



Обеспечение безопасности перевозок с помощью средств дистанционного зондирования



Сергей ИВАШОВ
Sergey I. IVASHOV

Александр БУГАЕВ
Alexander S. BUGAEV



Александр ТАТАРАИДЗЕ
Alexander B. TATARAIDZE

Алексей СКРЕБКОВ
Alexey V. SKREBKOV



Enhancement of Transportation Safety by Remote Sensing Devices

(текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 188)

Повышение безопасности железнодорожных перевозок в условиях растущих скоростей и интенсивности движения составов и при наличии террористической угрозы требует внедрения новых технических средств наблюдения и контроля. Особую задачу представляет разработка мер предотвращения аварий и катастроф, а также ликвидации их последствий. Применение средств дистанционного зондирования Земли, позволяющих оперативно получать информацию с больших площадей и с высоким разрешением, может оказать существенную помощь в этой сфере. В статье рассматриваются варианты спутников и дистанционно-пилотируемых летательных аппаратов, получающих информацию в различных диапазонах электромагнитного спектра. Анализируются их достоинства и недостатки, возможности совместного использования.

Ключевые слова: безопасность, железнодорожные перевозки, дистанционное зондирование Земли, спутники, дистанционно-пилотируемые летательные аппараты, аэрофотосъёмка, радиолокационное зондирование, обработка изображений.

Ивашов Сергей Иванович – кандидат технических наук, начальник лаборатории дистанционного зондирования МГТУ имени Н. Э. Баумана, Москва, Россия.

Бугаев Александр Степанович – академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой МФТИ (ГУ), Москва, Россия.

Татараидзе Александр Бидзинович – кандидат технических наук, младший научный сотрудник лаборатории дистанционного зондирования МГТУ имени Н. Э. Баумана, Москва, Россия.

Скребков Алексей Валентинович – кандидат технических наук, доцент кафедры электропоездов и локомотивов РУТ (МИИТ), Москва, Россия.

В научных публикациях последних лет [1–7] достаточно детально показаны возможные области применения дистанционно-пилотируемых летательных аппаратов (ДПЛА) и других средств дистанционного зондирования, включая спутники землеобзора, для обеспечения безопасности железнодорожных перевозок.

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) является методом получения информации об объекте или явлении без непосредственного физического контакта с самим объектом, например, воздушных или космических носителей. Такая информация может быть получена в различных диапазонах электромагнитных волн, но



а)



б)

Рис. 1. Общий вид ДПЛА вертолётного типа: а) в полёте с фотокамерой, установленной в карданном подвесе; б) оператор с пультом управления.

могут регистрироваться и другие виды излучения и параметры: радиационные, гравитационные, измерения рельефа местности и т.п. Методы зондирования делятся на пассивные (используются естественное отражённое или вторичное тепловое излучение объектов на поверхности Земли, обусловленное солнечной активностью) и активные (используют вынужденное излучение объектов, инициированное искусственным источником направленного действия, например, радиолокатором или лазером). В зависимости от решаемой задачи следует применять тот или иной тип носителя аппаратуры и её состав.

Статья посвящена исследованию возможности комбинированного использования различных источников информации.

ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ ДПЛА

Если раньше ДПЛА использовались исключительно в военных целях, то в настоящее время именно их гражданское применение становится все более актуальным. Первоначальный интерес военных, возникший в конце 1960-х годов, диктовался стремлением избежать риска жизни для экипажей при выполнении разведывательных полётов, а также при нанесении ударов по разведанным целям. Недостатком тех летательных аппаратов была необходимость возвращения на свою территорию после выполнения полётного задания для проявления отснятой фотоплёнки и дешифровки полученного

материала. Это снижало оперативность получения информации.

В дальнейшем наиболее успешно разработка ДПЛА развивалась в Израиле (тактические и оперативно-тактические аппараты) и США (оперативно-тактические и стратегические ДПЛА). Прогресс в разработке нового их поколения связан в первую очередь с появлением цифровых устройств, включая фотоаппараты, работающие в различных диапазонах длин волн, спутниковых средств навигации и спутниковых средств связи. Это значительно улучшило характеристики бортовой аппаратуры, прежде всего массогабаритные, и позволило улучшить лётные качества ДПЛА.

