

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 528.852.3

АЛГОРИТМ ТРЕХЭТАПНОГО ПЕРЕБОРА РЕБЕР ПОВЕРХНОСТИ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ОККЛЮЗИЙ ПРИ ОРТОТРАНСФОРМИРОВАНИИ

О. А. Пресняков, к.т.н., ведущий научный сотрудник НИИ «Фотон» РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0009-0007-3962-0724, e-mail: foton@rsreu.ru

Целью работы является создание алгоритма обнаружения окклюзий при ортотрансформировании спутниковых снимков по обратному закону геометрического соответствия. Под окклюзиями понимаются участки ортофотоснимка, закрытые возвышающимися объектами. При обработке по обратному закону области окклюзий ошибочно заполняются повторяющимися фрагментами изображения. В разработанном алгоритме пиксель относится к закрытым, если выше него визирный луч пересекается с кусочно-линейной поверхностью, построенной по цифровой модели местности (ЦММ). Алгоритм включает три цикла перебора ребер этой поверхности. В первом цикле обрабатываются ребра, проекции которых расположены вертикально в системе координат ЦММ, во втором – горизонтально и в третьем – диагонально. Алгоритм обеспечивает надежное обнаружение окклюзий без пропусков и ложных идентификаций.

Ключевые слова: окклюзия, ортотрансформирование, трансформирование по обратному закону, ЦММ, пересечение визирного луча с поверхностью, трассировка луча, перебор ребер поверхности, кусочно-линейная интерполяция ЦММ, корректные ортофотоснимки.

DOI: 10.21667/1995-4565-2025-91-148-157

Введение

В настоящее время снимки Земли из космоса предоставляются пользователям, как правило, в виде продуктов определенных уровней обработки [1, 2]. Создание продуктов уровня 2 предполагает выполнение ортотрансформирования изображений. Оно необходимо для устранения геометрических искажений снимка, вызванных особенностями съемочной аппаратуры, условиями съемки, рельефом местности. Изображение при этом преобразуется в ортогональную проекцию. Каждая точка на полученном ортофотоснимке наблюдается строго сверху. Но съемка ведется под некоторым углом. В результате на ортофотоснимке могут присутствовать области, которые соответствуют участкам местности, загороженным высокими объектами. Без принятия специальных мер заполнение закрытых фрагментов изображений («окклюзий») приводит к разного рода дефектам в зависимости от алгоритма ортотрансформирования. Для получения по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) качественных продуктов уровня обработки 2 необходимо решить задачу обнаружения окклюзий. В предлагаемой вниманию статье эта задача решается для случая ортотрансформирования по обратному закону с кусочно-линейной (треугольной) интерполяцией рельефа.

Постановка задачи

Алгоритм ортотрансформирования по обратному закону [3] обладает высоким быстродействием, но создаваемые с его помощью ортофотоснимки корректны, когда угловая высо-

та спутника больше угла наклона местности. В противном случае из одного и того же фрагмента исходного изображения могут формироваться несколько фрагментов результирующего кадра (рисунок 1). На схеме, приведенной на рисунке, отрезок ортофотоснимка A_1A_2 проецируется в отрезок поверхности Земли $A'_1A'_2$ и далее в отрезок $A''_1A''_2$ фокальной плоскости съемочного устройства. Участок $A''_1A''_2$ зарегистрированного изображения используется для заполнения A_1A_2 . Но $A''_1A''_2$ используется также для заполнения фрагментов A_2A_3 (причем зеркально) и A_3A_4 . На рисунке также приведен фрагмент снимка, для которого угол наклона местности превышает угловую высоту спутника, и результат его ортотрансформирования. Для большей наглядности в растр снимка впечатаны цифры 1 и 2 в местах, по смыслу соответствующих точкам A''_1 и A''_2 на схеме, и символ «С» между ними.

