

Научно-технический журнал

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Том 2. Выпуск 4. 2015

Том 2, Вып. 4, 2015

Аэрокосмические методы зондирования Земли, планет и других космических объектов. Геоэкология и космические системы поиска и спасания	
Космическая группировка прогнозного мониторинга как основа создания интегрированных систем предупреждения об угрозах стихийных бедствий Алексеев О.А., Разумова Н.В., Цадиковский Е.И., Линьков А.Д.	3
Практическая реализация методов радиометрической коррекции ИК-изображений, получаемых с использованием многоэлементных фотоприемников Андреев Р. В., Гектин Ю. М., Зайцев А. А., Смелянский М. Б.	9
Состояние и перспективы развития космических комплексов «Канопус-В» и «Метеор-М» Горбунов А.В., Ильина И.Ю., Саульский В.К.	14
Оценка возможности использования существующих объективов для проецирования видеоизображения на фоторегистрирующие приборы <i>Климов Д. И., Благодырев В. А.</i>	20
Многозональное сканирующее устройство малого разрешения МСУ-МР для космического информационного комплекса «Метеор-М». Принцип работы, эволюция, перспективы Акимов Н. П., Бадаев К. В., Гектин Ю. М., Рыжаков А. В., Смелянский М. Б., Фролов А. Г.	30
Адаптивная фильтрация изображений, искаженных турбулентной атмосферой Свиридов К. Н.	40
Радиотехника и космическая связь	
Расширение тактико-технических характеристик антенно-приемных комплексов на базе антенных установок типа ТНА Лемченко В. И., Катков Л. В., Корсин Р. Н., Кондрашов Ю. И., Киковский А. Н.	50
Повышение устойчивости радиолиний передачи информационно-управляющих сигналов к мешающим факторам Кириллов С. Н., Лукашин И. В., Полтавец Ю. И., Поляков А. В., Круглов С. А.	55
Проблемы синтеза адаптивных фильтров методами генетических алгоритмов с программной реализацией на языке C++ в ОС МСВС Ватитич В М. Лониов C A. Ефремов Ю.В. Сиренко А.Н.	59
Особенности процесса глубинного анизотропного травления кремния в технологии изготовления траншейных МОП-транзисторов <i>Ануров А. Е., Заботин Ю. М., Подгородецкий С. Г.</i>	66
Системный анализ, управление космическими аппаратами, обработка информации и системы телеметрии	
Методика повышения достоверности оценок показателей надежности системы обеспечения теплового режима космического аппарата при наземных испытаниях Белова В. В.	74
Технология приборостроения и производства ЭКБ	
Обеспечение качества переходных отверстий коммутационной платы с высокой плотностью проводящего рисунка Миронова Ж.А., Карягина Д.Д., Владимиров Б.В., Павлов А.В.	87
Условия и критерии применения микросхем и полупроводниковых приборов индустриального уровня качества в космическом приборостроении	0.0
пуров Ю. Л.	92

_

Vol. 2, Iss. 4, 2015

_

Aerospace Sensing of the Earth, Planets and Other Celestial Objects. Geoecology and Space Systems for Search and Rescue	
Space Forecast's Monitoring Constellation as a Basis for Integrated Natural Disasters Warning Systems Creation Alexeev O.A., Razumova N. V., Tsadikovsky E. I., Linkov A. D.	3
Practical Implementation of Methods of Radiometric Correction of IR Images Produced Using Multi-Element Photodetector	
Andreev R. V., Gektin Y. M., Zaytsev A. A., Smeliansky M. B.	9
State and perspectives of space complexes "Kanopus-V" and "Meteor-M" development Gorbunov A. V., Ilina I. Yu., Saulsky V.K.	14
Estimation of Possibility of Use of Objectives at Video Image Displaying on Photo Registering Devices <i>Klimov D. I., Blagodyryov V. A.</i>	20
Multiband scanner of low spatial resolution MSU-MR for space-based informational system "Meteor-M". The principle of operation and development prospects Akimov N. P., Badaev K. V., Gektin Yu. M., Ryzhakov A. V., Smeljansky M. B., Frolov A. G.	30
Adaptive Filtration of the Images, Distorted by Turbulent Atmosphere Sviridov K. N.	40
Radiotechnics and Satellite Communications	
Improving Of Tactical-Technical Characteristics of the Antenna-Receiving Complexes based on TTA antennas set Demchenko V. I., Katkov D. V., Korsun R. N., Kondrashov Yu. I., Kukovskiy A. N.	50
Improving of the Command Data Radio Link Stability to Interfering Factors Kirillov S. N., Lukashin I. V., Poltavec Yu. I., Polyakov A. V., Kruglov S. A.	55
Problems of Synthesis of Adaptive Filter Techniques of Genetic Algorithms to Software in C++ OS MSVS Vatutin V. M., Dontsov S. A., Efremov Yu. V., Sirenko A. N.	59
Specifics of Silicon Deep Anisotropic Etching in Trench MOSFET Manufacturing Technology Anurov A. E., Zabotin Yu. M., Podgorodetsky S. G.	66
System Analysis, Spacecraft, Information Processing and Telemetry Systems	
Methodology for Improving the Reliability of Parameters Estimates of Spacecraft Thermal Control System during Ground Tests	74
Instrumentation Technology and Production FCB	14
Quality Assurance of via Holes in the Wiring Board with High Density Conductive Pattern Mironova Z. A., Kariagina D. D., Vladimirov B. V., Pavlov A. V.	87
Application Condition and Criteria of Foreign Microcircuits and Semiconductors Industrial Quality Levels in Plastic Packages in Space Instrument-Making (Space Devises)	0.0
NUTOV YU. L.	92

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ 2015, том 2, выпуск 4, с. 3–8

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

УДК 550.3

Космическая группировка прогнозного мониторинга как основа создания интегрированных систем предупреждения об угрозах стихийных бедствий

О. А. Алексеев¹, Н. В. Разумова², Е. И. Цадиковский, А. Д. Линьков

¹д.т.н., проф., ²к. г.н., АО «Российские космические системы»

e-mail: igmass@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены научно-методические и технико-экономические аспекты создания космической группировки прогнозного мониторинга чрезвычайных ситуаций природного и техногенного происхождения, в которой интегрируются информационные ресурсы развивающихся средств наблюдений широкого спектра действий и специализированных средств.

Ключевые слова: космическая группировка прогнозного мониторинга, чрезвычайные ситуации природного и техногенного происхождения

Space Forecast's Monitoring Constellation as a Basis for Integrated Natural Disasters Warning Systems Creation

O. A. Alexeev¹, N. V. Razumova², E. I. Tsadikovsky, A. D. Linkov

¹doctor of engineering science, professor, ²candidate of geographical science Joint Stock Company "Russian Space Systems"

e-mail: igmass@mail.ru

Abstract. In the paper presented both methodological and technical-economic aspects of creation space constellation for forecast's monitoring of natural and manmade emergencies, which integrates informational resources of developing wide range space observation facilities and specialized infrastructure.

Key words: space constellation for forecast's monitoring, natural and man-caused emergencies

Введение

Важным фактором снижения отрицательного влияния чрезвычайных ситуаций (ЧС) природного и техногенного характера на здоровье людей и окружающую среду является своевременное и точное прогнозирование этих ситуаций.

Возникновению ЧС природного и техногенного характера предшествуют определенные процессы, происходящие в земной коре, на поверхности, в атмосфере (ионосфере) Земли, околоземном космическом пространстве, на критически важных технических объектах, — предвестники ЧС.

Параметры предвестников ЧС природного и техногенного характера доступны наблюдению различными средствами наземного, воздушного и космического базирования. Состав и характеристики средств определяют полноту, своевременность и точность наблюдения параметров предвестников ЧС.

Особая роль в наблюдении предвестников ЧС принадлежит космическим системам. Производительность отдельного космического средства при высоте круговой орбиты 400-900 км (отношение площади наблюдаемой поверхности Земли на заданном временном интервале к площади элемента разрешения) приблизительно в тридцать раз выше производительности воздушного средства с аналогичными характеристиками и режимами работы целевой аппаратуры. Для тех же условий наблюдаемая космическим средством площадь поверхности Земли на четыре-пять порядков превосходит площадь поверхности, наблюдаемую воздушным средством. Поэтому космическая группировка прогнозного мониторинга (КГПМ) является основным элементом при решении задач глобального и оперативного мониторинга ЧС.

Следует отметить, что разрешающая способность при наблюдении воздушного средства (без учета турбулентности атмосферы Земли) на один– два порядка выше, чем при наблюдении космического средства, при одинаковых характеристиках целевой аппаратуры. Наземные средства способны наблюдать предвестники ЧС, не доступные космическим и воздушным средствам.

Вместе с тем повышение эффективности предупреждения об угрозах стихийных бедствий (сильные землетрясения, лесные пожары и наводнения) и техногенных катастроф возможно только на пути рационального интегрирования информационных ресурсов средств различного базирования для наблюдения предвестников ЧС при определяющей роли космической группировки прогнозного мониторинга (КГПМ).

В статье рассматриваются научно-методические и технико-экономические аспекты создания КГПМ.

Научно-методические аспекты создания КГПМ

Методология разработки КГПМ представляется в виде системы подходов, принципов, методов, правил и норм, обеспечивающих определение внешних и внутренних характеристик КГПМ в соответствии с выбранными критериями.

К внешним характеристикам КГПМ относятся цели КГПМ — $\mathcal{U} = (u_i), i \in \overline{1, m_u}$, решаемые ею задачи — $\mathcal{J} = (\mathfrak{z}_i), i \in \overline{1, m_\mathfrak{z}}$, и показатели эффективности решения задач КГПМ — $\mathcal{P}_{\mathrm{KF}} = (\mathfrak{z}_{\mathrm{KF}i}), i \in \overline{1, m_\mathfrak{gKF}}$.

К внутренним характеристикам КГПМ относятся ее состав и структура $-S = (s_i), i \in \overline{1, m_s},$ параметры $-P = (p_i), i \in \overline{1, m_p},$ и состояния $-X = (x_i), i \in \overline{1, m_x}.$

Обозначим внешние и внутренние характеристики КГПМ кортежами $D_{\text{внеш}} = \langle \mathcal{U}, \mathcal{3}, \mathcal{3} \rangle, D_{\text{внутр}} = \langle S, P, X \rangle.$

Выбор внутренних характеристик КГПМ для определенных границ значений показателей ее эффективности производится в соответствии с заданными правилами сравнения вариантов КГПМ — критериями эффективности решения задач КГПМ — $K_d = (\kappa_{dj}(\mathcal{B}_{\mathrm{KF}})), \ j \in \overline{1, n_{kd}},$

$$K_d: D_{\text{внеш}} \to D_{\text{внутр}}.$$
 (1)

Исходные данные для решения задачи (1) формируются, опираясь на требуемые значения показателей эффективности прогнозов ЧС – $\mathcal{P}_{\text{птр}} = (d_{\text{пітр}}), i \in \overline{1, m_{\text{эп}}}$, в результате информационного преобразования

$$\mathcal{B}_{\text{птр}} \to D_{\text{внеш}},$$
 (2)



Рисунок. Методологическая схема разработки КГПМ

отражающего решение обратной по отношению к прямой задачи: оценку показателей эффективности прогнозов ЧС природного и техногенного происхождения $\widetilde{\partial}_n = (\widetilde{\partial}_{\pi i}), i \in \overline{1, m_{\mathfrak{II}}},$ при известных внутренних характеристиках КГПМ.

Решение прямой задачи отражает информационное преобразование

$$D_{\rm BHyTp} \to \widetilde{\mathcal{P}}_{\rm m}.$$
 (3)

Сущность методологии разработки КГПМ состоит в итерационном подходе, заключающемся (в рамках отдельной итерации) в синтезе структуры и оптимизации параметров КГПМ по заданным показателям эффективности прогнозов ЧС природного и техногенного происхождения, с последующим уточнением получаемых значений показателей эффективности прогнозов для выбранного варианта КГПМ в ходе его анализа. Условием окончания итерационного процесса является достижение заданной близости $\| \widehat{\mathcal{A}}_{\Pi} - \mathcal{A}_{\Pi TD} \|$ оценок показателей эффективности прогнозов для выбранного варианта КГПМ требуемым значениям при выполнении ограничений по времени, организационнотехническим и финансовым ресурсам решения задачи (рис. 1), где $\|\cdot\|$ — определенная норма разности $\partial_{\Pi} - \partial_{\Pi TD}$.

Решения обратной (2) и прямой (3) задач в рамках методологической схемы выбора проектного облика КГПМ сводятся к решению следующих частных (обратных и прямых) задач.

Частные обратные задачи:

а) выбор состава и определение граничных значений параметров ЧС — $\Pi = (n_i), i \in \overline{1, m_n}$, выбор состава и определение требуемых значений показателей эффективности прогнозов ЧС — $\mathcal{P}_{\text{птр}}(\widetilde{\Pi} - \Pi)$, где $\widetilde{\Pi}$ — оценки параметров ЧС (прогнозы чрезвычайных ситуаций);

б) выбор состава и определение граничных значений параметров предвестников ЧС — $B = (e_i), i \in \overline{1, m_s}$, выбор состава и определение требуемых значений показателей эффективности наблюдения предвестников ЧС $\mathcal{P}_{\text{втр}}(\widetilde{B}-B), (\widetilde{B}$ — оценки параметров предвестников ЧС), обеспечивающих требуемые значения показателей эффективности прогнозов ЧС $\mathcal{P}_{\text{птр}}$;

в) формирование целей \mathcal{U} , задач $\mathcal{3}$, выбор состава и определение требований к показателям эффективности решения задач КГПМ $\mathcal{P}_{\text{кгтр}}$, обеспечивающих требуемые значения показателей эффективности наблюдения предвестников ЧС $\mathcal{P}_{\text{втр}}$, формирование критериев эффективности КГПМ K_d ;

г) синтез структуры S и оптимизация параметров P КГПМ, обеспечивающих требуемые значения показателей эффективности решения задач КГПМ $\mathcal{P}_{\text{кгтр}}$, с использованием критериев K_d .

Частные прямые задачи:

а) оценивание показателей эффективности решения задач КГПМ $\widetilde{\mathcal{B}}_{\mathrm{Kr}}^{(j)}$, $j \in \overline{1, m_{\mathrm{вар}}}$, по выбранному варианту структуры $S^{(j)}$ и рассчитанным значениям параметров $P^{(j)}$ КГПМ в результате решения частной обратной задачи (г);

б) оценивание показателей эффективности наблюдения предвестников ЧС $\widetilde{\mathcal{J}}_{_{\rm B}}^{(j)}$, соответствующих показателям эффективности $\widetilde{\mathcal{J}}_{_{\rm K\Gamma}}^{(j)}$ (для *j*-го варианта КГПМ), полученным в ходе решения частной обратной задачи (в);

в) оценивание показателей эффективности прогнозов ЧС $\widetilde{\mathcal{B}}_{\pi}^{(j)}$, соответствующих показателям эффективности $\widetilde{\mathcal{B}}_{B}^{(j)}$ (для *j*-го варианта КГПМ), полученным в ходе решения частной обратной задачи (б);

г) сравнение оценок показателей эффективности прогнозов ЧС $\widetilde{\mathcal{P}}_{\Pi}^{(j)}$ с требуемыми значениями $\mathcal{P}_{\Pi T p}$ в соответствии с нормой $\|\widetilde{\mathcal{P}}_{\Pi} - \mathcal{P}_{\Pi T p}\|$ и принятие решения о соответствии *j*-го варианта КГПМ требованиям по прогнозированию ЧС.

Исходя из перечисленных частных задач информационные преобразования (2) и (1), а также информационное преобразование (3) представим в следующем развернутом виде:

$$\mathcal{\mathcal{B}}_{\mathrm{ntp}} \to \mathcal{\mathcal{B}}_{\mathrm{btp}} \to \mathcal{\mathcal{B}}_{\mathrm{krtp}} \to \langle S, P \rangle; \tag{4}$$

$$\langle S, P \rangle \to \widetilde{\mathcal{P}}_{_{\mathrm{K}\Gamma}} \to \widetilde{\mathcal{P}}_{_{\mathrm{B}}} \to \widetilde{\mathcal{P}}_{_{\mathrm{I}}}.$$
 (5)

Основу информационных преобразований $\langle S, P \rangle \to \widetilde{\mathcal{P}}_{\kappa\Gamma}, \mathcal{P}_{\kappa\GammaTP} \to \langle S, P \rangle$ составляет модель КГПМ. В основе информационных преобразований $\widetilde{\mathcal{P}}_{\kappa\Gamma} \to \widetilde{\mathcal{P}}_{B}, \mathcal{P}_{BTP} \to \mathcal{P}_{\kappa\GammaTP}$ лежат модели измерений и оценивания параметров предвестников ЧС средствами КГПМ. Для получения информационных преобразований $\widetilde{\mathcal{P}}_{B} \to \widetilde{\mathcal{P}}_{\Pi}, \mathcal{P}_{\PiTP} \to \mathcal{P}_{BTP}$ необходимы модели процессов, описывающих возникновение ЧС. В частности, для землетрясений весьма продуктивна имеющая междисциплинарный характер, развивающаяся и достигшая относительно недавно определенного уровня полноты комплексная модель взаимосвязей геоэффективных явлений в литосфере, атмосфере и ионосфере Земли [1].

Технико-экономические аспекты создания КГПМ

Задача выбора проектного облика КГПМ (информационные преобразования $\langle S, P \rangle \to \widetilde{\mathcal{P}}_{\kappa\Gamma}, \mathcal{P}_{\kappa\Gamma}, \mathcal{P}_{\kappa\Gamma} \to \langle S, P \rangle$) представляет собой совокупность четырех видов задач, обусловленных четырьмя видами прогнозируемых с использованием КГПМ чрезвычайных ситуаций: сильные землетрясения, наводнения, лесные пожары и ЧС техногенного происхождения.

Результаты решения задач выбора проектного облика КГПМ по каждому из четырех видов ЧС интегрируются для получения общего результата.

Решение частных задач определения и оценки внутренних характеристик КГПМ предполагает решение и интегрирование результатов решений таких составных частей этих задач, как определение и оценка орбитальной и наземной составляющих КГПМ, включая:

 – распределение задач КГПМ между ее орбитальной и наземной составляющими;

 выбор состава КА группировки, распределение задач по каждому из четырех видов ЧС по КА;

- синтез орбитальной структуры КГПМ [2];

 выбор состава и определение характеристик бортовой целевой аппаратуры КА группировки (аппаратура мониторинга и передачи данных) и бортовой служебной аппаратуры с учетом характеристик платформ КА;

 – распределение бортовой целевой аппаратуры по КА группировки;

 выбор состава и характеристик наземного комплекса приема, обработки и распространения (НКПОР) данных космического прогнозного мониторинга и наземного комплекса управления (НКУ) орбитальной группировкой КА;

– интеграцию информационных ресурсов орбитальных и наземных средств КГПМ при решении четырех видов задач прогнозного мониторинга.

Выбор проектного облика КГПМ должен учитывать следующее.

На КА орбитальной составляющей КГПМ предполагается размещать разнообразные типы целевой мониторинговой аппаратуры, предназначенной для сбора многочисленных информационных параметров. В частности, для решения только задачи краткосрочного сейсмопрогнозирования необходимо обеспечить комплексное использование целого ряда геофизических инструментов [1]:

 для измерения вертикального профиля концентрации электронного компонента ионосферы и его неоднородностей;

 – для определения состава и измерения интенсивности потоков радиации различного происхождения;

 для измерения вариаций электрических и магнитных полей;

– для измерения параметров электромагнитных излучений (особенно в диапазонах УНЧ, ОНЧ и КНЧ).

Кроме того, целесообразно фиксировать свечения верхней атмосферы, аномальные повышения температуры подстилающей поверхности сейсмоопасных районов, концентрации радона и некоторых специфических металлизированных аэрозолей в нижней атмосфере, наблюдать выстраивание цепочек облаков вдоль известных разломов земной коры.

Для прогнозного мониторинга природных (лесных) пожаров и речных наводнений потребуются различные виды съемочной аппаратуры (оптикоэлектронной, радиометрической, микроволновой, радиолокационной, лидарной).

Контрольный мониторинг критически важных и потенциально опасных технических объектов для прогнозирования ЧС техногенного характера возможно обеспечить путем размещения на КА КГПМ радиотехнической аппаратуры, предназначенной для сбора (по радиоканалам) данных, поступающих с наземных датчиков, расположенных на этих объектах. Полученная таким образом контрольная информация оперативно передается на наземные информационно-аналитические центры заинтересованных ведомств.

Столь разнообразный и разнотипный состав бортовых целевых приборов затруднительно разместить на одном КА. Следовательно, в состав орбитальной составляющей КГПМ должен войти ряд КА, объединяемых в несколько отдельных орбитальных группировок (КА-кластеров). При этом каждая из таких группировок (хотя и в различной степени) может привлекаться к решению всех четырех прогнозно-контрольных задач КГПМ. Например, относительно маломассогабаритную аппаратуру сбора данных от сети измерительных средств критически важных технических объектов возможно разместить на большинстве КА КГПМ.

Ориентировочно число КА N в орбитальной группировке для заданных значений высот круговых орбит h с наклонением i, угла обзора α , нижнего значения широты наблюдаемой области поверхности Земли $\phi_{\rm H}$ и периодичности обзора $T_{\rm oб3}$ определим следующим образом:

$$\begin{split} N &= \int (4\pi^2 R_{\rm 3} \cos \phi_{\rm H} \times \\ &\times \sin i \sqrt{(R_{\rm 3} + h)^3/\mu})/2h T_{\rm obs} \, {\rm tg}(\alpha/2) \Big[, \quad (6) \end{split}$$

где R_3 и μ — радиус сферической модели Земли и ее геоцентрическая гравитационная постоянная;

]. [— операция округления вверх до целого числа.

Определение параметров ряда предвестников ЧС, например, предвестников землетрясений в виде различных тепловых аномалий, приемлемо при периодичности обзора $T_{\rm of3} = 6$ ч. Тогда с учетом (6) наблюдение этих процессов на восходящей ветви орбиты начиная с широты $\phi_{\rm H} = 41^{\circ}$ при угле обзора $\alpha = 60^{\circ}$ потребует от 17 до 9 КА на солнечно-синхронных орбитах с высотами 400–900 км. Уменьшение периодичности обзора до одного часа потребует для решения той же задачи от 100 до 50 КА. Наблюдения на восходящей и нисходящей ветвях орбиты позволяют уменьшить число КА в два раза.

Периодичность обзора $T_{\rm oб3} = 1$ ч и меньше необходима для наблюдения предвестников землетрясений в виде вариаций полного электронного содержания ионосферы над эпицентрами землетрясений. Один из основных методов оперативного построения зависимости плотности электронной концентрации в ионосфере от пространственных координат и времени состоит в ее радиозондировании с использованием космических средств. Применение только низкоорбитальных КА для решения этой задачи может привести к не приемлемому по экономическим соображениям числу КА. В этом случае целесообразно комбинированное использование низкоорбитальных и наземных средств КГПМ, а также привлечение систем ГЛОНАСС и GPS. Таким образом, орбитальный сегмент КГПМ должен состоять из КА следующих типов:

 перспективных специализированных КА для решения отдельных задач прогнозирования ЧС, например, мониторинга ионосферы с целью формирования краткосрочных прогнозов землетрясений;

 существующих и разрабатываемых КА гидрометеорологического и природно-ресурсного назначения, привлекаемых функционально для решения широкого круга задач прогнозирования ЧС.

Выбор видов космических платформ необходимо производить с учетом усиливающейся тенденции использования малых и сверхмалых КА для решения задач прогнозного мониторинга, а также нелинейного характера увеличения стоимости разработки КА при увеличении его массовогабаритных характеристик.

Наземный сегмент КГПМ в части НКПОР целесообразно разрабатывать на трех иерархических уровнях:

 верхний уровень — федеральный центр прогнозного мониторинга в структуре центрального аппарата Роскосмоса с функцией координации деятельности центров нижних уровней и ведения главного каталога продукции и услуг прогнозного мониторинга;

 средний уровень — региональные центры прогнозного мониторинга, категорированные либо по территориально-административному критерию (с учетом степени риска ЧС природного и техногенного характера), либо исходя из отдельных задач прогнозного мониторинга;

 нижний уровень — пользовательские центры прогнозного мониторинга, обеспечивающие обслуживание ведомственных (МЧС, РАН, Минприроды и др.) и коммерческих категорий потребителей продуктов (сервисов) прогнозного мониторинга.

Окупаемость создания КГПМ с учетом дисконтирования может быть поэтапно обеспечена на основе гибкой инвестиционной политики, а также путем рационального использования технологического задела в области прогнозного мониторинга [3].

Заключение

Создание перспективной космической группировки прогнозного мониторинга (КГПМ) чрезвы-

чайных ситуаций (ЧС) природного и техногенного происхождения как основы создания интегрированных систем предупреждения об угрозах стихийных бедствий состоит в комплексном решении широкого круга научно-методических, техникоэкономических и других задач междисциплинарного характера. Конечной целью решения этих задач является выбор и реализация таких состава, структуры и параметров КГПМ, которые обеспечивают требуемые значения полноты, точности, достоверности и своевременности прогнозирования ЧС при фиксированных затратах на создание КГПМ.

Научно-методическая составляющая разработки КГПМ определяется установлением связей между характеристиками КГПМ и показателями эффективности прогнозирования ЧС.

Технико-экономическая составляющая разработки КГПМ основывается на установлении связей между ее внутренними и внешними характеристиками.

Перспективный орбитальный сегмент КГПМ представляется в виде кластеров специализированных КА для решения частных задач мониторинга отдельных предвестников ЧС и функционально привлекаемых группировок КА широкого назначения для решения большинства задач прогнозирования ЧС природного и техногенного характера.

Разработку наземного сегмента КГПМ в части НКПОР целесообразно вести на трех иерархических уровнях: федеральном, региональном и местном.

Список литературы

- 1. Пулинец С.А., Узунов Д.П., Давиденко Д.В. и др. Прогноз землетрясений возможен?! Под ред. С.А.Пулинца. М.: Тровант, 2014. 144 с.
- Меньшиков В.А., Перминов А.Н., Рембеза А.И., Урличич Ю.М. Основы анализа и проектирования космических систем мониторинга и прогнозирования природных и техногенных катастроф. М.: Машиностроение, 2014. 736 с.
- Жодзишский А.И., Разумов В.В., Дудкин С.А. и др. Перспективы создания пилотной версии проекта «Международная аэрокосмическая система глобального мониторинга» в России. Под ред. О.А.Алексеева. М.: Тровант, 2014. 200 с.

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ 2015, том 2, выпуск 4, с. 9–13

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

УДК 528.851

Практическая реализация методов радиометрической коррекции ИК-изображений, получаемых с использованием многоэлементных фотоприемников

Р.В. Андреев, Ю.М. Гектин¹, А.А. Зайцев, М.Б. Смелянский

¹к. т. н.

АО «Российские космические системы»

e-mail: andreev-k@list.ru, petrov_sv@spacecorp.ru

Аннотация. В работе описан метод радиометрической коррекции изображений, получаемых при помощи многоэлементных фотоприемников. Метод основан на использовании сигналов от элементов фотоприемника, находящихся вне поля зрения объектива. В работе рассмотрены способы практической реализации предложенного метода.

Ключевые слова: многоэлементный фотоприемник, аддитивная помеха, цифровое изображение, радиометрическая коррекция, «слепые» элементы

Practical Implementation of Methods of Radiometric Correction of IR Images Produced Using Multi-Element Photodetector

R. V. Andreev, Yu. M. Gektin¹, A. A. Zaytsev, M. B. Smeliansky

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

e-mail: andreev-k@list.ru, petrov_sv@spacecorp.ru

Abstract. The method of radiometric correction of images produced using multi-element photodetector is described in the paper. The method is based on the usege of signals from the elements located outside the field of view of the lens. The ways of practical implementation of the proposed method are considered.

Key words: multi-element photodetector, additive interference, digital image, radiometric correction, blind elements

Введение

Видеоинформация, получаемая при помощи аппаратуры ДЗЗ, достаточно часто содержит шумы и помехи различной природы. Высокие требования, предъявляемые к качеству этой видеоинформации, требуют разработки специальных методов коррекции негативных процессов. Стандартные методы фильтрации помех и шумов не всегда обеспечивают требуемые результаты. Поэтому при наземной обработке информации необходимо учитывать специфику конкретной аппаратуры.

В последнее время в аппаратуре ДЗЗ все чаще используются многоэлементные фотоприемные устройства. Для таких фотоприемников характерны протяженные импульсные помехи [2]. Пример таких помех приведен на рис. 1. Применение специальных методов их устранения может оказаться значительно эффективнее стандартной фильтрации.

В настоящее время на стадии комплексных предполетных испытаний находится аппаратура МСУ-ГС второго поколения [3], предназначенная для оперативного получения изображения облачности и подстилающей поверхности Земли. Для формирования изображений в ИК-каналах аппаратуры используются многоэлементные фотоприемные устройства. Ввиду особенностей алгоритма формирования выходного сигнала необходимо создание специальных методов радиометрической коррекции изображений, получаемых при помощи аппаратуры МСУ-ГС.

Формирование выходного сигнала в тепловых каналах аппаратуры МСУ-ГС № 2

В процессе работы аппаратуры формируются изображения в 3 видимых и 7 инфракрасных каналах. В ИК-каналах для формирования изображения используются многоэлементные фотоприемники форматом 144 × 8 элементов (8 линейных фотоприемных устройств, далее — ЛФПУ, по 144 элемента в каждом).

В целях сокращения объема передаваемой информации отсчеты от разных ЛФПУ одного фотоприемника объединяются между собой блоком обработки сигналов [1]. Протяженные импульсные помехи от разных ЛФПУ накладываются друг на друга (рис. 2), что значительно усложняет их фильтрацию. Кроме того, в тепловых каналах данной аппаратуры имеет место дрейф темновой составляющей сигнала фотоприемников. Величина этого дрейфа имеет сложную зависимость от многих факторов (температуры фотоприемника, времени с момента начала сеанса, времени с момента начала кадра и других, еще недостаточно исследованных), что значительно усложняет его коррекцию.

Использование элементов фотоприемника, находящихся вне поля зрения объектива, для коррекции выходного сигнала

Особенностью оптической схемы ИК-каналов аппаратуры МСУ-ГС №2 является уменьшенное (несколько меньше размеров фотоприемника) световое поле, формируемое объективом в фокальной плоскости. Таким образом, на фотоприемнике присутствуют элементы, на которые не попадает излучение от объекта съемки (далее — «слепые» элементы). Сигнал от таких элементов можно использовать в качестве опорного и с его помощью корректировать изображение.

