

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 004.932.4

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-89-100

Разработка модели субпиксельной обработки аэрокосмических снимков при дистанционном зондировании Земли*

Д.В. ФЕТИСОВ¹, А.Н. КОЛЕСЕНКОВ², С.И. БАБАЕВ³,
Т.А. ФЕТИСОВА⁴

390005, РФ, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1, Рязанский государственный радиотехнический университет

^a morzikov@gmail.com ^b sk62@mail.ru ^c babaev.s.i@gmail.com

^d pyurova_ta@mail.ru

Цифровая обработка широко используется в промышленности, образовании и космосе, которые работают с изображениями высокого разрешения. При дистанционном зондировании земной поверхности для исследования недр и полезных ископаемых необходимы изображения высокого разрешения. Однако снимки, получаемые со спутников и с помощью аэрофотосъемки, не всегда обладают достаточным качеством, вследствие чего их подвергают дополнительной компьютерной обработке. Поэтому разработка модели субпиксельной обработки аэрокосмических снимков для последующего повышения их качества является актуальной задачей для теоретических исследований и решения различных прикладных задач.

Космическая фотосъемка является важной составляющей для получения фотоснимков местности и ее последующего анализа. Она может проводиться различными способами: через одиночную или прицельную, маршрутную или глобальную съемку, каждая из которых обладает своим преимуществом. Также космическая съемка различается относительно масштаба, обзорности, пространственного разрешения и спектральных характеристик.

Для повышения качества получаемых снимков имеется 3 группы методов: линейные, нелинейные методы и суперразрешение. Последний метод также называется сканированием, под которым понимается обработка нескольких снимков низкого разрешения, сдвинутых относительно друг друга на часть пикселя. Для того чтобы повысить качество изображения с помощью метода субпиксельной обработки, и была разработана модель, подразумевающая преобразование исходного «непрерывного» снимка в «дискретный» (в виде матрицы) через функции рассеяния точки.

Таким образом, в данной статье проанализированы способы получения космических снимков земной поверхности, рассмотрены методы повышения их качества, а также разработана модель субпиксельной обработки аэрокосмических изображений при дистанционном зондировании Земли, что позволит проводить исследования и мониторинг полезных ископаемых и состояния недр земли.

Ключевые слова: изображение, суперразрешение, модель, сканирование, субпиксельная обработка, метод, дистанционное зондирование Земли, космический снимок

* Статья получена 24 декабря 2018 г.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день широкое распространение получили технологии, которые связаны с применением высококачественных цифровых изображений. Они используются в медицине, образовании, промышленности, космических исследованиях. Подобные науки и дисциплины, занимающиеся вопросами обработки изображений с низким разрешением, приобрели особую актуальность в настоящее время. Ранее основные разработки преимущественно проводились зарубежными учеными, однако российские исследования в последние годы также стали активно развиваться в данном направлении.

Алгоритмы и методы повышения качества цифровых изображений и снимков, полученных с помощью аэрофотосъемки, условно можно разделить на три группы: нелинейные методы, линейные методы, методы суперразрешения [1]. Но, несмотря на большое внимание, уделенное данным методам в современной научной литературе, и на стремительное развитие данной тематики, связанной с цифровой обработкой изображений, необходимо постоянно проводить анализ существующих, а также усовершенствованных методов повышения разрешения изображений [2, 3].

В связи с этим цель данной работы состоит в изучении процесса улучшения качества цифровых изображений современными методами обработки, их анализе, а также в разработке общей модели обработки снимков, полученных со спутников для проведения дальнейших исследований в рамках дистанционного зондирования Земли.

1. СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ СНИМКОВ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Космическая фотосъемка представляет собой технологический процесс представления земной поверхности в виде фотографических изображений с некоторого летательного аппарата для получения фотоснимков местности [4] с заданными характеристиками и параметрами. К главным задачам аэрокосмических съемок можно отнести:

- изучение планет Солнечной системы;
- исследование и рациональное использование полезных ископаемых и природных ресурсов Земли;
- исследование антропогенных изменений поверхности;
- изучение Мирового океана;
- исследование загрязнения воздушного и водного пространства;
- мониторинг окружающей среды;
- изучение прибрежных частей суши и акваторий шельфов.

