

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

А. В. ДЕНИСОВ

Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: www.denisoff@mail.ru

Рассматривается процесс оптимизации структуры оптико-электронной системы, работающей в диапазоне спектра излучения 0,42—1,1 мкм, путем имитационного моделирования ее системных блоков. Исследование структуры системы дистанционного зондирования экспериментальным натурным путем — сложная и дорогостоящая процедура, что обусловлено происходящими в системе различными физическими и технологическими процессами. Решение этой проблемы лежит в совокупном применении натурального и математического моделирования с использованием современных информационных технологий как на этапе создания системы, так и на этапе эксплуатации в целях совершенствования методов и средств проектирования, а также улучшения контроля таких параметров аппаратуры перспективных космических систем, как спектральный диапазон, физическая светосила, линейное разрешение на местности и производительность. Решив данную задачу, можно моделировать процесс съемки, тем самым улучшая функционально-параметрические характеристики системы при проектировании и согласовании технических данных как на этапе составления задания, так и натурных испытаний.

Ключевые слова: *оптико-электронная система, дистанционное зондирование поверхности Земли, система приема и преобразования информации, объектив, линейное разрешение на местности.*

Введение. Дистанционное зондирование поверхности Земли (ДЗЗ) осуществляется авиационными и космическими средствами, которые оснащены различного вида оптико-электронными системами (ОЭС), работающими в оптических диапазонах спектра излучения 0,42—1,1 мкм [1, 2].

На сегодняшний день более 15 стран владеют собственными орбитальными системами ДЗЗ, позволяющими решать различные картографические задачи. Как правило, съемка, производимая с борта космического аппарата оптико-электронной системой, выполняется в панхроматическом и мультиспектральном режимах. Панхроматическое изображение, представляемое в градациях черно-белого цвета, занимает весь видимый диапазон электромагнитного спектра; мультиспектральный снимок — это несколько отдельных изображений, формируемых в широких спектральных зонах видимого и инфракрасного излучения [3].

Принцип работы ОЭС заключается в анализе отраженной или излученной поверхностью Земли энергии в оптическом диапазоне [4]. Поэтому получаемую со спутника информацию можно рассматривать как результат прохождения сигнала через оптико-электронный тракт (ОЭТ), состоящий из атмосферы, атмосферных возмущений (атмосферной турбулентности, фона, помех и т.д.), системы приема и преобразования информации (СППИ), приемной оптической системы (ПОС) и объектива. Обобщенная схема работы ОЭС представлена на рис. 1 [5, 6], где, кроме названных, используются также следующие обозначения: СДЗЗ — система дистанционного зондирования поверхности Земли, НППИ — наземный пункт приема и преобразования информации, ПИ и МИ — панхроматическое и мультиспектральное изображение соответственно, ППЗ — подстилающая поверхность Земли.

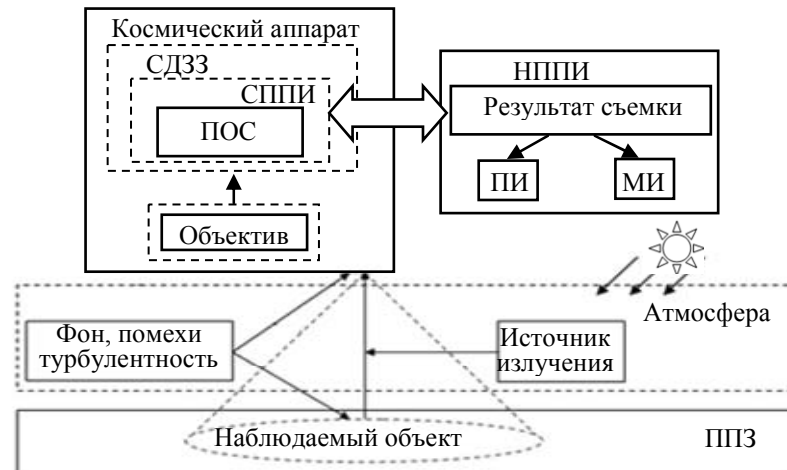


Рис. 1

Моделирование ОЭС. При изучении области дистанционного зондирования применяются современные компьютерные информационные технологии, позволяющие исследовать состояние ОЭС как на этапе испытаний, так и процессе эксплуатации, что обеспечивает возможность получения изображений высокого разрешения на НППИ.

