Формирование прогнозных изображений видимого диапазона на основе трехмерных цифровых моделей местности с текстурным покрытием

Generation of visible-range forecast images based on three-dimensional digital terrain models with a texture coating

Филиппских / Philippskih E.
Евгений Эдуардович
(phil_ml@list.ru, vka@mil.ru)
кандидат технических наук
ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского» МО РФ
(ВКА имени А. Ф. Можайского),
начальник отдела.
г. Санкт-Петербург

Попов / Popov A.
Анатолий Васильевич
(vka@mil.ru)
кандидат технических наук,
почетный работник науки и техники РФ.
ВКА имени А. Ф. Можайского,
старший научный сотрудник лаборатории.
г. Санкт-Петербург

Галкин / Galkin F.
Федор Александрович
(vka@mil.ru)
кандидат технических наук, доцент.
ВКА имени А. Ф. Можайского,
старший научный сотрудник отдела.
г. Санкт-Петербург

Захарчук / Zaharchuk A.
Алексей Викторович
(vka@mil.ru)
ВКА имени А. Ф. Можайского,
старший научный сотрудник лаборатории.
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: трехмерная цифровая модель местности – three-dimensional digital terrain model; текстурное покрытие – texture coating; прогнозное изображение – forecast image; видимый диапазон электромагнитного спектра – visible range of electromagnetic spectrum; оптико-электронное изображение – optoelectronic image; оптический датчик – optical sensor; дистанционное зондирование земной поверхности – remote sensing of the Earth surface.

В статье приводится описание предложенного авторами метода формирования прогнозных изображений видимого диапазона на основе использования трехмерных цифровых моделей местности, содержащих в своем составе текстурные покрытия. Рассмотрены варианты применения подобных прогнозных изображений при решении задач сопровождения на всех этапах их жизненного цикла существующих и перспективных оптических датчиковых средств мониторинга земной поверхности. Представлены примеры расчета прогнозных изображений местности видимого диапазона с использованием разработанного экспериментального программного модуля, реализующего предложенный метод.

The article describes the method of producing forecast visible-range images based on the use of three-dimensional digital terrain models containing textural coatings, proposed by the authors. The options of using similar forecast images as the solution for maintenance of existing and prospective Earth surface monitoring optical sensors at all stages of their life cycle have been reviewed. Examples of visible-range terrain forecast images design based on experimental software module developed for implementation of the proposed method have been presented.

Введение

Постоянное совершенствование и интенсивное развитие датчиковых средств видимого диапазона спектра в составе комплексов дистанционного зондирования земной поверхности, размещаемых, в том числе, на воздушных носителях, обуславливают необходимость решения задач по сопровождению этапов их разработки, испытаний и непосредственного применения на основе использования прогнозных (модельных) изображений местности, рассчитываемых по результатам моделирования функционирования оптико-

электронных датчиков в составе рассматриваемых комплексов.

Один из возможных подходов, обеспечивающих качественное и оперативное решение задачи формирования подобного рода прогнозных изображений, основан на использовании в качестве исходной информации различных геопространственных данных (обеспечивающих в конечном итоге получение трехмерных ЦММ с текстурными покрытиями), параметров моделируемого оптико-электронного датчика (условий его внешнего и внутреннего ориентирования), а также соответствующих модельно-ориентированных методов автоматизированного формирования на их основе прогнозных изображений видимого диапазона.

При использовании такого модельно-ориентированного метода формирования прогнозных изображений видимого диапазона обеспечивается учет основных характерных особенностей изображений видимого диапазона.

Модельно-ориентированный метод формирования прогнозных изображений местности видимого диапазона

Предлагаемый метод формирования прогнозных изображений местности видимого диапазона предусматривает реализацию моделирования процессов функционирования оптико-электронных датчиков воздушных средств дистанционного зондирования земной поверхности на основе модельно-ориентированного подхода с использованием процедуры трассировки лучами трехмерных ЦММ, в том числе содержащих в своем составе высокодетальные текстурные покрытия (формируемые из геокодированных космофотоснимков земной поверхности высокого разрешения) [1].

Процедура трассировки лучами трехмерных ЦММ обеспечивает описание процесса распространения световых лучей от момента их генерации источником до попадания в фотоприемное устройство датчика, включая взаимодействие с объектами трехмерной сцены.

Источниками световых лучей являются объекты природного происхождения, например, Солнце и Луна, а приемниками – системы технического зрения (оптико-электронные датчики) и зрительные рецепторы человека (глаз наблюдателя). Основная идея метода трассировки лучей сводится к повторению геометрических преобразований траектории светового луча на пути источник-объект-приемник [2].

