

Повышение точности формирования цифровой модели местности вдоль железнодорожного пути

Дмитрий Александрович Рошин

3 Центральный научно-исследовательский институт Министерства обороны Российской Федерации, Москва, Россия, whwhwh@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-5907-0156>

Аннотация. Рассмотрена задача повышения точности цифровых моделей местности, создаваемых в целях мониторинга и диагностики железнодорожного пути и прилегающей территории. Представлено техническое решение этой задачи, которое включает способ совместного проведения аэрофотосъёмки и лазерного сканирования, а также метод цифровой обработки полученных данных. Актуальность использования такого решения обусловлена существованием зон слабого приёма сигналов глобальной навигационной спутниковой системы, поскольку в данных зонах уменьшается точность построения цифровых моделей местности с помощью применяемых в настоящее время диагностических комплексов пространственного сканирования. Техническое решение основано на методе цифровой обработки аэрофотоснимков железнодорожного пути. При этом в качестве элементов внешнего ориентирования использованы нити рельсовой колеи, расположенные на нормированном расстоянии друг от друга. Применение данного метода позволило повысить точность определения траектории полёта летательного аппарата над железнодорожным путём и, как следствие, точность расчёта координат точек на земной поверхности. В результате сформирована цифровая модель местности, пригодная для диагностики и контроля состояния земляного полотна железнодорожного пути. При имитационном моделировании установлено, что применение предложенного метода позволило уменьшить до 50 % доверительный интервал распределения погрешности определения координат точек на местности и повысить точность формирования цифровой модели местности. Данное перспективное техническое решение повышения точности цифровых моделей местности для диагностики железнодорожного пути реализовано с помощью беспилотных летательных аппаратов, входящих в состав мобильного диагностического комплекса. К преимуществам предложенного решения относятся высокая оперативность и доступность применения.

Ключевые слова: цифровая модель местности, аэрофотосъёмка, лазерное сканирование, компьютерное зрение, определение координат, фотограмметрия, эрозионные процессы, земляное полотно, железнодорожные пути

Для цитирования: Рошин Д. А. Повышение точности формирования цифровой модели местности вдоль железнодорожного пути // Измерительная техника. 2021. № 2. С. 22–29. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-2-22-29>

Improving the accuracy of forming a digital terrain model along the railway

Dmitriy A. Roshchin

3 Central Research Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Moscow, Russia, whwhwh@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-5907-0156>

Abstract. The problem of improving the accuracy of digital terrain models created for monitoring and diagnostics of the railway track and the surrounding area is considered. A technical solution to this problem is presented, which includes a method for joint aerial photography and laser scanning, as well as a method for digital processing of the obtained data. The relevance of using this solution is due to the existence of zones of weak reception of signals from the global navigation satellite system, since in these zones the accuracy of constructing digital terrain models using currently used diagnostic spatial scanning systems is reduced. The technical solution is based on the method of digital processing of aerial photographs of the railway track. In this case, as elements of external orientation, the threads of the rail track located at a normalized distance from each other are used. The use of this method made it possible to increase the accuracy of determining the flight path of an aircraft over railway tracks and, as a result, the accuracy of calculating the coordinates of points on the earth's surface. As a result, a digital terrain model was created that is suitable for diagnostics and monitoring the condition of the railway trackbed. During simulation modeling, it was found that the application of the proposed method allowed to reduce to 50 % the confidence interval of the distribution of the error in determining the coordinates of points on the terrain and increase the accuracy of forming a digital terrain model. This promising technical solution for improving the accuracy of digital terrain models for railway track diagnostics is implemented using unmanned aerial vehicles that are part of the mobile diagnostic complex. The advantages of the proposed solution include high efficiency and availability of application.

