

ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ, РАСПОЗНАВАНИЕ ОБРАЗОВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИДЕОИНФОРМАЦИОННОГО ТРАКТА ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ: РЕШЕНИЯ, ПРОБЛЕМЫ И ЗАДАЧИ

Баврина А.Ю.^{1,2}, Мясников В.В.^{1,2}, Сергеев В.В.^{1,2}, Трещёва Е.В.¹, Чупшев Н.В.¹

¹ Институт систем обработки изображений РАН,

² Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Аннотация

В работе рассматриваются основные этапы преобразования информации в видеоинформационном тракте оптико-электронных систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Для каждого из этапов преобразования указываются существующие и оригинальные математические модели, методы и алгоритмы, лежащие в основе моделирования процесса оптического ДЗЗ. Проводится сравнение натуральных и моделируемых изображений с целью выявления формальных (численных) и неформальных (визуальных) несоответствий между ними. На основании результатов сравнения определяются перспективные постановки и направления исследовательских работ.

Ключевые слова: оптико-электронный тракт, дистанционное зондирование Земли, моделирование, подлинность изображений.

Введение

Видеоинформационный тракт оптико-электронных систем ДЗЗ – технически и математически сложная система преобразования визуальной информации. Для типовых оптико-электронных систем регистрации процесс преобразования информации может быть подразделён на несколько этапов, каждый из которых соответствует отдельным элементам тракта и описывается соответствующей математической моделью [1–11]. Результатом процесса моделирования является согласованная пара изображений: до (входное) и после (выходное) прохождения тракта. При этом основная ценность моделирования заключается не просто в получении прототипа «выходного» цифрового изображения, а в возможности оценить потребительские характеристики тракта, не прибегая к дорогостоящим или труднореализуемым натурным экспериментам [10, 11]. Информация о качестве цифровых изображений, получаемых в различных условиях съёмки, при разных параметрах аппаратуры, вариантах используемого оборудования и т.д., открывает возможность оптимизации как аппаратно-технического наполнения оптико-электронной системы в частности, так и лётно-технических характеристик космического аппарата в целом [12].

В настоящей работе рассмотрены основные этапы преобразования визуальной информации в видеоинформационном тракте оптико-электронных систем ДЗЗ. В частности:

- преобразования в атмосфере, учитывающие поглощение и рассеяние оптического сигнала, турбулентность, облачность;
- преобразование в оптической системе, учитывающее дифракцию и дефокусировку объектива;
- преобразования в видеодатчике – приборе с зарядовой связью (ПЗС-линейке, ПЗС-матрице или ПЗС-матрице с временной задержкой и накоплением – ПЗС ВЗН);

- аналогово-цифровое преобразование (АЦП) сигнала.

Для каждого из этапов преобразования представлены математические модели, методы и алгоритмы, лежащие в основе моделирования процесса оптического ДЗЗ. Проводится сравнение натуральных и моделируемых изображений с целью выявления формальных (численных) и неформальных (визуальных) несоответствий между ними. На основании результатов сравнения определяются перспективные постановки и направления исследовательских работ.

Искажения атмосферы: облачность

Математически корректное описание динамических процессов формирования облачности в атмосфере – сама по себе чрезвычайно сложная математическая и вычислительная задача. Достаточно заметить, что в современной международной классификации облака делятся по внешнему виду на десять основных форм (родов). При этом в основных родах различают значительное число видов, разновидностей и дополнительных особенностей. Десять основных родов облаков приводятся ниже, включая их латинские названия и сокращения [13]:

- перистые – Cirrus (Ci),
- перисто-кучевые – Cirrocumulus (Cc),
- перисто-слоистые – Cirrostratus (Cs),
- высококучевые – Altocumulus (Ac),
- высокослоистые – Altostratus (As),
- слоисто-дождевые – Nimbostratus (Ns),
- слоисто-кучевые – Stratocumulus (Sc),
- слоистые – Stratus (St),
- кучевые – Cumulus (Cu),
- кучево-дождевые – Cumulonimbus (Cb).

На практике (в приложениях компьютерной графики) при моделировании облачности обычно используют гораздо более грубые модели следующих основных типов [14–24]:

- модели частиц;
- метасферы (metaballs);
- воксельная модель;
- фракталы;
- шумовые функции (случайные поля);
- текстурированные сплошные тела.

Указанные модели могут комбинироваться для достижения хороших результатов. Следует также отметить, что представленные модели являются не математическими, а имитационными в силу использованных в них многочисленных упрощений.

В своей работе мы использовали случайные поля как базис для построения некоторых моделей облачности. Для формирования непрерывного «облачного покрытия» был выбран шум Перлина (Perlin Noise) [24], идея синтеза которого заключается в комбинации шумовой и интерполяционной составляющих. Методы синтеза шума обладают такими преимуществами, как простота реализации и достаточно высокая степень реалистичности. Примеры синтеза Перлин-шума представлены на рис. 1 и 2.

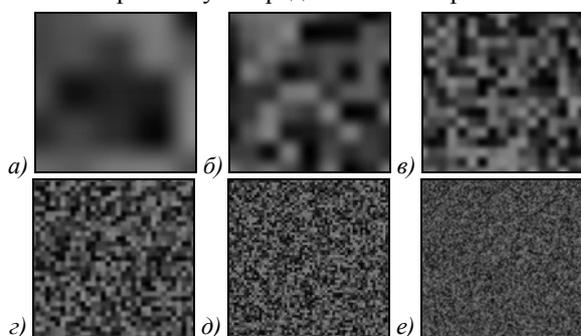


Рис. 1. Примеры составляющих текстуры Перлин-шума

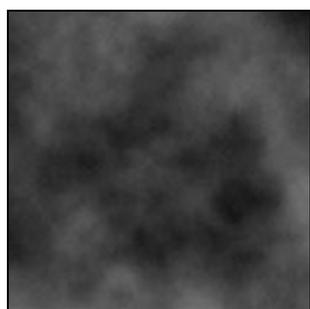


Рис. 2. Пример реализации Перлин-шума

Поле, заполненное шумом Перлина, можно непосредственно использовать для визуализации слоёв непрерывной облачности: слоистых, слоисто-дождевых, перисто-слоистых типов облаков.

Для моделирования слоёв разрывной облачности мы использовали группы эллипсов, заполненных текстурой, сгенерированной методом Перлин-шума. Процесс моделирования в этом случае состоит из следующих этапов:

- выбор позиций фрагментов облачности на изображении;
- формирование группы эллипсов, представляющих фрагмент облачности в каждой позиции;
- заполнение эллипсов текстурой Перлин-шума.

Пример результата синтеза разрывной облачности, состоящего из трёх «фрагментов-эллипсов», представлен на рис. 3.



Рис. 3. Результат заполнения эллипсоидов Перлин-текстурой

Результатом моделирования облаков является набор изображений фрагментов облачности, для каждого из которых заданы значения высоты расположения над поверхностью Земли и положение на спутниковом изображении, для которого моделируется облачность.

Заключительным этапом визуализации облаков на спутниковом изображении является отрисовка каждого фрагмента облачности и соответствующей ему тени на входном изображении. Для моделирования тени существенными параметрами являются высота облака, положение солнца и положение точки наблюдения. В этом случае итоговое изображение (для одного отдельного облака) представляется в следующем виде:

$$x(t_1, t_2) = I_{cl}(t_1, t_2) \cdot I_{max} + x_0(t_1, t_2) \cdot I_{sh}(t_1, t_2) \cdot (1 - I_{cl}(t_1, t_2)), \tag{1}$$

где $x_0(t_1, t_2)$ – исходное изображение (входное для моделирования); I_{max} – максимальное значение яркости для моделируемого изображения; I_{cl} – изображение облака (полутоновое, значение «0» интерпретируется как полностью прозрачный, со значением «1» – как полностью непрозрачный); I_{sh} – изображение тени облака, определяемое по формуле:

$$I_{sh}(t_1, t_2) = 1 - I_{cl}(t_1 - \Delta_1, t_2 - \Delta_2).$$

Здесь Δ_1, Δ_2 – сдвиг изображения тени относительно изображения облака (в метрах), определяемый соотношениями:

$$\Delta_1 = H(\tan \alpha_s \cos \beta_s - \tan \alpha_\gamma \cos \beta_\gamma),$$

$$\Delta_2 = H(\tan \alpha_s \sin \beta_s - \tan \alpha_\gamma \sin \beta_\gamma),$$

где H – высота облака в метрах; α_s и β_s – положение (угловое) Солнца; α_γ и β_γ – положение (угловое) точки наблюдения/съёмки.

