

Выбор исходных цифровых космических изображений для синтеза изображения участка поверхности Земли, представляемого в цифровой форме пикселями с существенно меньшей апертурой

С.В. Блажевич¹, В.Н. Винтаев², Е.С. Селютина¹, Н.Н. Ушакова²

¹ Белгородский государственный университет
308015, г. Белгород, ул. Победы, д.85
E-mail: blazh@bsu.edu.ru

² Белгородский университет потребительской кооперации
308023, г. Белгород, ул. Садовая, д. 116а
E-mails: viktor.vn2010@yandex.ru, natush2006@yandex.ru

В работе представлено решение проблемы поиска, распознавания и выбора из баз данных фрагментов цифровых космических снимков одного и того же участка земной поверхности взаимный пространственный сдвиг которых может составлять кроме величины кратной целому числу пикселей и доли апертуры пиксела на плоскости для возможного использования изображений в синтезе результирующего снимка с субпиксельным представлением.

Ключевые слова: синтез цифрового космического изображения, субпиксельное разрешение, выбор исходных космических изображений.

Введение

На базе серии сдвинутых относительно друг друга по осям «X» и «У» на долю апертуры пиксела цифровых космических изображений одного и того же участка местности, можно решать задачу синтеза изображения с проекцией пиксела на Землю, имеющего гораздо меньшую апертуру, при условии, что сумма пикселей, используемых исходных изображений равна количеству пикселей нового синтезированного изображения с повышенной разрешающей способностью. При работе с реальными изображениями одного и того же участка местности и запуске на них процедуры синтеза изображения с улучшенным разрешением, возникает ряд проблем, наиболее существенной из которых является нахождение тех фрагментов изображений, которые отображая один и тот же сюжет местности, соответствуют сдвигам на определенные доли пиксела одного изображения относительно другого. При этом на первом этапе необходимо по выбранному или имеющемуся изображению, принимаемому за эталон в базе данных по серии, как правило, достаточно объемных космических снимков выбрать подходящие или тождественные фрагменты, а затем осуществить прецизионные замеры сдвигов выбранных фрагментов относительно эталона по пространственным осям. Как показывает практика, ручная работа здесь обречена на бесконечные поиски, т.к. для того, чтобы найти хотя бы четыре подходящих фрагмента, необходимо проанализировать на схожесть по сюжету и на соответствие по сдвигам сотни и тысячи кадров и фрагментов. При выборе изображений и поиске необходимых сдвигов на переборах пар изображений в автоматизированном режиме целесообразно применять зарекомендовавшие себя методы, наиболее популярными из которых являются нахождение максимумов взаимно-корреляционной функции, метод вычисления координат центров «тяжести» изображений с оценкой их разности и метод оценок

фазовых взаимных сдвигов в амплитудно-фазовых пространственных спектрах Фурье изображений. При сдвигах изображений на доли пиксела происходит не фиксируемый визуально сдвиг сюжета, а всего лишь перераспределение цвето-яркостной картины на транспарантах, и при выявлении перечисленными методами величина функционала, чувствительного к сдвигу ведет себя как непрерывная функция сдвига, которая может быть представлена с любой степенью плотности отсчетов – ординат.

Однако, если не предпринимать мер, описанных ниже, то как решение задачи сравнения для поиска необходимого фрагмента, т.е. задачи распознавания фрагмента, так и решение вопроса о сдвиге его относительно эталона при построении вычислительных процедур порождает результаты с колоссальной неопределенностью, причиной которой являются невязки пар изображений по масштабам, динамическим диапазонам представленных сюжетов, цветовой палитре, взаимным поворотам [1].

Процедура распознавания

Организовывать процедуру распознавания на результатах сравнения параметров, соответствующих признаковым описаниям образа и эталона, как правило, более удобно, так как размерности пространств признаков в подавляющем большинстве случаев намного меньше размерностей пространств пиксельного представления самих образов и эталонов. Определенным отягощающим моментом здесь является то, что процедуры формирования признаковых пространств организуются, прежде всего, на фоне проблем достаточности и однозначности признакового представления образов и эталонов [2, 3], решение которых является отдельной и достаточно сложной задачей.

