



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 207 за 2018 г.



ISSN 2071-2898 (Print)
ISSN 2071-2901 (Online)

Новоторцев Л.В., Волобой А.Г.

Улучшенный метод
перебора плоскостей при
реконструкции строений по
аэрофотоснимкам

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Новоторцев Л.В., Волобой А.Г. Улучшенный метод перебора плоскостей при реконструкции строений по аэрофотоснимкам // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2018. № 207. 12 с. doi:[10.20948/prepr-2018-207](https://doi.org/10.20948/prepr-2018-207)
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2018-207>

**Ордена Ленина
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В.Келдыша
Российской академии наук**

Л.В. Новоторцев, А.Г. Волобой

**Улучшенный метод
перебора плоскостей
при реконструкции строений
по аэрофотоснимкам**

Москва — 2018

Новоторцев Л.В., Волобой А.Г.

Улучшенный метод перебора плоскостей при реконструкции строений по аэрофотоснимкам

В рамках проблемы оцифровки рельефа местности нередко возникает необходимость решения задач, связанных с обнаружением и трехмерной реконструкцией строений. Большинство алгоритмов, применяющихся для решения этой задачи, опираются на общие подходы и, как следствие, неэффективны либо по точности, либо по времени работы. В данной работе предлагается использовать модификацию одного из специализированных подходов: метода перебора плоскостей. В результате предложенного улучшения процесс реконструкции ускоряется в несколько раз, оставаясь при этом соизмеримым по качеству.

Ключевые слова: аэрофотоснимки, трехмерная реконструкция, компьютерное зрение, оцифровка рельефа местности

Leonid Vladimirovich Novotortsev, Alexey Gennadievich Voloboy

Improved method of the plane-sweep strategy in the task of building reconstruction from aerophotographs

The tasks of detection and three-dimensional reconstruction of buildings are to be often solved as part of the terrain digitizing problem. Most of the algorithms used to solve this problem are too general and, as a result, are ineffective either in accuracy or in terms of operation time. In this paper we propose to use a modification of the plane-sweep strategy method. As a result of the proposed improvement, the reconstruction process is accelerated several times, while providing comparable quality.

Keywords: aerophotographs, 3d reconstruction, computer vision, terrain digitization

Оглавление

Введение	3
Обзор существующих методов	3
Описание предложенного метода	6
Результаты и выводы	9
Библиографический список.....	11

Введение

Одна из основных задач фотограмметрии — оцифровка рельефа и местности с использованием изображений, полученных при аэрофотосъемке, космосъемке или съемке беспилотными летательными аппаратами (БПЛА). В свою очередь, в рамках задачи оцифровки рельефа и местности часто возникает необходимость оцифровки строений, в частности, выделения их на снимках и построения трехмерных моделей этих строений. Данная задача часто решается в рамках автоматического создания или обновления электронных карт, где наличие трехмерных моделей значительно увеличивает наглядность продукта и упрощает чтение карты.

Другая сфера, где рассматриваемая задача активно используется, — это анализ застройки. К примеру, такой анализ необходим для поиска выгодных мест для новой застройки и дальнейшей ее продажи. Также анализ застройки может использоваться в природоохранных целях для обнаружения нелегальной или опасной застройки.

Характерной особенностью рассматриваемой задачи является большой объем исходных данных. В некоторых случаях размер изображений достигает нескольких гигабайтов, а количество изображений в рамках одного проекта оцифровки может исчисляться тысячами. Ручная обработка такого объема данных стоит очень дорого и занимает огромное количество времени. Ситуация осложняется быстрым развитием технологий. На данный момент все большее распространение получает съемка с помощью БПЛА, что приводит к удешевлению процесса съемки и, в свою очередь, приводит к быстрому увеличению объема информации. Все это, так же как и быстрая потеря актуальности данных, говорит об острой необходимости автоматизации процесса оцифровки, который в описанных условиях становится не просто очень дорогим, а практически невыполнимым. Поэтому использование автоматических методов обработки аэрофотографических данных является на данный момент актуальным.