Ключевой задачей метода трассировки лучей является определение освещенности произвольной точки поверхности объектов трехмерной ЦММ. При этом отсутствие освещенности свидетельствует о затененности данной точки. Следовательно, метод трассировки лучей должен обеспечивать выявление видимых поверхностей и определять затененные области.

При моделировании работы датчиков видимого диапазона спектра с использованием метода трассировки задается точка местоположения наблюдателя (оптического датчика), направление наблюдения (по азимуту и углу места) и, в общем случае, положение источника освещения (Солнца, Луны). Положение источника освещения задается с помощью угла места и угла в азимутальной плоскости.

На рис. 1 показана геометрическая интерпретация механизма трассировки лучами трехмерной ЦММ (объекта) при формировании прогнозных изображений местности в видимом диапазоне. От источника освещения L излучается световой пучок. Большинство лучей, испущенных источником, не попадает в фотоприемник S, а значит, и не влияет на формируемое в нем изображение. Лишь очень малая часть лучей после всех отражений и преломлений в конце концов попадает в фотоприемное устройство датчика, создавая при этом изображение трехмерной сцены в его рецепторах.

В этом случае для определения освещенности сцены при формировании оптического изображения предлагается использовать так называемый метод обратной трассировки [2]. Метод обратной трассировки подразумевает рассмотрение наблюдателя (оптического датчика) S (рис. 1) в качестве источника обратных лучей, который фактически аккумулирует все лучи, в действительности приходящие в приемник из определенного направления независимо от их начала.

При этом обеспечивается формирование и отображение на картинной плоскости проекции (рис. 1) следующих элементов:

– непрозрачных объектов, поглощающих обратные лучи;

– отражений от зеркальных поверхностей объектов;

– областей тени, образующихся в точках поверхности, заслоненных от источника другими объектами.

Рассмотрим более подробно процесс обратной трассировки трехмерных ЦММ (рис. 1). Все обратные лучи испускаются из опорной точки проекции S. Данная точка одновременно является точкой местоположения наблюдателя (оптического датчика) с координатами (x_S, y_S, z_S). Направление линии визирования наблюдателя (оптического датчика) задается в азимутальной плоскости углом α, а в угломестной плоскости – углом β. Углы сектора обзора определяются параметрами оптической системы (датчика): фокусным расстоянием f (расстоянием от опорной точки проекции до картинной плоскости проекции) и размерами матрицы приемника с зарядовой связью (ПЗС), лежащей на картинной плоскости проекции. Обозначим угол сектора обзора в азимутальной плоскости как $\theta 1$, а в угломестной – $\theta 2$. Тогда выражения для расчета углов сектора обзора примут следующий вид

