Методы и средства моделирования систем дистанционного зондирования Земли из космоса

*А.В. Демин, А.В. Денисов*

*Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет*

*информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург*

Аннотация: В данной работе рассмотрены методы и средства моделирования системы дистанционного зондирования поверхности Земли из космоса в оптическом диапазоне спектра излучения с целью оптимизации ее структуры и функциональных параметров. Структуру сложной информационно-измерительной системы дистанционного зондирования исследовать экспериментальным натурным путем очень сложно и весьма дорого в связи с симбиозом различных физических и технологических процессов происходящих в ней. Выход лежит в совокупном применении натурного и математического моделирования с применением современных IT-технологий, как на этапе создания, так и на этапе эксплуатации, с целью повышения методов и средств проектирования, а также улучшения контроля параметров аппаратуры перспективных космических систем (спектрального диапазона, физической светосилы, линейного разрешения на местности и производительности самой системы).

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование поверхности Земли, космическая система, система приема и преобразования информации, объектив, приемная оптическая система, подстилающая поверхность Земли, космическая съемка, линейное разрешение на местности.

Свое развитие дистанционное зондирование поверхности Земли (ДЗЗ) из космоса в оптическом диапазоне спектра излучения (~ 0,4 ÷ 1,2 мкм) получило в конце 60-х и начале 70-х годов прошлого столетия. Аппаратура (на тот момент только осваивалась область не только ДЗЗ, но и всего космоса) первых космических средств дистанционного зондирования была трассового типа и определялась проекцией области измерений, на подстилающую поверхность Земли, представляющую собой линию. На сегодняшний момент в приемной оптической аппаратуре устанавливаются перспективные сканерные матрицы на базе приборов зарядовой связи. Они позволяют получать пространственную информацию, как о географических, так и техногенных процессах о поверхности Земли в видимом и инфракрасном диапазонах длин электромагнитных волн [1, 2]. Как правило, съемка из космоса происходит в панхроматическом и мультиспектральном режимах, позволяя тем самым получать пространственное изображение в различных диапазонах спектра излучения [3].

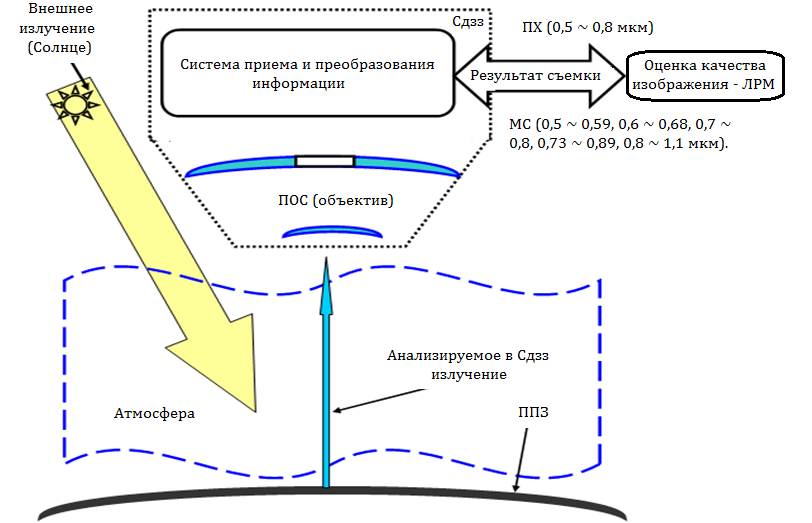


Рис. 1. – Принцип дистанционного зондирования поверхности Земли в оптическом диапазоне спектра излучения

Панхроматическая съемка (ПХ) занимает весь видимый диапазон электромагнитного спектра излучения (~ 0,5 ÷ 0,8 мкм) и тем самым представляются в градациях черно-белых (серых) цветов и обладает более высоким линейным разрешением, чем мультиспектральная съемка (МС). Где, система приема и преобразования информации формирует несколько отдельных изображений для широких спектральных зон в следующих диапазонах ~ 0,5 ÷ 0,59, 0,6 ÷ 0,68, 0,7 ÷ 0,8, 0,73 ÷ 0,89, 0,8 ÷ 1,1, 0,9 ÷ 1,1 мкм [4].