Основным отличием фотоснимков из космоса является скорость полета и большая высота, а также их периодическое изменение во время движения космического летательного аппарата по орбите; постоянное вращение Земли и объектов съемки относительно орбиты; изменение освещенности Земли по траектории полета летательного аппарата; фотографирование сквозь слой атмосферы; аппаратура для фотографирования полностью автоматизирована [5, 6].

Высота съемки способствует уменьшению масштаба снимка, однако ее выбор определяется поставленными при съемке задачами и необходимостью получения снимков определенного масштаба. Вследствие этого требования к оптической системе фотоаппаратов повышаются с точки зрения качества, которое должно быть хорошим или приемлемым по всему полю. К геометрическим искажениям предъявляются особенно высокие требования.

Преимущество и значимость снимков Земли из космоса бесспорны по сравнению с обычными воздушными снимками [7]. Прежде всего они отличаются своей обзорностью, благодаря которой позволяют делать съемку с охватом территории в сотни и тысячи километров. Также они обладают свойствами пространственной и спектральной генерализации (отсеивание случайного и второстепенного и выделение главного и существенного). Съемка из космоса позволяет получать фотоснимки через регулярные промежутки времени, а это, в свою очередь, способствует проведению качественных исследований динамики любого процесса [8].

Космическая съемка может проводиться разными методами. Относительно способа отображения земной поверхности на космических снимках обычно выделяют следующие виды съемки:

- одиночное фотографирование;
- прицельная;
- маршрутная;
- глобальная.

Под одиночной или выборочной съемкой подразумевается фотографирование ручными камерами самими космонавтами. В таких случаях снимки получаются перспективными со значительными углами наклона.

Прицельное фотографирование предназначено для получения изображений специально заданных участков Земли в стороне от трассы.

При маршрутной съемке фотографирование земной поверхности производится вдоль маршрута полета спутника, при этом ширина полосы/зоны съемки зависит от угла обзора и высоты полета съемочной системы. Для того чтобы увеличить полосу обзора, обычно практикуют «веерную» съемку, т. е. поперек направления полета двумя или тремя фотосистемами высокого разрешения.

Глобальная съемка – это съемка с полярно-орбитальных и геостационарных спутников. Четыре-пять спутников на экваториальной орбите обеспечивают непрерывное получение обзорных снимков всей Земли мелкого масштаба (космическое патрулирование) за исключением полярных шапок.

Под аэрокосмическим снимком [9, 10] в подобных случаях понимают двумерное изображение реальных объектов, полученное по определенным радиометрическим (фотометрическим) и геометрическим законам с помощью дистанционной регистрации яркости объектов и предназначенное для изучения видимых и скрытых объектов, процессов и явлений окружающего мира, для определения их положения на земной поверхности.

По своим геометрическим свойствам космический снимок принципиально не отличается от аэрофотоснимка, однако имеет особенности, которые связаны с фотографированием с большой высоты и скоростью движения. Ввиду того, что по сравнению с самолетом спутник движется гораздо быстрее, то требуются короткие выдержки при съемке.

Космическая съемка также классифицируется по следующим параметрам:

- пространственному разрешению;
- масштабам;
- обзорности;
- спектральным характеристикам.

Данные параметры определяют способность дешифровать различные объекты на космических снимках и с их помощью решать геологические задачи [11].

Различные по своему назначению спутники с разными съемочными системами для выполнения съемок запускаются в настоящее время. Из систем, которые предназначены для космических съемок, наиболее перспективными признаются радиолокаторы с синтезированной длиной антенны и многозональные оптико-электронные стереосканеры.