Основной проблемой автоматических методов является тот факт, что они уступают по точности. В настоящее время существует большое количество методов, направленных на оцифровку и восстановление трехмерных моделей сцен. Однако большинство этих методов неэффективны для решения задачи трехмерной реконструкции строений из-за своей общности. По этой причине лучше использовать специализированные методы решения этой задачи. Но поскольку эти методы также уступают по качеству ручной обработке, то остается необходимость в их модификации и развитии. Исследованию этой проблемы посвящена данная работа.

Обзор существующих методов

Основные распространенные методы трехмерной реконструкции можно разделить на группы по типу используемых данных, как представлено на Рис. 1.

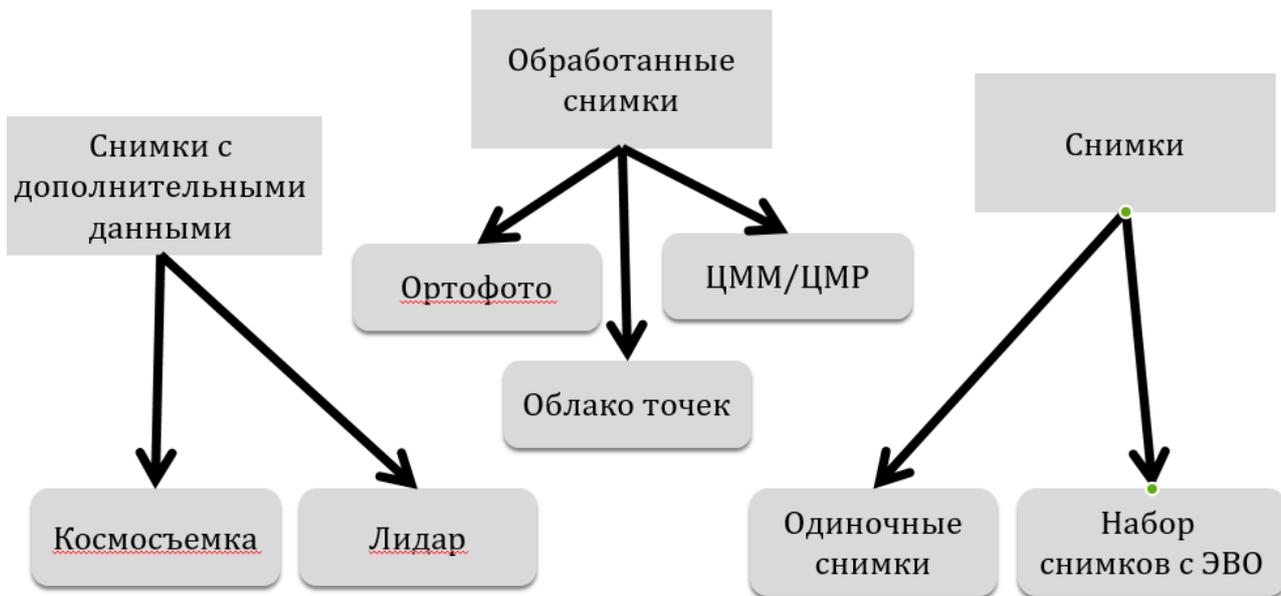


Рис. 1. Разделение методов трехмерной реконструкции по группам.

Космические снимки — собирательное название данных, получаемых с помощью космических аппаратов в различных диапазонах электромагнитного спектра. Полученные данные в дальнейшем визуализируются по определенному алгоритму. Одним из принципиальных отличий космической съемки является сканерный принцип получения снимка. Из-за этого элементы внешнего ориентирования поставляются не на целый снимок, а на каждую строку снимка.

Несмотря на то что алгоритмы, ориентированные на работу с "сырыми" растрами, часто применяют и для космоснимков, существует отдельная группа алгоритмов, связанных непосредственно с их обработкой. Это связано как со спецификой получения космоснимков (сканерная съемка), так и с дополнительными данными, такими как элементы внешнего ориентирования, дополнительные каналы изображений и т.д. Кроме того, спутниковая съемка предоставляет снимки крайне высокого разрешения, что также нередко используется.

Алгоритмы, относящиеся к данной категории, имеют довольно высокое качество обнаружения (точность достигает 84%), но из-за малой доступности качественных космоснимков их применение ограничено, хотя и в меньшей степени, чем алгоритмов, использующих данные лидара.