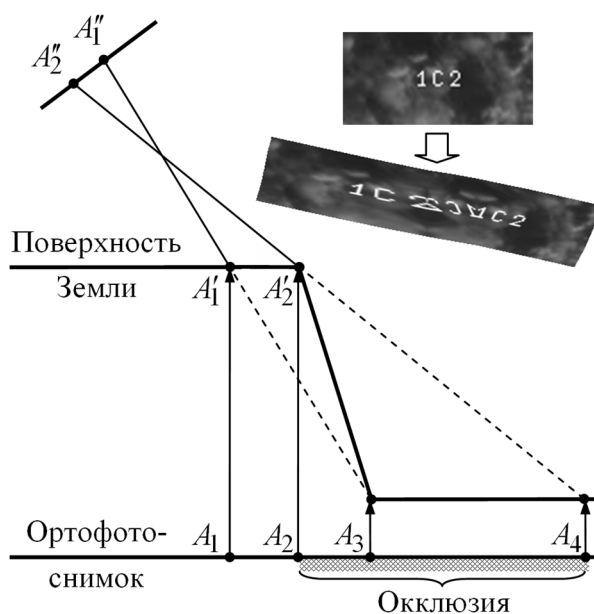


Рисунок 1 – Возникновение окклюзий при ортотрансформировании по обратному закону
Figure 1 – Occurrence of occlusions during orthorectification using backward projection

Для выявления закрытых областей предлагается проверять пересечение визирного луча с поверхностью, представляющей рельеф местности. Предлагаемый алгоритм обнаружения окклюзий разработан для использования совместно с процедурой ортотрансформирования, использующей тетраэдрическую аппроксимацию функции обратного геометрического соответствия исходного изображения и ортофотоснимка [3] и кусочно-линейную интерполяцию цифровой модели местности (ЦММ).

Рассмотрим элементы алгоритма ортокоррекции, существенные для обнаружения окклюзий. Представим создаваемый ортофотоснимок двумерной дискретной функцией отсчетов яркости $D(x, y)$, $x = 0, \dots, X - 1$, $y = 0, \dots, Y - 1$ в системе координат O_1xu . Для высокоскоростной обработки O_1xu дополняется высотой h , и в системе координат O_1xuh строится трехмерная аппроксимационная прямоугольная решетка. В ее узлах рассчитываются координаты исходного изображения. Каждая ячейка решетки разбивается на 6 тетраэдров, в пределах которых координаты линейно интерполируются по вершинам. В результате получается трехмерная кусочно-линейная функция обратного геометрического соответствия.

ЦММ перед ортотрансформированием преобразуется в систему координат O_2uv , $u = u_{O_1} + cx$, $v = v_{O_1} + cy$, где c – масштабный коэффициент, определяемый отношением шагов пространственной дискретизации (размеров пикселя) ортофотоснимка и ЦММ. Для последующего обнаружения окклюзий высоты должны быть известны на некотором расстоя-

нии за границами ортофотоснимка, поэтому начало отсчета O_2 смещено относительно O_1 . В результате трансформирования ЦММ формируется массив отсчетов функции $H(u, v)$, $u = 0, \dots, U-1$, $v = 0, \dots, V-1$.

При ортотрансформировании координаты (x, y) заполняемого пикселя ортофотоснимка дополняются высотой h , рассчитанной при помощи функции $\tilde{H}(u, v)$: $h = \tilde{H}(u, v)$. $\tilde{H}(u, v)$ является результатом кусочно-линейной интерполяции функции $H(u, v)$. По координатам (x, y, h) определяется ячейка аппроксимационной прямоугольной решетки и тетраэдр и рассчитываются координаты точки на исходном изображении при помощи линейной интерполяции.

Для кусочно-линейной интерполяции $H(u, v)$ плоскость O_2uv разбивается на треугольники, как показано на рисунке 2. Интерполированное значение высоты $\tilde{H}(u, v)$ находится как

$$\tilde{H}(u, v) = \begin{cases} H(\lfloor u \rfloor, \lfloor v \rfloor) + [H(\lfloor u \rfloor + 1, \lfloor v \rfloor) - H(\lfloor u \rfloor, \lfloor v \rfloor)]\{u\} + \\ \quad + [H(\lfloor u \rfloor + 1, \lfloor v \rfloor + 1) - H(\lfloor u \rfloor + 1, \lfloor v \rfloor)]\{v\}, & \text{если } \{u\} \geq \{v\}, \\ H(\lfloor u \rfloor, \lfloor v \rfloor) + [H(\lfloor u \rfloor + 1, \lfloor v \rfloor + 1) - H(\lfloor u \rfloor, \lfloor v \rfloor + 1)]\{u\} + \\ \quad + [H(\lfloor u \rfloor, \lfloor v \rfloor + 1) - H(\lfloor u \rfloor, \lfloor v \rfloor)]\{v\}, & \text{если } \{u\} < \{v\}, \end{cases}$$

где $\lfloor \cdot \rfloor$ обозначает ближайшее целое, меньшее числа, $\{ \cdot \}$ – дробную часть числа.