Относительно технологии съемки и используемого спектрального диапазона выделяют сканерную (оптико-электронного и оптико-механического сканирования) и фотографическую (черно-белую, цветную, спектрально-зональную) съемки в инфракрасном диапазоне, микроволновую радиометрическую и радиолокационную съемку, а также тепловую инфракрасную съемку.

В современном дистанционном зондировании Земли стал основным многозональный принцип. Такая съемка выполняется одновременно в трех-семи узких спектральных зонах инфракрасного и видимого диапазона и сочетается со съемкой в панхроматической зоне, чтобы получить изображения более высокого пространственного разрешения. Сканеры, основанные на ПЗС-матрицах, позволяют увеличить количество спектральных зон до нескольких сотен – это гиперспектральная съемка. Также существует многочастотная съемка, при которой реализуется многозональный принцип через использование нескольких частот (длин радиоволн) СВЧ-диапазона, и поляризационная съемка с разной поляризацией зондирующего излучения.

Детальные стереоскопические снимки, которые получают с космических высот с помощью оптико-электронных длиннофокусных сканеров, оказались приемлемыми для метрической характеристики рельефа поверхности Земли в виде цифровых моделей и изолинейных картин рельефа. Такая стереоскопическая съемка может быть представлена несколькими вариантами: одновитковая или однопроходная съемка (перекрывающиеся стереопары снимков получают относительно оптической оси, вращающейся в разных направлениях); двухвитковая съемка (получают снимки с поперечным перекрытием относительно соседних витков в результате отклонения оптической оси в сторону).

2. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ РАЗРЕШЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В настоящее время все методы улучшения качества цифровых изображений [12] можно разделить на линейные, нелинейные и суперразрешение. К первым методам (линейным) относится процедура интерполяции, являющейся самым простейшим способом повышения разрешения. При данном подходе интерполяция снимка представляется в виде функции, а пиксели – в виде точек, причем значения интерполирующей функции в них заранее из-

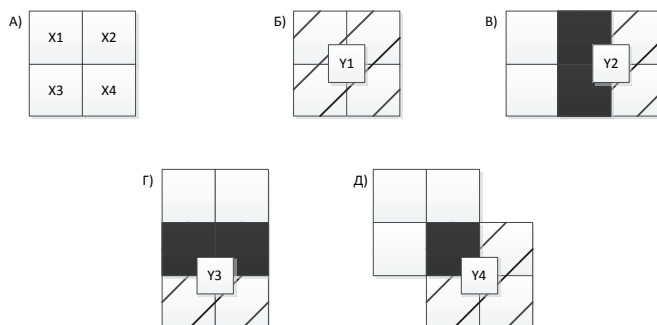
вестны. Под интерполяцией понимается процесс нахождения промежуточных значений относительно уже известных значений, составляющих дискретный набор, поэтому процедура интерполирования никогда не позволит точно восстановить информацию.

Методы интерполяции основаны на применении свертки изображения и ядер различных типов. Простейшим и самым быстрым линейным методом, основанным на процедуре интерполяции, является метод «ближайшего соседа», заключающийся в растяжении пикселей. Например, данное растяжение будет реализовано через дублирование пикселей изображения, если при ресамплинге используется целый коэффициент увеличения. Главным недостатком применения методов интерполяции является явно выраженный эффект ступенчатости.

Ко второй группе методов повышения разрешения изображений относятся нелинейные методы. Они позволяют избавиться от недостатков методов первой группы путем применения адаптивных методов. В них ядро задается пикселями, независимыми друг от друга. Примером нелинейных методов могут служить градиентные алгоритмы, которые позволяют достигнуть более качественных результатов при интерполяции относительно границ частей снимка. Здесь используются разные ядра поперек и вдоль контуров изображения (например, применяется функция Гаусса с переменными радиусами разных направлений). Благодаря интерполированию границ результат получается достаточно схожим с результатами бикубической интерполяции, однако эффект наложения оказывается почти полностью подавленным.

