

УПРАВЛЕНИЕ ТОВАРНЫМИ ПОТОКАМИ И ПЕРЕВОЗОЧНЫМ ПРОЦЕССОМ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

НА ОСНОВЕ КЛИЕНТООРИЕНТИРОВАННОСТИ И ЛОГИСТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

Коллективная монография членов и научных партнеров
Объединенного ученого совета ОАО «РЖД»

Ададуров С. Е., Алексеев А. М., Анисимов В. А., Анфиногенов А. Ю.,
Архипов Д. И., Батраев В. В., Баушев А. Н., Белова Е. И., Бессоненко С. А.,
Бетелин В. Б., Бородин А. Ф., Бугаев А. С., Бычков И. В., Верескун В. Д.,
Виноградов С. А., Галахов С. А., Глухов А. П., Гришин Е. М., Давыдов Ю. А.,
Ефимова О. В., Жарков М. Л., Зайцев А. А., Заручейский А. В., Зобнин В. Л.,
Зубков В. Н., Ивашов С. И., Казаков А. Л., Кирякин В. Ю., Климова Е. В.,
Колесников В. И., Колесников М. В., Корниенко А. А., Коссов В. С.,
Лазарев А. А., Лapidус Б. М., Лёвин Б. А., Лунин А. А., Мамаев Э. А.,
Махутов Н. А., Мачерет Д. А., Мехедов М. И., Морозов В. Н., Мугинштейн Л. А.,
Мусатова Е. Г., Осьминин А. Т., Панин В. В., Правдивец Н. А., Преображенский Д. А.,
Разевиг В. В., Розенберг Е. Н., Сайбаталов Р. Ф., Скребков А. В., Сотников Е. А.,
Спиров А. В., Татарaidзе А. Б., Фомин В. М., Шапкин И. Н., Шаров В. А.,
Шатохин А. А., Шенфельд К. П.

Под редакцией
д-ра экон. наук, проф. Б. М. Лapidуса
и д-ра техн. наук, проф. А. Т. Осьминина

ООО «Цемлизинг»
2019

УДК : 656.225.073

ББК : 39.2

У- 677

Управление товарными потоками и перевозочным процессом на железнодорожном транспорте на основе клиентоориентированности и логистических технологий : коллективная монография членов и научных партнеров Объединенного ученого совета ОАО «РЖД» / под ред. Б. М. Лапидуса, А. Т. Осьминина. – СПб:ЛЕМА, 2019. – 288 с. (Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД» № 4–6, 2019).

В коллективной монографии членов и научных партнеров Объединенного ученого совета ОАО «РЖД», объединяющего ведущих представителей отраслевой и фундаментальной российской науки, отражены ключевые вопросы научной поддержки перевозочного процесса и управления товарными потоками на железнодорожном транспорте, повышения эффективности его деятельности на основе клиентоориентированности и логистических принципов.

Рассмотрены системные вопросы развития логистических технологий, научные принципы прогнозирования и планирования железнодорожных грузовых перевозок, повышения эффективности и безопасности управления перевозочным процессом в условиях ограниченных пропускных способностей линий, открывающие новые возможности для роста эффективности ОАО «РЖД».

Монография предназначена для руководителей и сотрудников ОАО «РЖД» и профильных институтов РАН, руководителей и сотрудников научно-исследовательских, конструкторских, технологических и эксплуатирующих организаций, преподавателей, докторантов, аспирантов и студентов транспортных вузов.

Редакция изданий
Объединенного ученого совета ОАО «РЖД»
129626, Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10.
Тел.: (499) 260-42-43
Факс: (499) 260-42-96

ISBN 978-5-00105-520-4

© Коллектив авторов
© Объединенный ученый совет ОАО «РЖД», 2019.
Все права защищены.
При перепечатке ссылка на источник обязательна.