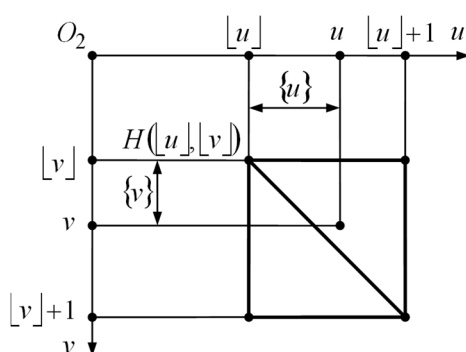


Рисунок 2 – Треугольная сетка для кусочно-линейной интерполяции ЦММ
Figure 2 – Triangular grid for piecewise-linear DSM interpolation

Для процесса ортотрансформирования с рассмотренными выше ключевыми особенностями задача обнаружения окклюзий предлагаемым способом формулируется следующим образом. Для каждой точки (x, y) ортофотоснимка необходимо проверить взаимное расположение визирного луча и поверхности $\tilde{H}(u, v)$. Окклюзия фиксируется, если какой-либо его участок оказывается ниже $\tilde{H}(u, v)$. Сам визирный луч известен из геодезической привязки исходного изображения, пересчет в систему координат которой точки (x, y) выполняется при помощи используемой при ортотрансформировании функции обратного геометрического соответствия.

Известные алгоритмы обнаружения окклюзий

В настоящее время нельзя назвать универсальный общепринятый метод детектирования окклюзий. Это вызвано различиями исходных данных (типов съемочных устройств, способов представления данных о высоте местности и т.д.), а также недостатками известных методов, в разной степени существенными в зависимости от решаемой задачи. Приведем наиболее популярные группы алгоритмов.

Алгоритмы обнаружения окклюзий на основе метода Z-буфера предполагают создание трех двумерных массивов, размер которых совпадает с исходным снимком. В них запоминаются координаты пикселей ортофотоснимка, для заполнения которых происходило обращение к соответствующим пикселям исходного изображения, а также расстояния от центра перспективы до точек поверхности. При повторном обращении сохраняются координаты точки ортофотоснимка с меньшим расстоянием до центра перспективы. По полученным массивам формируются пиксели результирующего изображения, а области окклюзий остаются незаполненными. Алгоритм характеризуется высоким быстродействием. Недостатки алгоритма подробно проанализированы в литературе [4]. Он допускает пропуск или ложную идентификацию окклюзий, особенно при масштабном отличии исходного и ортотрансформированного снимков. Кроме того, возможен пропуск окклюзий в областях, закрытых вертикальными стенами конструкций (проблема «M-portion»).

Алгоритмы, основанные на анализе угла съемки, отслеживают изменение угла между визирным лучом и проходящей через центр оптического проектирования снимка отвесной линией при удалении от точки надира в радиальном направлении. Окклюзия фиксируется, если угол в рассматриваемой точке меньше ранее полученных значений.

Алгоритм адаптивного радиального сканирования [4] предполагает последовательный перебор и анализ всех радиальных направлений с азимутом $0...360^\circ$. При этом шаг приращения азимута динамически уменьшается по мере удаления от надира для сокращения вычислительных затрат и минимизации пропуска окклюзий. Данный алгоритм эффективен для обработки результатов кадровой съемки. Применить его для определения закрытых областей на сканерных снимках нельзя, так как точка надира имеет свое положение для каждой строки исходного изображения. Можно также отметить, что алгоритм обнаруживает окклюзии с погрешностью из-за того, что линия определенного азимута не проходит строго через центры пикселей ортофотоснимка.

Алгоритмы трассировки луча основаны на обнаружении пересечений визирного луча с рельефом. Требуя более высоких вычислительных затрат по сравнению с рассмотренными выше, эти алгоритмы более универсальны и обеспечивают более строгое детектирование окклюзий. В качестве наиболее простого и универсального можно привести алгоритм трассировки луча с анализом высот [5]. В соответствии с этим алгоритмом от анализируемого пикселя ортофотоснимка до точки надира на горизонтальной проекции визирного луча выбираются промежуточные точки, в которых высота луча сравнивается с высотой поверхности. Высота рельефа получается при помощи билинейной интерполяции ЦММ. Шаг промежуточных точек определяется исходя из интервала дискретизации ЦММ и наклона траектории поиска. Этот алгоритм строго не гарантирует отсутствие пропуска пересечений луча с рельефом, на тестовых примерах авторами идентифицировано 94,04 % от общего числа закрытых пикселей.