Кроме того, даже в высокоинтеллектуальных схемах распознавания, реализованных на анализе нечетких множеств, в схемах с применением модального исчисления во множествах лингвистических описаний [4] распознаваемых образов не избежать массовых вычислений разностей вида $A(I,J)-B(I,J)$ (здесь A и B представители множеств параметров, определенных для распознаваемого образа и эталона, причем количество индексов, то есть размерность пространств изоморфных множеств не обязательно должна быть равна двум, I, J – целочисленные индексы, нумерующие представляемые элементы множеств). На потоке приведенных вычисляемых разностей, как правило, строятся затем метрические соотношения и решающие правила, вид которых позволяет нам отнести всю процедуру распознавания к тому или иному типу – в [5] описана модель бортовой системы распознавания в классе вероятностных признаков, построенная по схеме без обучения. Такие схемы распознавания диктуются, как правило, требованиями, главным из которых является минимально возможное значение вероятности ошибки первого рода при распознавании образа. В этой методологии и целесообразно строить схему поиска фрагментов по эталону. Следует учесть, что от фрагмента к фрагменту вся сцена может меняться, поэтому будем считать, что в сценах всегда присутствует образ, инвариантный от сцены к сцене.

Проблему фильтрации образов из смеси с шумами [6] и проблему вычленения распознаваемого образа из всей предъявляемой на анализ сцены и помещения его в соответствующем окне в данном случае считаем решенными, предполагая при этом, что всегда будут реализованы такие положения окна, что, по крайней мере, одним из своих ребер оно отсечет один из сливающихся с распознаваемым образом посторонний образ [7-9].

Целесообразно построить такую меру попиксельного сравнения объектов, которая покажет нулевое расстояние в многомерном пространстве (число измерений пространства равно количеству пикселей в анализируемом окне) только в случае идентичности образа и сравниваемого с ним эталона – это классическая метрика Хэмминга: сумма квадратов разностей сравниваемых пикселей с соответствующими номерами на образе и эталоне. Одна из наиболее употребимых модификаций метрики Хэмминга – это норма матрицы связности (сходства), элементами которой являются коэффициенты, вычисляемые по матрицам признаков в соответствующих кластерах [10].

В цветном портрете образа и эталона представим цвет в популярной аддитивной цветовой модели, при этом коэффициенты, определяющие долевого контраст каждой из цветных составляющих модели при переходе к черно-белому представлению портретов или легко находятся или заимствуются из телевизионных стандартов типа PAL или SECAM. Отметим сразу, что цветовые карты различных фрагментов почти всегда различны, поэтому первым шагом применим процедуру одновременного перевода фрагментов в черно-белую палитру, сохранив, скажем, для исходной представляющей палитры TRUE COLOR три черно-белых канала в восьмиразрядном представлении. Теперь для нас изображение – это все еще полное поле точек портрета, но лишенное цветовой раскраски. После выполнения этих процедур функция сравнения (метрика Хэмминга) будет инвариантной к невязке цветных палитр пар сравниваемых изображений.

Следующим этапом будет согласование динамических диапазонов отображения образа и эталона, выполняемое в паллиативе делением всех цифровых амплитуд яркости пикселей образа и эталона на максимальный яркостный код, найденный в образе и эталоне, соответственно, в данном окне представления образа и эталона. Амплитуды всех яркостей в образе и эталоне будут после выполнения упомянутой операции деления нормированы. При этом проблем с метрикой Хэмминга не возникает, если передаточные характеристики трактов синтеза образа и эталона от сенсорных частей трактов до блоков попиксельного сравнения линейны или имеют идентичные нелинейности, отличающиеся друг от друга лишь масштабным коэффициентом (что означает эквивалентность гистограмм контраста на фрагментах). В противном случае, если мы не знаем невязку между этими нелинейностями, то требуется использование механизма приведения указанных характеристик к наперед заданному виду [11, 12] (в том числе и к виду кусочно-линейному) – на опорных засветках сенсорных каскадов трактов, в том числе на равномерно распределенных по яркости на поле транспарантов объектов визуализации. В последнем случае довольно легко определяются интервальные аддитивный и мультипликативный коэффициенты коррекции в тракте на основании того, что транспаранты, сравниваемые попиксельно просто должны представлять собой равномерно засвеченное полотно. Т.к. возможность опорной засветки при выборе фрагментов из имеющихся в базах данных уже упущена, то вычисление мультипликативных и аддитивных коэффициентов по существу выполняемой радиометрической коррекции фрагментов для их сравнения может быть реализована на основе анализа и выполнения процедур парной эквализации гистограмм.