При визуализации нескольких фрагментов облачности, расположенных на различных высотах относительно поверхности земли, необходимо учитывать, что одни фрагменты могут «затенять» другие. В этом случае необходимо упорядочить фрагменты по высоте и накладывать их на моделируемое изображение от фрагментов с меньшей высотой к фрагментам с боль-

шей высотой по описанному выше алгоритму. В этом случае выражение (1) используется столько раз, сколько облаков отрисовывается на изображении.

Пример изображения с помещённой облачностью и тенями представлен в конце работы, на рис. 6.

**Искажения атмосферы:
поглощение и турбулентность**

По характеру искажений оптического сигнала атмосферные помехи разделяются на несколько групп [1 – 11].

Молекулярное поглощение излучения атмосферными газами приводит к энергетическим потерям в сигнале. Помехи от посторонних источников (рассеянное и отражённое солнечное излучение, собственное свечение атмосферы и земной поверхности и т. д.) проявляются в добавлении к сигналу независимой фоновой составляющей. Аэрозольное и молекулярное рассеяние отбирает у оптического сигнала часть энергии и передает её «рассеянной» сигнальной компоненте с низкочастотным пространственным спектром. Причём для высокоразрешающих систем дистанционного зондирования, наблюдающих детали поверхности с характерными размерами порядка единиц и десятков метров, рассеянную компоненту сигнала можно также отнести к фону. Таким образом, в рамках линейного приближения процессов переноса излучения, достаточного для большинства практических ситуаций, данная группа атмосферных искажений описывается простой математической моделью:

$$y(t_1, t_2) = a \iint_D h(\tau_1, \tau_2) x(t_1 - \tau_1, t_2 - \tau_2) d\tau_1 d\tau_2 + b, \quad (2)$$

где $x(t_1, t_2)$ – входной сигнал, поле истинной яркости земной поверхности; $y(t_1, t_2)$ – выходной сигнал, поле яркости, наблюдаемое через атмосферу; a и b – параметры искажений: соответственно, коэффициент прозрачности атмосферы и яркость фона ($0 < a < 1$, $b > 0$); $h(\tau_1, \tau_2)$ – функция размытия точки (ФРТ), обусловленная турбулентностью атмосферы. Из данных, приведённых в [6 – 8, 25], следует, что эта ФРТ допускает довольно точную гауссовскую аппроксимацию:

$$h(\tau_1, \tau_2) = \frac{1}{2\pi r^2} \exp\left(-\frac{\tau_1^2 + \tau_2^2}{2r^2}\right),$$

где r – параметр, служащий оценкой радиуса пятна «размытия» двумерного сигнала. При наблюдении земной поверхности из космоса в направлении, близком к надиру, в зависимости от состояния атмосферы значения r меняются от 1,7 до 10 см [25], т.е. оказываются меньше, чем пространственное разрешение большинства современных систем ДЗЗ.

При короткой экспозиции линейная модель искажений вида (2) также применима, но лишь для каждой локальной области двумерного сигнала: из-за пространственно-временных флуктуаций показателя преломления в турбулентных воздушных потоках ФРТ искажающей системы здесь оказывается случайной [9, 10]. Реализации этой случайной ФРТ име-

ют вид узких положительных импульсов, лежащих в пределах пятна размытия сигнала при длительной экспозиции [9, 10]. Поэтому для большинства современных систем ДЗЗ искажениями, возникающими при короткой экспозиции в результате турбулентности атмосферы, можно пренебречь.

Искажения оптической части тракта

С помощью оптической системы поле яркости земной поверхности переводится в его изображение в фокальной плоскости объектива. Для оптики высокоразрешающих систем дистанционного зондирования, описываемой в параксиальном приближении, данный переход сопровождается масштабированием оптического сигнала, а также его пространственно-частотными искажениями, моделируемыми двумерной ЛПП-системой [7, 8, 10, 12, 25]. Учитывая, что масштабирование не меняет «состав» регистрируемой видеодатчиком информации, преобразование сигнала $y(t_1, t_2)$, поступающего на вход оптической системы после прохождения им атмосферы, может быть представлено в следующем виде:

$$f(t_1, t_2) = \iint_D h_{opt}(\tau_1, \tau_2) y(t_1 - \tau_1, t_2 - \tau_2) d\tau_1 d\tau_2.$$

Здесь $f(t_1, t_2)$ – поле яркости (сигнал) после оптической системы, поступающее на видеодатчик. Как известно, другое, во многих случаях более удобное описание ЛПП-системы даёт её амплитудно-частотная характеристика (АЧХ, в оптике – функция пространственной модуляции), определяемая как преобразование Фурье импульсной характеристики [10, 25]:

$$H_{opt}(\Omega_1, \Omega_2) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h_{opt}(\tau_1, \tau_2) \exp(-i(\Omega_1 \tau_1 + \Omega_2 \tau_2)) d\tau_1 d\tau_2$$

и устанавливающая простую связь между спектрами Фурье входного $Y(\Omega_1, \Omega_2)$ и выходного $F(\Omega_1, \Omega_2)$ сигналов:

$$F(\Omega_1, \Omega_2) = H_{opt}(\Omega_1, \Omega_2) Y(\Omega_1, \Omega_2).$$

В рамках таких представлений хорошо разработаны математические модели конкретных типов оптических систем. Так, для идеального (безабберационного) объектива с круглым зрачком при узкополосном (монохромном, но некогерентном) излучении [7, 10, 12]:

$$h_{opt}(\tau_1, \tau_2) = \left[\frac{4J_1\left(0,5\Omega_0\sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2}\right)}{\Omega_0\sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2}} \right]^2,$$

$$H_{opt}(\Omega_1, \Omega_2) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \left[\arccos\left(\frac{\sqrt{\Omega_1^2 + \Omega_2^2}}{\Omega_0}\right) - \frac{\sqrt{\Omega_1^2 + \Omega_2^2}}{\Omega_0} \sqrt{1 - \frac{\Omega_1^2 + \Omega_2^2}{\Omega_0^2}} \right], & \text{при } \Omega_1^2 + \Omega_2^2 < \Omega_0^2, \\ 0, & \text{вне,} \end{cases}$$

где $J_1(\cdot)$ – функция Бесселя первого рода первого порядка, Ω_0 – частота среза оптической системы:

$$\Omega_0 = \frac{2\pi d}{H\lambda}, \tag{3}$$

где d – диаметр зрачка, H – расстояние наблюдения, λ – длина волны светового излучения. Во многих реальных оптических системах высокого качества суммарное влияние остаточных aberrаций при немонхромном излучении приближает импульсную характеристику к гауссоиду и, соответственно, частотную характеристику – к функции подобного же вида:

$$H_{opt}(\Omega_1, \Omega_2) = \exp[-0,5r^2(\Omega_1 + \Omega_2)],$$

где r – экспериментально определяемый параметр.

Дефокусировка объектива с круглым зрачком моделируется ЛПП-системой с характеристиками [7, 10, 12, 25]:

$$h_{def}(\tau_1, \tau_2) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi r^2}, & \text{при } \tau_1^2 + \tau_2^2 < r^2, \\ 0, & \text{вне,} \end{cases}$$

$$H_{def}(\Omega_1, \Omega_2) = \frac{2J_1(r\sqrt{\Omega_1^2 + \Omega_2^2})}{r\sqrt{\Omega_1^2 + \Omega_2^2}},$$

где r – радиус пятна размытия, который в единицах длины, приведённых к объектной плоскости (земной поверхности), задаётся выражением:

$$r = \frac{\Delta\rho dH}{2\rho^2},$$

где ρ – фокусное расстояние объектива, $\Delta\rho$ – отклонение фокальной плоскости от плоскости изображения, d и H – то же, что и в формуле (3).

Искажения видеодатчика

ПЗС ВЗН датчик представляет собой матрицу $M \times M_2$ прямоугольных фоточувствительных электродов размером $L_1 \times L_2$ каждый, расположенных на плоскости с шагами S_1 и S_2 по вертикали и горизонтали соответственно. Электрод накапливает электрический заряд, пропорциональный интенсивности падающего излучения, площади электрода и времени накопления.

При работе датчика в K -тактном режиме ВЗН электроды объединяются по вертикали в группы по K штук и образуют единые ячейки, накапливающие «зарядовые пакеты». Через интервалы времени Θ происходит сдвиг каждой ячейки (зарядового пакета) на один электрод вниз по плоскости датчика. Поскольку обычно $K \ll M$, в рамках идеализированной модели датчика пренебрежём накоплением заряда в первых $(K - 1)$ тактах движения ячейки, когда она имеет неполный вертикальный размер, т.е. будем считать, что ячейка из K электродов последовательно занимает возможные $(M - K + 1)$ поло-

жений. Изображение (поле интенсивности излучения) в плоскости датчика смещается с постоянной скоростью V_1 по вертикали («догоняя» зарядовые пакеты) и V_2 по горизонтали.