3.2. Дистанционное зондирование инфраструктуры железных дорог

БУГАЕВ А. С., д-р. физ.-мат. наук, академик РАН

(член Объединенного ученого совета ОАО «РЖД», заведующий лабораторией Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, заведующий кафедрой МФТИ)

ИВАШОВ С. И., канд. техн. наук

(начальник лаборатории МГТУ им. Н. Э. Баумана)

ТАТАРАИДЗЕ А. Б., канд. техн. наук

(старший научный сотрудник МГТУ им. Н. Э. Баумана)

РАЗЕВИГ В. В., канд. техн. наук

(старший научный сотрудник МГТУ им. Н. Э. Баумана)

СКРЕБКОВ А. В., канд. техн. наук

(доцент кафедры «Электропоезда и локомотивы» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)))

АЛЕКСЕЕВ В. М., д-р. техн. наук, проф.

(профессор кафедры «Управление и защита информации» РУТ (МИИТ))

Введение

Безопасность железнодорожных перевозок требует постоянного внимания со стороны персонала и руководства ОАО «РЖД». Это относится к контролю за состоянием машинистов локомотивов, а также всех служб, связанных с обеспечением работы железной дороги: то, что называется человеческим фактором. Эти проблемы решаются набором организационно-технических мероприятий, повышающих дисциплину и улучшающих условия труда работников.

К сожалению, есть еще технические факторы, например нарушение целостности ж/д пути (разрыв рельса, разрушение стрелочных переходов) и др., которые требуют постоянного контроля. Отдельной проблемой является противодействия террористическим акциям с применением взрывных устройств (ВУ), которые могут привести к еще более тяжелым последствиям. Использование дистанционных средств получения информации: искусственных спутников Земли и дистанционно-пилотируемых летательных аппаратов (ДПЛА), могло бы оказать существенную помощь в определении масштабов катастрофы и путей ее устранения, включая оказание помощи пострадавшим [1–4].

Еще одной из задач, связанных с обеспечением безопасности железнодорожного движения, являются происшествия связанные с природными явлениями: сходом селей и снежных лавин, обильных снегопадов на равнинной местности и т. д. Дистанционные средства контроля над такими явлениями

могли бы оказать существенную помощь в их прогнозе и ликвидации последствий. Для контроля состояния снежного покрова на горных склонах на лавиноопасных участках возможно использование ДПЛА для построения трехмерных изображений местности в летнее время (без снежного покрова) и после обильных снегопадов. Сравнение подобных изображений позволит определить высоту снежного покрова, а ДПЛА, оснащенные пассивными радиолокаторами (радиометрами) сантиметрового и дециметрового диапазонов, дадут возможность измерить его влажность [5, 6]. Совокупность этих факторов (запас снега и его влажность) позволят создать достаточно точный прогноз вероятности схода снежных лавин [7].

Железная дорога является перевозчиком опасных грузов: взрывчатых веществ, опасных и ядовитых химических соединений, горючих и легко воспламеняющихся материалов и т. д. В случае аварии необходимо оперативно оценить масштаб катастрофы и принять решения по оперативному устранению ее последствий.

Описанные примеры показывают возможные области применения ДПЛА и других средств дистанционного зондирования, включая спутники землеобзора, для обеспечения безопасности железнодорожных перевозок. Для пояснения дадим некоторые определения.

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) является методом получения информации об объекте или явлении без непосредственного физического контакта с данным объектом, например с воздушных или космических носителей. Такая информация может быть получена в различных диапазонах электромагнитных волн, но могут регистрироваться другие виды излучения и параметры: радиационные, гравитационные, измерения рельефа местности и другие. Методы зондирования могут быть пассивные, то есть использовать естественное отраженное или вторичное тепловое излучение объектов на поверхности Земли, обусловленное солнечной активностью, и активные — использующие вынужденное излучение объектов, инициированное искусственным источником направленного действия, например активным радиолокатором или лазером. В зависимости от решаемой задачи следует использовать тот, или иной тип носителя аппаратуры и ее состав. Статья посвящена исследованию возможности комбинированного использования различных источников информации.