Суперразрешение составляет третью группу методов повышения качества изображения. Под суперразрешением понимают построение изображения очень высокого разрешения по нескольким изображениям низкого разрешения, слабо отличающимся друг от друга. Главная идея заключается в применении субпиксельных сдвигов снимков исследуемого объекта для разных комбинаций информации с нескольких изображений, полученных в результате аэрофотосъемки. Обычно в литературе для восстановления изображения высокого разрешения путем субпиксельной обработки сдвинутых снимков низкого разрешения употребляют термин «сканирование» [13]. При этом пиксели имеют конечный размер, их сигналы соответствуют усредненным значениям некоторой окрестности точки, а не значениям яркости объекта в определенной точке на исходном изображении. При смещении снимков на долю или часть пикселя усреднение производится в разных кадрах по разным окрестностям.

На рисунке упрощенно изображен процесс улучшения качества в случае с использованием четырех снимков, которые сдвинуты на половину пикселя по двум направлениям (например, А – изображение высокого разрешения, состоящее из четырех пикселей X_i , где i – номер пикселя; Б–Д – снимки низкого разрешения, состоящие из одного пикселя, полученные при субпиксельном сдвиге камеры в разных направлениях; пиксель изображения низкого разрешения обозначен как Y_j , где j – номер кадра при сканировании). Для нахождения значений пикселей результирующего изображения высокого разрешения требуются данные о значениях точек на граничной области, захватываемой кадром низкого разрешения при его сдвиге относительно исходного положения.



Варианты метода суперразрешения

Versions of the super-resolution method

Методы суперразрешения также делятся на два типа: методы, основанные на обучении, и методы, основанные на восстановлении изображения [2, 14]. Первые методы используют один снимок низкого разрешения и обновляемую базу данных, вторые – несколько снимков низкого разрешения. Обучающие методы являются перспективными, но не являются универсальными (например, их невозможно использовать для восстановления инфракрасных изображений).

Восстанавливающие методы для получения изображений высокого разрешения [3, 15] можно разделить на алгоритмы, использующие одномерное сканирование, и алгоритмы, использующие двумерное сканирование. Особого внимания заслуживают методы одномерного сканирования, поскольку они не так сложны в реализации и быстро приводят к желаемому результату.

В целом субпиксельная обработка как процедура получения суперразрешения сводится к минимизации отклонения восстановленного изображения от изображения реального объекта.

3. ОБЩАЯ МОДЕЛЬ СУБПИКСЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Свет в плоскости получения изображения распространяется непрерывно, поэтому процесс описания модели следует начать с непрерывного формирования снимка. Для этого используется функция рассеяния точки, которая позволяет моделировать усреднения и искажения в момент фиксации изображения.

Для получения сверхразрешения необходимо использовать несколько снимков. Пусть $I_k(pix)$ – это исходное непрерывное изображение низкого разрешения, состоящее из номеров пикселей (pix) низкого разрешения. Для его получения через фотокамеру происходит следующее:

$$I_k(pix) = (F_k PSF_k) pix, \quad (1)$$

где F_k – исходное изображение в камере, PSF_k – функция рассеяния точки. Иначе формулу (1) можно представить так:

$$I_k(pix) = \int F_k(x) \cdot PSF_k(x - m) dx. \quad (2)$$

Перейдем от функциональной зависимости к матричной. Предположим, что сетка координат пикселей для изображения со сверхразрешением равна $grid_k(x, y) = grid_k(z)$, и подставим в (2) вместо x :

$$I_k(pix) = \int F_k(grid_k(x, y)) PSF_k(grid_k(x, y) - m) \left| \frac{dgrid_k}{dz} \right| dz. \quad (3)$$

Обозначим $F_k(grid_k(x, y)) = \alpha(z)$ и подставим в (3):

$$I_k(pix) = \int \alpha(z) \cdot PSF_k(grid_k(z) - m) \left| \frac{dgrid_k}{dz} \right| dz. \quad (4)$$