Считаем, что строка зарядовых пакетов после достижения нижнего положения на матрице электродов мгновенно передаётся на выход датчика (эта передача осуществляется с периодичностью $K\Theta$). Выведенная строка зарядовых пакетов соответствует строке отсчётов формируемого дискретного изображения.

Для такой модели датчика процесс формирования дискретного изображения описывается двухшаговой схемой [10]. На первом шаге происходит сглаживание непрерывного сигнала двумерной ЛПП-системой, моделирующей реально действующую на сигнал (эквивалентную, виртуальную) апертуру датчика. На втором шаге производится пространственная дискретизация сигнала по координатам. Величины шагов дискретизации непосредственно задаются параметрами датчика.

Виртуальная апертура датчика

АЧХ виртуальной апертуры идеализированного датчика имеет вид кратного произведения, в котором каждый из пяти сомножителей допускает определённую физическую интерпретацию [10]:

$$H_{CCD}(\Omega_1, \Omega_2) = H_0(\Omega_1, \Omega_2) H_1(\Omega_1, \Omega_2) \times \\ \times H_2(\Omega_1, \Omega_2) H_3(\Omega_1, \Omega_2) H_4(\Omega_1, \Omega_2),$$

где

$$H_0(\Omega_1, \Omega_2) = \frac{4 \sin \frac{\Omega_1 L_1}{2} \sin \frac{\Omega_2 L_2}{2}}{L_1 L_2 \Omega_1 \Omega_2}$$

– АЧХ системы, усредняющей двумерный сигнал по площади электрода;

$$H_1(\Omega_1, \Omega_2) = \frac{\sin PK}{K \sin P}$$

– АЧХ системы, описывающей формирование накапливающей ячейки из K электродов;

$$H_2(\Omega_1, \Omega_2) = \frac{\sin Q}{Q}$$

– АЧХ «смаза» сигнала из-за различия непрерывного движения изображения и скачкообразного движения ячейки;

$$H_3(\Omega_1, \Omega_2) = \frac{\sin[(Q - P)(M - K + 1)]}{(M - K + 1) \sin(Q - P)}$$

– АЧХ «смаза» за счёт накопления зарядового пакета в $(M - K + 1)$ различных положениях ячейки при рассогласовании средней скорости её движения со скоростью изображения;

$$H_4(\Omega_1, \Omega_2) = \exp\{i[Q(M + K - 1) - P(M - 1)]\}$$

– чисто фазовая частотная характеристика, отражающая сдвиг выходного сигнала относительно

выходного. В приведённых выше формулах для краткости введены обозначения:

$$P = \frac{\Omega_1 S_1}{2}, Q = \frac{(\Omega_1 V_1 + \Omega_2 V_2) \Theta}{2}.$$

В результате АЧХ сигнала $z(t_1, t_2)$, искажённого ЛЛП-системой видеодатчика, имеет вид:

$$Z(\Omega_1, \Omega_2) = H_{CCD}(\Omega_1, \Omega_2) F(\Omega_1, \Omega_2).$$

Дискретизация сигнала по координатам

Пространственная дискретизация сигнала по координатам описывается простым соотношением:

$$z(i_1, i_2) = z(i_1 S_1 + \Lambda_1, i_2 S_2 + \Lambda_2),$$

$$i_1 = 0, N_1 - 1, \quad i_2 = 0, N_2 - 1.$$

Здесь Λ_1, Λ_2 – позиция «начала координат» для цифрового изображения в физической плоскости оптического сигнала; N_1 – вертикальный размер цифрового изображения («высота» в отсчётах), характеризующий при моделировании «длительность» процесса съёмки; N_2 – горизонтальный размер цифрового изображения («ширина» в отсчётах), который для большинства систем ДЗЗ удовлетворяет условию: $N_2 = M_2$.

Математическая модель АЦП

Аналого-цифровое преобразование электрического сигнала, формируемого видеодатчиком, заключается в квантовании его амплитуды, т.е. в замене каждого значения отсчёта сигнала $z(\dots)$ на один из «квантованных уровней» j . В наиболее широко распространённом случае равномерного квантования имеем [10, 25]:

$$j_z = \begin{cases} 0, & z < z_{\min}; \\ \left[\frac{z - z_{\min}}{z_{\max} - z_{\min}} \right] (J - 1), & z_{\min} \leq z < z_{\max}; \\ J - 1, & z \geq z_{\max}. \end{cases}$$

Здесь J – число уровней квантования сигнала, $[\dots]$ – знак выделения целой части числа, z_{\min}, z_{\max} – установленные границы шкалы сигнала.

Специфика моделирования с учётом рельефа Земли и геометрии съёмки

Пусть функция $r(t_1, t_2)$ задаёт поверхность (рельеф Земли), характеризуя высоту поверхности в соответствующих координатах, а функция $x_{ort}(t_1, t_2)$ характеризует яркость (цвет) этой поверхности в тех же координатах.

Задача моделирования состоит в получении цифрового изображения $z(i_1, i_2)$ (или его квантованного аналога $j_z(i_1, i_2)$), являющегося результатом съёмки заданной поверхности (Земли) с учётом известных позиций космического аппарата (КА) и параметров видеoinформационного тракта (в том числе положения Солнца). Данная задача, очевидно, разбивается на две независимые подзадачи:

- получение изображения-проекции $x_0(t_1, t_2)$ (промежуточный результат), учитывающего геометрию съёмки, рельеф и положение Солнца;
- моделирование съёмки с учётом характеристик видеoinформационного тракта (решение представлено в предшествующих разделах).

Заметим, что, учитывая «сканирующий» характер работы регистрирующего устройства (ПЗС ВЗН), задача построения изображения-проекции $x_0(t_1, t_2)$ может быть рассмотрена для одномерного случая, как представлено на рис. 4, где

- H – высота съёмки;
- центр регистрируемого изображения (толстая чёрная линия на рис. 4) расположен на расстоянии S от точки положения КА на земной поверхности;
- $W1$ – плоскость задания функции $x_{ort}(t_1, t_2)$;
- $W2$ – плоскость проекции – область задания функции $x_0(t_1, t_2)$;
- L – дальность съёмки;
- $\alpha_{\min}, \alpha_{\max}$ – предельные углы съёмки.

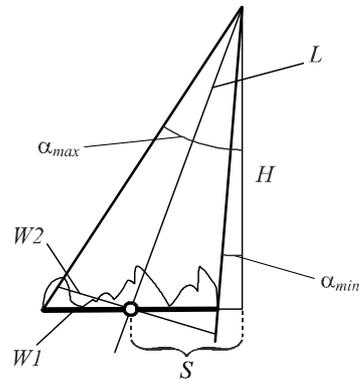


Рис. 4. Моделирование с учётом рельефа

С учётом сделанных обозначений, алгоритм синтеза изображения-проекции $x_0(t_1, t_2)$ на основании функции яркости $x_{ort}(t_1, t_2)$, рельефа $r(t_1, t_2)$ и данных о геометрии базируется на простейших геометрических соотношениях. В частности, для каждой координаты t_2 выходного изображения $x_0(t_1, t_2)$ определяет угол визирования $\alpha(t_2)$ и затем соответствующее значение яркости $x_{ort}(t_1, t_{\alpha(t_2)})$. Учёт положения Солнца и позиции съёмки производится здесь же, на основании известных соотношений закона Ламберта [1, 2].

Программный комплекс моделирования процессов ДЗЗ

Для исследования теоретических положений, методов и алгоритмов моделирования был разработан программный комплекс моделирования процесса ДЗЗ. Основными функциями программного комплекса являются:

- создание, изменение и сохранение модели видеoinформационного тракта;
- формирование покрытия территории геопривязанными снимками (изображениями-прототипами);

- формирование покрытия территории геопривязанными изображениями рельефов;
- моделирование процесса съёмки для отдельных изображений-прототипов покрытия, то есть получения по конкретному входному изображению соответствующего выходного изображения ДДЗ;
- моделирование процесса съёмки для заданной территории съёмки (с учётом рельефа);
- отображения статуса процесса моделирования;
- отображения служебных сообщений в процессе моделирования;
- интерактивное управление процессом моделирования.

Примеры некоторых экранных форм моделирующего программного комплекса приведены на рис. 5а-в. Пример результата моделирования приведён на рис. 6.

Сравнение моделируемых и натуральных изображений

Сравнение моделируемых и натуральных изображений и определение собственно качества моделирования могут быть выполнены несколькими способами.

С одной стороны, формальным – сопоставляя основные числовые характеристики натурального изображения-прототипа и изображения, полученного после моделирования. В качестве формальных характеристик, численно определяющих качество цифровых изображений, могут выступать [26 – 29]:

- уровень шума на изображении;
- АЧХ системы искажения, полученная «слепым» методом идентификации.