Обозначим сигнал от элемента фотоприемника как $U_{m,L}$, где L — номер ЛФПУ, m — номер элемента. Тогда $U_{m,L} = U'_{m,L} + \delta_{m,L}$, где $U'_{m,L}$ сигнал от объекта съемки, а $\delta_{m,L}$ — помеха.

Каждый отсчет проходит процедуру двухточечной коррекции:

$$\begin{split} U_{m,L}^{\text{hopm}} &= \frac{U_{m,L} - U_{m,L}^{\text{xom}}}{U_{m,L}^{\text{rop}} - U_{m,L}^{\text{xom}}} \times A + C = \\ &= (U_{m,L} - U_{m,L}^{\text{xom}}) \times K_{m,L} + C, \end{split}$$

где $U_{m,L}^{\text{норм}}$ — нормализованный сигнал, $U_{m,L}^{\text{хол}}$ — сигнал от холодного источника излучения (космос), $U_{m,L}^{\text{гор}}$ — сигнал от горячего источника излучения (термостатированная заслонка), A — масштабный коэффициент, C — уровень «холодного» в нормализованном выходном сигнале, $K_{m,L}$ — коэффициент



Рис. 1. Фрагмент одного из сканов ИК-канала аппаратуры МСУ-ГС № 1. На фрагменте присутствуют вертикальные полосы, представляющие собой протяженные импульсные помехи



Рис. 2. Фрагмент одного из сканов ИК-канала аппаратуры МСУ-ГС № 2. Снимок получен во время съемки «фона» при наземных испытаниях. Протяженные импульсные помехи от различных ЛФПУ одного фотоприемника накладываются друг на друга при формировании выходного сигнала

нормализации. Таким образом,

$$\begin{split} U_{m,L}^{\text{hopm}} &= (U_{m,L} + \delta_{m,L} - U_{m,L}^{\text{xom}}) \times K_{m,L} + C = \\ &= U_{m,L}'^{\text{hopm}} + \delta_{m,L} \times K_{m,L}. \end{split}$$

Затем нормализованные отсчеты от 8 ЛФПУ объединяются между собой в блоке обработки сигналов. Обозначим процедуру объединения отсчетов оператором \hat{F} . На выходе данной процедуры информация будет представлена в виде отсчетов от одного виртуального ЛФПУ:

$$U_i^{\mathrm{bmx}} = \widehat{F}(U_{m,L}^{\mathrm{hopm}}).$$

Процедура объединения отсчетов представляет собой суммирование нормализованных отсчетов, умноженных на заранее известные коэффициенты интерполяции. Следовательно, оператор \hat{F} аддитивен и выходной сигнал можно представить в виде

$$\begin{split} U_i^{\text{bbix}} &= \widehat{F}(U_{m,L}^{\prime\,\text{hopm}} + \delta_{m,L} \times K_{m,L}) = \\ &= \widehat{F}(U_{m,L}^{\prime\,\text{hopm}}) + \widehat{F}(\delta_{m,L} \times K_{m,L}). \end{split}$$

В случае импульсной помехи или дрейфа сигнала величина помехи δ зависит только от номера ЛФПУ и не зависит от номера элемента ($\delta_{m,L} = \delta_L$). Поскольку на «слепые» элементы излучение от поверхности не попадает, изменение значения сигнала от этих элементов может быть вызвано только помехами или дрейфом. Обозначим изменение сигнала для «слепых» элементов по сравнению с его значением в начале кадра как δ_L^{blind} . Если считать, что величина $\delta_{m,L}$ включает в себя только дрейф и импульсные помехи, то $\delta_{m,L} = \delta_L^{\text{blind}}$ и процедура коррекции выходного сигнала выглядит следующим образом:

$$\begin{split} U_i^{\text{kop}} &= U_i^{\text{bbix}} - \widehat{F}(\delta_L^{\text{blind}} \times K_{m,L}) = \widehat{F}(U_{m,L}'^{\text{hopm}}) + \\ &+ \widehat{F}(\delta_{m,L} \times K_{m,L}) - \widehat{F}(\delta_L^{\text{blind}} \times K_{m,L}) = \widehat{F}(U_{m,L}'^{\text{hopm}}) + \\ &+ \widehat{F}((\delta_{m,L} - \delta_L^{\text{blind}}) \times K_{m,L}) = \widehat{F}(U_{m,L}'^{\text{hopm}}), \end{split}$$

где $U_i^{\text{кор}}$ — значение скорректированного сигнала. Скорректированный сигнал не содержит в себе компонент, вызванных дрейфом или импульсными помехами.

Практическая реализация метода коррекции изображения

На практике такую радиометрическую коррекцию можно реализовать двумя способами: проводить ее на борту или при наземной обработке сигнала. Бортовая коррекция математически значительно проще наземной, так как выходной сигнал в этом случае корректируется уже на этапе нормализации. Однако это требует значительного усложнения алгоритма работы блока обработки сигнала. Поэтому для аппаратуры МСУ-ГС № 2 был выбран второй способ, т.е. радиометрическая коррекция при наземной обработке.

Для проведения процедуры наземной радиометрической коррекции предложенным в предыдущем разделе способом необходимо передавать величины поправок δ_L^{blind} . Так как эти величины зависят только от номера ЛФПУ и от времени, то для каждой строки выходного сигнала необходимо передать 8 значений соответствующих поправок. Поскольку выходной сигнал имеет разрядность 10 бит, а величина дрейфа и помехи может быть как положительной, так и отрицательной, то величины поправок вычисляются следующим образом:

$$\delta_{L,t}^{\text{blind}} = \sum_{\text{blind}} (U_{m,L}^{\text{xon}} - U_{m,L,t} + 512) / N_{\text{blind}},$$

где \sum_{blind} есть сумма по всем номерам m элементов ЛФПУ, которые считаются «слепым», N_{blind} — количество «слепых» элементов в выбранном ЛФПУ, а t — номер строки выходного сигнала (всего 3400 строк в одном скане).

Всего получается 8 значений поправок δ_L^{blind} для каждой строки видеоинформации. В аппаратуре МСУ-ГС № 2 эти поправки записываются в первые и последние 4 отсчета строки для каждого ИК-канала.

Процедура наземной обработки для выделенного пикселя видеоинформации выглядит следующим образом:

$$U_i^{\mathrm{KOP}} = U_i + \sum_{L=1}^8 \widehat{F}((\delta_L^{\mathrm{blind}} - 512) \times K_{m,L}),$$

где $K_{m,L}$ — коэффициент нормализации, рассчитываемый из передаваемых в телеметрии значений от горячего и холодного источников излучения.

Результаты применения алгоритма коррекции изображения

Следует отметить, что оценить результаты применения описанного выше алгоритма коррекции в полной мере можно только на стадии летно-конструкторских испытаний (т. е. уже после запуска аппарата на геостационарную орбиту). Отчасти поэтому был выбран способ его реализации через наземную, а не через бортовую коррекцию, так как при коррекции на борту видоизменить или отменить применение алгоритма было бы уже невозможно.

Применение алгоритма коррекции при наземных испытаниях показало приемлемые результаты как по фильтрации аддитивных помех, так и при компенсации дрейфа. На рис. 3 приведен фрагмент изображения, полученного при съемке «фона» одним из тепловых каналов аппаратуры МСУ-ГС № 2 при наземных испытаниях.

Как видно, на изображении присутствует мощная регулярная помеха. На рис. 4 приведен тот же фрагмент после радиометрической коррекции, использующей сигнал от «слепых» элементов.

В таблице приведены средние значения СКО по различным участкам обоих изображений. Фрагменты 10х70 пикселей выбирались на темных и светлых участках нескорректированного изображения. На скорректированном изображении выбирались те же фрагменты. Сравнение результатов показывает, что полосы, вызванные протяженными импульсными помехами, практически полностью отсутствуют. Уровень шума по небольшому однородному фрагменту при этом не изменяется.

Уровень фонового сигнала при данной съемки равнялся 25. Заниженное среднее значение на нескорректированном изображении вызвано дрейфом темновой составляющей сигнала. Из результатов видно, что предложенный алгоритм коррекции позволяет скомпенсировать дрейф с точностью до 1 уровня квантования сигнала.

Заключение

Предложенный алгоритм радиометрической коррекции изображений уже включен в программный комплекс наземной обработки видеоинформации аппаратуры МСУ-ГС № 2. Запуск аппарата ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДОВ РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ ИК-ИЗОБРАЖЕНИЙ 13



Рис. 3. Фрагмент одного из сканов ИК-канала аппаратуры МСУ-ГС №2. Снимок получен во время съемки фона при наземных испытаниях



Рис. 4. Тот же фрагмент после радиометрической коррекции

	Изображение до ко	ррекции	Изображение после коррекции		
	Среднее значение СКО (Среднее значение	СКО	
Фрагмент 10 × 70 пикселей, выбранный на темной полосе	25,03	1,66	24,75	1,69	
Фрагмент 10 × 70 пикселей, выбранный на яркой полосе	22,08	1,61	24,88	1,67	
По всему изображению	22,23	2,28	24,27	1,87	

Таблица. Сравнение изображений до и после коррекции

был запланирован на август 2015 г. Во время летноконструкторских испытаний была проведена более детальная оценка результатов применения алгоритма. В случае хороших результатов возможно применение алгоритма для бортовой коррекции видеоизображения в следующих поколениях аппаратуры.

Список литературы

1. Андреев Р.В. Разработка программного комплекса тестирования блока обработки сигналов геостацио-

нарной сканирующей аппаратуры тепловой области спектра. Дисс. ... магистра прикладных математики и физики. М., 2014. 53 с.

- 2. Бабышкин В. Е, Ерошкин В. Н., Яницкий А. А. Геостационарный гидрометеорологический комплекс второго поколения «Электро» // Космонавтика и ракетостроение, 2010, № 2(59), с. 46–53.
- 3. Гектин Ю.М., Еремеев В.В., Егошкин Н.А., Зенин В.А., Москатиньев И.В. Нормализация изображений от геостационарной космической системы наблюдения Земли // Цифровая обработка сигналов, 2011, № 3, с. 28–31.

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАШИОННЫЕ СИСТЕМЫ 2015, том 2, выпуск 4, с. 14-19

АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ, ПЛАНЕТ И ДРУГИХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ.

ГЕОЭКОЛОГИЯ И КОСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПОИСКА И СПАСАНИЯ

УДК 629.78

Состояние и перспективы развития космических комплексов «Канопус-В» и «Метеор-М»

А. В. Горбунов¹, И. Ю. Ильина, В. К. Саульский²

¹к. т. н., ²д. т. н. АО «Корпорация "ВНИИЭМ"» e-mail: ntk vnijem@bk.ru

Аннотация. АО «Корпорация "ВНИИЭМ"» развивает два основных направления создания космических комплексов (КК) дистанционного зондирования Земли: 1) КК оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций на базе спутников «Канопус-В» и 2) КК гидрометеорологического назначения на базе спутников «Метеор-М». Для обоих видов КК приведены составы решаемых задач, орбитальные характеристики, параметры бортовых комплексов аппаратуры, планируемые сроки запусков очередных спутников, направления дальнейших разработок перспективных космических аппаратов.

Ключевые слова: полезная нагрузка, космический комплекс, «Канопус-В», «Метеор-М», космическая платформа, орбита, панхроматический, многоспектральный

State and perspectives of space complexes "Kanopus-V" and "Meteor-M" development

A. V. Gorbunov¹, I. Yu. Ilina, V. K. Saulsky²

¹candidate of engineering science, ²doctor of engineering science JSC "VNIIEM Corporation"

e-mail: ntk.vniiem@bk.ru

Abstract. JSC "VNIIEM Corporation" creates and develops two main directions of space complexes (SC) for the Earth remote sensing: 1) SCs on the base of "Kanopus-V" satellites for anthropogenic and natural disaster monitoring, 2) hydro-meteorological SCs on the base of "Meteor-M" satellites. A lot of data including task compositions, orbital characteristics, on-board payload parameters, planning times to launch new satellites in their orbits, father trends for perspective space craft development are given for both of the above mentioned SCs.

Key words: payload, space complex, "Kanopus-V", "Meteor-M", space platform, orbit, panchromatic, multispectral

АО «Корпорация "ВНИИЭМ"» создает космические комплексы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) уже около полувека. В настоящее время на орбитах находятся два КА оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций (ЧС) «Канопус-В» и «Белорусский космический аппарат», запущенные 22 июля 2012 г., и два КА гидрометеорологического назначения «Метеор-М» №1 и «Метеор-М» №2, выведенные в космос соответственно 17 сентября 2009 г. и 8 июля 2014 г.

Спутник «Канопус-В » [1] функционирует на круговой солнечно-синхронной орбите с высотой около 510 км. Время пересечения восходящего узла орбиты — 11 час. 27 мин. Спутник имеет трехосную систему ориентации и стабилизации, обеспечивающую точность ориентации не хуже 5 угловых мин и точность стабилизации — не хуже 0,001 °/с. Масса спутника — 473,2 кг, в том числе масса полезной нагрузки — 108 кг. Срок активного существования не менее 5 лет.

Как отмечено выше, основное назначение этих спутников — анализ и прогноз техногенных и природных ЧС. Наряду с этим, информация от данных КА широко используется для следующих целей:

 обнаружения крупных выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду и решения других задач экологического мониторинга;

 выявления перспективных площадей на поиск полезных ископаемых;

– создания и обновления топографических карт;

 – составления кадастров и инвентаризации сельскохозяйственных угодий;

- контроля землепользования;

- слежения за застройкой территорий;

 наблюдения за водными ресурсами и прибрежными районами страны.

С целью решения указанных задач на борту КА «Канопус-В» установлена оптико-электронная съемочная аппаратура, обеспечивающая получение панхроматических изображений земной поверхности с пространственным разрешением 2,1 м в полосе захвата 23 км и многоспектральных снимков (в 4 спектральных каналах) с разрешением 10,5 м в полосе 20 км. За счет поворотов по углу крена реализуется возможность проведения наблюдений в широкой полосе обзора (свыше 900 км). Суточная производительность KA «Канопус-В» составляет 300 000–500 000 $\mbox{\ кm}^2.$

Приказом Федерального космического агентства № 27 от 23 декабря 2013 г. космический комплекс (КК) «Канопус-В» с КА «Канопус-В» № 1 принят в эксплуатацию после успешного окончания летных испытаний.

Космическая информация от данного комплекса эффективно использовалась для обнаружения и слежения за лесными пожарами на обширной территории Восточной и Центральной Сибири; мониторинга экстремального наводнения в бассейне реки Амур в 2013 г.; оперативной оценки ледовой обстановки и процессов ледохода на Лене и других крупных реках России; выявления биогенных загрязнений на акваториях Черного и других морей; слежения за развитием горного и прибрежного кластеров и экологической ситуацией в районе города Сочи в период возведения спортивных и других сооружений при подготовке к зимней олимпиаде 2014 г.; контроля выбросов загрязняющих веществ в районах крупных ТЭЦ (вблизи городов Омск, Сургут).

В рамках Международной Хартии по космосу и крупным катастрофам снимки с КА «Канопус-В» № 1 в 2014 г. использовались для мониторинга района предположительного крушения воздушного судна Boeing 777 компании Malaysian Airlines, проводилась съемка пострадавших от наводнения районов Великобритании, штата Парана (Бразилия), Сербии, а также для мониторинга лесных пожаров в восточном регионе Индии (окрестности г. Кохима).

Таким образом, КА «Канопус-В» № 1 удовлетворяет всем требованиям своего назначения и продолжает эффективно использоваться в интересах российских потребителей космических данных ДЗЗ.

С целью дальнейшего совершенствования спутников типа «Канопус-В» проводится разработка усовершенствованного КА «Канопус-В-ИК». На нем дополнительно к указанной выше полезной нагрузке будет установлена широкозахватная аппаратура для съемки в двух инфракрасных диапазонах: 3,5–4,1 мкм и 8,4–9,4 мкм с пространственным разрешением около 200 м в полосе захвата не менее 2000 км. Длительность выполнения съемок на одном витке орбиты может достигать

30 мин. Данный КА будет оперативно обнаруживать очаги лесных пожаров с размерами от 5 × 5 м.

Основными министерствами и ведомствамипотребителями космической информации от КА типа «Канопус-В», помимо Министерства чрезвычайных ситуаций, являются Росгидромет, Минприроды, Роснедра, Минсельхоз, Росреестр, а также Министерство регионального развития. Анализируя их запросы с точки зрения требуемой периодичности и оперативности обеспечения съемки территории нашей страны, можно сделать вывод о целесообразности формирования в ближайшем будущем достаточно крупной космической системы из 5-6 КА типа «Канопус-В». В связи с этим в рамках Федеральной космической программы России запланировано создание и наращивание соответствующей орбитальной группировки КА типа «Канопус-В» в ближайшие несколько лет. В частности, в 2017 и затем в 2018 гг. планируется осуществить парные запуски спутников «Канопус-В» №3 и №4, «Канопус-В» №5 и №6.

В перспективе с целью удешевления затрат на образование и последующее поддержание космической системы, состоящей из спутников типа «Канопус-В», предлагается осуществлять кластерные запуски очередной партии космических аппаратов в составе до 4 спутников одновременно на борту одной ракеты-носителя «Союз-2» этапа 1Б с разгонным блоком «Фрегат».

Унифицированная малая космическая платформа УМКП-400, созданная для КА «Канопус-В» [1,2], отличается высоким конструктивным совершенством. Впервые в практике создания в АО «Корпорация "ВНИИЭМ"» спутников среднего и малого классов она спроектирована в негерметичном исполнении. Корпус платформы изготавливается в виде прямоугольного параллелепипеда, облицованного сотовыми панелями. Он служит несущей силовой основой для закрепления внутри и на его поверхности всех бортовых служебных приборов и специального модуля полезной нагрузки. Одновременно он играет важную роль в поддержании требуемого теплового режима работы УМКП и КА в целом. Для этого на нем монтируются различные элементы и устройства терморегулирования, включая контурные и угловые тепловые трубы, радиаторы охлаждения, управляемые электронагреватели, маты экранно-вакуумной термоизоляции, датчики. На корпус наносятся специальные терморегулирующие покрытия с высокой устойчивостью к воздействию радиации. Термостабилизация сотовых панелей достигается за счет встраивания в них низкотемпературных тепловых труб.

В компоновочной схеме и конструкции космической платформы реализован ряд прогрессивных технических решений, направленных на минимизацию массогабаритных характеристик. В частности, к ним относятся модульное построение, высокий уровень плотности компоновки в результате ее оптимизации, объединение всей служебной электроники в едином моноблоке в виде стойки авионики, сокращение площади створок солнечной батареи за счет применения трехкаскадных фотопреобразователей на основе арсенида галлия с высоким коэффициентом полезного действия.

Впервые в отечественной практике в составе бортового комплекса управления (БКУ) применены аппаратно-программные средства, позволившие внедрить автоматическое управление режимами работы телекомандной системы (ТКС) и автоматизированное дистанционное управление наземными средствами командно-измерительных пунктов из ЦУП. Также впервые в ТКС используется международный S-радиодиапазон в интересах зарубежных заказчиков.

Разработаны и реализованы новые технические решения по повышению живучести космической платформы и КА на ее базе, включая специальное программное обеспечение для обнаружения и парирования нештатных ситуаций, аппаратуру регулирования заряда и распределения электропитания для защиты аккумуляторных батарей, нанесение защитных покрытий от статического электричества на фотопреобразователи солнечных батарей.

На концах солнечных панелей имеются магнитные виброгасители, обеспечившие значительное снижение амплитуды и длительности нежелательных колебаний, когда выполняются программные повороты космического аппарата по крену для наведения бортовой оптико-электронной аппаратуры на заданные объекты на земной поверхности.

Аппаратно-программные средства навигации обеспечивают высокую точность геопривязки космических снимков (с погрешностями 15–50 м без опорных точек). Этого достаточно для создания и обновления ортофотопланов и топографических карт масштаба 1:50 000 и крупнее.

Для поддержания заданных орбитальных параметров и фазового положения КА в орбитальной группировке на борту спутника имеется корректирующая двигательная установка на базе стационарных плазменных двигателей СПД-50.

Несмотря на то, что унифицированная малая космическая платформа УМКП-400 разработана для КА «Канопус-В», она обладает высокой универсальностью с точки зрения возможностей смены полезных нагрузок. На ее базе разрабатываются и проектируются новые и перспективные спутники не только для оперативного мониторинга техногенных и природных ЧС, но и для научно-исследовательских целей, а также детального наблюдения Земли. В частности, с космодрома «Восточный» планируется запустить КА научного назначения «Ломоносов». Это событие, помимо научной актуальности, примечательно тем, что КА «Ломоносов» призван стать первым автоматическим спутником, выведенным в космос с нового космодрома.

С максимальным использованием опыта и задела по рассматриваемой малой космической платформе УМКП-400 проектируются перспективные малогабаритные КА типа «Канопус-ВМ1» и «Канопус-ВМ2». Они будут обладать высокими информационными характеристиками, требуемыми для проведения детальной съемки Земли с повышенным пространственным разрешением и широкими полосами захвата.

На КА типа «Канопус-ВМ1» и «Канопус-ВМ2» будут установлены усовершенствованные бортовые оптико-электронные съемочные системы. Будет увеличен гарантийный срок активного существования до 7 лет. Повысится технический уровень КА в целом. Масса спутника может возрасти до 750–800 кг, а масса полезной нагрузки — до 330–350 кг. Рассматриваются новые возможности кластерного запуска космических аппаратов в космос. Исследуются вопросы повышения высоты орбит и варианты построения перспективных орбитальных группировок.

В частности, для КА «Канопус-ВМ1» рассматривается целесообразность повышения высоты солнечно-синхронной орбиты до 860 км. При этом планируется сохранить пространственное разрешение панхроматических снимков на уровне 2,1 м, достигаемом в настоящий момент для КА «Канопус-В» № 1 с высоты 510 км. Пространственное разрешение многоспектральных снимков, получаемых на КА «Канопус-ВМ1», должно улучшиться, несмотря на рост высоты орбиты, до 4,2 м. Ожидается, что удастся увеличить полосу захвата как при панхроматической, так и при многоспектральной съемке, до 100 км.

Для КА «Канопус-ВМ2» в настоящий момент предлагается использовать солнечно-синхронную орбиту с высотой около 500 км. В этом случае пространственное разрешение получаемых панхроматических изображений может быть обеспечено на уровне около 1 м, а многоспектральных — приблизительно 4 м. Ширина полосы захвата для обоих типов снимков — не менее 50 км.

Наряду со спутниками оперативного мониторинга техногенных и природных ЧС, важнейшим направлением деятельности АО «Корпорация "ВНИИЭМ"» является разработка и создание космических аппаратов гидрометеорологического назначения. В данной области АО «Корпорация "ВНИИЭМ"» продолжает многолетнюю работу по созданию и совершенствованию КА серии «Метеор» [2, 3, 4]. Недавно закончил свой пятилетний гарантийный срок существования КА «Метеор-М» № 1 [3], но ему на смену уже пришел КА «Метеор-М» № 2. Новый спутник успешно прошел период летных испытаний и принят в эксплуатацию в России. Он также входит в объединенный состав международной группировки полярно-орбитальных метеорологических спутников, функционирующих под эгидой Всемирной метеорологической организации (ВМО).

Спутник «Метеор-М» №2 функционирует на круговой солнечно-синхронной орбите с высотой около 820 км. Солнечное время пересечения экватора 9 ч 30 мин. Масса КА составляет 2930 кг. Масса полезной нагрузки — 1200 кг. Срок активного существования — 5 лет.

Основное назначение КА «Метеор-М» №2 — обеспечение глобального наблюдения поверхности Земли и атмосферы. Космическая информация от этого спутника применяется для следующих целей:

 – анализ погоды и ее предсказание в глобальном и региональном масштабах,

- мониторинг глобального изменения климата,

контроль состояния и прогноз характеристик морской воды,

 – анализ космической погоды и предсказание связанных с ней явлений (солнечный ветер, ионосферные исследования, магнитное поле Земли и т. д.).

На КА «Метеор-М» № 2 установлена полезная нагрузка, в которую входят следующие приборы:

 сканирующий радиометр MCУ-MP (6 спектральных каналов в видимой и инфракрасной областях спектра с пространственным разрешением около 1 км);

 шестиканальная съемочная система видимой области спектра КМСС (в составе 3 камер с пространственным разрешением 100 м и 50 м);

– радиолокатор бокового обзора (в Х-диапазоне) «Северянин»;

– микроволновый радиометр МТВЗА-ГЯ (26-канальный модуль температурно-влажностного зондирования атмосферы в области длин волн 10,6–183 ГГц);

 – фурье-спектрометр ИКФС-2 (инфракрасный (ИК) зондировщик атмосферы в спектральной области 5–15 мкм со спектральным разрешением около 0,5 см⁻¹);

 комплекс гелиогеофизических измерений ГГАК-М.

Все перечисленные приборы полностью функциональны, за исключением локатора «Северянин», эффективность использования которого ухудшена из-за низкого отношения сигнал/шум. Кроме того, завершается работа по абсолютной калибровке микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ.

Спутниковые данные от КА «Метеор-М» № 2 в настоящее время используются в Росгидромете, а также в МЧС, Минприроды и других федеральных и региональных учреждениях России.

Согласно Федеральной космической программе России и «Стратегии деятельности в области гидрометеорологии и смежных с ней областях на период до 2030 года (с учетом аспектов изменения климата)», перспективная полярно-орбитальная система российских спутников должна состоять из трех гидрометеорологических и одного океанографического спутника.

В связи с этим предполагается вывести на орбиту очередной метеоспутник «Метеор-М» № 2-1 в 2016 г. Далее планируются запуски еще четырех аналогичных КА: «Метеор-М» № 2-2, 2-3, 2-4, 2-5. Все они будут разработаны в АО «Корпорация "ВНИИЭМ"» и запущены в 2019–2021 гг. В результате должна быть создана система из идентичных спутников, функционирующих на утренних и дневных солнечно-синхронных орбитах.

На всех перечисленных спутниках полезные нагрузки будут аналогичны КА «Метеор-М» №2, но со следующими изменениями:

 на КА «Метеор-М» № 2-1 и 2-2 не будет радиолокатора «Северянин» и гелиогеофизического комплекса ГГАК-М;

2) на КА «Метеор-М» № 2-3, 2-4, 2-5 вместо радиолокатора «Северянин» и комплекса ГГАК-М появятся усовершенствованный радиолокатор «МетеоСар» и модифицированный гелиогеофизический комплекс ГГАК-М2.

В интересах океанографии продолжается разработка спутника «Метеор-М» № 3. Орбита спутника должна быть круговой солнечно-синхронной с высотой 652 км. Масса КА «Метеор-М» № 3 достигнет порядка 2000 кг, включая полезную нагрузку не менее 700 кг. Срок активного существования — 7 лет.

Полезная нагрузка КА «Метеор-М» № 3 включает следующие приборы:

– многорежимный радар Х-диапазона с активной фазированной решеткой (АФАР) с пространственным разрешением от 1 до 500 м в полосе захвата 10–750 км;

– скаттерометр Ки-диапазона с пространственным разрешением $25\times25~{\rm km}^2$ в полосе захвата 1800 км;

 сканер береговой зоны (4 канала в видимой области спектра, пространственное разрешение 80 м, полоса захвата 800 км);

 – сканер цветности океана (8 каналов в видимой области спектра, пространственное разрешение 1 км, полоса захвата 3000 км);

– прибор радиозатменного зондирования «Ра- диомет».

Запуск КА «Метеор-М» №3 намечен на 2020 г.

В дальнейшем планируется создание перспективных метеорологических КА «Метеор-МП» и океанографических КА «Океан».

Перспективная группировка метеорологических спутников «Метеор-МП» должна придти на смену системе из КА типа «Метеор-М». Запуск 1-го спутника «Метеор-МП» № 1 намечен на 2021 г., а 2-го КА «Метеор-МП» № 2 — на 2023 г.

Полезная нагрузка спутников типа «Метеор-МП» будет в основном аналогична бортовому научному комплексу спутников типа «Метеор-М», но с улучшенными характеристиками целевых приборов. В состав полезной нагрузки перспективных КА «Метеор-МП» планируется включить следующие научные инструменты:

многоканальный сканирующий радиометр с низким разрешением,

 – многоспектральный сканирующий имаджер видимого диапазона со средним разрешением,

- инфракрасный фурье-спектрометр,

 многоспектральный инфракрасный сканер среднего разрешения,

- спектрометр химического состава атмосферы,

 микроволновый имаджер-зондировщик (модуль температурно-влажностного зондирования атмосферы),

- радар бокового зондирования,
- прибор радиозатменного зондирования,

- гелиогеофизический комплекс.

Спутники типа «Метеор-МП» будут иметь сугубо метеорологическое назначение. Для целей океанографии в рамках Федеральной космической программы планируется создание специализированных океанографических спутников «Океан», начало разработки которых намечено на 2020 г.

Полезная нагрузка спутников «Океан» будет состоять из следующих приборов:

- сканер цветности океана,
- сканер береговой зоны,
- скаттерометр,

многорежимный радиолокатор с антенной типа АФАР.

Главная цель создания объединенной группировки перспективных спутников «Метеор-МП» и «Океан» состоит в том, чтобы обеспечить глобальное наблюдение поверхности Земли, Мирового океана и атмосферы. Данные, получаемые этими спутниками, будут использоваться для следующих задач:

– анализ погоды и ее предсказание в глобальном и региональном масштабах,

- контроль глобального изменения климата,

 контроль морской воды и прогноз изменения ее состояния,

 – анализ космической погоды и предсказание связанных с ней явлений (солнечный ветер, ионосферные исследования, магнитное поле Земли и т. д.).

Список литературы

- Космический комплекс оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций «Канопус-В» с космическим аппаратом «Канопус-В» № 1. М: ФГУП «НПП "ВНИИЭМ"», 2011. 110 с.
- Горбунов А.В., Чуркин А.Л., Саульский В.К. Задачи и направления развития космических платформ и аппаратов ОАО «Корпорация "ВНИИЭМ"» // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. Приложение за 2014 г. Материалы второй международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». М.: ФГУП «НПП "ВНИИЭМ"», 2014. С. 32–44.
- Космический комплекс гидрометеорологического и океанографического обеспечения «Метеор-ЗМ» с космическим аппаратом «Метеор-М» № 1. Под ред. д.т.н. С.Н. Волкова, д.т.н. Ю. В. Трифонова, к.т.н. А. В. Горбунова, к.т.н. В.Н. Дядюченко. М.: ФГУП «НПП "ВНИИЭМ"», 2009. 142 с.
- Гусев А.А., Ильина И.Ю., Саульский В.К., Чуркин А.Л. Опыт разработки космической платформы для космических аппаратов «Метеор» // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. М.: ФГУП «НПП "ВНИИЭМ"», 2013, т. 155, с. 3–2.