1. Достоинства и недостатки дистанционно-пилотируемых летательных аппаратов

В последние годы характеризуются все более широким применением ДПЛА с расширением круга задач, решаемых с их помощью. Если раньше ДПЛА использовались исключительно в военных целях, то в настоящее время их гражданское применение становится все более актуальным. Первоначальный интерес военных, возникший в конце 60-х годов, был продиктован

стремлением избежать риска жизни для экипажей при выполнении разведывательных полетов, а также при нанесении ударов по разведанным целям. Недостатком этих летательных аппаратов была необходимость возвращения на свою территорию после выполнения полетного задания для проявления отснятой фотопленки и дешифровки полученного материала. Это снижало оперативность получения информации.

В дальнейшем наиболее успешно разработка ДПЛА развивалась в Израиле (тактические и оперативно-тактические ДПЛА) и США (оперативно-тактические и стратегические ДПЛА). Прогресс в разработке нового поколения ДПЛА 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, особенно ее массогабаритные характеристики, и позволило улучшить летные 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 многороторных аппаратов вертолетного типа с электрической тягой. Летательные аппараты данного типа отличаются простотой конструкции и дешевизной. Это объясняется в первую очередь отсутствием такого неотъемлемого для обычных вертолетов конструктивного элемента как автомат перекоса лопастей и использованием асинхронного управления тягой электрических двигателей, позволяющим контролировать перемещение аппарата в полете. Шестироторный ДПЛА, изображенный на рис. 1, был использован для получения изображений инфраструктуры Экспериментального кольца (ЭК) ВНИИЖТ в г. Щербинка. Еще одним достоинством данного типа ДПЛА является то обстоятельство, что их использование в настоящее время в полосе отчуждения железной дороги и на высотах менее 100 м не требует специальных разрешений на полеты.



Рис. 1. Общий вид ДПЛА вертолетного типа:
а) общий вид ДПЛА в полете с фотокамерой,
установленной в карданном подвесе;
б) на заднем плане оператор с пультом управления ДПЛА

Недостатком многороторных ДПЛА является относительно небольшое время полета, как правило, менее 1 часа, и, следовательно, связанные с этим ограничения по дальности и высоте полета. Однако этот тип летательных аппаратов крайне удобен, когда оператор, управляющий их полетом, 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 полета может быть достигнуто за счет сменных аккумуляторов во время промежуточных посадок, хотя ограничение по радиусу действия при этом остается, и оно существенно.

2. Анализ спутниковых ресурсов получения информации

Если в 60-е и 70-е годы 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 и контроль за возникновением чрезвычайных ситуаций и ликвидация их последствий;
- геологоразведка;
- прогноз погоды;
- контроль за окружающей средой и источниках ее загрязнения;
- сельское хозяйство;
- лесное хозяйство;
- строительство и многие другие отрасли.

При дистанционном зондировании со спутников производится регистрация излучения поверхности Земли в различных диапазонах электромагнитных волн. Как правило, используется многоспектральная фотосъемка и радиолокаторы бокового обзора. В некоторых случаях при геодезической съемке для измерения рельефа поверхности используется излучение лазера. Данные ДЗЗ, полученные с космического аппарата (КА), оснащенного фотоаппаратурой видимого диапазона, характеризуются большой степенью зависимости от прозрачности атмосферы и времени суток. Поэтому для снятия этих ограничений в последние годы получили развитие спутники ДЗЗ, оснащенные 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 во время 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 счет преимущества конструктивных решений со спутниками военного назначения.

Как правило, спутники ДЗЗ запускаются на так называемые солнечно-синхронную орбиту (иногда именуемую гелиосинхронной), которая обладают 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°.

Основным достоинством оптических спутников ДЗЗ является возможность получение снимков с высоким разрешением, которое может достигать 0,3 м. В тоже время эти спутники не являются всепогодными, т. е. не могут получать изображение ночью или на местности закрытой облачностью. Если первый недостаток еще может быть потенциально устранен, например, при использовании инфракрасной оптики. То облачность, которая в средних широтах зимой может скрывать землю неделями, а то и месяцами, делает невозможным использование оптических спутников. Всепогодными являются спутники радиолокационной разведки местности, хотя они и обладают худшим разрешением. При этом радиолокация дает дополнительные возможности, например, получение изображений в различных поляризациях.