Из представленных в таблице № 1 тактико-технических характеристик, и в соответствии с процессом приема и преобразования информации в оптическом диапазоне, представленном на рис. 1, можно говорить о том, что съемка из космоса является нестационарным процессом, захватывающим многие области науки, результатом которого является не только правильность работы всех звеньев системы, но и обеспечение количественного показателя на выходе – линейного разрешения на местности [5].

Таблица № 1

Качественные и количественные характеристики действующих систем дистанционного зондирования

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Наимено-вание КА | Страна-изгото-витель | H,  км | Режим съемки | | Нак-лон КА, град | Перио-дичность съемки в сутки | Полоса захва-та, км | Линейное разреше-ние на местнос-ти, м | |
| ПХ | МС | ПХ | МС |
| GeoEye-1 | США | 770 | + | | 98,1 | 2,3 | 15,2 | 0,46 | 1,65 |
| Pleiades-1A, 1B | Фран-ция | 705 | + | | 98,2 | 1 | 20 | 0,5 | 2,0 |
| Ресурс-ДК1 | Россия | 360-604 | + | | 64,8; 64,9: 70,0; 70,4 | 6 | От 4,7 до 28,3 | 1 | 2-3 |
| DubaiSat-2 | Корея | 600 | + | | 97,8 | Не доступно | 12 | 1 | 4 |

Получаемую со спутника информацию можно рассматривать как результат прохождения ее от подстилающей поверхности Земли (ППЗ) через оптико-электронный тракт, состоящий из атмосферы и ее возмущений, системы приема и преобразования информации (СППИ) и объектива. Модель дистанционного зондирования в рамках теории линейных систем в виде следующего функционала

*AСдзз = {BАтмосферы*⊗ *CАтм.возмущений* ⊗ *DСъемки* ⊗ *EСППИ* ⊗ *FОбъектива},* (1)

где

*{BАтмосферы*⊗ *BАтм.возмущений* ⊗ *CСъемки* ⊗ *DСППИ* ⊗ *EОбъектива}* – суперпозиции оптических свойств атмосферы, оптических возмущений, изображение объекта съёмки и способов приёма и обработки оптической информации.

В связи с вышесказанным при разработке сложных космических систем особенно широкое применение находят методы и средства математического моделирования, которые по сравнению с методами натурного и полунатурного моделирования обладают явными преимуществами в плане ресурсных и временных затрат. Поэтому математическое моделирование с применением IT-технологий является неизбежной составляющей научно-технического и технологического прогресса. Различными аспектами моделирования посвящено немало работ, и все они рассматривались и изучаются на данный момент времени для различных процессов – от экономических до физических. Но, как правило, для исследования сложных космических систем применяются в основном два типа математических моделей – аналитическое и имитационное. Классификация методов моделирования представлено на рис. 2 [6].

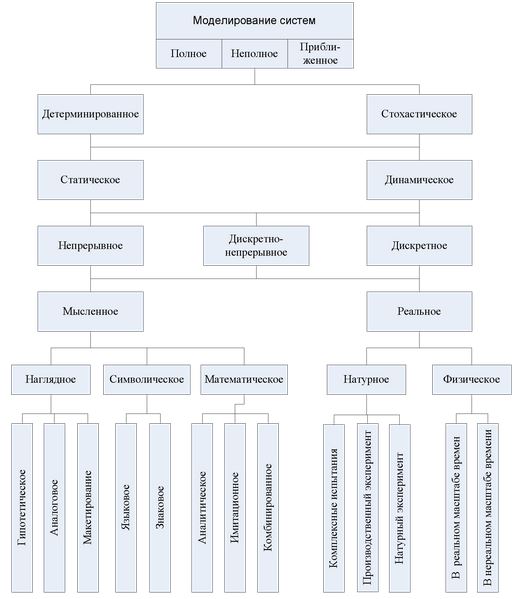


Рис. 2. – Классификация методов моделирования

Аналитическое и имитационное моделирование часто противопоставляются друг другу, в связи с тем, что общий функционал системы имитационной модели дистанционного зондирования составляется в виде одного или нескольких уравнений. А отличием аналитического подхода, является, то, что динамика космической системы учитывается при составлении функционала, а не реализуется в виде последовательностей операций. Остановимся на плюсах и минусах для данных методов чуть поподробнее.