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ 2015, том 2, выпуск 4, с. 20–29

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

УДК 621.398

Оценка возможности использования существующих объективов для проецирования видеоизображения на фоторегистрирующие приборы

Д. И. Климов, В. А. Благодырев¹

¹к.т.н. АО «Российские космические системы» e-mail: tm016@rniikp.ru

Аннотация. Оценивается возможность использования существующих объективов при проецировании видеоизображения (ВИ) на фоторегистрирующие приборы путем анализа моделей идеального и реального объективов с оценкой быстродействия считывания спроецированного изображения на фоточувствительную зону прибора с зарядовой связью (ПЗС). Приведены основные понятия и определения, требующиеся для оценки ВИ на ПЗС. Рассмотрены и проанализированы различные виды ПЗС. Проведен анализ существующих ПЗС с виртуальной фазой (ВФПЗС) и инфракрасных ПЗС (ИК ПЗС) отечественного производства (ОП).

Определено пороговое значение потока излучения в зависимости от длины волны, диаметр отверстия объективов и фокусные расстояния, а также оценено быстродействие проецирования ВИ для ПЗС ОП ISD017 как для модели идеального объектива, так и для модели реального объектива.

Ключевые слова: видеоизображение, объектив, прибор с зарядовой связью, инфракрасный ПЗС, виртуальная фаза

Estimation of Possibility of Use of Objectives at Video Image Displaying on Photo Registering Devices

D. I. Klimov, V. A. Blagodyryov

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

e-mail: tm016@rniikp.ru

Abstract. The estimation of possibility of use of objectives is considered at video image displaying on photoregistering devices by the analysis of models of ideal and real objectives with an estimation of speed of displaying of the image on a photosensitive zone of charge-coupled devices (CCD). The basic concepts and the definitions which are required for estimation of video image on charge-coupled devices are resulted. Various kinds of CCD are considered and analyzed. The analysis of existing CCD's with a virtual phase and infra-red CCD's of domestic production is carried out.

Threshold value of a stream of radiation depending on length of a wave, diameter of an aperture of objectives and focal lengths is defined, and also speed of displaying of video image for a domestic production CCD ISD017 is estimated both at model of an ideal objective, and at model of a real objective.

Key words: video image, objective lens, charge-coupled devices (CCD), infra-red CCD, virtual phase

Структуры ПЗС

Основным элементом для преобразования видеоинформации в электромагнитные колебания являются приборы с зарядовой связью (ПЗС), представляющие собой линейки или матрицы близко расположенных друг к другу МОП-конденсаторов.

ПЗС-структуры — это интегральные полупроводниковые приборы, в основе работы которых лежит принцип накопления, передачи и хранения локализованного зарядового пакета в потенциальных ямах, образуемых в полупроводнике под действием внешнего электрического поля.

Ввод и вывод информационного сигнала, то есть динамической неоднородности в ПЗС, осуществляется транзисторной структурой, в которой формируется зарядовый пакет.

Упрощенно прибор с зарядовой связью можно рассматривать как матрицу близко расположенных **МОП-конденсаторов** (электрод, отделенный от кремния слоем диэлектрика или окисной пленкой). С физической точки зрения ПЗС интересны тем, что электрический сигнал в них представлен не током или напряжением, как в большинстве других твердотельных приборах, а зарядом.

ПЗС с виртуальной фазой

Один из наиболее эффективных способов расширения спектрального диапазона измерительного прибора — использование **ПЗС с виртуальной фазой**. Суть этого способа в том, что один из электродов обычного ПЗС заменяется на мелкий замкнутый на стоп-каналы слой р-типа непосредственно на поверхности кремния (виртуальный затвор). Доза зарядов канала под виртуальным затвором делается больше, чем под тактовыми затворами. Структура с виртуальным затвором, замкнутым на подложку, с точки зрения канала переноса не отличается от состояния фиксации в обычном ПЗС со скрытым каналом.

По сравнению с обычными ПЗС, в ней около половины площади ячейки свободны от поликремния, отсюда высокая чувствительность в синей и УФ областях спектра (теоретически даже и до мягкого рентгена). В отличие от обычной ПЗС (с электродами из поликристаллического кремния, рис. 1), ПЗС с виртуальной фазой (рис. 2) обладают высокой квантовой эффективностью и чувствительностью в большем диапазоне длин волн (240–1000 нм), как показано на рис. 3 [2].

Основные области применения ВФПЗС — системы астроориентации и астронавигации искусственных спутников Земли и космических станций, наземная и космическая астрономия, экспериментальное физическое оборудование.

Наиболее ярким примером ВФПЗС отечественного производства являются ПЗС [1], выпускаемые ГУП «НПП "Электрон-Оптроник"» с характеристиками, представленными в табл. 1. Здесь HS — скоростной (двухкаскадный) выходной узел, LN — малошумящий (однокаскадный) выходной узел.

Способы реализации и модели ИК ПЗС

Матричный ИК ПЗС представляет собой монолитный прибор со строчно-кадровым переносом и объемным каналом. Его фоточувствительная секция выполнена на основе диодов с барьером Шоттки из силицида платины. Информация с фоточувствительного массива считывается с помощью вертикальных и горизонтального ПЗС-регистров с четырех- или трехфазной организацией.

Существует разработка заказных ПЗС-модулей, заключающаяся в основном в модификации матричных и линейных фоточувствительных ПЗС (ФПЗС), выпускаемых ведущими мировыми производителями в соответствии с техническими требованиями заказчика, с монтажом неохлаждаемых ФПЗС (как в виде чипов, так и в корпусе изготовителя) на термоэлектрические холодильники (Пельтье) в вакуумно-плотные газонаполненные корпуса собственной разработки и производства.

Примеры моделей ИК ПЗС отечественного производства — ПЗС [1], выпускаемые ГУП «НПП "Электрон-Оптроник"» с характеристиками, которые представлены в табл. 2.



Рис. 2. Структура ВФПЗС

Модель ВФПЗС	ISD017	ISD029	ISD048	ISD049	ISD075
Формат (число элементов)	1040 imes 1160	512×512	386×290	578 imes 578	1225×1300
Архитектура	SFF	FF	FT	FT	SFF
Площадь пикселя, мкм ²	16 imes 16	16 imes 16	22×22	22×22	14×14
Число считывающих регистров и типы выходов	2LN, 2HS	1LN, 1HS	1HS	1HS	2LN, 2HS
Фоточувствительная площадь, мм ²	$16,\!6 imes18,\!6$	8,2 imes 8,2	8,5 imes 6,4	12,7 imes 12,7	18,8 imes 17,2
Заряд насыщения, тыс. эл.	200	130	300	300	130
Шум считывания двухкаскадного выходного устройства (HS) при частоте 1 МГц, число эл.	10-12	10-15	15	15	10
Шум считывания однокаскадного выходного устройства (LN), число эл.	7	6	_	_	6
Темновой сигнал при -35 °С, не более эл/яч/с			7		
Неоднородность чувствительности, не более %	3				

Таблица 1. Характеристики моделей ВФПЗС ОП

Таблица 2. Характеристики моделей ИК ПЗС ОП

Параметр	Тип ИК ПЗС				
Параметр	ISD200M	ISD090	ISD091		
Формат	256×290	480 imes 320	320×240		
Площадь пикселя, мкм ²	50 imes 33	28×28	40×40		
Спектральный диапазон, мкм	1,3–5,3				
Зарядовая вмести- мость, (число эл.)	$7 * 10^5$	106	$1,2 * 10^{6}$		

ИК-системы диапазона 8-14 мкм

Предназначены для детального рассмотрения термообстановки в области температур от +80 до -70 °С. Для получения видеоизображения в данной области длин волн требуется термоохлаждение кристалла ПЗС азотным криостатом или жидким азотом. Применение данных систем несет за собой дополнительные массогабаритные ограничения и сложность реализации целевых модулей, а также использование специальных объективов, выполненных из германия.



Рис. 3. Зависимость квантовой чувствительности ПЗС и ВФПЗС

Разработкой подобных объективов, например, занимается фирма Optics-M, выпускающая объективы под штучные заказы или малыми сериями.

ИК-объективы для ИК-систем диапазона 8– 14 мкм состоят из двух асферических германиевых линз (фокусное расстояние 50 и 100 мм) и из двух асферических и одной сферической германиевой линзы (фокусное расстояние 18 мм). Перефокусировка осуществляется вручную. Объективы по резьбе прикручиваются непосредственно к кожуху камеры, что допускает замену фокусного расстояния простым вкручиванием другого объектива.

В табл. 3 приведены характеристики описанных выше объективов.

Таблица 3. Характеристики объективов с германиевыми линзами Технические характеристики

технические характеристики								
Фокусное расстояние, мм	100	18-100						
Размер изображения, мм	Размер изображения, мм 16							
Зона обзора, °	50	18	9	50-9				
Пропускание, %	88	91	88	70				
Задний рабочий отрезок, мм	30	33	33	35				

Разбиение спектральных составляющих на поддиапазоны, в соответствии с реальными моделями ПЗС и объективами

Рассматриваемый диапазон длин волн (0,3– 15 мкм) разобьем на поддиапазоны, в соответствии с реальными моделями ПЗС и объективами, как представлено в табл. 4.

В соответствии с распределением чувствительности ПЗС по диапазонам длин волн, в каждой из точек установки видеорегистратора будут установлены по две ВК в защитном термокожухе: одна с ВФПЗС, другая — с ИК ПЗС. Обе камеры настроены на одну и ту же область обзора и пересылают на наземную станцию потоки информации, получаемой с двух камер одновременно. Так как, согласно табл. 1 и 2, форматы изображения ВФПЗС шире, чем ИК ПЗС, то перед ВК с ВФПЗС необходимо устанавливать объектив с зоной обзора примерно в 1,2-2 раза меньше, чем у объективов, устанавливаемых перед ВК с ИК ПЗС.

Пороговое значение чувствительности ПЗС

Ограничение чувствительности ПЗС определяется уровнем шумов [2], который, как видно из табл. 1, приближенно равен сумме шума считывания выходного устройства и темнового тока. Пороговое значение потока излучения определяется как

$$P_{\rm nop} = \frac{hc}{\lambda} \sqrt{\frac{SN}{\eta}},\tag{1}$$

где η — квантовая эффективность ПЗС (см. рис. 3), которая имеет примерный вид нормального распределения и определяется как отношение среднего числа фотогенерированных фотонов к числу фотонов, попадающих на ПЗС [2], S — площадь фоточувствительной части ПЗС, N — число электронов, вызывающих шумы ПЗС.

Построим семейство графиков $P_{\text{пор}}(\lambda, \text{ нм})$ при разных значениях η , взятых из графика рис. 3,

Наименование поддиапазона	Диапазон длин	Диапазон цветовых	Тип
в программе	волн, мкм	температур, К	видеорегистратора
УФ	0,3–0,38	9653-7621	
ВД	0,38-0,74	7621-3914	ВК с ВФПЗС
ИК1	0,74-1,10	3914-2630	
ИК2	1,10-5,5	2630-525	ВК с ИК ПЗС
ИК3	5,5-8,0	525-362	ИК-системы
ИК4	8,0-15,0	362-190	термоохлаждением

Таблица 4. Поддиапазоны длин волн с учетом реальных ПЗС и объективов

Примечание: ВК — видеокамера.

для ПЗС ISD017 (см. табл. 1). Для данной ПЗС

$$S = 16,6 \times 18,6$$
 (мм) $= 3,088 \cdot 10^{-4}$ м²; $N = 20.$

Стоит отметить, что значение $P_{\text{пор}}(\lambda)$ без участия фокусирующих оптических систем очень незначительно, поэтому для построения семейства графиков и наглядности результатов домножим значения $P_{\text{пор}}$ на коэффициент масштабирования = 10^{19} (рис. 4).

Из графика видно, что с ростом длины волны пороговое значение потока излучения падает. Следовательно, большей интенсивности излучения соответствует меньшая длина волны.

Теперь построим на одном графике зависимость от длины волны (в нм) квантовой эффективности и порогового значения ($P_{\text{пор}}$) потока излучения (домноженного на коэффициент масштабирования 10¹⁹), применимые к матрице ISD017 (рис. 5).

Из графика видно, что значение $P_{\text{пор}}$ уменьшается с ростом квантовой эффективности ПЗС.

Модель идеального объектива

Идеальной моделью объектива с точки зрения спектрального диапазона и фокусировки является камера-обскура — простейший вид устройства, позволяющего получать оптическое изображение объектов, которая представляет собой светонепроницаемый ящик с отверстием в одной из стенок и экраном (матовым стеклом или белой бумагой) на противоположной стенке. Лучи света, проходя сквозь небольшое отверстие, создают перевернутое изображение на экране. На основе камеры-обскуры были сделаны некоторые фотокамеры.

Камера-обскура имеет отверстие диаметром приблизительно 0,5-5 мм, выполняющее роль объектива фотокамеры. Однако простое отверстие вместо линзы не обеспечивает высокой резкости изображения. До определенного предела резкость изображения может быть повышена путем уменьшения диаметра отверстия, но при слишком сильном уменьшении начинают сказываться эффекты дифракции и изображение становится еще более расплывчатым, кроме того, резко падает освещенность экрана (т. к. уменьшается относительное отверстие «диафрагмы»). Обскура характеризуется бесконечно большой глубиной резко изображаемого пространства (глубиной резкости). Говорить о фокусном расстоянии обскуры можно только условно. Под эквивалентным фокусным расстоянием такой камеры обычно понимают расстояние от отверстия до экрана f_1 . Соотношение f_1/d определяется, как и в объективе, числом диафрагмы.

Пусть в нашем случае экраном камерыобскуры будет служить фоточувствительная зона ПЗС со сторонами a и b, а диаметр отверстия d. Расстояние от отверстия до ПЗС f_1 , а до поверхности, откуда снимается изображение, f_2 . Размер проецируемого изображения с рассматриваемой поверхности $D_1 \times D_2$. Одно из сечений проецирования изображения с поверхности на ПЗС через идеальный объектив представлено на рис. 6. Число диафрагмы будет определяться граничным значением чувствительности ПЗС, т.е. N.



Рис. 4. Семейство графиков при разных значениях квантовой эффективности для матрицы ISD017



Рис. 5. Зависимость от длины волны квантовой эффективности и порогового значения потока излучения для матрицы ISD017

На рис. 6 показано одно из сечений рассматриваемой модели. Геометрическое построение сечения со сторонами b и D_2 ПЗС и плоскости изображения соответственно аналогично. Из подобия равнобедренных треугольников получаем:

$$f_{21}(D_1, f_1) = \frac{f_1}{a} D_1$$
 и $f_{22}(D_2, f_1) = \frac{f_1}{b} D_2$. (2)



Рис. 6. Зависимость от длины волны квантовой эффективности и порогового значения потока излучения для матрицы ISD017

Так как $a \approx b$ и отверстие камеры-обскуры расположено посередине светонепроницаемого ящика, то

$$f_2(D, f_1) = \frac{f_{21}(D_1, f_1) + f_{22}(D_2, f_1)}{2}, \qquad (3)$$

где

$$D = \frac{D_1 + D_2}{2}.$$
 (4)

Построим семейство графиков $f_2(D)$ при фиксированных значениях f_1 (рис. 7) для ПЗС ISD017, представляющих собой линейную зависимость. Причем с ростом f_1 растет f_2 , а следовательно, растет и D.



Рис. 7. Зависимость расстояния от линзы объектива до объекта от размеров объекта при различных расстояниях от отверстия до фоторегистрирующего прибора

Важной характеристикой объектива является светосила — величина освещенности оптических изображений в (фокальных) плоскостях различных оптических устройств, характеризующая степень светопропускания объектива. Геометрическая светосила вычисляется как отношение максимального диаметра входного зрачка объектива к заднему фокусному расстоянию.

Любой световой поток сквозь кольцо, которое ограничивает источник света, определяет мощность светового излучения этого потока, и его называют полным световым потоком источника света. Его величина не может быть увеличена никакими оптическими устройствами. Световой поток сквозь оптическую систему (объектив) может только уменьшить свою мощность.

Камера-обскура представляет собой модель идеального объектива, пропускающего малую долю светового потока с бесконечно широким спектральным диапазоном. В нашем случае светосила будет определяться соотношением

$$E_{\min} = \frac{d}{f_1}.$$
(5)

Также известно, что светосила идеального объектива бесконечной полосы спектрального диапазона определяется уровнем шумов, т.е.

$$E_{\min} = N. \tag{6}$$

Светосила обратно пропорциональна диафрагменному числу, т.е. чем больше диафрагменное число, тем меньше света попадет на фоточувствительную зону ПЗС.

Таким образом, подставляя (6) в (5), получаем

$$N = \frac{d}{f_1},\tag{7}$$

$$\Rightarrow \quad d(N, f_1) = f_1 N. \tag{8}$$

Построим графики $d(f_1)$ при разных фиксированных значениях N для ПЗС ISD017 (рис. 8).



Рис. 8. Зависимость диаметра отверстия от расстояния от линзы объектива до фоторегистрирующего прибора при разных диафрагменных числах (N)

Как видно из рисунка, отверстие идеального объектива тем уже, чем меньше число электронов, вызывающих шумы ПЗС, которые определяют граничную чувствительность ПЗС. С ростом f_1 диаметр отверстия возрастает. Это объясняется тем, что чем больше заднее фокусное расстояние, тем больше фотонов, пройдя через объектив, должны попасть в нужное место фоточувствительной зоны ПЗС.

Быстродействие проецирования изображения при идеальном объективе

Оценим быстродействие проецирования изображения величиной D через идеальный объектив диаметром d и задним фокусным расстоянием f_1 на фоточувствительную зону ПЗС площадью $S = a \cdot b$. При заданных условиях время проецирования изображения на фоточувствительную зону ПЗС будет оцениваться как

$$t = \frac{D}{d} t_{\Pi 3C}, \tag{9}$$

где $t_{\Pi 3C} = 1/F_{cq}$ — время срабатывания ПЗС после попадания на фоторегистрирующую поверхность фотонов, а F_{cq} — частота считывания ПЗС.

При уменьшении частоты считывания уменьшается уровень шумов считывания и возрастает время накопления заряда, поэтому меньшему быстродействию соответствует меньший диаметр отверстия идеального объектива и большая четкость изображения (попадание фотонов на фоточувствительную зону ПЗС и их последующее накопление при проецировании изображения).

Представим значения величин для оценки быстродействия для ПЗС ISD017 при двух значениях частоты считывания ПЗС, как показано в табл. 5.

Таблица 5. Оценка быстродействия проецирования изображения на ПЗС ISD017 при модели идеального объектива

$F_{\rm cy}$, кГц	f_1 , mm	<i>d</i> , мм	N	f_2 , mm	D, mm	<i>t</i> , мс
	10	2,5		200	352	0,246
	20	5,0		500	440	0,154
1000	30	7,5	25	800	470	0,110
	40	10,0		1000	440	0,077
	50	12,5		1500	528	0,074
	10	0,4		200	352	18,000
	20	0,8		500	440	11,000
50	30	1,2	7	800	470	7,822
	40	1,6		1000	440	5,500
	50	2,0		1500	528	5,280



Рис. 9. Оценка быстродействия проецирования изображения для ПЗС ISD017 при изменении диаметра отверстия идеального объектива при частоте считывания ПЗС 1 МГц



Рис. 10. Оценка быстродействия проецирования изображения для ПЗС ISD017 при изменении диаметра отверстия идеального объектива при частоте считывания ПЗС 50 кГц

Используя табл. 5, построим зависимость быстродействия проецирования изображения от диаметра отверстия идеального объектива (рис. 9, 10).

Проецирование изображения на ПЗС через модель реального объектива

Напомним, что камера-обскура — модель идеального объектива, который пропускает малый световой поток бесконечно большого спектрального

диапазона. Светосила данного объектива очень мала и определяется уровнем шумов фоторегистрирующего прибора. Для увеличения светосилы требуется перейти к реальному объективу, светосила которого будет $E = k \cdot E_{\min}$, где $k = S_o/S$, причем $S = a \cdot b$ — площадь фоточувствительной зоны ПЗС, $S_o = \frac{\pi}{4}d^2$ — площадь действующего отверстия объектива диаметром d. Следовательно, для светосилы объектива получаем выражение

$$E = \frac{\pi d^2}{4Nab}.$$
 (10)

Построим зависимость E(d) для ПЗС ISD017 при двух значениях N (рис. 11).



Рис. 11. Зависимость светосилы от действующего отверстия объектива для ПЗС ISD017

Чем больше уровень шумов, тем больший порог чувствительности у ПЗС и тем больший световой поток должен пройти через объектив на фоточувствительные элементы ПЗС. Следовательно, при увеличении уровня шумов ПЗС требуется выбирать объектив с большей светосилой, а значит, и с большим действующим отверстием.

Учитывая то, что в геометрическом смысле светосила также определяется как S_o/f^2 [3], где f — фокусное расстояние объектива, то, принимая во внимание (10),

$$\frac{N}{ab} = \frac{1}{f^2} \quad \to \quad f = \sqrt{\frac{S}{N}}.$$
 (11)

Существует понятие диафрагменного числа [3], равного отношению фокусного расстояния объектива к диаметру его действующего отверстия, т.е.

$$K = f/d. \tag{12}$$

Подставляя (11) в (12), получим:

$$K = \frac{1}{d}\sqrt{\frac{S}{N}}.$$
 (13)

Чем выше диафрагменное число, тем меньший световой поток пройдет через объектив и тем меньше будет его светосила [3]. Из (13) видно, что диафрагменное число также увеличивается при уменьшении уровня шумов ПЗС (а следовательно, и при уменьшении частоты считывания ПЗС). Величина, обратная диафрагменному числу, называется относительным отверстием объектива.

Быстродействие проецирования изображения при использовании реального объектива

Оценим задержку проецирования изображения на фоточувствительную зону ПЗС ISD017 с учетом свойств реального объектива. Для этого построим график d(E) (рис. 12), выразив зависимость через соотношение (10):

$$d(E) = \sqrt{\frac{4SE}{\pi N}}.$$
 (14)

Затем представим значения величин для оценки быстродействия для ПЗС ISD017, сведя их в табл. 6 при двух значениях частоты считывания ПЗС.

Как видно из рис. 9, 10, 13 и 14, при увеличении действующего отверстия объектива быстродействие проецирования изображения на фоточувствительную зону ПЗС ускоряется, потому что с увеличением диаметра действующего отверстия увеличивается и его светосила, а следовательно, и доля светового потока. Время накопления фотонов на ПЗС уменьшается при переходе от модели идеального объектива к модели реального.

Стоит отметить, что для ВК на КА или РН необходимо использовать длиннофокусные объективы, т. к. из рис. 6, 7 и соотношения (2) следует, что чем больше расстояние до объекта, тем больше должно быть фокусное расстояние объектива.



Рис. 12. Зависимость действующего отверстия от светосилы объектива для ПЗС ISD017

Таблица 6. Оценка быстродействия проецирования изображения на ПЗС ISD017 при модели реального объектива

$F_{\rm cu}$, кГц	E	<i>d</i> , мм	N	D, мм	f_2 , mm	<i>t</i> , мс
	0,2	3,35		200	352	0,107
	0,3	4,10		500	440	0,105
1000	0,5	5,30	25	800	470	0,089
	0,8	6,70		1000	440	0,070
	1,0	7,50		1500	528	0,066
	0,2	1,77		200	352	4,052
	0,3	2,17		500	440	3,971
50	0,5	2,80	7	800	470	3,352
	0,8	3,55		1000	440	2,663
	1,0	3,97		1500	528	2,481

При уменьшении расстояния от объекта до объектива в КА и РН для сохранения модели используемого объектива необходимо увеличить глубину резкости, т.е. увеличить диафрагменное число путем уменьшения действующего отверстия объектива в соответствии с соотношением (12). Настройку диаметра действующего отверстия объектива ВК предполагается проводить при монтаже ВК на РН. Следует учитывать, что при уменьшении d увеличивается задержка проецирования изображения на фоторегистрирующий прибор, как следует из соотношения (12) и рис. 13, 14, однако даже при $F_{cq} = 50$ кГц задержка проецирования составляет не более 200 мкс. Тем не менее, при наземной



Рис. 13. Быстродействие проецирования изображения при модели реального объектива (частота считывания ПЗС IDS017 1 МГц)



Рис. 14. Быстродействие проецирования изображения при модели реального объектива (частота считывания ПЗС IDS017 50 кГц)

обработке ВИ для измерения температуры разницу задержек проецирования для конкретных выбранных моделей объективов и ПЗС нужно учитывать.

Список литературы

- Вишневский Г.И., Выдревич М.Г., Нестеров В.К., Ривкинд В.Л. Отечественные УФ и ИК ФПЗС и цифровые камеры на их основе / Электроника: наука, технология, бизнес, 2003, № 8.
- Формозов Б. И. Аэрокосмические фотоприемные устройства в видимом и инфракрасном диапазонах. СПбГУАП, 2002. 120 с.
- 3. Кулагин С.В., Апарин Е.М. Проектирование фотои киноприборов». М.: Машиностроение, 1986.

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ 2015, том 2, выпуск 4, с. 30–39

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

УДК 629.785

Многозональное сканирующее устройство малого разрешения МСУ-МР для космического информационного комплекса «Метеор-М». Принцип работы, эволюция, перспективы

Н. П. Акимов, К. В. Бадаев, Ю. М. Гектин¹, А. В. Рыжаков, М. Б. Смелянский, А. Г. Фролов²

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

e-mail: petrov_sv@spacecorp.ru

Аннотация. Рассматриваются принцип действия, конструктивные особенности и направления развития приборов MCУ-MP, предназначенных для эксплуатации в составе метеоспутников «Метеор-М» № 1 и № 2. Аппаратура производит непрерывную съемку земной поверхности. Наблюдение поводится в шести спектральных каналах. Пространственное разрешение в надире 1 км, полоса захвата 2950 км.

Ключевые слова: метеоспутники, спектрозональная съемка Земли, сканирующее устройство

Multiband scanner of low spatial resolution MSU-MR for space-based informational system "Meteor-M". The principle of operation and development prospects

N. P. Akimov, K. V. Badaev, Yu. M. Gektin¹, A. V. Ryzhakov, M. B. Smeljansky, A. G. Frolov²

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

e-mail: petrov_sv@spacecorp.ru

Abstract. This paper explains the principle of operation, construction details and development prospects of MSU-MR apparatus series. These apparatuses are intended for operation on board of meteo satellites «Meteor-M» \mathbb{N}_2 1 and \mathbb{N}_2 2. MSU-MR uninterruptedly observes the Earth in six spectral bands with spatial resolution of 1 km in the 2950 km field of view.

Key words: meteo satellites, multiband remote sensing of the Earth, scanning system

Введение

В настоящее время, в соответствии с Концепцией развития российской космической системы дистанционного зондирования Земли [1], предполагается значительное увеличение группировки специализированных гидрометеорологических спутников серии «Метеор-М» (разработчик КА АО «Корпорация "ВНИИЭМ"»), функционирующих на солнечно синхронных орбитах высотой 830 км. Одним из важнейших приборов, установленных на этих КА, является многозональное сканирующее устройство малого разрешения — МСУ-МР (рис. 1), разработанное в АО «Российские космические системы» для решения гидрометеорологических задач. Первый прибор МСУ-МР был изготовлен для КА «Метеор-М» №1, эксплуатация которого начата в октябре 2009 г. и успешно продолжается до настоящего времени (уже более 5 лет). Устройство МСУ-МР обеспечивает глобальное непрерывное наблюдение облачности и поверхности Земли в полосе захвата 2950 км с пространственным разрешением 1 км в спектральном диапазоне от 0,5 до 12,5 мкм. Основные технические характеристики приборов МСУ-МР (находящихся в настоящее время в эксплуатации) приведены в табл. 1. Информация (фрагменты изображений), формируемая МСУ-МР, представлена на рис. 2.

Аналогом устройства MCV-MP является американский радиометр AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), входящий в состав измерительных комплексов спутников NOAA (высота орбиты 870 км) и обеспечивающий получение изображений в 6 спектральных каналах (0,58–0,68, 0,725–1,1, 1,58–1,64, 3,55–3,93, 10,3–11,3 и 11,4–12,4 мкм) с разрешением 1,1 км.

С помощью информации, получаемой с аппаратуры МСУ-МР КА «Метеор-М», возможно решение различных прикладных и научно-исследовательских задач. Прежде всего, это оперативное прогнозирование погодных условий на основе измерений параметров окружающей среды: температура поверхности, наличие осадков, распределение облаков, скорость ветра и т.д. [4]. По данным, поступающим со спутника, проводятся исследования климата и факторов, влияющих на его изменение, исследуются движения ледников и айсбергов, вулканическая активность, возможно раннее обнаружение лесных пожаров.

В настоящее время на орбитах успешно функционируют два спутника «Метеор-М»: №1 (запущен в 2009 г.) и №2 (запущен в 2011 г.) с приборами МСУ-МР №1 и №2 соответственно. При разработке МСУ-МР №1 многие технологические и конструктивные решения были впервые применены в практике российского космического приборостроения (малоэлементные сборки из приемников инфракрасного диапазона, система пассивного радиационного охлаждения этих приемников (PX), системы бортовой калибровки ИК-каналов и т.д.). Некоторые из примененных решений крайне затруднительно либо и вовсе невозможно проверить при наземной отработке прибора. Летные испытания, подтвердив в целом правильность реализованных принципов построения аппаратуры, выявили некоторые недостатки первого прибора. Анализ полученных снимков и телеметрической информации позволил определить факторы и степень их воздействия, оказывающих наибольшее влияние на качество получаемой информации, и прибор МСУ-МР № 2 создавался уже с учетом всех выявленных проблем, пожеланий и замечаний конечных потребителей спутниковых данных.

Принцип работы

Принципиальная оптическая схема многозонального сканирующего устройства МСУ-МР представлена на рис. З. Устройство содержит две идентичные независимые оптико-механические системы (основную и резервную). В процессе работы устройства по команде оператора может быть осуществлен переход на другой комплект.