Разработка алгоритма трехэтапного перебора ребер кусочно-линейной поверхности

Дефекты ортотрансформирования возникают, когда участок визирного луча проходит ниже представленной ЦММ поверхности Земли. Используем для проверки поверхность $h = \tilde{H}(u, v)$ и будем выполнять расчеты в системе координат $O_{2uv}h$. Это позволяет обеспечить строгое соответствие высот этой поверхности высотам, использованным при ортотрансформировании. В $O_{2uv}h$ луч визирования имеет вид некоторой кривой, что обусловлено искажениями картографической проекции, а также учетом рефракции атмосферы. Поэтому выполняется его кусочно-линейное приближение на интервале высот от поверхности до максимальной высоты местности в пределах снимка и его окрестности и проверяется взаимное расположение $\tilde{H}(u, v)$ с каждым полученным отрезком. Обозначим AB отрезок, фрагмент аппроксимированного визирного луча. Его проекцию на плоскость O_{2uv} (горизонтальную проекцию) обозначим $A'B'$.

Окклюзия регистрируется, если хотя бы один из треугольников, которые образуют $\tilde{H}(u, v)$ и через горизонтальные проекции которых проходит $A'B'$, находится выше AB или пересекается им. Это условие выполняется, когда AB проходит под одним из ребер поверхности или конец отрезка, точка B , располагается ниже треугольника, в проекцию которого попадает B' . Начало отрезка исключается из рассмотрения, поскольку начало первого отрезка, аппроксимирующего луч, находится строго на поверхности, а начало очередного отрезка совпадает с концом предыдущего. Задача обнаружения окклюзии сводится, таким образом, к перебору ребер поверхности, под или над которыми проходит визирный луч, и проверке их взаимного расположения с лучом, а также проверке расположения точки B .

На рисунке 3 показан отрезок $A'B'$ на плоскости O_2uv . На рисунке также нанесена треугольная сетка, образованная проекциями ребер поверхности $\tilde{H}(u, v)$. Предлагается перебор анализируемых ребер поверхности разделить на три части: перебор ребер с вертикальными, горизонтальными и «диагональными» проекциями на O_2uv . Сами ребра далее будем называть по виду их проекции на O_2uv вертикальными, горизонтальными или диагональными. При таком разделении координаты точек пересечения $A'B'$ с проекциями ребер в пределах каждого множества образуют арифметическую прогрессию. Например, координата u соседних точек пересечения $A'B'$ и вертикальных ребер (отмеченных на рисунке выколотыми квадратами) отличается на 1; координата v – на $k_{vu} = (v_B - v_A)/(u_B - u_A)$. Это позволяет организовать перебор точек пересечения с низкими вычислительными затратами.

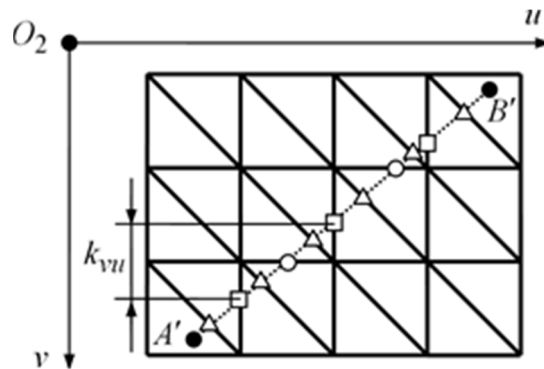


Рисунок 3 – Пересечения проекций отрезка визирного луча и ребер поверхности
Figure 3 – Intersections of viewing vector segment and surface edges projections

При проверке взаимного расположения AB и ребер поверхности необходимо будет обращаться к $H(u, v)$. Примем, что в памяти ЭВМ отсчеты $H(u, v)$ размещаются последовательно в порядке $H(0, 0), \dots, H(U-1, 0), H(0, 1), \dots$. Обозначим эту последовательность вектором $\mathbf{h} = (h_0, h_1, \dots, h_{UV-1})$, $h_{v \cdot U + u} = H(u, v)$. Для ускорения обработки сформируем также вектор $\hat{\mathbf{h}} = (\hat{h}_0, \hat{h}_1, \dots, \hat{h}_{UV-1})$, элементы которого равны максимальной высоте в пределах квадратной ячейки с левым верхним углом в точке (u, v) :

$$\hat{h}_{v \cdot U + u} = \begin{cases} \max [H(u, v), H(u+1, v), H(u, v+1), H(u+1, v+1)], & \text{если } u < U-1 \text{ и } v < V-1; \\ \max [H(u, v), H(u, v+1)], & \text{если } u = U-1 \text{ и } v < V-1; \\ \max [H(u, v), H(u+1, v)], & \text{если } u < U-1 \text{ и } v = V-1; \\ H(u, v), & \text{если } u = U-1 \text{ и } v = V-1. \end{cases}$$