Реконструкция на основе данных лидара. Лидар (LIDAR англ. Light Identification Detection and Ranging — обнаружение, идентификация и определение дальности с помощью света) — технология получения и обработки информации об удаленных объектах с помощью активных оптических систем, использующих явления поглощения и рассеяния света в

оптически прозрачных средах [8, 15]. Реконструкция сцены с использованием этих данных значительно облегчена, поскольку сами данные уже содержат информацию о высоте в каждой точке. Недостатком использования данного типа данных для реконструкции строений является большая стоимость оборудования и полета. Несмотря на большую вариативность методов, опирающихся на использование данных лидара [12] (в том числе и построение облака точек), их общий недостаток — стоимость, сильно ограничивающая их применение. По этой причине их более подробное рассмотрение выходит за рамки представленной работы.

Построение модели по облаку точек. Создание облака точек является довольно сложной задачей, требующей больших вычислительных затрат, которые значительно увеличиваются при отсутствии хорошей калибровки изображений. Результат, получаемый этим методом, представляет собой высокоточную реконструкцию сцены [7].

К его недостаткам можно отнести очень медленную скорость работы и необходимость дополнительного анализа полученной трехмерной сцены для выделения из нее строений, что еще больше увеличивает вычислительные затраты методов, основанных на подобном подходе. Сочетание представленных недостатков с тем фактом, что задача выделения строений по уже построенной трехмерной модели является нетривиальной, делает данный подход неоптимальным в рамках рассматриваемой задачи, несмотря на высокую распространенность его для решения задач, связанных с реконструкцией сцен по нескольким снимкам.

Цифровая модель местности, ЦММ (digital terrain model, DTM) – синоним: математическая модель местности, МММ – цифровое представление пространственных объектов, соответствующих объектовому составу топографических карт и планов, используемое для производства цифровых топографических карт.

Ортофотоплан. Одним из основных продуктов, получаемых на выходе цифровых фотограмметрических систем (ЦФС), является ортофотоплан. При их построении на исходных снимках корректируются геометрические искажения, связанные с параметрами камеры, наклоном оптической оси, рельефом местности и т. п. Результат такого ортотрансформирования в виде единого непрерывного растра или набора листов представляется в какой-либо картографической проекции.

Использование таких данных, как ЦММ или ортофото значительно увеличивает как точность нахождения строений, так и упрощает восстановление трехмерной модели. Точность этих подходов достигает 85%-87% [9]. Однако надо понимать, что ЦММ и ортофото изначально получаются в результате крайне ресурсоемкой обработки изображений (аэрофотоснимков в частности). Это влияет либо на доступность исходных данных в случае работы с уже готовым ортофото и ЦММ, либо на время работы алгоритма. Получение ортофото может занимать часы или даже сутки для реальных данных [16].

ЦММ более доступны, и алгоритмы ее получения менее ресурсоемкие, но все равно занимает часы на современных компьютерах [10].

Построение по выделенным отрезкам. Данный метод подразумевает предварительный анализ каждого из снимков, выделение отрезков и последующее их сопоставление [3]. Этот подход обладает большой гибкостью и скоростью. Более того, поскольку строения в своем большинстве имеют линейные черты, то объекты, выделенные данным подходом, в основном будут являться строениями. Дополнительный фильтр с использованием таких простых метрик, как размер объектов, почти полностью исключает ложные срабатывания. Это существенно облегчает одну из частей поставленной задачи: обнаружение строений.

Также стоит отметить, что в большинстве случаев аэрофотоснимки поставляются с данными элементов внешнего ориентирования (ЭВО), которые используются для построения первого приближения сопоставления снимков. Далее по тексту предполагается, что ЭВО предоставлены и используются. Методы, основанные на данном походе, уступают по точности реконструкции тем, что основываются на построении облака точек, но выигрывают по скорости работы (они до 30 раз быстрее) [5]. Эти преимущества являются крайне важными в рамках задачи реконструкции и обнаружения строений по аэрофотоснимкам.

Одним из наиболее распространенных подходов, относящихся к представленной группе, является метод перебора плоскостей [3] и его модификация [14]. Данный алгоритм дает высокую точность обнаружения, но работает значительно медленнее подобных алгоритмов. Представленная работа посвящена разработке метода ускорения рассматриваемого подхода без значительной потери точности.