Пусть $I'_k(pix')$ – новое изображение со сверхразрешением, состоящее из номеров пикселей (pix) высокого разрешения и получаемое в соответствии с $\alpha(z)$. Тогда перейдем от непрерывной к дискретной форме представления изображения:

$$I_k(pix) \cong \sum_{pix'} \left[I'(pix') \int_{pix'} PSF_k(grid_k(z) - m) \left| \frac{dgrid_k}{dz} \right| dz \right]. \quad (5)$$

Предположим, что

$$\beta_k(pix, pix') \cong \int_{pix'} PSF_k(grid_k(z) - m) \left| \frac{dgrid_k}{dz} \right| dz.$$

Тогда получим

$$I_k(pix) \cong \sum_{pix'} I'(pix') \cdot \beta_k(pix, pix'). \quad (6)$$

Если матрица высокого разрешения одна, то получим

$$I_k(pix) = I' \beta_k. \quad (7)$$

Предположим, что PSF содержит только пикселизацию изображения, исходных изображений несколько и достаточно, тогда однозначно можно найти значения пикселей нового изображения I' заданного размера, решая систему уравнений $I_k(pix) / b_k$.

В дальнейших исследованиях повышение разрешения будет рассмотрено на основе растрового (дискретного) изображения, имеющего определенную структуру, в которой пиксель является наименьшим логическим элементом. При увеличении масштаба изображения происходит укрупнение пикселей, тем самым повышается зернистость за счет окрашивания в один цвет соседних точек. Для уменьшения размера пикселей необходимо

ввести дополнительные точки, для которых требуется дополнительная информация. Эти данные можно получить путем взаимного смещения субпикселей исходных изображений. Поэтому задача получения сверхразрешения сводится к разработке алгоритма синтеза (совмещения снимков со смещением на доли пикселя) исходных изображений. Таким образом, значение нового пикселя получается за счет других пикселей, частично схожих между собой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе рассмотрены три основные группы методов повышения разрешения изображений, из которых линейные и нелинейные методы не вносят новой информации в изображение, чего нельзя сказать про метод суперразрешения. В нем используются данные сразу нескольких снимков, что позволяет вносить больше информации в результирующее изображение высокого разрешения. Также были представлены методы субпиксельной обработки изображений, которые позволяют повысить качество цифрового изображения за счет пространственных сдвигов и получения новых пикселей. Подробно представлена общая модель субпиксельной обработки данных, которая может применяться при решении различных прикладных задач при дистанционном зондировании Земли.

Необходимо отметить, что это только начальные исследования в области субпиксельной обработки аэрокосмических снимков, и имеется огромный потенциал для дальнейшего изучения данной области. В частности, можно рассмотреть одномерное и двумерное сканирование, повышение разрешения с помощью масок или методом восстановления цифровых изображений, реализовать их с помощью высокоуровневого языка программирования, провести экспериментальные исследования и сделать выводы о применимости того или иного метода при решении определенных прикладных задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фетисов Д.В., Колесенков А.Н. Субпиксельная обработка изображений как средство увеличения пространственного разрешения снимков // Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XXIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. – Рязань, 2018. – Т. 2. – С. 390–391.
2. Фетисов Д.В., Колесенков А.Н. Увеличение пространственного разрешения аэрокосмических снимков с использованием субпиксельной обработки // Современные технологии в науке и образовании СТНО-2018: сборник трудов Международной научно-технической и научно-методической конференции. – Рязань, 2018. – С. 221–226.
3. Improving the aerospace image quality using subpixel processing for the earth's distance monitoring / D.V. Fetisov, A.N. Kolesenkov, T.A. Fetisova, V.V. Strotov // Proceedings Collections from SPIE Remote Sensing. – Berlin, 2018. – Paper 10792-17. – P. 1–6.
4. Fetisov D.V., Kolesenkov A.N., Fetisova T.A. Automatic scaling method of aerospace images using spectral transformation // 2018 International Russian Automation Conference (IRAC). – Sochi, Russia, 2018. – DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501672.
5. Козлов В.Л., Кузьмичев И.П. Измеритель дальности и размерных параметров объектов на основе цифровой фотокамеры // Вестник БГУ. – 2011. – № 1. – С. 33–37.