Аналитические модели позволяют 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 моделей. Для сложных же систем, в которых явления и процессы, в них происходящие, многопараметричны и многообразны, что, именно, и имеет место, в частности, в системах дистанционного зондирования из космоса [7].

В этой связи, метод математического имитационного моделирования позволяет осуществить численное моделирование поведения подсистем космической системы ДЗЗ и их взаимодействия с учетом возмущений различной природы в течение заданного или формируемого периода времени. Тем самым, стоит говорить о том, что имитационная модель есть специальный аппарат, связывающий натурный и виртуальный эксперимент в едином программно-аппаратном комплексе, имитирующий полное функционирование системы дистанционного зондирования поверхности Земли в оптическом диапазоне спектра излучения с сохранением всех физических и технологических процессов. Блок-схема имитационного моделирования системы дистанционного зондирования одним из многочисленных способов представлена на рис. 3 [8].

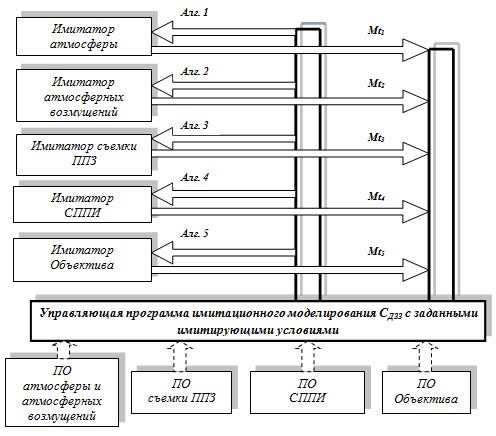


Рис. 3. – Блок-схема имитационного моделирования способом просмотра активностей блоков

Где

*Mt* – модельное время имитируемого блока системы ДЗЗ (СДЗЗ); *Алг* – алгоритм имитации каждого имитируемого блока; *ПО* – программное обеспечение имитационного моделирования СДЗЗ по принятым аналитическим соотношениям.

Также следует отметить, что для имитационного моделирования применяются следующие методы:

* моделирование способом составления расписаний событий;
* моделирование транзактным способом;
* моделирование агрегатным способом;
* моделирование процессным способом.

Перспективность же метода способом просмотра активностей блоков состоит в том, что он является наиболее удобным по сравнению с выше представленными методами для имитационного моделирования системы ДЗЗ. Его преимущество, заключается в том, что представление системы в виде активируемых блоков позволяет в процессе моделирования управлять и изменять тактико-технические характеристики модели дистанционного зондирования, что крайне удобно при поиске оптимальных проектных решений.

Имитационная модель системы дистанционного зондирования является отображением функционирования подсистем реального опытного образца. При этом ее, возможно, отобразить в различных математических соотношениях: математической структурной формой первого порядка, системой уравнений, макромоделью, дифференциальных уравнений, в виде пространственно-временной кинематической модели и других видах. Также имитационную модель ДЗЗ можно представить в матричном виде, где учитывается вся структура космической системы, которая (может быть) по сравнению с моделью дифференциальных уравнений имеет довольно простой вид, но сохраняет структуру модели в цельном виде в процессе всей имитации. Таким образом, общую имитационную модель СДЗЗ можно представить в следующем матричном виде (2)

(2)

где

*F*Объектива *–* матрица хода лучей, входящих в объектив; *F'*Объектива *–* матрица лучей, выходящих из объектива; *F*ОД Объектива – матрица, представляющая собой оператор действия; *E*СППИ*–* матрица действия СППИ;  *–* вектор параметров СППИ; *A*ДВ*–* матрица, учитывающая движение СДЗЗ по орбите; *B*АТМ – матрица действия атмосферы; *C*Атм. возмущений – матрица действия помех, фонов, дымки, турбулентности и т.д.; *–* вектор параметров помех, фонов, дымки, турбулентности и т.д.; *–* вектор управления съёмкой; *М*КОЭФ *–* матрица постоянных коэффициентов СДЗЗ.

