов при ошибках задания высоты наблюдаемого объекта

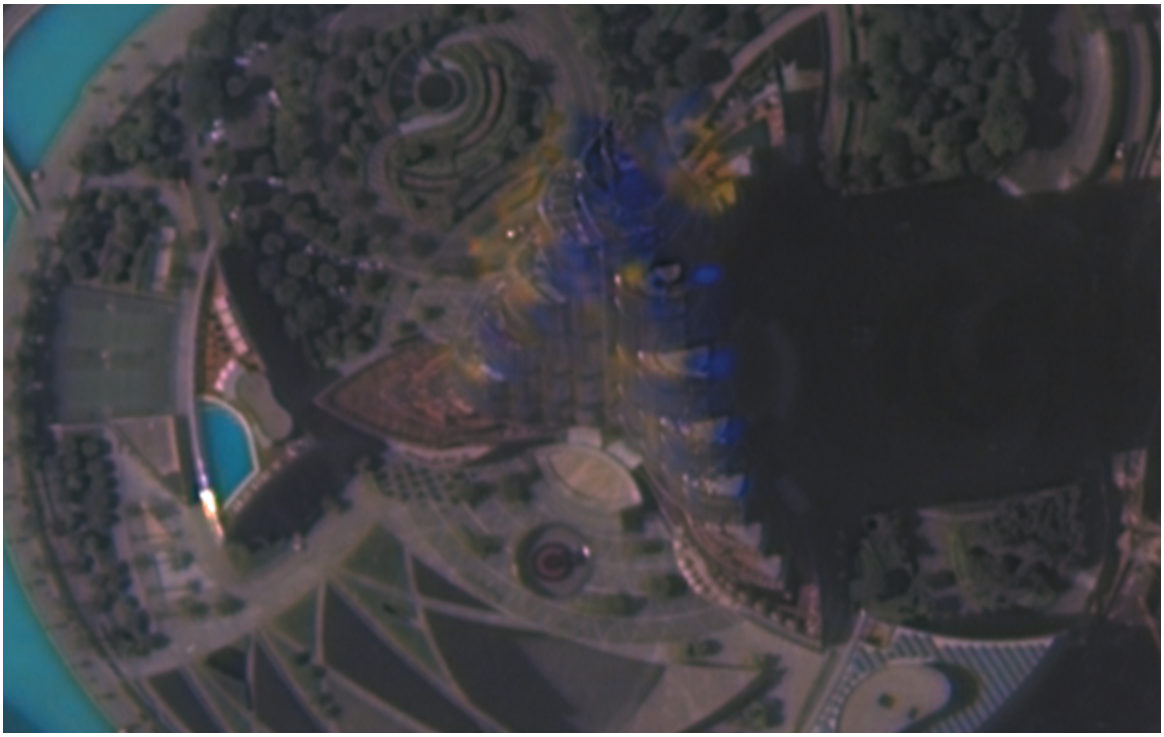


Рис. 5. Ошибки синтеза спектральных каналов данных «Геотон-Л1» КА серии «Ресурс-П» для высотных объектов

(ЦМР), используемой при синтезе спектральных каналов (данное требование характерно для аппаратуры среднего пространственного разрешения КА «Ресурс-П» — КШМСА [9]).

4. Синтез изображений различных спектральных каналов на основе нелинейных деформаций изображений (данное решение реализовано в НКПОР КА «Ресурс-П» в виде специального программного обеспечения, требующего участия оператора для контроля триангуляционной сети, см. рис. 6).

Технология формирования БСП

Общая технология формирования БСП, по данным «Геотон-Л1» КА серии «Ресурс-П», приведена на рис. 7. Технология включает этап формирования продуктов стандартной обработки, ориентированный на программные решения НКПОР, в рамках которых выполняется создание продуктов уровня 4А по «Перечню стандартных продуктов, изготавливаемых по материалам ДЗЗ с КА типа “Ресурс-П”» [11] в автоматизированном режиме (с участием

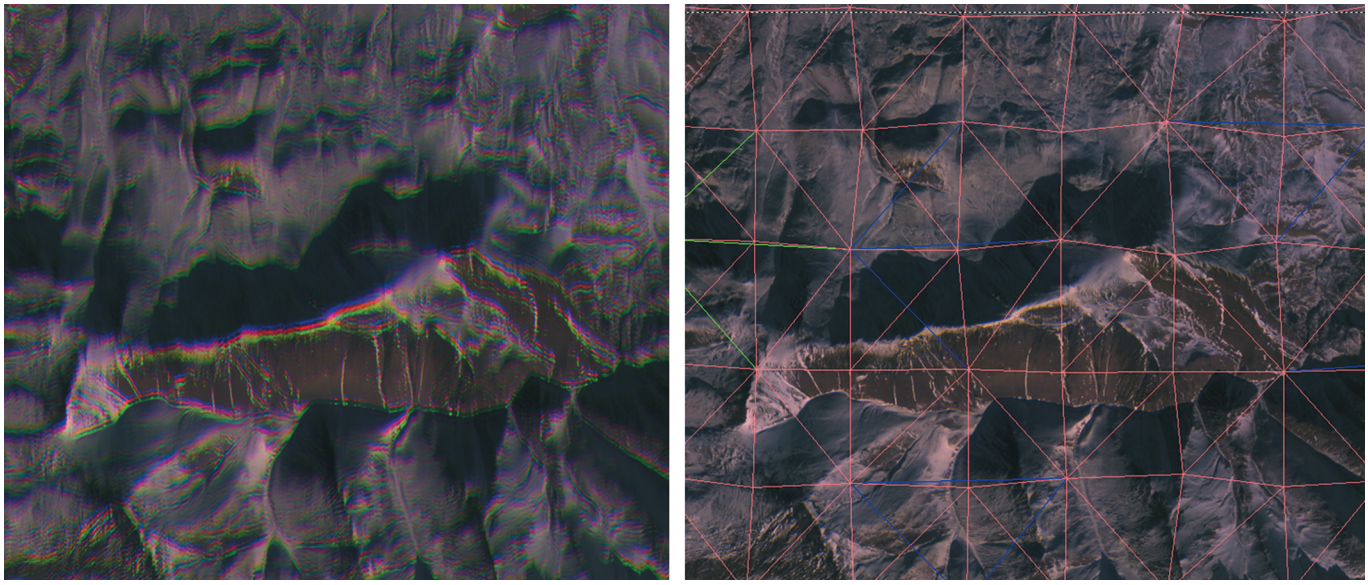


Рис. 6. Пример синтеза спектральных каналов данных «Геотон-Л1» КА серии «Ресурс-П» с использованием корреляционного сопоставления и построения триангуляционной сети

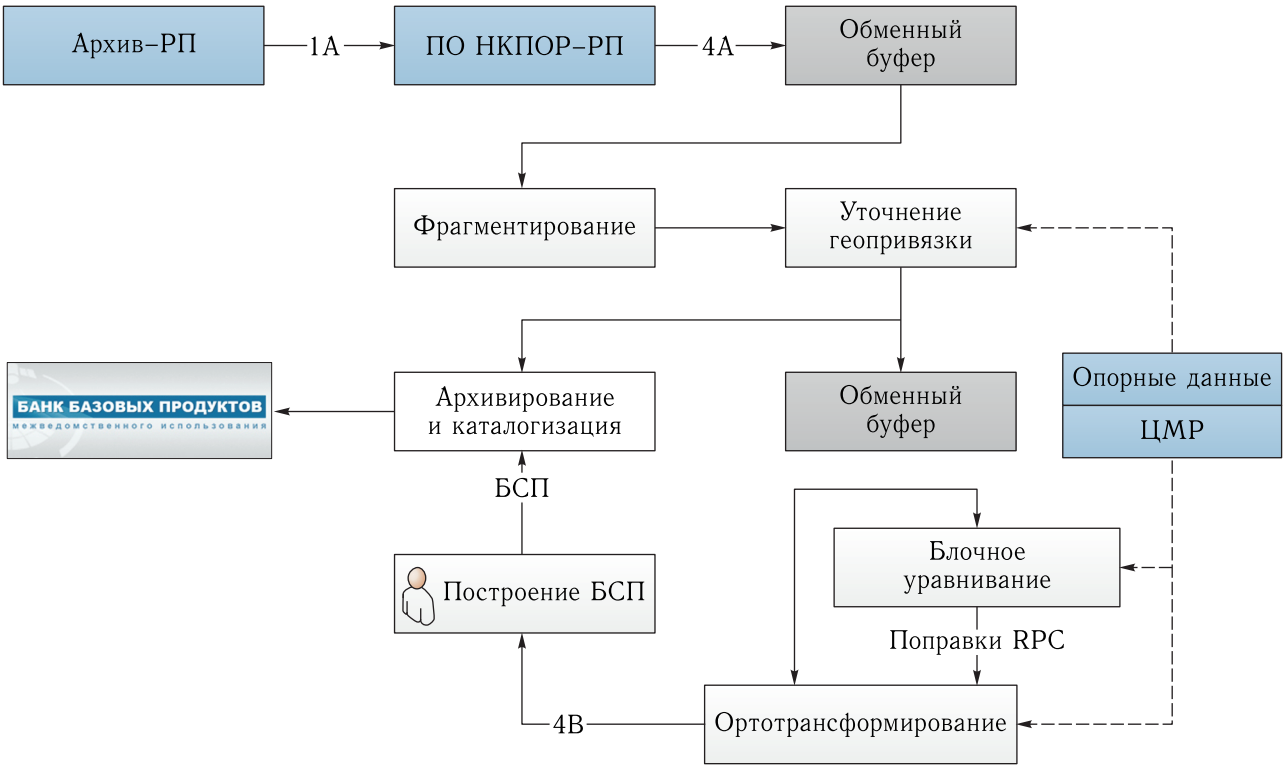


Рис. 7. Технология формирования БСП по данным аппаратуры «Геотон-Л1» КА типа «Ресурс-П»

оператора). Далее для каждого маршрута выполняется автоматическое уточнение геопривязки (на основе опорных данных и цифровой модели рельефа), а также фрагментирование (см. рис. 8) маршрута на сцены. Обработанные маршруты/сцены аккумулируются в обменном буфере, а также загружаются

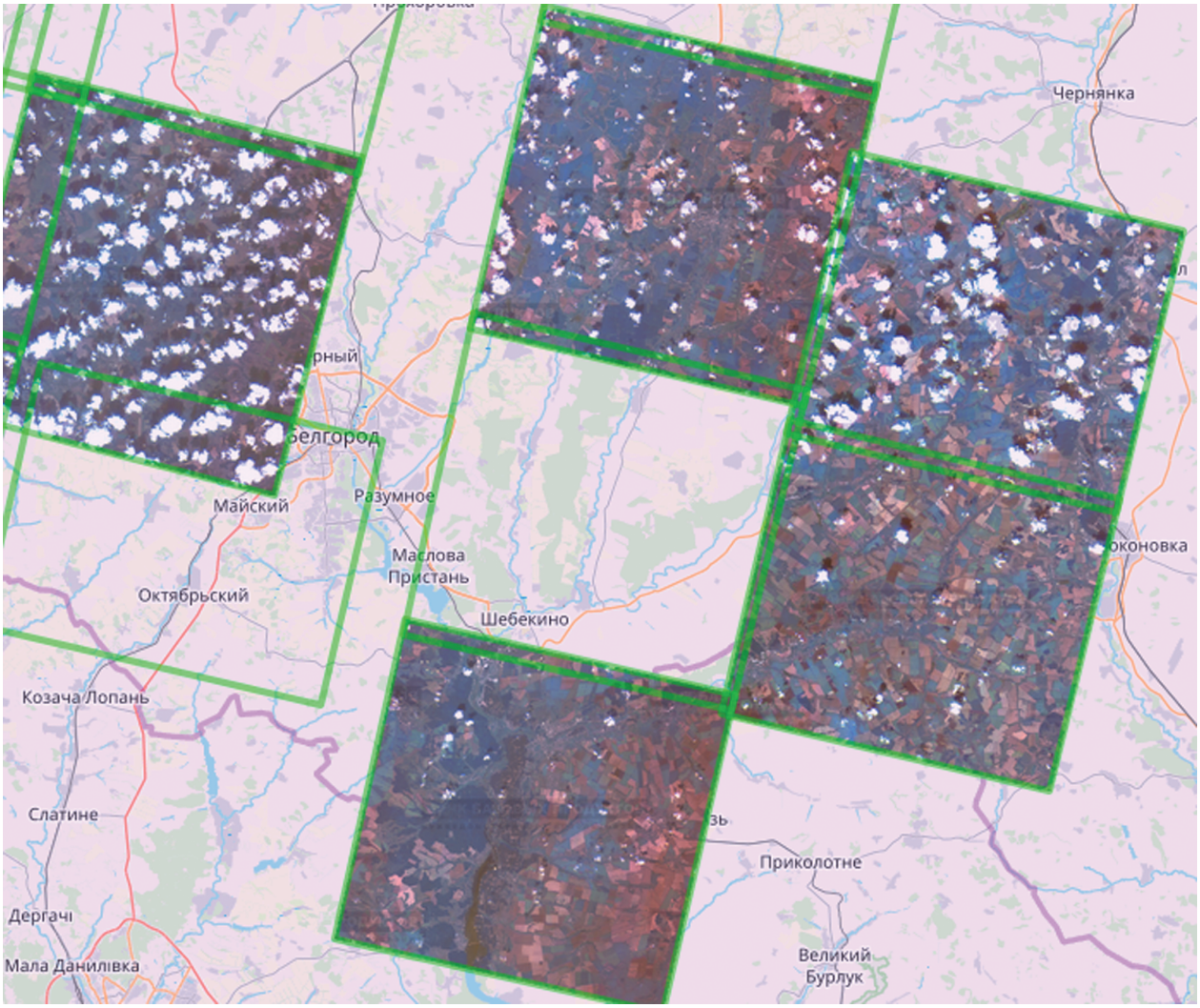


Рис. 8. Примеры фрагментированных маршрутов аппаратуры «Геотон-Л1» КА серии «Ресурс-П» на территорию Белгородской области

в геоинформационный сервис «Банк базовых продуктов», где производится их каталогизация и архивирование.

В рамках данной работы для автоматического измерения плановых координат опорных точек использовалось покрытие, предоставляемое Planet Labs (пространственное разрешение — 3 м), точность геодезической привязки которого не хуже 10 м [12]. Доступ к этому покрытию реализован в рамках библиотеки GDAL (https://gdal.org). В качестве ЦМР применялась SRTM (https://doi.org/10.5066/F7PR7TFT).