Схема алгоритма проверки взаимного расположения AB с вертикальными ребрами приведена на рисунке 4. Перебор ребер выполняется слева направо. Сначала (блок 1) выполняется расчет вспомогательных переменных – компонент вектора $\overline{AB}$ в системе координат

$O_{2uv}h$. Обработка продолжается, только если проверка (блок 2) подтверждает ненулевую протяженность $A'B'$ вдоль оси u . В этом случае рассчитываются (блок 3) угловые коэффициенты k_{vu} и k_{hu} . Затем (блоки 4-6) вычисляются координаты $u_{\min}$ и $u_{\max}$ левой и правой проекций вертикальных ребер, пересекаемых $A'B'$, а также координата v первой точки пересечения и высота h отрезка AB над этой точкой. Далее выполняется цикл проверки ребер с проекциями от $u_{\min}$ до $u_{\max}$ (блоки 7-13). В цикле определяется (блок 8) адрес a высоты первой точки ребра, который совпадает с адресом максимальной высоты ячейки, в которую оно попадает. Если высота луча не превышает максимальной высоты в ячейке (блок 9), рассчитывается (блок 10) высота h_s рассматриваемого ребра в точке (u, v) . Если AB проходит ниже ребра (блок 11), фиксируется окклюзия (блок 14) и цикл прерывается. В противном случае рассчитываются (блок 12) координата v следующей точки пересечения и высота h отрезка AB в ней.

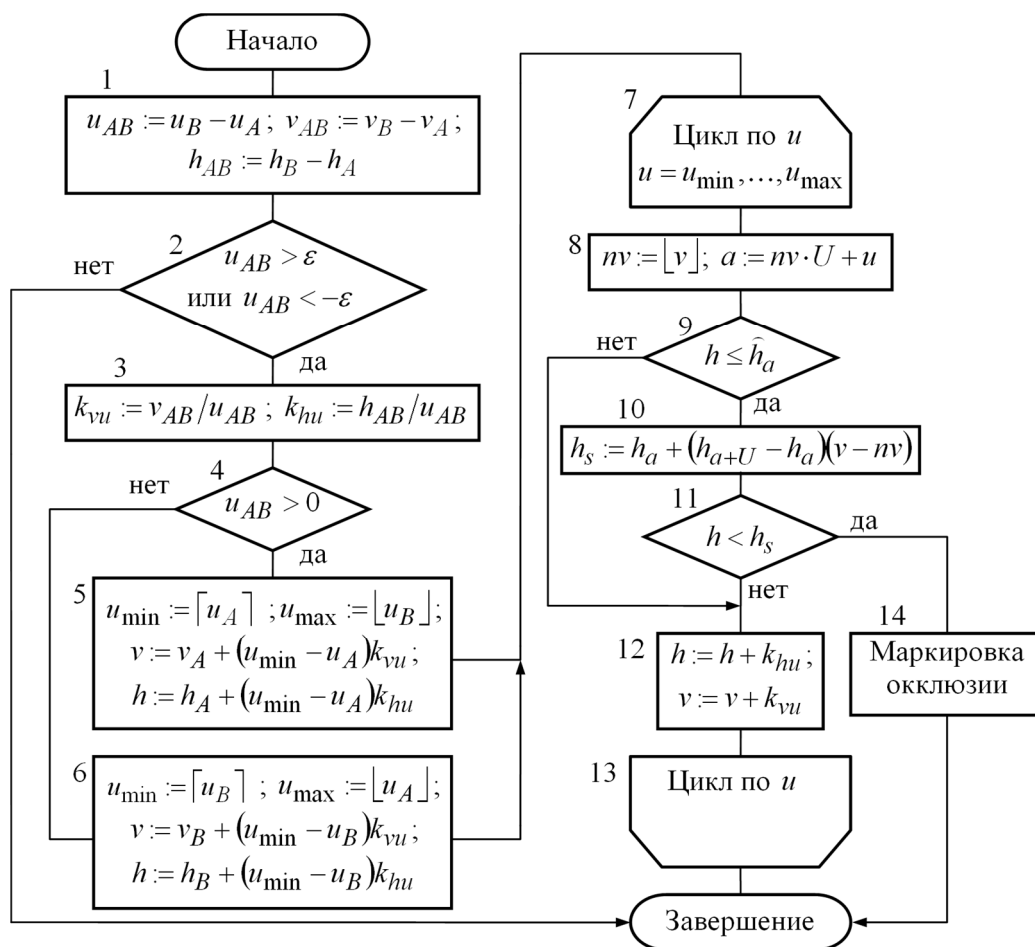


Рисунок 4 – Схема алгоритма проверки взаимного расположения отрезка с вертикальными ребрами поверхности