$$\theta 1 = 2 \cdot \mathrm{arctg}\left(\frac{a/2}{f}\right), \qquad (1)$$

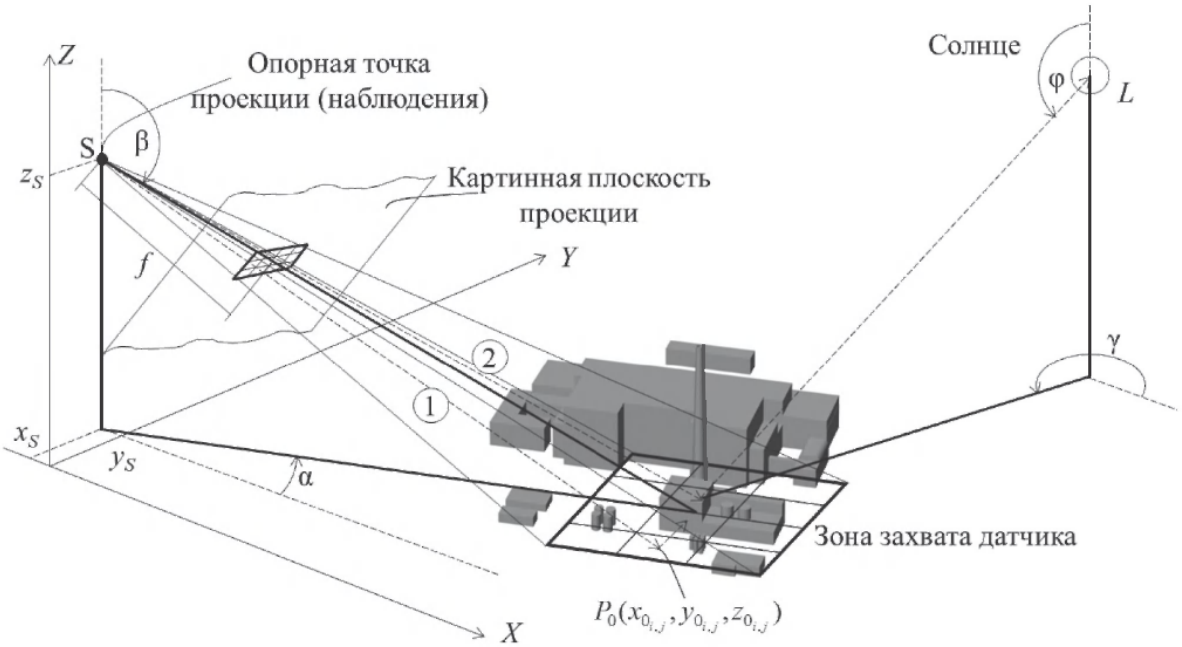

Рис. 1. Геометрическая интерпретация механизма трассировки лучами трехмерной ЦММ (объекта) при формировании прогнозных изображений местности в видимом диапазоне

$$\theta 2 = 2 \cdot \mathrm{arctg}\left(\frac{d/2}{f}\right), \tag{2}$$

где a – ширина матрицы ПЗС, м;

d – высота матрицы ПЗС, м.

Матрица ПЗС характеризуется также линейными размерами элемента матрицы ПЗС, которые, в свою очередь, определяют общее количество этих элементов в составе матрицы ПЗС. Количество лучей трассировки, исходящих из точки наблюдения S, равно количеству элементов матрицы ПЗС. На рис. 2 показан пример матрицы ПЗС размером $M \times N$ элементов. Через элемент матрицы ПЗС $P_{m.n}$, находящийся на пересечении m-ой колонки и n-ой строки, проходит главная оптическая ось.

Координаты $(x_{m\,n}, y_{m\,n}, z_{m\,n})$ точки пересечения главной оптической оси с картинной плоскостью проекции (матрицей ПЗС) $P_{m.n}$ (рис. 2) определяются по следующим выражениям для перехода от сферических координат к декартовым

$$x_{m,n} = x_S + f \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\alpha), \tag{3}$$

$$y_{m,n} = y_S + f \cdot \sin(\beta) \cdot \sin(\alpha), \tag{4}$$

$$z_{m,n} = z_S + f \cdot \cos(\beta). \tag{5}$$

Для задания $M \times N$ лучей трассировки необходимо определить координаты $(x_{i,j}, y_{i,j}, z_{i,j})$, $i \in [0;M)$, $j \in [0;N)$ геометрических центров $C_{i,j}$ элементов матрицы ПЗС с использованием следующих выражений

$$x_{i,j} = x_{m,n} + r_{i,j} \cdot \sin\left(\beta - \frac{\pi}{2}\right) \cdot \cos\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right); \tag{6}$$

$$y_{i,j} = y_{m,n} + r_{i,j} \cdot \sin\left(\beta - \frac{\pi}{2}\right) \cdot \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right); \tag{7}$$

$$z_{i,j} = z_{m,n} + r_{i,j} \cdot \cos\left(\beta - \frac{\pi}{2}\right), \ i \in [m;M), \ j \in [0;n], \tag{8}$$

где $r_{i\,j}$ – расстояние (в картинной плоскости проекции) от центральной точки ПЗС матрицы с координатами $(x_{m,n}, y_{m,n}, z_{m,n})$ до точки геометрического центра элемента ПЗС матрицы $C_{i,j}$, находящейся на пересечении i-го столбца и j-ой строки.

Значения $r_{i\,j}$ определяются исходя из линейных размеров элементов матрицы ПЗС.

Пространственное положение $N \times M$ лучей трассировки, исходящих из точки наблюдения $S\,(x_S, y_S, z_S)$, задается с помощью рассчитанных координат центров $C_{i,j}\,(x_{i,j}, y_{i,j}, z_{i,j})$, $i \in [0;M)$, $j \in [0;N)$ элементов матрицы ПЗС размером $N \times M$ в виде уравнения прямой

$$\frac{x - x_S}{x_{i,j} - x_S} = \frac{y - y_S}{y_{i,j} - y_S} = \frac{z - z_S}{z_{i,j} - z_S}, \ i \in [0;M), \ j \in [0;N). \tag{9}$$

Далее осуществляется непосредственно процесс трассировки ЦМ ФЦО всеми $N \times M$ лучами.