Далее выполнялось блочное уравнивание для заданного набора маршрутов/сцен и последующее их ортотрансформирование. Например, при блочном уравнивании данных «Геотон-Л1» КА серии «Ресурс-П» на территорию Республики Крым (перепад высот более 1500 м) СКО на опорных точках составило не более 5 м [13]. При этом для регионов с перепадом высот в несколько сотен метров, например Белгородской области, СКО привязки отдельных сцен составляло около 1,5 пикселей опоры или не более 5 м (см. рис. 9). Соответственно для таких «равнинных» регионов формирование БСП осуществлялось без блочного уравнивания и для сведения контуров ортотрасформированных маршрутов/сцен, при необходимости применялись методы локальной деформации,

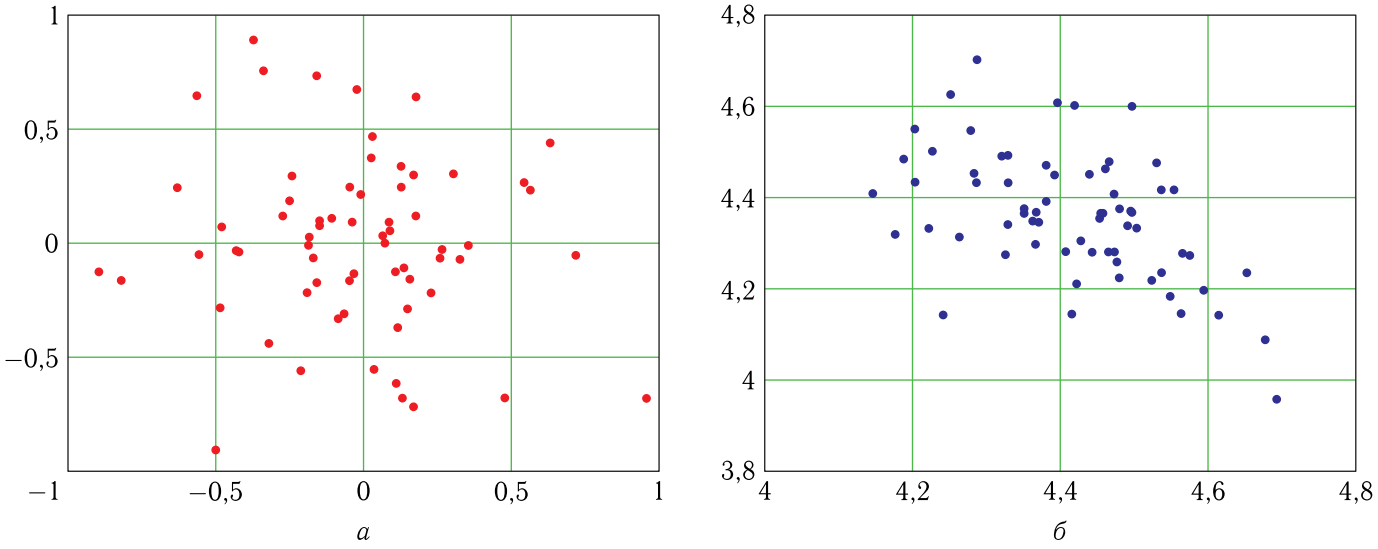


Рис. 9. Распределение *а*) систематических и *б*) случайных ошибок (м) геопривязки сцен «Геотон-Л1» КА серии «Ресурс-П», используемых при формировании БСП на территорию Белгородской области

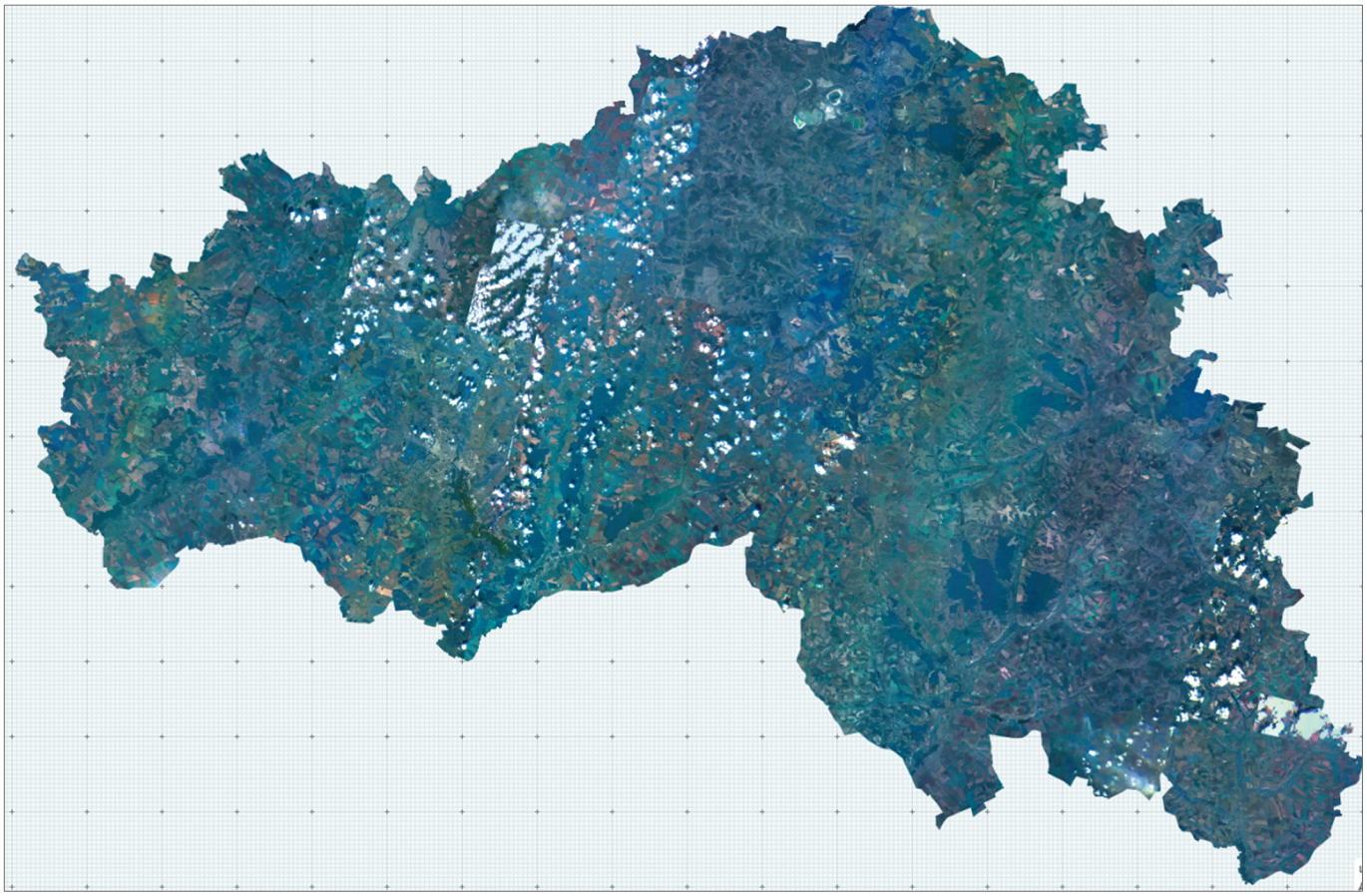


Рис. 10. Пример БСП территории Белгородской области, сформированного по данным аппаратуры «Геотон-Л1» КА серии «Ресурс-П» за летние периоды 2013–2018 гг.

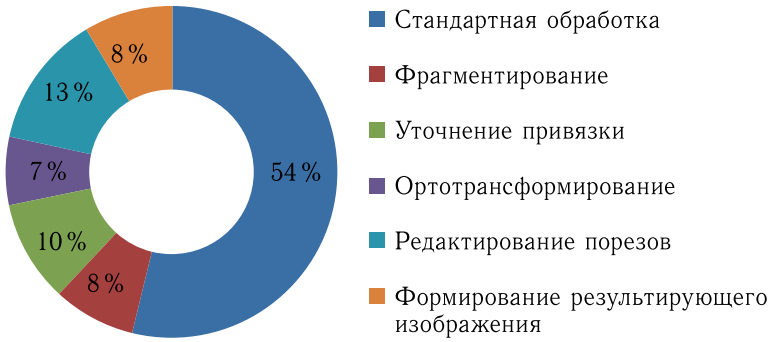


Рис. 11. Диаграмма распределения времени между технологическими этапами формирования БСП Белгородской области

Таблица. Временные оценки формирования БСП Белгородской области

Технологический этап	Время, ч	Объем, ТБ
Стандартная обработка	250*	1,2**
Фрагментирование	37	2,5
Уточнение привязки	46	–
Ортотрансформирование	31	2,5
Редактирование порезов	61*	–
Формирование результирующего изображения	39	0,5

* — этап с участием оператора. ** — данные со сжатием.

в частности реализованные в фотограмметрическом пакете Photomod. Результирующее изображение БСП Белгородской области приведено на рис. 10.

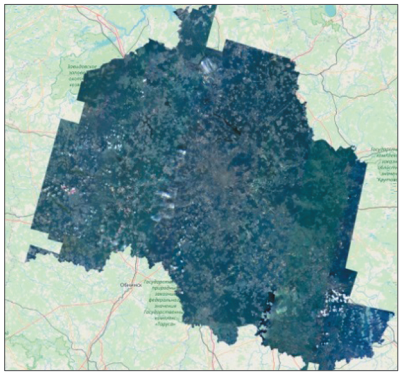
В таблице показаны временные оценки технологических этапов формирования покрытия (включая накладные расходы, связанные с копированием данных) на примере формирования БСП Белгородской области на основе обработки более 30 маршрутов данных «Геотон-Л1» КА серии «Ресурс-П». Соответствующая таблице диаграмма распределения временных затрат показана на рис. 11. Анализ диаграммы показывает, что работа оператора составляет 2/3 всего времени формирования конечного продукта, при этом более половины времени уходит на стандартную обработку данных «Геотон-Л1» КА «Ресурс-П».

Следует отметить, что этапы автоматической обработки данных выполнялись на двух вычислительных узлах, организованных в соответствии с моделью линейного конвейера. Узел фрагментирования в том числе являлся буфером стандартных продуктов НКПОР. Для уточнения геопривязки и ортотрансформирования применялся вычислительный узел, обеспечивающий также копирование ортотрансформированных сцен на вычислительный узел оператора формирования БСП. С учетом межсетевого взаимодействия, а также накладных расходов одновременного чтения/записи обменных буферов обеспечивались номинальные показатели автоматической обработки данных — 15–25 Мб/с. Для увеличения скорости автоматической обработки планируется дальнейшая оптимизация технологической схемы.

Заключение

В рамках выполнения контрактных работ по заказу Госкорпорации «Роскосмос» сформированы бесшовные сплошные покрытия по данным аппаратуры «Геотон-Л1» КА серии «Ресурс-П» за летние периоды 2013–2018 гг. на следующие регионы РФ (см. рис. 10, 12): Москва и Московская область, Санкт-Петербург и Ленинградская область, Севастополь и Республика Крым, Белгородская, Брянская, Воронежская, Калининградская, Курская, Самарская, Орловская области.

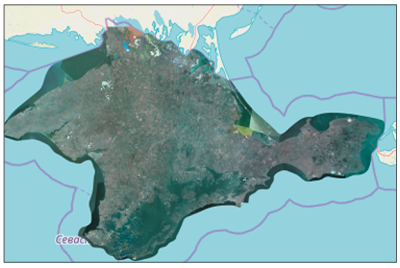
В общей сложности на основе данных стандартных продуктов ДЗЗ объемом около 10 ТБ (с учетом сжатия) сформировано более 330 тыс. км^2 (более 3,5 ТБ) бесшовных сплошных покрытий регио-



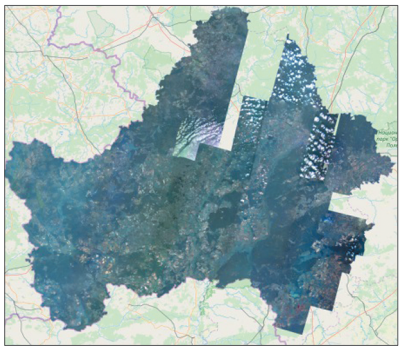
Москва
и Московская область



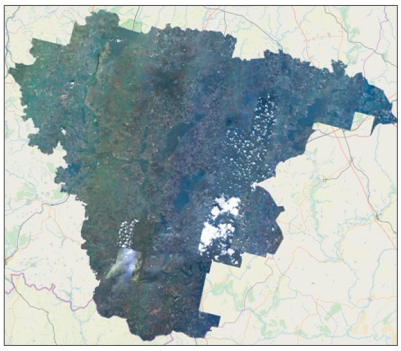
Санкт-Петербург
и Ленинградская область



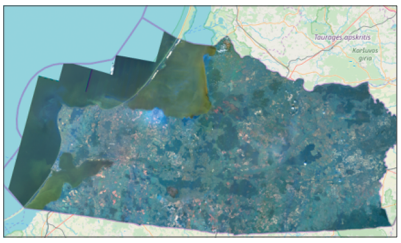
Севастополь
и Республика Крым



Брянская область



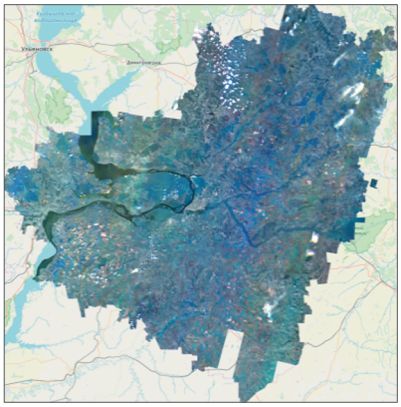
Воронежская область



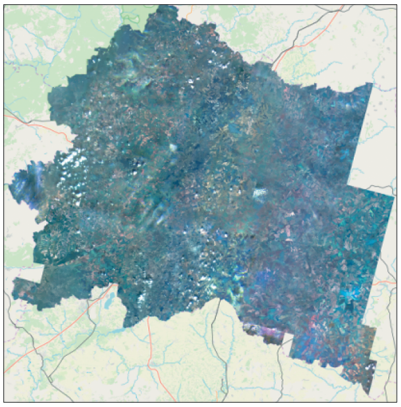
Калининградская область



Курская область



Самарская область



Орловская область

Рис. 12. Обзорные изображения бесшовных сплошных покрытий регионов РФ, сформированных по данным аппаратуры «Геотон-Л1» КА серии «Ресурс-П» за летние периоды 2013–2018 гг.