Каждая оптико-механическая система устройства включает:

 плоское сканирующее зеркало с двухсторонним отражающим покрытием, совершающее непрерывное круговое вращение с помощью привода;

– 6 информационных оптических блоков, формирующих изображения в 6 спектральных диапазонах: 0,5–0,7, 0,7–1,1, 1,6–1,8, 3,5–4,1, 10,5–11,5, 11,5–12,5 мкм;



Рис. 1. Внешний вид прибора МСУ-МР

Параметры	МСУ-МР № 1	МСУ-МР № 2	AVHRR
Высота орбиты	835	835	833
Количество каналов	6	6	6
Спектральные диапазоны, мкм	0,5-0,7	0,5-0,7	0,58-0,68
	0,7-1,1	0,7-1,1	0,72 - 1,00
	1,6-1,8	1,6-1,8	1,58-1,64
	3,5-4,1	3,5-4,1	3,55-3,93
	10,5-11,5	10,5-11,5	10,30-11,30
	11,5-12,5	11,5-12,5	11,50-12,50
Полоса захвата, км	2800	2950	2900
Разрешение на поверхности, км	1,0	1,0	1,09
Отношение сигнал/шум в видимых			
и ближних ИК-каналах:			
• 0,5-0,7 мкм;	700	1900	300-500
• 0,7-1,1 мкм;	600	1000	300-500
• 1,6-1,8 мкм	250	500	300-500
Эквивалентная шуму измеряемая разность			
температур на уровне 300 К ИК-каналов, К:			
• 3,5-4,1 мкм;	0,2	0,09	0,12
• 10,5-11,5 мкм;	0,2	0,04	0,12
• 11,5-12,5 мкм	0,3	0,07	0,12

Таблица 1. Тактико-технические характеристики приборов МСУ-МР и их зарубежного аналога



Рис. 2. Информация, формируемая прибором МСУ-МР. Сверху вниз: синтезированное RGB-изображение (0,5–0,7 мкм; 0,7–1,1 мкм; 1,6–1,8 мкм); 3,5–4,1 мкм; 10,5–11,5 мкм; 11,5–12,5 мкм

– 6 блоков радиометрической бортовой калибровки (по одному на каждый информационный блок), оптически связанные с информационными каналами через сканирующее зеркало и поворотные зеркала.

Для оптимальной компоновки устройства информационные оптические блоки диапазонов от 0,5 до 1,8 мкм и от 3,5 до 12,5 мкм, а также соответствующие им блоки калибровки расположены по разные стороны сканирующего зеркала.

Охлаждение приемников среднего и дальнего инфракрасных диапазонов (от 3,5 до 12,5 мкм) осуществляется с помощью общей пассивной радиационной системы охлаждения, ориентированной в открытый космос.

Сканирующие зеркала выполнены из ситалла CO-115М и имеют размер 165 × 175 × 36 мм. Зеркала облегчены с помощью системы взаимно-перпендикулярных отверстий, которая также используется для расположения в них элементов оси вращения и стоек рамки, в которой подвешивается зеркало. В процессе работы зеркала совершают равномерное круговое движение со скоростью 3,25 об/с. Вращение сканирующих зеркал осуществляется независимыми приводами вращения. Оси вращения зеркал совпадают с направлением движения космического аппарата. Разворот визирной оси с помощью сканирующего зеркала и движение самого аппарата позволяет осуществить непрерывную трассовую съемку в угле обзора 110°. Зеркала имеют двухстороннее отражающее покрытие, что позволяет снизить скорость вращения привода в два раза и наиболее оптимально разместить оптические блоки, формирующие изображения.

Оптические блоки диапазонов от 0,5 до 1,1 мкм включают: фильтр, формирующий спектральный диапазон, поворотное зеркало, трехлинзовый объектив, имеющий фокусное расстояние f' = 150 мм, и входной зрачок D = 50 мм, одноэлементный приемник излучения. Размер чувствительного элемента приемника излучения $(0, 2 \times 0, 2)$ мм.

Оптический блок диапазона от 1,6 до 1,8 мкм включает: фильтр, формирующий спектральный диапазон, поворотное зеркало, трехлинзовый объектив, имеющий фокусное расстояние f' = 150 мм и входной зрачок D = 50 мм, диафрагму диаметром 0,2 мм, систему переноса изображения диафрагмы на приемник излучения и одноэлементный приемник излучения. Так как размер чувствительного элемента приемника излучения в канале (0,3× × 0,3) мм, то мгновенное поле канала формируется диафрагмой диаметром 0,2 мм, а перенос излучения с диафрагмы на приемник излучения с уществляется дополнительной оптической системой.



Рис. 3. Принципиальная оптическая схема устройства МСУ-МР:

1 — сканирующее зеркало, 2 — привод, 3 — фильтр, 4 — поворотное зеркало, 5 — объектив, 6 — приемник излучения, 7, 8 — поворотные зеркала, 9 — объектив, 10 — фильтр, 11 — приемник излучения, 12 — радиационная система охлаждения приемников излучения, 13 — поворотное зеркало, 14 — объектив канала калибровки в диапазоне 0,5–1,8 мкм, 15 — фильтр канала калибровки в диапазоне 0,5–1,8 мкм, 16 — эталонный стабилизированный источник излучения в диапазоне 0,5–1,8 мкм, 17 — имитатор абсолютно черного тела с температурой 313 К, 18 — имитатор абсолютно черного тела с температурой 258 К, 19 — тепловая трубка, 20 — радиационный экран охлаждения имитатора абсолютно черного тела 18, 21 — диафрагма, 22 — система переноса изображения

Оптические блоки диапазонов от 3,5 до 12,5 мкм включают: поворотные зеркала, трехлинзовый объектив, фильтр, формирующий спектральный диапазон, четырехэлементный приемник излучения. Объективы выполнены из германия, имеют фокусное расстояние f' = 40 мм и входной зрачок D = 45 мм. Размер чувствительного элемента приемника (0,05×0,08) мм. ИК-приемники ориентированы вдоль оси сканирования, в результате каждая точка поверхности проецируется последовательно на каждый элемент фотоприемника, а затем производится усреднение четырех полученных отсчетов с каждой точки, то есть в ИК-диапазоне реализован режим временной задержки и накопления сигнала (ВЗН). Конструктивно приемники жестко закреплены на радиационной системе охлаждения, ориентированной на космическое пространство, что позволяет получить в процессе эксплуатации устройства в зоне чувствительных элементов приемников температуру 78–80 К.

Задачей блоков калибровки информационных каналов является формирование эталонных потоков излучения определенного спектрального состава и заданной интенсивности (близкой к верхнему уровню динамического диапазона), которые вводятся в основной (измерительный) тракт устройства и проходят через все его элементы. Ввод излучения, формируемого блоками калибровки, осуществляется с помощью сканирующего зеркала в каждой строке вне ее активной части.

Блоки калибровки информационных каналов, обеспечивающих получение изображений в диапазоне от 0,5 до 1,8 мкм, включают: поворотное зеркало, объектив, фильтр и стабилизированный источник излучения (лампа накаливания ТРШ1600-2200).

В состав блоков калибровки каналов в диапазоне от 3,5 до 12,5 мкм входят два имитатора абсолютно черных тела, одно из которых имеет температуру 320 К, а другое 255 К. Заданная температура и ее стабилизация в процессе эксплуатации на имитаторах абсолютно черных тел, имеющих температуру 320 К, достигается с помощью регулируемого нагревательного элемента. На имитаторах абсолютно черных тел, имеющих температуру 255 К, — с помощью радиационного экрана, ориентированного на космос, причем связь между имитаторами абсолютно черных тел и экраном осуществляется через тепловые трубки, а значение и стабилизация температуры — регулируемым нагревательным элементом.

Требуемая рабочая температура ИК-фотоприемников составляет 78–80 К. Для обеспечения температурного режима применяется система пассивного радиационного охлаждения (РХ) (рис. 4). Преимущество подобных систем в том, что они имеют практически неограниченный ресурс работы и не требуют постоянного электропитания в процессе работы.



Рис. 4. Система радиационного охлаждения ИК-фотоприемников: 1 — фотоприемник, 2 — вторая ступень РХ, 3 — изолирующие слои первой ступени РХ, 4 — объектив, 5 — система поворотных зеркал

Фотоприемники 1 устанавливаются на плоской поверхности — второй ступени РХ 2, имеющей равновесную (при штатной ориентации космического аппарата) температуру 78–80 К. Для исключения попадания излучения от теплых корпусных элементов используются изолирующие слои первой ступени 3. Температура первой ступени составляет 150 К. Обязательное условие для работы РХ — отсутствие излучения Земли и Солнца в поле зрения системы охлаждения. Отсюда возникает ограничение по размещению системы на борту КА в зависимости от параметров орбиты.

В процессе создания устройства МСУ-МР российскими предприятиями была разработана и изготовлена современная элементная база: электромеханический привод сканирующего зеркала (АО «Корпорация "ВНИИЭМ"»), многоэлементные ИК-фотоприемники (НПО «Сапфир»), радиационная система охлаждения ИК-фотоприемников (НПО НИИЭМ), в АО «Российские космические системы» проведен большой комплекс работ по модернизации стендового метрологического оборудования.


Рис. 5. Влияние криоосадков на качество изображения канала 11,5–12,5 мкм. Слева — до «очистки», справа — после «очистки»

Конструктивные решения, реализованные при создании МСУ-МР № 2, наиболее влияющие на качество получаемой информации

Одним из наиболее трудно устранимых факторов, ухудшающих качество изображения и радиометрическую точность аппаратуры, является образование криоосадков, состоящих в основном из молекул воды, осаждающихся на наиболее холодных поверхностях, в частности на входных окнах фотоприемников.

Для борьбы с данным эффектом применяется режим «очистки» РХ, при котором производится нагрев второй ступени до 40 °С. Влияние криоосадков на качество изображения можно визуально оценить по рис. 5.

Однако при проведении сеанса «очистки» молекулы воды остаются внутри РХ и с течением времени опять осаждаются на входных окнах фотоприемников. Для борьбы с этим явлением в MCУ-MP № 2 была изменена конструкция РХ, а именно изменено расположение теплоизолирующих стенок. Они располагаются под углом относительно друг друга — расходятся к внешней поверхности РХ (в МСУ-МР № 1 стенки располагаются параллельно), что позволяет молекулам воды после нескольких соударений со стенками в процессе «очистки» улететь в открытое пространство. Отличие конструкции первого и второго варианта радиационного холодильника показаны на рис. 6.

Кроме того, была изменена конструкция фотоприемников, позволяющая обеспечить повышенную температуру входного окна фотоприемника относительно его корпуса. В результате происходит перераспределение криоосадков в процессе охлаждения — большая часть молекул осаживается на окружающих стенках и более холодном корпусе.

Другая сложность работы с пассивными системами радиационного охлаждения заключается в невозможности полной имитации условий эксплуатации при наземной отработке, а расчеты имеют большие погрешности из-за недостаточного объема информации об изменении свойств материалов, в частности теплоемкости и модуля упругости, при криогенных температурах. В МСУ-МР, установленном на КА «Метеор-М» № 1, температура фотоприемников составила 100 К, что не позволило реализовать требуемую чувствительность примененных фотоприемников. Для уменьшения



Рис. 6. Конструкция радиационного холодильника прибора МСУ-МР № 1 (слева) и МСУ-МР № 2 (справа): 1 — фотоприемники, 2 — вторая ступень радиатора (78 К), 3 — первая ступень радиатора (150 К), 4 — нити, удерживающие вторую ступень, 5 — стойки крепления нитей



Рис. 7. Поверхность Черного моря, сравнение информации в канале 10,5–11,5 мкм. КА «Метеор-М» № 1 (слева): 26.05.10 г., $\Delta T_{_{ЭКВ}} = 0,15$ К; КА «Метеор-М» № 2 (справа): 29.09.14 г., $\Delta T_{_{ЭКВ}} = 0,05$ К

температуры в следующем приборе, установленном на КА «Метеор-М» № 2, была увеличена площадь излучающей поверхности системы охлаждения и проведены некоторые конструктивные доработки, что позволило в результате достигнуть рабочей температуры 78 К и повысить радиометрическую чувствительность в три раза. Эффективность этого решения хорошо видна на снимках, приведенных на рис. 7.

Принятые меры позволили значительно увеличить скорость очистки внутреннего объема РХ от криоосадков. Сравнительная количественная оценка скорости изменения значений динамического диапазона видеосигналов в ИК-каналах аппаратуры МСУ-МР № 1 и № 2 представлена на рис. 8.

При составлении глобальных метеорологических карт земной поверхности по видеоинформации, получаемой прибором МСУ-МР №1, было установлено, что полоса обзора 2800 км при высоте орбиты 835 км не обеспечивает перекрытие изображений поверхности Земли на экваторе. Во втором приборе было увеличено поле зрения на угол 2,07°, при этом полоса обзора составила 2950 км, что позволило составить полную карту поверхности Земли без пропусков в экваториальной зоне (рис. 9).

Комплекс конструктивных доработок позволил значительно повысить радиометрическую точность прибора. По этому показателю прибор МСУ-МР № 2 находится на современном уровне аппаратуры подобного класса.



Рис. 8. Изменение значений динамического диапазона ИК-каналов аппаратуры МСУ-МР № 1 и МСУ-МР № 2



Рис. 9. Увеличение угла обзора МСУ-МР №2 (сверху) на угол 2,07° относительно МСУ-МР №1 (снизу)

Будущее

В настоящее время в АО «Российские космические системы» ведутся работы по изготовлению МСУ-МР для КА «Метеор-М» № 2–1 и № 2–2 и подготовка к производству для КА «Метеор-М» № 2–3 и № 2–4. Запуск этих спутников позволит создать полноценную низкоорбитальную гидрометеорологическую группировку.

Одновременно с изготовлением новой аппаратуры продолжается работа по ее совершенствованию:

– корректируется система управления бортовыми эталонными источниками излучения инфракрасных каналов, что позволит исключить влияние нештатных ситуаций (например, разворота космического аппарата) на стабильность радиометрической точности и обеспечит возможность коррекции характеристики преобразования (зависимость выходного сигнала от радиационной температуры) для наблюдения протяженных источников излучения с повышенной температурой;

 разрабатывается система бортовой фокусировки ИК-объективов, которая позволит значительно сократить продолжительность и стоимость наземной отработки аппаратуры, а также обеспечит проведение фокусировки в реальных орбитальных условиях; – разрабатывается система обеспечения температурного режима фотоприемников видимых диапазонов спектра с повышенной стабильностью для повышения радиометрической точности измерения;

 проводятся конструктивные и электротехнические изменения, направленные на ускорение и автоматизирование создания приборов.

Список литературы

- Концепция развития российской космической системы дистанционного зондирования Земли на период до 2025 года. М.: Роскосмос, 2006.
- Патент № 2306583 РФ. G02B 23/12. Многозональное сканирующее устройство для дистанционного получения изображений в широком угле обзора / Акимов Н.П., Гектин Ю.М., Новиков М.В., Смелянский М.Б., заявлено 12.12.2005. Опубл. 20.09.2007.
- 3. http://noaasis.noaa.gov/NOAASIS/ml/avhrr.html
- Меньшиков В.А., Перминов А.Н., Рембеза А.И., Урличич Ю.М. Основы анализа и проектирования космических систем мониторинга и прогнозирования природных и техногенных катастроф. М.: Машиностроение, 2014.

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ 2015, том 2, выпуск 4, с. 40–49

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

УДК 621.396

Адаптивная фильтрация изображений, искаженных турбулентной атмосферой

К. Н. Свиридов

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

e-mail: sviridovkn@yandex.ru

Аннотация. Рассматриваются особенности формирования средних длинно-экспозиционных и средних короткоэкспозиционных изображений ДЗЗ, искаженных турбулентной атмосферой. Представлены аналитические выражения для средней длинно-экспозиционной и средней коротко-экспозиционной оптических передаточных функций (ОПФ) системы атмосфера-телескоп. Рассмотрены алгоритмы априорной пространственной фильтрации. Предложен и исследован адаптивный алгоритм последетекторной фильтрации средних изображений с формированием и максимизацией функций резкости изображения.

Ключевые слова: турбулентная атмосфера, оптическая передаточная функция (ОПФ), средняя длинно-экспозиционная ОПФ, средняя коротко-экспозиционная ОПФ, пространственная фильтрация, адаптивная фильтрация с максимизацией функции резкости изображения

Adaptive Filtration of the Images, Distorted by Turbulent Atmosphere

K. N. Sviridov

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

e-mail: sviridovkn@yandex.ru

Abstract. Peculiarities of formation average long-exposures and average short-exposures images, distorted by turbulent atmosphere, areconsidered. Analitic expressions for average long-exposure and average short-exposure optical transfer functions (OTF) of system atmosphere-telescope are presented. Algorithms of apriori spatial filtration are considered. Adaptive algorithm of postdetection filtration of average images by formation and maximized function of sharpening images is proposed and investigated.

Key words: turbulent atmosphere, optical transfer function (OTF), average long-exposure OTF, average short-exposure OTF, spatial filtration, adaptive filtration by maximization of function sharpening for image

Введение

Наличие турбулентной атмосферы Земли между зондируемым участком земной поверхности и космическим аппаратом ДЗЗ существенно ограничивает информационные возможности систем ДЗЗ [1]. Возникают две проблемы: проблема «видения» через турбулентную атмосферу и проблема «изопланатичности» зондируемого участка земной поверхности.

Суть этих проблем состоит в том, что проблема «видения» накладывает ограничения на минимальный размер деталей, разрешаемых системой атмосфера-телескоп на зондируемом участке земной поверхности, а проблема «изопланатичности» ограничивает максимальный размер зондируемого участка земной поверхности, который еще является пространственно-инвариантным к атмосферным искажениям, то есть эта проблема ограничивает поле зрения систем ДЗЗ.

Эти проблемы существенно зависят от условий наблюдения, и в частности от условий регистрации изображений ДЗЗ.

Если время регистрации au_{\Im} превышает интервал временной корреляции атмосферных флуктуаций τ_{Λ} (так называемого времени «замороженности» турбулентностей атмосферы), говорят о длинно-экспозиционной регистрации, а если время регистрации au_{\Im} меньше au_{A} , то говорят о коротко-экспозиционной регистрации. Эти два крайних случая и являются предметом наших исследований. Они существенно отличаются характером атмосферных искажений. Так, если длинно-экспозиционное изображение, усредненное по атмосферным искажениям за время $\tau_{\Im} > \tau_{A}$, обладает худшим разрешением, чем мгновенное коротко-экспозиционное изображение, регистрируемое за время $\tau_{\Im} < \tau_{A}$, то оно является пространственно-инвариантным к атмосферным искажениям во всем поле зрения системы атмосфера-телескоп, в отличие от короткоэкспозиционного изображения, состоящего в этом поле из ряда мгновенных областей изопланатичности, пространственно-неинвариантных к атмосферным искажениям.

Средняя оптическая передаточная функция (ОПФ) систем ДЗЗ

На ранней стадии развития техники ДЗЗ желание работать в широком поле зрения стимулировало получение длинно-экспозиционных изображений ДЗЗ как в отечественных космических аппаратах ДЗЗ «Ресурс-ДК-1» [2] и «Ресурс-П» [3], так и в американских космических аппаратах ДЗЗ «QuickBird», «WorldView» и «GeoEye» [4]. Используемая в них при детектировании технология ВЗН (временной задержки и накопления) приводит к регистрации длинно-экспозиционного изображения ДЗЗ, усредненного по атмосферным искажениям.

Характеристикой этого изображения является средняя длинно-экспозиционная оптическая передаточная функция, определяемая [5]:

$$\begin{aligned} \langle \tau(\mathbf{f}) \rangle_{\mathbf{z}-\mathbf{y}} &= \langle \tau(\mathbf{f}) \rangle = \\ &= \tau_0(\mathbf{f}) \exp\{-3,44[(\overline{\lambda}F\mathbf{f}/r_0(\overline{\lambda},H)]^{5/3}\}. \end{aligned}$$
(1)

С развитием техники ДЗЗ появились новые технологии, позволяющие учитывать и компенсировать атмосферные искажения.

Так нами был предложен способ комбинированного использования длинно-экспозиционного изображения и серии из N спектрально-фильтруемых коротко-экспозиционных изображений, независимых по атмосферным искажениям [6]. Этот способ позволил получать в результате детектирования и обработки среднее коротко-экспозиционное изображение, пространственно-инвариантное к атмосферным искажениям и характеризуемое средней коротко-экспозиционной оптической передаточной функцией, определяемой [5]

$$\langle \tau(\mathbf{f}) \rangle_{{}_{\mathsf{K}-\mathfrak{I}}} = \tau_0(\mathbf{f}) \times \\ \times \exp\{-3,44[\overline{\lambda}F\mathbf{f}/r_0(\overline{\lambda},H)]^{5/3}[1-(\overline{\lambda}F\mathbf{f}/D)^{1/3}]\}.$$

$$(2)$$

Аппаратурное достижение среднего короткоэкспозиционного изображения рассмотрено в работе [21].

В выражениях (1) и (2) $\mathbf{f} = (\rho_1 - \rho_2)/\overline{\lambda}F$ – пространственно-частотный вектор в апертуре ρ телескопа ДЗЗ, $\overline{\lambda}$ – средняя длина волны солнечного излучения подсвета ($\overline{\lambda} = 0,5$ мкм), F – фокусное

расстояние телескопа ДЗЗ, $\tau_0(f)$ — оптическая передаточная функция телескопа ДЗЗ, определяемая для круглой апертуры диаметра D соотношением

$$\begin{aligned} \tau_{0}(f) &= \\ &= \begin{cases} \frac{2}{\pi} \left[\arccos \frac{(\overline{\lambda}Ff)}{D} - \frac{(\overline{\lambda}Ff)}{D} \sqrt{1 - \left(\frac{\overline{\lambda}Ff}{D}\right)^{2}} \right], \\ & \text{для } \overline{\lambda}Ff \leqslant D, \\ 0, & \text{для } \overline{\lambda}Ff > D, \end{cases} \end{aligned}$$

а $r_0(\overline{\lambda}, L)$ — пространственный радиус корреляции атмосферных флуктуаций светового излучения (так называемый параметр Фрида), зависящий от протяженности трассы распространения в турбулентной атмосфере — L, длины волны — $\overline{\lambda}$, степени турбулентности вдоль трассы распространения — $C_n^2(h)$, природы неискаженного волнового фронта и определяемый для сферической волны как [5]

$$r_0(\overline{\lambda},L) = \left[0,423\left(\frac{2\pi}{\overline{\lambda}}\right)^2 \int_0^L C_n^2(h)\left(\frac{h}{L}\right)^{5/3} dh\right]^{-3/5},$$
(4)

где $C_n^2(h)$ — высотный профиль структурного параметра флуктуаций показателя преломления атмосферы, L — протяженность турбулентной трассы вертикального распространения, равная $L \approx 10$ км, а h — высота над зондируемой поверхностью Земли.

Эти функции средних ОПФ (1) и (2) являются аналитически определенными и могут быть использованы при фильтрации получаемых средних изображений. Единственным неизвестным параметром здесь является величина пространственного радиуса корреляции атмосферных флуктуаций $r_0(\overline{\lambda}, L)$, определяемая для КА ДЗЗ, находящегося на высоте H при $\overline{\lambda} = 0,5$ мкм, соотношением [7]

$$r_0(H) = 5.95 \cdot 10^{-6} H \{ I(H/L) \}^{-3/5}$$
 [M], (5)

где

$$I(H/L) = \Gamma(7/3; H/L) / \Gamma(7/3),$$
 (6)

$$\Gamma(a,b) = \int_{0}^{b} dx \cdot x^{a-1} e^{-x}$$
 — неполная гамма-функция.

Получаемые средние длинно-экспозиционные [2, 3, 4] и средние коротко-экспозиционные [6, 21] изображения ДЗЗ могут быть улучшены по разрешению алгоритмами пространственной фильтрации.

Пространственная фильтрация изображений

Зарегистрированное изображение объекта в общем случае можно представить в виде

$$I_{\mu}(\mathbf{l}) = H\left[\int I_{0}(\mathbf{r})I_{\mathrm{A-T}}(\mathbf{l},\mathbf{r})d\mathbf{r}\right] + I_{\phi}(\mathbf{l}), \qquad (7)$$

где $I_0(\mathbf{r})$ — истинное распределение интенсивности объекта, $I_{A-T}(\mathbf{l}, \mathbf{r})$ — импульсный отклик системы атмосфера-телескоп (функция рассеяния точки (ФРТ)), H — нелинейность, обусловленная процессом регистрации изображения и $I_{\phi}(\mathbf{l})$ — некоторый аддитивный шум в детектируемом изображении.

Обычно используют более простую модель детектируемого изображения, в которой пренебрегают нелинейностью процесса детектирования H [1], что допустимо, например, при рассмотрении слабоконтрастных фотографических изображений и изображений с телевизионных и ПЗС-детекторов, кроме того, предполагают, что система, формирующая изображение, является пространственно-инвариантной (изопланатичной), то есть для нее

$$I_{\mathrm{A-T}}\left(\mathbf{l},\mathbf{r}\right) = I_{\mathrm{A-T}}\left(\mathbf{l}-\mathbf{r}\right). \tag{8}$$

В этом случае детектируемое искаженное изображение (7) можно представить интегралом свертки вида

$$I_{\mu}(\mathbf{l}) = \int I_0(\mathbf{r}) I_{\mathrm{A}-\mathrm{T}}(\mathbf{l}-\mathbf{r}) d\mathbf{r}] + I_{\phi}(\mathbf{l}).$$
(9)

Пространственная фильтрация изображений вида (9), впервые предложенная и исследованная в 50-х гг. XX в. Аббе, Портером, Цернике и Марешалем [8], требует выполнения традиционной последовательности операций, представленной на рис. 1. Следует заметить, что даже в идеальном случае, когда шум отсутствует, $I_{\phi}(\mathbf{l}) = 0$, а импульсный отклик системы атмосфера-телескоп

1 0



Рис. 1. Блок-схема алгоритма пространственной фильтрации

 $I_{\rm A-T}({f l}-{f r})$ является точно известным, решение интегрального уравнения Фредгольма первого рода

$$I_{\mu}(\mathbf{l}) = \int I_0(\mathbf{r}) I_{\mathrm{A-T}}(\mathbf{l} - \mathbf{r}) \, d\mathbf{r}], \qquad (10)$$

к которому сводится проблема фильтрации, сопряжено с известными трудностями.

Это объясняется тем, что подобное интегральное уравнение является плохо обусловленным и, согласно лемме Римана–Лебега, сколь угодно малые возмущения $I_{\mu}(\mathbf{l})$ в правой части уравнения (10) могут привести к сколь угодно большим погрешностям в определении $\widehat{I_0}(\mathbf{r})$. В реальных условиях проблема пространственной фильтрации изображений становится еще более сложной.

Это обусловлено наличием аддитивных и мультипликативных шумов, нелинейностью и неинвариантностью процесса детектирования изображений, а главное, ограниченностью и чаще отсутствием априорной информации о $H[\cdot]$, $I_{\phi}(\mathbf{l})$ и $I_{A-T}(\mathbf{l}, \mathbf{r})$.

1. Априорная фильтрация

Известны: инверсная [9,10], гомоморфная [11] и некоторые другие [12] методы пространственной

фильтрации, основанные на априорном знании указанных выше функций.

Для сравнения возможностей их использования применительно к проблеме атмосферного видения был проведен эксперимент [13] по машинному моделированию искаженного атмосферой и аддитивным шумом изображения участка лунной поверхности и его последующей пространственной фильтрации. Результаты для различных отношений сигнал/шум представлены на рис. 2 и рис. 3. Отсюда видно, что при большом отношении сигнал/шум возможно получение дифракционно-ограниченных изображений. При этом наблюдается малое отличие в результатах фильтрации различными методами, ибо при большем отношении сигнал/шум все они стремятся к инверсной фильтрации. Гомоморфный фильтр визуально дает более удовлетворительное качество изображения, чем линейный винеровский фильтр. Это можно объяснить лучшим согласованием нелинейного гомоморфного фильтра с нелинейными характеристиками зрительной системы человека.

2. Апостериорная фильтрация

В идеальном случае для точного определения ОПФ системы атмосфера-телескоп необходимо иметь некоторый точечный источник в изопланатичной области с зондируемым участком.

Реально при наблюдениях ДЗЗ подобная возможность, как правило, отсутствует и возникает необходимость апостериорного определения ОПФ системы ДЗЗ, сформировавшей изображение, по самому зарегистрированному изображению. При этом искомая для фильтрации ОПФ будет существенно зависеть как от условий получения изображений (случаи длинно-экспозиционной и коротко-экспозиционной регистрации), так и от особенностей их последующей обработки (случаи обработки одного или серии изображений).

Первым методом апостериорной пространственной фильтрации применительно к проблеме «видения» явился метод фильтрации среднего длинно-экспозиционного изображения [14]. ОПФ системы атмосфера-телескоп $\langle I_{A-T}(\mathbf{f}) \rangle$ для длинноэкспозиционного изображения ДЗЗ $\langle I_{\mu}(\mathbf{l}) \rangle$ является аналитически известной и определяемой (1). При этом фильтрующая функция $\widetilde{F}(\mathbf{f})$ инверсного фильтра [9] представима в виде

$$\widetilde{F}(\mathbf{f}) = \frac{\widetilde{I}_{T_0}(\mathbf{f})}{\langle \widetilde{I}_{\mathrm{A-T}}(\mathbf{f}) \rangle} = \frac{\tau_0(\mathbf{f})}{\tau_{\mathcal{I}-\mathfrak{I}}(\mathbf{f})} = \\ = \exp\left\{3,44\left[(\overline{\lambda}F\mathbf{f})/r_0(\overline{\lambda},H)\right]^{5/3}\right\}. \quad (11)$$

Для среднего коротко-экспозиционного изображения, получаемого в [6], ОПФ системы атмосфера-телескоп определяется (2), а фильтрующая функция $\widetilde{F}(\mathbf{f})$ инверсного фильтра имеет вид

$$\widetilde{F}(\mathbf{f}) = \frac{\tau_0(\mathbf{f})}{\tau_{\mathrm{K}-\vartheta}(\mathbf{f})} = \exp\left\{3,44\left[(\overline{\lambda}\mathrm{F}\mathbf{f})/r_0(\overline{\lambda},H)\right]^{5/3} \cdot \left[1 - (\overline{\lambda}F\mathbf{f})/D\right]^{1/3}\right\}.$$
(12)

Для фильтрации среднего длинно-экспозиционного изображения участка лунной поверхности в модельном эксперименте [13] были использованы фильтрующая функция гомоморфного фильтра вида

$$\widetilde{F}(\mathbf{f}) = \left[\frac{\tau_0^2(\mathbf{f})}{\tau_0^2(\mathbf{f})\exp\left\{-6.88\left[\overline{\lambda}F\mathbf{f}/r_0(\overline{\lambda})\right]^{5/3}\right\} + \widetilde{\Phi}_N(\mathbf{f})/\widetilde{\Phi}_O(\mathbf{f})}\right]^{1/2}$$
(13)

и фильтрующая функция линейного винеровского фильтра вида

$$\widetilde{F}(\mathbf{f}) = \frac{\tau_0(\mathbf{f}) \exp\left\{-3.44[(\overline{\lambda}F\mathbf{f})/r_0(\overline{\lambda})]^{5/3}\right\}}{\tau_0^2(\mathbf{f}) \exp\left\{-6.88[(\overline{\lambda}F\mathbf{f})/r_0(\overline{\lambda})]^{5/3}\right\} + \widetilde{\Phi}_N(\mathbf{f})/\widetilde{\Phi}_O(\mathbf{f})}.$$
(14)

Из полученных выражений для фильтрующих функций средних изображений видно, что неизвестным параметром, необходимым для их реализации, является величина пространственного радиуса корреляции атмосферных флуктуаций $r_0(\bar{\lambda})$, а также величины спектральных плотностей объекта $\tilde{\Phi}_O(\mathbf{f})$ и шума $\tilde{\Phi}_N(\mathbf{f})$. Последние могут быть определены по зарегистрированному изображению на основании известных методов [15].