По известным координатам начальных и конечных точек можно определить уравнения прямых, в которых лежат трассирующие лучи. Данные уравнения имеют вид

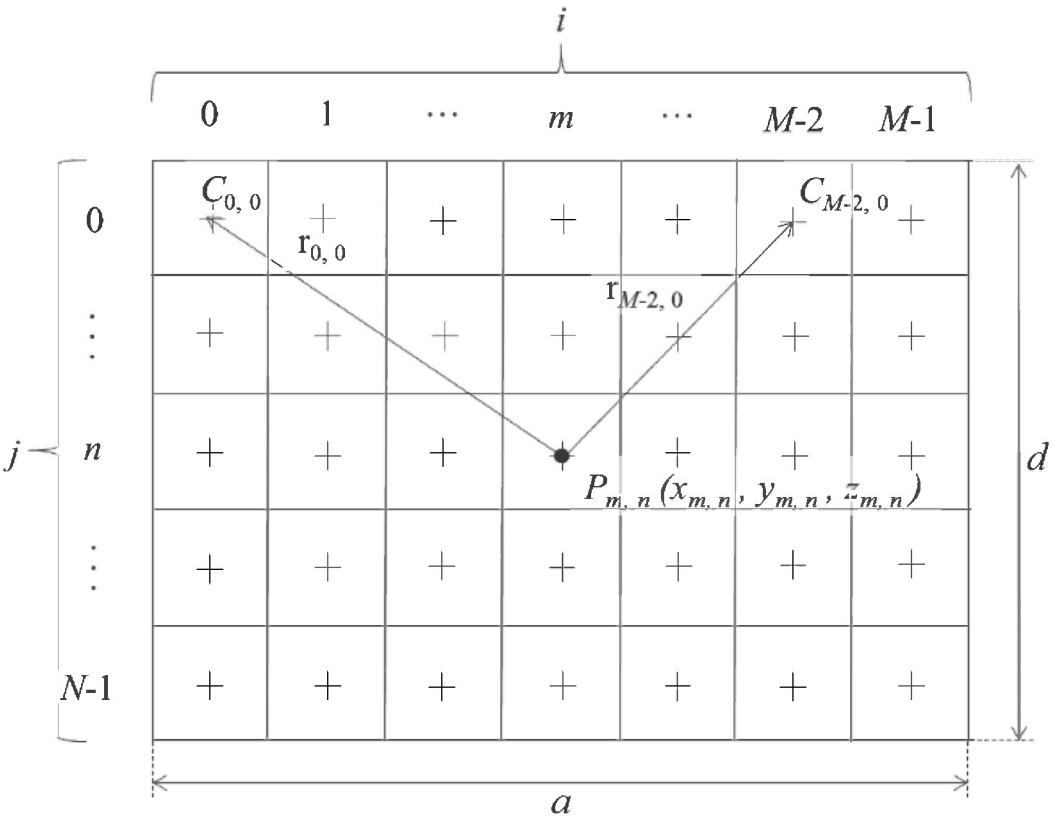

Рис. 2. Пример матрицы ПЗС размером $M \times N$ элементов

$$y = kx + b,\ z = hx + b. \qquad (10)$$

После подготовительного этапа по определению уравнений прямых, в которых лежат трассирующие лучи, осуществляется непосредственно этап трассировки трехмерной ЦММ. Сущность данного этапа сводится к определению координат точек пересечения лучей и треугольных фацетов, описывающих поверхность объекта (местности).

Положение треугольного фацета в пространстве задается с помощью трех вершин и вектора нормали к его поверхности. При поиске точек пересечения фацетов и лучей трассировки может оказаться так, что один луч пересекает несколько фацетов. Считается, что луч пересекает тот фацет, точка пересечения с которым, находится ближе всего к начальной точке (точке S местоположения оптического датчика, рис. 1). Данный фацет считается видимым, т.е. он не затенен другими фацетами.

Исходя из вышесказанного, решение задачи определения точки пересечения трассирующего луча и фацета сводится к последовательному выполнению следующих шагов:

– определение точки пересечения луча трассера с плоскостью, в которой лежит фацет;

– проверка условия попадания точки пересечения внутрь фацета;

– выбор фацета, пересекающегося с лучом трассера в точке, наиболее приближенной к начальной точке (точке испускания луча).