Так как эталон и образ могут иметь невязку по углу взаимного поворота (на субпиксельном уровне), то устранение этой проблемы приводит либо к использованию преобразований и того и другого к виду инвариантному к повороту, либо применению преобразований Родона, заключающихся в формировании так называемых суммопроекций: подобно алгоритму интерференционного веерного фильтра, в окне, несущем образ, и в окне, несущем эталон, намечается K пар тождественных в каждой паре взаимно пересекающихся осей, на каждой

из которых накапливается амплитудный профиль так называемой тени объекта при нормальном на каждую ось проектировании с суммированием амплитуд контраста вдоль оси проектирования. Для портретов объектов, обладающих связностью и симметрией, количество осей в преобразовании Родона может быть даже сведено к двум (более того, если объект – это, допустим, круг, то достаточно и одной оси). Для каждого из эталонов заранее решается задача о количестве осей Родона, позволяющем однозначное распознавание объекта.

Кроме того при всех выполненных выше «выравниваниях» изображений необходимо устранить несовпадения распределений яркостей на образах изображений, вызванные разными углами места солнца при синтезе изображений еще на борту космического аппарата.

В работе для подавления амплитудной картины (как отмечалось выше, зависимой от условий наблюдения) опорного ориентира реализуется градиентная фильтрация с пониженным порядком операций дифференцирования (меньше единицы).

Исследован [13] и используется амплитудный пространственный спектр образа и эталона после градиентной фильтрации или после обработки дифференциальным оператором $D_x^\alpha D_y^\beta$, при $0 < \alpha < 1$, $0 < \beta < 1$.

Применяется версия градиентного фильтра в виде

$$\text{grad}_{\alpha\beta} S(x, y) = ((D_x^\alpha S)^2 + (D_y^\beta S)^2)^{1/2} \quad (0 < \alpha < 1, 0 < \beta < 1), \quad (1)$$

результат воздействия которого на спектр изображения $F(\omega)$ определяется множителем $(J\omega_x)^\alpha \cdot (J\omega_y)^\beta$, где ω_x, ω_y – пространственные частоты изображения; $F(f)$ – Фурье-образ f .

Выполнение градиентной фильтрации с порядком меньше единицы, подавляющей низкие и средние моды амплитудного ПС образа подавляет зависимость от времени суток, метеоусловий, сезона, и параметров орбиты наблюдения объекта амплитудно-яркостную составляющую картины образа, сохраняя границы при обрамлении перепадов яркостей, которые в большей степени определяются геометрией объекта [14].

Решению задачи распознавания в достаточной мере препятствуют суточные, метео-, а также сезонные вариации изображения объектов или района. С целью снижения влияния перечисленных факторов на достоверность распознавания предлагается метод генерализации суточно-, метео-, сезонно- инвариантных образов наблюдаемых объектов [14]: «суточно-метео-сезонные» инварианты образов создаются заменой их амплитудных пространственных спектров на спектр белого шума при сохранении фазовых спектров с последующим обратным быстрым преобразованием Фурье (БПФ).