нов Российской Федерации сверхвысокого пространственного разрешения.

Список литературы

1. *Кучейко А. А.* Мировые тенденции развития отрасли ДЗЗ из космоса. Отрасль ДЗЗ в вопросах и ответах // Земля из космоса, 2019, № 10 (26). С. 36–45.

2. *Бакланов А. И.* Новые горизонты космических систем оптико-электронного наблюдения Земли высокого разрешения // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2018, т. 5, вып. 3. С. 17–28.

3. *Бакланов А. И.* Новые горизонты космических си-

стем оптико-электронного наблюдения Земли высокого разрешения (ч. II) // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2018, т. 5, вып. 4. С. 14–27.

4. *Кирилин А.Н.*, *Ахметов Р.Н.*, *Стратилатов Н.Р.*, *Бакланов А.И.*, *Федоров В.М.*, *Новиков М.В.* Космический аппарат «Ресурс-П» // Геоматика, 2010, № 4 (9). С. 23–26.
5. *Васильев А.И.*, *Крылов А.В.*, *Панкин А.В.* Стандартная обработка данных КШМСА КА «Ресурс-П» в обеспечение автоматического формирования бесшовного сплошного покрытия // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2019, т. 16, № 2. С. 18–28.
6. *Марков А.Н.*, *Васильев А.И.*, *Крылов А.В.*, *Евлашкин М.А.*, *Михеев А.А.* Эксперимент по формированию бесшовного сплошного покрытия на территорию российской федерации по данным КМСС КА «Метеор-М» // Дистанционное зондирование Земли из космоса в России, 2019, вып. № 1. С. 50–55.
7. *Марков А.Н.*, *Васильев А.И.*, *Ольшевский Н.А.*, *Михаленков Р.А.*, *Салимонов Б.Б.*, *Синяев П.А.*, *Евлашкин М.А.* Особенности доступа к ресурсам геоинформационного сервиса «Банк базовых продуктов» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2019, т. 16, № 3. С. 228–237.
8. *Селин В.А.*, *Марков А.Н.*, *Васильев А.И.*, *Коршунов А.П.* Геоинформационный сервис «Банк базовых продуктов» // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2019, т. 6, вып. 1. С. 40–48.
9. *Тохиян О.О.*, *Кошкин К.В.* Опыт разработки и эксплуатации геопортала Роскосмоса // Геоматика, 2011, № 2. С. 20–28.
10. *Тохиян О.О.*, *Гладков А.П.*, *Васильев А.Ю.* Расширение возможностей сервисов геопортала Роскосмоса // Геоматика, 2015, № 2. С. 22–25.
11. Перечень стандартных продуктов, изготавливаемых по материалам ДЗЗ с КА типа «Ресурс-П». Продукты стандартной обработки информации, полученной аппаратурой «Геотон» КА «Ресурс-П». http://www.ntsomz.ru/for_clients/standart_ip/standart_ip_resurs_p#geoton (Дата обращения 12.02.2020).
12. Planet imagery product specifications, JANUARY 2018. https://www.planet.com/products/satellite-imagery/files/Planet_Combined_Imagery_Product_Specs_December2017.pdf (Дата обращения 12.02.2020).
13. *Алексеевский А.С.*, *Пешкун А.А.* Пилотный проект бесшовное сплошное покрытие высокого разрешения (БСПВР) Республики Крым // Вебинар Госкорпорации «Роскосмос» с представителями органов исполнительной власти субъектов Российской Федерации 15 февраля 2018 года. http://www.ntsomz.ru/webinar150218 (Дата обращения 12.02.2020).

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ
2020, том 7, выпуск 1, с. 84–94

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

УДК 621.391.7 DOI 10.30894/issn2409-0239.2020.7.1.84.94

Методы аутентификации и шифрования информации в сетях связи на основе динамично изменяющихся матриц ключей и матриц алгоритмов

И. Н. Пантелеймонов, *panteleymonov_in@spacecorp.ru*
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. А. Монастыренко, *monastyrenko_aa@spacecorp.ru*
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. В. Белозерцев, *belozertsev_av@spacecorp.ru*
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

В. В. Боцва, *bakirovamsh@tsniimash.ru*
АО «ЦНИИ машиностроения», г. Королев, Российская Федерация

А.В. Наумкин, *alexander.naumkin@ks54.ru*
ГБПОУ «Колледж связи № 54» имени П. М. Вострухина, г. Москва, Российская Федерация

Аннотация. В сетях подвижной связи стандарта GSM на SIM-карте абонента хранятся постоянные ключ аутентификации и алгоритм аутентификации. Для аутентификации абонента используются постоянные ключ аутентификации, алгоритм аутентификации и алгоритм шифрования, которые задействуются для аутентификации абонента и шифрования передаваемой информации. В случае компрометации ключа аутентификации алгоритм аутентификации и алгоритм шифрования злоумышленника смогут входить в связь с базовой станцией под чужим идентификатором телефона IMSI (International Mobile Subscriber Identity). Представлена технология усиления криптостойкости алгоритмов аутентификации и шифрования информации, применяемых в сетях подвижной связи GSM, в основе которой вместо постоянных ключа аутентификации, алгоритма аутентификации и алгоритма шифрования лежит применение динамично изменяющихся матриц ключей и алгоритмов. Предлагаемое техническое решение может иметь широкое применение в системах радиосвязи, сетях подвижной связи и персональной подвижной спутниковой связи, а также позволит избирательно подходить к дополнительному усилению криптостойкости передаваемой информации для отдельных категорий абонентов. Положительным эффектом также является то, что повышение криптостойкости сети связи осуществляется без значительного увеличения вычислительной нагрузки на процессор абонентского терминала, что обеспечивает экономию заряда аккумуляторной батареи абонентского терминала.

Ключевые слова: ключ, алгоритм, аутентификация, шифрование, базовая станция, абонентский терминал

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ
2020, том 7, выпуск 1, с. 84–94

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

Methods of Authentication and Encryption of Information in Communication Networks Based on Dynamically Changing Key Matrices and Matrix Algorithms

I. N. Panteleymonov, *panteleymonov_in@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation
A. A. Monastyrenko, *monastyrenko_aa@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation
A. V. Belozertsev, *belozertsev_av@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation
V. V. Botsva, *bakirovamsh@tsniimash.ru*
JSC "Central Research Institute of Mechanical Engineering", Korolev, Russian Federation
A. V. Naumkin, *alexander.naumkin@ks54.ru*
"College of Communication No. 54" named after P.M. Vostrukhina, Moscow, Russian Federation

Abstract. In GSM mobile networks, a subscriber's SIM card stores a permanent authentication key and an authentication algorithm. For authentication of the subscriber is used a permanent authentication key, an authentication algorithm, as well as an encryption algorithm, that used to encrypt the transmitted information. If the authentication key is compromised, an attacker will be able to communicate with the base station using someone else's IMSI (International Mobile Subscriber Identity). The technology for enhancing the cryptographic strength of authentication algorithms and information encryption used in GSM mobile networks is presented, which, instead of using a permanent authentication key, authentication algorithm and encryption algorithm, is based on the use of dynamically changing key matrices and algorithms. The proposed technical solution can be widely used in radio communication systems, mobile networks, and personal mobile satellite communications. It will also make it possible to differentiate additional strengthening of the cryptographic stability of the transmitted information for certain categories of subscribers. An additional positive effect is that the increase in the cryptographic strength of the communication network is carried out without a significant increase in the computational load on the processor of the subscriber terminal, which saves the battery power of the subscriber terminal.

Keywords: key, algorithm, authentication, encryption, base station, subscriber terminal

Введение

По оценке аналитиков, уровень потерь операторов мобильной связи от разного рода мошенничества и вредительства составляет от 2–6 % до 25 % от общего объема трафика. Причем атаки мошенников направлены как против операторов, так и против абонентов [1]. Решение проблемы обеспечения безопасности в российских сетях связи осложняется широким использованием технических средств зарубежного производства, что создает возможность реализации не декларируемых поставщиками возможностей [1].

Для передачи информации цифровой телефонии и коротких сообщений (SMS) с использованием персональных абонентских терминалов наибольшее распространение получил стандарт GSM. В сетях подвижной связи (СПС) GSM для аутентификации абонента используются постоянные ключ аутентификации K_i и алгоритм аутентификации A_i, а для шифрования информации применяются постоянный алгоритм шифрования A_8, которые привязаны к SIM-карте абонента [2]. Злоумышленник, который единожды вскрыл ключ аутентификации K_i, алгоритм аутентификации A_i и алгоритм шифрования A_8, может постоянно расшифровывать информацию в абонентском канале связи с конкретным пользователем СПС GSM. Отдельные категории абонентов, например представители крупного бизнеса [3, 4] или госслужащие [5], нуждаются в повышении криптостойкости услуг связи СПС GSM [6] и сетях подвижной персональной спутниковой связи [7].

Алгоритмы аутентификации и шифрования в СПС GSM

В современных сетях подвижной (мобильной) связи применяется алгоритм шифрования, основанный на следующей технологии [2].

Для аутентификации информации абонента в сетях подвижной связи стандарта GSM каждый абонентский терминал (АТ) содержит записанные в SIM-карте свои индивидуальный ключ аутентификации K_i и алгоритм аутентификации A_i. Базовая станция (БС) сети подвижной связи передает на АТ случайное число RAND, а АТ на основании числа RAND, ключа аутентификации K_i и алгоритма аутентификации A_i вычисляет значение ответа SRES: $\mathrm{SRES} = A_i(K_i; \mathrm{RAND})$. Далее АТ отправляет ответ SRES на базовую станцию, которая использует ключ K_i и алгоритм аутентификации A_i вызываемого абонента, хранящиеся в базах данных зарегистрированных абонентов мобильного центра коммутации, вычисляет число SRES и сравнивает вычисленное число SRES с полученным от абонентского терминала. Если вычисленное и полученное от АТ число SRES совпадают, то БС вступает в связь с АТ.

То есть в данном случае используется аутентификация с открытым ключом, характеризующаяся следующими недостатками:

– ключ K_i и алгоритм аутентификации A_i постоянные, следствием чего является низкая криптостойкость;

– случайное число RAND передается по открытому каналу связи и при компрометации ключа и алгоритма аутентификации злоумышленник может осуществить ложное подключение к базовой станции (т. е. создать ложный АТ, осуществив подлог), пока на АТ, ключи и алгоритмы аутентификации которого скомпрометированы, не будет сменена SIM-карта;

– отсутствует возможность увеличения криптостойкости аутентификации для отдельных категорий АТ без применения дополнительных программных средств.

Для шифрования информации абонентской радиолинии в сети подвижной связи стандарта GSM БС передает на АТ случайное число RAND. Абонентский терминал на основании числа RAND, ключа K_i и алгоритма шифрования A_8 вычисляет ключ шифрования на сеанс связи K_c: $K_c = A_8(K_i; \mathrm{RAND})$. Передаваемая в абонентской радиолинии (от базовой станции и от абонентского терминала) информация зашифровывается с применением ключа шифрования на сеанс связи K_c и алгоритма шифрования A_8: $E_c = A_8(K_c; I_c)$, где I_c — открытая информация в сеансе связи.

То есть используют шифрование с открытым ключом, характеризующееся следующими недостатками:

– алгоритм вычисления A_i ключа аутентификации K_i, из которого формируется ключ шифрования информации в сеансе связи K_c, постоянный, поэтому злоумышленник имеет возможность скомпрометировать ключ аутентификации K_i, а затем научится формировать ключи шифрования информации в сеансе связи K_c;

– алгоритм шифрования A_8, используемый для формирования ключа шифрования информации в сеансе связи K_c из ключа аутентификации K_i и применяемый для шифрования информации, постоянный, поэтому данный способ шифрования обладает низкой криптостойкостью;

– случайное число RAND передается по открытому каналу связи и при компрометации ключа аутентификации K_i, алгоритма аутентификации A_i и алгоритма шифрования A_8 злоумышленник может прослушивать трафик АТ, пока не будет сменена SIM-карта;

– для отдельных категорий АТ отсутствует возможность увеличения криптостойкости шифрования без применения дополнительных программных средств.

Метод аутентификации абонента с применением динамично изменяющихся матриц ключей и алгоритмов

В предлагаемом методе аутентификации [8] данные аутентификации и шифрования передаваемой информации задействуются при установлении каждого соединения и передаче данных и организованы в памяти каждого составляющего систему устройства как матрица ключей аутентификации M_{Ki}; матрица порядков смены позиций M_{CKi} ключей аутентификации K_i в матрице ключей аутентификации M_{Ki}; матрица алгоритмов аутентификации M_{Ai}; матрица порядков смены позиций M_{CAi} алгоритмов аутентификации A_i в матрице M_{Ai}; матрица M_{A8} алгоритмов шифрования A_8; матрица порядков смены позиций M_{CA8} алгоритмов шифрования A_8 в матрице M_{A8} алгоритмов шифрования.

При работе предложенной системы передачи данных периодические изменения позиций ключей в матрице ключей, а также изменение алгоритмов в матрице алгоритмов являются альтернативой хранения в постоянном запоминающем устройстве большого количества ключей и алгоритмов. Работа системы основана на двух последовательных процессах: аутентификации информации абонентской радиолинии и шифрования абонентской радиолинии. Порядок смены ключей аутентификации K_i, формулы математических операций и механизм смены алгоритмов аутентификации A_i и алгоритмов шифрования A_8 известны каждому центру коммутации системы — наземной станции сети подвижной связи и/или спутнику-ретранслятору сети персональной спутниковой связи. Процесс аутентификации удостоверяет, что абонент имеет право доступа к услугам связи и предшествует процедуре установления соединения. После установления соединения начинает работу процедура шифрования информации в абонентской радиолинии.

Пример простейшей матрицы ключей аутентификации —

$$M_{Ki} = \begin{Vmatrix} K_{i11} & K_{i12} & K_{i13} \\ K_{i21} & K_{i22} & K_{i23} \\ K_{i31} & K_{i32} & R \end{Vmatrix},$$

где R — это принятое от БС число RAND.