Keywords: digital terrain model, aerial photography, laser scanning, computer vision, coordinate measurements, photogrammetry, exogenous geological processes, roadbed, railway tracks

Введение. Качество и безопасность грузовых и пассажирских перевозок, осуществляемых железнодорожным транспортом, в первую очередь определяется состоянием железных дорог. На стабильность геометрии рельсовой колеи оказывают большое влияние основная площадка и балластная призма земляного полотна железнодорожного пути [1]. На земляное полотно воздействуют различные эрозионные процессы, в том числе карст и криогенное пучение грунта. Анализ изменений геометрии пути и вызывающих их причин показывает, что в зависимости от конкретных условий эксплуатации участка пути (топографии, климата, гидрологии) балластная призма в разной степени подвергается влиянию эрозионных процессов, протекающих в грунте [2]. При этом могут возникать просадки земляного полотна, а также толчки, перекосы, разжижение и выплески балласта, трещины на поверхности балластного слоя, трещины на откосах и обочинах, выпирание грунтов на междупутья и в кюветы, что приводит к повреждению железнодорожного пути [3]. При недостаточной толщине балластного слоя также возникают и развиваются до опасных размеров деформации основной площадки земляного полотна [4]. Если же верх балластной призмы имеет недостаточную ширину, то снижается поперечная устойчивость рельсошпальной решётки [5].

Для мониторинга и диагностики проблем эксплуатации железнодорожного пути используются цифровые модели местности, построенные по данным сканирования в зоне, прилегающей к оси пути. Цифровые данные сканирования представляют собой совокупность точек, заданных пространственными координатами, с привязкой к линейной, железнодорожной и геодезической системам координат [6]. Причём необходимо строить и анализировать цифровые модели не только самого железнодорожного пути, но и прилегающей территории. Это важно для отслеживания опасных процессов, которые могут повлиять на состояние пути. При обработке цифровых моделей местности решаются проблемы, связанные с определением негабаритных объектов железнодорожной инфраструктуры и выявлением возникающих деформаций балластной призмы и основной площадки земляного полотна. Кроме того, обработка цифровых моделей в системе автоматизированного проектирования позволяет решать различные топографические задачи при выполнении проектно-изыскательных работ.

В настоящее время основными средствами контроля состояния железнодорожного пути являются путевые диагностические комплексы пространственного сканирования, построенные на базе путеизмерительных вагонов или путевых тележек [6–8]. Такие комплексы позволяют выявлять опасные деформации балластной призмы и земляного полотна, а также нарушения габаритов приближения строений железнодорожной инфраструктуры в соответствии с допусками, установленными ГОСТ 9238-2013 «Габариты железнодорожного подвижного состава и приближения строений». Однако диагностические комплексы на базе путеизмерительных вагонов и путевых тележек характеризуются невысокой производительностью и оперативностью.

Поэтому повышение эффективности диагностики протяжённых участков железных дорог особенно актуально.

Применение технологий лазерного сканирования и определения координат по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) совместно с проведением аэрофотосъёмочных работ способствовало появлению новых современных технических решений для мониторинга и диагностики линейных объектов и инфраструктуры посредством летательных аппаратов (ЛА). Подобные способы оценки состояния сетей газопроводов, трасс пролегания магистральных нефтепроводов и их инфраструктуры описаны в [9–12]. Тем не менее, недостаточная точность получаемых в ходе аэрофотосъёмки цифровых моделей местности является основным препятствием для их применения в целях диагностики железнодорожного пути. Определение координат ЛА в процессе аэрофотосъёмки по сигналам ГНСС не всегда может обеспечить необходимую высокую точность. Это связано с существованием обширных областей с неблагоприятными условиями для приёма сигналов ГНСС [13]. На результирующую точность лазерно-локационных измерений большое влияние оказывает местоположение наземных базовых станций коррекции сигналов ГНСС, используемых для повышения точности определения координат ЛА. По мере удаления ЛА от таких станций возрастают погрешности координатных измерений точек на местности [14]. Высокие погрешности определения координат ЛА приводят в итоге к погрешностям построения цифровых моделей местности.

Поэтому актуальна проблема повышения точности создаваемых с помощью ЛА цифровых моделей железнодорожного пути и прилегающих к нему объектов инфраструктуры железнодорожной сети в зонах слабого приёма сигналов ГНСС. На основе применения технологии компьютерного зрения разработано техническое решение этой проблемы.