6. Блажевич С.В., Селютина Е.С. Повышение разрешения цифрового изображения с использованием субпиксельного сканирования // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Математика. Физика. – 2014. – № 5. – С. 186–190.

7. Козлов В.Л., Васильчук А.С. Субпиксельная обработка изображений для измерения дальности на основе цифровой фотокамеры // Приборы и методы измерений. – 2012. – № 1. – С. 115–120.

8. Бескид П.П., Куракина Н.И., Орлова Н.В. Геоинформационные системы и технологии. – СПб.: РГГМУ, 2013. – 173 с.

9. Синтез цифровых изображений субпиксельного уровня разрешения с использованием расфокусировки / С.В. Блажевич, В.Н. Винтаев, Е.С. Селютина, Н.Н. Ушакова // Техническое зрение в системах управления, 2011: сборник трудов научно-технической конференции. – М., 2012. – С. 127–137.

10. Чернявский Г.М. Перспективы космического мониторинга Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2004. – Т. 1. – С. 39–46.

11. Гонсалес Р.С., Вудс Р.Е. Цифровая обработка изображений: монография / пер. с англ. под ред. П.А. Чочиа. – М.: Техносфера, 2006. – 1072 с.

12. Костяшкин Л.Н., Логинов А.А., Никифоров М.Б. Проблемные аспекты системы комбинированного видения летательных аппаратов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 5 (142). – С. 61–65.

13. Таганов А.И. Анализ и классификация рисков проекта методами нечеткой кластеризации // Информационные технологии моделирования и управления. – 2010. – № 4 (63). – С. 455–461.

14. Костров Б.В., Саблина В.А. Адаптивная фильтрация изображений со структурными искажениями // Цифровая обработка сигналов. – 2008. – № 4. – С. 49–53.

15. Костров Б.В., Костров В.В., Саблина В.А. Алгоритм восстановления изображений с периодическими низкочастотными искажениями // Радиотехника. – 2009. – № 11. – С. 92–95.

Фетисов Дмитрий Вадимович, аспирант кафедры космических технологий Рязанского государственного радиотехнического университета. Основное направление научных исследований – компьютерная обработка аэрокосмических снимков, дистанционное зондирование Земли, получение изображений со спутников. Имеет более 30 публикаций. E-mail: morzitko@gmail.com

Колесенков Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры космических технологий Рязанского государственного радиотехнического университета. Основное направление научных исследований – дистанционный мониторинг объектов и территорий. Имеет более 100 публикаций, в том числе одну монографию. E-mail: sk62@mail.ru

Бабаев Сергей Игоревич, старший преподаватель кафедры электронных вычислительных машин Рязанского государственного радиотехнического университета. Основное направление научных исследований – обработка аэрокосмических изображений. Имеет более 50 публикаций. E-mail: babaev.s.i@gmail.com

Фетисова Татьяна Анатольевна, аспирант кафедры систем автоматизированного проектирования вычислительных средств Рязанского государственного радиотехнического университета. Основное направление научных исследований – параллельные вычисления, ускорение алгоритмов обработки данных. Имеет более 40 публикаций. E-mail: ryugova_ta@mail.ru

Fetisov Dmitry Vadimovich, a postgraduate student at the department of space technologies in the Ryazan State Radio Engineering University. His research interests are focused on computer processing of aerospace images, remote sensing of Earth, and receiving satellite images. He is the author of over 30 publications. E-mail: morzitko@gmail.com

Kolesenkov Alexander Nikolaevich, PhD (Eng.), an associate professor at the department of space technologies in the Ryazan State Radio Engineering University. His research interests are focused on remote monitoring of objects and areas. He is the author of over 100 publications including 1 monograph. E-mail: sk62@mail.ru

Babaev Sergei Igorevich, an assistant professor at the computer department in the Ryazan State Radio Engineering University. His research interests are focused on computer processing of aerospace images. He is the author of over 50 publications. E-mail: babaev.s.i@gmail.com