Пример простейшей матрицы смены позиций ключей аутентификации —

$$M_{CKi} = \begin{Vmatrix} C_{Ki11} & C_{Ki12} & C_{Ki13} \\ C_{Ki21} & C_{Ki22} & C_{Ki23} \\ C_{Ki31} & C_{Ki32} & C_{Ki33} \end{Vmatrix}.$$

Пример простейшей матрицы алгоритмов аутентификации —

$$M_{Ai} = \begin{Vmatrix} A_{i11} & A_{i12} & A_{i13} \\ A_{i21} & A_{i22} & A_{i23} \\ A_{i31} & A_{i32} & A_{i33} \end{Vmatrix}.$$

Пример простейшей матрицы смены позиций алгоритмов аутентификации —

$$M_{CAi} = \begin{Vmatrix} C_{Ai11} & C_{Ai12} & C_{Ai13} \\ C_{Ai21} & C_{Ai22} & C_{Ai23} \\ C_{Ai31} & C_{Ai32} & C_{Ai33} \end{Vmatrix}.$$

Пример простейшей матрицы алгоритмов шифрования —

$$M_{A8} = \begin{Vmatrix} A_{811} & A_{812} & A_{813} \\ A_{821} & A_{822} & A_{823} \\ A_{831} & A_{832} & A_{833} \end{Vmatrix}.$$

Пример простейшей матрицы смены позиций алгоритмов —

$$M_{Cae} = \begin{Vmatrix} C_{A811} & C_{A812} & C_{A813} \\ C_{A821} & C_{A822} & C_{A823} \\ C_{A831} & C_{A832} & C_{A833} \end{Vmatrix}.$$

Аутентификация АТ выполняется следующим образом.

Шаг 1. Матрицы M_{K_i} ключей аутентификации, матрицы порядков смены позиций M_{CKi} ключей аутентификации, матрицы алгоритмов аутентификации M_{A_i}, матрицы порядков смены позиций M_{CAi} алгоритмов аутентификации, матрицы алгоритмов шифрования M_{A8} и матрицы порядков смены позиций M_{A8} алгоритмов шифрования записываются в постоянное энергонезависимое запоминающее устройство (ПЗУ) каждого АТ (или на SIM-карту), в защищенные базы данных центров коммутации и являются уникальными для каждого АТ.

Шаг 2. Принятое АТ от центра коммутации случайное число RAND записывается в одну из позиций матрицы M_{Ki} ключей аутентификации для проведения процедуры вычисления числа SRES. Позиция матрицы M_{Ki} ключей аутентификации, в которую записывается принятое случайное число RAND, определяется порядком смены позиций C_{Ki} ключа аутентификации.

Шаг 3. Значения ключей аутентификации K_i и принятое случайное число RAND, записанных в матрице M_{Ki} ключей аутентификации, периодически перемещаются по позициям матрицы ключей аутентификации по определенному алгоритму в соответствии с действующим на данный момент порядком смены позиций C_{Ki} ключей аутентификации. Порядковые номера порядков смены позиций C_{Ki} ключа аутентификации записаны в матрице M_{CK_i} порядков смены позиций ключа аутентификации, и каждому номеру порядков смены позиций C_{Ki} ключа аутентификации соответствует определенная последовательность смены позиций.

После прохождения полного цикла смены позиций ключами аутентификации K_i и принятым случайным числом RAND ключи аутентификации K_i и принятое случайное число RAND возвращаются на исходные позиции и изменяется порядок смены их позиций C_{Ki}. После прохождения полного цикла изменения порядков смены позиций C_{KAi} ключами аутентификации порядки смены позиций C_{KAi} возвращаются на исходные позиции в матрице M_{CKi} порядков смены позиций и порядок смены позиций C_{KAi} изменяется по определенному закону.

Шаг 4. Номера алгоритмов A_i вычисления числа SRES (алгоритмов аутентификации) записываются в матрицу аутентификации алгоритмов M_{Ai}, и каждому порядковому номеру соответствует своя математическая формула.

Шаг 5. Номера алгоритмов аутентификации A_i, записанных в матрице M_{Ai} алгоритмов аутентификации, перемещаются по позициям матрицы алгоритмов аутентификации по определенному правилу в соответствии с действующим на данный момент порядком смены позиций C_{Ai} алгоритмов аутентификации. Вначале номера алгоритмов аутентификации A_i изменяются по одному правилу C_{A_i}, действующему в настоящий момент, затем порядок смены позиций алгоритма аутентификации C_{Ai} изменяется. Номера порядков смены позиций C_{Ai} алгоритма аутентификации записаны в матрице M_{CAi} порядков смены позиций алгоритма аутентификации, и каждому номеру порядков смены позиций C_{Ai} алгоритма аутентификации соответствует определенная последовательность смены позиций.

После прохождения полного цикла смены позиций номерами алгоритмов аутентификации A_i номера алгоритмов аутентификации возвращаются на исходные позиции и изменяется порядок смены их позиций C_{Ai}. После прохождения полного цикла изменения порядков смены позиций C_{Ai} номерами алгоритмов аутентификации A_i порядки смены позиций C_{Ai} возвращаются на исходные позиции в матрице M_{CAi} порядков смены позиций и порядок смены позиций C_{Ai} изменяется по определенному закону.

Смена позиций ключами аутентификации K_{Ai} и номеров алгоритмов аутентификации A_i осущест-

вляется через строго определенные интервалы времени (от 1 суток до полугода), известные АТ и центрам коммутации. Все алгоритмы вычислений A_i ответа SRES содержат однонаправленные функции.

Шаг 6. В АТ на основании матрицы M_{Ki} ключей аутентификации, принятого случайного числа RAND и матрицы алгоритмов аутентификации M_{Ai} производятся математические операции для вычисления числа SRES.

Шаг 7. Вычисленное число SRES передается в центр коммутации, где также вычисляется число SRES. Вычисленное число SRES сравнивается с полученным от АТ числом SRES. Абонент считается прошедшим аутентификацию при совпадении чисел SRES, вычисленных АТ и центром коммутации.

Криптостойкость процесса аутентификации определяется:

– длиной ключа аутентификации L_{Ki} (для увеличения криптостойкости длина ключа шифрования L_{Ki} должна стремится к максимально возможному значению);

– количеством применяемых ключей аутентификации N_{Ki} и количеством перестановок ключей N_{CKi} (для увеличения криптостойкости количество применяемых ключей аутентификации и количество перестановок ключей должны стремиться к максимально возможным значениям);

– сложностью и количеством алгоритмов аутентификации N_{Ai} (для увеличения криптостойкости сложность и количество алгоритмов аутентификации должны стремиться к максимально возможным значениям);

– количеством перестановок алгоритмов аутентификации N_{CAi} (для увеличения криптостойкости количество перестановок алгоритмов аутентификации должно стремиться к максимально возможным значениям);

– периодом действия ключей аутентификации T_{Ki} и алгоритмов аутентификации T_{Ai} (для увеличения криптостойкости период действия ключей аутентификации и алгоритмов аутентификации должны стремиться к минимально возможным значениям).

Алгоритм работы АТ и центра коммутации СПС или СР сети ПСС при выполнении процедуры аутентификации изображен на рис. 1 и 2.

Метод шифрования информации с применением динамично изменяющихся матриц ключей и алгоритмов

В предлагаемом методе [8] шифрование информации выполняется следующим образом.

Шаг 1. Ключ шифрования K_c на сеанс связи определяется из вычисленного на этапе аутентификации ключа аутентификации K_i с применением действующего в настоящий момент алгоритма шифрования A_8.

Шаг 2. Номера алгоритмов шифрования A_8 записываются в матрицу алгоритмов шифрования M_{A8}. Каждому порядковому номеру соответствует заданная математическая формула. Номера алгоритмов шифрования A_8, записанных в матрице алгоритмов шифрования M_{A8}, перемещаются по позициям данной матрицы по определенному правилу в соответствии с действующим на данный момент порядком смены позиций C_{A8} алгоритмов шифрования.

Вначале номера алгоритмов шифрования A_8 изменяются по одному правилу C_{A8}, действующему в настоящий момент, затем порядок смены позиций алгоритма шифрования C_{A8} изменяется. Номера порядков смены позиций C_{A8} алгоритма шифрования записаны в матрице M_{CA8} порядков смены позиций алгоритма шифрования, и каждому номеру порядков смены позиций C_{A8} алгоритма шифрования соответствует определенная последовательность смены позиций. После прохождения полного цикла смены позиций номерами алгоритмов шифрования A_8 номера алгоритмов шифрования возвращаются на исходные позиции и изменяется порядок смены их позиций C_{A8}.

После прохождения полного цикла изменения порядков смены позиций C_{A8} номерами алгоритмов шифрования A_8 порядки смены позиций C_{A8} возвращаются на исходные позиции в матрице M_{CA8} порядков смены позиций и порядок смены позиций C_{A8} изменяется по определенному закону.

Смена позиций номеров алгоритмов шифрования A_8 осуществляется через строго определенные интервалы времени (от 1 суток до полугода), известные АТ и центрам коммутации. Все алгоритмы

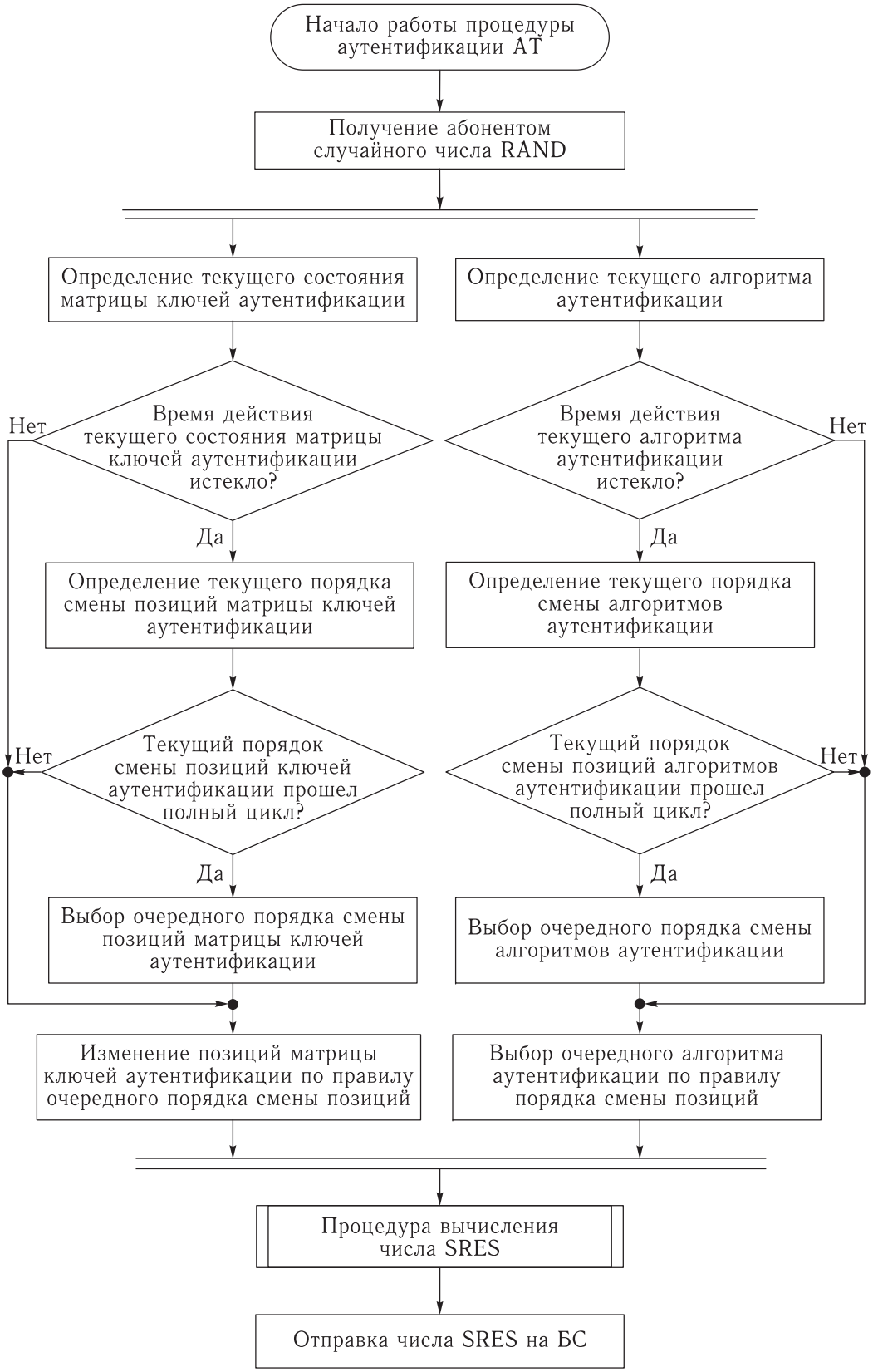


Рис. 1. Алгоритм работы АТ при выполнении процедуры аутентификации

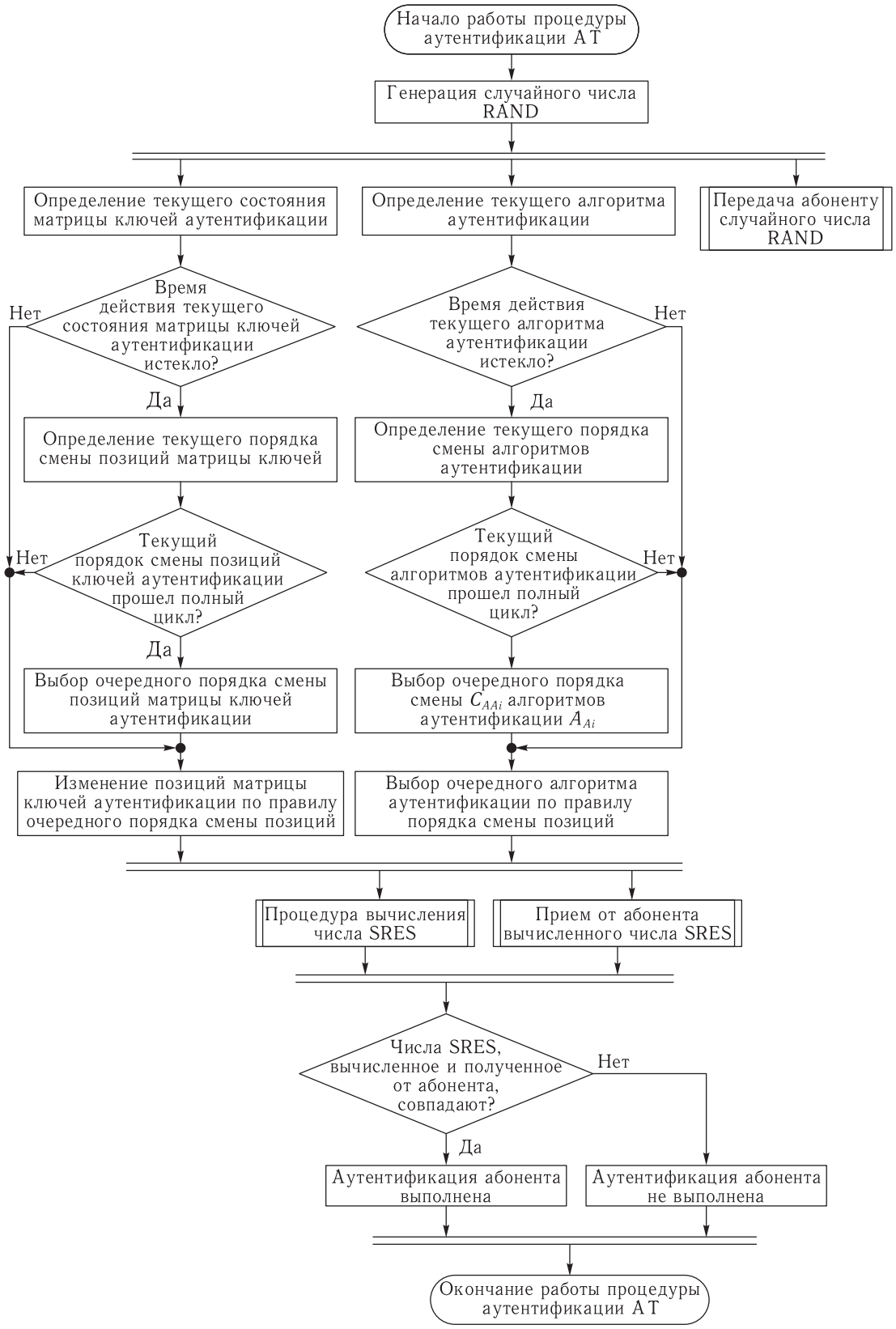


Рис. 2. Алгоритм работы центра коммутации сети подвижной связи или спутника-ретранслятора сети подвижной персональной спутниковой связи при выполнении процедуры аутентификации