К формальным способам проверки также можно отнести *методы анализа подлинности цифровых изображений ДДЗ*, не защищённых цифровыми водяными знаками [30]. Целью этих методов является определение степени уверенности в том, что конкретное изображение ДДЗ не является *контрафактным*. Это подразумевает, в частности, что анализируемое изображение ДДЗ [31 – 33]:

- не было модифицировано до его поступления пользователю. Это подразумевает, в частности, проверку того, что изображение не содержит дубликатов (своего изображения или другого);
- не является полностью или частично синтезированным (компилированным);
- не взято полностью или частично с другого изображения;
- не было подвергнуто изменениям, приводящим к потере информации (JPEG-кодирование, ресэмплинг) и т.д.

В ИСОИ РАН были предложены подходы, методы, численные алгоритмы и информационные технологии анализа подлинности цифровых изображений ДДЗ [32, 33]. Они решают ряд задач, классифицируемых на следующие группы:

- обнаружение дубликатов на изображении,
- выявление несоответствий в свойствах изображения,
- поиск изображений в БД,

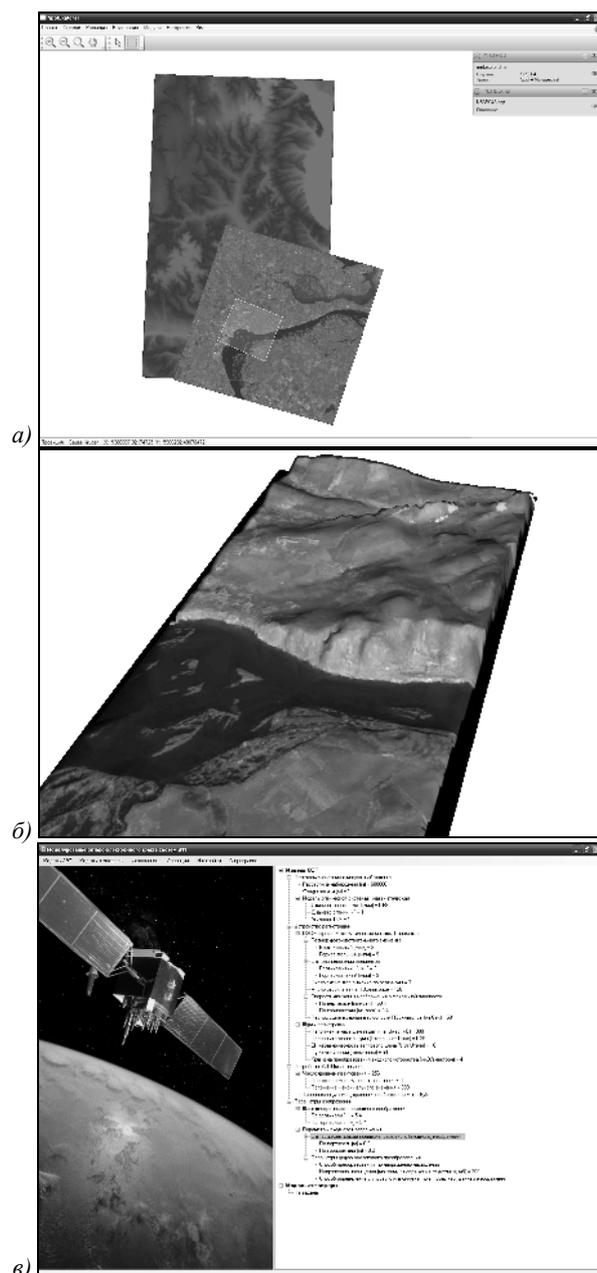


Рис. 5. Экранные формы моделирующего программного комплекса: размещение изображений-прототипов и рельефных данных на территории моделируемой съёмки (а); предварительная 3D визуализация регистрируемых данных ДДЗ (б); состав модели процесса ДДЗ (в)

- проверка пролёта КА,
- проверка снимка на соответствие условиям съёмки (требует интерактивного участия человека),
- наличие признаков JPEG – сжатия изображения с потерями.

В целом, оригинальные наукоёмкие решения ИСОИ РАН позволяют обеспечить комплексную предметно-ориентированную безопасность данных космического ДДЗ.

Наконец, качество моделирования может быть определено неформальным (визуальным) способом.

В данном случае эксперт (человек) определяет, является ли изображение действительно похожим на изображение дистанционного зондирования, полученное с конкретного КА, или нет.

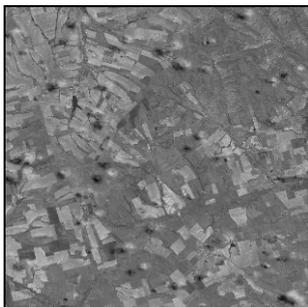


Рис. 6. Пример изображения, полученного моделированием процесса ДЗЗ с наложением облачности

Ниже приведены результаты сравнений модельных и натуральных изображений на предмет качественного соответствия указанным выше способам и проверяемым в них гипотезам (тестам).

Формальный анализ числовых характеристик

Для проведения анализа числовых характеристик было необходимо наличие двух множеств изображений ДЗЗ, первое из которых Ξ_0 является натурной съёмкой с конкретного КА, а второе, обозначаемое Ξ_1 , – результатом моделирования такой съёмки с параметрами аналогичного КА. В качестве натуральных снимков выступали 25 моноспектральных снимков, полученных в спектральном диапазоне 0,61–0,68 мкм с разрешением 10 метров с французского КА Spot-4. В качестве снимков-источников для моделирования выступали снимки Индийского КА Cartosat (IRS-P5) в количестве $N=31$ штук, получаемые с разрешением 2,5 метра в спектральном диапазоне 0,50–0,85 мкм. Относительно небольшое число используемых при моделировании изображений было вызвано достаточно большими объёмами обрабатываемых данных (размер снимка IRS-P5 составляет 12000×12000 отсчётов) и, как следствие, большим требуемым временем собственно моделирования (обработка снимка занимает от получаса до часа). В то же время выбранное число представляется достаточным для проводимого анализа.

Поскольку полные данные о съёмочной аппаратуре Spot-4 отсутствовали (доступные данные могут быть найдены на сайте ИТЦ «СканЭкс» www.scanex.ru и промо-сайте производителя продукта http://spot4.cnes.fr/spot4_gb/hrvir.htm), по натурным моноспектральным снимкам с помощью оригинального метода [27] производилась идентификация неизвестных параметров оптико-электронного тракта SPOT-4 – АЧХ искажающей системы $H(\Omega_1, \Omega_2)$ и среднеквадратическое отклонение (СКО) шума δ .

Полученные оцененные параметры использовались для проведения моделирования и получения N «псевдо-SPOT» снимков на основе снимков IRS-P5.

Для каждого из смоделированных изображений были рассчитаны характеристики искажающего тракта: оценка среднеквадратического отклонения шума δ_j и оценки АЧХ системы искажений ОЭТ $H_j(\Omega_1, \Omega_2)$ ($j = \overline{0, N-1}$). Методики определения этих характеристик представлены в работах [10, 26-29]. Степень «похожести» конкретного изображения с характеристиками δ_j и $H_j(\Omega_1, \Omega_2)$ на продукт КА Spot-4 определялась как относительное отклонение характеристики от соответствующего референтного значения, соответственно, δ и $H(\Omega_1, \Omega_2)$ ($j = \overline{0, N-1}$):

$$\Delta\delta_j = \frac{|\delta_j - \delta|}{\delta},$$

$$\Delta H_j = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (H_j(\Omega_0, \Omega_1) - H(\Omega_0, \Omega_1))^2 d\Omega_0 d\Omega_1}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (H(\Omega_0, \Omega_1))^2 d\Omega_0 d\Omega_1}.$$

В табл. 1–3 приведены распределения значений указанных отклонений.

Таблица 1. Относительное отклонение для шума (референтное значение $\delta = 0,8$)

Интервал для $\Delta\delta$	Частота отклонения
[0; 0,05]	0,129
(0,05; 0,1]	0,065
(0,1; 0,15]	0,032
(0,15; 0,2]	0,194
(0,2; 0,3]	0,194
(0,3; 0,4]	0,129
(0,4; 0,5]	0,097
(0,5; 0,6]	0,129
(0,6; 1]	0,032

Таблица 2. СКО шума (референтное значение $\delta = 0,8$)

Интервал для δ_j	Частота попадания в интервал
[0; δ]	1
(δ ; $+\infty$)	0

Таблица 3. Относительные отклонения для АЧХ

Интервал для ΔH	Частота отклонения
[0; 0,01]	0,387
(0,01; 0,02]	0,258
(0,02; 0,03]	0,226
(0,03; 0,04]	0,097
(0,04; 0,1]	0,032
(0,1; 1]	0

Как видно из табл. 3, отклонение по АЧХ на всём множестве смоделированных изображений не превышает 4%, причём практически для 97% изображений отклонение не превышает 3%. Это позволяет ут-

верждать о практическом отсутствии отличий в АЧХ для смоделированных изображениях по сравнению с изображениями SPOT-4 и считать *формальный тест на соответствие по АЧХ пройденным*.