Описание предложенного метода

Как уже упоминалось выше, данный подход состоит из следующих этапов:

1. выделение отрезков на каждом изображении;
2. связывание соседних отрезков;
3. сопоставление отрезков;
4. предварительное построение плоскостей;
5. валидация и уточнение плоскостей;
6. построение результата.

Из приведенных этапов пункты 3 и 5 являются новыми алгоритмами, описанными ниже, этап 4 является существенно модифицированным алгоритмом перебора плоскостей. Остальные этапы либо являются темой отдельного исследования (пункты 1 и 2), либо существенно не отличаются от аналогичных этапов существующего метода перебора плоскостей (пункт 6).

Выделение отрезков. Рассматриваемый алгоритм сильно зависит от результата операции выделения отрезков. Несмотря на то что в рамках представленного метода пропущенные и разорванные отрезки частично компенсируются при реконструкции, пропуск слишком большого числа отрезков может привести к существенному ухудшению результата. По этой причине предлагается использовать алгоритм LSD [6] или алгоритмы, основанные на нем.

Связывание соседних отрезков. Помимо дефектов описанного типа (пропущенные и разорванные отрезки), при выделении отрезков также нередко возникают дефекты, связанные с потерей связи между отрезками. Для их устранения проводятся дополнительные операции по связыванию отрезков в ломаные для каждого из снимков (Рис. 2).

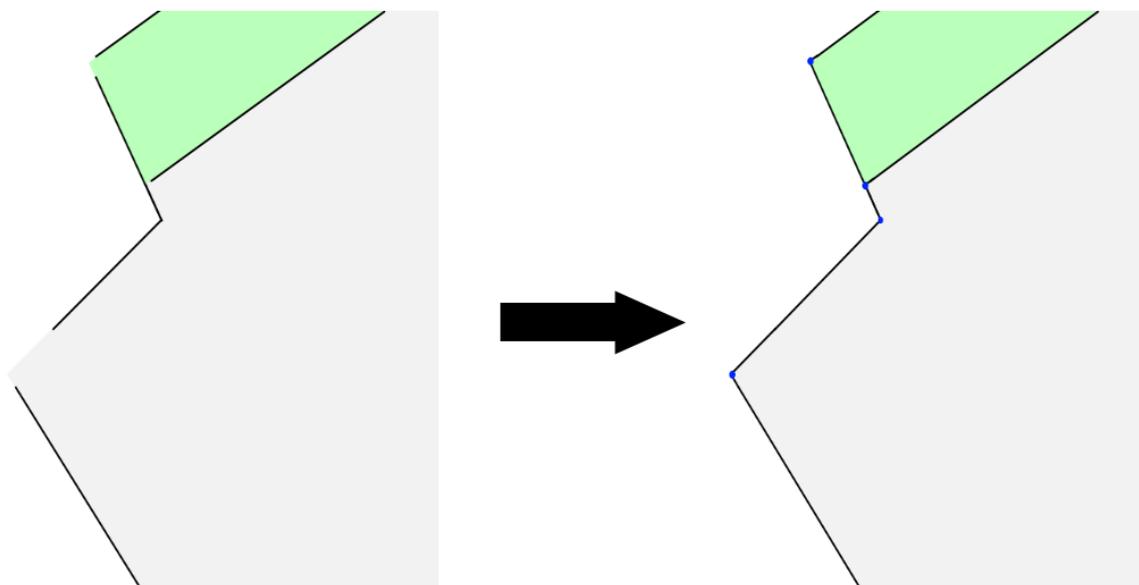


Рис. 2. Объединение отрезков в ломаную.

Для этого предлагается продолжить проверяемые отрезки прямыми и вычислить точку пересечения прямых. Далее выполняется проверка расстояния, на которое необходимо продолжить отрезки до пересечения. Для этого определяются входные параметры: нижний и верхний порог для отбраковки. Величина этих параметров определяется масштабом и качеством снимков, а также характером объектов на снимках (плотностью и размером строений). Если расстояние от концов отрезков до точки пересечения меньше нижнего порога, то отрезки продлеваются без дополнительных проверок. Если это расстояние больше верхнего порога, то никаких операций не требуется. В противном случае, если расстояние больше нижнего порога, но меньше верхнего, то выполняется дополнительный анализ поля градиентов в той области, в которой должно проходить продление отрезка до точки пересечения [1].