Figure 4 – Scheme of the algorithm to check relative position of segment with vertical surface edges

Проверка взаимного расположения отрезка AB , аппроксимирующего фрагмент визирного луча, и горизонтальных ребер выполняется аналогично проверке взаимного расположения с вертикальными ребрами. Оси u и v меняются местами, формула для расчета a принимает вид: $a := v \cdot U + nu$.

Для проверки пространственного отношения AB и диагональных ребер введем на плоскости O_{2uv} вспомогательную косоугольную декартову систему координат O_2pq , ось p которой совпадает с осью u системы координат O_{2uv} , а ось q образует с осью u угол 45° (рисунок 5). Масштаб по осям p и q выберем таким образом, чтобы связь между координатами

в O_2pq и O_2uv определялась формулами $p = u - v$, $q = v$. После расчета по этим формулам p_A , q_A , p_B , q_B проверка взаимного расположения AB и диагональных ребер также аналогична проверке взаимного расположения с вертикальными ребрами. Оси u и v меняются на p и q , формула для расчета a принимает вид: $a := nq(U+1) + p$.

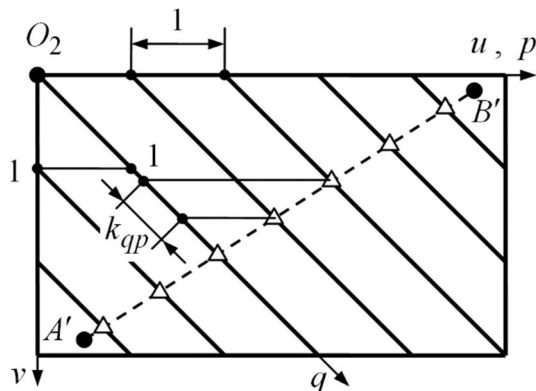


Рисунок 5 – Вспомогательная система координат O_2pq для перебора диагональных ребер

Figure 5 – Auxiliary coordinate system O_2pq for iterating over diagonal edges

На завершающем шаге проверки пересечения поверхности отрезком AB высота в точке B сравнивается с $\tilde{H}(u_B, v_B)$.

Реализация алгоритма

Рассмотренный алгоритм был реализован в виде программы на языке C++. Для оценки быстродействия выполнено ортотрансформирование тестового снимка с последующим обнаружением окклюзий. Размер пикселя выбранного снимка составил 0,79 м, высота спутника в центре снимка $64,5^\circ$. Перепад высот в районе снимка – 2194 м. В качестве цифровой модели местности использована цифровая модель высот SRTM с разрешением 1 угл. с. Обработка выполнена в многопоточном режиме (48 потоков) на сервере с двумя 12-ядерными процессорами Intel Xeon E5-2687W v4 (базовая частота 3 ГГц) под управлением ОС AstraLinux 1.6. Скорость обнаружения окклюзий в ходе обработки составила $149 \cdot 10^6$ пикселей/с, скорость ортотрансформирования в процессе этой же обработки – $642 \cdot 10^6$ пикселей/с (1226 МБ/с).

Доля ошибочно идентифицированных (пропущенных или неверно обнаруженных) закрытых пикселей составила для тестового изображения 0,07 % от общего количества пикселей в области окклюзии. Ошибки идентификации вызваны ошибками кусочно-линейной аппроксимации визирных лучей. Для сравнения при использовании алгоритма трассировки луча с анализом высот [5] доля ошибочно идентифицированных пикселей окклюзии на этом же изображении составила до 8,26 % в зависимости от выбранной картпроекции, а скорость обработки – $236 \cdot 10^6$ пикселей/с. Разработанный алгоритм свободен от недостатков, присущих алгоритму на основе Z-буфера [4], и не приводит к ошибкам из-за отличия масштабов исходного и ортотрансформированного изображений.