Рис. 2. Моделирование искаженных изображений: *a*) истинное распределение интенсивности объекта; *б*) дифракционно-ограниченное изображение; *в*) импульсный отклик системы атмосфера-телескоп; *г*) изображения объекта, искаженные атмосферой и аддитивным шумом фона



Рис. 3. Априорная пространственная фильтрация модельных изображений: *a*) винеровская фильтрация; *б*) гомоморфная фильтрация



Рис. 4. Апостериорная инверсная фильтрация среднего длинно-экспозиционного изображения планеты Сатурн: *а*) исходное для фильтрации изображение; *б*) недостаточная коррекция; *в*) перекоррекция

Что касается определения величины $r_0(\overline{\lambda})$, то в традиционных методах пространственной фильтрации длинно-экспозиционного изображения астрономического объекта [16] для этого осуществляют перебор величин неизвестного параметра в диапазоне его возможных значений. При этом пространственная фильтрация оказывается неточной. Пример недокорректированного и перекорректированного изображений, полученных при переборе параметра $r_0(\overline{\lambda})$ в инверсном фильтре (11), представлен соответственно на рис. 4, б и в.

3. Адаптивная фильтрация

Для устранения отмеченных недостатков, обусловленных произволом выбора величины параметра $r_0(\overline{\lambda},)$ в фильтрующей функции и субъективизмом оценки качества отфильтрованного изображения оператором, нами был предложен другой подход к фильтрации как длинно-экспозиционного, так и коротко-экспозиционного изображения, основанный на цифровой адаптации спектра зарегистрированного изображения [17]. При этом если для среднего изображения адаптивной коррекции подвержен только модуль пространственного спектра, то для мгновенного коротко-экспозиционного изображения адаптивной коррекции должны быть подвержены как модуль, так и фаза пространственного спектра. Цифровая адаптация спектра коротко-экспозиционного изображения ДЗЗ будет рассмотрена нами позже в отдельной статье.

Здесь же в соответствии с предложенным подходом при фильтрации среднего длинно-экспозиционного или среднего коротко-экспозиционного изображения фильтрующими функциями $\tilde{F}(\mathbf{f})$, определяемым (11)–(14), сначала в фильтрующей функции $\tilde{F}(\mathbf{f})$ выбирают максимально возможное значения величины параметра $r_0(\overline{\lambda}, H)$, определяемое в зависимости от высоты H космического аппарата ДЗЗ, по эмпирической формуле [18]

$$r_{0_{\text{MAKC}}}(\overline{\lambda}, H) = \frac{H}{L} r_0(\overline{\lambda}, L).$$
(15)

Затем формируют функцию резкости отфильтрованного изображения и максимизируют ее при адаптивной коррекции модуля пространственного спектра путем последовательного изменения (а точнее, уменьшения) величины параметра $r_0(\overline{\lambda}, H)$ в выражении для функции $\widetilde{F}(\mathbf{f})$ и итерационного повторения указанной последовательности операций. При этом весь процесс адаптивной фильтрации осуществляется автоматически без вмешательства оператора и оканчивается при достижении функцией резкости глобального максимума. Блок-схема описанного алгоритма апостериорной пространственной фильтрации представлена на рис. 5, а пример его реализации для различных циклов адаптации длинно-экспозиционного изображения планеты Юпитер дан на рис. 6.

В качестве функции резкости изображения здесь была использована функция резкости вида [19]

$$S = -\int_{\Omega_{\mathsf{H}}} \widehat{I}_{0}^{\mathsf{K}_{2}}\left(\mathbf{l}\right) d\mathbf{l} = -\int_{\Omega} |\widehat{I}_{0}^{\mathsf{K}}\left(\mathbf{f}\right)|^{2} d\mathbf{f}, \qquad (16)$$

где Ω и — область изображения, Ω — область пространственного спектра, $\widehat{I}_0^K(\mathbf{f})$ — оценка пространственного спектра для оценки адаптивно



Рис. 5. Блок-схема алгоритма адаптивной фильтрации среднего изображения

отфильтрованного изображения $\widehat{I}_0^K(\mathbf{l})$, а K — номер итерации адаптивного поиска глобального максимума функции резкости. Смума функции резкости.

Заключение

В данной статье рассмотрен и исследован адаптивный способ апостериорной пространственной фильтрации изображений, усредненных по атмосферным искажениям. Проведенные эксперименты по фильтрации средних длинно-экспозиционных изображений космических объектов, наблюдаемых с Земли через турбулентную атмосферу, подтвердили возможность повышения разрешения зарегистрированных изображений. Учитывая принцип «взаимности» распространения световых волн



Рис. 6. Адаптивная фильтрация среднего изображения планеты Юпитер: *a*) исходное для фильтрации изображение; *б*), *в*) и *г*) результаты амплитудной адаптивной фильтрации соответственно при $\hat{r}_0^K = 15$ см, 10 см и 5 см

в турбулентной атмосфере [20], можно утверждать, что рассмотренные в данной статье алгоритмы могут быть эффективно использованы и в обратном направлении, то есть для адаптивной фильтрации средних изображений ДЗЗ. Это позволит улучшить разрешение исходных зарегистрированных изображений земной поверхности и повысит их коммерческую привлекательность.

Список литературы

- Свиридов К. Н. Технологии высокого разрешения оптических систем атмосферного видения. ISBN 978-3-65969-676-3. LAP (LAMBERT Academic Publishing), 2015.
- 2. Петри Г. Российский спутник «Ресурс-ДК1»: альтернативный источник данных сверхвысокого разрешения // Геоматика, 2010, № 4, с. 38-42.

- 3. *Кирилин А. Н. и др.* Космический аппарат «Ресурс-П» // Геоматика, 2010, № 4, с. 23–26.
- Лавров В. В. Космические съемочные системы сверхвысокого разрешения // Геоинформационный портал ГИС Ассоциации, 2010, № 2.
- Fried D.L. Optical Resolution through a Randomly Inhomogeneous Medium for Very Long and Very Short Exposures // JOSA, 1966. V. 56, № 10, p. 1372–1379.
- Свиридов К. Н. Способ дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), заявка ОАО «Российские космические системы» на изобретение № 2013125540 от 03.06.2013. ПатентРФ № 2531024 от 20.08.2014.
- Fried D. L. Limiting Resolution Looking Down Through the Atmosphere // Journal of the Optical Society of America, 1966. V. 56, p. 1380–1384.
- 8. *Tsujinchi J.* Correction of optical images by compensation of aberrations and by spatial frequency filtering

in «Progress in Optics». Ed. E. Wolf, North-Holland, Amsterdam. V. 2, 1963, p. 130.

- 9. *Fienup J. R.* Space Object Imaging through the Turbulent Atmosphere // Proc. of the SPIE «Applications of Digital Image Processing», 1978. V. 149, p. 72.
- Harris J. L., Sr. Image Evaluation and Restoration // J. Opt. Soc. Am., 1966. V. 56, p. 569.
- 11. *Cole E.R.* The Removal of Unknown Image Blurs by Homomorphic filtering // Dept. of Computer Science University of Utah, ARPA Technical Report, UTEC-CSC-74-029, June, 1974.
- 12. Оппенгейм А.В., Шафер Р.В. Цифровая обработка сигналов. М.: Связь, 1979.
- 13. *Breedlove J. R., Jr.* Digital Image Processing of Simulated Turbulence and Photon Noise Degraded Images of Extended Objects // Proc. of the SPIE «Imaging through the Atmosphere», 1976. V. 75, p. 155.
- McGlamery B. L. Restoration of Turbulence-Degraded Images // J. Opt. Soc. Am., 1967. V. 57, p. 293.
- Helstrom C. W. Image Restoration by the Method of Least Squares // J. Opt. Soc. Am., 1967. V. 57, p. 297.

- 16. Дудинов В.Н., Цветкова В.С., Кришталь В.А., Хованский Н.А. Обработка астрономических изображений методами когерентной оптики // Вестник ХГУ, 1974, № 117, с. 19.
- 17. Свиридов К.Н., Бакут П.А., Ряхин А.Д., Устинов Н.Д. Адаптивный способ формирования изображения. Авторское свидетельство № 190078 от 04.07.1983.
- Свиридов К. Н. О предельном разрешении аэрокосмических систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2014, т. 1, вып. 1, с. 34–40.
- Muller R.A., Buffington A. Real-time correction of atmospherically degraded telescope Images through image sharpening // J. Opt. Soc. Am., 1974. V. 64, p. 1200.
- 20. *Shapiro J. H.* Reciprocity of the turbulent atmosphere // J. Opt. Soc. Am., 1971, 61, p. 492.
- Свиридов К. Н. Дистанционное зондирование Земли с адаптивной компенсацией случайных наклонов волнового фронта // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2015, т. 2, вып. 3, с. 12–22.

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ 2015, том 2, выпуск 4, с. 50–54

— РАДИОТЕХНИКА И КОСМИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ ——

УДК 621.396.67

Расширение тактико-технических характеристик антенно-приемных комплексов на базе антенных установок типа ТНА

В. И. Демченко, Д. В. Катков, Р. Н. Корсун, Ю. И. Кондрашов, А. Н. Куковский

ФГУП «Ростовский-на-Дону НИИ радиосвязи» Федеральный научно-производственный центр

e-mail: rniirs@rniirs.ru

Аннотация. В работе представлены технические решения по построению комплектов для повышения тактикотехнических характеристик антенно-приемных комплексов СВЧ-диапазона на базе антенных установок ТНА. Проведен анализ технических требований к модернизированным антенно-приемным комплексам, существующих технических решений по построению антенно-приемных комплексов. Предложенные технические решения проверены на шести образцах антенно-приемных комплексов на базе антенных установок ТНА.

Ключевые слова: антенно-приемные комплексы, телеметрические наземные антенны, земные станции спутниковой связи, расширение TTX, зеркальные системы, антенно-приемные устройства, комплект модернизации

Improving Of Tactical-Technical Characteristics of the Antenna-Receiving Complexes based on TTA antennas set

V. I. Demchenko, D. V. Katkov, R. N. Korsun, Yu. I. Kondrashov, A. N. Kukovskiy

Federal State Unitary Enterprise "Rostov-on-Don State Research Institute of Radio Communication" Federal Research & Production Center

e-mail: rniirs@rniirs.ru

Abstract. Scheme of modernization kit construction allows to make serial deliveries of kits for rigging ups and improvement of tactical-technical characteristics of ARC models, based on TTA antennas set. Propositioned technical solutions were tested on 6 samples of ARC, based on TTA. Positive results of tests confirmed correct choice of technical solutions in modernization kits constructing.

Key words: antenna-receiving complex, telemetric terraneous antenna, terraneous stations of satellite communication, improving of tactical-technical characteristics, reflector systems, antenna-receiving devices, modernization kit

На территории Российской Федерации эксплуатируются антенно-приемные комплексы на базе антенных установок ТНА, введенные в эксплуатацию в 90-х гг. прошлого века. Металлоконструкции опорно-поворотных устройств и зеркальных систем комплексов находятся в удовлетворительном состоянии, а антенно-фидерные тракты, системы наведения и тракты трансляции сигналов выработали свой ресурс, морально устарели и не позволяют выполнять весь комплекс возлагаемых на них задач. Сложной технической задачей в этом случае является создание универсальных комплектов, обеспечивающих повышение тактико-технических и эксплуатационных характеристик крупноапертурных антенно-приемных комплексов (АПК), так как антенные установки типа ТНА имеют свои индивидуальные особенности.

Цель работы — повышение эффективности эксплуатируемых АПК на базе антенных установок ТНА, достигаемое решением следующих задач:

 – разработкой структуры комплектов, обеспечивающих повышение TTX антенно-приемных комплексов на основании анализа и обобщения требований, предъявляемых к современным антенноприемным комплексам;

 проверкой и использованием предложенных решений на шести образцах АПК;

 подготовкой к серийным поставкам комплектов модернизации.

Анализ современных требований к параметрам антенн для земных станций спутниковой связи с учетом национальных и международных норм и рекомендаций на параметры антенн [1, 2, 3, 4], а также опыта эксплуатации антенн для земных станций спутниковой связи приводит к необходимости на модернизированных АПК на базе антенных установок ТНА обеспечить:

– пространственно-частотный поиск, обнаружение, слежение и одновременный прием излучений геостационарных искусственных спутников Земли в зоне радиовидимости в L-, C-, X-, и Ки-диапазонах частот;

– пространственно-частотный поиск, обнаружение, слежение и одновременный прием излучений искусственных спутников Земли на низких, средних и высокоэллиптических орбитах в VHF-, UHF-, L-, S- и X-диапазонах частот; поляризационную селекцию принятых сигналов с ортогональными круговыми и линейными поляризациями с развязкой не менее 27 дБ;

 оперативное управление составными частями изделия с возможностью дистанционной диагностики их технического состояния;

усиление, коммутацию и трансляцию принятых сигналов на расстояние до 600 м.

Для формирования структуры комплектов модернизации проведено техническое освидетельствование шести антенно-приемных комплексов: ТНА-400, ТНА-210, ТНА-110Ю, ТНА-110П, ТНА-97, ТНА-97УП.

Результаты технического освидетельствования показали:

 состояние опорно-поворотного устройства и зеркальной системы всех антенн является удовлетворительным;

 – антенно-приемные комплексы оснащены как однозеркальными, так и двухзеркальными системами облучения, выполненными по схемам Грегори и Кассегрена [5];

 системы наведения находятся в неудовлетворительном состоянии, не обеспечивают режимы работы в соответствии с техническими условиями изделий;

 – антенно-фидерные устройства выработали свой ресурс, морально устарели и не обеспечивают требуемого для выполнения поставленных задач совмещения диапазонов частот;

длины кабельных трасс составляют от 50 до 300 м;

- комплекты ЗИП израсходованы;

– комплекты КИП устарели и находятся в неудовлетворительном состоянии.

Таким образом, для расширения тактикотехнических и эксплуатационных характеристик антенно-приемных комплексов на базе антенных установок ТНА с учетом вышеизложенного необходимо:

 оснастить АПК антенно-приемными трактами и комплектами малошумящих преобразователей сигналов;

оснастить АПК новыми системами наведения;

 оснастить АПК системой управления и контроля (диагностики);



Рисунок. Структурная схема универсальных комплектов модернизации АПК на базе антенных установок ТНА

оснастить АПК трактами трансляции сигналов и полнодоступным коммутатором сигналов, обеспечивающими усиление, коммутацию и трансляцию сигналов на расстояние до 600 м;

- оснастить АПК комплектами ЗИП и КИП;

 доработать зеркальные системы АПК до двухзеркальных схем.

На основании вышеизложенного может быть сформирована структура комплектов модернизации АПК на базе антенных установок ТНА. Структура универсального комплекта модернизации представлена на рисунке.

Далее будут рассмотрены ключевые решения по построению составных частей комплектов модернизации.

Для оптимального оснащения антенно-приемных комплексов приемными трактами [6] были разработаны четыре типа антенно-приемных устройств:

- АПУ-1 (диапазоны VHF/UHF);
- АПУ-2/8 (диапазоны L/S/X);
- АПУ-1.5 (диапазон L);
- АПУ-4/7/11/12 (диапазоны C/X/Ku).

АПУ-1 реализован на базе четырех двухканальных логопериодических излучателей, устанавливаемых на тыльной стороне контррефлектора.

АПУ-2/8 обеспечивает формирование суммарно-разностных диаграмм для обеспечения режима автосопровождения, при этом в L- и S-диапазонах формирование диаграмм производится с использованием четырех двухканальных логопериодических излучателей, расположенных вокруг облучателя X-диапазона, а в X-диапазоне происходит

формирование суммарно-разностной диаграммы на моде TE21.

АПУ-1.5 реализован в соответствии с патентом на полезную модель [7] формированием дополнительного канала путем введения в конструкцию антенны излучателя, содержащего два ортогональных полуволновых вибратора, закрепленных у вершины контррефлектора.

Облучатели C/X/Ки в связи с индивидуальными особенностями изделий вынесены из состава АПУ-4/7/11/12. Облучатели разработаны для каждого типа АПК, в качестве базовой конструкции используется гофрированный рупорный облучатель с модулированной внутренней структурой [8], обладающей рядом преимуществ:

 низкий уровень кросполяризационного излучения;

 слабая зависимость положения фазового центра от частоты;

– меньшие габариты.

Устройство усиления, коммутации и трансляции построено с учетом обеспечения длины кабельной трассы до 600 м. При этом применение волоконно-оптических трактов трансляции нецелесообразно. Состав тракта трансляции определяется длиной трассы, в него входит от одного блока магистральных усилителей (при длине до 150 м) до четырех (при длине до 600 м). Количество магистральных усилителей варьируется от двух до десяти в зависимости от количества каналов (диапазонов частот) в АПК. Магистральные усилители обеспечивают оперативную регулировку коэффициента усиления в пределах от 0 до 30 дБ. Управление и диагностика магистральных усилителей осуществляется по интерфейсу RS-485. Также в состав устройства усиления, коммутации и трансляции включен полнодоступный коммутатор ПКС 16 × 8, обеспечивающий независимую коммутацию любого из входов на любой из выходов. Управление и диагностика ПКС 16×8 осуществляется по сети Ethernet.

Системы наведения максимально унифицированы, но имеют индивидуальные особенности для каждого типа АПК, а выполнены на базе шкафов управления с современными тиристорными преобразователями Simoreg DCMaster.

Система управления и контроля реализована на базе ПЭВМ с модулем цифровой обработки

ADP201P1/ADMDDC5016. Такой вариант построения позволяет обеспечить диагностику состояния всех составных частей АПК через интерфейс RS-485, за исключением системы наведения, взаимодействие с которыми осуществляется по сети Ethernet по универсальному для всех типов АПК протоколу. Диагностика заключается в циклическом опросе составных частей, каждому из которых присвоен свой IP-адрес, результат опроса отображается на мониторе оператора.

Комплект доработки зеркальных систем разрабатывался для каждой АПК индивидуально и включал в себя при необходимости:

- колонну облучателя;

- элементы установки АВУ;

- контррефлектор.

В результате проведения монтажных и пусконаладочных работ были расширены тактикотехнические и эксплуатационные характеристики антенно-приемных комплексов ТНА-400, ТНА-210, ТНА-110Ю, ТНА-110П, ТНА-97, ТНА-97УП. Положительные результаты испытаний модернизированных АПК подтверждены актами Государственных испытаний. Разработанной документации присвоена литера «01», комплектам модернизации АПК присвоены коды ЕСКП и ОКП.

Разработанные комплекты модернизации позволяют осуществлять расширение тактико-технических и эксплуатационных характеристик АПК на базе антенных установок ТНА в два этапа:

- серийная поставка комплекта модернизации;

монтаж, пусконаладочные работы и ввод
 в эксплуатацию модернизированного АПК.

Выводы:

1. Проведенный анализ требований и существующих решений по построению АПК, их углубленное техническое освидетельствование позволили разработать структуру комплектов, обеспечивающих проведение модернизации в наиболее короткие сроки и с наименьшими затратами. При этом предложено использовать максимально унифицированный комплект, в котором в зависимости от типа ТНА вносится минимальный объем изменений.

2. Разработанные комплекты модернизации позволили расширить тактико-технические и эксплуатационные характеристики шести образцов АПК на базе антенных установок ТНА. 3. Предложенная схема построения комплектов модернизации позволяет осуществлять серийные поставки комплектов для расширения тактикотехнических и эксплуатационных характеристик конкретных образцов АПК на базе антенных установок ТНА без проведения углубленного технического освидетельствования.

4. Эффективность эксплуатации АПК, оснащенных комплектами модернизации, повышается за счет:

 применения многодиапазонных антенно-приемных трактов;

 доработки зеркальных систем до двухзеркальных схем;

 применения системы управления и контроля, обеспечивающей оперативное управление и диагностику составных частей изделия;

– применения системы наведения, выполненной на базе современных схемных решений.

Список литературы

1. Rec. ITU-R S.465-5 Reference earth-station radiation pattern for use coordination and interference assessment in the frequency range from 2 to 30 GHz.

- 2. Rec. ITU-R S.580-5 Radiation diagrams use as objectives for antennas of earth stations operating with geostationary satellites.
- 3. Общие технические требования на станции земные для линий спутниковой связи, работающие с ИСЗ на геостационарной орбите в диапазонах частот 6/4 ГГц и 14/11-12 ГГц. Утверждены Госкомитетом Российской Федерации по связи и информатизации, 1997 г.
- Справочник по спутниковой связи и вещанию. Под редакцией Л. Я. Кантора. М.: Радио и связь, 1985. 268 с.
- 5. *Вуд П.* Анализ и проектирование зеркальных антенн. Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1984. 208 с.
- 6. Покрас А.М., Сомов А.М., Цуриков Г.Г. Антенны ЗССС. М.: Радио и связь, 1985. 215 с.
- 7. Волошин В.А., Высоцкий В.М., Крикунов В.В., Мешков А.В., Щербинин В.И. Двухзеркальная антенна Кассегрена. Патент на полезную модель № 13725 от 10.05.2000.
- 8. Фролов О.П., Вальд В.П. Зеркальные антенны для земных станций спутниковой связи. М.: Горячая линия-Телеком, 2008. 496 с.

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ 2015, том 2, выпуск 4, с. 55–58

— РАДИОТЕХНИКА И КОСМИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ —

УДК 621.391:623.61

Повышение устойчивости радиолиний передачи информационно-управляющих сигналов к мешающим факторам

С. Н. Кириллов¹, И. В. Лукашин², Ю. И. Полтавец³, А. В. Поляков⁴, С. А. Круглов⁵

¹∂. т. н.

^{1,2}Рязанский государственный радиотехнический университет ^{3,4,5}АО «Российские космические системы»</sup>

e-mail: lukashin.iv@yandex.ru

Аннотация. Произведен анализ устойчивости радиолинии передачи информационно-управляющих сигналов, построенной на основе профиля CSS стандарта IEEE 802.15.4а, в канале связи с многолучевым распространением и доплеровским смещением частоты. Показано, что данная радиолиния обладает высокой устойчивостью при функционировании в канале связи с многолучевым распространением и повышенной устойчивостью к доплеровскому смещению частоты по сравнению с использованием фазоманипулированных сигналов. Так, для скорости перемещения подвижного объекта со скоростью до 300 км/ч требуется увеличение отношения сигнал/шум всего на 0,1 дБ при вероятности битовой ошибки 10⁻⁴.

Ключевые слова: IEEE 802.15.4а, CSS, ЛЧМ-импульс, многолучевое распространение, доплеровское смещение частоты

Improving of the Command Data Radio Link Stability to Interfering Factors

S. N. Kirillov¹, I. V. Lukashin², Yu. I. Poltavec³, A. V. Polyakov⁴, S. A. Kruglov⁵

¹doctor of engineering science ^{1,2}Ryazan state radio engineering university ^{3,4,5}Joint Stock Company "Russian Space Systems"

e-mail: lukashin.iv@yandex.ru

Abstract. Analysis of the command data radio link's in communication channel with multipath and the Doppler shift is made. The radio link is based on IEEE 802.15.4a standard CSS profile. It is shown the radio link possesses a high stability, when functioning in communication channel with the multipath and increased stability to the Doppler shift compared with the phase-shift keyed signal.

For example the velocity of network point with a speed up to 300 km/h requires increase in the signal-noise ratio on 0,1 dB with a bit error probability 10^{-4} .

Key words: IEEE 802.15.4a, profile CSS, LFM pulse, multipath, Doppler shift

К радиолиниям высокоскоростных подвижных объектов (ВСПО), таких как беспилотные летательные аппараты, предъявляются повышенные требования к эффективному функционированию в условиях доплеровского смещения частоты и многолучевого распространения. В целом стандарт IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) 802.15.4a [1] профиль CSS (Chirp Spread Spectrum) отражает способ построения радиолинии, которая обеспечивает устойчивость к вышеперечисленным мешающим факторам. Стандарт IEEE 802.15.4a ориентирован на организацию беспроводных сетей мониторинга и контроля параметров различных радиотехнических объектов.

Представляет интерес анализ возможности использования способа построения радиолинии на основе стандарта IEEE 802.15.4а профиля CSS в каналах передачи информационно-управляющих сигналов ВСПО при скорости передачи до 10 Мбит/с.

Профиль CSS является одним из первых стандартов, в котором регламентируется использование метода расширения спектра импульсами с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). Согласно этому профилю ЛЧМ-импульсы имеют длительность, равную $T_{\rm имп} = 1,1875$ мкс, и коэффициент модуляции частоты, равный $\mu = 7,3158 \times$ $imes 10^{12}$ c $^{-2}$, вследствие чего база сигнала равна $B = \mu T_{\text{имп}}^2 = 10,3.$ Согласно этому стандарту набор из 4 ЛЧМ-импульсов образует ЛЧМ-символ. Всего возможны четыре варианта ЛЧМ-импульсов, которые получаются путем вариации законов изменения частоты: возрастающей или убывающей, и двух частотных полос. В ЛЧМ-символе определено четыре закона изменения частоты (рис. 1), составленные по критерию минимума коэффициента взаимной корреляции между символами. Для минимизации коэффициента взаимной корреляции разработчики стандарта дополнительно ввели временные паузы между ЛЧМ-символами. Временные паузы задаются параметром τ_m , где $m = \overline{1, 4}$, который определяет временной сдвиг четных ЛЧМ-символов.

Математическое представление непрерывного видеосигнала во временной области, построенного из ЛЧМ-символов с учетом временных пауз



Рис. 1. Варианты законов изменения частоты ЛЧМ-символов в стандарте IEEE 802.15.4a

описывается следующим выражением [1]:

$$s(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=1}^{4} \exp(j\mathbf{c}_{n,k}) \cdot s_m(t, \omega_{k,m}, T_{n,k,m}) =$$

=
$$\sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=1}^{4} \exp(j\mathbf{c}_{n,k}) \cdot \exp\left[j\omega_{k,m}(t - T_{n,k,m}) + j\xi_{k,m}\frac{\mu}{2}(t - T_{n,k,m})^2\right] \cdot W(t - T_{n,k,m}), \quad (1)$$

где n — порядковый номер ЛЧМ-символа, m — номер закона изменения частоты ЛЧМ-символа, $k = \overline{1,4}$ — номер ЛЧМ-импульса в составе ЛЧМ-символа, $\mathbf{c}_{n,k}$ — фаза информационного символа, $\omega_{k,m}$ — центральная частота ЛЧМ-импульса, $\xi_{k,m}$ — определяет закон изменения частоты внутри ЛЧМ-импульса, $T_{n,k,m} = \left(k + \frac{1}{2}\right) T_{\rm имп} + n T_{\rm сим} - \left(1 - (-1)^n\right) \tau_m$ — время начала ЛЧМ-импульса, W(t) — весовая функция, $T_{n,k,m} = \left(k + \frac{1}{2}\right) T_{\rm имп} + n T_{\rm сим} - (1 - (-1)^n) \tau_m$ — время начала ЛЧМ-импульса, Все значения параметров $\omega_{k,m}$, $\xi_{k,m}$, τ_m определены в [1].

При описании стандарта IEEE 802.15.4а отсутствуют сведения по построению приемного тракта для профиля CSS. В соответствии с рекомендацией, приведенной в [2], приемный тракт состоит из банка фильтров (БФ) и блока демодуляции и декодирования (БДД) (рис. 2). Банк фильтров, описанный в [3], состоит из 4 фильтров с импульсными характеристиками $h_{k m}(t)$, соответствующими ЛЧМ-импульсам в составе ЛЧМ-символа. Блок стробирования осуществляет фиксирование значений откликов согласованных фильтров в моменты окончания ЛЧМ-импульсов. Блок демодуляции и декодирования осуществляет операции, связанные с дифференциальным декодированием, фазовой демодуляцией (ФД), деперемежением (Д) и биортогональным декодированием (БД) сигнала.



Рис. 2. Функциональная схема приемного тракта

При разработке и исследовании радиолиний, работающих в условия многолучевого распространения, обычно ограничиваются рассмотрением моделей с дискретным многолучевым распространением [4]. Огибающая импульсной характеристики каналов передачи информации ВСПО в любой момент времени распределена по рэлеевскому закону распределения.

Для исследования устойчивости радиолинии, построенной на основе профиля CSS, в условиях доплеровского смещения частоты и многолучевого распространения осуществлено имитационное моделирование для канала передачи информации. Достоверность работы имитационной модели подтверждается тем, что полученные зависимости вероятности битовой ошибки от ОСШ (отношения сигнал/шум) в канале связи с аддитивным белым гауссовским шумом для диапазона вероятностей битовой ошибки $10^{-3}-10^{-5}$ имели отклонения экспериментальной зависимости от теоретической, приведенной в [1], которые не превышали 0,3 дБ для всех законов изменения частоты в ЛЧМ-символе. Имитационная модель обеспечивала вероятность битовой ошибки $P_0 = 10^{-5}$ при q = -5 дБ.