Формирование цифровой модели местности вдоль железнодорожного пути. Проведение плановой аэрофотосъёмки вдоль железнодорожного пути позволяет получить фотоснимки поверхности земляного полотна и участков местности, непосредственно прилегающих к рельсовой колее. Высота аэрофотосъёмки рассчитывается с учётом технических характеристик используемой аэрофотокамеры (АФК) и должна обеспечивать требуемое взаимное перекрытие каждой пары последовательно сделанных снимков. Снижение высоты аэрофотосъёмки оказывает непосредственное влияние на увеличение разрешения формируемой цифровой модели местности. Поэтому необходим оптимальный баланс между высотой и скоростью полёта используемого ЛА с соблюдением требуемых мер безопасности. В ходе компьютерной обработки полученных аэрофотоснимков выполняется их взаимное ориентирование, и с помощью метода накидного монтажа формируется ортофотоплан участка местности вдоль железнодорожного пути [15].

Применение воздушного лазерного сканера (ВЛС) совместно с аэрофотосъёмкой позволяет сканировать земляное полотно железной дороги и с высокой (миллиметровой) точностью фиксировать расстояния от точки съёмки до поверхности земляного полотна вдоль линий развёртки,

формируемых ВЛС. Благодаря применению узкого лазерного луча в коротковолновом диапазоне спектра достигается высокое разрешение производимых сканером угловых измерений. Однако воздействие порывов ветра вызывает крен, тангаж и рыскание ЛА, что негативно сказывается на его курсовой устойчивости и приводит к отклонению направления съёмки от вертикали. С целью уменьшения влияния положения ЛА на точность определения координат ВЛС вместе с АФК размещают на гиросtabilизирующей установке вдоль линии, определяющей направление полета ЛА, на некотором расстоянии b друг от друга. На рис. 1 изображена принципиальная схема формирования цифровой модели местности вдоль участка железнодорожного пути.

Для создания трёхмерных цифровых моделей местности также необходимо определить координаты точек съёмки. Наиболее точными устройствами для определения координат являются геодезические ГНСС приемники. При наличии в непосредственной близости базовой станции или сети референчных ГНСС станций, транслирующих поправки, достигается сантиметровая точность определения координат ЛА. По координатам ЛА и расстояниям до точек на земной поверхности вычисляются координаты точек на поверхности земли, строится облако точек, представляющее собой точечную модель рельефа земной поверхности. В результате совмещения облака точек с аэрофотоснимком образуется трехмерная модель местности.

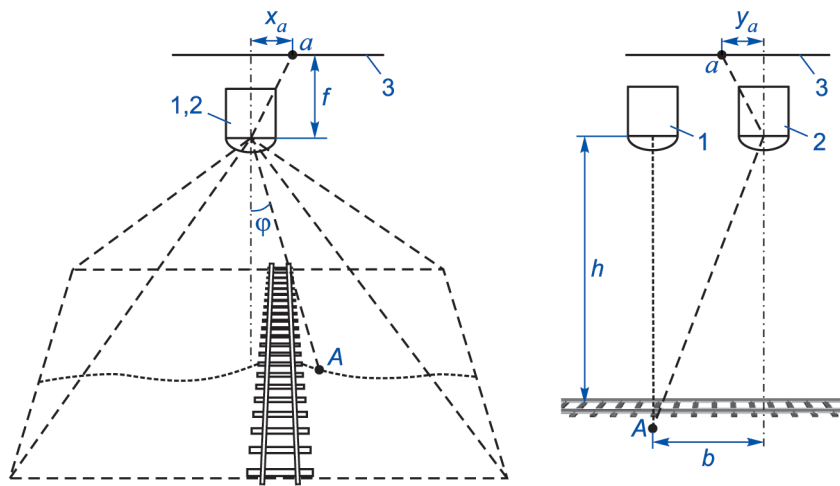


Рис. 1. Принципиальная схема определения координат точки A в процессе проведения аэрофотосъёмки и лазерного сканирования местности: 1 – воздушный лазерный сканер; 2 – аэрофотокамера; 3 – условная плоскость изображения аэрофотокамеры; h – требуемая высота аэрофотосъёмки; b – расстояние между АФК и ВЛС; f – фокусное расстояние объектива АФК; φ – угол наклона лазерного луча; a – проекция точки A на условную плоскость изображения АФК; x_a, y_a – координаты точки a