В связи с вышесказанным, представим основные имитационные модели дистанционного зондирования поверхности Земли в оптическом диапазоне спектра излучения. Для этого воспользуемся представленной математической моделью (2), где построен процесс взаимодействия системы ДЗЗ с ППЗ образуя последовательность передачи оптико-электронного тракта: «СДЗЗ – атмосфера – граница действия возмущений – спектральный диапазон (входной сигнал) – поверхность Земли – спектральный диапазон (выходной сигнал) – граница действия возмущений – атмосфера – СДЗЗ».

На системном уровне СППИ представима в виде пространственного фильтра, характеризуемая функцией рассеяния (импульсная реакция) *H*0*(x', y',* или в виде оптической передаточной функции (ОПФ) . Кроме этого, геометрические и энергетические преобразующие свойства оптической системы описываются спектральным коэффициентом пропускания τ0(λ). Распределение полезной составляющей спектральной освещенности в плоскости изображения *x'*, *y'* СППИ связано с распределением спектральной ППЗ следующим выражением

(3)

где

– распределение спектральной яркости пространства съемочного объекта, отнесенного к координатам плоскости изображения;

– заданный апертурный угол съемки;

– спектральный коэффициент пропускания атмосферы.

В пространственно-частотной области соотношению (4) эквивалентно выражение (3), связывающее спектры входного и выходного сигналов через ОПФ СППИ

(4)

где

– Фурье-образ нормированной функции рассеяния для излучения с длиной волны 𝜆.

(5)

Рассмотрим общие соображения по синтезу вида функции рассеяния ОПФ объектива космической системы. В качестве первого приближения принимается, что объективне имеет аберраций, а качество формируемого в СППИ изображения ограничено лишь дифракцией на входном зрачке [9]. В этом случае функция рассеяния для объектива с круглым зрачком без экранирования имеет вид

(6)

где

– функция Бесселя первого рода первого порядка.

(7)

а ОПФ –

(8)

где

– предельная пространственная частота;

(9)

Для сложных многозвенных объективов более точной аппроксимацией полихроматической функции рассеяния является двумерная функция Гаусса

(10)

где

*r0* – эффективный радиус пятна рассеяния объектива.

ОПФ в этом случае имеет вид

При проектировании космической системы, в соответствии с задачами наблюдения, ОПФ СППИ с объективом должна иметь достаточно высокий уровень на пространственных частотах, необходимых для обеспечения заданной величины линейного разрешения на местности.

Например, спутники двойного назначения GeoEye-1 и WirldView-II реализованные в США обеспечивают просмотр ППЗ с проекцией пиксела в панхроматическом канале 0,41 ~ 0,46 м соответственно, первый в полосе захвата 15,2 км, а второй – 16,4 м с высоты орбиты 770 км и 684 км соответственно. При этом масса первого КА составляет 1955 кг, а масса второго – 2800 кг, диаметр входного зрачка телескопа – 1,1 м для обоих КА, эффективная длина строки СППИ – порядка 36 000 пикселов. Наблюдение производится одновременно в панхроматическом и мультиспектральном спектральных диапазонах съемок. Число спектральных диапазонов мультиспектрального канала в первом КА 4, а во втором – 8.

При описании линейного разрешения на первом этапе определяется разрешающая способность системы в фокальной плоскости. Вычисляется зенитный угол ζ КА из точки наблюдения [10]

(11)

где

*θ* – угол визирования на объект наблюдения относительно местной вертикали;

*R3* = 6371 км – средний радиус Земли;

*HКА* – высота космического аппарата над поверхностью Земли.

Далее рассчитывается наклонная дальность съемки

(12)

затем в соответствии с определением оцениваемого показателя, линейное разрешение на местности представляется в следующем виде

(13)

где

*f* – фокусное расстояние объектива;

*v*– значение разрешаемой частоты в изображении, штр/мм.