На рисунке 6 приведен фрагмент ортофотоснимка, использованный для иллюстрации на рисунке 1. На нем подсвечена область, ошибочно заполненная из-за окклюзии и обнаруженная с использованием предложенного алгоритма.



Рисунок 6 – Результат детектирования окклюзии

Figure 6 – Occlusion detection result

Анализ возможностей возникновения окклюзий при использовании цифровых моделей высот SRTM

На практике в качестве источника данных о высоте поверхности Земли широко применяются цифровые модели высот SRTM [6]. Как правило, они распространяются представленными в геодезической системе координат. Оценим на примере SRTM с шагом пикселей 30 угл. с («SRTM 30"») и 3 угл. с («SRTM 3"»), какие углы съемки и в каких районах Земли могут приводить к окклюзиям при использовании подобных данных. Для этого выполним в декартовой геоцентрической системе координат кусочно-линейную треугольную аппроксимацию рельефа с вершинами в точках, соответствующих центрам пикселей моделей высот. По площадям треугольников и углам их наклона относительно касательных плоскостей к земному эллипсоиду построим гистограмму площадей полученной поверхности Земли с разными углами наклона (рисунок 7). Гистограмма показывает, что ограничение минимальной угловой высоты спутника не гарантирует отсутствия окклюзий при ортотрансформировании. Общая площадь участков с углами наклона свыше 60° составляет 1879 кв. км для SRTM 30" и 18904 кв. км для SRTM 3". Примечание: использованная SRTM 3" не охватывает полярные области и ограничена диапазоном широт от 60° ю.ш. до 60° с.ш.

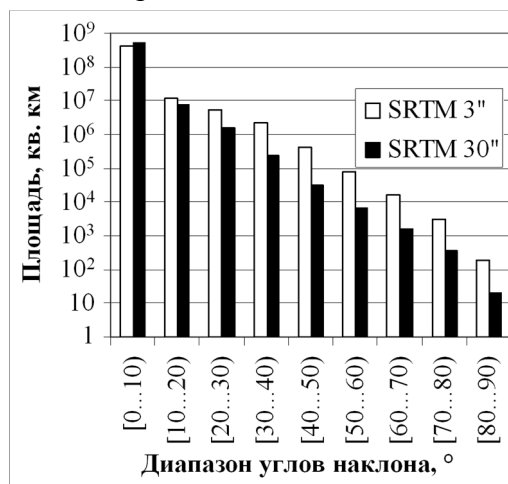


Рисунок 7 – Гистограмма площадей участков поверхности Земли с различными углами наклона

Figure 7 – Histogram of the Earth's surface areas with different inclination angles

Расположение участков поверхности Земли с углами наклона свыше 60° показано на рисунке 8. Как видно из рисунка, такие участки встречаются практически на всех широтах. Вероятность возникновения окклюзий выше для снимков высокогорных и горных районов.

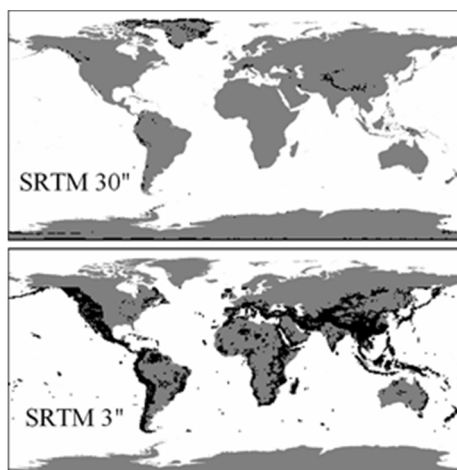


Рисунок 8 – Одноградусные зоны (закрашены черным цветом), в которых возможно возникновение окклюзий при угловой высоте спутника менее 60°
Figure 8 – One-degree zones (filled in black) where occlusions may occur when satellite's angular height is less than 60°

Закключение

Задача обнаружения окклюзий, возникающих в процессе ортотрансформирования, является актуальной. Если угловая высота спутника не превышает 60° , дефекты в виде дублирующихся объектов могут возникать на ортотрансформированных снимках любых широт даже при использовании цифровой модели высот низкой детальности с шагом дискретизации 30 угл. с. С ростом детальности ЦММ риск возникновения окклюзий увеличивается.