Fig. 1. Schematic diagram of determining the coordinates of point A in the process of aerial photography and laser scanning of the area: 1 – aerial laser scanner; 2 – aerial camera; 3 – conditional plane of the image of the aerial camera; h – the required height of aerial photography; b – the distance between aerial camera and aerial laser scanner; f – the focal length of the aerial camera lens; φ – the angle of inclination of the laser beam; a – projection of point A onto the conditional plane of the aerial camera image; x_a, y_a – coordinates of point a

Согласно способу построения трёхмерной модели местности вдоль железнодорожного пути, описанному в [16], полученные аэрофотоснимки и данные лазерного сканирования местности подвергаются компьютерной обработке. Отличительной особенностью данного способа является применение метода цифровой обработки стереопар аэрофотоснимков железнодорожного пути. При этом в качестве элементов внешнего ориентирования выступают нити рельсовой колеи, отстоящие на нормированном расстоянии друг от друга. Применение этого метода позволяет более точно вычислить траекторию полета ЛА в зонах слабого приёма сигналов ГНСС и определить координаты точек съёмки, что способствует повышению точности построения цифровой модели местности.

На первом этапе компьютерной обработки в процессе анализа каждого аэрофотоснимка на изображении железнодорожного пути выделяется множество пикселей, принадлежащих рельсовым нитям. Рельсовые нити характеризуются однородностью цвета, поэтому для их распознавания в качестве средних значений компонентов цвета принимаются медианы в диапазоне принимаемых значений. Расстояние между рельсовыми нитями на изображении определяется путем кусочно-линейной аппроксимации составляющего их множества пикселей. Для этого изображение помещается в прямоугольную систему координат с осью абсцисс, проходящей через центр изображения и пересекающей рельсовые нити в некоторых точках x_1, x_2 при $x_1 < x_2$.

Затем изображения на полученных аэрофотоснимках приводятся к единому масштабу. Для каждого аэрофотоснимка вычисляется коэффициент масштабирования изображения местности. Подсистема развёртки ВЛС формирует лазерные лучи с постоянным угловым шагом $d\varphi$. Линия развёртки ВЛС образуется множеством лучей, n из которых попадает в поле зрения объектива АФК. Угловое положение ВЛС задаётся так, что его центральный лазерный луч параллелен главной оптической оси АФК, а линия развёртки ВЛС перпендикулярна направлению полёта ЛА. Угол наклона φ_i i -го лазерного луча, фиксирующего некоторую точку на местности, вычисляется как

$$\varphi_i = [(n - 2i + 1)/2] d\varphi.$$

Из этого выражения определяются индексы i_1, i_2 для лазерных лучей, фиксирующих точки на двух рельсовых нитях:

$$i_1 = [(n + 1)/2 - \arctg(x_1/f)/d\varphi];$$

$$i_2 = [(n + 1)/2 - \arctg(x_2/f)/d\varphi],$$

где f – фокусное расстояние объектива АФК.

Затем определяется высота h_n ЛА над рельсовой колеёй и вычисляется коэффициент m масштабирования изображений местности на аэрофотоснимках:

$$m = h_n / h = \sum_{i=1}^{i_2} (l_i \cos \varphi_i) / [h(i_2 - i_1 + 1)],$$

где h – требуемая высота аэрофотосъёмки; l_i – расстояние до рельсовой колеи, измеренное ВЛС.

Далее изображения на аэрофотоснимках масштабируются по методу билинейной интерполяции. После чего все аэрофотоснимки разбиваются на стереопары, образованные двумя последовательно сделанными аэрофотоснимками с требуемым перекрытием, которые затем взаимно ориентируются [17]. Для этого на изображения каждой стереопары накладывается комбинация маркеров, равномерно распределённых по кадру в форме прямоугольной матрицы с шагом k , кратным длине N_x и ширине N_y изображений:

$$dx = N_x / k; \quad dy = N_y / k.$$

Для области, которая ограничивает множество пикселей, обозначенных маркерами на первом изображении, можно задать векторную функцию $\mathbf{s}_1$ суммарных значений компонентов цвета

$$\mathbf{s}_1(k_x, k_y) = \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 \mathbf{c}(k_x dx + i, k_y dy + j),$$

где k_x, k_y – позиция маркера в строке и столбце прямоугольной матрицы соответственно; $\mathbf{c}$ – вектор в цветовом пространстве RGB; i, j – позиция пиксела в области маркера на изображении.