При разработке сложных космических систем особенно широкое применение находят методы и средства математического моделирования, которые, по сравнению с методами натурного моделирования, обладают явными преимуществами в плане ресурсных и временных затрат [7]. Для исследования сложных космических систем применяются в основном два типа математического моделирования — аналитическое и имитационное [8].

Модель ОЭС в рамках теории линейных систем представляется в виде следующего функционала [9]:

$$A_{\text{ОЭС}} = \{B_{\text{атм}} \cdot S_{\text{СППИ}} \cdot D_{\text{об}}\},$$

где $\{B_{\text{атм}} \cdot S_{\text{СППИ}} \cdot D_{\text{об}}\}$ — суперпозиции оптических свойств атмосферы, СППИ и объектива.

Аналитическое и имитационное моделирование часто противопоставляются в связи с тем, что общий функционал имитационной модели системы дистанционного зондирования составляется в виде одного или нескольких уравнений. Отличие аналитического подхода заключается в том, что динамика космической системы учитывается при составлении функционала, а не реализуется в виде последовательностей операций. Рассмотрим достоинства и недостатки данных методов подробнее.

Аналитическое моделирование позволяет произвести наиболее полное исследование только в том случае, если получены явные аналитические зависимости, связывающие в полной мере вход и выход системы при известных начальных условиях, что возможно для сравнительно несложных систем. Для сложных же систем, явления и процессы происходящие в которых многопараметричны и многообразны (в частности, систем дистанционного зондирования из космоса), применяется имитационное моделирование [10, 11]. В этой связи использование метода математического имитационного моделирования позволяет осуществить численное моделирование поведения подсистем космической системы дистанционного зондирования и их взаимодействия с учетом возмущающих факторов различной природы в течение заданного или формируемого периода времени. Таким образом, можно говорить о том, что имитационная модель есть специальный аппарат, связывающий натурный и виртуальный эксперименты в едином программно-аппаратном комплексе. Структурная схема имитационного моделирования системы дистанционного зондирования представлена на рис. 2 [12], где приняты следующие обозначения: СДИ — скорость движения изображения в продольном и поперечном направлениях; ФПМ — функция передачи модуляции; ЛРМ — линейное разрешение на местности; ПЗС — прибор с зарядовой связью; M_i — модельное время имитируемого блока системы; алгоритмы 1—6 — алгоритмы имитации некоторых блоков.