**Таким образом, в данной публикации в соответствии с теорией систем были рассмотрены и проанализированы методы и средства моделирования системы дистанционного зондирования поверхности Земли в оптическом диапазоне спектра излучения. Показано, что имитационное моделирование на примере способа просмотра активностей блоков позволяет выполнить целенаправленное исследование опытного образца системы с целью оптимизации ее структуры и тактико-технических параметров. Приведены некоторые имитационные процессы и модели оптических информационно-измерительных систем дистанционного зондирования.**

Литература

1. Гермак О.В. Использование данных дистанционного зондирования для экологического мониторинга опустынивания // Инженерный вестник Дона, 2013, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2167.

2. Кузнецов К.К. Имитационное моделирование взаимосвязи инициаторов высокотехнологичных инноваций // Инженерный вестник Дона, 2009, №14 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2009/250.

3. Кутузов С. А., Марданова М. А., Осипков Л. П., Старков В. Н. Проблемы математического моделирования космических систем. – СПб: СОЛО, 2000 г. С. 228.

4. Демин А.В., Денисов А.В. «Моделирование функционально-параметрических характеристик систем дистанционного зондирования поверхности Земли в оптическом диапазоне спектра излучения». Южно-Сибирский научно-технический вестник, выпуск № 1 (9). 2015 г. – С. 46-49.

5. Данные геоинформационной системы и космического мониторинга СОВЗОНД. – URL: sovzond.ru.

6. Демин А. В., Копорский Н. С. Имитационное моделирование информационно-измерительных и управляющих систем: Монография. – СПб: СПБГУ ИТМО, 2007 г. С. 139.

7. Малышев А.К., Ростиславский М.Б. К вопросу об оптимизации метода свободного поиска // Всероссийская компьютерная конференция «Поисковые алгоритмы в XXI веке». М.: Прогрессор, 2013. С. 175-186.

8. Торшина И. П. Компьютерное моделирование оптико-электронных систем первичной обработки информации. – М.: Университетская книга; Логос, 2009 г. С. 248.

9. John R Jensen. Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective (2nd Edition). – М: Prentice Hall, 2006. P. 608.

10. Thomas Lillesand, Ralph W. Kiefer, Jonathan Chipman. Remote Sensing and Image Interpretation. – М: Wiley, 2007. P. 469.

References

1. Germak O.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2167.

2. Kuznecov K.K Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2009, №14 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2009/250.

3. Kutuzov S. A., Mardanova M. A., Osipkov L. P., Starkov V. N. Problemy matematicheskogo modelirovanija kosmicheskih system [Problems of mathematical modeling of space systems]. SPb.: SOLO, 2000. p. 228.

4. Demin A.V., Denisov A.V. Juzhno-Sibirskij nauchno-tehnicheskij vestnik, vypusk № 1 (9) 2015. рр. 46-49.

5. Dannye geoinformacionnoj sistemy i kosmicheskogo monitoringa SOVZOND. URL: sovzond.ru.

6. Demin A. V., Koporskij N. S. Imitacionnoe modelirovanie informacionno-izmeritel'nyh i upravljajushhih sistem: Monografija. [Simulation data-measuring and control systems] SPb: SPBGU ITMO, 2007. p. 139.

7. Malyshev A.K., Rostislavskij M.B. Vserossijskaja komp'juternaja konferencija «Poiskovye algoritmy v XXI veke» (To the question of optimization of the method of free search. All computer conference "Search algorithms in the XXI century"). M.: Progressor, 2013. pp. 175-186.

8. Torshina I. P. Komp'juternoe modelirovanie optiko-jelektronnyh sistem pervichnoj obrabotki informacii. [Computer simulation of optoelectronic systems for primary processing] M.: Universitetskaja kniga; Logos, 2009 g. p. 248.

9. John R Jensen. Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective (2nd Edition). M: Prentice Hall, 2006. P. 608.

10. Thomas Lillesand, Ralph W. Kiefer, Jonathan Chipman. Remote Sensing and Image Interpretation. M: Wiley, 2007. P. 469.