На втором изображении задаётся смещение $(\Delta x, \Delta y)$ и определяется расстояние L по осям X и Y от каждого маркера до центра изображения (x_0, y_0)

$$L(k_x, \Delta x) = k_x dx - x_0 + \Delta x;$$

$$L(k_y, \Delta y) = k_y dy - y_0 + \Delta y.$$

Затем задаётся угол поворота $\Delta \psi$ первого изображения относительно второго. На втором изображении определяются суммарные значения $\mathbf{s}_2$ компонентов цвета по окрестностям множества пикселей, обозначенных маркерами:

$$\mathbf{s}_2(k_x, k_y, \Delta x, \Delta y, \Delta \psi) = \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 \mathbf{c}(\tilde{X}, \tilde{Y});$$

$$\tilde{X} = [x_0 + \sqrt{L^2(k_x, \Delta x) + L^2(k_y, \Delta y)} \times \cos(\arctg(L(k_y, \Delta y) / L(k_x, \Delta x)) + \Delta \psi)];$$

$$\tilde{Y} = [y_0 + \sqrt{L^2(k_x, \Delta x) + L^2(k_y, \Delta y)} \times \sin(\arctg(L(k_y, \Delta y) / L(k_x, \Delta x)) + \Delta \psi)].$$

В зависимости от смещения маркеров и угла поворота одного изображения относительно другого значения целевой функции δ вычисляются по формуле

$$\begin{aligned} \delta(\Delta x, \Delta y, \Delta \psi) &= \\ &= \sum_{k_y=1}^{k-1} \sum_{k_x=1}^{k-1} [\mathbf{s}_1(k_x, k_y) - \mathbf{s}_2(k_x, k_y, \Delta x, \Delta y, \Delta \psi)]^2 \rightarrow \min. \end{aligned}$$

Относительное смещение и угол поворота определяют значениями аргументов целевой функции, при которых она принимает минимальное значение, не превышающее установленного порогового коэффициента. По аргументам функции $\delta(\Delta x, \Delta y, \Delta \psi)$ вычисляется перемещение точки съёмки $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$ за период времени между моментами фотографирования $(t_\varepsilon, t_{\varepsilon+1})$:

$$\Delta X = h \Delta x / f;$$

$$\Delta Y = h \Delta y / f;$$

$$\Delta Z = fQ(q_2 - q_1) / (q_1 q_2 p_x),$$

где Q – нормированное расстояние между рельсовыми нитями; q_1, q_2 – расстояния в пикселах между рельсовыми нитями на изображениях стереопары; p_x – физический размер пиксела на изображении.

По сумме этих перемещений определяются координаты точки съёмки в трёхмерной декартовой системе координат модели местности. За начало координат принимаются координаты первой точки съёмки на заданной высоте h . Координаты последующих точек съёмки $(P_{x_\varepsilon}, P_{y_\varepsilon}, P_{z_\varepsilon})$, полученных в последовательности $\{1, \dots, \varepsilon, \dots\}$, вычисляются из выражений

$$P_{x_\varepsilon} = \sum_{i=1}^{\varepsilon} \Delta X_i;$$

$$P_{y_\varepsilon} = \sum_{i=1}^{\varepsilon} \Delta Y_i;$$

$$P_{z_\varepsilon} = Qf / (q_\varepsilon p_x).$$

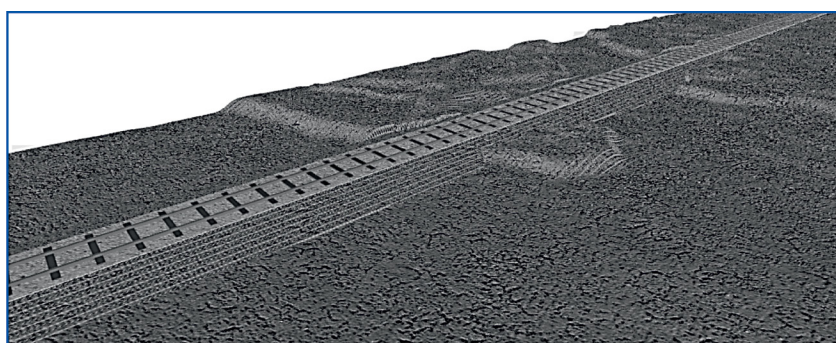


Рис. 2. Цифровая модель местности вдоль железнодорожного пути

Fig. 2. Digital model of the area along the railway

Угол поворота ε -го аэрофотоснимка в системе координат модели местности вычисляется по формуле