Для современных ДПЛА гражданского назначения характерны более низкая стоимость эксплуатации и отсутствие необходимости использования стационарных аэродромов (как правило, их запуск осуществляется с передвижных катапульт или прямо с руки оператора). Особенный прогресс был достигнут в разработке много-роторных аппаратов вертолётного типа с электрической тягой. Они отличаются простотой конструкции и дешевизной. Это объясняется отсутствием такого неотъемлемого для обычных вертолётов конструктивного элемента, как автомат перекоса лопастей, и использованием асинхронного управления тягой электрических двигателей, позволяющего контролировать перемещение аппарата в полёте. Шестироторный ДПЛА, изображённый на рис. 1, был использован для получения изображений инфраструктуры экспери-



ментального кольца ВНИИЖТ в Щербинке. Ещё одним достоинством данного типа ДПЛА является то обстоятельство, что их применение в полосе отчуждения железной дороги и на высотах менее 100 м не требует специальных разрешений на полёты.

Недостатком многороторных ДПЛА считается относительно небольшое время полёта (как правило, менее 1 часа) и, следовательно, связанные с этим ограничения по дальности и высоте полёта. Однако сам тип летательных аппаратов крайне удобен, когда оператор, управляющий их полётом, находится непосредственно на месте события или недалеко от него. В этом случае информацию о происходящем на земле можно получать в реальном масштабе времени, что необходимо, например, при ликвидации последствий железнодорожной катастрофы. Увеличение времени полёта может быть достигнуто за счёт сменных аккумуляторов во время промежуточных посадок, хотя ограничение по радиусу действия остаётся, и оно существенно.

АНАЛИЗ СПУТНИКОВЫХ РЕСУРСОВ

Если в 60-е и 70-е годы прошлого века основными потребителями спутниковой информации (фото- и радиолокационной разведки) были военные, а сама информация носила секретный характер, то в последние десятилетия значительный сегмент потребителей составляет весьма прибыльный гражданский сектор. В первую очередь к задачам, решаемым спутниками землеобзора, можно отнести:

- исследование природных ресурсов и рациональное природопользование;
- предсказание, анализ протекания, контроль за возникновением чрезвычайных ситуаций и ликвидация их последствий;
- геологоразведка;
- прогноз погоды;
- контроль за окружающей средой и источниками её загрязнения;
- сельское хозяйство;
- лесное хозяйство;
- строительство и ещё многие другие отрасли.

При дистанционном зондировании со спутников производится регистрация из-

лучения поверхности Земли в различных диапазонах электромагнитных волн. Как правило, используются многоспектральная фотосъёмка и радиолокаторы бокового обзора. В некоторых случаях при геодезической съёмке для измерения рельефа поверхности применяется излучение лазера. Данные ДЗЗ, полученные с космического аппарата, оснащённого фотоаппаратурой видимого диапазона, характеризуются большой степенью зависимости от прозрачности атмосферы и времени суток. Поэтому для снятия этих ограничений получили развитие спутники ДЗЗ, оснащённые радиолокаторами бокового обзора. Радиолокационные снимки имеют худшее разрешение по сравнению с оптическими, но дают возможность получать изображения независимо от погоды и времени суток, что имеет принципиальное значение, например, для проводки судов по Севморпути в период полярной ночи.

В настоящее время спутники ДЗЗ составляют наряду со спутниками связи и навигации значительный сегмент коммерческих услуг космической индустрии. Часто спутники ДЗЗ создаются организациями, связанными с военно-промышленным комплексом своих стран, что позволяет снизить затраты на их разработку за счёт преемственности конструктивных решений со спутниками военного назначения.

Обычно спутники ДЗЗ запускаются на так называемую солнечно-синхронную орбиту (иногда именуемую гелиосинхронной), которая обладает такими параметрами, что спутник, находящийся на ней, проходит над любой точкой земной поверхности приблизительно в одно и то же местное солнечное время. Таким образом, угол освещения земной поверхности будет приблизительно одинаковым на всех проходах спутника. Постоянные условия освещения очень хорошо подходят для спутников, получающих оптические изображения земной поверхности (в том числе спутников дистанционного зондирования земли, метеоспутников). Параметры солнечно-синхронных орбит лежат в пределах: высота над поверхностью земли 600–800 км, период обращения 96–100 мин, а наклон орбиты около 98°.