Fetisova Tatiana Anatolievna, a postgraduate student at the department of automated design of computers in the Ryazan State Radio Engineering University. Her research interests are focused on parallel computations and acceleration of data processing algorithms, She is the author of over 40 publications. E-mail: pyurova_ta@mail.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-89-100

Development of a model for sub-pixel processing of aerospace images during remote sensing of the Earth*

D.V. FETISOV^a, A.N. KOLESENKOV^b, S.I. BABAEV^c, T.A. FETISOVA^d

Ryazan State Radio Engineering University, 59/1, Gagarin St., Ryazan, 390005, Russian Federation

^a morzitko@gmail.com ^b sk62@mail.ru ^c babaev.s.i@gmail.com ^d pyurova_ta@mail.ru

Abstract

Digital processing is widely used in industry, education and space which work with high-resolution images. For remote sensing of the Earth's surface, high resolution images are needed to study the subsoil and minerals. However, images obtained from satellites and using aerial photography do not always have a sufficient quality. As a result they are subjected to additional computer processing. Therefore, the development of a model of sub-pixel processing of aerospace images for the subsequent improvement of their quality is an important task for theoretical studies and solving various applied problems.

Space photography is an important component for obtaining photographs of the terrain and its subsequent analysis. It can be carried out in various ways: through a single or aimed, route or global survey, each of which has its own advantage. Also, satellite survey differs with respect to scale, visibility, spatial resolution and spectral characteristics.

To improve the quality of images obtained, there are 3 groups of methods used: linear, nonlinear methods and super resolution. The last method is also called scanning, which refers to the processing of several low-resolution images shifted relative to each other by a part of a pixel. In order to improve the quality of the image using the sub-pixel processing method, a model was developed that implies the transformation of the original "continuous" image into a "discrete" (as a matrix) through point scattering functions.

Thus, this article analyzes the means for obtaining satellite images of the Earth's surface, discusses methods for improving their quality, and also develops a model of sub-pixel processing of aerospace images during remote sensing of the Earth, which will allow research and monitoring of minerals and the state of the Earth's interior.

Keywords: image, super-resolution, model, scanning, sub-pixel processing, method, Earth remote sensing, space image

* Received 24 December 2018.