$$\Psi_{\varepsilon} = \sum_{i=1}^{\varepsilon} \Delta \Psi_i.$$

Затем находят координаты точек на местности в прямоугольной трёхмерной системе координат создаваемой модели. Так положение некоторой точки A на местности в системе координат АФК определяется выражениями

$$X_A = l_A m \sin \varphi_i;$$

$$Y_A = b;$$

$$Z_A = l_A m \cos \varphi_i,$$

где l_A – расстояние до точки A , измеренное ВЛС; b – расстояние между ВЛС и АФК.

Для преобразования координат точки A , зафиксированной из точки съёмки ($Px_{\varepsilon}, Py_{\varepsilon}$), в систему координат трёхмерной модели местности используются выражения

$$\left. \begin{aligned} X'_A &= Px_{\varepsilon} + X_A \cos \psi_{\varepsilon} - Y_A \sin \psi_{\varepsilon}; \\ Y'_A &= Py_{\varepsilon} + Y_A \cos \psi_{\varepsilon} + X_A \sin \psi_{\varepsilon}; \\ Z'_A &= h - Z_A. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Вследствие отклонения ЛА от заданной траектории полёта и недостаточного взаимного перекрытия аэрофотоснимков в формируемой трёхмерной модели местности

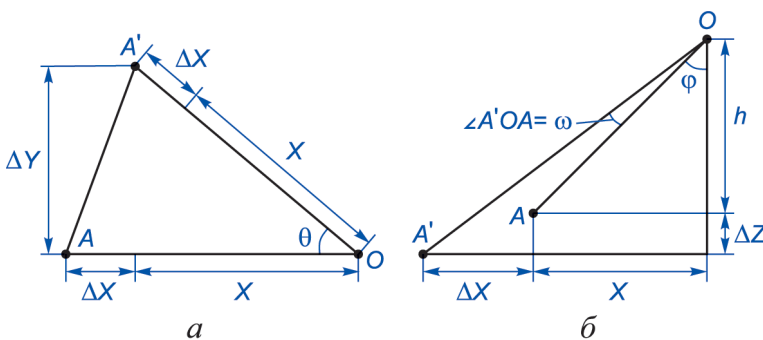


Рис. 3. Проекция погрешностей измерения в системе координат ЛА на горизонтальную (а) и вертикальную (б) плоскости:

$A'(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$ – погрешности измерения координат произвольной точки $A(X, Y, Z)$ на местности; O – начало координат; h – высота проведения аэрофотосъёмки; θ – погрешность измерения угла отклонения ЛА от курса; ω – погрешность ориентирования гиросtabilизирующей установки

Fig. 3. Projections of measurement errors in the coordinate system of the aircraft on the horizontal plane (a); on the vertical plane (b):

$A'(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$ – errors in measuring the coordinates of an arbitrary point $A(X, Y, Z)$ on the ground; O – origin; h – height of aerial photography; θ – error in measuring the angle of deviation of the aircraft from the course; ω – orientation error of the gyrostabilizing device

могут возникать разрывы [18]. Причиной возникновения разрывов в модели также является то, что ВЛС формирует линии развертки с некоторой частотой. Поскольку частота фотографирования АФК намного меньше частоты формирования линий развертки, то за период фотографирования формируется некоторое множество линий развертки. Следовательно, для устранения разрывов в модели необходимо выполнить интерполяцию по области сканирования.