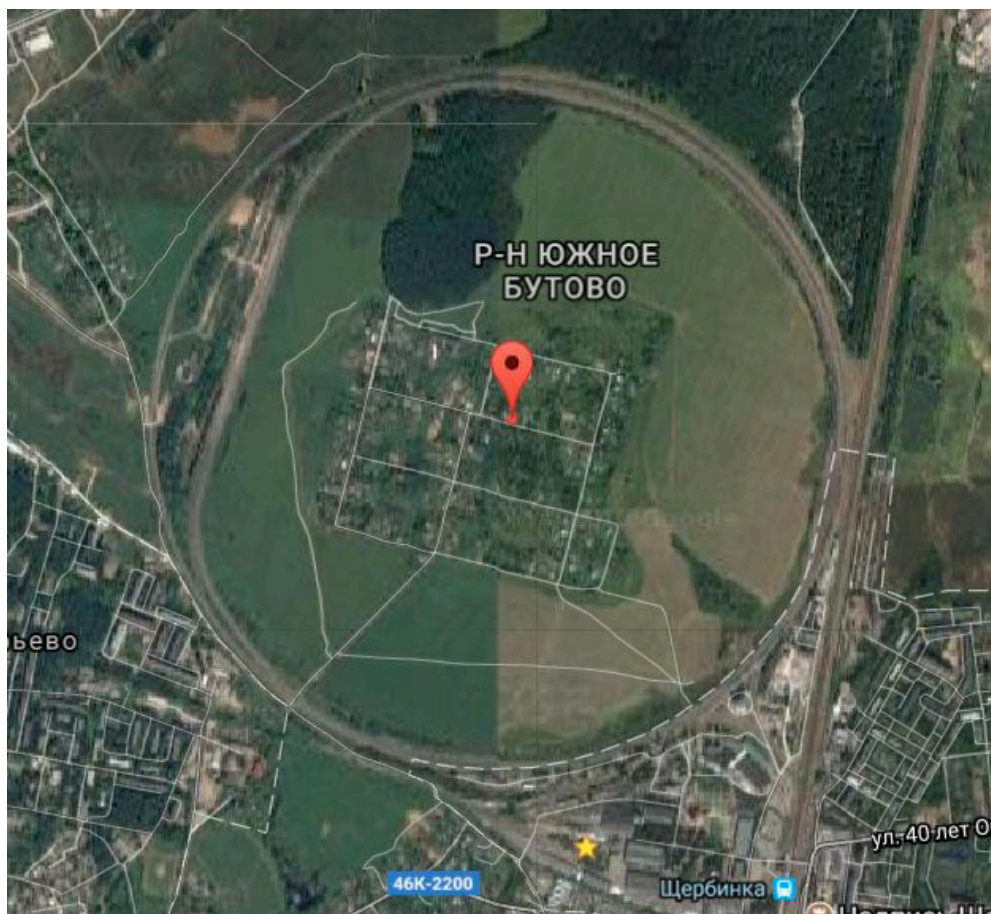


Рис. 2. Изображение ЭК ВНИИЖТ из базы данных Google Maps.

Основным достоинством оптических спутников ДЗЗ является возможность получения снимков с высоким разрешением, которое может достигать 0,3 м.

В то же время эти спутники не всепогодные, т.е. не могут получать изображение ночью или на местности, закрытой облачностью. Если первый недостаток ещё может быть потенциально устранён, например, при использовании инфракрасной оптики, то облачность, которая в средних широтах зимой может скрывать землю неделями, а порой и месяцами, делает невозможным использование оптических спутников.

Всепогодными являются спутники радиолокационной разведки местности, хотя они и обладают худшим разрешением. При этом радиолокация даёт дополнительные возможности, например, получение изображений в различных поляризациях.

БАЗЫ ДАННЫХ СПУТНИКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

Результаты спутниковой фотосъёмки получили широкое распространение благодаря общедоступности и простоте работы с ними, например, посредством Интернета. Спутниковые снимки и карты на их основе используются даже для решения бытовых задач, в том числе для навигации личных автомобилей или вызова такси.