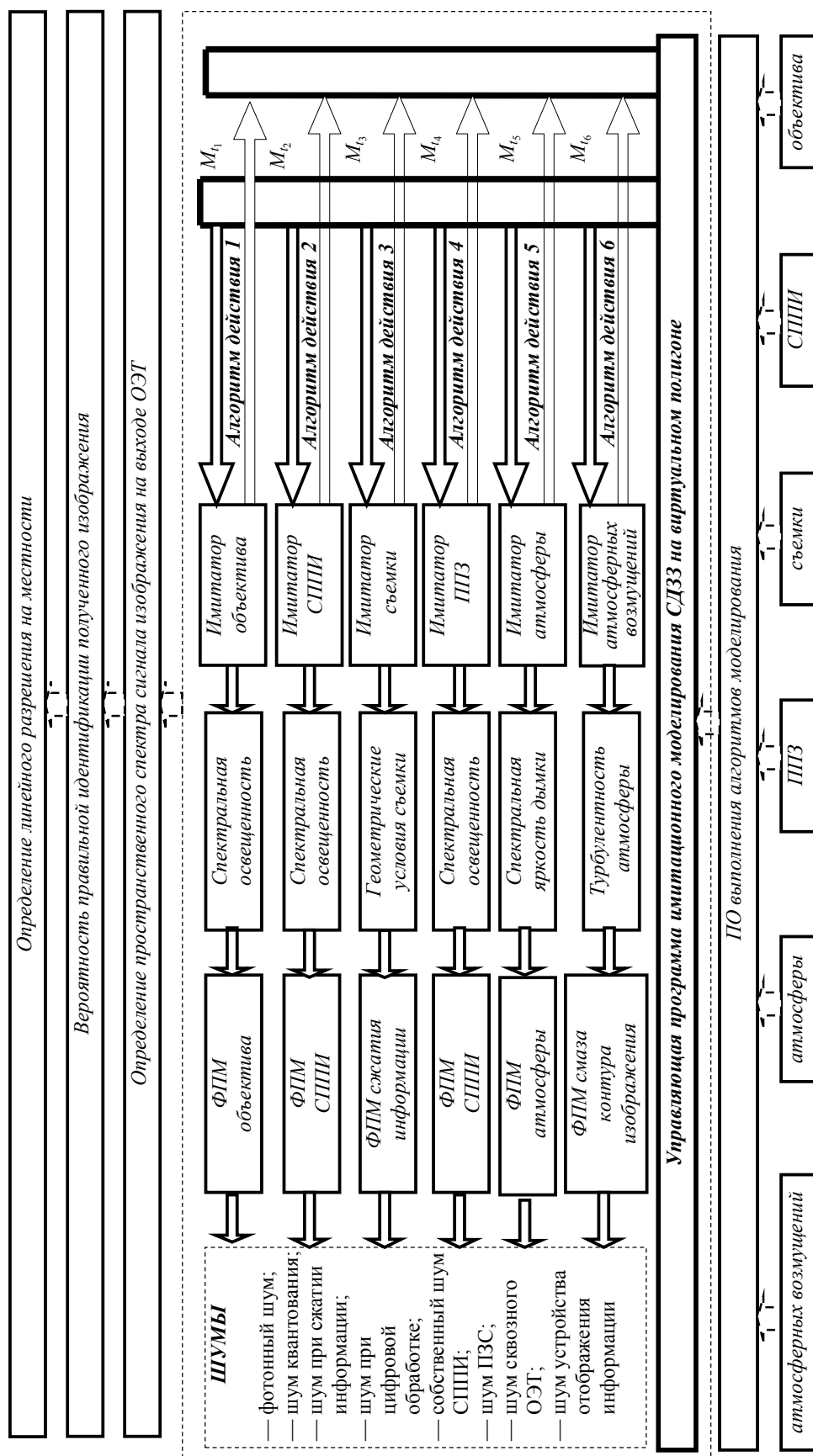


Рис. 2

Общий алгоритм моделирования процесса съемки. На рис. 3 представлен общий алгоритм построения изображения, формируемого ОЭС, реализуемый на специализированном программно-аппаратном комплексе. Началом процесса моделирования является ввод оператором на ПК-1 исходных данных: параметров орбиты, маршрута и съемки. В результате получения всех данных осуществляется моделирование процесса съемки имитационной поверхности Земли с учетом погрешностей и формируются изображения для каждой из восьми ПЗС-матриц с последующей их передачей через локально-вычислительную сеть на ПК-2. Результат моделирования, соответствующий заданным условиям, представляется в виде файлов изображений [13, 14]. На ПК-2 оператор, используя специальное программное обеспечение виртуального полигона, обрабатывает изображения с последующей их сшивкой полиномиальным методом. По результатам моделирования формируется автоматический отчет с основными характеристиками системы и оценкой линейного разрешения [8, 14].