Также важно отметить, что в случае, если точка пересечения продленных отрезков находится на одном из них, то отрезок разбивается на два и в дальнейших вычислениях воспринимается как два отрезка.

Сопоставление отрезков. После того как отрезки были выделены на каждом из изображений, необходимо выполнить их сопоставления: связывание отрезков на разных снимках, соответствующих одним и тем же граням объектов на сцене. Данный этап оказывает существенное влияние на итоговый результат. По этой причине необходимо использовать алгоритмы, обеспечивающие высокую точность сопоставления, к примеру SIFT [13] или ORB [11].

Данные о связывании соседних отрезков, полученные на предыдущем этапе, также могут использоваться для ускорения сопоставления. Связи между отрезками можно использовать в качестве подсказок: связанные (пересекающиеся) отрезки имеет смысл сопоставлять со связанными отрезками на другом снимке [2].

Предварительное построение плоскостей. На данном этапе в методе перебора плоскостей предлагается для каждого отрезка перебирать все плоскости, образуемые им (все углы поворота вокруг отрезка). Далее на проекции плоскости на снимок выбираются точки интереса и сопоставляются с соответствующими точками на других снимках (соответствующие точки находятся за счет преобразования проекции плоскости с одного снимка на другой при использовании информации об ориентировании снимков) [3].

Данная операция дает точные результаты, но полный перебор плоскостей занимает слишком много времени (минуты), особенно если использовать маленький шаг дискретизации угла [3], и является самым длительным этапом алгоритма (до 50% вычислительного времени). Далее считаем, что отрезки перебираются от самого длинного в порядке убывания. В данной работе предлагается решать проблему ресурсозатратности этой части алгоритма при помощи информации о связанных отрезках.

Далее для определенности будем называть отрезок, относительно которого вращаем полуплоскость, — отрезком-осью. Связанный с ним отрезок — отрезком-предположением. Используя данные о связи сопоставленных отрезков, можно сделать оценку угла наклона полуплоскости относительно отрезка-оси и применять метод перебора плоскостей в окрестности угла, определяемого связанным отрезком. Два отрезка, естественно, однозначно определяют полуплоскость, но из-за погрешностей и ошибок сопоставления исключительно на это полагаться нельзя. Диапазон перебора углов относительно предположительного угла и шаг перебора являются входными параметрами алгоритма и определяются качеством снимков и характером объектов, изображенных на них.

Если брать отрезок-предположение как есть, то велика вероятность, что из-за ошибок сопоставления реконструкция полуплоскости для рассматриваемых отрезков — оси и предположения — не будет найдена. По этой причине для

нахождения начального приближения полуплоскости используются трехмерные координаты точки пересечения отрезков и дальнего конца отрезка-предположения. Также стоит учитывать, что предположение может оказаться ложным и искомой полуплоскости не существует. Это определяется слабой корреляцией точек интереса при использовании алгоритма перебора плоскостей.

Если у рассматриваемого отрезка есть несколько связанных с ним отрезков, то описанная выше процедура применяется для каждого из них.

Валидация и уточнение плоскостей. На предыдущем этапе были получены полуплоскости с большой точностью. Однако есть возможность ее увеличить. Для этого рассматриваются отрезки, находящиеся на проекции плоскости на изображения. Из этих отрезков отфильтровываются короткие для исключения шума и деталей крыши (обычно достаточно фильтровать все отрезки короче трех метров в трехмерном пространстве, но конкретная величина зависит от качества и вида снимков). Далее отфильтровываются отрезки, расстояние концов которых до плоскости превышает погрешность при построении. Данная величина высчитывается на основе шага угла при переборе плоскостей и размера рассматриваемого отрезка: расстояние от одного из концов отрезка до плоскости при его отклонении от нее на угол, равный шагу перебора. Также не рассматриваются отрезки, находящиеся дальше удвоенного размера отрезка-оси.

Из оставшихся отрезков выбираются не более десяти имеющих наименьшее отклонения. И по трехмерным координатам концов отрезков проводится линейная регрессия для уточнения плоскости. Данная операция сходится быстро благодаря точному начальному приближению, полученному на предыдущем этапе.