Отклонения величины шума от референтного значения $\delta=0,8$, как видно из табл. 1, достаточно существенные. В то же время дополнительный анализ, представленный в табл. 2, показывает, что абсолютно все смоделированные изображения искажены шумом с заведомо меньшим значением дисперсии. Такая ситуация (значительное систематическое смещение среднего) может быть объяснена недостаточной точностью выбранной методики оценки. При этом, очевидно, оказывается возможной апостериорная коррекция шума до требуемого уровня путём добавления синтезированного «белого шума» к полученному изображению [25]. Поскольку такая коррекция позволяет получить шум требуемого уровня ($\delta=0,8$) с любой наперёд заданной точностью (эксперимент здесь ввиду предопределённости результата не представлен), *тест по уровню шума также можно считать пройденным*.

Формальный анализ подлинности цифровых изображений

Анализ подлинности, как было отмечено ранее, заключается в решении ряда задач, каждая из которых предназначена для выявления определённого «нарушения»: наличие дубликата, наличие признаков JPEG – сжатия, наличие в БД снимков аналога и т.п. Указанные «нарушения» возникают в тех случаях, когда изображения синтезируются (компилируются) из других изображений посредством специальных операций. Учитывая это, некоторые из «нарушений» не могут быть обнаружены на модельных изображениях по причине принципиального отсутствия в процессе моделирования соответствующих «нарушениям» операций. К таким нарушениям, в частности, относятся:

- наличие дубликата фрагмента на том же изображении, поскольку процесс моделирования не выполняет дублирование фрагментов;
- наличие несоответствий в свойствах изображения, поскольку параметры моделирования одинаковы для всех частей изображения;
- наличие признаков JPEG – сжатия изображения с потерями, поскольку моделирование не включает в себя процесс сжатия.

С другой стороны, есть «нарушение», которое может быть обнаружено вне зависимости от качества собственно моделирования – это несоответствие данным о пролёте КА. Поскольку данные о пролёте содержатся в метаданных продукта ДЗЗ, собственно содержание изображения ДЗЗ на результат прохождения теста никак не влияет.

Наконец, существуют «нарушения», которые заведомо будут обнаружены практически у всех проверяемых изображений. К таким нарушениям, в первую очередь, относится нахождение для смоделированного изображения в БД изображения-прототипа. По-

скольку моделирование предполагает использование изображения-прототипа, проблема обнаружения такого «нарушения» фактически сводится к задаче ведения достаточно полной БД изображений ДЗЗ. К аналогичным «нарушениям» относится также и «нарушение», связанное с несоответствием условиям съёмки (угол съёмки и угол положения Солнца). При ненадлежащем выборе изображения-прототипа по изображению урбанизированных построек даже неподготовленный пользователь легко обнаружит подделку. Относительным недостатком последнего теста является необходимость участия в нём человека, что на данный момент делает этот тест достаточно трудоёмким, не позволяя его полностью автоматизировать.

Представленный качественный анализ тестов подлинности сведён в таблицу 4.

Таблица 4. Тесты формального анализа подлинности цифровых изображений ДЗЗ

Наименование теста	Результат прохождения
наличие дубликатов	пройден
выявление несоответствий в свойствах изображения	пройден
поиск изображений в БД	не пройден
проверка пролёта КА	опционально
проверка снимка на соответствие условиям съёмки	не пройден
наличие признаков JPEG – сжатия изображения с потерями	пройден

Экспертный анализ изображений

В качестве данных для сравнения использовались множества натуральных Ξ_0 и модельных Ξ_1 изображений. Заметим, что в состав множества Ξ_1 модельных изображений входило семь изображений с смоделированной облачностью. Множества изображений Ξ_0 и Ξ_1 объединялись для получения материалов, подаваемых для анализа экспертами. В качестве экспертов выступали три специалиста по приёму данных ДЗЗ Центра приёма и обработки космической информации ФГБОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)». Экспертам относительно каждого изображения на основании его визуального анализа необходимо было указать, является ли оно фрагментом натурального снимка Spot-4 или получено путём моделирования. Распределение числа натуральных и модельных изображений экспертам не сообщалось. Экспертам были предоставлены примеры натуральных изображений Spot-4 (по другим территориям съёмки), а также информация о том, что для моделирования использовались снимки IRS-P5. Процесс анализа всех изображений занимал у каждого эксперта от двух до четырёх часов. Результаты проведённого эксперимента представлены ниже, в табл. 5.

На основании приведённых результатов можно сделать следующие предварительные выводы.

Таблица 5. Результаты экспертного анализа изображений

Наименование	Частота		
	эксперт 1	эксперт 2	эксперт 3
Верное определение снимков SPOT	0,87	0,67	0,89
Верное определение снимков «псевдо-SPOT» (облачность НЕ моделируется)	0,83	0,96	0,08
Верное определение снимков «псевдо-SPOT» (облачность моделируется)	1,00	0,71	1,00

Во-первых, все эксперты достаточно уверенно определяли «Псевдо-SPOT» снимки, если на изображении моделировалась «облачность». Во-вторых, для остального множества снимков результаты сильно разнились, что можно объяснить опытом специалистов (третий эксперт практически не распознал «псевдо-SPOT» изображения). Ориентируясь на результаты первых двух экспертов, можно сделать вывод о способности квалифицированного и опытного эксперта различить SPOT и «псевдо-SPOT» изображения с достаточно высокой степенью достоверности. Анализ результатов, проведённый вместе с экспертами, выявил следующие причины:

а) в SPOT-изображениях реальные облака оказываются «засвеченными» (выходят за динамический диапазон), в то время как в изображениях IRS-P5 они регистрируются в полутонах (диапазона хватает);

б) в продуктах SPOT и IRS-P5 присутствуют существенные различия в отображении зелёных насаждений, в частности леса и его границ (для SPOT – тёмный, для IRS-P5 – светлый). Данный факт вызван значительным различием в спектральных диапазонах, в которых работают эти КА;

в) в силу конструктивных особенностей аппаратов, расположение камер IRS-P5 наклонное (фиксированный ненулевой угол тангажа и изменяемый угол крена), в то время как SPOT чаще всего производит съёмку в надир. Это добавляет в снимки IRS-P5 легко узнаваемые искажения перспективного характера.

Названные причины позволили экспертам достаточно уверенно отличать SPOT от «Псевдо-SPOT» изображений.

Непосредственные выводы по результатам экспериментов

Основные выводы по представленным результатам сравнения могут быть сформулированы следующим образом.

I. При адекватно подобранных параметрах моделирования *полностью автоматический формальный анализ изображений ДЗЗ не позволяет определить*, было ли изображение натурным или получено путём моделирования.

II. Формальный (и полностью автоматический) анализ позволяет *гарантированно распознать смоделированное изображение по его изображению-прототипу* (исходное псевдодискретное изображение), если таковое доступно системе анализа (изображение находится в БД изображений ДЗЗ).

III. Формальный анализ оказывается полезным при анализе снимков в ситуации, когда снимок проверяется на соответствие условиям съёмки, что *требует участия человека*.

IV. *Неформальный (визуальный) анализ изображений ДЗЗ позволяет практически всегда отличить моделируемые изображения, если на них моделируется «облачность»*.

V. *Квалифицированные и опытные эксперты способны различить натурные и моделируемые изображения с достаточно высокой степенью достоверности*.