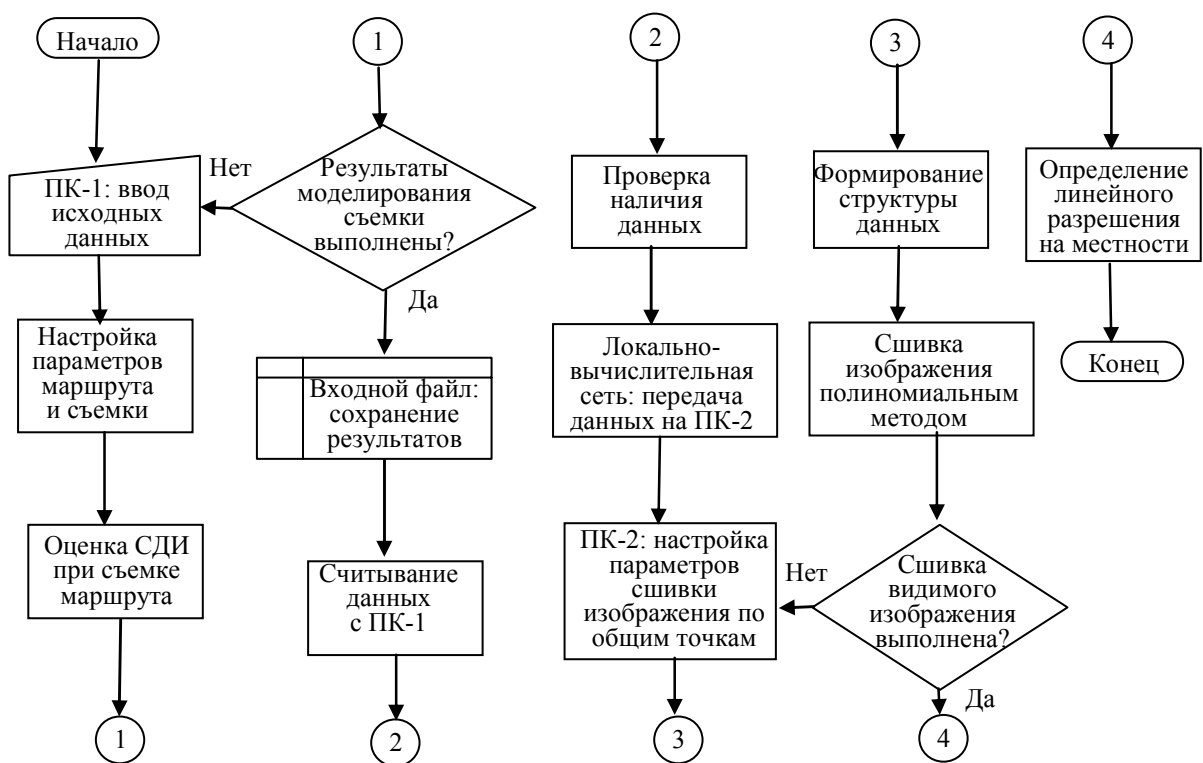


Рис. 3

На практике методика имитационного моделирования реализуется путем получения полиномиальным методом изображения в виде отдельных полос. Сшивка единого изображения осуществляется совмещением связующих точек. Метод базируется на использовании опорных точек местности с известными геодезическими координатами. Координаты опорных точек служат эталоном, по которому производится координатная привязка изображений с использованием данных об ориентации визирной оси. Технология автоматического определения связующих точек для каждой пары перекрывающихся матриц (рис. 4) заключается в следующем: сначала автоматически определяются контурные точки в матрицах m_i и n_i , затем с помощью коррелятора определяются соответствующие связующие точки в матрице n_j . Для нахождения точек используется локальный метод поиска.