С целью определения освещенности элемента $P_{i,j}$ матрицы ПЗС (рис. 2) из соответствующей точки $P_0(x_{0_{i,j}}, y_{0_{i,j}}, z_{0_{i,j}})$ пересечения трассирующего луча с фацетом по направлению на источник освещения L (рис. 1) задается вторичный стробирующий луч. Для вторичного стробирующего луча аналогичным образом определяется точка пересечения с фацетом элемента трехмерной сцены. Если вторичный луч пересекает какой-либо фацет сцены, то считается, что точка пересечения трассирующего луча с фацетом $P_0(x_{0_{i,j}}, y_{0_{i,j}}, z_{0_{i,j}})$ затенена, а следовательно соответствующий элемент $P_{i,j}$ матрицы ПЗС (пиксель формируемого изображения) будет содержать значение яркости, соответствующее области световой тени. Данному случаю соответствует пример распространения луча «1» на рис. 1. Значения уровней яркости пикселей формируемого оптического изображения, содержащих область тени, рассчитываются с учетом значения угла-места φ положения источника света L, а также с учетом состояния атмосферы (дождь, туман, облачность и т.д.).

Если же вторичный луч на своем пути не пересекает ни одного фацета сцены, то считается, что точка пересечения трассирующего луча с фацетом $P_0(x_{0_{i,j}}, y_{0_{i,j}}, z_{0_{i,j}})$ является освещенной, а следовательно элемент $P_{i,j}$

матрицы ПЗС (пиксель формируемого изображения) будет содержать значение яркости, соответствующее освещенной области. Данному случаю соответствует пример распространения луча «2» на рис. 1.

В конечном итоге значение яркости каждого пикселя формируемого изображения рассчитывается с учетом яркости соответствующих пикселей текстурного изображения из состава трехмерной ЦММ (попадающих в элемент разрешения), а также условий их освещенности.

В результате трассировки формируется матрица оптического изображения размерностью $N \times M$ для заданных условий наблюдения и освещения, содержащая значения рассчитанных уровней яркости пикселей, соответствующих затененным и освещенным областям трехмерной ЦММ.

Результаты реализации метода формирования прогнозных изображений видимого диапазона на основе трехмерных цифровых моделей местности с текстурным покрытием

Для подтверждения возможностей формирования прогнозных изображений видимого диапазона на основе использования трехмерных ЦММ, содержащих в своем составе текстурные покрытия, было осуществлено апробирование предложенного метода с помощью экспериментального программного модуля (ПМ) формирования прогнозных изображений видимого диапазона.

К основным функциональным возможностям ПМ формирования прогнозных изображений видимого можно отнести следующие:

– поддержка графического интерфейса пользователя;

– загрузка и визуализация трехмерных ЦММ;

– задание параметров для расчета прогнозных ОЭИ;

– непосредственно расчет прогнозных ОЭИ на основе трехмерных ЦММ для заданных элементов внешнего ориентирования, траектории перемещения и технических характеристик оптико-электронного датчика (масштаба и детальности изображения);

– визуализация рассчитанных прогнозных изображений с обеспечением выполнения необходимых сервисных функций, включая сохранение в базе данных.

Необходимым условием для расчета прогнозного изображения видимого диапазона является наличие загруженной трехмерной ЦММ, содержащей в своем составе:

– рельеф местности;

– маршрут (траекторию) полета воздушного судна;

– текстурное покрытие на основе матрицы планового изображения;

– объекты инфраструктуры и фоновые образования (при наличии).

Также необходимо задать условия наблюдения и параметры функционирования моделируемого оптического датчика [3], а именно:

– тип (наименование) оптического датчика аппаратуры наблюдения;

– значения параметров функционирования оптического датчика;

– координаты точки наблюдения (проецирования);

– направление наблюдения (углы задания пространственного положения оптической оси датчика).

Перечень параметров функционирования оптического датчика при расчете прогнозных изображений в приближении геометрической оптики включает в себя:

– фокусное расстояние оптической системы, м;

– ширину и высоту элемента ПЗС матрицы, м;

– ширину и высоту ПЗС матрицы (количество элементов).

Параметры положения естественного источника освещения (Солнце, Луна) задаются в соответствии с результатами расчета на заданную дату.

Кроме того, имеется возможность задавать (изменять) количество отсчетов (трассирующих лучей), приходящихся на один элемент разрешения (по обеим координатам) формируемого прогнозного ОЭИ. По умолчанию значение данного параметра равно единице. Увеличение количества элементов осреднения обеспечивает повышение точности расчета прогнозных изображений, но приводит к значительному увеличению временных затрат.

Когда все параметры моделируемого датчика заданы, активизируется процесс расчета прогнозного изображения видимого диапазона, которое в дальнейшем визуализируется и при необходимости сохраняется в базе данных.