Проведенные исследования радиолинии, построенной на основе профиля CSS, показали высокую эффективность по сравнению со случаем использования фазоманипулированных сигналов при функционировании в условиях многолучевого распространения и доплеровского смещения частоты. При исследовании влияния доплеровского смещения частоты на функционирование радиолинии было показано, что для скорости перемещения ВСПО до 300 км/ч отношение сигнал/шум увеличивается не более чем на 0,1 дБ при вероятности битовой ошибки $P_{
m o}=10^{-4}.$ В случае исследования влияния многолучевого распространения было показано, что при использовании профиля CSS влияние меньше, чем при использовании фазоманипулированных мультипликативных составляющих сигналов.

Таким образом, проведенные исследования радиолинии ВСПО, построенной на основе профиля CSS, показали, что используемая схема приемного тракта обладает более высокой эффективностью при функционировании в многолучевых каналах связи по сравнению с фазоманипулированными сигналами. Дополнительное повышение устойчивости радиолинии в данном случае обеспечивает наличие схемы многолучевого разнесения [5]. Также исследования продемонстрировали повышенную устойчивость радиолинии к доплеровскому смещению частоты.

Список литературы

1. IEEE Std 802.15.4a-2007. Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer

(PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs).

- De Dominicis C. M., Ferrari P., Flammini A., Sisinni E. Wireless Sensors Exploiting IEEE 802.15.4a for Precise Timestamping // International IEEE Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication, Portsmouth: IEEE, 2010, p. 48–54.
- 3. Abou Bakr Othman M., Farhang-Boroujeny B., Schmid T. Exploiting Quasi-Orthogonal Chirp Sig-

nals in Multi-User Access Communication Systems. http://www.academia.edu/2045074/Exploiting_Quasi-Orthogonal_Chirp_Signals_in_Multi-User_Access_ Communication_Systems

- 4. Волков Л.Н., Немировский М.С., Шинаков Ю.С. Системы цифровой радиосвязи. М.: Эко-Трендз, 2005. 392 с.
- 5. Ипатов В. Расширение спектра и CDMA. Принципы и приложения. М.: Техносфера, 2007. 488 с.

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ 2015, том 2, выпуск 4, с. 59–65

— РАДИОТЕХНИКА И КОСМИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ ———

УДК 621.37

Проблемы синтеза адаптивных фильтров методами генетических алгоритмов с программной реализацией на языке C++ в ОС МСВС

В. М. Ватутин¹, С. А. Донцов², Ю. В. Ефремов, А. Н. Сиренко

¹д. т. н., проф., ²к. т. н. АО «Российские космические системы»

e-mail: vladmvat@mail.ru

Аннотация. При решении задачи излучения устойчивых сигналов, имеющих постоянный спектральный состав, требуется синтезировать уравнение соответствующей модели сигнала.

Для синтеза предлагается использовать одну из разновидностей генетических алгоритмов — метод группового учета аргументов (МГУА). Фактически синтезированное этим методом уравнение является оптимальным фильтром — частным представлением разложения в ряд Лотки-Вольтерра.

Получение результата разложения — результат работы генетического алгоритма.

Проблемами при синтезе оптимального фильтра являются правило разделения данных, правило генерации моделейпретендентов, метод получения коэффициентов модели и форма квадратичного критерия отбора модели.

В докладе приводятся алгоритмы для решения перечисленных проблем, реализованные на языке C++ и работающие под управлением ОС MCBC.

Особый интерес представляет модифицированный алгоритм Зейделя для определения коэффициентов оптимальной модели, способный работать с плохо определенными матрицами, имеющими значение определителя близким или равным нулю.

Ключевые слова: синтез оптимального фильтра, метод группового учета аргументов, системы линейных уравнений, генетический алгоритм

Problems of Synthesis of Adaptive Filter Techniques of Genetic Algorithms to Software in C++ OS MSVS

V. M. Vatutin¹, S. A. Dontsov², Yu. V. Efremov, A. N. Sirenko

¹doctor of engineering science, professor, ²candidate of engineering science Joint Stock Company "Russian Space Systems"

e-mail: vladmvat@mail.ru

Abstract. In solving the problem of radiation stable signals with constant spectral composition is required to synthesize the appropriate signal model equation.

For the synthesis is proposed to use one of the types of genetic algorithms -a method of group account of arguments (GMDH). In fact, synthesized by this method the equation is the optimal filter -a private performance of the series expansion Lotka–Volterra.

The results obtained expansion — the result of a genetic algorithm.

The problems in the synthesis of the optimal filter are usually separate data, usually generate models of applicants, the method of obtaining the coefficients of the model and the form of the quadratic model selection criterion.

The report provides algorithms for solving these problems, implemented in C++ and runs under OS MSVS.

Of particular interest is the modified algorithm for determining the coefficients Seidel optimal model capable of operating with a poorly-defined matrices having determinant value close or equal to zero.

Key words: the synthesis of the optimal filter, method of group account of argume, a system of linear equations, genetic algorithm

Метод группового учета аргументов

Метод группового учета аргументов — это семейство индуктивных алгоритмов для математического моделирования мультипараметрических данных. Метод основан на рекурсивном селективном отборе моделей, на основе которых могут строиться более сложные модели.

Автор метода — академик АН СССР, академик Национальной академии наук Украины (НАНУ), директор Института кибернетики им. В. М. Глушкова Алексей Григорьевич Ивахненко.

Метод группового учета аргументов применяется в самых различных областях науки и техники для анализа данных и отыскания закономерностей для прогнозирования и моделирования систем, решения задач оптимизации и распознавания образов. Индуктивные алгоритмы МГУА дают уникальную возможность автоматически находить взаимозависимости, выбрать оптимальную структуру модели или сети и увеличить точность существующих алгоритмов.

Этот подход самоорганизации моделей принципиально отличается от обычно используемых дедуктивных методов. Он основан на индуктивных принципах — нахождение лучшего решения основано на переборе всевозможных вариантов.

Метод группового учета аргументов состоит из нескольких алгоритмов для решения разных задач. В него входят как параметрические алгоритмы, так и алгоритмы кластеризации, комплексирования аналогов и вероятностные алгоритмы. Этот подход к самоорганизации уравнений основан на переборе постепенно усложняющихся моделей и выборе наилучшего решения согласно минимуму внешнего критерия, в общем случае — квадратичного. В качестве базисных моделей могут использоваться не только алгебраические полиномы, но и разностные, нелинейные и вероятностные функции.

Анализ входных данных

Отсчеты модулированного сигнала поступают ∂a_0 с выхода приемного устройства. В итоге на вход программы поступает вектор значений, взятых Отсюда полу с определенной частотой дискретизации. Коли- уравнений Гаусса.

чество измерений может варьироваться в очень широких пределах.

Для того чтобы все данные находились в одном диапазоне изменения значений, необходимо произвести нормализацию. Это поможет легко сопоставлять полученные значения и повышает обусловленность матриц, предназначенных для получения коэффициентов моделирующего уравнения.

Из ряда входных отсчетов получаем систему уравнений. Для этого выберем уравнение линии регрессии в виде линейной разностной схемы, представимой в следующем виде:

$$y_N = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + \ldots + a_N x_N =$$

= $a_0 + \sum_{i=1}^N a_i x_i$,

где N — число членов линейного разностного уравнения (интервал корреляции со значением выходного сигнала модели y_N), а x — значение сигнала, отстоящее по времени на i шагов назад от текущего (N-го) значения сигнала.

Для каждой точки *q* экспериментальных данных можно подсчитать величину квадрата отклонения (ошибки):

$$\delta^2 = (q - q_0^2).$$

Суммируя уравнения такого вида для всех *N* экспериментальных точек, получим выражение для средней квадратической ошибки:

$$\Delta^2 = \sum_{i=1}^N \delta_t^2.$$

Для вычисления минимума среднеквадратической ошибки находим выражение для частных производных (по числу определяемых коэффициентов уравнения регрессии) и приравниваем их к нулю:

$$\frac{\partial \Delta^2}{\partial a_0} = 0, \ \frac{\partial \Delta^2}{\partial a_1} = 0, \ \frac{\partial \Delta^2}{\partial a_2} = 0, \ \dots$$

Отсюда получим систему так называемых уравнений Гаусса.



Разделение данных на обучающую и проверочную выборки

Основной критерий требует разбиения выборки минимум на две равные части: Обучающую (training sample) и Проверочную (validation sample). Обычно таблица исходных данных делится на три части: проверочная, обучающая и экзаменационная (test sample). Обучающая выборка используется для получения оценок параметров модели (например, коэффициентов регрессии), а проверочная — для выбора структуры модели.

Обучающая выборка — выборка, по которой производится настройка (оптимизация параметров) модели зависимости.

Если модель зависимости построена по обучающей выборке, то оценка качества этой модели, сделанная по той же выборке, оказывается, как правило, неустойчивой, то есть становящейся неточной при малых изменениях данных. Это нежелательное явление называют переобучением. На практике оно встречается очень часто. Хорошую эмпирическую оценку качества построенной модели дает ее проверка на независимых данных, которые не использовались для обучения.

Тестовая (или контрольная) выборка — выборка, по которой оценивается качество построенной модели. Качество получаемой модели оценивается по величине специального квадратичного критерия.

Оценку качества, сделанную по тестовой выборке, можно применить для выбора наилучшей модели. Однако тогда она снова окажется смещенной. Для получения несмещенной оценки выбранной модели приходится выделять третью выборку. Несмещенной называется оценка, математическое ожидание которой равно оцениваемому параметру.

Проверочная выборка — выборка, по которой осуществляется выбор наилучшей модели из множества моделей, построенных по обучающей выборке.

Метод Гаусса–Зейделя для решения систем линейных алгебраических уравнений

Для генерации уравнений-претендентов необходимо решать системы линейных уравнений. Для этого можно воспользоваться методом Гаусса– Зейделя. Преимущество метода заключается в способности решать разреженные матрицы — матрицы с преимущественно нулевыми элементами.

Метод Гаусса-Зейделя — классический итерационный метод решения системы линейных уравнений.

В виде исходных данных задачи имеем систему линейных уравнений вида

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + \ldots + a_{1n}x_n = b_1, \\ \dots \\ a_{n1}x_1 + \ldots + a_{nn}x_n = b_n. \end{cases}$$

Чтобы пояснить суть метода, перепишем задачу в виде:

$$\begin{cases} a_{11}x_1 = -a_{12}x_2 - a_{13}x_3 - \dots - a_{1n}x_n + b_1, \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 = -a_{23}x_3 - \dots - a_{2n}x_n + b_2, \\ \dots \\ a_{(n-1)1}x_1 + a_{(n-1)2}x_2 + \dots + a_{(n-1)(n-1)}x_{(n-1)} = \\ = -a_{(n-1)n}x_n + b_{n-1}, \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{n(n-1)}x_{n-1} + a_{nn}x_n = b_n. \end{cases}$$

Здесь в j-м уравнении мы перенесли в правую часть все члены, содержащие x_i , для i > j. Эта запись может быть представлена

$$(L+D)\mathbf{x} = -U\mathbf{x} + \mathbf{b},$$

где в принятых обозначениях D означает матрицу, у которой на главной диагонали стоят соответствующие элементы матрицы A, а все остальные нули; тогда как матрицы U и L содержат верхнюю и нижнюю треугольные части A, на главной диагонали которых нули.

Итерационный процесс в методе Гаусса-Зейделя состоится по формуле

$$(L+D)\mathbf{x}^{(k+1)} = -U\mathbf{x}^{(k)} + \mathbf{b}, \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

После выбора соответствующего начального приближения $\mathbf{x}^{(0)}$.

Метод Гаусса–Зейделя можно рассматривать как модификацию метода Якоби. Основная идея модификации состоит в том, что новые значения $\mathbf{x}^{(i)}$ используются здесь сразу же по мере получения, в то время как в методе Якоби они не используются до следующей итерации:

$$\begin{split} \left\|Ax^{(k+1)} - b\right\| &\leqslant \varepsilon, \\ \begin{cases} x_1^{(k+1)} = c_{12}x_2^{(k)} + c_{13}x_3^{(k)} + \ldots + c_{1n}x_n^{(k)} + d_1, \\ x_2^{(k+1)} = c_{21}x_1^{(k+1)} + c_{23}x_3^{(k)} + \ldots + c_{2n}x_n^{(k)} + d_2, \\ \ldots \\ x_n^{(k+1)} = c_{n1}x_2^{(k+1)} + c_{n2}x_2^{(k+1)} + \ldots \\ \ldots + c_{n(n-1)}x_{n-1}^{(k+1)} + d_n, \end{split}$$

где

$$c_{ij} = \begin{cases} -\frac{a_{ij}}{a_{ii}}, & j \neq i, \\ 0, & j = i. \end{cases} \quad d_i = \frac{b_i}{a_{ii}}, \quad i = 1, \dots, n.$$

Таким образом, i-я компонента (k + 1)-го приближения вычисляется по формуле

$$x_i^{(k+1)} = \sum_{j=1}^{i-1} c_{ij} x_j^{(k+1)} + \sum_{j=i}^n c_{ij} x_j^{(k)} + d_i, \quad i = 1, \dots, n$$

Условия окончания итерационного процесса Зейделя при достижении точности ε в упрощенной форме имеет вид

$$\left\|x^{(k+1)} - x^{(k)}\right\| \leqslant \varepsilon.$$

Более точное условие окончания итерационного процесса имеет вид

$$\left\|Ax^{(k+1)} - b\right\| \leqslant \varepsilon$$

и требует больше вычислений. Благодаря критерию окончания итерационного процесса, алгоритм решения систем линейных уравнений хорошо подходит для разреженных матриц, так как при их решении не происходит зацикливания.

Генерация моделей-претендентов

Целью МГУА является получение модели в результате перебора моделей из индуктивнопорождаемого множества. Параметры каждой модели настраиваются так, чтобы доставить минимум выбранному внешнему критерию. Различают два основных вида алгоритмов — однорядный и многорядный.

Все алгоритмы МГУА воспроизводят схему массовой селекции: последовательно порождаются модели возрастающей сложности. Каждая модель настраивается: методом наименьших квадратов находятся значения параметров. Из моделей претендентов выбираются лучшие в соответствии с выбранным критерием. Многорядные алгоритмы могут вычислять остатки регрессионных моделей после каждого ряда селекции или не вычислять, при этом используются исходные данные.

Каждая полиномиальная модель однозначно определяется набором индексов *s* входящих в него мономов (одночленов):

$$y = a_0 + w(s)a(s).$$

Элементы вектора w — коэффициенты при мономе полинома; элементы вектора a — результат произведения свободных переменных соответствующих мономов. Индексы $s \in \{1, \ldots, F_0\}$ есть индексы мономов, входящих в модель. Иначе производная модель

$$y = a_0 + w(s)a(s)$$

порождается набором индексов $s \in \{1, ..., F_0\}$, включающих соответствующие элементы векторов

$$w = \langle w_1, \dots, w_{F_0} \rangle$$
 и $a = \langle a_1, \dots, a_{F_0} \rangle.$

При ограничении полинома числом *R* число мономов полинома равно

$$F_0 = \sum_{r=1}^R \bar{C}_r^P = \sum_{r=1}^R \frac{(r+p-1)!}{P!(r-1)!}$$

а число моделей первого ряда соответственно равно 2^{F_0} . Здесь $\overline{C_r^P}$ — число сочетаний с повторениями из P по r, P — число свободных переменных элементов вектора x.

Модели-претенденты порождаются индуктивно. При этом вводится ограничение на длину полинома базовой модели. Например, степень полинома базовой модели не должна превышать заданное число R. Тогда базовая модель представима в виде линейной комбинации заданного числа F_0 произведений свободных переменных:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_1^2, x_1 x_2, x_2^2, \dots, x_m^R).$$

Здесь *f* — линейная комбинация. Аргументы этой функции переобозначаются следующим образом:

$$\begin{aligned} x_1 \to a_1, \ x_2 \to a_2, \ \dots, \ x_1^2 \to a_\alpha, \ x_1 x_2 \to a_\beta, \\ x_2^2 \to a_\gamma, \ \dots, \ x_m^q \to a_{F_0}. \end{aligned}$$

То есть

$$y = f(a_1, 1_2, \dots, a_{F_0}).$$

Для линейно входящих коэффициентов задается одноиндексная нумерация

$$w = \langle w_1, \ldots, w_{F_0} \rangle.$$

Тогда модель может быть представлена в виде линейной комбинации.

$$y = w_0 + \sum_{i=1}^{F_0} w_i a_i.$$

Каждая порождаемая модель задается линейной комбинацией элементов $\{(w_i, a_i)\}$, в которой множество индексов $\{i\} = s$ является подмножеством $\{1, \ldots, F_0\}$.

Определение и выбор критерия

Вычисление значения оптимального уравнения на проверочной выборке осуществляется с помощью внешнего критерия.

Критерий выбора модели может быть назван внешним, если он получен с помощью дополнительной информации, не содержащейся в данных, которые использовались при вычислении параметров моделей. Например, такая информация есть в дополнительной, тестовой выборке.

Алгоритм МГУА использует и внутренний и внешний критерий. Внутренний критерий применяется для настройки параметров модели, внешний критерий — для выбора модели оптимальной структуры. Возможен выбор модели по нескольким внешним критериям.

В данной работе одним из внешних критериев является проверка на соответствие спектра сигнала, полученного из обучающей выборки, и спектра, полученного из тестовой выборки.



Рис. 2. Спектр сигнала на проверочной выборке



Рис. 3. Спектр сигнала на обучающей выборке

Модель претендент будет определена тем правильнее, чем меньше значение критерия:

$$Cr = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{k=1}^{N} (S_{kn} - S_{ko})^2}.$$

Правильней всего выбирать не один внешний критерий, а несколько. Возьмем в качестве дополнительного критерия критерий регулярности.

Критерий регулярности $\Delta^2(C)$ включает среднеквадратичную ошибку на обучающей подвыборке C, полученную при параметрах модели, настроенных на тестовой подвыборке l:

$$\Delta^{2}(C) = |y_{C} - A_{C}\widehat{w}_{l}|^{2} = (y_{C} - A_{C}\widehat{w}_{l})^{T}(y_{C} - A_{C}\widehat{w}_{l}),$$

где A — система линейных уравнений, полученная из выборки, и

$$\widehat{y}_C(l) = A_C \widehat{w}_l$$

Для того чтобы учитывать результаты вычислений нескольких критериев, необходимо использовать комбинированный критерий

$$k^2 = \sum_{i=1}^{K} a_i k_i^2$$

при условии нормировки

$$k^{2} = \sum_{i=1}^{K} a_{i} \frac{k_{i}^{2}}{k_{i\max}^{2}} \sum_{i=1}^{K} a_{i} = 1.$$

Здесь k_i — принятые на рассмотрение критерии, а a_i — веса этих критериев, назначенные в начале вычислительного эксперимента.

Используются так же нормализованные значения критериев. При этом предыдущая формула имеет вид

$$k^2 = \sum_{i=1}^{K} a_i \frac{k_i^2}{k_{i\,\text{max}}^2}.$$

После того, как все зависимости y_i , $i = \overline{1, p}$ идентифицированы, по внешнему критерию из них отбирают лучшую.

Заключение

Приведенный выше алгоритм может работать в режиме реального времени для синтеза оптимального фильтра.

Список литературы

- 1. Дьяконов В. П. Справочник по алгоритмам и программам на языке бейсик для персональных ЭВМ. М.: Наука. Физмалит, 1989. 240 с.
- 2. *Коршунов Ю. М.* Математические основы кибернетики. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1980. 424 с.
- 3. Фадеев Д.К., Фадеева В.Н. Вычислительные методы линейной алгебры.
- 4. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. М.: Мир, 1978.

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ 2015, том 2, выпуск 4, с. 66–73

— РАДИОТЕХНИКА И КОСМИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ —

УДК 66.088

Особенности процесса глубинного анизотропного травления кремния в технологии изготовления траншейных МОП-транзисторов

А. Е. Ануров, Ю. М. Заботин, С. Г. Подгородецкий

AO «Российские космические системы» e-mail: anurov_aleksey@mail.ru

Аннотация. В докладе рассмотрены особенности травления тренчей для формирования затвора в технологии изготовления вертикальных силовых МОП-транзисторов и представлены зависимости геометрии тренчей от параметров травления. Показано, что пропорциональное изменение расходов газов не оказывает существенного влияния на режим травления и вид тренчей, а соотношение времени травления и осаждения пассивации сильно влияет на наклон стенок тренча и шероховатость дна.

Ключевые слова: глубинное реактивное ионное травление (ГРИТ), вертикальные силовые МОП-транзисторы, Bosch-процесс, технология trenchMOS

Specifics of Silicon Deep Anisotropic Etching in Trench MOSFET Manufacturing Technology

A. E. Anurov, Yu. M. Zabotin, S. G. Podgorodetsky

Joint Stock Company "Russian Space Systems"

e-mail: anurov_aleksey@mail.ru

Abstract. Operation of gate trench etching for vertical power MOSFET manufacturing technology is considered and investigation results are shown as dependences of trench geometry from etch parameters and as parameters of the final etch regime in this paper. It is shown that gas flows' proportional change has a little effect on the etch regime and the trench form, and etch time to deposition time ratio has a strong influence on the wall slope and the bottom roughness.

Key words: deep reactive ion etching (DRIE), vertical power MOSFET, Bosch-process, trenchMOS technology

1. Введение

Плазменные методы формирования микронаноструктур на основе плазмохимических И процессов травления и осаждения являются ключевыми в технологии микро- и наноэлектроники. Формирование высокоаспектных (A > 10) и сверхвысокоаспектных (A > 50) микроструктур с высокоанизотропным профилем в кремнии необходимо для создания высокочувствительных инерционных датчиков, микроконденсаторов и других приборов, а также для траншейной технологии (trenchMOS) изготовления МОП-транзисторов. Среди плазменных процессов травления наибольшее распространение получил Bosch-процесс благодаря конструктивной простоте оборудования по сравнению с криопроцессом и лучшими параметрами травления по сравнению со смешанным процессом травления [1]. Таким образом, оптимизация Bosch-процесса травления, как одной из операций, влияющих на выходные параметры МОП-транзисторов, является актуальной задачей.

Цель работы — исследование Bosch-процесса глубинного травления кремния в технологии изготовления МОП-транзисторов.

Для достижения поставленной цели в работе необходимо было решить следующие задачи:

 провести анализ принципа действия, областей применения и технологии изготовления МОП-транзисторов;

 провести анализ физических основ плазмохимического травления (ПХТ) и технологии формирования отверстий в кремнии;

 исследовать особенности глубинного анизотропного травления кремния в технологии изготовления МОП-транзисторов.

2. Анализ принципа действия МОП-транзисторов

Большинство современной цифровой электроники построено на полевых МОП-(метал-окиселполупроводник) транзисторах, как более экономичных, по сравнению с биполярными транзисторами. Иногда МОП-транзисторы называют МДП (металл-диэлектрик-полупроводник). Международный термин таких транзисторов — MOSFET (metaloxide-semiconductor field effect transistor). Существуют n-канальные и p-канальные МОП-транзисторы (рис. 1) [2].

На рис. 1 представлен транзистор с затворами, расположенными вертикально в канавках-тренчах.



Рис. 1. Силовой вертикальный МОП-транзистор

На рис. 1 отмечены три контакта транзистора: исток — 1, сток — 2 и затвор — 6. Транзистор сформирован в эпитаксиальной структуре, состоящей из подложки 8, на которой выращен высокоомный эпитаксиальный слой 7. В качестве подложки используются пластины низкоомного кремния кристаллографической ориентации (100). Так как после окончательного формирования структуры для уменьшения последовательного сопротивления структура утоняется, подлегирование тыльной стороны нецелесообразно. В качестве материала подложки используются пластины, легированные мышьяком с удельным сопротивлением 0,005 Ом · см. В эпитаксиальном слое 7 диффузией или эпитаксией формируется область *p*-типа 4. Таким образом, получается диодная структура с *p*-*n*-переходом, состоящая из слоев 4, 7, 8. Для того чтобы при обратном смещении не было пробоя по периметру диодной структуры, на рисунке приведен вариант расширения области пространственного заряда с помощью охранного кольца 9. Канавки затворов заполнены легированным поликристаллическим кремнием и изолированы от области 4 тонким слоем (50-100 нм) диоксида кремния 5. Исток 1 обычно заземлен, на сток 2 подается смещение, диодная структура в результате заперта. При подаче на контакт затвора 6 положительного смещения вдоль поверхности диоксида кремния имеет место инверсия проводимости и транзистор открывается.



Рис. 2. Профиль травления, получаемый при: а — изотропном ПХТ, б — реактивном ионном травлении [2]

Для того чтобы обеспечить качественную работу транзистора, необходимо обеспечить целый ряд условий. Прежде всего, чем выше плотность канавок-тренчей на единицу поверхности, тем ниже сопротивление транзистора, соответственно, меньше потери мощности. Поэтому шаг канавок (питч) должен быть минимальным. Необходимо также обеспечить расширение области пространственного заряда (ОПЗ) по контуру диффузионной области на периферии транзистора, чтобы исключить пробой вследствие сужения ОПЗ.

Анализ физических основ плазмохимического травления (ПХТ) и технологии формирования отверстий в кремнии

ПХТ кремния позволяет формировать как изотропные, так и анизотропные, высокоаспектные профили (рис. 2) [2].

Воsch-процесс ПХТ — циклический процесс, состоящий из двух этапов. Первый этап — этап травления, при котором ионы фтора плазмы, сформированной из газа SF₆, вступают в реакцию с кремнием, образуя газообразное соединение SiF₄, которое откачивается из системы вакуумными насосами. Травление происходит изотропно. За этапом травления следует этап пассивации. На этом этапе плазма создается из газа C_4F_8 . Ионы C_4F_8 формируют полимер, схожий с тефлоном, который осаждается на поверхность образца. Этот полимер не вступает в реакцию с травящей плазмой и обеспечивает защиту от дальнейшего травления для кремния, который находится под ним. Перед следующим этапом травления этот полимер необходимо удалить со дна протравленной канавки. Для этого используются ионы, которые под действием электрического поля движутся практически по нормали ко дну канавки и выбивают полимер с поверхности. Таким образом, полимер удаляется только со дна, а стенки канавки остаются защищенными от травления. Дальнейшее чередование процессов травления и пассивации позволяет анизотропно протравить кремний до желаемой глубины (рис. 3) [2].



Рис. 3. Bosch-процесс травления кремния: *a*) образец с маской, *б*) первый шаг травления, *в*) шаг осаждения, *г*) второй шаг травления [2]

Преимущества Bosch-процесса:

 в отличие от жидкостного травления, травление производится анизотропно, независимо от кристаллографических плоскостей обрабатываемого объекта;



Рис. 4. Схема реактора установки SI 500

 – размеры отверстия в маске практически совпадают с размерами входного и выходного отверстия в кремнии.

Недостаток Bosch-процесса:

 шероховатые стенки получаемых отверстий [2].

Процесс ПХТ кремниевых пластин проводили на установке плазмохимического травления в индуктивно-связанной плазме *SI* 500 *PTSA Plasma Etcher* производства *SENTECH Instruments GmbH* (Германия), в разряде индуктивно-связанной плазмы высокой плотности (13,56 МГц) на изолированном охлаждаемом (до –30 °C) электроде при рабочих давлениях 4–5 Па [3,4].

4. Особенности глубинного анизотропного травления кремния в технологии изготовления МОП-транзисторов

Объектами исследования являлись кремниевые пластины со сформированным на поверхности топологическим рисунком тренчей МОП-транзисторов. Маска формировалась из фоторезиста марки *Shipley* толщиной 1,2–1,5 мкм. Заданные параметры тренчей: глубина травления 5,5–6,5 мкм, шероховатость стенок ≤ 100 нм, шероховатость дна ≤ 10 нм.

Контроль геометрических размеров полученных структур проводили при помощи стилусной профилометрии, оптической микроскопии и растровой электронной микроскопии (РЭМ) (стилусный профилометр Alpha-Step D-100, исследовательский микроскоп AxioImager, растровый электронный микроскоп JCM 6000). При оптимизации Bosch-процесса варьировались следующие параметры:

 $Q_{{
m SF}_6},\ Q_{{
m C}_4{
m F}_8}$ — расходы газов ${
m SF}_6,\ {
m C}_4{
m F}_8,$ см $^3/$ мин;

 $P_{E1},\,P_{E2}$ — рабочее давление в камере на первом и втором шаге травления, Па;

 P_D- рабочее давление в камере на шаге осаждения, Па;

 W_{E1}^{RF} , W_{E2}^{RF} — мощность генератора ВЧ-смещения на первом и втором шаге травления, Вт;

 W_D^{RF} — мощность генератора ВЧ-смещения на шаге осаждения, Вт;

 $W_{E1}^{ICP}, W_{E2}^{ICP}$ — мощность источника ИСП на первом и втором шаге травления, Вт;

 W_D^{ICP} , Вт — мощность источника ИСП на шаге осаждения;

 $t_{E1},\,t_{E2}$ — время первого и второго шага травления, с;

 t_D , с — время шага осаждения;

 $T_{\scriptscriptstyle \mathfrak{I} \mathfrak{I}}$ — температура электрода.

5. Результаты

Результаты травления тренчей МОП-транзисторов стандартным режимом Bosch-процесса представлены на рис. 5. Травление наглядно демонстрирует наличие подтрава под маску и микроигл на стенках тренчей.



Рис. 5. Снимок РЭМ протравленных тренчей

Согласно анализу литературы [5, 6, 7, 8]:

 основной причиной высокой шероховатости стенок является подтрав под маску;



Рис. 6. Зависимость подтрава под маску от температуры электрода



Рис. 7. Зависимость скорости травления кремния от температуры электрода



Рис. 8. Снимки РЭМ протравленных тренчей: a - T = -10 °C, $\delta - T = -5$ °C, s - T = 0 °C, z - T = 5 °C, $\partial - T = 10$ °C, e - T = 15 °C, $\mathcal{K} - T = 20$ °C



Рис. 9. Снимки РЭМ протравленных тренчей. Соотношение времени: а – 7/3, б – 6/3

 неровность дна проявляется в виде микроигл, которые являются следствием неравномерного травления пассивации.

В ходе выполнения работы получены следующие данные.

- При уменьшении температуры электрода с 20 °С до -10 °С наблюдалось уменьшение подтрава. Предполагается, что это вызвано ослаблением химической реакции между радикалами плазмы и стенками тренча, а также отсутствием десорбции полимера. Зависимость представлена на рис. 6.
- С ростом температуры электрода наблюдается рост скорости травления, зависимость представлена на рис. 7.
- Скорость травления кремния возрастает с температурой. На рис. 8 приведены снимки РЭМ, соответствующие экспериментальным точкам на графике.
- Соотношение времени травления и осаждения пассивационного слоя сильно влияет на наклон стенок тренча и на шероховатость дна. Уменьшение величины отношения времени первого шага травления к времени нанесения пассивации увеличивает угол наклона стенок тренча, а также размер шероховатости.
- Время первого шага травления влияет на образование микроигл на дне тренча. При времени травления ≥ 5 с микроиглы отсутствуют, что может быть вызвано полным снятием пассивации со дна тренча.