3. Базы данных спутниковой информации

В настоящее время результаты спутниковой фотосъемки получили широкое распространение благодаря общедоступности и простоте работы с ними, например, несколько картографических сайтов предоставляет бесплатный доступ к спутниковым фотографиям в Интернете — Google Maps, Yahoo! Maps, Яндекс.Карты и др. Спутниковые снимки и карты на их основе широко используются даже для решения отдельных бытовых задач, например для навигации личных автомобилей или вызова такси. Отдельные сайты предоставляют лишь результаты спутниковой съемки, позволяя работать с базами снимков: NASA World Wind, TerraServer-US, Космоснимки, LandsatLook Viewer (USGS).

Бесплатные сервисы космической информации хотя и обладают достаточно высоким разрешением, но не позволяют получать оперативную информацию, т. к. информация на них обновляется достаточно редко. Фотоизображения для них были получены по результатам съемки в теплое время года, т. е. при отсутствии снежного покрова. Такие изображения могут быть использованы для некоторых видов аналитической работы, но не позволяют получать опера-

тивную и актуальную информацию об интересующем событии или объекте. Для этого надо обращаться в специализированные организации, торгующие спутниковой информацией, например Инженерно-технологический центр «СКАНЭКС». Эта услуга является платной, но дает возможность получить информацию с учетом пожеланий заказчика: времени, места и условий съемки, разрешения 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 для экологических исследований, где важно сравнить изменение ландшафта за длительное время.

4. Сравнение информации полученной с различных носителей

Для выполнения работ по получению изображений транспортной инфраструктуры железных дорог было выбрано Экспериментальное кольцо ВНИИЖТ в г. Щербинка. Выбор этого объекта был связан со следующими обстоятельствами. Во-первых, этот объект хорошо изучен и расположен близко от Москвы. Во-вторых, в силу его экспериментального статуса не возникло затруднений с разрешением на полеты 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 поселок. Само ЭК состоит из двух двухпутных колец: внешнего и внутреннего. Внешнее кольцо имеет форму правильной окружности, а внутреннее содержит прямолинейный участок.

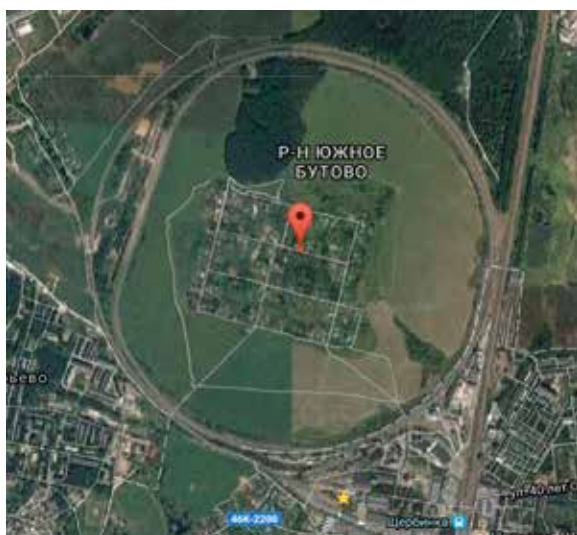


Рис. 2. Изображение ЭК ВНИИЖТ из базы данных Google Maps

В нижнем левом углу находится депо. Квадратом отмечен один из районов полетов ДПЛА, результаты которых используются в настоящей статье. Звездочка в квадрате находится на месте расположения водонапорной башни, которая служила ориентиром при полетах ДПЛА. 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 ребер. Ребристая форма крыши хорошо просматривается даже на спутниковом снимке. Этот же район около водонапорной башни был снят с борта ДПЛА, оснащенного фотоаппаратом в карданном подвесе с высоты около 70 м, рис. 1. Результат съемки приведен на рис. 4.