Пример внешнего вида диалогового окна ПМ формирования прогнозных изображений видимого диапазона представлен на рис. 3.

В качестве одного из тестовых районов для апробирования предложенного метода был выбран участок местности с ярко выраженным рельефом, границы которого представлены на рис. 4.

При расчете прогнозного оптико-электронного изображения с использованием трехмерной ЦММ был выбран тестовый оптический датчик сканерного типа со следующими параметрами:

– фокусное расстояние оптической системы – 0.015 м;

– ширина элемента ПЗС матрицы – 0.00075 м;

– высота элемента ПЗС матрицы – 0.00075 м;

– ширина ПЗС матрицы – 200 элементов;

– высота ПЗС матрицы – 1 элемент.

Моделировались условия наблюдения с высоты 300 м в надир.

Результат формирования прогнозного изображения оптико-электронного датчика сканерного типа при наблюдении земной поверхности с сильно выраженным рельефом с высоты 300 м представлен на рис. 5.

Результаты сравнительного анализа полученного прогнозного изображения видимого диапазона и соответствующего ему исходного детального космического изображения на тот же участок местности (рис. 5) свидетельствуют о том, что использование предложенного метода

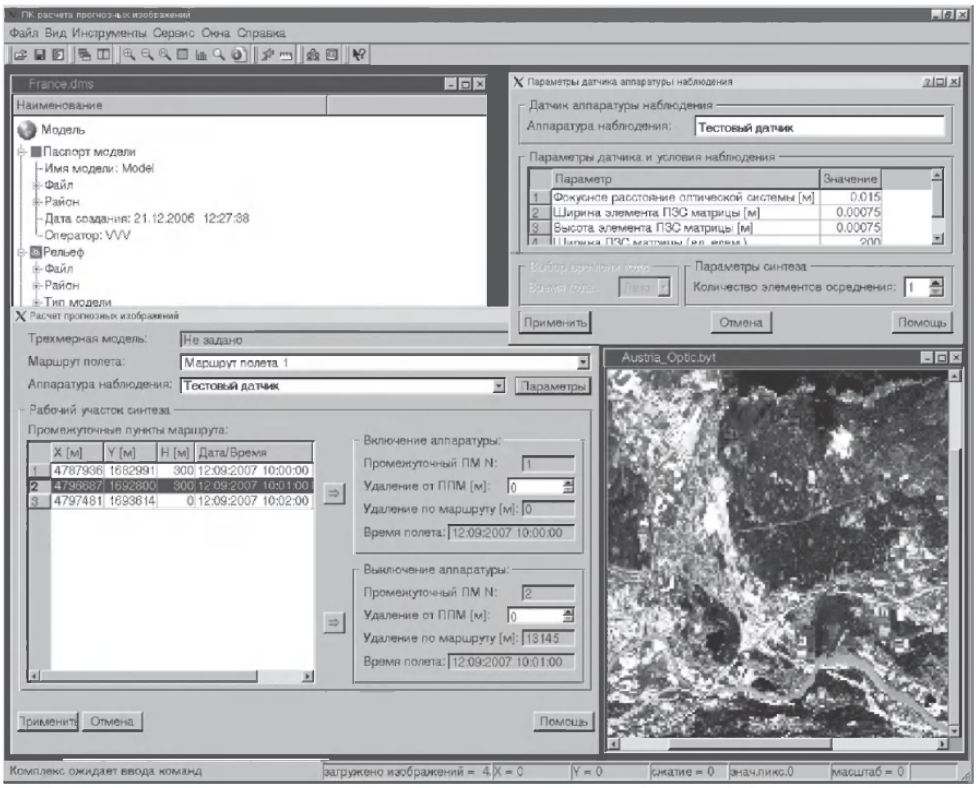

Рис. 3. Пример внешнего вида диалогового окна ПМ формирования прогнозных изображений видимого диапазона