REFERENCES

1. Fetisov D.V., Kolesenkov A.N. [Subpixel image processing as the means of increasing the spatial resolution of images]. *Novye informatsionnye tekhnologii v nauchnykh issledovaniyakh: materialy XXIII Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov, molodykh uchenykh i spetsialistov* [Materials of the XXIII All-Russian scientific and technical conference of students, young scientists and specialists “New information technologies in scientific research”], Ryazan, 2018, vol. 2, pp. 390–391. (In Russian).
2. Fetisov D.V., Kolesenkov A.N. [Increasing the Spatial Resolution of Aerospace Images using Subpixel Processing]. *Sovremennye tekhnologii v nauke i obrazovanii STNO-2018: sbornik trudov Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi i nauchno-metodicheskoi konferentsii* [Collection of works of the International scientific, technical and scientific-methodical conference “Modern technologies in science and education”, STNO-2018], Ryazan, 2018, pp. 221–226. (In Russian).
3. Fetisov D.V., Kolesenkov A.N., Fetisova T.A., Strotov V.V. Improving the aerospace image quality using subpixel processing for the earth’s distance monitoring. *Proceedings Collections from SPIE Remote Sensing*, 2018, Berlin, Germany, paper 10792–17, pp. 1–6.
4. Fetisov D.V., Kolesenkov A.N., Fetisova T.A. Automatic scaling method of aerospace images using spectral transformation. *2018 International Russian Automation Conference (IRAC)*, Sochi, Russia, 2018. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501672.
5. Kozlov V.L., Kuz'michev I.R. Izmeritel' dal'nosti i razmernykh parametrov ob'ektov na osnove tsifrovoi fotokamery [Measuring instrument of range and size parameters of objects on the basis of a digital camera]. *Vestnik BGU – Bulletin of BSU*, 2011, no. 1, pp. 33–37.
6. Blazhevich S.V., Selyutina E.S. Povyshenie razresheniya tsifrovogo izobrazheniya s ispol'zovaniem subpiksel'nogo skanirovaniya [Enhancing the resolution of a digital image using subpixel scanning]. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika. Fizika – Belgorod State University Scientific Bulletin. Mathematics and Physics*, 2014, no. 5, pp. 186–190.
7. Kozlov V.L., Vasil'chuk A.S. Subpiksel'naya obrabotka izobrazhenii dlya izmereniya dal'nosti na osnove tsifrovoi fotokamery [Sub-pixel image processing for ranging based on a digital camera]. *Pribory i metody izmerenii – Devices and Methods of Measurements*, 2012, no. 1, pp. 115–120.
8. Beskid P.P., Kurakina N.I., Orlova N.V. *Geoinformatsionnye sistemy i tekhnologii* [Geographic information systems and technologies]. St. Petersburg, Russian State Hydrometeorological University Publ., 2013. 173 p.
9. Blazhevich S.V., Vintaev V.N., Selyutina E.S., Ushakova N.N. [Synthesis of digital images of subpixel level of resolution using defocusing]. *Tekhnicheskoe zrenie v sistemakh upravleniya, 2011: sbornik trudov nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Computer vision in control systems 2011. Proceedings of the scientific-technical conference]. Moscow, 2012, pp. 127–137. (In Russian).
10. Chernyavskii G.M. Perspektivy kosmicheskogo monitoringa zemli [Prospects for earth space monitoring]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa – Current problems in remote sensing of the earth from space*, 2004, vol. 1, pp. 39–46.
11. Gonzalez R.C., Woods R.E. Tsifrovaya obrabotka izobrazhenii [Digital image processing]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2006. 1072 p. (In Russian).
12. Kostyashkin L.N., Loginov A.A., Nikiforov M.B. Problemnye aspekty sistemy kombinirovannogo videniya letatel'nykh apparatov [Problem aspects of the system of combined vision of aircraft]. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki – Izvestiya Southern Federal University. Engineering sciences*, 2013, no. 5 (142), pp. 61–65.
13. Taganov A.I. Analiz i klassifikatsiya riskov proekta metodami nechetkoi klasterizatsii [Analysis and classification of project risks using fuzzy clustering methods]. *Informatsionnye tekhnologii modelirovaniya i upravleniya – Information Technologies for Modeling and Management*, 2010, no. 4 (63), pp. 455–461.

14. Kostrov B.V., Sablina V.A. Adaptivnaya fil'tratsiya izobrazhenii so strukturnymi iskazheniyami [Adaptive filtering of images with structural distortions]. *Tsifrovaya obrabotka signalov – Digital Signal Processing*, 2008, no. 4, pp. 49–53.

15. Kostrov B.V., Kostrov V.V., Sablina V.A. Algoritm vosstanovleniya izobrazhenii s periodicheskimi nizkochastotnymi iskazheniyami [Algorithm for restoring images with periodic low-frequency distortions]. *Radiotekhnika – Radioengineering*, 2009, no. 11, pp. 92–95.

Для цитирования:

Разработка модели субпиксельной обработки аэрокосмических снимков при дистанционном зондировании Земли / Д.В. Фетисов, А.Н. Колесенков, С.И. Бабаев, Т.А. Фетисова // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 2 (75). – С. 89–100. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-89-100.

For citation:

Fetisov D.V., Kolesenkov A.N., Babaev S.I., Fetisova T.A. Razrabotka modeli subpiksel'noi obrabotki aerokosmicheskikh snimkov pri distantsi-onnom zondirovanii Zemli [Development of a model for sub-pixel processing of aerospace images during remote sensing of the Earth]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 2 (75), pp. 89–100. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-89-100.