Качественные выводы

Как следует из представленных выше непосредственных выводов по экспериментам, формальный анализ числовых характеристик искомого цифрового изображения не позволяет отличить натурное изображение от смоделированного. В то же время, привлечение дополнительной информации – метаданных съёмки (ориентация камер, используемый спектральный диапазон, используемый динамический диапазон), базы данных изображений ДЗЗ, интеллектуальной информации об изображённых объектах урбанизированного (здания) или натурального (облака, лес) характера – позволяет относительно легко отличить смоделированное изображение от натурального. Этот факт приводит к следующему качественному выводу относительно процесса моделирования: *современные модели, методы, алгоритмы и информационные технологии моделирования данных ДЗЗ обязаны привлекать всю доступную информацию (в том числе – высокоуровневую и интеллектуальную) о сцене съёмки и характеристиках процесса регистрации для получения результата, неотличимого от натурального изображения*. Предварительный анализ проблемы позволяет выделить целый ряд факторов, которые оказывают влияние на результат моделирования и которые в обязательном порядке должны быть учтены при моделировании:

- метаданные, определяющие геометрию съёмки и параметры модели, специфику цифрового тракта;
- специфические параметры погоды (давление, направление ветра и др.), характеризующие вид отдельных облаков, плотность облачности, её ориентацию и ориентацию дождевых «шлейфов» на снимке и т.п.;
- состав, взаимное расположение и характер / геометрию изображённых на снимке объектов (в особенности – урбанизированных объектов);
- наличие «стыков» (геометрическое рассогласованных изображений в изображении-комposite), возникающих при формировании изображения-прототипа съёмки. Для иллюстрации этого пункта на рис. 7 представлен пример покрытия, сформированного в программе Google

Earth. Очевидно, что даже неподготовленный человек легко обнаружит «шов» на изображении и, как следствие, определит изображение как «ненатурное»;

- динамику изменения объектов урбанизированного и натурального происхождений (строительство дороги, домов, вырубка или рекреация лесов и т.п.);
- специфику получения и характеристики псевдо-непрерывного «изображения-источника», используемого для моделирования.

Представленные качественные выводы делают актуальными два блока проблем, связанных как с учётом при моделировании указанных факторов, так и с разработкой полностью автоматических методов их детектирования (например, алгоритмов нахождения «стыков» на изображениях, подобных приведённому на рис. 7).

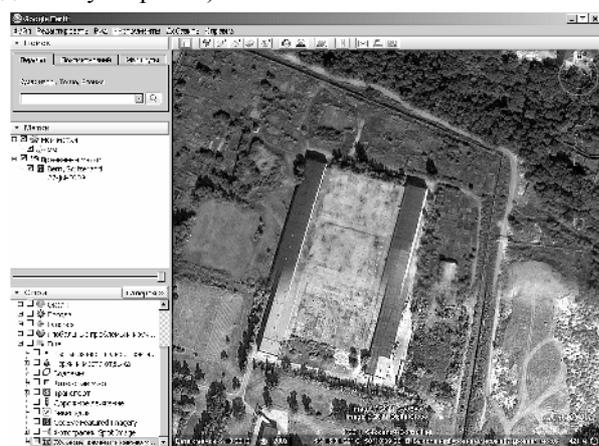


Рис. 7. Пример стыковки отдельных изображений в Google Earth

Заключение

Моделирование цифровых изображений ДЗЗ – математически и технически сложная задача. При этом существующие в настоящее время модели, методы, алгоритмы и программные средства позволяют получить результат, который формальными автоматическими вычислительными процедурами распознаётся как «ненатурное» изображение только в исключительных случаях (наличие изображений-прототипов в базе данных). В то же время визуальный неформальный анализ позволяет получить правильный ответ относительно смоделированного снимка существенно чаще.

Полученные в работе результаты и сформулированные выводы обуславливают необходимость создания новых и развития существующих моделей, методов и алгоритмов моделирования по ряду направлений. В том числе, наиболее перспективным представляется:

- развитие методов моделирования с целью учёта дополнительной информации о регистрируемой сцене (метаданных, векторных данных об изображённых урбанизированных и натуральных объектах, специфики их развития и изменения и т.п.);

- создание новых методов моделирования облачности, позволяющих получать визуально не отличимые от натуральных изображения;
- развитие методов синтеза «бесшовных покрытий» из цифровых снимков;
- определение возможности устранения и устранение «специфики» изображений-источников, используемых для моделирования.

В плане разработки методов и алгоритмов анализа изображений с целью определения их подлинности представляются перспективными следующие направления:

- разработка высокоскоростных методов поиска изображений ДЗЗ и их фрагментов в БД изображений;
- разработка методов и алгоритмов определения соответствия цифрового изображения указанному продукту КА (соответствие изображений объектов по спектральным характеристикам и т.п.);
- разработка методов полностью автоматического определения параметров съёмки (высоты Солнца и позиции КА) и/или их проверки по данным ДЗЗ (анализ теней, ракурсов съёмки и т.п.);
- разработка методов и алгоритмов обнаружения и анализа «облачности» на изображении;
- создание методов и алгоритмов обнаружения и анализа «швов» на цифровых снимках;
- создание инфотелекоммуникационной инфраструктуры данных ДЗЗ с поддержкой функций распределённого поиска (сервисов поиска) [34].

Благодарности

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке:

- грантов РФФИ (проекты 11-07-12059-офи-м-2011, 11-07-12060-офи-м-2011, 11-07-12062-офи-м-2011);
- программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Фундаментальные проблемы информатики и информационных технологий», проект 2.12;
- гранта Президента РФ № НШ-4128.2012.9.

Авторы также выражают благодарность специалистам Центра приёма и обработки космической информации ФГБОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)» Копенкову В.Н. и Титовой О.А. за участие в эксперименте.

Литература

1. **Rees, W.G.** Physical Principles of Remote Sensing / W.G. Rees. – Cambridge University Press, 2012. – 530 p.
2. **Schowengerdt, R.A.** Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing / R.A. Schowengerdt. – Academic Press, 2006. – 560 p.
3. **Зуев, В.Е.** Перенос оптических сигналов в земной атмосфере (в условиях помех) / В.Е. Зуев, М.В. Кабанов. – М.: Советское радио, 1977. – 368 с.
4. **Мишин, И.В.** Оценка нелинейных искажений оптического изображения земной поверхности в горизонтально-однородной атмосфере / И.В. Мишин // Исследования Земли из космоса. – 1982. – № 6. – С. 80-85.