Для осуществления развиваемой стратегии поиска фрагментов изображений необходимо построение и наполнение базы данных сезонных инвариантов на основе процесса комплексирования спектрально-корреляционного и структурно-лингвистического методов распознавания выбираемых для систематического наблюдения опорных ориентиров (ОО) и объектов на территориях (полигонах, исследуемы ареалах) [15, 16].

Далее целесообразно перейти к устранению невязок по масштабам представления пар сопоставляемых фрагментов изображений. Инварианты к масштабу, как правило – это преобразование Фурье-Меллина наборов признакового описания. В работе [17] соответствующие инвариантные представления и их доказательная база показаны с необходимой степенью подробности. При поддержке средствами автоматизации задачи выбора фрагментов из баз данных для заданного фрагмента необходимо ввести меру достоверности распознавания для автоматизированного процесса принятия решения на продолжение перебора фрагмен-

тов: меру оценки промаха в распознавании, прямо пропорциональную вычисленной дисперсии изображения, ширине полосы спектра шума, ширине полосы перекрытия спектров шумов и образов, и обратно пропорциональной ширине полосы спектра образа [15].

Для осуществления операций распознавания реализуется следующая последовательность действий:

- на фрагменте изображения, к которому подбираются пары, находятся один или несколько характерных объектов – опорных ориентиров (ОО);
- оператор-интерпретатор обрамляет исследуемый объект на фрагменте изображения – опорный ориентир сплошной линией, прорисовывает его по контуру, ограничивающему переход от ОО к фону. При этом, естественно, ошибка обрамления минимизируется либо на «глаз», либо отслеживанием максимума корреляции обрамленного всякий раз ОО и его эталона, построенного средствами графического пакета или графического приложения;
- в окне диалога восстанавливается фон, (синтезируется средствами компьютерной графики) адекватный окну ОО, либо в окне с ОО обнуляются пиксели, представляющие фон. Так как корреляционные коэффициенты считаются интегрированием (суммированием) на апертурах окон, то в первом случае, экстремумы соответствующих им величин слегка сглажены (присутствием константы от интеграла по фону); во втором случае эти величины выявляются острее [19].

Функция взаимной корреляции (ФВК) в описываемых окнах вычисляется в виде:

$$R(\xi, \eta) = \frac{\iint [S_{ИО}(x, y) - S_{ИО}] [S_{ОО}(x - \xi, y - \eta) - S_{ОО}] dx dy}{(\iint [S_{ИО}(x, y) - S_{ИО}]^2 [S_{ОО}(x - \xi, y - \eta) - S_{ОО}]^2 dx dy)^{1/2}}, \quad (2)$$

где $S_{ИО}(x, y)$ – контраст в окне эталона, $S_{ОО}(x, y)$ – контраст в окне опорного ориентира, $S_{ИО}$ и $S_{ОО}$ – математического ожидания контраста в соответствующих окнах. Интегрирование выполняется по апертуре окон. В качестве ошибки распознавания Π принимается величина

$$\Pi = 1 - \max R(\xi, \eta). \quad (3)$$

Здесь $R(\xi, \eta)$ не больше единицы в силу соотношения (3).

В соответствии с положениями основ корреляционного анализа [18,19] результаты проведенных исследований, моделирований и сравнений, сопровождаемые значениями $\max R(\xi, \eta) < 0.7$ отбраковываются.

Формула для вычисления нормированной функции взаимной корреляции между объектом и эталоном в дискретном варианте имеет вид:

$$R(k^2) = \frac{\sum_{i=1}^{k^2} b_i b_{yi}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{k^2} b_{yi}^2 - \frac{1}{k^2} (\sum_{i=1}^{k^2} b_{yi})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{k^2} b_i^2 - \frac{1}{k^2} (\sum_{i=1}^{k^2} b_i)^2}} - \frac{\frac{1}{k^2} \sum_{i=1}^{k^2} b_i \sum_{i=1}^{k^2} b_{yi}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{k^2} b_i^2 - \frac{1}{k^2} (\sum_{i=1}^{k^2} b_i)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{k^2} b_{yi}^2 - \frac{1}{k^2} (\sum_{i=1}^{k^2} b_{yi})^2}}, \quad (4)$$

где k^2 – размеры окон, i пробегает все значения номеров пикселей изображений, b_i – яркость пиксела в окне опорного ориентира, b_{oi} – яркость пиксела в окне эталона.