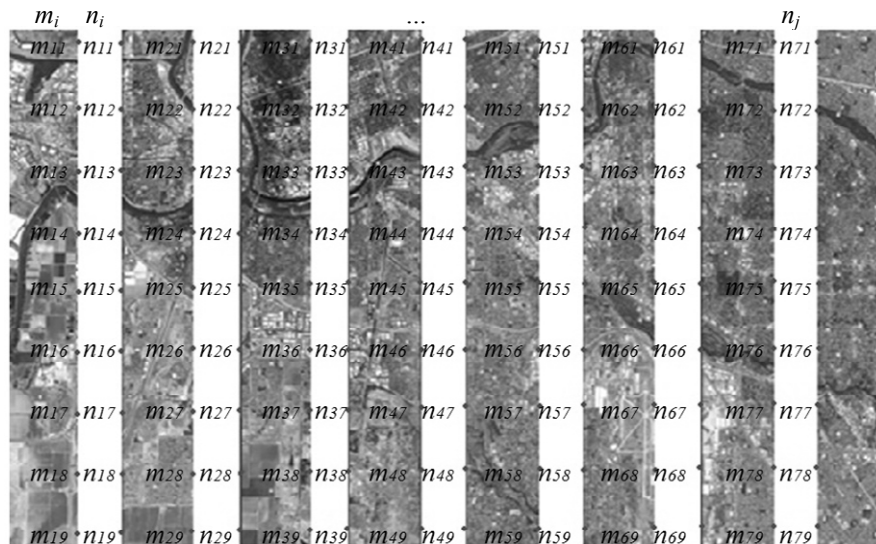


Рис. 4

Имитационные модели ОЭС. Поскольку структуры традиционных моделей дистанционного зондирования для воспроизведения разных нестационарных процессов существенно различаются (что ограничивает области их применения), имитационную модель ОЭС можно представить в следующем матричном виде [8, 9]:

$$\begin{bmatrix} \dot{\chi} \\ \dot{\xi} \\ D'_{\text{ф.п}} \end{bmatrix} = J \left\{ D_{\text{д.об}} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ D_{\text{ф.п}} \end{bmatrix} + S_{\text{СППИ}} \begin{bmatrix} \chi \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + B_{\text{атм}} \begin{bmatrix} 0 \\ \xi \\ 0 \end{bmatrix} \right\} + M \cdot F,$$

где $D_{\text{ф.п}}$ и $D'_{\text{ф.п}}$ — матрицы лучей, входящих в фокальную плоскость объектива и выходящих из нее соответственно; $D_{\text{д.об}}$ — матрица, характеризующая действие объектива; χ — вектор параметров СППИ; J — матрица, учитывающая движение ОЭС по орбите; ξ — вектор параметров помех; F — вектор управления съемкой; M — матрица постоянных коэффициентов ОЭС.

Характеристики ОЭС определяются передаточными функциями оптической системы. В пространстве изображений поверхность Земли описывается распределением полезных составляющих x' , y' спектральной освещенности, что в пространственно-частотной области эквивалентно выражению, связывающему спектры входного $\tilde{L}_\lambda(x', y')$ и выходного $\tilde{E}_\lambda(x', y')$ сигналов через оптическую передаточную функцию [11]:

$$\tilde{E}_\lambda(v_{x'}, v_{y'}) = \tilde{H}_{0\lambda}(v_{x'}, v_{y'}) \tilde{L}_\lambda(x', y'),$$

где $\tilde{H}_{0\lambda}(v_{x'}, v_{y'})$ — фурье-образ нормированной функции рассеяния $H_{0\lambda}(x', y')$ для излучения с длиной волны λ :

$$\tilde{H}_{0\lambda}(v_{x'}, v_{y'}) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H_{0\lambda}(x', y') \exp[-2\pi(v_{x'}x' + v_{y'}y')] dx' dy';$$

v_x , v_y — пространственные частоты изображения в продольном и поперечном направлениях.

В этой связи основные имитационные модели процесса дистанционного зондирования можно представить в виде ФПМ [6, 15].

Имитационная модель турбулентности атмосферы описывается формулой Фризера:

$$B_{\text{атм}}(v_x, v_y) = \exp \left\{ -2\pi^2 \frac{Q^2 f^2 (v_x^2 + v_y^2)}{H_{\text{КА}}^2} \right\},$$

где Q — параметр турбулентности атмосферы; f — фокусное расстояние объектива; $H_{\text{КА}}$ — высота космического аппарата над поверхностью Земли.