Для этого частота фотографирования АФК подбирается так, чтобы отношение частоты сканирования ν_c к частоте фотографирования ν_{ϕ} выражалось натуральным числом. При этом момент фотографирования должен быть синхронизирован по времени с формированием линии развертки. Коэффициент k_j для расчёта положения ЛА в момент формирования линии развертки относительно его положения в момент времени фотографирования t_{ε} определяется следующим выражением:

$$k_j = j \nu_{\phi} / \nu_c.$$

Тогда выражения (1) для определения координат точек в промежуточных линиях развертки, сформированных ВЛС за интервал времени между моментами фотографирования ($t_{\varepsilon}, t_{\varepsilon+1}$), принимают следующий вид:

$$X'_i = Px_{\varepsilon} + k_j \Delta X + X_i \cos(\psi_{\varepsilon} + k_j \Delta \psi) - Y_i \sin(\psi_{\varepsilon} + k_j \Delta \psi);$$

$$Y'_i = Py_{\varepsilon} + k_j \Delta Y + Y_i \cos(\psi_{\varepsilon} + k_j \Delta \psi) + X_i \sin(\psi_{\varepsilon} + k_j \Delta \psi);$$

$$Z'_i = h + k_j \Delta Z - Z_i.$$

Линии развертки ВЛС помещаются в декартовую систему координат съёмочного участка, и на них накладывается координатная сетка. В результате пересечений линий развертки ВЛС с вертикальными прямыми, проходящими через крайние точки этих линий, образуются замкнутые области, ограниченные участком съёмки. В процессе интерполяции по этим областям образуется облако точек, представляющее собой точечную модель местности. При этом разрешение полученной модели зависит от установленного размера ячеек координатной сетки. Путём совмещения масштабированных изображений аэрофотоснимков с полученным облаком точек формируется цифровая модель местности.

Оценка методической погрешности определения координат. Методическую погрешность представленного способа оценивали посредством имитационного моделирования процессов проведения аэрофотосъёмки и лазерного сканирования местности [17]. Цифровую модель земной поверхности (рис. 2) строили с учётом погрешностей определения координат ЛА по сигналам ГНСС. Затем полученные в ходе моделирования аэрофотоснимки и данные лазерного сканирования подвергали

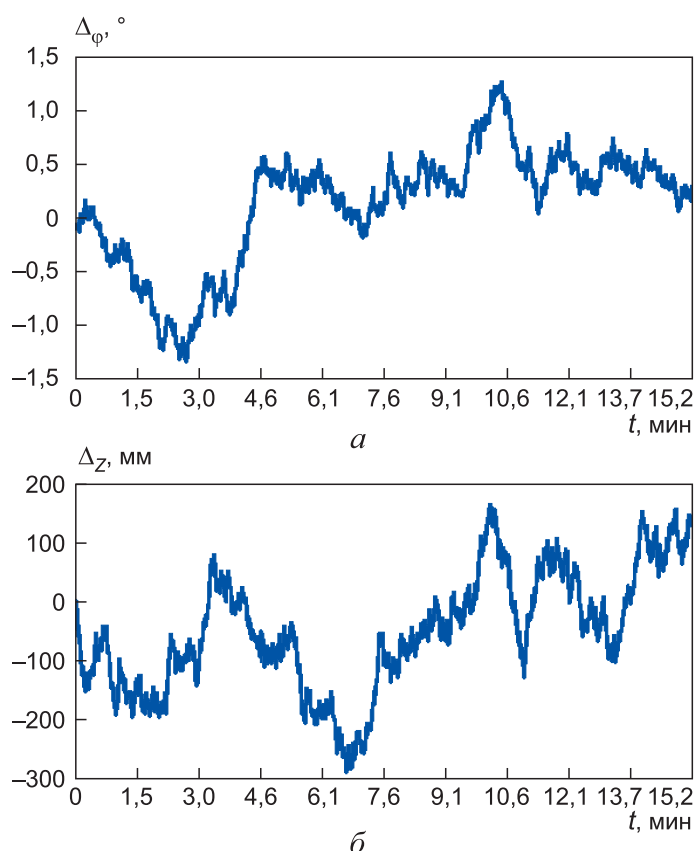


Рис. 4. Временные зависимости отклонения $\Delta\varphi$ ЛА от курса (а) и заданной высоты ΔZ полёта (б)

Fig. 4. Graphs of the aircraft deviation $\Delta\varphi$ from the course (a) and the fixed flight altitude ΔZ (b)

компьютерной обработке в соответствии с описанным методом цифровой обработки. С помощью данного метода корректировали траекторию полёта ЛА и вычисляли поправки координат точек съёмки, определенных по сигналам ГНСС. В заключение оценивали влияние метода на точность формирования цифровой модели местности.