Бесплатные сервисы космической информации хотя и обладают достаточно высоким разрешением, но не позволяют получать оперативную информацию, она обновляется там довольно редко. Фотоизображения для сайтов обычно получают по результатам съёмки в тёплое время года, при отсутствии снежного покрова. Такие изображения могут быть использованы для некоторых видов аналитической работы, но не дают актуальную информацию об интересующем событии или объ-



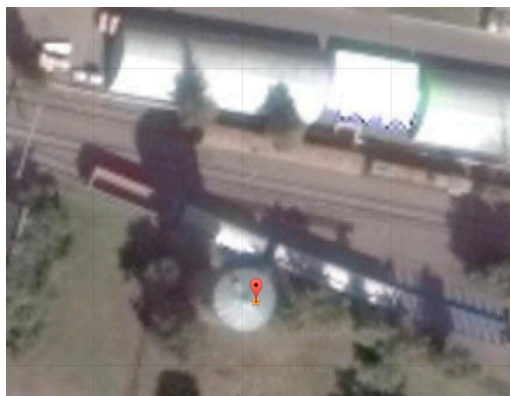


Рис. 3. Крупномасштабное спутниковое изображение района водонапорной башни на ЭК.



Рис. 4. Фотоснимок района водонапорной башни на ЭК, полученный с борта ДПЛА.

екте. Для этого надо обращаться в специализированные организации, торгующие спутниковой информацией. Эта услуга является платной, но зато позволяет иметь данные с учётом пожеланий заказчика: времени, места и условий съёмки, качество снимков и других параметров. Информация может быть как актуальной, т.е. полученной недавно, так и взятой из баз данных, накопленных за предыдущие годы. Последнее является важным для информации, используемой в экологических исследованиях, где предстоит сравнить изменение ландшафта за длительный срок.

СРАВНЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ С РАЗЛИЧНЫХ НОСИТЕЛЕЙ

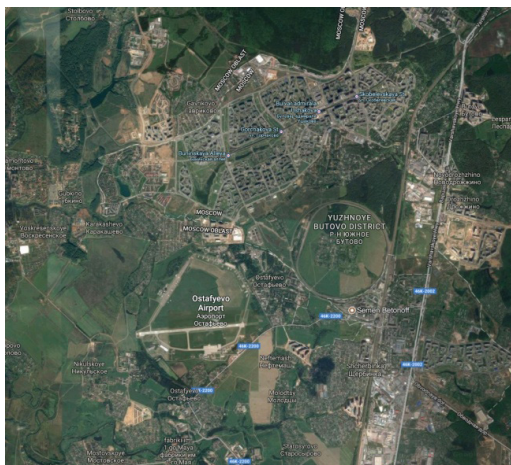
Для выполнения работ по получению изображений транспортной инфраструктуры железных дорог было выбрано экспериментальное кольцо (ЭК) ВНИИЖТ. Выбор этого объекта был связан со следующими обстоятельствами. Во-первых, он хорошо изучен и расположен близко от Москвы. Во-вторых, в силу его экспериментального статуса не возникло затруднений с разрешением на полёты ДПЛА над его территорией. На рис. 2 приведено изображение ЭК, взятое из базы данных GoogleMaps. Центр кольца отмечен маркером, его координаты: 55.521373, 37.550190 (северная широта и восточная долгота в градусах соответственно). Внутри кольца расположен дачный посёлок. Само ЭК состоит из двух двухпутных колец: внешнего и внутреннего. Внешнее имеет форму правильной окружности,

а внутреннее содержит прямолинейный участок.