Разработанный алгоритм позволяет надежно определять области окклюзий при ортотрансформировании по обратному закону с кусочно-линейной интерполяцией ЦММ. Доля ложно идентифицированных закрытых областей при обработке тестового снимка не превысила 0,07 % от всей площади окклюзий. Подчеркнем, что речь идет о дублирующихся объектах, возникающих в процессе ортотрансформирования. Неправильное перемещение фрагментов исходного снимка в результирующий кадр из-за ошибок ЦММ не является предметом рассмотрения в настоящей статье.

Скорость детектирования окклюзий путем трехэтапного перебора ребер поверхности оказалась на тестовом примере в 4,3 раза ниже скорости ортотрансформирования. Такую скорость обработки можно считать приемлемой для практического применения предложенного алгоритма в рамках технологии создания по данным ДЗЗ стандартных продуктов уровня обработки 2. Это позволяет повысить их качество, гарантируя исключение методических дефектов ортотрансформирования в областях, закрытых при съемке высотными объектами.

Библиографический список

1. Кузнецов А.Е. Системы и технологии обработки аэрокосмической информации // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2012. № 39-2. С. 7-13.
2. ГОСТ Р 59480-2021. Данные дистанционного зондирования Земли из космоса. Уровни обработки данных дистанционного зондирования Земли из космоса. М.: Стандартинформ, 2021.
3. Кузнецов А.Е., Побаруев В.И., Пошехонов В.И., Пресняков О.А. Программный комплекс обработки информации от сканерно-кадровых съемочных систем КА «Канопус-В» и «БКА» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 1. С. 287-300.
4. Ayman F. Habib, Eui-Myoung Kim, Chang-Jae Kim. New Methodologies for True Orthophoto Generation. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 2007, vol. 73, no. 1, pp. 025-036.
5. Ki In Bang, Changjae Kim A New True Ortho-photo Generation Algorithm for High Resolution Satellite Imagery. Korean Journal of Remote Sensing. 2010, vol. 26, no. 3, pp. 347-359.
6. Liping Yang, Xingmin Meng, Xiaoqiang Zhang. SRTM DEM and its application advances. International Journal of Remote Sensing, 32:14, 3875-3896

UDC 528.852.3

THREE-CYCLE SURFACE EDGES ANALYSIS ALGORITHM FOR OCCLUSIONS DETECTION DURING ORTHORECTIFICATION

O. A. Presnyakov, Ph.D. (Tech.), Leading Researcher, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0009-0007-3962-0724, e-mail: foton@rsreu.ru

The aim of the work is to create an algorithm for occlusion detection during orthorectification of satellite images using backward projection. Occlusions are the areas of an orthoimage that are obscured by towering objects. Processing using indirect method leads to incorrect filling of occlusion areas by repeated fragments of an image. According to the developed algorithm, a pixel belongs to obscured if a viewing vector above it intersects with piecewise-linear surface that interpolates digital surface model (DSM). The algorithm includes three cycles of iterating over the edges of this surface. The first cycle processes edges, which projections in DSM coordinate system are located vertically, the second – horizontally, and the third – diagonally. The algorithm provides reliable detection of occlusions without omissions and false identifications.

Keywords: occlusion, orthorectification, backward projection, DSM, intersection of ray and surface, ray tracing, iteration over surface edges, piecewise-linear DSM interpolation, true orthophoto.

DOI: 10.21667/1995-4565-2025-91-148-157

References

1. **Kuznecov A.E.** Sistemy i tekhnologii obrabotki aerokosmicheskoy informacii. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2012, no. 39-2, pp. 7-13. (in Russian).
2. **GOST R 59480-2021.** Dannye distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. Urovni obrabotki dannyh distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. Moscow: Standartinform. 2021.
3. **Kuznetsov A.E., Pobaruiev V.I., Poshekhonov V.I., Presnyakov O.A.** Programmnyj kompleks obrabotki informacii ot skanerno-kadrovyyh s'emochnyh sistem KA «Kanopus-V» i «BKA». *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2014, vol. 11, no. 1, pp. 287-300. (in Russian).
4. **Ayman F. Habib, Eui-Myoung Kim, Chang-Jae Kim.** New Methodologies for True Orthophoto Generation. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2007, vol. 73, no. 1, pp. 025-036.
5. **Ki In Bang, Changjae Kim** A New True Ortho-photo Generation Algorithm for High Resolution Satellite Imagery. *Korean Journal of Remote Sensing*. 2010, vol. 26, no. 3, pp. 347-359.
6. **Liping Yang, Xingmin Meng, Xiaoqiang Zhang.** SRTM DEM and its application advances. *International Journal of Remote Sensing*, 32:14, 3875-3896.