вычислений A_8 ключа шифрования K_c содержат однонаправленные функции.

Шаг 3. Информация зашифровывается с помощью ключа шифрования K_c на сеанс связи и алгоритма шифрования A_8.

Криптостойкость процесса шифрования информации определяется:

– длиной ключа аутентификации L_{Ki} (для увеличения криптостойкости длина ключа шифрования L_{Ki} должна стремиться к максимально возможному значению);

– количеством применяемых ключей аутентификации N_{Ki} и количеством перестановок ключей N_{CK_i} (для увеличения криптостойкости количество применяемых ключей аутентификации и количество перестановок ключей должны стремиться к максимально возможным значениям);

– сложностью и количеством алгоритмов аутентификации N_{Ai} и алгоритмов шифрования N_{A8} (для увеличения криптостойкости сложность и количество алгоритмов аутентификации и алгоритмов шифрования должны стремиться к максимально возможным значениям);

– количеством перестановок алгоритмов аутентификации N_{CAi} и алгоритмов шифрования N_{CA8} (для увеличения криптостойкости количество перестановок алгоритмов аутентификации должно стремиться к максимально возможным значениям);

– периодом действия ключей аутентификации T_{Ki}, алгоритмов аутентификации T_{Ai} и алгоритмов шифрования T_{A8} (для увеличения криптостойкости период действия ключей аутентификации, алгоритмов аутентификации и алгоритмов шифрования должен стремиться к минимально возможным значениям).

Алгоритм процедуры шифрования в сети подвижной связи или спутника-ретранслятора в сети подвижной персональной спутниковой связи изображен на рис. 3.

Дешифрование информации выполняется следующим образом.

Шаг 1. В центре коммутации так же, как и в АТ, на основании вычисленного на этапе аутентификации ключа аутентификации K_i и матрицы алгоритмов шифрования M_{A8i} производятся математические операции для вычисления ключа шифрования на сеанс связи K_c.

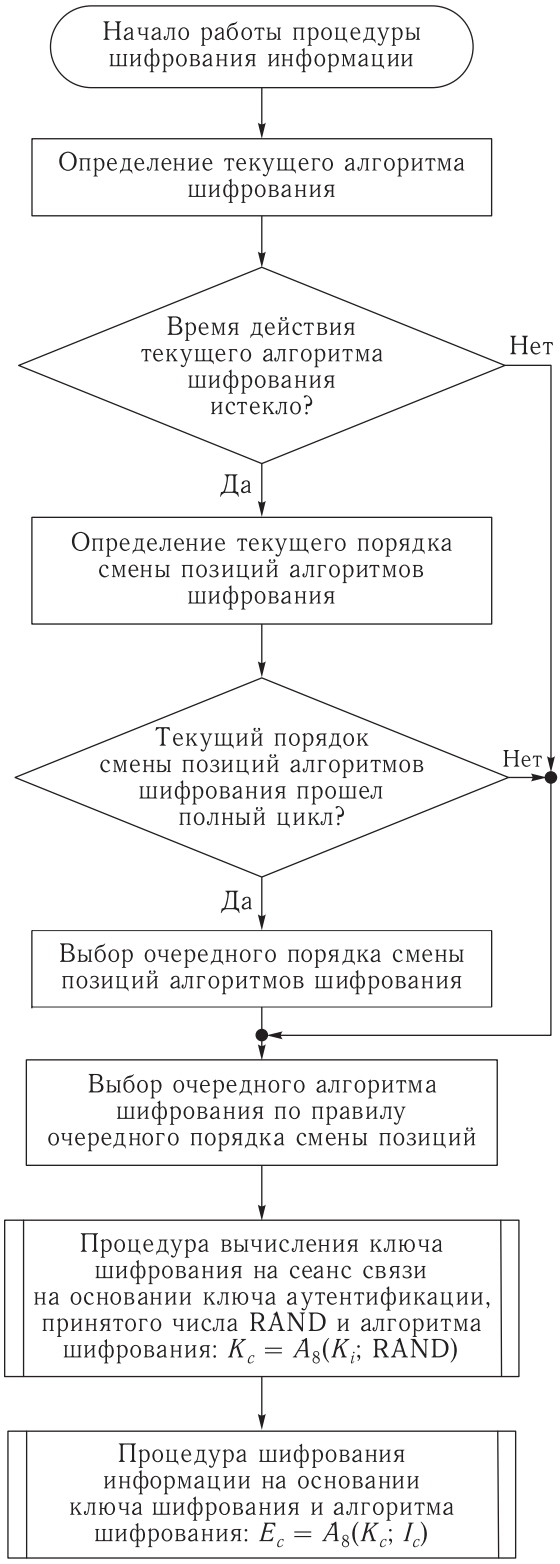


Рис. 3. Алгоритм процедуры шифрования в сети подвижной связи или спутника-ретранслятора в сети подвижной персональной спутниковой связи

Шаг 2. Затем в центре коммутации на основании вычисленного ключа шифрования на сеанс связи K_c и действующего в настоящий момент алгоритма шифрования A_8 выполняется дешифрование информации (функция, обратная шифрованию).

Методика управления степенью криптостойкости передаваемой информации

Для управления степенью криптостойкости передаваемой информации и, соответственно, отказа от усложнения системы в ряде случаев абонентов классифицируют по восьми категориям от 0-й до 7-й [8]:

1) абоненты с минимальными требованиями к криптостойкости — 0-й, 1-й, 2-й категорий — «массовый» пользователь (потенциальный нарушитель — хакер, работающий единолично на обычных бытовых компьютерах);

2) абоненты с повышенными требованиями к криптостойкости — 3-й, 4-й категорий — высокопоставленные представители бизнеса и госслужащие (потенциальный нарушитель — организованная группа хакеров, работающая в интересах преступных организаций или конкурентной разведки в небольших центрах обработки данных);

3) абоненты с высокими требованиями к криптостойкости — 5-й, 6-й, 7-й категорий — высокопоставленные госслужащие и представители силовых структур и ведомств (потенциальный нарушитель – инженеры, имеющие в распоряжении крупные центры обработки данных).

В зависимости от категории абонентов применяют:

– разные по размеру матрицы ключей аутентификации, матрицы порядков смены позиций ключей аутентификации, матрицы алгоритмов аутентификации и матрицы порядков смены позиций алгоритмов аутентификации;

– разные по размеру матрицы алгоритмов шифрования и матрицы порядков смены позиций алгоритмов шифрования;

– разные временные сроки действия определенной комбинации ключей аутентификации;

– разные временные сроки действия определенного алгоритма аутентификации и определенного алгоритма шифрования;

– разные по сложности алгоритмы аутентификации и алгоритмы шифрования;

– разную длительность интервала времени действия определенной комбинации ключей аутентификации, алгоритмов аутентификации и алгоритмов шифрования, которая должна быть меньше периода, необходимого для компрометации ключей и алгоритмов.

Например, для категории абонентов с максимальными требованиями к криптостойкости информации ключи можно записывать не в одну, а в две матрицы и производить операцию умножения одной матрицы на другую.

Заключение

В рассмотренных методах аутентификации и шифрования информации за счет одновременного обеспечения на всех устройствах большого количества вариантов числа аутентификации и ключа шифрования информации абонентского канала связи обеспечивается повышение криптостойкости системы передачи данных с минимальной дополнительной нагрузкой на вычислительные мощности АТ.

Таким образом, разработана и обоснована методика аутентификации абонентов и шифрования информации, обладающая следующими преимуществами:

– простотой реализации, не требующей высокой производительности вычислительных средств;

– универсальностью применения в различных системах радиосвязи и спутниковой связи, в том числе в СПС и в СППСС военного и двойного назначения;

– гибким подходом к изменению степени криптостойкости для различных категорий трафика и различных категорий абонентов.

Список литературы

1. *Барсуков В.С.* Безопасность GSM: реальная или виртуальная? // GSM guard. http://www.gsm-guard.net/press1_2.html (Дата обращения 19.02.2020).

2. *Чекалин А. А.*, *Зарев А. В.*, *Скрыль С. В.*, *Вохминцев В. А. и др*. Защита информации в системах мобильной связи: Учеб. пособ. для вузов. 2-е изд., испр. и доп. М.: Горячая линия–Телеком, 2005. 171 с.

3. Организация для защиты корпоративной сотовой связи на базе SafePhone Plus. Решения операторов персональных данных. https://www.niisokb.ru/upload/solutions-for-operators-of-personal-data.pdf (Дата обращения 19.02.2020).

4. Требования по защите информации в корпоративной системе мобильной связи при обработке данных в государственных информационных системах. https://www.niisokb.ru/upload/the-infosecurity-requirements-for-state-information-systems.pdf (Дата обращения 19.02.2020).

5. Приказ от 11 февраля 2013 г. №17 «Об утверждении требований о защите информации, не составляющей государственную тайну, содержащейся в государственных информационных системах». Список изменяющих документов (В ред. «Приказов ФСТЭК России» от 15.02.2017 №27, от 28.05.2019 №106). https://www.fstec.ru/normotvorcheskaya/akty/53-prikazy/702 (Дата обращения 27.02.2020).

6. *Максименко В. Н*. Организационно-режимные процессы защиты информации в сетях сотовой подвижной связи. https://studfile.net/preview/8102488/ (Дата обращения 19.02.2020).

7. Приказ от 21 июля 1999 г. №22 «Об утверждении Положения о порядке, общих условиях и принципах использования на территории Российской Федерации систем глобальной подвижной персональной спутниковой связи (ГППСС) и требованиях по обеспечению информационной безопасности для российских сегментов указанных систем». https://www.base.garant.ru/181201 (Дата обращения 27.02.2020).

8. *Пантелеймонов И. Н.*, *Толкачев В. И.*, *Пантелеймонова А. В.*, *Адамсон Н. Н.*, *Тодуркин В. В.* Патент №2684488 Российской Федерации. Система защищенной передачи данных: №2018116591/08: заявл. 05.04.18; опубл. 04.09.19.

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ
2020, том 7, выпуск 1, с. 95–103

ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ, МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА, ПРИБОРЫ НА КВАНТОВЫХ ЭФФЕКТАХ

УДК 538.975/621.316.849 DOI 10.30894/issn2409-0239.2020.7.1.95.103

Исследование процессов токопереноса в тонкопленочных магниторезистивных структурах $Ni_{0,76}Fe_{0,18}Co_{0,06}$

А. Б. Грабов, *npoit@npoit.ru*
АО «НПО измерительной техники», г. Королёв, Московская область, Российская Федерация

Аннотация. Исследованы процессы гальваномагнитного транспорта в тонких пленках мягкого ферромагнетного сплава $Ni_{0,76}Fe_{0,18}Co_{0,06}$, применяемого в анизотропных магниторезистивных датчиках (АМР) индукции магнитного поля космического применения. Описаны результаты измерения зависимостей магнитофизических и магнитоэлектрических параметров тонкой пленки $Ni_{0,76}Fe_{0,18}Co_{0,06}$ 6-зондовым методом. Обнаружена величина $\Delta\rho/\rho \geqslant 5{,}0\,\%$. Проведен анализ процесса токопереноса в сплаве в рамках модели трехмерной топологии поверхностей Ферми Лифшица–Каганова. Сделан вывод, что наблюдаемое повышение $\Delta\rho/\rho$ — следствие эффекта разрыва дырочной зоны проводимости из-за присутствия атомов кобальта в кубической подрешетке железа. Результаты могут быть применены для повышения чувствительности АМР-сенсоров и для разработки новых материалов спинтроники.

Ключевые слова: анизотропное магнитосопротивление, тонкая пленка, поверхность Ферми, токоперенос

Study of Current Transfer Processes in Thin Film Magnetoresistive Structures $Ni_{0,76}Fe_{0,18}Co_{0,06}$

A. B. Grabov, *npoit@npoit.ru*
Joint Stock Company "Scientific Production Association of Measuring Equipment" (NPO IT), Korolev, Moscow Region, Russian Federation

Abstract. Galvanomagnetic transfer processes in thin films of the soft magnetic alloy $Ni_{0,76}Fe_{0,18}Co_{0,06}$ used in space-grade anisotropic magnetoresistive (AMR) magnetic field's sensors are studied. The results of measuring the magnetophysical and magnetoelectric parameters of a thin film of $Ni_{0,76}Fe_{0,18}Co_{0,06}$ alloy using a 6-probe method are described. The value $\Delta\rho/\rho \geqslant 5.0\,\%$ was detected. The analysis of the current transfer process in the alloy is carried out according to the model the three-dimensional topology of the Fermi surfaces proposed by Lifshitz–Kaganov. It is concluded that the increase in $\Delta\rho/\rho$ is a consequence of the rupture of the hole conduction band due to the presence of cobalt atoms in the cubic iron sublattice. Obtained results can be used for upgrade high-sensitive AMR-sensors and for new spintronic materials development.