5. **Кондратьев, К.Я.** Влияние атмосферы на исследование природных ресурсов из космоса / К.Я. Кондратьев, О.И. Смоктий, В.В. Козодеров. – М.: Машиностроение, 1985. – 272 с.
6. **Гонин, Г.Б.** Космическая фотосъёмка для изучения природных ресурсов / Г.Б. Гонин. – Л.: Недра, 1980. – 319 с.
7. **Мельканович, А.Ф.** Фотографические средства и их эксплуатация / А.Ф. Мельканович. – М.: Изд-во Министерства обороны, 1984. – 576 с.
8. **Фризер, Х.** Фотографическая регистрация информации / Х. Фризер; пер. с нем. – М.: Мир, 1978. – 670 с.
9. **Goodman, J.W.** Statistical Optics / J.W. Goodman. – Wiley-Interscience, 2000. – 572 p.
10. **Сергеев, В.В.** Методы цифрового моделирования опто-электронных систем дистанционного формирования и обработки изображений : дис. докт. тех. наук: 05.13.16: защищена 14.07.93; утв. 14.01.94 / Сергеев Владислав Викторович. – Самара, 1993. – 432 с.
11. **Matise, B.K.** Simulating the Performance of Imaging Sensors for Use in Realistic Tactical Environments / B.K. Matise, T.J. Rogne, G.R. Gerhart [et al.] // Proceedings SPIE. – 1985. – Vol. 550. – P.2-11.
12. **Shannon, R.** The Art and Science of Optical Design / R. Shannon. – Cambridge University Press. – 630 p.
13. Wikipedia – Cloud [Электронный ресурс] – Электрон. дан. – USA, 2012. – <http://en.wikipedia.org/wiki/Cloud>.
14. **Harris, M.J.** Real-time cloud rendering / M.J. Harris, A. Lastra // Proceedings of Eurographics. – 2001. – P. 76-84.
15. **Reeves, W.** Particle systems - a technique for modeling a class of fuzzy objects / W. Reeves // Proceedings of SIGGRAPH. – 1983. – P. 359-375.
16. **Reeves, W.** Approximate and probabilistic algorithms for shading and rendering structured particle systems / W. Reeves, R. Blau // Proceedings of SIGGRAPH. – 1985. – P. 313-322.
17. **Blinn, J.F.** A generalization of algebraic surface drawing / J.F. Blinn // Proceedings of SIGGRAPH. – 1982. – P. 273-274.
18. **Wyvill, G.** Ray-Tracing Soft Objects / G. Wyvill, A. Trotman // Proceedings of CG International. – 1990. – P. 439-475.
19. **Dobashi, Y.** Using metaballs to modeling and animate clouds from satellite images / Y. Dobashi, T. Nishita, H. Yamashita, T. Okita // The Visual Computer. – 1999. – Vol. 15. – P. 471-482.
20. **Dobashi, Y.** A simple, efficient method for realistic animation of clouds / Y. Dobashi, K. Kaneda, H. Yamashita, T. Okita, T. Nishita // Proceedings of SIGGRAPH. – 2000. – P. 19-28.
21. **Nishita, T.** Display of clouds taking into account multiple anisotropic scattering and sky light / T. Nishita, Y. Dobashi, E. Nakamae // Proceedings of SIGGRAPH. – 1996. – P. 379-386.
22. **Cabral, B.** Accelerated volume rendering and tomographic reconstruction using texture mapping hardware / B. Cabral, N. Cam, J. Foran // Proceedings of the 1994 Symposium on Volume Visualization. – 1994. – P. 91-98.
23. **Hufnagel, R.E.** Random Wavefront Effects / R.E. Hufnagel // Photographic Science and Engineering. – 1965. – N 4. – P. 244-247.
24. **Musgrave, F.K.** Texturing and Modeling. A procedural Approach / F.K. Musgrave, D. Peachey, K. Perlin, D.S. Ebert, S. Worley – 3d edition. – Morgan Kaufmann, 2002. – 712 p.
25. **Pratt, W.K.** Digital Image Processing / W.K. Pratt. – New York: John Wiley and Sons, Inc., – 1978.
26. **Myasnikov, V.V.** Computer program for automatic estimation of digital image quality / V.V. Myasnikov, A.A. Ivanov, M.V. Gashnikov, E.V. Myasnikov // Pattern Recognition and Image Analysis. – 2011. – Vol. 21. – N 3. – P. 415-418.
27. **Баврина, А.Ю.** Метод параметрического оценивания опто-электронного тракта системы дистанционного формирования оптического изображения / А.Ю. Баврина, В.В. Мясников, А.В. Сергеев // Компьютерная оптика. – 2011. – Том 35, № 4. – С. 500-507. – ISSN 0134-2452.
28. **Гашников, М.В.** Обнаружение информативных фрагментов в задаче оценки качества изображений / М.В. Гашников, В.В. Мясников // 8-я Международная конференция «Интеллектуализация обработки информации – 2010». – М.: МАКС Пресс, 2010. – С. 325-328.
29. **Myasnikov, V.V.** Software System for Identification of Optoelectronic Digital Imaging Systems and Estimation of Their Quality / V.V. Myasnikov, A.A. Ivanov, M.V. Gashnikov, E.V. Myasnikov // Proceedings of the 10-th International Conference on Pattern Recognition and Image Analysis: New Information technologies (PRIA-10'2010), St-Peterburg, Russian Federation, December 5-12, Spb.: Polytechnika, – 2010. – Vol. 2. – P. 109-112.
30. **Cox, I.J.** Digital watermarking and steganography / I.J. Cox, M. Miller, J. Bloom, J. Fridrich. – San Francisco: Morgan Kaufmann Publishing, 2008. – 624 p.
31. **Popescu, A.C.** Statistical Tools for Digital Image Forensics / A.C. Popescu // PhD thesis, Dartmouth College, Department of Computer Science, Hanover, USA. – 2005. – P. 11-102.
32. **Глумов, Н.И.** Обнаружение на изображениях искусственных изменений локального происхождения / Н.И. Глумов, А.В. Кузнецов // Автометрия. – 2011. – Т. 47, № 3. – С. 3-11.
33. **Glumov, N.I.** Analysis of images for local artificial changes with JPEG compression properties / N.I. Glumov, A.V. Kuznetsov // Pattern Recognition and Image Analysis. – 2011. – Vol. 21(2). – P. 244-246.
34. **Мостовой, Я.А.** Распределённая система хранения данных дистанционного зондирования Земли, их обработки и web-опубликования / Я.А. Мостовой, В.В. Мясников, В.В. Сергеев, В.А. Сойфер // 5-ая Международная конференция «Земля из космоса – наиболее эффективные решения», Москва, 29 ноября – 1 декабря 2011 г. Сборник тезисов. – Москва.: ИТЦ «СканЭкс», НП «Прозрачный мир», Издательство Бином. – С 150-151.

References

1. **Rees, W.G.** Physical Principles of Remote Sensing / W.G. Rees. – Cambridge University Press, 2012. – 530 p.
2. **Schowengerdt, R.A.** Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing / R.A. Schowengerdt. – Academic Press, 2006. – 560 p.
3. **Zuev, V.I.** Transfer of optical signals in Earth atmosphere (in noise case) / V.I. Zuev, M.V. Cabanov – Moscow: “Soviet Radio” Publisher, 1977. – 368 p. – (In Russian).
4. **Mishin, I.V.** Nonlinear distortion estimation for the Earth's surface optical image in a horizontally-homogeneous atmosphere / I.V. Mishin // Research Earth from Space. – 1982. – N 6. – P. 80-85. – (In Russian).
5. **Condratiev, C.Ya.** The influence of the atmosphere on the exploration of natural resources from space / C.Ya. Condratiev, O.I. Smokti, V.V. Cozoderov. – Moscow: “Mashinostroenie” Publisher, 1985. – 272 p. – (In Russian)
6. **Gonin, G.B.** Satellite imagery to natural resources / G.B. Gonin. – Leningrad: “Nedra” Publisher, 1980. – 319 p. – (In Russian).

7. **Melkanovich, A.F.** Photographic equipment and their operation / A.F. Melkanovich. – Moscow: Defense Ministry Issue Publisher, 1984. – 576 p. – (In Russian).
8. **Frizer, H.** Photographic recording of information / H. Frizer; trans. from German. – Moscow: “Mir” Publisher, 1978. – 670 p. – (In Russian).
9. **Goodman, J.W.** Statistical Optics / J.W. Goodman. – Wiley-Interscience, 2000. – 572 p.
10. **Sergeyev, V.V.** Methods of digital simulation of electro-optical systems for remote creation and image processing: Master’s thesis. – Samara, 1993. – 432 p. – (In Russian).
11. **Matise, B.K.** Simulating the Performance of Imaging Sensors for Use in Realistic Tactical Environments / B.K. Matise, T.J. Rogne, G.R. Gerhart [et al.] // Proceedings SPIE. – 1985. – Vol. 550. – P.2-11.
12. **Shannon, R.** The Art and Science of Optical Design / R. Shannon. – Cambridge University Press. – 630 p.
13. **Wikipedia** – Cloud [Электронный ресурс] – Электрон. дан. – USA, 2012. – <http://en.wikipedia.org/wiki/Cloud>.
14. **Harris, M.J.** Real-time cloud rendering / M.J. Harris, A. Lastra // Proceedings of Eurographics. – 2001. – P. 76–84.
15. **Reeves, W.** Particle systems - a technique for modeling a class of fuzzy objects / W. Reeves // Proceedings of SIGGRAPH. – 1983. – P. 359-375.
16. **Reeves, W.** Approximate and probabilistic algorithms for shading and rendering structured particle systems / W. Reeves, R. Blau // Proceedings of SIGGRAPH. – 1985. – P. 313-322.
17. **Blinn, J.F.** A generalization of algebraic surface drawing / J.F. Blinn // Proceedings of SIGGRAPH. – 1982. – P. 273-274.
18. **Wyvill, G.** Ray-Tracing Soft Objects / G. Wyvill, A. Trotman // Proceedings of CG International. – 1990. - P. 439-475.
19. **Dobashi, Y.** Using metaballs to modeling and animate clouds from satellite images / Y. Dobashi, T. Nishita, H. Yamashita, T. Okita // The Visual Computer. – 1999. – Vol. 15. – P. 471-482.
20. **Dobashi, Y.** A simple, efficient method for realistic animation of clouds / Y. Dobashi, K. Kaneda, H. Yamashita, T. Okita, T. Nishita // Proceedings of SIGGRAPH. – 2000. – P. 19-28.
21. **Nishita, T.** Display of clouds taking into account multiple anisotropic scattering and sky light / T. Nishita, Y. Dobashi, E. Nakamae // Proceedings of SIGGRAPH. – 1996. – P. 379-386.
22. **Cabral, B.** Accelerated volume rendering and tomographic reconstruction using texture mapping hardware / B. Cabral, N. Cam, J. Foran // Proceedings of the 1994 Symposium on Volume Visualization. – 1994. – P. 91–98.
23. **Hufnagel, R.E.** Random Wavefront Effects / R.E. Hufnagel // Photographic Science and Engineering. – 1965. – N 4. – P. 244-247.
24. **Musgrave, F.K.** Texturing and Modeling. A procedural Approach / F.K. Musgrave, D. Peachey, K. Perlin, D.S. Ebert, S. Worley. – 3d edition. – Morgan Kaufmann, 2002. – 712 p.
25. **Pratt, W.K.** Digital Image Processing / W.K. Pratt. – New York: John Willey and Sons, Inc., 1978.
26. **Myasnikov, V.V.** Computer program for automatic estimation of digital image quality / V.V. Myasnikov, A.A. Ivanov, M.V. Gashnikov, E.V. Myasnikov // Pattern Recognition and Image Analysis. – 2011. – Vol. 21. – N 3. – P. 415-418.
27. **Bavrina, A.U.** Parametric estimation method of optical-electronic channel remote optical imaging / A.U. Bavrina, V.V. Myasnikov, A.V. Sergeyev // Computer optics. – 2011. – Vol. 35, N 4. – P. 500-507. – (In Russian).
28. **Gashnikov, M.V.** Detection of informative fragments in the task of evaluation of image quality / M.V. Gashnikov, V.V. Myasnikov // 8-th International Conference «Intellectual information processing – 2010». – Moscow: “Maks Press” Publisher, 2010. – P. 325-328. – (In Russian).
29. **Myasnikov, V.V.** Software System for Identification of Optoelectronic Digital Imaging Systems and Estimation of Their Quality / V.V. Myasnikov, A.A. Ivanov, M.V. Gashnikov, E.V. Myasnikov // Proceedings of the 10-th International Conference on Pattern Recognition and Image Analysis: New Information technologies (PRIA-10’2010), St-Peterburg, Russian Federation, December 5-12, Spb.: Polytechnika, 2010. – Vol. 2. – P. 109-112.
30. **Cox, I.J.** Digital watermarking and steganography / I.J. Cox, M. Miller, J. Bloom, J. Fridrich. – San Francisco: Morgan Kaufmann Publishing, 2008. – 624 p.
31. **Popescu, A.C.** Statistical Tools for Digital Image Forensics / A.C. Popescu // PhD thesis, Dartmouth College, Department of Computer Science, Hanover, USA. – 2005. – P. 11-102.
32. **Glumov, N.I.** Detection of artificial changes in the images of local origin / N.I. Glumov, A.V. Kuznetsov // Avtometriya. – 2011. – Vol. 47, N 3. – P. 3-11. – (In Russian).
33. **Glumov, N.I.** Analysis of images for local artificial changes with JPEG compression properties / N.I. Glumov, A.V. Kuznetsov // Pattern Recognition and Image Analysis. – 2011. – Vol. 21(2). – P. 244-246.
34. **Mostovoi, Ya.A.** Distributed storage system of remote sensing, processing, and web-publishing / Ya.A. Mostovoi, V.V. Myasnikov, V.V. Sergeyev, V.A. Soifer // 5-th International Conference «Earth from Space – the Most Effective Solutions», Moscow, November 29 – December 1, 2011. Proceedings. – Moscow.: ITC «ScanEx», NP «Prozrachni Mir», Binom Issue. – P 150-151. – (In Russian).