Имитационная модель объектива описывается выражением

$$D_{\text{об}}(v_x, v_y) = \frac{E_{\text{м}}(v_y, y) E_{\text{с}}(v_x, x) v_x}{\sqrt{E_{\text{с}}^2(v_x, x) v_y^2 + E_{\text{м}}^2(v_y, y) v_x^2}},$$

где $E_{\text{м}}(v_y, y)$ — интегральная ФПМ объектива в меридиональном направлении; $E_{\text{с}}(v_x, x)$ — спектральная составляющая ФПМ объектива в сагиттальном направлении.

Имитационная модель СППИ создается с учетом спектрального состава излучения в фокальной плоскости и спектральных характеристик пропускания среды распространения излучения:

$$S_{\text{СППИ}}^i(v_i) = \frac{1}{I_E} \int_{\lambda_{\text{н}}}^{\lambda_{\text{к}}} S_{\text{СППИ}}^i(v_i, \lambda) k_{\text{об}} k_{\text{ОЭТ}} k_{\text{атм.в}} k_{\text{атм}}^{\cos \theta - 1} G \lambda \Phi d\lambda, \quad i = x, y,$$

где I_E — составляющая, создаваемая отраженным солнечным излучением; $k_{\text{об}}$, $k_{\text{ОЭТ}}$, $k_{\text{атм.в}}$, $k_{\text{атм}}$ — спектральные коэффициенты пропускания объектива, оптико-электронного тракта, атмосферных возмущений и атмосферы соответственно; θ — угол визирования на объект наблюдения относительно местной вертикали; G — спектральная освещенность поверхности Земли; Φ — относительная спектральная чувствительность.

Линейное разрешение на местности. ОЭС позволяют получать пространственную информацию о поверхности Земли в оптическом диапазоне спектра излучения, тем самым определяя совокупность свойств объекта наблюдения. Главная оценка качества изображения — его линейное разрешение на местности.

В соответствии с задачами наблюдения при моделировании ОЭС фурье-образ нормированной функции рассеяния должен быть более высокого порядка, чем это требуется по техническому заданию. В этой связи модель для оценки линейного разрешения на местности имеет следующий вид [15]:

$$\Psi(v) = \frac{d}{2v^* f \cos \zeta} = \frac{R_3}{2v^* f} \left(\frac{(R_3 + H_{\text{КА}}) \cos \theta_z}{\sqrt{R_3^2 - (R_3 + H_{\text{КА}})^2 \sin^2 \theta}} \right);$$

$$\zeta = \arcsin \left(\frac{R_3 + H_{\text{КА}}}{R_3} \sin \theta \right); \quad d = R_3 \frac{\sin(\zeta - \theta)}{\sin \theta},$$

где ζ — зенитный угол; R_3 — средний радиус Земли; d — имитируемая наклонная дальность съемки; v^* — разрешающая частота ОЭС.