Keywords: anisotropic magnetoresistance, thin film, Fermi surface, current transfer

Введение

Происходящее в настоящий момент одновременное развитие наноспутниковых технологий и переход к высокоинформативным методам многоплатформенных исследований геомагнитного поля остро поднимает вопрос о миниатюризации магнитометрической аппаратуры космических аппаратов (ММА КА) [1]. В основу принципов действия чувствительных элементов (ЧЭ) ММА КА могут быть положены более десятка разных физических эффектов, но наилучшим потенциалом миниатюризации при высокой чувствительности, малом энергопотреблении и высокой стойкости к внешним факторам обладают анизотропные магниторезистивные сенсоры (АМР-сенсоры) [1, 2]. АМР-сенсоры представляют собой специальные резисторы, сделанные из тонкой пленки мягкого ферромагнетика, напыленной на диэлектрическую подложку. Миниатюризация АМР-сенсоров легко достигается за счет их изготовления методами микроэлектронной технологии (напыление тонких пленок, фотолитография, травление). На основе АМР-эффекта в последние годы был разработан ряд миниатюрных ЧЭ магнитной индукции, используемых в бортовых векторных системах ММА КА [3–5].

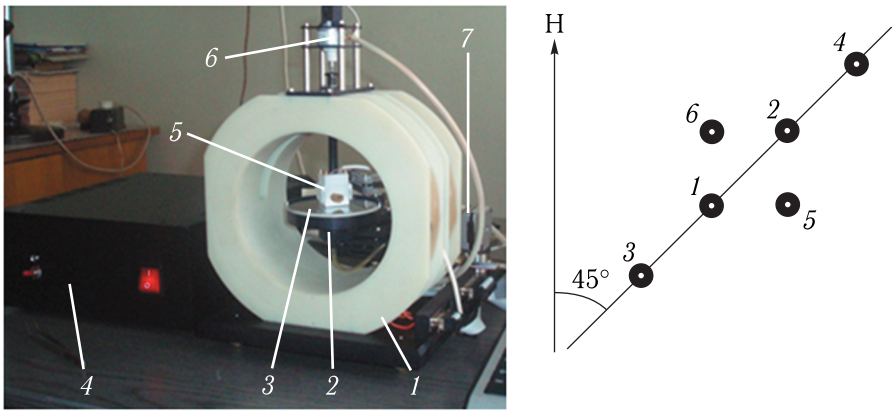
Однако чувствительность и разрешающая способность современных АМР-магнитометров примерно на 1–2 порядка хуже, чем у наиболее широко применяемого типа векторных магнитометров ММА КА — флюксгейт-магнитометра. Из-за требований, связанных с повышением отношения сигнал–шум и сохранением температурной стабильности, наиболее часто используемым для АМР-сенсоров материалом является пермаллой состава $Ni_{0,81}Fe_{0,19}$, имеющий $\Delta\rho/\rho \approx 1{,}8\,\%$ [2, 6]. Повышение чувствительности АМР-сенсора может быть достигнуто совершенствованием топологии [4, 5] либо повышением величины магнитосопротивления $\Delta\rho/\rho$ исходной пленки.

Второй путь представлялся более сложным, хотя еще McGuire и Potter [2] предложили два сплава — $Ni_{0,91}Fe_{0,09}$ и $Co_{0,7}Fe_{0,3}$, демонстрирующие в объемном образце $\Delta\rho/\rho > 5{,}0\,\%$. Однако данных о тонкопленочных АМР-сенсорах на их основе до сих пор нет. Tumanski [6, с. 99] отмечал, что «…обоснованное прогнозирование соответствия между стехиометрическим составом ферромагнитного сплава, его остаточным удельным сопротивлением ρ и $\Delta\rho/\rho$ представляет собой задачу, не решенную даже на теоретическом уровне». Тем не менее ранее были получены тонкие пленки сплава $Ni_{0,76}Fe_{0,18}Co_{0,06}$ [7–9]. Эти пленки изоморфны $Ni_{0,81}Fe_{0,19}$, но имеют меньшую величину ρ и воспроизводимо демонстрируют значение $\Delta\rho/\rho \geqslant 5{,}0\,\%$. Из них были изготовлены ЧЭ, пригодные для применения в ММА КА [3, 4]. В данной работе выполнено исследование гальваномагнитных свойств тонких пленок $Ni_{0,76}Fe_{0,18}Co_{0,06}$, описываются результаты эксперимента и анализируется возможный механизм влияния добавки Co на механизм токопереноса в пленке.

Образцы и методика измерений

В качестве опытных образцов на ситалловых подложках размером 60×48 мм были напылены 5 однослойных ферромагнитных пленок $Ni_{0,76}Fe_{0,18}Co_{0,06}$. Напыление производилось в промышленной установке вакуумного напыления типа УРМ3-279, оборудованной ионно-плазменным источником и магнитной системой, обеспечивающей наведение в плоскости подложки магнитного поля напряженностью 200 Гс. Напыление производилось с мишени типа НЖ18К6, содержащей соответственно 76 % Ni, 18 % Fe и 6 % Co.

Толщина слоя $Ni_{0,76}Fe_{0,18}Co_{0,06}$ контролировалась по времени напыления и составила 250 Å. Для измерения магнитофизических параметров пленок $(R_s, H_c, H_k, dR/R)$ использовался стенд ТИДН.411182.001, изготовленный в СКТБ ИРЭ РАН (рис. 1) [8], который является первой российской установкой, реализующей 6-зондовый метод измерения магнитосопротивления, предложенный J. Cavallo [10]. Так же как и в традиционном 4-зондовом, в 6-зондовом способе измерения сигналом является разность потенциалов V между двумя точками. В схему измерений 6-зондового метода введена дополнительная пара потенциальных контактов (контакты *5* и *6* на рис. 1, *б*). То есть одна пара контактов (*3* и *4*) располагается в позиции максимума сигнала от магнитосопротивления, а другая пара (*5* и *6*) — в позиции минимума



а *б*

Рис. 1. *а*) Общий вид измерительного стенда ТИДН.411182.001, разработанного СКТБ ИРЭ РАН: *1* — катушки Гельмгольца, *2* — поворотный столик, *3* — образец, *4* — блок электроники и управления, *5* — 6-зондовая измерительная головка, *6* — привод измерительной головки, *7* — привод поворотного столика; *б*) схема расположения измерительных контактов зондовой головки

сигнала. Линия расположения контактов под 45° относительно оси легкого намагничивания (ОЛН) пленки обеспечивает максимальный сигнал V от магнитосопротивления при прохождении положения $\ln(1+\Delta\rho/\rho)$. При этом V между любой парой измерительных контактов будет описываться уравнением

$$V = \frac{IR}{2\pi}\left[\ln\left(1+\frac{\Delta\rho}{\rho_0}(\cos\theta+\sin\theta)^2\right) - \ln\left(1+\frac{\Delta\rho}{\rho_0}(\cos\theta-\sin\theta)^2\right)\right], \quad (1)$$

где ρ_0 — удельное сопротивление, перпендикулярное M_s;

$\Delta\rho$ — магнитосопротивление;

θ — угол между направлением намагниченности и осью x.

Шестизондовым методом непосредственно на поверхности ферромагнитной пленки можно измерить локальное значение поверхностного сопротивления R_s (Ом/квадрат) и вычислить из него коэффициент магнитосопротивления dR/R_s:

$$dR/R_s = \frac{R_{s\max} - R_{s\min}}{R_{s\max}}. \quad (2)$$

Магнитное поле напряженностью ±150 Э создается парой катушек Гельмгольца (позиция *1* на рис. 1, *а*). На поворотный столик (*2*) устанавливаются исследуемые образцы (*3*). Блок электроники и управления *4* подает калиброванный ток на токовые контакты (*1* и *2*) 6-зондовой измерительной головки (*5*) и измеряет разность потенциалов на двух парах потенциальных контактов. Также блок электроники и управления управляет приводом измерительной головки (*6*) и приводом поворотного столика (*7*). Измерительный стенд ТИДН.411182.001 позволяет снимать ом-эрстедные характеристики пленок при различных углах поворота столика, а также в различных точках пластины. Коэрцитивная сила H_c определялась как разность ΔH положения пиков $R_{s\max}$ прямой и обратной ветви зависимости $R_s = f(H)$. Положение ретроградного участка на нисходящей ветви этого графика соответствует величине поля смещения H_s. При этом поле магнитной анизотропии H_k представляет собой полуширину основания пика.

По данным семейств ом-эрстедных характеристик при разных углах поворота θ для каждого образца были построены зависимости $dR/R_s = f(\theta)$, $H_c = f(\theta)$, $H_k = f(\theta)$.

Результаты измерений

Для всех образцов были сняты семейства ом-эрстедных характеристик в диапазоне углов поворота 0–360° с шагом 15°. За нулевое направление принималось технологически заданное направление

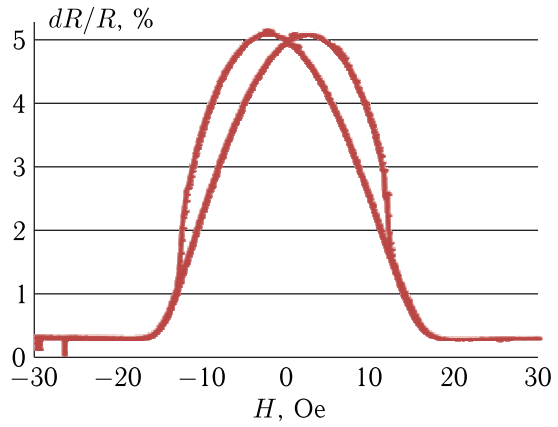


Рис. 2. Анизотропный магниторезистивный эффект $\Delta\rho/\rho = 5{,}15\,\%$ в пленке $Ni_{0,76}Fe_{0,18}Co_{0,06}$ (образец III, таблица)

ОЛН. Вид ом-эрстедной характеристики образца III при $\theta = 0{,}0°$ приведен на рис. 2.

По полученным характеристикам были вычислены основные магнитофизические параметры пленок и их изменение в зависимости от угла поворота (рис. 3).

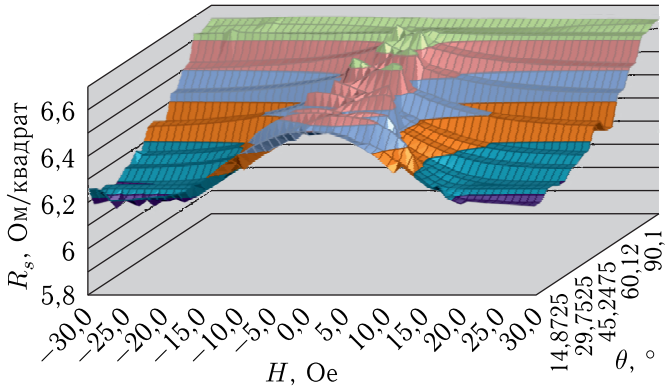


Рис. 3. Изменение R_s в в магнитном поле напряженностью в диапазоне ±30 Э при повороте столика от 0° до 90° (образец III, таблица)

В таблице приведены все полученные при измерении магнитофизические параметры образцов.

Величины H_c, H_k и dR/R указаны для направления, параллельного ОЛН ($\theta = 0{,}0°$). Более наглядным и информативным является представление величин dR/R, H_c и H_k в виде полярных диаграмм их зависимостей от угла поворота подложки. В этом случае обретает физический смысл собственная осевая симметрия описанной кривой,

Таблица. Магнитофизические параметры образцов (отклонение от ОЛН — 0°)

Образец	I	II	III	IV	V
H_c, Э	1,83	1,94	2,37	0,59	1,29
H_k, Э	15,2	14,8	14,4	11,4	14,7
dR/R, %	4,42	4,58	5,00	3,45	4,00
α_{50}, °	3,6	17,7	17,7	1,0	19,4

ее симметрия относительно полярной точки, симметрия относительно ОЛН (0–180°) и оси трудного намагничивания (ОТН) (90°–270°).

Диаграмма зависимости $dR/R = f(\theta)$ подложек приведена на рис. 4.

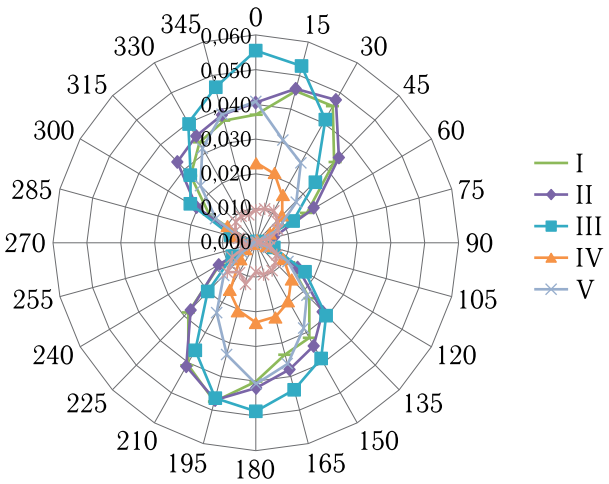


Рис. 4. Диаграмма $dR/R = f(\theta)$

Кривые имеют гантелеобразную форму с ожидаемой перетяжкой в области ОТН, где dR/R всех образцов падает практически до нуля. Площадь, занимаемая каждой кривой, четко соответствует максимальной величине магниторезистивного эффекта в пленке.