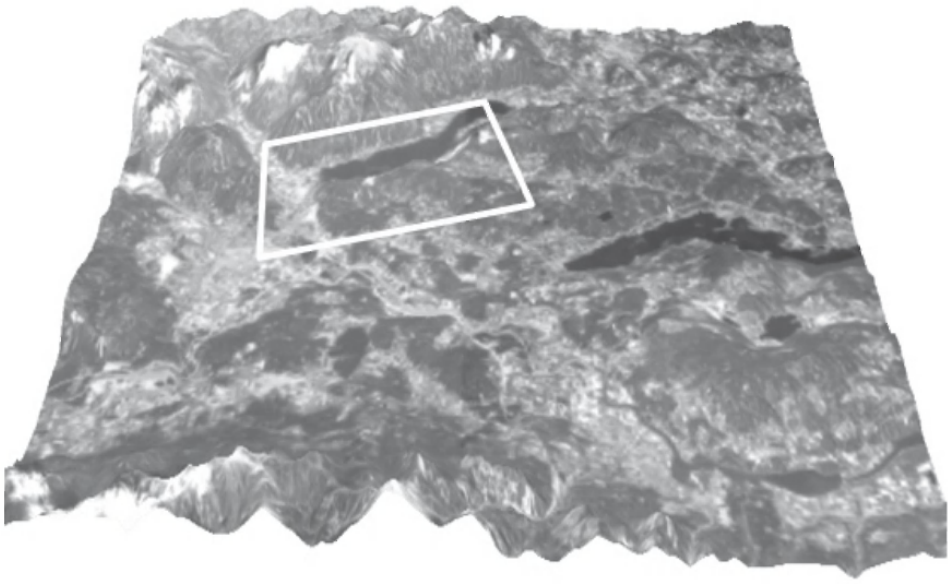

Рис. 4. Пример трехмерной цифровой модели местности с ярко выраженным рельефом и с текстурным покрытием

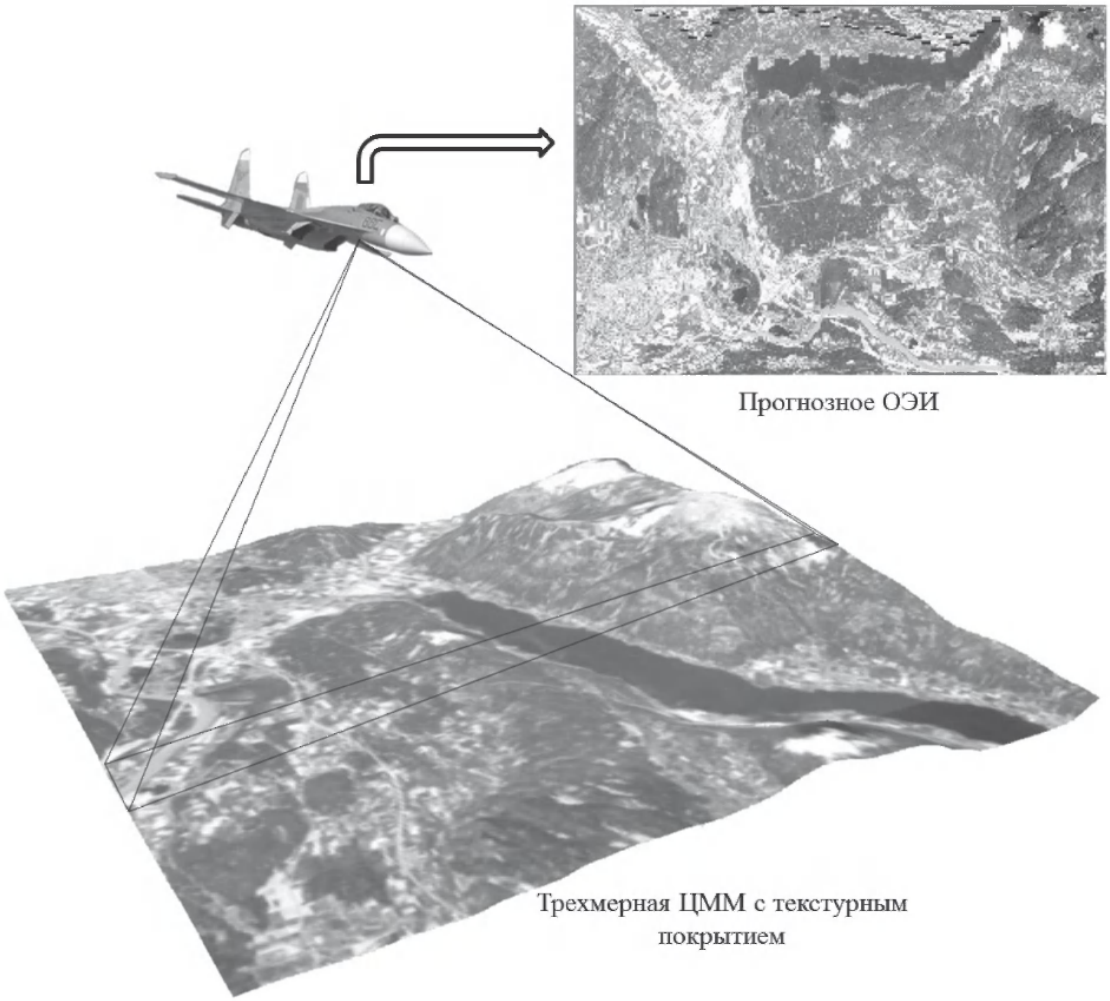

Рис. 5. Результат формирования прогнозного изображения оптико-электронного датчика сканерного типа при наблюдении земной поверхности с сильно выраженным рельефом с высоты 300 м