Заключение. Рассмотрены методы и средства моделирования ОЭС космического назначения с использованием разработанного алгоритма. Показано, что имитационное моделирование совместно с натурным экспериментом позволяет выполнить исследование опытного образца системы с целью оптимизации ее структуры и тактико-технических параметров. Приведено описание некоторых имитационных процессов и моделей системы дистанционного зондирования поверхности Земли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демин А. В., Денисов А. В., Летуновский А. В. Оптико-цифровые системы и комплексы космического назначения // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 3. С. 51—59.
2. Астапов А. П., Васильев Д. В., Заложнев Ю. И. Теория оптико-электронных следящих систем. М.: Наука, 1988. 328 с.
3. Бакут П. А., Жулина Ю. В., Иванчук Н. А. Обнаружение движущихся объектов / Под ред. П. А. Бакута. М.: Сов. радио, 1980. 288 с.
4. Гарбук С. В., Гершензон В. Е. Космические системы дистанционного зондирования Земли. М.: Изд-во „А и Б“, 1997. 296 с.
5. Гош С., Чандра А. Дистанционное зондирование и географические информационные системы. М.: Техносфера, 2008. 328 с.
6. Демин А. В., Денисов А. В. Разработка и исследование математической модели дистанционного зондирования поверхности Земли на виртуальном полигоне // Сб. статей XLV Междунар. науч.-практ. конф. № 4 (41) „Технические науки — от теории к практике“. Новосибирск: СибАК, 2015. С. 100—106.
7. Карпов Ю. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование. СПб: БВХ-Петербург, 2005.
8. Демин А. В., Денисов А. В. Методы и средства моделирования систем дистанционного зондирования Земли из космоса // Инженерный вестн. Дона. 2015. № 2 [Электронный ресурс]: <ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2015/2914>.
9. Демин А. В., Денисов А. В. Моделирование функционально-параметрических характеристик систем дистанционного зондирования поверхности Земли в оптическом диапазоне спектра излучения // Южно-Сибирский науч.-техн. вестн. 2015. № 1 (9). С. 46—49.
10. Максимей И. В. Имитационное моделирование на ЭВМ. М.: Радио и связь, 1988. 232 с.
11. Торшина И. П. Компьютерное моделирование оптико-электронных систем первичной обработки информации. М.: Университетская книга — Логос, 2009. 248 с.
12. Демин А. В., Денисов А. В. Разработка динамической сцены для моделирования и анализа проектных решений оптико-цифровых систем дистанционного зондирования поверхности Земли // Южно-Сибирский науч.-техн. вестн. 2015. № 1 (9). С. 50—56.
13. Аванесов Г. А., Василевский А. С., Зиман Я. Л., Полянский И. В. Цифровые авиационные съемочные системы на линейных ПЗС-детекторах // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2005. С. 189—195.
14. Демин А. В., Денисов А. В. Программно-аппаратный комплекс моделирования процесса съемки // Инженерный вестн. Дона. 2015. № 2 [Электронный ресурс]: <ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2015/2913>.
15. Батраков А. С., Анатольев А. Ю. Математическая модель для прогнозирования линейного разрешения космических оптико-электронных систем дистанционного зондирования // Оптич. журн. 2000. Т. 67, № 7.

Сведения об авторе

Андрей Васильевич Денисов — Университет ИТМО; кафедра оптико-цифровых систем и технологий; ведущий инженер; E-mail: www.denisoff@mail.ru

Рекомендована кафедрой
оптико-цифровых систем и технологий

Поступила в редакцию
31.08.15 г.

Ссылка для цитирования: Денисов А. В. Моделирование оптико-электронных систем космического назначения // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 11. С. 882—889.

SIMULATION OF OPTOELECTRONIC SYSTEMS FOR SPACE APPLICATIONS

A. V. Denisov

ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia

E-mail: www.denisoff@mail.ru

Optimization of optical-electronic system for the range of 0.42 – 1.1 μm with the use of imitation modeling of the system units is considered. The proposed approach allows for substitution of complicated and expensive field tests for investigation of a remote sounding system, with a combined application of nature and mathematical modeling on the base of modern information technologies at the stage of the system design as well as at the stage of field exploitation. The approach is aimed at improvement of the design methods and means, and at improvement of control over such parameters of perspective space systems equipment as spectral range of operation, physical aperture, linear resolution of the terrain, and the system performance. Solution to the problem opens a way to simulation of the survey process and therefore improvement of functional and parametric characteristics of the system in the process of design and coordination of technical data both at the stage of drawing up technical specifications, and in the process of full-scale field tests.

Keywords: optical-electronic system, remote sensing of the Earth surface, the system of reception and transformation of information, lens, linear ground resolution.

Data on author

Andrey V. Denisov — ITMO University, Department of Optical and Digital Systems and Technologies; Leading Engineer; E-mail: www.denisoff@mail.ru

For citation: Denisov A. V. Simulation of optoelectronic systems for space applications // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroyeniye. 2015. Vol. 58, N 11. P. 882—889 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-11-882-889