В диаграмме основное внимание следует обратить на направление осей собственной симметрии кривых, которое характеризует отклонение направления максимального магниторезистивного эффекта от ОЛН. Приведенная диаграмма демонстрирует, что подавляющее большинство образцов имеет существенное отклонение максимума dR/R от ОЛН. Величина этого отклонения заключена, как правило, в диапазоне от 2°–3° до 15°. Величина отклоне-

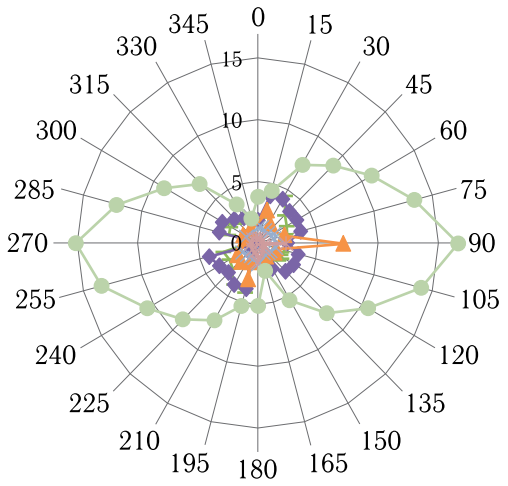


Рис. 5. Диаграмма $H_c = f(\theta)$. + – обр. I, ▲ — обр. II, ■ — обр. III, • — обр. IV, = — обр. V

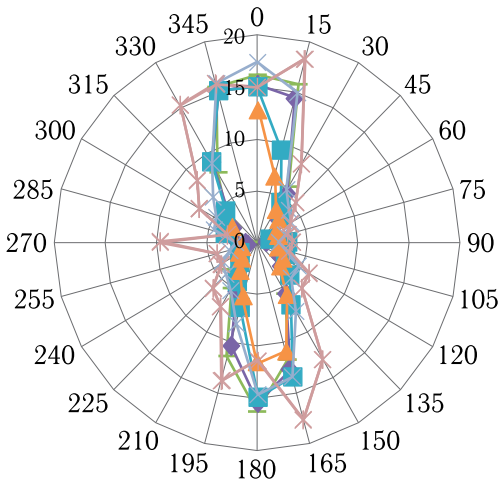


Рис. 6. Диаграмма $H_k = f(\theta)$. + – обр. I, ▲ — обр. II, ■ — обр. III, • — обр. IV, = — обр. V

ния не связана ни с величиной dR/R, ни с величиной α_{50}. Так, наименьшее отклонение имеют образцы III и IV, которые имеют соответственно наибольшую и наименьшую абсолютную величину dR/R из исследованной выборки, а наибольшее отклонение дают образцы I и II, которые в выборке имеют наибольшее и наименьшее значение α_{50}.

Наиболее характерным в диаграмме зависимости $H_c = f(\theta)$ ферромагнитных пленок от угла (рис. 5) является четко выраженный минимум H_c в области ОЛН. Причем понятие «минимум» доходит вплоть до того, что в ряде образцов в области этого минимума наблюдается отрицательная величина коэрцитивности, что на первый взгляд кажется лишенным какоголибо физического смысла. Кажущееся отрицательное значение H_c в сплаве $Ni_{0,76}Fe_{0,18}Co_{0,06}$ наблюдалось впервые и требует дополнительного анализа. Форма кривых $H_k = f(\theta)$ тоже может быть охарактеризована как гантелеобразная (рис. 6). Ось симметрии «перетяжки» направлена вдоль ОТН.

Обсуждение результатов

С точки зрения современной теории магнитосопротивление является гальваномагнитным транспортным феноменом [11]. Перенос заряда происходит в ферромагнитном материале, состоящем из локализованных магнитных моментов, имеющих трансляционную симметрию. Магнитное поле закручивает носители заряда, а также поляризует их спины. Поляризация фиксирует направление спинов, и исчезает возможность рассеяния с поворотом спина. Магнитосопротивление в такой модели является следствием снижения полной вероятности рассеяния [12].

Использовавшийся в работе сплав $Ni_{0,76}Fe_{0,18}Co_{0,06}$ представляет собой типичный твердый раствор замещения [13], составленный из трех различных $3d$-металлов. Он образован матрицей гранецентрированной кубической (ГЦК) решеткой Ni с параметром ячейки $a \sim 3{,}524$ Å и растворенными в ней атомами Fe и Co. Если решетка немодифицированного $Ni_{0,81}Fe_{0,19}$ состоит из простой кубической решетки Fe и вставленной в нее октаэдрической решетки Ni, то в $Ni_{0,76}Fe_{0,18}Co_{0,06}$ в одной четверти узлов кубической подрешетки Co частично замещает Fe. При этом структура самого Co испытывает искажение вследствие нарушения симметрии. Вид кристаллической ячейки сплава $Ni_{0,76}Fe_{0,18}Co_{0,06}$ приведен на рис. 7.

Токоперенос в сплаве $Ni_{0,76}Fe_{0,18}Co_{0,06}$ осуществляется как по электронному, так и по дырочному механизму. Для случая токопереноса двумя типами носителей известно следующее выражение для величины $\Delta\rho/\rho$ [14]:

$$\frac{\Delta\rho_t}{\rho_0} = \frac{\sigma_1\sigma_2(R_1\sigma_1 - R_2\sigma_2)^2B^2}{(\sigma_1+\sigma_2)^2 + (R_1\sigma_1^2 + R_2\sigma_2^2)^2B^2}, \qquad (3)$$

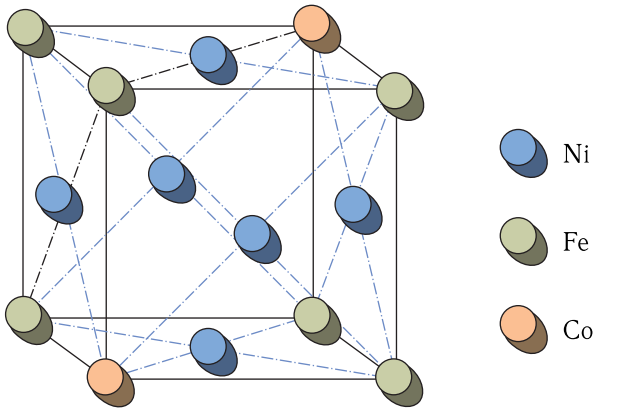


Рис. 7. Кристаллографическая ячейка сплава $Ni_{0,76}Fe_{0,18}Co_{0,06}$

где σ_1 и σ_2 — собственные проводимости для электронов и дырок, R_1 и R_2 — постоянные Холла для электронов и дырок соответственно, B — напряженность магнитного поля.

Следует обратить внимание, что в общем случае в магнитном поле для носителей с двумя спиновыми состояниями будет происходить расщепление по эффективной массе m^* [15]. Следовательно, процессы токопереноса в ферромагнитном сплаве будут характеризоваться 4 значениями σ_n — двумя электронными и двумя дырочными. Значение σ_n для каждого типа носителей заряда можно вычислить из известной формулы, связывающей длину свободного пробега данного типа носителей — l_n и интеграл площади поверхности Ферми — S [16]:

$$\sigma_n = \frac{e^2}{12\pi^3 h} \int\limits_S l \, dS. \qquad (4)$$

Для анализа конкретного сплава в том числе необходимо проанализировать форму и топологию поверхностей Ферми каждого компонента. Отметим, что до широкого внедрения методов нейтронного рассеяния основным способом исследования поверхности Ферми в металлах и полупроводниках было именно изучение зависимости $\Delta\rho/\rho = f(\theta)$ [14].

Анализировались поверхности Ферми Ni, Fe и Co для моделей, разработанных Вакохой и Ямашитой (ВЯ) [17]. На рис. 8 приведена качественная модель энергетических зон для одной ячейки сплава $Ni_{0,76}Fe_{0,18}Co_{0,06}$, построенная в приближении «жестких зон», т. е. исходя из предположения, что атомы элементов в сплаве в целом сохраняют форму поверхности Ферми, свойственную для элементарных веществ. После трансляции этой ячейки получается трехмерная сетка из ферми-поверхностей, анализируемая методами анализа трехмерных топологий, разработанных И. М. Лифшицем и М. И. Кагановым (ЛК) [18, 19] и развитыми в работах В. Г. Песчанского [20], А. Я. Мальцева [12, 21] и других [22].

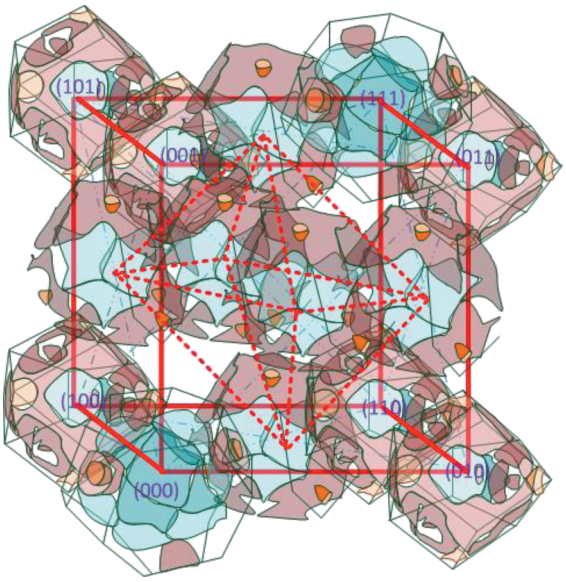


Рис. 8. Модель топологии поверхностей Ферми в кристаллической ячейке сплава $Ni_{0,76}Fe_{0,18}Co_{0,06}$

Теория ЛК давно заняла место в арсенале инструментов теоретической физики металлов [16]. Однако в прикладных работах по АМР-сенсорам она используется редко, поэтому целесообразно привести основные положения ЛК, важные для исследования гальваномагнитных явлений в ферромагнетиках:

1) носители заряда могут перемещаться в кристаллах только по топологически разрешенным траекториям, обращаясь по ним с ларморовской частотой ω;

2) в зависимости от геометрии трехмерной сетки из ферми-поверхностей разрешенные траектории для носителей заряда могут быть как открытыми, так и замкнутыми. Открытые орбиты характеризуются зависимостью вида $\Delta\rho/\rho \propto B^2$, а закрытые — $\Delta\rho/\rho \propto B_1$;

3) разрешенные траектории могут иметь топологию двух типов: «гофрированный цилиндр» и «трехмерная решетка из трубок». Если поверхность Ферми цилиндрической топологии, в ней имеется открытая траектория в том случае, если вектор индукции магнитного поля лежит в плоскости перпендикулярной оси цилиндра. Если плоскость направлена под углом — траектория замкнутая [18];

4) если магнитное поле наклонено к плоскости, нормальной к оси «гофрированного цилиндра» под малым углом θ, то длина траектории носителя заряда и период его обращения возрастает пропорционально θ^{-1}.

Проанализируем по ЛК транслированную ячейку сплава $Ni_{0,76}Fe_{0,18}Co_{0,06}$с формой энергетических зон, соответствующей моделям ВЯ в первом приближении. В ГЦК-матрице Ni электроны спином «вниз» локализованы в двух больших замкнутых электронных карманах с центрами в точке Г в 5-й и 6-й зонах [14, с. 229]. Поскольку карманы замкнутые, то, согласно [18], электроны, находящиеся в них, также имеют замкнутую траекторию и не участвуют в процессе гальваномагнитного токопереноса. Для электронов со спином «вверх» имеется многосвязанный лист поверхности Ферми с перешейками вдоль направлений $\langle 111\rangle$. Перекрываясь с соседними атомами, эти листы образуют топологию типа «трехмерная решетка», которая и должна играть главную роль в гальваномагнитном транспорте в никелевой матрице. Дырочные карманы у Ni располагаются в точке L 4-й зоны и в точке X 3-й и 4-й зонах и трехмерной топологически связанной решетки не образуют [17].

Модель ВЯ энергетических зон ОЦК Fe топологически гораздо сложнее никелевой. Электронные поверхности Ферми состоят из большой октаэдрической замкнутой поверхности в точке Г 4-й зоны со структурой типа «валет», а также группы малых электронных линз, расположенных вдоль Г–Н и образующих перешейки между «валетами». Другими словами, в железе токоперенос может осуществляться электронами и спином «вверх», и спином «вниз». Еще более сложную топологию имеют дырочные поверхности Fe. Они включают не только два дырочных кармана в точке H, но и сложную многосвязанную трубчатую дырочную поверхность, открытую вдоль направлений $\langle 001\rangle$, $\langle 111\rangle$, $\langle 110\rangle$. Перекрываясь с соседними атомами, эта трубчатая решетка Fe, в отличие от Ni, создает открытую траекторию для дырок. Эффективная масса дырок больше электронной, поэтому движение носителей по этой траектории будет давать вклад в H_c.

Зонная структура Co в сплаве $Ni_{0,76}Fe_{0,18}Co_{0,06}$ будет характеризоваться большей неопределенностью [14, с. 232]. Чистый Co гексагонален, и модель ВЯ предусматривает для Co наличие 18 гексагонально-симметричных поверхностей Ферми. Большую часть объема ячейки занимает сдвоенная электронная сфера в точке Г, три концентрические дырочные поверхности, а также три группы мелких электронных и дырочных карманов. При этом по ВЯ в Co больших дырочных зон, способных образовать структуру «трехмерной решетки», нет. Согласно модели ЛК, наличие зависимости вида $\Delta\rho/\rho \propto B^2$ доказывает наличие открытых орбит в направлении, нормальном к B. Полученная гантелеобразная зависимость $\Delta\rho/\rho = f(\theta)$ (рис. 4) достаточно хорошо аппроксимируется известными уравнениями синусоидальной спирали 2-го порядка или лемнискаты Бернулли в полярных координатах [14, 19]:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = B^2 \cdot \cos 2\theta, \qquad (5)$$

которое говорит, что у сплава $Ni_{0,76}Fe_{0,18}Co_{0,6}$ мы имеем дело с поверхностью Ферми, открытой вдоль ОЛН и закрытой вдоль ОТН для электронов во всех исследованных образцах (относительно требуемого для построения лемнискаты квадрата параметра $\Delta\rho/\rho$ см. формулу (3)).

Аналогичная аппроксимация H_c уравнением лемнискаты типа

$$H_c^2 = B^2 \cdot \cos(-2\theta) \qquad (6)$$

возможна только для образца IV (рис. 5), имеющего наиболее низкое значение $\Delta\rho/\rho = 3{,}45\,\%$. То есть этот образец отличается от остальных наличием открытых дырочных траекторий вдоль ОТН. Наличие ретроградного участка на ом-эрстедной характеристике $Ni_{0,76}Fe_{0,18}Co_{0,06}$ образца IV указывает на существование области преимущественно дырочного токопереноса. Между тем мы видим, что в образце III ретроградный

участок отсутствует, а H_c при всех значениях θ не превышает 1,8 Э, причем форма $H_c = f(\theta)$ не гантелеобразная, а «звездчатая», соответствующая зависимости $H_c \infty B^1$, что свидетельствует о закрытости в образце III дырочных траекторий во всех направлениях и меньшей роли дырочного механизма в общем токопереносе.