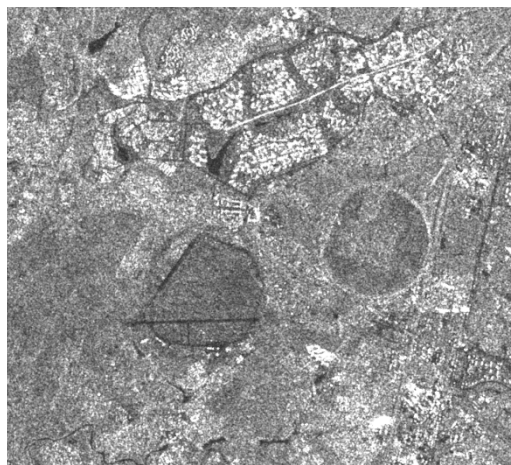
В нижнем левом углу находится депо. Квадратом отмечен один из районов полётов ДПЛА, результаты которых используются в нашей статье. Звёздочка в квадрате находится на месте расположения водонапорной башни, служившей ориентиром при полётах. Увеличенное изображение башни, полученное со спутника, приведено на рис. 3.

Крыша башни имеет коническую форму и покрыта оцинкованным железом. Отдельные листы железа стыкуются между собой в виде вертикальных рёбер. Ребристая форма крыши хорошо просматривается даже на спутниковом снимке. Этот же район около водонапорной башни был снят с борта ДПЛА, оснащённого фотоаппаратом в карданном подвесе с высоты около 70 м. Результат съёмки на рис. 4.

Оба снимка отличаются расположением подвижного состава на путях, поскольку сделаны в разное время года. Также они отличаются как размерами, так и направлением тени, отбрасываемой местными предметами, ибо снимки были произведены при разном положении солнца на небесной сфере. Это обстоятельство подчёркивает важность солнечно-синхронных орбит, которые упомянуты ранее и обычно предназначены для спутников ДЗЗ. Ещё одним преимуществом солнечно-синхронных орбит является возможность по длине отбрасываемой тени на снимках, полученных на разных витках обращения спутника, определить, строится объект или нет и с какой скоростью. Обычно этот метод используется



а)



б)

Рис. 5. Спутниковые снимки окрестностей экспериментального кольца:
а) изображение видимого спектра по данным ресурса Google Maps;
б) радиолокационное изображение с европейского спутника Sentinel-1.

при дешифровке снимков разведывательных спутников, но может быть применён и при кадастровой съёмке, когда необходимо на большом массиве изображений выделить незаконно возводимые постройки. Здесь достаточно вычесть два изображения, полученных с разницей в несколько недель или месяцев, чтобы зафиксировать вновь возводимые постройки и их высоту.

Если сравнивать разрешающую способность обоих фотоснимков, то очевидно, что изображения с ДПЛА имеют значительно лучшее разрешение, чем спутниковые. Это и понятно, ибо высота орбит спутников ДЗЗ составляет 400–600 км. ДПЛА имеют ещё одно преимущество перед спутниками: они меньше зависят от погодных условий. При наличии облачности невозможно производить съёмку в видимом спектре со спутников. В то время как ДПЛА могут летать ниже границы облачности и получать нужную информацию.

Всепогодной является радиолокационная съёмка. На рис. 5 приведены два крупномасштабных снимка окрестности экспериментального кольца, полученных по данным ресурса Google Maps и базы данных радиолокационного спутника Sentinel-1 [8].

В нижней части обоих снимков видны аэропорт Остафьево (слева на снимке) и ЭК ВНИИЖТ (справа). Оба изображения имеют приблизительно один и тот же масштаб, но видимое изображение содержит больше деталей по сравнению с радиоло-

кационным. Масштаб приведённых снимков можно легко оценить, учитывая, что внешнее кольцо полигона имеет форму правильной окружности диаметром 1912 м.

Преимуществом радиолокации, как указывалось, является всепогодность и круглосуточность. В некоторых случаях радиолокационные снимки могут оказаться единственным источником информации. В связи с этим можно сделать вывод, что для решения своих задач ОАО «РЖД» важно иметь доступ к разнообразным средствам ДЗЗ.

ПОСТРОЕНИЕ ТРЁХМЕРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Современные средства обработки изображений помогают на основе отдельных снимков, полученных с ДПЛА, синтезировать трёхмерные изображения объектов на поверхности Земли. Это позволяет рассматривать объекты под различными ракурсами и с различных высот. Такая технология может найти применение при проектировании сложных объектов инфраструктуры (мостов, тоннелей и т.д.), а также решать некоторые задачи обеспечения их безопасности.