Построение результата. На данном этапе предлагается использовать аналогичный этап метода перебора плоскостей без существенных изменений. Суть этого этапа заключается в ограничении полуплоскостей отрезками, лежащими на них, и выделении новых граней за счет пересечения полуплоскостей.

Также на этом этапе проходит фильтрация объектов по таким параметрам, как размер (отсеиваются машины, гаражи), высота объектов и их протяженность (отсеиваются дороги и поля).

Результаты и выводы

На рис. 3 представлен пример результата работы представленного метода. На нем видно, что представленный алгоритм отлично справляется с реконструкцией строений со сложной структурой (верхние правые дома). Однако из-за того, что основой для построения плоскостей служат отрезки, плоские крыши восстанавливаются с дефектами (левое нижнее здание).

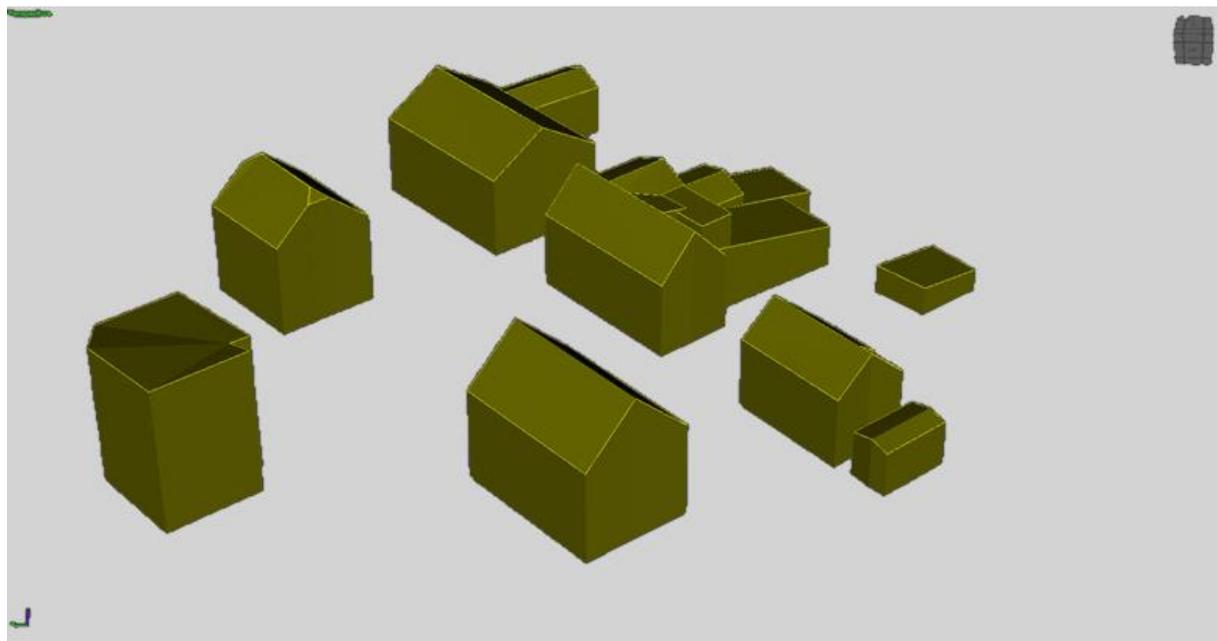


Рис. 3. Пример построения трехмерной сцены по набору снимков.

В таблице 1 приведены данные сравнения представленного метода с методом перебора плоскостей и с методом [4], основанном на использовании облака точек. Эти методы также были реализованы авторами данной работы для сравнения со своим алгоритмом.

Данные приведены для набора из 6 фрагментов снимков размером 1028x891x24. Сцена, представленная на изображениях, содержит 8 строений.

Из результатов, приведенных в таблице 1, следует, что представленный метод работает быстрее, чем метод перебора плоскостей, и предоставляет точность, не уступающую этому методу. Однако описанный алгоритм уступает более точному алгоритму, использующему облако точек. Данная разница объясняется компромиссом между точностью и скоростью работы.