В процессе распознавания на первом запуске процедуры поиска фрагментов производится конструирование, подбор эталона, а также юстирование его в окне по углу и смещению относительно осей окна до тех пор, пока не определится максимальное значение $R(k^2)$. В программу вычисления функции корреляции каждый раз автоматически вводятся растровые файлы окон по завершению оператором какой-либо из манипуляций над изображением. Для ускорения вычислений используется теорема о Фурье-преобразовании свертки двух функций с применением быстрых преобразований Фурье (БПФ)

$$R(k^2) = F^{-1}(F(b) \cdot F(b_{oi})) \quad (5)$$

где F^{-1} – обратное БПФ.

Т.к. ФВК определяется как обратное Фурье преобразование произведений двух спектральных представлений коррелируемых изображений, то спектральное ее представление будет намного уже по полосе, чем спектральные полосы исходных изображений, т.е. скорость восхождения ФВК к максимуму и острота пика намного меньше, чем просто при анализе поведения разности фаз спектров при сдвиге одного из изображений.

Что же касается вычислений моментных функционалов, то результаты этих вычислений сильно замаскированы мгновенными значениями шумовой составляющей на изображениях. Причем, что именно считать шумовой составляющей, трудно определить, т.к. понятие «шумовая составляющая» формулируется достаточно субъективно человеком, рассматривающим изображение. Но очевидно, что чем насыщеннее высокочастотные составляющие спектров изображений, тем труднее работать с моментными функциями.

На рис. 1-4 для примера представлены, соответственно, исходное изображение, преобразование Родона изображения на обе оси координат, разность преобразований Родона исходного изображения и изображения, сдвинутого на пиксел вправо и вниз, разность преобразований Родона исходного изображения и изображения, сдвинутого на полпиксела вправо и вниз.



Рис. 1. Исходное изображение



Рис. 2. Преобразование Родона исходного изображения



Рис. 3. Разность преобразований Родона исходного изображения и изображения, сдвинутого на пиксел вправо и вниз



Рис. 4. Разность преобразований Родона исходного изображения и изображения, сдвинутого на полпиксела вправо и вниз

Легко заметить реализованную в примере достаточно высокую чувствительность при измерении сдвигов изображений. В качестве метрической оценки сдвига здесь можно принять средневзвешенную яркость пикселей на разностных преобразованиях Родона по осям координат.