В качестве исходных данных для построения трёхмерной модели поверхности участка земли с расположенными на нём объектами железнодорожной инфраструктуры были использованы 176 фотографий, собранных в ходе полётов ДПЛА верто-



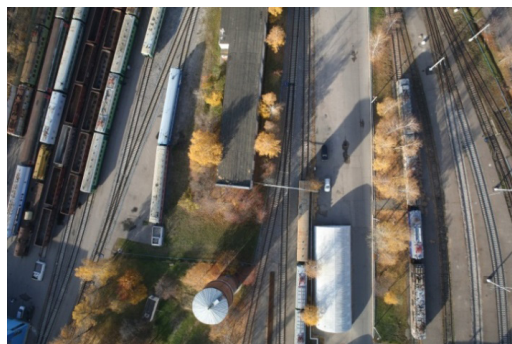
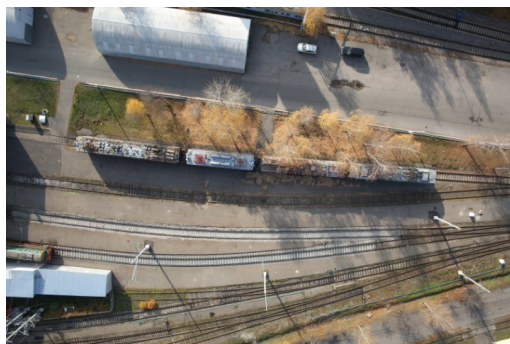


Рис. 6. Примеры исходных изображений, сделанных ДПЛА.

лётного типа с шестью подъёмными роторами и расположенной на нём в управляемом карданном подвесе камерой Canon EOS 5D Mark II с объективом Canon EF-S 17–55 f/2.8 IS USM, рис. 1. Примеры некоторых исходных фотографий приведены на рис. 6.

Для синтеза трёхмерного изображения решается задача поиска соответствия между ключевыми точками на разных изображениях, выполняется она путём поиска точек с минимально отличающимися дескрипторами — векторами параметров, описывающих точку. Так, алгоритм SIFT описывает каждую ключевую точку вектором со 128 параметрами, определяемыми на основе локальных градиентов в окрестностях точки.

Один из наиболее эффективных алгоритмов фильтрации ложно определённых соответствий ключевых точек — RANSAC (Random Sample Consensus) [9]. Суть метода заключается в итеративном поиске лучшей матрицы преобразования (фундаментальной матрицы) между случайно выбранными N ключевыми точками на одном изображении и соответствующими точками на втором. В итоге из набора ключевых точек удаляются такие, отклонение которых в результате применения найденного преобразования от соответствующих точек на другом изображении превышает заданный порог.

Для построения трёхмерной модели поверхности необходимо установить внутренние (фокусное расстояние, координаты принципиальной точки, коэффициенты дисторсии) и внешние параметры камеры (положение и ориентация). Внутренние параметры являются независимыми от

внешних условий и не меняются от снимка к снимку. Как правило, внутренние параметры вычисляются с помощью съёмки калибровочных объектов, геометрия которых заранее известна, но могут быть также вычислены и без их использования при условии наличия большого количества снимков с общими точками [10]. Внешняя калибровка производится посредством триангуляции ключевых точек, общих для двух и более кадров.

Полученная трёхмерная модель поверхности под различными ракурсами наблюдения и с различных высот показана на рис. 7.

Более полное представление о полученной модели может быть получено из видео, представленного в [11]. Следует отметить некоторые особенности данных, на которых была построена модель:

- сравнительно небольшое количество снимков;
- неоптимальная траектория полёта ДПЛА;
- малое перекрытие между снимками;
- отсутствие сведений об ориентации ДПЛА и камеры, а также данных о GPS/ГЛОНАСС координатах.