для формирования прогнозных изображений видимого диапазона на основе использования трехмерных ЦММ обеспечивает учет:

– параметров моделируемого датчика, определяющих детальность (разрешающую способность) и масштаб прогнозного изображения;

– условий дистанционного зондирования (траектория полета, ориентация датчика в пространстве), определяющих местонахождение и размеры зоны захвата датчика на местности, а также его разрешающую способность (в зависимости от высоты полета);

– геофизических условий применения (естественная освещенность, рельеф местности), определяющих значения компонентов цветовой кодировки (RGB) отсчетов яркости, соответствующих освещаемой поверхности объектов в составе трехмерной ЦММ, а также их перераспределение с учетом характеристик рельефа местности (особенно характерно при условии соизмеримости значений перепадов высот местности и высоты съемки);

– текстурных свойств поверхностей объектов и подстилающей поверхности в составе трехмерной сцены.

В конечном итоге корректный учет вышеуказанных характерных особенностей при использовании рассматриваемого метода позволяет обеспечить адекватное формирование прогнозных изображений видимого диапазона на основе трехмерных ЦММ для заданных элементов внешнего ориентирования, траектории перемещения и основных технических характеристик оптико-электронных датчиков, входящих в состав систем и комплексов дистанционного зондирования земной поверхности воздушного базирования.

Заключение

Разработанный метод формирования прогнозных изображений видимого диапазона за счет применения трехмерных ЦММ обеспечивает адекватный переход от изображений в плановой проекции (текстурных покрытий

в составе трехмерных ЦММ), получаемых в основном космическими средствами дистанционного зондирования земной поверхности, к прогнозным оптико-электронным изображениям, при формировании которых учитываются особенности условий наблюдения и параметров функционирования современных оптико-электронных датчиков, а также влияние рельефа местности на перераспределение отсчетов яркости и формирование областей тени на прогнозных изображениях.

Предложенный метод и формируемые на его основе прогнозные изображения видимого диапазона целесообразно использовать для обеспечения воздушных комплексов (средств) дистанционного зондирования земной поверхности, построенных на базе пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов, в которых в качестве полезной нагрузки используются оптико-электронные системы технического зрения и соответствующая датчиковая аппаратура. К перспективным направлениям применения таких прогнозных изображений видимого диапазона можно отнести следующие:

– предполетный тренаж и обучение экипажей (операторов) воздушных комплексов мониторинга и дистанционного зондирования земной поверхности [4];

– обоснование тактико-технических требований к создаваемым перспективным образцам оптико-электронной датчиковой аппаратуры и подтверждение возможности их технической реализуемости с достижением заданных требований по качеству получаемых данных;

– обеспечение проведения испытаний и опытной эксплуатации экспериментальных образцов оптических датчиков в составе комплексов дистанционного зондирования земной поверхности путем формирования репрезентативной выборки необходимых наборов тестовых данных;

– обеспечение выполнения процедур планирования применения комплексов мониторинга воздушного базирования с использованием прогнозных изображений (выбор оптимального маршрута и высоты полета воздушного судна, задание циклограммы функционирования оптических датчиков, оценка информативности местности и т.п.).

Литература

1. Применение цифровых моделей местности в задачах информационного обеспечения аэрокосмических систем / И.А. Бырков [и др.] // Наука и технологии в промышленности. – 2006. – № 2. – С. 48–51.

2. Никулин, Е. А. Компьютерная геометрия и алгоритмы машинной графики / Е.А. Никулин. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 576 с.

3. Теория и практика цифровой обработки изображений. Дистанционное зондирование и географические информационные системы / под ред. А.М. Берлянта. – М.: Научный мир, 2003. – 168 с.

4. Бырков, И. А. Пространственно-энергетические модели местности в задачах предполетной подготовки экипажей летательных аппаратов / И.А. Бырков, Е.Э. Филиппских // Мир авионики. – 2003. – № 2. – С. 40–41.