Литература

1. *Винтаев В.Н., Ушакова Н.Н., Мельникова И.В., Гаджиев М.Г., Жуков А.В.* Разработка обобщенной структуры пространства признаков для бортовой системы распознавания без обучения. – Сб. докл. Международной науч.-технич. Интернет-конференции «Информационные технологии в управлении и моделировании». Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2005. С. 37-43.
2. Радиолокационные станции воздушной разведки / Под ред. Кондратенкова Г.С. – М.: Воениздат, 1983. 152 с.
3. *Горелик А.Л.* Методы распознавания / А.Л.Горелик, В.А. Скрипкин. – М.: Высшая школа, 1984. 208 с.
4. *Надь И.* Об одном подходе к построению нечетких алгоритмов человеко-машинной классификации / И. Надь, С.В. Романов // Математические методы распознавания образов: Матер. III Всесоюзн. конф., Львов, 1987. Ч.1. С.193-194.
5. *Винтаев В.Н., Уразбахтин А.И., Ушакова Н.Н.* Моделирование бортовой подсистемы распознавания в классе вероятностных признаков // Телекоммуникации, 2004. №6. С. 26-28.
6. *Тихонов В.И.* Нелинейная фильтрация и квазикогерентный прием сигналов / В.И. Тихонов, Н.К. Кульман. – М.: Советское радио, 1975. 704 с.
7. *Бейтс Р.* Восстановление и реконструкция изображений / Р. Бейтс, М. Мак-Доннел. – М.: Мир, 1989. 336 с.
8. *Прэтт У.* Цифровая обработка изображений / У.Прэтт. – М.: Мир, 1982. Кн. 2. 790 с.
9. *Патрик Э.А.* Основы теории распознавания образов / Э.А. Патрик. – М.: Советское радио, 1980. 408 с.
10. *Тепли Б.Д., Балакришнан С.Н.* Классификация и оценка нескольких целей с применением методов кластерного анализа // Аэрокосмическая техника, 1990. №10. С. 24-33 [(Journal of Guidance, Control, and Dynamics. 1990. No. 1, pp. 121-127, пер. В.В. Кузнецова).
11. *Винтаев В.Н., Гамидов В.В., Исмаилов К.Х.* Задача цифровой нормализации матриц фотоприемных устройств. Сообщения НПОКИ №1. Баку: Изд. «ЭЛМ», 1984. С.38-51.
12. *Винтаев В.Н., Исмаилов Т.К., Исмаилов К.Х., Мамедов Ф.А., Гадживердиев А.З., Искандеров М.М.* Устройство для сбора и обработки данных аэрокосмических измерений. АС СССР №1174938, БИ №31 23.08.85.
13. *Ушакова Н.Н.* Коррекция цифровых космических изображений на основе верифицирующего моделирования. – Дисс. на соискание ученой степени канд. тех. наук. – Белгород, БГТУ им. В.Г. Шухова, 2004. 255 с.
14. *Минко В.А.* Инварианты дистанционного мониторинга антропогенных объектов / В.А. Минко, В.Н. Винтаев, Б.Ф. Подпоринов, Н.Н. Ушакова // Экология и безопасность жизнедеятельности: Сб. докладов междунар. научно-п. ракт. конф. Пенза, 2002. – С. 50-51.
15. *Винтаев В.Н., Константинов И.С., Ушакова Н.Н., Шапиренко И.В.* Полнота системы опорных ориентиров в задаче коррекции разрешения дистанционных снимков по опорным ориентирам. Тезисы докладов IV международной научно-практической конференции «Пилотируемые полеты в космос». Звездный городок Московской обл., 2000.
16. *Винтаев В.Н.* Основные инварианты геодезических и природоресурсных исследований при дистанционном зондировании с космических платформ / В.Н. Винтаев, И.С. Константинов, Н.Н. Ушакова // Современные проблемы технического, естественно-научного и гуманитарного знания: Сб. докладов регион. научн.-практ.конф. Губкин, 2001. – С.121-125.
17. *Корнилов В.Ю.* Инвариантное представление изображений для распознавания космических объектов. – Дисс. на соискание ученой степени докт. тех. наук. – Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, 2005. 326 с.

18. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника / В.И.Тихонов. – М.: Советское радио, 1966. 677 с.
19. Гече Ф.Э. Признаковые отношения толерантности в задачах распознавания изображений / Ф.Э. Гече, А.Е. Батюк, М.В. Добош // Распараллеливание обработки информации: Сб. докладов VII Всесоюзн. шк.-семинара, Львов, 1989. – Ч. 2. С. 34-36.

Selection of base digital satellite images for the image synthesis of an Earth's surface section represented in digital pixels with significantly smaller aperture

S.V. Blazeovich¹, V.N. Vintaev², E.S. Selyutina¹, N.N. Ushakova²

¹ Belgorod State University

E-mail: blazh@bsu.edu.ru

² Belgorod University of Consumer Cooperatives

E-mails: viktor.vn2010 @yandex.ru, natush2006@yandex.ru

The paper presents a solution of the problem of search, identification and selection of database fragments of digital satellite images of the same section of the earth's surface whose mutual spatial shift can constitute not only integer values of pixels but also portions of pixel aperture in order to use these images in the synthesis of the resulting image with subpixel representation.

Keywords: digital satellite image synthesis, sub-pixel resolution, base satellite image selection.