Таблица 1

**Сравнение представленного метода с существующими
по точности построения**

Метрика	Метод Baillard'00	Метод Dahlke'15	Представленный метод
Точность по плану (пикс)	0.89	0.68	0.81
Точность по высоте (пикс)	2.98	2.01	2.76
Время (сек)	68	236	26

Ввиду особенностей работы представленного метода, все объекты, построенные в процессе, классифицируются как строения. По этой причине данный метод можно рассматривать как метод поиска строений. В таблице 2 представлены сравнение точности и времени работы представленного метода с существующими, в частности с [3] и [9].

Таблица 2

**Сравнение представленного метода с существующими
по точности обнаружения**

Метрика	Метод Baillard'00	Метод Peng'16	Представленный метод
Точность	0.91	0.82	0.88
Полнота	0.96	0.86	0.94
F-мера (F_1)	0.93	0.84	0.91

В данной таблице использовалась метрика точность-полнота. Эти параметры вычисляются по формулам (1)-(3), где TP (true positive) – количество верных обнаружений, FP (false positives) – количество неверных обнаружений, а FN (false negative) – количество необнаруженных объектов.

$$\text{Точность} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (1)$$

$$\text{Полнота} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2)$$

$$F_1 = 2 \times \frac{\text{Точность} \times \text{Полнота}}{\text{Точность} + \text{Полнота}} \quad (3)$$

Из представленной таблицы видно, что предложенный метод уступает по точности методу перебора плоскостей, но по-прежнему превосходит метод, опирающийся на более точные данные (лидар и ортофото).

Библиографический список

1. Новоторцев Л.В., Волобой А.Г. Автоматическое распознавание зданий на аэрофотоснимках // Труды 16-ой международной конференции CAD/CAM/PDM-2016 "Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта". — 2016. — С. 68-72.
2. Волобой А.Г., Новоторцев Л.В. Сопоставление областей на аэрофотоснимках в задаче распознавания строений // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. Материалы двадцать первого научно-практического семинара. — 2018. — С. 17-23.

3. Baillard C., Zisserman A. A plane-sweep strategy for the 3D reconstruction of buildings from multiple images // International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. — 2000. — Vol. 33(B2). — P. 56-62.
4. Dahlke D., Linkiewicz M., Meissner H. True 3D building reconstruction: façade, roof and overhang modelling from oblique and vertical aerial imagery // International Journal of Image and Data Fusion. — 2015. — Vol. 6(4). — P. 314-329.
5. Dahlke D., Linkiewicz M. Comparison between two generic 3d building reconstruction approaches — point cloud based vs. image processing based // International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. — 2016. — Vol. 41(B3) — P. 599-604.
6. von Gioi R. G. et al. LSD: A fast line segment detector with a false detection control // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. — 2010. — Vol. 32(4). — P. 722-732.
7. Malihi S. et al. 3D Building Reconstruction Using Dense Photogrammetric Point Cloud // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Prague, Czech Republic. — 2016. — Vol. 3. — P. 71-74.
8. Middleton W. E. K, Spilhaus A. F., Meteorological instruments, University of Toronto, 3rd ed. 1953.
9. Peng D., Zhang Y. Building Change Detection by Combining LiDAR Data and Ortho Image // ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2016. P. 669-676.
10. Pepe M., Prezioso G. Two approaches for dense DSM generation from aerial digital oblique camera system // Proceedings of the 2nd International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management, Rome, Italy, 2016. P. 26-27.
11. Rublee E. et al. ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF // 2011 IEEE international conference on Computer Vision (ICCV). — 2011. — P. 2564-2571.
12. Wang R., Peethambaran J., Chen D. LiDAR Point Clouds to 3-D Urban Models : A Review // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. — 2018. — Vol. 11(2). — P. 606-627.
13. Wang X., Fu W. Optimized SIFT image matching algorithm // IEEE International Conference on Automation and Logistics. — 2008. — P. 843-847.
14. Wang Y. C. et al. 3D Reconstruction of Piecewise Planar Models from Multiple Views Utilizing Coplanar and Region Constraints // Journal of Information Science and Engineering. — 2013. — Vol. 29(2). — P. 361-378.
15. Wu B. et al. A graph-based approach for 3D building model reconstruction from airborne LiDAR point clouds // Remote Sensing. — 2017. — Vol. 9(1). — P. 92.
16. Zhou G., Wang Y. Occlusion detection for urban aerial true orthoimage generation // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2016. P. 3009-3012.