В связи с этим логично будет предположить, что, поскольку Co не имеет значительных дырочных зон, атомы Co, внедренные в угловые позиции в подрешетке железа в структуре сплава $Ni_{0,76}Fe_{0,18}Co_{0,06}$ так, как это показано на рис. 7, как бы «разрывают» открытые Fe дырочные траектории, не меняя формы траекторий электронных. Вследствие этого вклад дырочного тока в суммарный перенос заряда в модифицированном $Ni_{0,76}Fe_{0,18}Co_{0,06}$ существенно меньше, чем в немодифицированном $Ni_{0,81}Fe_{0,19}$. Соответственно меньше и вклад «тяжелых» дырок из Fe в коэрцитивность пленки. А учитывая то, что Co дает дополнительный электрон в никелевую матрицу, имеющую открытые электронные траектории, можно утверждать, что, по сравнению с немодифицированным пермаллоем, σ_s в $Ni_{0,76}Fe_{0,18}Co_{0,06}$, наоборот, будет выше, что и наблюдалось ($\rho_s(Ni_{0,76}Fe_{0,18}Co_{0,06})$ = 6,2–9,0 Ом/квадрат, $\rho_s(Ni_{0,81}Fe_{0,19}) = 22{,}0$ Ом/квадрат [6]).

Выводы

На основании изложенного можно сформулировать следующие выводы:

– повышение чувствительности АМР-сенсоров путем повышения $\Delta\rho/\rho$ исходной пленки возможно, в частности, при использовании тройного сплава $Ni_{0,76}Fe_{0,18}Co_{0,06}$, имеющего $\Delta\rho/\rho \approx 5{,}0\,\%$;

– кристаллографический изоморфизм структуры $Ni_{0,76}Fe_{0,18}Co_{0,06}$ и $Ni_{0,81}Fe_{0,19}$ с высокой вероятностью выражается в замене атомами Co одной четверти атомов в подрешетке железа. Замена Fe на Co приводит к «разрыву» открытой спаренными атомами Fe в $Ni_{0,81}Fe_{0,19}$ дырочной траектории, что снижает коэрцитивность пленки и улучшает ее гистерезисные свойства.

Анализ взаимосвязи свойств гальваномагнитного транспорта с кристаллографической структурой сплавов методами теории ЛК позволяет относительно просто и наглядно моделировать свойства новых материалов магнитоэлектроники и спинтроники, что может оказаться полезным для разработки новых высокочувствительных и малошумящих миниатюрных АМР-сенсоров, в том числе и для ММА КА.

Список литературы

1. *Diaz-Michelena M.* Small magnetic sensors for Space Applications // Sensors, 2009, № 9. P. 2271–2288.
2. *Mac-Guire T.R.*, *Potter R.I.* Anisotropic magnetoresistance in Ferromagnetic 3-d Alloys // IEEE Transactions on Magnetics, 1975, vol. 11, No. 4. P. 1018–1038.
3. *Грабов А.Б.*, *Бродин Е.В.*, *Веселов А.В. и др.* МРД-009 И МРД-010-магниторезистивные бортовые интеллектуальные магнитометры для КА // Авиакосмическое приборостроение, 2015, № 6. С. 14–21.
4. *Ажаева Л.А.*, *Веселов А.В.*, *Грабов А.Б. и др.* Патент № 2495514 Российской Федерации. Магниторезистивный датчик: № 2012118207/28: заявл. 03.05.2012; опубл. 10.10.2013 / Бюллетень № 28. 8 л.
5. *Суханов В.И.*, *Грабов А.Б.* Тонкопленочные магниторезистивные датчики и измерительные преобразователи магнитной индукции // Информационно-технологический вестник, 2018, № 2 (16). С. 35–44.
6. *Tumanski S.* Thin Film Magnetoresistive Sensors, IOP Publishing Ltd, 2001.
7. *Грабов А.Б.* Дисперсия магнитной анизотропии в пленках NiFeCo // Информационно-управляющие и измерительные системы-2013: Тезисы докладов. Королёв, 2013. С. 44.
8. *Ажаева Л.А.*, *Буянов А.В.*, *Грабов А.Б.*, *Суханов В.И.*, *Сергеева Л.В.*, *Тимофеев Б.В.* Анизотропный магниторезистивный эффект величиной более 5 % в тонких ферромагнитных пленках // Информационно-управляющие и измерительные системы-2012: Тезисы докладов. Королёв, 2012. С. 103.
9. *Грабов А.Б.* Шумовые характеристики магниторезистивных пленок // Информационно-управляющие и измерительные системы-2012: Тезисы докладов. Королёв, 2012. С. 104.
10. US Statutory Invention Registration, Reg. No. H585. Author: J. Cavallo.; “Anisotropic magnetoresistance measurement apparatus and method thereof”. Appl. No 146,012. Feb. 7, 1989.

11. *Bechthold P.S.* Galvanomagnetic Transport: from Hall Effect to AMR. 40th IFF Spring School, Julich, 9th – 20th March 2009. B 7. P. 1–35.

12. *Новиков С.П.*, *Мальцев А.Я.* Топологические явления в нормальных металлах // УФН, 1998, т. 168, № 3. С. 249–258.

13. *Laughlin D.E.*, *Willard M.A.*, *McHenry M.E.* Magnetic Ordering: Some Structural Aspects. Phase Transformations and Evolution in Materials, edited by P. Turchi and A. Gonis, The Minerals, Metals and Materials Society. 2000. P. 121–137.

14. *Крэкнелл А.*, *Уонг К.* Поверхность Ферми / Пер. под ред. В.Я. Кравченко. Москва: Атомиздат, 1978. 352 с.

15. *Didukh L. et al.* Magnetic field dependence of conductivity and effective mass of carriers in a model of Mott-Hubbard material // Condensed Matter Physics, 2005, vol. 8, no. 4(44). P. 825–834.

16. *Катанин А.А.*, *Ирхин В.Ю.*, *Игошев П.А.* Модельные подходы к магнетизму двумерных зонных систем. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2012. 75 с.

17. *Gold A.V.* Fermi Surface Studies in Iron and Nickel // Journal of Applied Physics, 1968, vol. 39. P. 768.

18. *Каганов М.И.*, *Лифшиц И.М.* Электронная теория металлов и геометрия // УФН, 1979, т. 129. С. 487–529.

19. *Лифшиц И.М.*, *Каганов М.И.* Некоторые вопросы электронной теории металлов. III. Кинетические свойства электронов в металле // УФН, 1965, т. 87. С. 389–469.

20. *Kaganov M.*, *Peschansky V.* Galvano-magnetic phenomena today and forty years ago // Physics Reports, 2002, vol. 372. P. 445–487.

21. *Мальцев А.Я.* Об аналитических свойствах магнитопроводимости при наличии устойчивых открытых электронных траекторий на сложной поверхности Ферми // ЖЭТФ, 2017, т. 151, вып. 5. С. 944–973.

22. *Petrovykh D.Y.*, *Altmann K.N.*, *Hochst H.*, *Laubscher M.*, *Maat S.*, *Mankey G.J.*, *and Himpsel F.J.* Spin-dependent band structure, Fermi surface, and carrier lifetime of permalloy // Applied Physics Letters, 1998, vol. 73, no. 23. P. 3459–3461.

Scientific and technical journal

ROCKET-SPACE DEVICE ENGINEERING AND INFORMATION SYSTEMS

Vol. 7. No. 1. 2020

Founder:
Joint Stock Company “Russian Space Systems”

Advisory Council

Chair:
Tyulin A.E., Dr. Sci. (Econ.), Cand. Sci. (Eng.), Corresponding Member of Russian Academy of Missile and Artillery Sciences, Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation
Deputy Chairmen:
Erokhin G.A., Cand. Sci. (Eng.), Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation
Romanov A.A., Dr. Sci. (Eng.), Prof., Academician, International Academy of Astronautics, Moscow, Russian Federation
Nesterov E.A., Cand. Sci. (Econ.), Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

Members of the Advisory Council:

Artemyev V.Yu., Joint Stock Company “Scientific and Production Association of Measurement Equipment”, Moscow, Russian Federation
Akhmedov D.Sh., Dr. Sci. (Eng.), Corresponding Member of National Engineering Academy of the Republic of Kazakhstan, SLLP “Institute of Space Systems and Technologies”, Almaty, Republic of Kazakhstan
Baturin Yu.M., Doctor of Law, Prof., Corresponding Member, Russian Academy of Sciences, S.I. Vavilov Institute for the History of Science and Technology of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
Blinov A.V., Cand. Sci. (Eng.), Corresponding Member of Russian Engineering Academy, Joint-Stock Company “Research institute of physical measurements”, Penza, Russian Federation
Gabitov I.R., Dr. Sci. (Phys.–Math.), Prof., University of Arizona, the USA
Zhantayev Zh.Sh., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Academician of Kazakhstan National Academy of Natural Sciences, Joint-Stock Company “National Center of Space Research and Technology”, Almaty, Republic of Kazakhstan
Zhmur V.V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russian Federation
Kolachevsky N.N., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Corresponding Member, Russian Academy of Sciences, Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
Kuleshov A.P., Dr. Sci. (Eng.), Prof., Academician, Russian Academy of Sciences, Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russian Federation
Nosenko Yu.I., Dr. Sci. (Eng.), Prof., Joint Stock Company “Research Institute of Precision Instruments”, Moscow, Russian Federation
Perminov A.N., Dr. Sci. (Eng.), Prof., Member of International Academy of Astronautics, Russian Engineering Academy, Russian Academy of Cosmonautics named after K.E. Tsiolkovsky, Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation
Pobedonostsev V.A., Dr. Sci. (Eng.), branch of Joint Stock Company “United Rocket and Space Corporation”–“Institute of Space Device Engineering”, Moscow, Russian Federation
Stupak G.G., Dr. Sci. (Eng.), Prof., Academician of Russian Academy of Cosmonautics named after K.E. Tsiolkovsky, Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation
Chebotarev A.S., Dr. Sci. (Eng.), Prof., Stock Company “Special research bureau of Moscow power engineering institute”, Moscow, Russian Federation
Chernyavsky G.M., Dr. Sci. (Eng.), Prof., Corresponding Member, Russian Academy of Sciences, Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation
Chetyrkin A.N., branch of Joint Stock Company “United Rocket and Space Corporation”–“Institute of Space Device Engineering”, Moscow, Russian Federation

Editorial Board

Editor-in-Chief:
Romanov A.A., Dr. Sci. (Eng.), Prof., Academician, International Academy of Astronautics, Moscow, Russian Federation
Deputy Editor-in-Chief:
Fedotov S.A., Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

Members of the Editorial Board:

Alekseyev O.A., Dr. Sci. (Eng.), Prof., Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation
Alybin V.G., Dr. Sci. (Eng.), Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation
Belokonov I.V., Dr. Sci. (Eng.), Prof., Samara National Research University, Samara, Russian Federation
Betanov V.V., Dr. Sci. (Eng.), Prof., Corresponding Member of Russian Academy of Missile and Artillery Sciences, Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation
Bugaev A.S., Dr. Sci. (Phys.–Math.), Prof., Academician, Russian Academy of Sciences, Kotel’nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, Moscow, Russian Federation
Vasilkov A.P., Ph. Doctor in Physics and Mathematics, Science Systems and Applications Inc., Maryland, the USA
Vatutin V.M., Dr. Sci. (Eng.), Prof., Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation
Danilin N.S., Dr. Sci. (Eng.), Prof., Academician of Russian and International Engineering Academies, Russian Academy of Cosmonautics named after K.E. Tsiolkovsky, Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation
Dvorkin V.V., Dr. Sci. (Eng.), Prof., Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation
Zhodzishsky A.I., Dr. Sci. (Eng.), Academician of Russian Academy of Cosmonautics named after K.E. Tsiolkovsky, Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation
Zhukov A.A., Dr. Sci. (Eng.), Joint Stock Company “Russian Space Systems“, Moscow, Russian Federation
Kolachevsky N.N., Dr. Sci. (Phys.–Math.), Prof., Corresponding Member, Russian Academy of Sciences, Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
Kukushkin S.S., Dr. Sci. (Eng.), Prof., Academician of Russian Academy of Cosmonautics named after K.E. Tsiolkovsky, Corresponding Member of Russian Engineering Academy, Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation
Mikhaylov V.Yu., Dr. Sci. (Eng.), Prof., Moscow Aviation Institution, Moscow, Russian Federation
Novikov D.A., Dr. Sci. (Eng.), Prof., Corresponding Member, Russian Academy of Sciences, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Russian Federation
Petrukovich A.A., Dr. Sci. (Phys.–Math.), Prof., Corresponding Member, Russian Academy of Sciences, Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
Povalyayev A.A., Dr. Sci. (Eng.), Prof., Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation
Pulinets S.A., Dr. Sci. (Phys.–Math.), Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation
Rainer Sandau, Dr. Sci. (Eng.), Adjunct Professor, International Academy of Astronautics, Berlin, Germany
Rimskaya O.N., Cand. Sci. (Econ.), Assoc. Prof., Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation
Strelnikov S.V., Dr. Sci. (Eng.), Joint Stock Company “Scientific Production Association Orion”, Krasnoznamensk, Russian Federation
Sychev A.P., Cand. Sci. (Eng.), Joint Stock Company “Research Institute of Precision Instruments”, Moscow, Russian Federation
Tislenko V.I., Dr. Sci. (Eng.), Prof., Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation
Tokarev A.S. (Executive Secretary), Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation
Tuzikov A.V., Dr. Sci. (Phys.–Math.), Prof., Correspondent Member of the National Academy of Sciences of Belarus, The State Scientific Institution “The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus”, Minsk, Republic of Belarus

The publication frequency is four issues per year.
The journal is included into the Russian Science Citation Index.
The journal is included into the List of peer-reviewed scientific publications approved by the Higher Attestation Commission (VAK RF).
The opinions expressed by authors of the papers do not necessarily those of the editors.
ISSN 2409-0239
DOI 10.30894/issn2409-0239.2020.7.1
The subscription number of the journal in the united catalogue “The Russian Press” is 94086.

Joint Stock Company “Russian Space Systems”,
ul. Aviamotornaya 53, Moscow, 111250 Russia
Tel. +7 (495) 673-96-29
www.spacedevice.ru
e-mail: journal@spacecorp.ru

© Joint Stock Company “Russian Space Systems”
© FIZMATLIT

Moscow
FIZMATLIT ®
2020

ISSN 2409-0239

ISSN 2409-0239

DOI 10.30894/issn2409-0239.2018.5.3