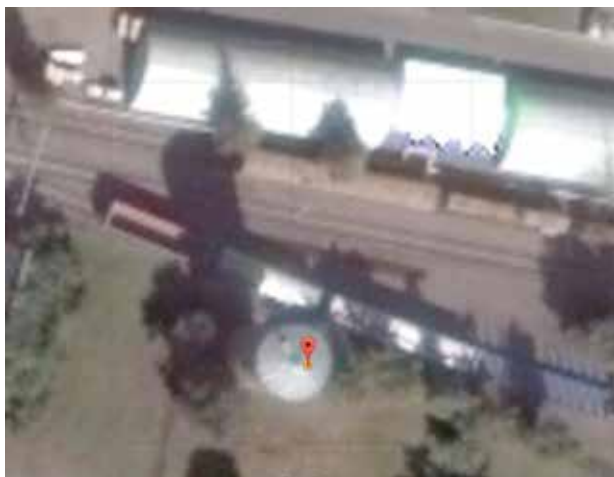


Рис. 3. Крупномасштабное спутниковое изображение района водонапорной башни на ЭК по данным Google Maps



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

Оба снимка отличаются расположением подвижного состава на путях, т. к. были сделаны в различное время года. Также они отличаются как размерами, так и направлением тени, отбрасываемой местными предметами, т. к. снимки были произведены при разном положении солнца на небесной сфере. Это обстоятельство подчеркивает важность солнечно-синхронных орбит, которые были упомянуты ранее и обычно используются для спутников ДЗЗ. Еще одним преимуществом использования 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 при дешифровке снимков разведывательных спутников, но может быть применен и при кадастровой съемке, когда необходимо на большом массиве изображений выделить незаконно возводимые постройки. Здесь достаточно вычесть два изображения, полученных с разницей нескольких недель или месяцев, чтобы определить 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, т. к. высота орбит спутников ДЗЗ составляет 400–600 км. ДПЛА имеют еще одно преимущество перед спутниками: они меньше зависят от погодных условий. При наличии облачности невозможно производить съемку в видимом спектре со спутников. В то время как ДПЛА могут летать ниже нижней границы облачности и получать информацию.

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



Рис. 5. Спутниковые снимки окрестностей
Экспериментального кольца ВНИИЖТ:

- а) изображение видимого спектра по данным ресурса GooleMaps;
- б) радиолокационное изображение с европейского спутника Sentinel-1

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 радиолокационным. Масштаб приведенных снимков можно легко оценить, учитывая, что внешнее кольцо полигона ВНИИЖТ имеет форму правильной окружности диаметром 1912 м.

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

5. Построение трехмерных изображений объектов железнодорожной инфраструктуры

Современные средства обработки изображений позволяют на основе отдельных снимков, полученных с ДПЛА, синтезировать трехмерные 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 ж/д инфраструктуры (мостов, тоннелей и т. д.), а также решать некоторые задачи обеспечения их безопасности.

В качестве исходных данных для построения трехмерной модели поверхности участка земли с расположенными на нем объектами ж/д инфраструктуры были использованы 176 фотографий, собранных в ходе полетов ДПЛА вертолетного типа с 6 подъемными роторами и с подвешенной на нем 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.

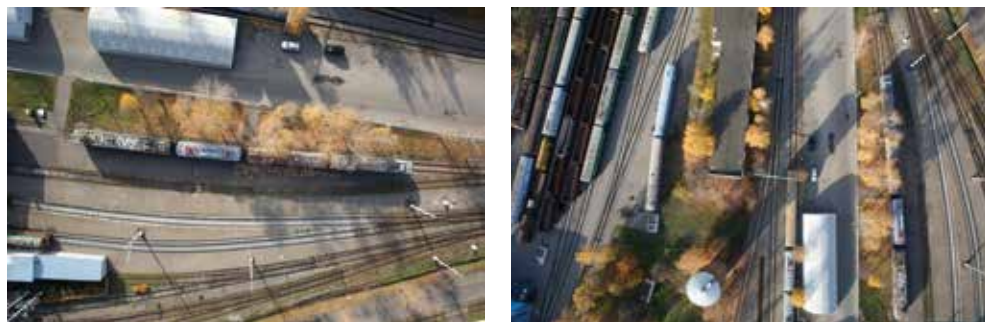


Рис. 6. Примеры исходных изображений сделанных ДПЛА

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

Один из наиболее эффективных алгоритмов фильтрация ложно определенных 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 трехмерной 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 съемки калибровочных объектов, геометрия которых заранее известна, но могут быть также вычислены и без их использования, при условии наличия большого количество снимков с общими точками [10]. Внешняя калибровка производится посредством триангуляции ключевых точек общих для двух и более кадров.