MODELLING OF VIDEOINFORMATIONAL TRACT OF OPTOELECTRONIC REMOTE SENSING SYSTEMS OF EARTH: SOLUTIONS, PROBLEMS AND TASKS

A.Yu. Bavrina^{1,2}, V.V. Myasnikov^{1,2}, V.V. Sergeyev^{1,2}, E.V. Tresheva¹, N.V. Chupshv¹

¹*Image Processing Systems Institute of RAS*

²*S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (National Research University)*

Abstract

This work describes the primary steps of visual data processing in electronic informational tract of remote sensed optical image formation. The mathematical models, methods and algorithms produced for each of these steps that lie in the basis of the modelling program system that describes processes in the optical remote sensing of the Earth. This work describes the main visual differences

in model-based and practical images. In addition, the perspective statements and directions of research work are mark out.

Key words: optoelectronic tract, Earth remote sensing, modeling, digital image forensics.

Сведения об авторах



Баврина Алина Юрьевна, 1980 года рождения. В 2003 г. окончила Самарский государственный аэрокосмический университет (СГАУ). В 2006 г. защитила диссертацию на соискание степени кандидата технических наук. В настоящее время работает научным сотрудником в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте систем обработки изображений РАН и, по совместительству, ассистентом кафедры геоинформатики и информационной безопасности СГАУ. Круг научных интересов включает цифровую обработку сигналов и изображений, геоинформатику, распознавание образов. Имеет 26 публикаций, из них 8 статей. Является членом Российской ассоциации распознавания образов и анализа изображений.

E-mail: alina@smr.ru.

Alina Yurievna Bavrina (1980 b.), graduated from the S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (SSAU) at 2003, received her PhD in Technical sciences at 2006. At present she is a researcher at the Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences, holding a part-time position of assistant at SSAU's Geoinformatics and Information Security sub-department. The area of interests includes digital signals and image processing, geoinformatics, pattern recognition. She is co-author of 26 scientific papers, including 8 articles. She is a member of Russian Association of Pattern Recognition and Image Analysis.

Мясников Владислав Валерьевич, 1971 года рождения. В 1994 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет (СГАУ). В 1995 году поступил в аспирантуру СГАУ, в 1998 году защитил диссертацию на соискание степени кандидата технических наук, а в 2008 – диссертацию на соискание степени доктора физико-математических наук. В настоящее время работает ведущим научным сотрудником в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте систем обработки изображений РАН и, одновременно, профессором кафедры геоинформатики и информационной безопасности СГАУ. Круг научных интересов включает цифровую обработку сигналов и изображений, компьютерное зрение, распознавание образов, искусственный интеллект и геоинформатику. Имеет более 100 публикаций, в том числе 40 статей и две монографии (в соавторстве). Член Российской ассоциации распознавания образов и анализа изображений.



E-mail: vmvas@smr.ru. Страница в интернете: <http://www.ipsi.smr.ru/staff/MyasVV.htm>

Vladislav Valerievich Myasnikov (1971 b.), graduated (1994) from the S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (SSAU). He received his PhD in Technical sciences (2002) and DrSc degree in Physics & Maths (2008). At present he is a leading researcher at the Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences, and), holding a part-time position of Associate Professor at SSAU's Geoinformatics and Information Security sub-department. The area of interests includes digital signals and image processing, geoinformatics, neural networks, computer vision, pattern recognition and artificial intelligence. He's list of publications contains about 100 scientific papers, including 40 articles and 2 monographs. He is a member of Russian Association of Pattern Recognition and Image Analysis.



Сергеев Владислав Викторович, 1951 года рождения. В 1974 году окончил Куйбышевский авиационный институт (КуАИ, ныне – Самарский государственный аэрокосмический университет, СГАУ). В 1978 году защитил в Ленинградском электротехническом институте диссертацию на соискание учёной степени кандидата технических наук, а в 1993 – диссертацию на степень доктора технических наук в СГАУ. В настоящее время работает заведующим лабораторией математических методов обработки изображений Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института систем обработки изображений РАН и, одновременно, заведующим кафедрой геоинформатики и информационной безопасности СГАУ. Круг научных интересов включает цифровую обработку сигналов и изображений, геоинформатику и распознавание образов. Имеет более 250 публикаций, в том числе две монографии. Член Российской ассоциации распознавания образов и анализа изображений.

E-mail: vserg@smr.ru. Страница в интернете: <http://www.ipsi.smr.ru/staff/Sergeev.htm>

Vladislav Viktorovich Sergeev (1951 b.), graduated (1974) from the S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (SSAU). He received his PhD in Technical sciences (1978) and DrSc degree in Physics & Maths (1993). At present he is a head of laboratory at the Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences, and, holding a part-time position as the head of the Geoinformatics and Information Security sub-department at SSAU. The

area of interests includes digital signals and image processing, geoinformatics and pattern recognition. He's list of publications contains about 250 scientific papers, including 2 monographs. He is a member of Russian Association of Pattern Recognition and Image Analysis.

Трещёва Елена Владимировна, 1982 года рождения, в 2007 году окончила Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (СГАУ) по специальности «Прикладная математика и информатика». Работает стажёром-исследователем лаборатории математических методов обработки изображений Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института систем обработки изображений РАН. Области научных интересов: обработка и анализ изображений, геоинформатика.



Elena Vladimirovna Tresheva graduated (2007) from the Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (SSAU), majoring in Applied Mathematics and Computer Science. Currently he is a trainee-researcher at the Mathematical Methods of Image Processing Laboratory of the Image Processing Systems Institute of the RAS. His current research interests include geoinformatics, image processing and image analysis.



Чупшев Николай Викторович, 1986 года рождения, в 2008 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (СГАУ) по специальности «Прикладная математика и информатика». Работает стажёром-исследователем лаборатории математических методов обработки изображений Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института систем обработки изображений РАН. Области научных интересов: обработка и анализ изображений, геоинформатика.

E-mail: nikolay.smr@gmail.com.

Nikolay Victorovich Chupshev graduated (2008) from the Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (SSAU), majoring in Applied Mathematics and Computer Science. Currently he is a trainee-researcher at the Mathematical Methods of Image Processing Laboratory of the Image Processing Systems Institute of the RAS. His current research interests include geoinformatics, image processing and image analysis.

Поступила в редакцию 28 сентября 2012 г.