Рис. 10. Зависимости высоты микроигл от времени первого шага травления (время осаждения — 2 с, время второго шага травления — 1 с). Фотографии РЭМ, соответствующие экспериментальным точкам на графике, приведены на рис. 11

- Пропорциональное изменение расходов газов не оказывает существенного влияния на режим травления и вид получаемых тренчей (рис. 12).
- С увеличением мощности первого шага травления с 25 до 100 В скорость травления возрастает, со 100 до 150 В рост скорости травления сильно замедляется.
- Подтрав под маску возрастает с увеличением мощности первого шага травления. Предполагается, что это вызвано увеличением энергии ионов и радикалов плазмы. Ниже приведены


Рис. 11. Снимки РЭМ протравленных тренчей. Время первого шага травления: а – 4 с, б – 4,5 с



Рис. 12. Снимки РЭМ протравленных тренчей. Соотношение расходов газов: а — 250/200, б — 125/100, в — 75/60



Рис. 13. Зависимость подтрава под маску от мощности ВЧ-смещения первого шага травления

фотографии РЭМ, соответствующие экспериментальным точкам на графике.

На основе приведенных выше наблюдений был выбран режим травления, соответствующий поставленным требованиям (глубина травления 5,5– 6,5 мкм, шероховатость стенок ≤ 100 нм, шероховатость дна ≤ 10 нм). Вид полученных тренчей приведен на рис. 15.

6. Выводы

В работе рассмотрен принцип действия и области применения МОП-транзисторов. Показано, что МОП-транзистор имеет достаточно простое устройство и широко распространен в различных областях автоматики и электроники. Рассмотрен один из видов РИТ — Bosch-процесс.

Приведен результат подбора параметров Boschпроцесса (см. таблицу), удовлетворяющий поставленным требованиям (ширина канавки 2–3 мкм, глубина травления 5,5–6,5 мкм, шероховатость стенок ≤ 100 нм, шероховатость дна ≤ 10 нм). В дальнейшем планируется провести процесс травления для канавок шириной 330 нм, а также сквозное травление (глубина 380 мкм) чувствительного элемента (упругого подвеса) маятникового акселерометра.



Рис. 14. Снимки РЭМ протравленных тренчей. Мощность первого шага травления: a-25 Вт, b-50 Вт, e-75 Вт, e-100 Вт, $\partial-125$ Вт, e-150 Вт

$Q_{{ m SF}_6},$ см $^3/$ мин	$Q_{{ m C}_4{ m F}_8}, \ { m cm}^3/{ m muh}$	P_{E1} , Па	P_{E2}, Π а	<i>P_D</i> , Па	W_{E1}^{RF} , Bt	W_{E2}^{RF} , Вт	W_D^{RF} , Вт	t_{E1} , c	t_{E2} , c	$t_{Dep},{ m c}$	<i>T</i> _{эл} , °С
75	60	4	4	5	35	0	5	4,8	0,3	3,5	5



Рис. 15. Снимок РЭМ протравленных тренчей по конечному режиму

Список литературы

 Амиров И.И. Плазменные процессы формирования высокоаспектных структур для микро- и наномеханических устройств. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физикоматематических наук. Ярославский филиал Учреждения Российской академии наук Физико-технологического института РАН, 2010.

- http://www.nanofab.ualberta.ca/wp-content/uploads/ 2009/05/bosch_simple.pdf
- 3. http://www.eavangard-semi.ru/si500
- http://tudresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/ fakultaet_elektrotechnik_und_informationstechnik/ihm/ news/semicon2013_talks/08_Gargouri_SENTECH
- Postnikov A. V., Amirov I.I., Naumov V. V., Kalnov V. A. Simulation, fabrication, and dynamics characteristics of electrostatically actuated switches // Proceedings of SPIE, 2008, vol. 7025.
- 6. *Walker M. J.* Comparison of Bosch and cryogenic processes for patterning high aspect ratio features in silicon, Oxford Instruments Plasma Technology plc, North End, Yatton, Bristol, B549 4AP UK, 2001.
- Donohue L.A., Hopkins J., Barnett R., Newton A., Barker A. Developments in Si and SiO2 Etching for MEMS based optical applications, Proc. SPIE 5347, Micromachining Technology for Micro-Optics and Nano-Optics II, 44 (January 24, 2004); doi:10.1117/12.524471.
- http://www.nanofab.ualberta.ca/wp-content/uploads/ 2009/03/primer_deepsiliconrie.pdf

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ 2015, том 2, выпуск 4, с. 74–86

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

УДК 62-97

Методика повышения достоверности оценок показателей надежности системы обеспечения теплового режима космического аппарата при наземных испытаниях

В.В.Белова

OAO «Ракетно-космическая корпорация "Энергия" имени С. П. Королёва» e-mail: viktoria.belova@rsce.ru

Аннотация. В работе рассмотрена автоматизированная методика моделирования и расчета показателя надежности (вероятности безотказной работы) системы обеспечения теплового режима транспортного грузового корабля «Прогресс». Методика базируется на основе логико-вероятностной методологии блок-схем надежности, дерева отказов, а также марковского моделирования, реализованных в специализированном программном обеспечении Windchill Quality Solutions версии 10.2 (paнее Relex).

Ключевые слова: логико-вероятностная методология, показатель эффективности, средняя производительность, расширенные блок-схемы надежности, электрическая модель производительности, потоковая модель производительности

Methodology for Improving the Reliability of Parameters Estimates of Spacecraft Thermal Control System during Ground Tests

V. V. Belova

JSC "Rocket and Space Corporation "Energia" after S. P. Korolev" e-mail: viktoria.belova@rsce.ru

Abstract. The paper considers the automated technique for modeling and calculation of reliability (probability of failurefree operation) system for thermal control system of transport cargo ship "Progress". The technique is based on the logical-probabilistic methodology flowcharts reliability, fault tree and Markov modeling implemented in specialized programs Windchill Quality Solutions software version 10.2 (previously, Relex).

Key words: logical-probabilistic methodology, performance indicator, average capacity, extended reliability block diagram, electricity network model performance, flow network model performance

Введение

Новое научно-техническое направление теории надежности технических систем — надежность изделий ракетно-космической техники (РКТ) — возникло благодаря своей специфике: ответственность и сложность задач, особая среда функционирования изделий, малые партии поставок продукции. Анализ причин неудачных запусков и аварий ряда космических аппаратов (КА) в 2011–2013 гг. [1,2] показал, что на этом направлении есть еще много нерешенных проблем. Одна из них — проблема повышения достоверности оценки надежности технической системы КА на исследуемом основном этапе (или фазе основного этапа) жизненного цикла (ЖЦ) изделия.

Проблема является 1) комплексной, так как распространяется на все этапы жизненного цикла КА; 2) мультидисциплинарной, так как требует привлечения прикладных методов теории надежности, теории испытаний, математической статистики, математического моделирования, информационного и программного обеспечения; 3) многосложной, так как способствует поиску взаимосвязанного решения большого количества других проблем, вытекающих из противоречий, основные из которых:

1. Действующая на предприятиях с начала 1980-х система контроля качества и надежности РКТ научного, социально-экономического, двойного и военного назначения, реализует нормативный подход. В настоящее же время, в условиях масштабной реформы отрасли, на предприятиях внедряются различные автоматизированные системы управления ЖЦ качества изделий, реализуя тем самым процессный подход в управлении надежностью.

2. Разрабатываемые сегодня современные технические системы КА характеризуются следующими особенностями:

- увеличением размерности;
- сложностью связей в структуре (в том числе немонотонной), ее неприводимостью к типовым тривиальным структурам (последовательные, параллельные и их комбинации) — структурно-сложные технические системы (ССТС);
- разнообразием методов и видов резервирования (согласно [3]);

- наличием уровней эффективности по функционированию — функционально-сложные системы;
- стратегией восстановления;
- стратегией технического обслуживания;
- зависимостью функционирования элементов как по отказам, так и по восстановлению;
- динамикой процесса отказа.

Учет этих особенностей, а также непрерывное возрастания требований технического задания к точности и достоверности показателей надежности (ПН) проектируемой системы требуют применения специализированного программного обеспечения анализа надежности.

3. «Грубые» инженерные методики расчета надежности системы на этапе проектирования, которые до сих пор используются в промышленности, не рассматривают вопросы по повышению точности и «достоверности» оценки ПН. Принято считать, что если этапе наземной экспериментальной отработки (НЭО) объем испытаний мал (или испытания безотказны), то прогноз надежности вообще теряет смысл. Однако на практике выводы на основании таких испытаний делать необходимо. Как следствие, возникают вопросы по научному обоснованию разработки методики испытаний на зачетной фазе НЭО для демонстрации достигнутого уровня надежности.

Таким образом, вопросы по повышению достоверности надежности ССТС КА на исследуемом этапе (или фазе этапа) ЖЦ изделия — проектирования, НЭО, эксплуатации и т.д. — становятся особенно актуальными.

Важное место в ряду служебных ССТС КА занимает система обеспечения теплового режима (СОТР), совершенствование которой позволяет повысить массовую и энергетическую эффективность КА. СОТР по массе и потреблению энергии является существенным звеном в модели надежности КА. Она обладает всеми признаками сложной системы и имеет самостоятельную цель функционирования, согласующуюся с общей целью функционирования объекта.

В работе предложена полная и непротиворечивая концепция решения исследуемой проблемы, заключающаяся в построении расчетно-экспериментальной «Методики повышения достоверности

СОТР КА на этапе наземных испытаний», базирующейся на основе логико-вероятностной методологии блок-схем надежности, дерева отказов, фазовых диаграмм, а также марковского моделирования, реализованных в специализированном программном обеспечении Windchill Quality Solutions версии 10.2 (paнее Relex) [4].

Процедура построения «Методики» сводится к решению четырех задач:

- анализ и оценка надежности СОТР КА;
- проверка адекватности модели надежности СОТР КА (валидация и верификация);
- оценка надежности СОТР КА на этапе КЭИ;
- повышение достоверности оценки показателя надежности СОТР КА на этапе КЭИ.

«Методика повышения достоверности СОТР КА на этапе наземных испытаний» будет продемонстрирована на примере невосстанавливаемой СОТР транспортного грузового корабля (ТГК) «Прогресс» для заключительной фазы НЭО — этапа комплексных электрических испытаний (КЭИ). В качестве показателя надежности рассматривается **вероятность безотказной работы (ВБР)**. Решение вышеупомянутых задач и интерпретация результатов приводится на двух вариантах расчета: 1) для 30 суток автономного полета; 2) при продолжительности функционирования изделия до 200 суток (в том числе 30 суток автономного полета).

Структура «Методики повышения достоверности оценок показателей надежности СОТР ТГК "Прогресс" на этапе КЭИ» приведена на рис. 1, *a* и *б*.

1. Методика анализа и оценки надежности

Задача анализа и оценки надежности СОТР КА рассмотрена в [5, 6], где приведено ее решение — «Методика автоматизированного логиковероятностного моделирования и расчета вероятности безотказной работы СОТР ТГК "Прогресс"» для математической модели анализа надежности: **структурной схемы надежности (ССН)**. Вышеупомянутая модель разработана с использованием графического редактора блочных диаграмм надежности RBD (Reliability Block Diagram) аналитического модуля OpSim (Optimization and Simulation — Оптимизация и Моделирование) системы Windchill Quality Solutions (WQS) (до 2013 г. — Relex). Результаты расчета по методике отражены в техническом отчете OAO PKK «Энергия» и использованы для научного обоснования расчетной оценки BБР СОТР ТГК «Прогресс» для двух вариантов расчета: 1) для 30 сут автономного полета; 2) при продолжительности функционирования изделия до 200 сут (в том числе 30 сут автономного полета).

Для вариантов 1)–2) показатель ВБР СОТР ТГК «Прогресс», рассчитанный по инженерной методике отдела-разработчика, совпал с аналогичным показателем, рассчитанным по автоматизированной методике при заданной точности и уровне доверительной вероятности 0,95.

Структурная схема надежности СОТР ТГК «Прогресс»

На рис. 2, *a*−∂ представлены некоторые ССН функциональных звеньев СОТР ТГК «Прогресс». На рис. 2, *a* приведена ССН СОТР. На рис. 2, *б* приведена ССН системы терморегулирования (СТР). На рис. 2, *в* приведена ССН контура грузового отсека (КГО). На рис. 2, *в* приведена ССН электронасосного агрегата контура грузового отсека (ЭНА КГО). На рис. 2, ∂ приведена ССН контура навесного радиатора (КНР).

На рис. З приведены расчеты по методике для ВБР СОТР ТГК «Прогресс» методом ССН в момент времени 720 ч (30 сут автономного полета). Значение ВБР равно 0,9966781.

Значение (1-ВБР) равно 0,003321896. При 95% доверительной вероятности рассчитаны верхняя и нижняя границы доверительного интервала ВБР.

Результаты автоматизированного расчета совпали с аналитическими расчетами по модели отдела-разработчика (с учетом принятых допущений), что подтверждает адекватность разработанных моделей предлагаемой методики. Кроме этого, рассматриваемая методика имеет ряд новых возможностей по сравнению с методикой отделаразработчика. Например, построение новой математической модели анализа надежности СОТР ТГК «Прогресс»: дерева отказов (ДО).



Рис. 1. Структура «Методики» и схема реализации моделей надежности в общей структуре целевых задач: *a* — структура «Методики повышения достоверности оценок надежности СОТР ТГК "Прогресс"» на этапе КЭИ», *б* — структура задачи «Анализ надежности СОТР»



Рис. 3. Результаты аналитического расчета ВБР по методу ССН для СОТР ТГК «Прогресс» на участке автономного полета 720 ч



Рис. 4. Дерево отказов СОТР ТГК «Прогресс» для расчета (1-ВБР) на участке автономного полета 720 ч

Эта модель разработана с использованием аналитического модуля FTA (Fault Tree Analysis — Анализ дерева отказов). ДО СОТР ТГК «Прогресс» для расчета (1-ВБР) на участке автономного полета 720 ч приводится на рис. 4. Результаты моделирования показали, что разработанная модель ДО СОТР ТГК «Прогресс» эквивалентна разработанной модели ССН СОТР ТГК «Прогресс» по показателю (1-ВБР).

Результатом расчета по модели ССН является ВБР = «надежность» = 0,9966781. Из этого следует, что (1-ВБР) = «ненадежность» = 0,003321896 (см. рис. 3).

Результатом расчета по модели ДО является вероятность отказа $\Phi = 0,003321896$ (см. значение в результирующем событии «Отказ СОТР» на рис. 4). Таким образом, (1-ВБР) = Φ .

Следует отметить, что отсутствие значимых дополнительных факторов, которые можно учесть только в модели ДО, приводит к недостоверной, часто завышенной оценке показателя ВБР. Например, показатель ВБР СОТР ТГК «Прогресс», рассчитанный по методике отдела-разработчика методом ССН, больше на 3% аналогичного показателя, рассчитанного по автоматизированной методике (методом ДО), учитывающей особенности резервирования и динамики отказа некоторых функциональных звеньев.

Возможность построения динамической модели надежности с помощью Динамического дерева отказов (ДДО) обеспечивается введением в них четырех специальных вершин: «приоритетное И»: PAND (Priority AND Gate), «принудительная последовательность»: SEQ (Sequence Enforcing Gate), «резервирование»: SPARE (Spare Gate), «функциональная зависимость»: FDEP (Functional Dependency Gate) [7]. Общее ДДО СОТР ТГК «Прогресс» для расчета (1-ВБР) на участке автономного полета 720 ч приводится на рис. 5, *a*.

ДДО отдельных звеньев СОТР ТГК «Прогресс» на участке автономного полета 720 ч



а — Общее Динамическое дерево отказов СОТР ТГК «Прогресс»



б — Динамическое дерево отказов группы ЭНАЗ КГО

Рис. 5. Динамическая модель надежности СОТР ТГК «Прогресс» для расчета (1-ВБР) на участке автономного полета 720 ч



в — Марковская модель группы ЭНАЗ КГО, эквивалентная Динамическому дереву отказов ЭНАЗ КГО



г — Динамическое дерево отказов группы РРЖ

Рис. 5. Продолжение



∂ — Марковская модель группы РРЖ, эквивалентная Динамическому дереву отказов группы РРЖ

Рис. 5. Окончание

и эквивалентные им Марковские модели приведены на рис. 5, *б*-*д*.

Результаты для модели фазовой диаграммы надежности СОТР ТГК «Прогресс» при продолжительности функционирования изделия до 200 сут (в том числе 30 сут автономного полета) приведены на рис. 6.

Результаты расчета показателей надежности СОТР ТГК «Прогресс» трех фаз процесса электрических испытаний на ТК для расчета (1-ВБР) приведены на рис. 7.

2. Оценка надежности СОТР КА на этапе КЭИ

Объем КЭИ реализуется через последовательное решение частных задач, определяемых видом и этапом испытаний. Цель и задачи КЭИ достигаются выполнением всех установленных этапов испытаний: этап 1 — ЭИ на контрольной испытательной станции завода экспериментального машиностроения (КИС ЗЭМ); этап 2 — электрические испытания на техническом комплексе (ТК); этап 3 подготовка изделия на стартовом комплексе (СК). Необходимость введения этапов обусловлена требованиями общего технологического плана подготовки изделия и особенностями эксплуатации изделия на заключительных этапах подготовки. КЭИ предусматривают следующие виды испытаний: защитные операции изделия (ЗО); проверочные включения систем изделия (ПВ), комплексные испытания систем изделия (КИ); совместные испытания (СИ) с другими изделиями, входящими в состав орбитальной станции (только на 1 этапе, проводятся на комплексном стенде Международной космической станции (КС МКС)); заключительные операции перед отправкой на техническом комплексе (ТК).

Для успешного выполнения задачи комплексных электрических испытаний СОТР ТГК «Прогресс» на этапе ТК необходимо успешное выполнение всех ее штатных проверок в каждой из трех последовательно выполняемых фаз: 1 фаза (5 ч) старт (подготовка к работе); 2 фаза (95 ч) — работа; 3 фаза (5 ч) — пуск. В каждой фазе используется одно и то же оборудование СОТР ТГК «Прогресс», соединенное в различные ССН. На рис. 8, *a*, *б*, *в* и *г* представлены примеры блок-схем надежности каждой из фаз.

Результаты для Фазовая СТР 4800:								
	Этап	Цикл	Время	Средняя прод	Надежность эт	Надежность	Ненадежность	
1	Этап 1	1,00	720,00	7,200000e+002	9,966210e-001	9,966210e-001	3,379000e-003	
2	Этап 2	1,00	4800,00	4,080000e+003	9,769180e-001	9,736170e-001	2,638300e-002	

Рис. 6. Результаты расчета фазовой диаграммы надежности СОТР ТГК «Прогресс» для расчета (1-ВБР) на участке совместного полета 200 сут



Результаты для Поэтапная схема ПРИМЕР Виктор:

	Этап	Цикл	Время	Средняя продолжительность	Надежность этапа	Надежность	Ненадежность
1	Этап 1	1,00	5,00	5,000000e+000	9,983800e-001	9,983800e-001	1,620000e-003
2	Этап 2	1,00	95,00	9,000000e+001	9,376390e-001	9,361200e-001	6,388000e-002
3	Этап 3	1,00	100,00	5,000000e+000	9,651220e-001	9,034700e-001	9,653000e-002

Рис. 7. Результаты расчета показателей надежности СОТР ТГК «Прогресс» для расчета (1-ВБР) трех фаз процесса электрических испытаний на ТК



Рис. 8. Фазовая диаграмма



Рис. 8. Окончание

На рис. 8 также представлены результаты моделирования фазовой диаграммы для времени испытаний 100 ч.

3. Марковская модель процесса биномиальных испытаний (Markov)

Результаты расчета ПН на разработанных Марковских моделях СОТР ТКГ «Прогресс» (на при-

мере основного насоса ЭНАЗ КГО) в модуле Markov представляют собой вероятность состояния (отказ или работа) по результатам биномиальных испытаний. Агрегирование этих значений в общую динамическую модель системы дает расчетно-экспериментальную оценку надежности на момент времени, определенный заданным количеством испытаний системы. Результаты моделирования Марковской модели биномиальных испытаний (для 5 испытаний) представлены на рис. 8.



Заключение

Приведенные результаты позволяют выдать рекомендации в задаче повышения достоверности оценки показателя на этапе наземных испытаний. Для задачи верификации системы на рассматриваемом этапе даются обоснованные рекомендации к построению программы-методики испытаний.

Список литературы

- Российское Космическое Агентство. http://www.federalspace.ru О работе Межведомственной комиссии по расследованию причин аварии PH «Протон-М». Дата обращения 15.12.2014.
- Российское Космическое Агентство. http://www.federalspace.ru Основные положения Заключения Межведомственной комиссии по анализу причин нештатной ситуации, возникшей в процессе проведения летных испытаний космического аппарата «Фобос-Грунт». Дата обращения 15.12.2014.

- Р 50-54-82-88. Рекомендации. Надежность в технике. Выбор способов и методов резервирования. М: Издательство стандартов, 1988. 46 с.
- Relex 2011. Reference Manual. Relex Software Corporation 41West Otterman Street, Greensburg, Pensilvania 15601 USA, 2011. 3172 p.
- 5. Белова В.В. Моделирование надежности системы обеспечения теплового режима космического аппарата на этапе электрических испытаний // Надежность и качество сложных систем, 2013, № 3, с. 31–40.
- 6. Белова В. В. Анализ и интерпретация результатов автоматизированного моделирования и расчета показателей надежности процесса комплексных электрических испытаний системы обеспечения теплового режима транспортного грузового корабля «Прогресс». В сб. Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления (ВСПУ 2014). М.: Изд-во ИПУ РАН, 2014. С. 7553–7563.
- 7. Викторова В.С., Степанянц А.С. Модели и методы расчета надежности технических систем. М.: Ленанд, 2014. 256 с.

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ 2015, том 2, выпуск 4, с. 87–91

———— ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА ЭКБ —

УДК 621.3.049.75

Обеспечение качества переходных отверстий коммутационной платы с высокой плотностью проводящего рисунка

Ж. А. Миронова, Д. Д. Карягина, Б. В. Владимиров, А. В. Павлов

АО «Российские космические системы»

e-mail: zhannampei@mail.ru

Аннотация. В работе проанализированы возможности обеспечения качества переходных отверстий высокоплотных коммутационных плат в области посадочного места поверхностно-монтируемых компонентов (ПМК) с большим количеством и малым шагом выводов, расположенных в виде матрицы. Основное внимание уделено вопросу формирования заполненных переходных металлизированных сквозных отверстий для защиты металлизации от возможных остатков технологических растворов, флюсов и предотвращения ухода припоя при сборочномонтажных операциях. Показаны результаты применения различных методов заполнения отверстий.

Ключевые слова: многослойная коммутационная плата, защита переходных отверстий, заполнение переходных отверстий, посадочное место BGA-компонента, высокоплотная компоновка проводящего рисунка платы

Quality Assurance of via Holes in the Wiring Board with High Density Conductive Pattern

Z. A. Mironova, D. D. Kariagina, B. V. Vladimirov, A. V. Pavlov

Joint Stock Company "Russian Space Systems" e-mail: zhannampei@mail.ru

Abstract. The paper proposes analysis of quality assurance of via holes in the wiring board with high density conductive pattern. The main attention is paid to the formation of filled via holes, as well as to metallization protection from possible residual technological solutions and fluxing agents. Results of various methods to fill the transition holes are shown.

Key words: multilayer wiring board, quality assurance through holes, to fill the via hole, design wiring board for BGA, high density of conductive pattern

Введение

Использование в разработках электронной аппаратуры ракетно-космической техники (РКТ) электронной компонентной базы (ЭКБ) в корпусах с высокой плотностью выводов в виде матриц, например BGA, CGA, CSP, приводит к необходимой «дезинтеграции» со следующим уровнем электронного модуля — коммутационной платой. Проводящий рисунок коммутационной платы в области посадочного места такой ЭКБ представляет собой высокоплотную компоновку монтажных контактных площадок (КП) и проводников, размещаемых между ними, как показано на рис. 1.



Рис. 1. Посадочное место ПМК на плате

Физическим ограничением в данном случае является возможность размещения определенного количества проводников, отводимых от КП внутренних периметров матрицы, в трассировочном канале (узком месте), т. е. между соседними монтажными КП. Диаметр и шаг КП определяют величину узкого места и максимальное количество проводников, расположенных в нем, в соответствии с классом точности изготовления платы. Максимальное количество проводников, расположенных в узком месте на платах 5, 6 и 7 класса точности, представлено в таблице.

Максимально возможное количество полной матрицы выводов ПМК, трассируемое на внешнем слое коммутационной платы с учетом числа проводников в узком месте по классу точности, представлено на рис. 2.

Таким образом, на внешнем слое коммутационной платы 5 класса точности возможна трассировка ПМК с количеством выводов от 4 до 256 шт. с шагом от 0,25 до 1,5 мм соответственно, 6 класса точности от 64 до 324 шт., 7 класса точности от 100 до 784 шт. с приведенным выше шагом выводов [1].



Рис. 2. Возможность разводки ПМК с матрицей выводов на внешнем слое платы с учетом класса точности

Решение проблемы недостаточности трассировочной области на одном внешнем слое коммутационной платы для проектирования ПМК с матричным расположением выводов даже в условиях самого высокого класса точности заключается в создании переходных отверстий от монтажных КП на нижележащие слои коммутационной платы.

Конструкционно-технологическое решение (КТР) проводящего рисунка посадочного места ПМК при изготовлении коммутационной платы по традиционной технологии металлизации сквозных отверстий (МСО) представляет собой создание переходов от монтажных КП на нижележащие слои типа «dog bone», т.е. дублирование монтажной КП параллельной КП с переходным отверстием согласно рис. 3 [2,3].

Методы и результаты защиты переходных отверстий

Для исключения ухода припоя переходные отверстия должны быть закрыты защитной паяльной маской (ЗПМ) [4]. В технологиях изготовления коммутационных плат с высокой плотностью компоновки проводящего рисунка в большинстве случаев применяются фотопроявляемые жидкие ЗПМ [5].

Если переходное отверстие закрыто ЗПМ только с одной стороны, существует большая вероятность ухудшения качества металлизации отверстия в связи со сложностью удаления остатков флюса и других химических реактивов, попадающих

Узкое место	Шаг выводов,	Диаметр КП,	Максимальное количество проводников в узком месте, шт.			
между кп, мм	MM	MM	5 класс	6 класс	7 класс	
0,95	1,50	0,55	4	5	9	
0,72	1,27	0,55	3	4	6	
0,65	1,00	0,35	2	3	6	
0,60	1,00	0,40	2	3	5	
0.55	1,00	0,45	2	3	5	
0,00	0,80	0,25	2	3	5	
0.50	0,80	0,30	2	2	4	
0,30	0,75	0,25	2	2	4	
0.45	0,80	0,35	1	2	4	
0,40	0,75	0,30	1	2	4	
	0,80	0,40	1	2	3	
0,40	0,75	0,35	1	2	3	
	0,65	0,25	1	2	3	
0,35	0,65	0,30	1	1	3	
0,25	0,50	0,25	0	1	2	

Таблица. Максимальное количество проводников



Рис. 3. Схема посадочного места ПМК с матрицей выводов на плате: *a*) вид сверху; *б*) поперечное сечение переходных отверстий

в процессе финишных и монтажно-сборочных операций. Сложность очистки, отмывки малых переходных отверстий показана на рис. 4 на примере



Рис. 4. Брак коммутационной платы: *a*) закрытые переходные отверстия (показано стрелкой); *б*) шлейф финишного покрытия из незакрытого переходного отверстия

возникновения шлейфа финишного покрытия, что приводит к отбраковке платы.

Таким образом, необходимо качественное закрытие сквозных переходных отверстий с двух сторон платы.

Перекрытие сквозных переходных отверстий жидкой ЗПМ возможно в случае, когда диаметр составляет не более 0,3 мм. В отверстия с диаметром, равным 0,3 мм и более, ЗПМ частично проникает внутрь, не полностью защищая медное покрытие от окисления, как показано на рис. 5.



Рис. 5. Микрошлиф сквозного отверстия с диаметром 0,3 мм: 1 — частичное заполнение ЗПМ; 2 — оголенное медное покрытие

Также известны случаи нарушения целостности ЗПМ над отверстием в связи с термическим расширением воздушной среды внутри закрытого с двух сторон сквозного переходного отверстия во время пайки платы [6].

Таким образом, для создания надежного межсоединения целесообразна дополнительная технологическая операция заполнения переходных металлизированных отверстий, выполняемая перед нанесением ЗПМ. При этом необходимо учитывать коэффициент теплового расширения (КТР) материала, применяемого для заполнения отверстий, чтобы избежать проблем с дополнительными напряжениями в плате.

В качестве материалов для заполнения отверстий экономически более выгодно использовать непроводящие материалы (без добавления металлических частиц), так как такие материалы дешевле проводящих, а металлизация отверстий обеспечивает качественное межсоединение, не нуждающееся в дополнительном электрическом контакте за счет проводящего материала в металлизированных отверстиях [7].

Непроводящие материалы чаще всего представляют собой эпоксидные системы.

По мере развития технологии формирования заполненных переходных отверстий увеличилось количество методов их заполнения.

Традиционным методом является заполнение отверстий через трафарет. Заполняющий материал может быть продавлен через трафарет с помощью



Рис. 6. Полуавтоматическая установка трафаретной печати

ракеля (рис. 6) или валика. При этом можно использовать полуавтоматическое оборудование.

Для заполнения переходных отверстий с большим аспектным соотношением возможно улучшение процесса за счет использования стола с вакуумным прижимом с нижней стороны плат.

На сегодняшний день производители ЗПМ также выпускают специальную пасту для заполнения переходных отверстий, совместимую с ЗПМ, но обладающую много меньшим коэффициентом усадки после термообработки из-за большего процента содержания твердого вещества. В рекомендациях по методу заполнения определены: трафарет с переходными отверстиями, увеличенными на 0,1 мм; подложка под плату с увеличенными в три раза переходными отверстиями; величина давления ракеля, его скорость, угол заточки и атаки.