Несмотря на указанные особенности, полученная модель достаточно точно отображает характер местности, где производилась съёмка. Построение модели осуществлялось при помощи математического обеспечения Pix4DMapper [12].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый анализ возможностей использования дистанционных средств зондирования Земли (спутники ДЗЗ и ДПЛА, оснащённые различными датчика-

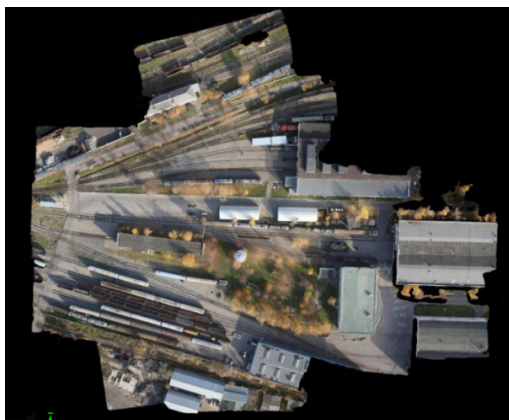


Рис. 7. Трёхмерная модель поверхности.

ми) подтверждает, что они могут оказаться эффективными для обеспечения безопасности движения на железных дорогах России. Их информация может найти применение и для решения других задач, например, при проектировании и строительстве железнодорожной инфраструктуры. В статье показано, что эффективность средств дистанционного зондирования Земли повышается за счёт комбинирования спутниковых информационных систем и ДПЛА, а использование современных средств обработки видеoinформации даёт возможность построения синтетических трёхмерных изображений инфраструктуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Eyre-Walker R. E. A., Earp G. K. Application of Aerial Photography to Obtain Ideal Data for Condition Based Risk Management of Rail Networks / The 4th IET International Conference on Railway Condition Monitoring, June 18–20, 2008, Conference Centre, Derby, UK.
2. Лёвин Б. А., Бугаев А. С., Ивашов С. И., Разевиг В. В. Дистанционно-пилотируемые летательные аппараты и безопасность пути // Мир транспорта. — 2013. — № 2. — С. 152–157.
3. Grey E. Worker drones: maintaining railway tracks from the air, May 16, 2016. [Электронный ресурс]: <http://www.railway-technology.com/features/featureworker-drones-maintaining-railway-tracks-from-the-air-4893229/>. Доступ 24.06.2018.
4. Flammini F., Pragliola C., Smarra G. Railway Infrastructure Monitoring by Drones, 2016. International

Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC 2016), 02–04 November 2016, Toulouse (France), DOI: 10.1109/ESARS-ITEC.2016.7841398.

5. Шутко А. М. СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. — М.: Наука, 1986. — 189 с.
6. Пассивная радиолокация. Методы обнаружения объектов / Под ред. А. П. Быстрова и А. В. Соколова. — М.: Радиотехника, 2008. — 318 с.
7. Бугаев А. С., Ивашов С. И., Лёвин Б. А., Недорчук Б. Л., Разевиг В. В. Оценка с помощью беспилотных летательных аппаратов опасности схода снежных лавин в районах прохождения железнодорожных путей // Ренессанс железных дорог: Фундаментальные научные исследования и прорывные инновации / Под ред. Б. М. Липидуса. — М.: Аналитика Родис, 2015. [Электронный ресурс]: http://www.rslab.ru/downloads/rzd_renaissance.pdf. Доступ 24.06.2018.
8. [Электронный ресурс]: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1/observation-scenario/archive>. Доступ 24.06.2018.
9. Fischler M., Bolles R. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography, Communications of the ACM. — Vol. 24. — No. 6. — 1981. — Pp. 381–395.
10. Hartley R., Zisserman A. Multiple View Geometry in Computer Vision. Cambridge University Press. — 2004. — 672 p.
11. РАСКАН-4/4000. Радиолокатор для зондирования строительных конструкций. [Электронный ресурс]: <http://rascan.ru/download/rzd.mp4>. Доступ 24.06.2018.
12. Pix4Dmapper. [Электронный ресурс]: <https://pix4d.com/product/pix4dmapper/>. Доступ 24.06.2018.

Координаты авторов: **Ивашов С. И.** – sivashiv@rslab.ru, **Бугаев А. С.** – bugaev@cos.ru, **Татараидзе А. Б.** – tataraidze@rslab.ru, **Скребков А. В.** – skrebkov_av@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 24.06.2018, принята к публикации 10.08.2018.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17–20–02086. Авторы выражают благодарность сотрудникам Экспериментального железнодорожного кольца в г. Щербинка за содействие в проведении полётов ДПЛА для получения необходимой информации.