Полученная трехмерная 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 полета ДПЛА;

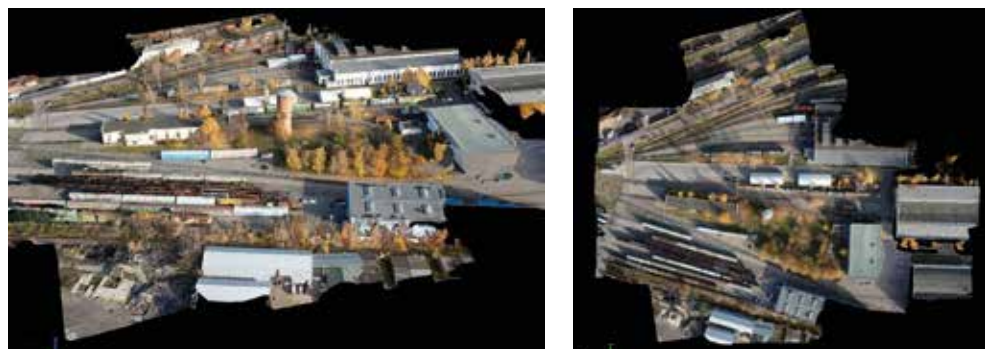


Рис. 7. Трехмерная модель поверхности

- 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 особенности местности, где производилась съемка. Построение модели осуществлялось при помощи математического обеспечения Pix4Mmapper [12].

Заключение

Проведенный анализ возможностей использования дистанционных средств зондирования Земли (спутники ДЗЗ и ДПЛА, оснащенные различными датчиками) показал, что они могут оказаться эффективным средством 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 работе показано, что эффективность средств дистанционного зондирования Земли повышается за счет комбинирования спутниковых информационных систем и ДПЛА, а использование современных средств обработки видеoinформации дает возможность построения синтетических трехмерных изображений железнодорожной инфраструктуры.

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 полетов ДПЛА для получения необходимой информации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R. E. A. Eyre-Walker, G. K. Earp, 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 18–20 June 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 (46). С. 152–157.
3. Worker drones: maintaining railway tracks from the air, May 17 2016, railway-technology.com, <http://www.railway-technology.com/features/featureworker-drones-maintaining-railway-tracks-from-the-air-4893229/>
4. Corey Rich, Unmanned Aerial Vehicles and the Future of Asset Managmemen, report of the Simon Fraser University, April 15th, 2015. <http://www.google.ru/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=9&ved=0ahUKewif0b6d7-LUAhWiHpoKHWzlBokQFghsMAG&url=http%3A%2F%2Fsummit.>

sfu.ca%2Fsystem%2Ffiles%2Fitems1%2F15582%2FCorey%2520Rich.pdf&usg=AFQjCNHjnWIXL-FHzDtTrILzq0Vu8DTTCw&cad=rjt

5. Шутко А. М. СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. М: Наука, 1986. С. 189.
6. Пассивная радиолокация. Методы обнаружения объектов / под ред. Быстрова А. П. и Соколова А. В. – М., Радиотехника, 2008. С. 318.
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. Лapidуса. МО, Аналитика Родис, 2015.
8. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1/observation-scenario/archive>
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. 1981. Vol. 24. N. 6. Pp. 381–395.
10. Hartley R., Zisserman A., Multiple View Geometry in Computer Vision. Cambridge University Press, 2004, 672 p.
11. <http://rascan.ru/download/rzd.mp4>
12. Pix4Dmapper. URL: <https://pix4d.com/product/pix4dmapper/> (date of access: 05.10.2017).