Тем не менее, при заполнении пастой переходных отверстий с большим аспектным соотношением существует большая вероятность вовлечения воздуха в промежутки между проходами ракеля, и некачественное заполнение отверстий, как показано на рис. 7.

В АО «Российские космические системы» А.В.Павловым, Ж.А.Мироновой, А.В.Бровкиным разработан новый метод формирования заполненных переходных металлизированных сквозных отверстий (подана заявка на изобретение). Разработанное КТР позволяет заполнять переходные металлизированные сквозные отверстия с аспектным соотношением более 10 : 1 без образования



Рис. 7. Микрошлиф заполненных пастой сквозных переходных отверстий с воздушными полостями



Рис. 8. Микрошлиф сквозного переходного отверстия, заполненного эпоксидным полимером

воздушных полостей. Материалом для заполнения переходных отверстий служит эпоксидный полимер, идентичный входящему в состав базовых материалов для изготовления платы стеклотекстолита и препрега. Данный метод не требует дальнейшего проведения операции планаризации поверхности платы, закупки нового оборудования и проводится непосредственно перед нанесением ЗПМ. Результат заполнения переходных металлизированных сквозных отверстий представлен на рис. 8.

Заключение

Для создания перспективного печатного узла с применением высокоинтегрированной ЭКБ с большим количеством и малым шагом выводов, расположенных в виде матрицы, необходимо обеспечить надежность высокоплотной компоновке проводящего рисунка коммутационных плат, в том числе в области посадочных мест ЭКБ. Формирование заполненных переходных металлизированных сквозных отверстий коммутационной платы с учетом КТР позволит обеспечить требуемое качество высокоплотной компоновке проводящего рисунка коммутационных плат. Новый разработанный метод заполнения переходных отверстий открывает возможность получить оптимальное КТР для данного объекта анализа.

Список литературы

- 1. Миронова Ж.А., Шахнов В.А., Гриднев В.Н. Высокоплотная компоновка проводящего рисунка многослойных коммутационных плат // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э.Баумана. Серия: Приборостроение, 2014, № 6(99), с. 61–70.
- 2. Гриднев В.Н., Миронова Ж.А., Шахнов В.А. Обеспечение качества компоновки монтажных контактных площадок высокоплотной коммутационной платы // Надежность и качество сложных систем, 2014, № 4(8), с. 19–25.
- Миронова Ж.А., Павлов А.В. Многослойные печатные платы сверхплотного монтажа / Труды VI Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий» / ОАО «Российская корпорация ракетно-космического приборостроения и информационных систем». М: 2013, с. 256–265.
- IPC-2226 Частный стандарт на проектирование печатных плат с высокоплотными межсоединениями. Ассоциация электронной промышленности IPC / Пер. с англ. М.: ФГУП ВНИИА, 2003. 56 с.
- 5. *Кумбз К. Ф.* Печатные платы: Справочник в 2-х книгах. Книга 1 / Пер. с англ. М.: Техносфера, 2011. 1016 с.
- 6. Баева О. Технология тентинга с заливкой переходных отверстий. М.: Технологии в электронной промышленности, 2008. 58 с.
- 7. Торстен Рекерт. Новые технологии заполнения отверстий и последующей планаризации. М.: Технологии в электронной промышленности, 2005. 56 с.

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ 2015, том 2, выпуск 4, с. 92–102

——— ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА ЭКБ —

УДК 621.315.592

Условия и критерии применения микросхем и полупроводниковых приборов индустриального уровня качества в космическом приборостроении

Ю. Л. Нуров

эксперт НЦСЭО, АО «Российские космические системы»

e-mail: ynikac@rniikp.ru

Аннотация. В статье рассматриваются мероприятия, которые рекомендуется реализовать при вынужденном использовании микросхем и полупроводниковых приборов индустриального уровня качества в пластиковых корпусах (МПК). Приводятся положительные и отрицательные характеристики МПК по сравнению с герметичными микросхемами. Представлена схема прохождения МПК в НЦСЭО, включая 100%-й входной контроль (ВК), отбраковочные испытания (ОИ), диагностический неразрушающий контроль (ДНК), выборочный разрушающий физический анализ (РФА) и сертификационные испытания (СИ). Обсуждается подход к определению надежностных характеристик партий МПК, прошедших комплекс всесторонних испытаний.

Ключевые слова: микросхема в пластмассовом корпусе, отбраковка, входной контроль, испытания на надежность, квалификационные испытания

Application Condition and Criteria of Foreign Microcircuits and Semiconductors Industrial Quality Levels in Plastic Packages in Space Instrument-Making (Space Devises)

Yu. L. Nurov

expert RCT CE, Joint Stock Company "Russian Space Systems" e-mail: ynikac@rniikp.ru

Abstract. The article considers necessary action on using foreign microcircuits industrial quality levels in plastic packages (PEM) for space devises. It describes PEMs positive and negative features in compare with hermetic microcircuits. Here you will find the PEMs routing in the RTC SE including 100% incoming inspection, screening testing diagnostic nondestructive testing, sepling destructive physical analyses and the certification testing. The article considers an approach to the definition of reliability performances of PEMs lot going through the combination of comprehensive tests.

Key words: plastic encapsulated microcircuit, screening, incoming inspection, reliability testing, qualification testing

Введение

В начале девяностых годов прошлого века в США стали применять термин ВСР («лучшая коммерческая практика» — «best commercial practices»), относящийся к лучшим невоенным достижениям в создании компонентов коммерческого/ индустриального применения. ВСР-компоненты отличались массовостью, серийностью производства, высоким качеством, надежностью и низкой стоимостью. Особенно это относилось к области микросхем и полупроводниковых приборов в пластиковых корпусах (МПК).

Известная директива Перри в июне 1994 г. предлагала создать все необходимые условия для применения ВСР-компонентов в системах военного назначения. Главная цель директивы Перри заключалась в использовании технических характеристик, спецификаций и стандартов для индустриальных схем; при этом предполагалось снижение стоимости военных систем без ухудшения их качества.

Были разработаны требования к системам качества изготовления и поставки микросхем, руководства по выбору BCP-компонентов для использования в военных системах различного назначения и ряд других требований.

Со временем в качестве методологических подходов к применению микросхем индустриального уровня качества, в том числе МПК, для специальных целей, предлагалось использовать частично методы отбраковки и квалификации, изложенные в MIL PRF 38535, MIL-STD-883, JANTXV, JANS.

В настоящее время в США, Европе, Японии выпущены документы (руководства), в которых излагаются требования и условия, которым должны удовлетворять МПК для их применения в космической радиоэлектронной аппаратуре (РЭА).

Эти требования настоятельно рекомендуют приобретать МПК у надежного поставщика, проводить этим компонентам расширенный комплекс испытаний, включая ускоренные испытания на безотказность, следовать определенным правилам обращения и хранения пластиковых компонентов, проводить статистический анализ надежностных характеристик испытанных компонентов и вводить их в базу данных для последующего использования.

Достоинства и недостатки интегральных микросхем в пластиковых корпусах индустриального уровня качества

По сравнению с микросхемами специального применения (Space, Military, Hi-Rel) МПК имеют много приимуществ, основные из которых:

 непрерывность и массовость выпуска, что положительно влияет на стабильность и повторяемость основных технических характеристик, которые, в свою очередь, определяют качество и надежность партий микросхем;

– гораздо большие функциональные возможности МПК по сравнению с более консервативными возможностями микросхем специального применения. Это особенно заметно при сравнении с функциональными возможностями СБИС микропроцессоров, микроконтроллеров, ОЗУ, ПЗУ, ПЛИС;

 малые габариты, вес, что особенно важно при построении радиоэлектронных систем космического применения;

 низкая чувствительность к механическим вибрационным нагрузкам и влиянию линейного ускорения, которое в герметичных микросхемах приводит к обрыву внутренних проводников, расположенных в свободном подкорпусном пространстве;

 возможность приобретения в короткие сроки и по низкой цене;

– некоторые зарубежные авторы считают также, что производство МПК подвергается более частому мониторингу, чем это требует MIL-STD-883.

К сожалению, МПК имеют ряд существенных ограничений с точки зрения применения их в космическом приборостроении. К этим ограничениям относятся:

 негерметичное исполнение, позволяющее влаге проникать через пластиковую оболочку, что может привести как к коррозии со временем металлических соединений, площадок и в итоге к отказу микросхемы, так и к явлению растрескивания (popcorn) МПК при пайке выводов из-за давления образовавшихся паров влаги на пластмассовую оболочку;

 МПК имеют несколько меньший диапазон рабочих температур (-40 °C-+80 °C) по сравнению с корпусными герметичными микросхемами (-60 °C-+125 °C);

 – более короткое время жизненного цикла, приводящего к проблеме, называемой за рубежом obsolence (снятие с производства), что требует создания необходимых складских запасов для повторяемых выпусков продукции;

- неоднородность партий;

 отсутствие данных по гарантированной радиационной стойкости;

 отсутствие документального подтверждения надежностных характеристик.

Несмотря на очевидные недостатки МПК для космического применения, в США не прекращаются работы по исследованию условий и критериев применения их в военной и космической радиоэлектронной аппаратуре.

В 2003–2004 гг. NASA (США) почти одновременно выпустило две инструкции: PEM-INST-001 «Instruction for Plastic Encapsulated Microcircuit (PЭM) Selection, Sceening and Qualitication» и EEE-INST-002 «Instruction for EEE Parts Selection, Screening, Qualitication», первая из которых полностью посвящена МПК, а во второй МПК и полупроводниковым приборам (ППП) посвящены отдельные разделы: раздел M4 «Microcircuit, plastic encapsulated» и раздел S1 «Semiconductor, devices discrete».

В этих документах подчеркивается, что МПК изначально были сконструированы для использования в ремонтируемых системах, где их легко было заменить.

Неиспользование их в военной и космической аппаратуре объяснялось в основном двумя причинами:

 ограниченным по сравнению со специальным применением диапазоном рабочих температур и абсорбцией влаги в связи с негерметичным исполнением;

негарантированным показателем надежности
 МПК при неоднородности выпускаемых партий.

Необходимо было разработать методы и процедуры квалификации и отбраковки для раннего выявления дефектов в партиях МПК и внедрить раннюю отбраковку ненадежных элементов в партии для возможности использования этой «улучшенной» партии в аэрокосмической промышленности.

Однако поскольку качество, необходимое для космического использования, не было заложено в МПК при конструировании и изготовлении, нельзя гарантировать, что МПК будут иметь тот же уровень качества, что и ЭРИ, специально изготовленные для космического применения.

В любом случае МПК рекомендуется применять только в тех случаях, когда по тем или иным причинам нельзя приобрести к определенному сроку микросхемы с необходимыми функциональными характеристиками категорий Space, Military, Hi-Rel, индустриальные микросхемы в герметичных корпусах, микросхемы из складских запасов (COTS).

Прохождение ЭРИ индустриального уровня качества в НЦ СЭО

В НЦ СЭО АО «Российские космические системы» в течение многих лет и в настоящее время в бортовой аппаратуре многих заказов применяется электронная компонентная база индустриального уровня качества, в том числе и МПК. Для проведения их испытаний разрабатывались, непрерывно совершенствовались и реализовывались, программы входного контроля, отбраковочных испытаний, диагностического неразрушающего контроля, сертификационных испытаний.

За год в среднем проводились испытания до 150 тыс. МПК.

На начальном этапе НЦ СЭО анализирует предварительный Перечень ЭРИ для определенного заказа, подготовленный техническим подразделением института, разработчиками и технологами, выдает предложения по его коррекции, подписывает окончательный вариант Перечня и выдает необходимые задания на подготовку рабочих мест испытательного центра к выполнению всех требуемых испытательных процедур для каждого типа ЭРИ. В это же время подразделение закупок осуществляет через дилеров приобретение заявленных ЭРИ.

При закупке МПК очень важно выбрать надежного квалифициорованного поставщика или в крайнем случае авторизированного дилера. Желательно, чтобы изготовитель МПК имел опыт производства компонентов специального назначения. Закупающее подразделение АО «Российские космические системы» по возможности должно быть документально осведомлено о системе управления качеством у изготовителя, технологии производства, объеме испытаний МПК (функциональный контроль, отбраковочные испытания), организацией обращения с компонентами, их хранении, методами и результатами надежностных испытаний, гарантией поставок в срок и др. Уровень влажности закупаемых МПК должен быть не ниже третьего [1].

НЦ СЭО выпускает или уточняет программы проведения входного контроля (ВК), отбраковочных испытаний (ОИ), диагностического неразрушающего контроля (ДНК), сертификационных испытаний (СИ); выпускает информационные материалы, инструкции, другую НДТ.

Очень важно на этапе входного контроля проверить полноту и достаточность сопроводительной документации и детально оценить внешний вид МПК.

Для МПК на этапе ВК должна проводиться операция проверки хотя бы относительной однородности партии. Поскольку, в отличие от микросхем Military и Space, индустриальные компоненты могут быть изготовлены не из одной и той же пластины, не в одно и то же время, не на одной и той же производственной линии, не пронумерованы изготовителем, выборочные испытания на квалификацию (сертификацию) могут быть недостоверными для распространения их результатов на всю партию. Одним из наиболее простых методов определения однородности партии какого-то определенного типономинала микросхемы может быть проверка информативных электрических параметров этой партии по ужесточенным нормам, которые устанавливаются в результате статистической обработки результатов измерений партии. В качестве информативного параметра для определения однородности партии чаще всего выбираются токи, протекающие в цепи питания испытуемой микросхемы. По степени разброса величин этих токов и характеру их распределения можно судить в какой-то степени об однородности элементов в партии. Большую уверенность в однородности партии дает последующая электротермотренировка и анализ изменения разброса и распределения величин информативного параметра. Обычно допустимыми отклонениями считается разброс информативного параметра в пределах ±10%.

Электрические параметры должны измеряться при трех рабочих температурах: нормальной, минимальной и максимальной. Результаты измерений заносятся в базу данных и хранятся в ней не менее 10 лет.

Следующий этап — проведение статической или совмещенной статико-динамической электротермотренировки (ЭТТ). Желательно проводить по согласованию с изготовителем (если это возможно) электротермотренировку МПК при температуре +125 °С в течение 240 ч, после чего рассчитывается дрейф информативного параметра. Положительная температура ЭТТ не должна превышать температуру стеклования пластика (обычно эта температура лежит в пределах +140-+150 °С).

На финальной стадии проводят контроль электрических параметров и функционирования при нормальной, минимальной и максимальной рабочих температурах. Максимально допустимый процент брака не должен превышать 10%.

В последнее время начал проводиться функциональный контроль микросхем на максимальной рабочей тактовой частоте в широком диапазоне рабочих температур и напряжений питания, что позволяет значительно повысить эффективность испытаний.

Из партии МПК, прошедшей весь комплекс 100% испытаний (ВК, ОИ, ДНК), формируются случайным образом выборки для проведения СИ и испытаний на радиационную стойкость. Количество элементов в выборках определены в программах испытаний, которые согласованы с Заказчиком. Остальные элементы вместе с предварительным заключением передаются на склад и далее в цеха без права предъявления Заказчику до завершения СИ.

Испытания МПК на радиационную стойкость представляют отдельную проблему [2] и в настоящей статье не рассматриваются.

Схема прохождения микросхем индустриального уровня качества, реализованная в НЦ СЭО, представлена на рис. 1.

Ю. Л. НУРОВ



Рис. 1. Прохождение микросхем и полупроводниковых приборов в пластиковых корпусах

Сертификационные испытания

В НЦ СЭО СИ МПК проводятся в следующем объеме:

- испытания на паяемость;
- контроль внешнего вида;

 контроль параметров в нормальных условиях и при предельных температурах;

- термоциклирование;
- испытание на акустическом микроскопе;
- испытания на влагостойкость;
- испытания на безотказность.

По результатам испытаний составляется протокол, который служит основанием для выдачи окончательного Заключения, согласованного с ВП, о возможности использования данной партии в РЭА конкретного заказа. Объем СИ, реализуемый в настоящее время в НЦ СЭО, несколько отличается от объема сертификационных (квалификационных) испытаний, рекомендуемых для МПК инструкциями NASA PEM-INST-001 и INST-002 (раздел M4). Во-первых, акустическая микроскопия в зарубежных стандартах проводится на начальном этапе после визуального контроля внешнего вида и после испытаний на безотказность. Во-вторых, часть элементов выборки подвергается тесту HAST (тест с высоким ускорением стресса; обычно +130 °C при 85% влажности). В-третьих, кроме испытаний на паяемость используется также испытание на устойчивость к пайке.

Последовательность сертификационных (квалификационных) испытаний, рекомендуемая этими стандартами, представлена на рис. 2.

Важно отметить, что размер выборки, показанный на рисунке, соответствует принятому в НЦ СЭО, а в вышеприведенных инструкциях эта выборка существенно больше.

В НЦ СЭО ведутся работы по гармонизации отечественного и зарубежного подхода к объему и последовательности сертификационных (квалификационных) испытаний МПК и ППП.



Рис. 2. Последовательность проведения сертификационных (квалификационных) испытаний МПК

Разрушающий физический анализ

онным испытаниям не подвергаются. Мы считаем, что МПК в обязательном порядке долж-В настоящее время в НЦ СЭО проводит ны подвергаться выборочному РФА. Оборудоваразрушающий физический анализ (РФА) только ние для рентген-контроля (расположено на завоотечественных микросхем, которые сертификаци- де РКП), акустический микроскоп (расположен



Рис. 3. Последовательность проведения РФА МПК

на территории ЗАО «НПО КП»), растровый электронный микроскоп, оптическая аппаратура, тестер для испытаний вскрытой микросхемы на прочность внутренних проводников и сдвига кристалла, химлаборатория имеются в НЦ СЭО. Ведутся работы по химической декапсуляции МПК. Квалификация персонала сектора позволяет проводить РФА, подготавливать полноценные отчеты по его проведению и вводить результаты РФА МПК в базу данных.

На рис. 3 показаны типичный объем и последовательность проведения РФА МПК, рекомендуемая инструкциями PEM-INST-001 и INST-002. Желательно проводить РФА МПК до проведения отбраковочных испытаний на выборке 5 шт. Для эффективного проведения РФА МПК желательно также гармонизировать отечественный и зарубежный подходы к каждой операции РФА. Зарубежный материал по операциям

- внешний визуальный контроль;

- ретгенография;
- акустическая микроскопия;
- поперечный срез;
- внутренний визуальный контроль;
- испытания на РЭМ

с оценочными критериями по каждой операции приводится в двух вышеуказанных инструкциях NASA.

НЦ СЭО необходимо завершить работу по химическому травлению МПК, приобрести установку для плазменного травления и арендовать (или приобрести) акустический микроскоп и рентгенотелевизионную установку.

Отбраковка контрафактных МПК

Сегодня на тему контрафактности многих изделий электронной техники, и в частности МПК, написано много статей, инструкций, выпущен ряд стандартов, проведены семинары и даже конференции [3]. Наиболее полная программа решения проблем с контрафактными компонентами изложена в американской программе ССАР101 «COUNTER-FEIT COMPONENTS AVOIDANCE PROGRAM, CERTIFICATION FOR» (2013 г.).

Следует подчеркнуть, что необходимость приобретения индустриальных МПК и ППП у официальных поставщиков или дистрибьюторов чрезвычайно важна не только с точки зрения применения этих элементов в специальном приборостроении, но и с точки зрения сведения к минимуму возможности засорения приобретаемых партий контрафактными ЭРИ.

Контрафактные МПК могут быть выявлены практически на всех этапах и операциях испытаний МПК и ППП, показанных на рис. 1, особенно на операциях:

 контроль внешнего вида и сопроводительной документации; - электротермотренировка и оценка дрейфа;

– параметрический и функциональный контроль, особенно на высоких тактовых частотах, *m*-метрия, квазистатические токи утечки, ВАХ;

- растровая электронная микроскопия;

– рентген-контроль;

 внутренний визуальный контроль после декапсуляции;

- акустическая микроскопия;

- паяемость;
- влагостойкость.

Фирма SovTest предлагает новый тестер, полезный для выявления контрафактных микросхем. Он основан на сравнении параметров каждого отдельного вывода с параметрами хорошо известного годного устройства. При этом измеряются только напряжения между каждым выводом и шиной земли, между каждым выводом и шиной питания, между каждым выводом относительно других. Разновидность этого метода — метод сравнения импедансов информативных цепей известной (хорошей) и проверяемой микросхемы.

Ни одно отдельно взятое испытание не гарантирует отсев контрафактного элемента, но комплекс испытаний, проводимый в НЦ СЭО, сводит вероятность проникновения контрафактных МПК в РЭА к минимуму.

Надежностные характеристики

В материале «Selection Guide for electronic components preductive reliabilite models» (2009 г.) фирмы IMdR приводится расчет λ -характеристик по различным методикам для различных условий эксплуатации, включая спутниковую РЭА для низких и геостационарной орбит.

Анализировались методики расчета λ -характеристик ЭРИ и оборудования по справочникам: MIL-HDBK-217F,RDF-93, UTE-C 80810, FIDES и MIL-HDBK 217 Plus.

Результирующие λ -характеристики, рассчитанные по моделям, приведенным в вышеуказанных справочниках, отличаются в десятки раз для одного и того же оборудования. Так, для низких орбит λ -характеристики по моделям UTE-C 80810, MIL-HDBK-217F, RDF-93 почти совпадают,

а по моделям FIDES и MIL-HDBK 217 Plus отличаются примерно в 20 раз. Для геостационарных орбит картина сохраняется, за исключением того, что к моделям FIDES и MIL-HDBK 217 Plus добавляется модель UTE-C 80810.

По материалам всех справочников можно оценить надежность характеристик МПК для условий применения в космической аппаратуре.

Несколько лет назад автором была предпринята попытка оценить надежность индустриальных микросхем по справочнику MIL-HDBK-217F. В этом справочнике приводится эмпирическая формула, по которой можно определить коэффициент качества πq , находящийся в пределах от 2 (второй военный уровень качества) до 10 (индустриальный уровень качества):

$$\pi q = 2 + \frac{87}{\Sigma K},\tag{1}$$

где *К* — коэффициент, учитывающий объем проведенных отбраковочных испытаний.

Коэффициент πq входит в формулу

 $\lambda = \lambda b \cdot \pi \mathbf{T} \cdot \pi L \cdot \pi e \cdot \pi q,$

где $\pi т$ — коэффициент, учитывающий температурные условия работы МПК в РЭА;

πL — коэффициент изученности;

 πe — коэффициент, учитывающий окружающие условия, в которых используются МПК;

 λb — базовая интенсивность отказов для конкретного класса МПК.

Формула (1) не учитывает проведение 100%-го диагностического неразрушающего контроля и выборочного контроля при проведении сертификационных испытаний, включающих испытания на безотказность. Была предложена другая модифицированная формула:

$$\pi q = 1 + \frac{1}{1 + \Sigma n} + \frac{87}{\Sigma K},\tag{2}$$

в которой учитывается вклад этих испытаний в снижение коэффициента πq .

В соответствии с MIL-HDBK-217F в качестве коэффициентов *К* использовались коэффициенты:

K₁ = 50 (термоциклы, максимальная положительная и отрицательная рабочие температуры, контроль внешнего вида); $K_2 = 36$ (электротермотренировка в течение 240 ч);

$$K_3 = 11$$
 (радиография);

$$\sum K = 97.$$

В качестве дополнительных коэффициентов *n* использовались:

 $n_1 = 2$ (ДНК по ужесточенным нормам);

 $n_2 = 3$ (дрейф информативного параметра); $\sum n = 5.$

В итоге получено:

$$\pi q = 1 + \frac{1}{1+5} + \frac{87}{97} = 1 + 0,166 + 0,897 = 2,063 \approx 2.$$

Именно эта оценка надежности микросхем была использована и согласована с МО РФ при расчете надежности аппаратуры БИНС для изделия ГЛОНАСС. Работу по уточнению формулы (2) следует продолжить, т.к. в ближайшее время МПК будут подвергаться РФА.

Что касается подтверждения надежностных характеристик МПК, прошедших ускоренные испытания, представляет интерес работа Н. Ливингстона SSB-1 «Guidelines for Usiug Plastic Encapsulatec Microcircus and Semiconductors for Military application» (2004 г.). В ней автор рассматривает ускоренные испытания, применяемые для МПК, коэффициенты ускорения, получаемые при реализации этих испытаний, приводит методику расчета интенсивности отказов МПК. На рис. 4 показаны четыре вида стрессовых воздействий на МПК (температура, влага, термоциклирование, повышенное напряжение).

Если для подтверждения приемлемой интенсивности отказов (ноль отказов при доверительной вероятности 90%) провести эксперимент, в котором партию МПК (40 шт.) подвергнуть испытанию на влагостойкость (температура +93 °C при влажности 90%) и электротермотренировке при той же температуре в течение 1000 ч (количество приборочасов t = 40000), то при условии, что в эксплуатации эта партия элементов используется во влажности 20% и при температуре +40 °C, можно показать, что величина λ будет равна 5 фитам.



Рис. 4. Определение интенсивности отказов по результатам ускоренных испытаний МПК

Действительно, коэффициент ускорения

$$K_{y} = \left(\frac{RH_{t}}{RH_{u}}\right)^{3} \exp\left[\frac{Ea}{K} * \left(\frac{1}{Tu} - \frac{1}{Tt}\right)\right] \left(\frac{0.9}{0.2}\right)^{3} \times \exp\left[\frac{0.9}{8,6171 * 10^{-5}} * \left(\frac{1}{313} - \frac{1}{366}\right)\right] = 114\,688;$$

интенсивность отказов

$$\lambda = \frac{\chi^2(a, \text{d.f.})}{2 \cdot Ky \cdot t} = \frac{4,605}{2 \cdot 11\,468 \cdot 40\,000} = 5,02 \cdot 10^{-9}, \text{ т. e. } \approx 5$$
фит.

Для обеспечения вероятности безотказной работы аппаратуры , равной 95% при количестве МПК в приборе $n_n = 100$ шт. в течение времени эксплуатации t = 7 лет, интенсивность отказов МПК должна быть

$$\lambda_{\scriptscriptstyle 9} = \frac{1 - P}{n_n \cdot t_{\scriptscriptstyle 9}} = \frac{1 - 0.95}{100 \cdot 61\,320} = 8,15 \cdot 10^{-9} = 8$$
фит,

что согласуется с интенсивностью отказов, подтвержденной ускоренными испытаниями, приведенными выше.

Выводы

Несмотря на активно ведущиеся работы по импортозамещению, мы предполагаем, что в ближайшие 3–4 года потребность в МПК останется, хотя их количество в целом сократится.

МПК должны применяться в исключительных случаях, когда их невозможно заменить на микросхемы более высокого уровня качества из-за требуемых больших функциональных возможностей и сжатых сроков на закупку и изготовление аппаратуры.

При закупке МПК для космического применения необходимо приложить максимальные усилия для закупки у основного изготовителя или официального дилера и с максимально возможной документацией, относящейся к ее качеству.

Особенно внимательно следует отнестись к оценке однородности закупаемых партий МПК. Каждая партия МПК должна пройти 100%-й входной контроль с тщательным контролем сопроводительной документации и внешнего вида, включая габаритные размеры и вес, 100%-е диагностический

неразрушающий контроль и выборочные сертифи- Список литературы кационные испытания.

В составе выборочных испытаний настоятельно рекомендуем включить РФА, дополняющий возможность выявления контрафактных микросхем.

Испытания должны совершенствоваться и проводиться высококвалифицированным персоналом на аттестованном оборудовании, в чистых помещениях при соблюдении требований обращения с элементами, их транспортировки и хранения.

Результаты измерений должны анализироваться, обрабатываться и храниться в базе данных.

- 1. IPC/JEDEC J-5TD-02OC. Moisture/Reflow Sensitivity classification for Non-hermetic Solid State Surface Mount Devieces 2004.
- 2. Ужегов В.М. Проблемные вопросы обеспечения стойкости бортовой аппаратуры к воздействию ионизирующих излучений. Российская научно-техническая конференция «Сертификация ЭКБ-2015», Санкт-Петербург, 2015.
- 3. Кононов В.К., Салова Е.В. Новые стандарты в области подтверждения соответствия и предотвращения контрафакта, подделок. Российская научно-техническая конференция «Сертификация ЭКБ-2015», Санкт-Петербург, 2015.



Уважаемые авторы и читатели журнала «Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы»!

В 2016 г. исполняется 70 лет АО «Российские космические системы» — признанному лидеру в создании, развитии и эксплуатации современной космической радиоэлектронной аппаратуры и информационно-управляющих систем.

В рамках юбилейных мероприятий АО «Российские космические системы» в начале июня 2016 г. в г. Москве проводит VIII Всероссийскую научно-техническую конференцию «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий». В работе конференции принимают участие ведущие ученые и специалисты ракетно-космической отрасли, аспиранты и студенты вузов.

Тематические направления конференции:

Секция 1. Навигационные космические системы и технологии.

Секция 2. Системы и технологии дистанционного зондирования Земли и спутникового мониторинга.

Секция 3. Наземные комплексы управления и системы.

Секция 4. Бортовые радиотехнические системы.

Секция 5. Космические системы связи и ретрансляции. Информационные технологии и системы.

Секция 6. Системы для космических исследований. Микротехнологии в космосе.

Секция 7. Разработка, технологии производства и тестирование ЭКБ.

Заявки на участие в конференции и краткая аннотация докладов принимаются в срок до 1 февраля 2016 г. по адресу *rks-304@mail.ru*.

Контактный телефон Оргкомитета: +7 (495) 673-96-29.

Планируется издание сборника трудов к началу конференции.

С дополнительной информацией о порядке проведения конференции и материалами VII конференции можно ознакомиться на сайте АО «Российские космические системы»: *www.spacecorp.ru*.

Оргкомитет конференции

Научно-технический журнал

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

ТОМ 2. ВЫПУСК 4. 2015

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство ПИ №ФС77-55464 от 25 сентября 2013 г.

> Редактор *В.Р. Игнатова* Оригинал-макет: *Д.П. Вакуленко* Оформление переплета: *Н.Л. Лисицына*

Подписано в печать 11.11.2015. Формат 60×88/8. Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 12,71. Уч.-изд. л. 13,98. Тираж 220 экз. Заказ №

Издательская фирма «Физико-математическая литература» МАИК «Наука/Интерпериодика» 117342, Москва, ул. Бутлерова, 17 Б E-mail: fizmat@maik.ru, fmlsale@maik.ru; http://www.fml.ru

Отпечатано с электронных носителей издательства в ППП «Типография «Наука» 121099, г. Москва, Шубинский пер., 6