В созданной имитационной модели учитывали реальные условия проведения аэрофотосъёмки, а также технические характеристики современных устройств, применяемых для этой цели. В расчёт принимали технические характеристики среднеформатной цифровой аэрофотосъёмочной камеры с разрешением 11608×8708 пикселей, физический размер пиксела 4,6 мкм, фокусное расстояние объектива 100 мм. Высоту аэрофотосъёмки устанавливали на отметке $h=50$ м. Проводили маршрутную съёмку местности вдоль железнодорожного пути в течение 16 мин при переменном ветре со скоростью до 12 м/с. Погрешность ориентирования АФК и ВЛС гиростабилизирующей установкой принимали $\omega=\pm 0,1^\circ$. Погрешность измерения координат ЛА приёмником сигналов ГНСС задавали в пределах $\Delta_{\text{ГНСС}}=\pm 20$ мм.

Погрешность измерения координат точек на местности Δ_{XYZ} представляет собой суммарную погрешность, состоящую

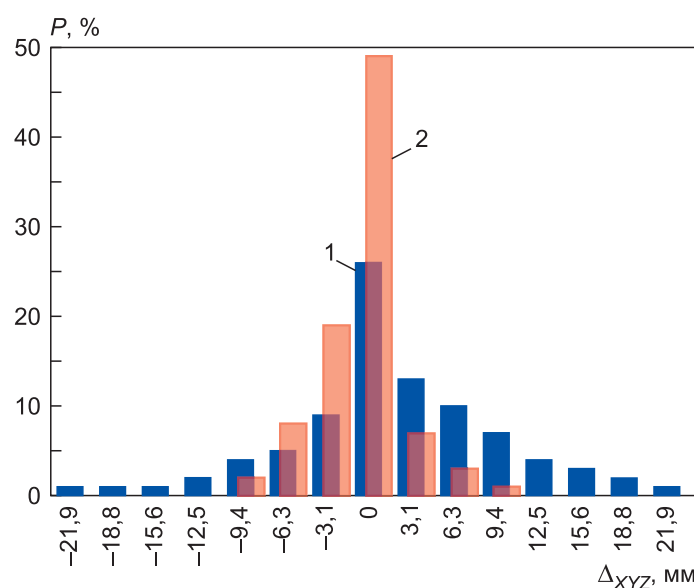


Рис. 5. Гистограммы распределения погрешности определения координат точек на местности до (1) и после (2) компьютерной обработки

Fig. 5. Histograms of the distribution of the error in determining the coordinates of points on the ground – before (1) and after (2) computer processing

из погрешностей измерения координат точек на местности в системе координат ЛА и глобальной системе координат ГНСС:

$$\Delta_{XYZ} = \Delta_{\text{ЛА}} + \Delta_{\text{ГНСС}}. \quad (2)$$

На рис. 3 графически представлены ортогональные проекции абсолютных погрешностей $\Delta_{\text{ЛА}}$ определения координат точек (ΔX , ΔY , ΔZ) на оси системы координат ЛА. В горизонтальной плоскости (рис. 3, а) погрешность определения координаты ΔY произвольной точки А на поверхности местности зависит от погрешности θ измерения угла отклонения ЛА от курса. В вертикальной плоскости (рис. 3, б) погрешности определения координат ΔX , ΔZ зависят от величины погрешности ориентирования гиростабилизирующей установки ω и погрешности определения высоты ЛА над рельсовой колеёй. Наибольший вклад в погрешность $\Delta_{\text{ЛА}}$ на малой высоте h проведения аэрофотосъёмки вносит погрешность определения координаты ΔY , поскольку погрешность измерения угла отклонения ЛА от курса (рыскание) превышает погрешность ориентирования гиростабилизирующей установки. Следовательно, погрешность $\Delta_{\text{ЛА}}$ можно выразить через ΔY – наибольшую из погрешностей измерения координат, и представить с помощью следующего равенства:

$$\Delta_{\text{ЛА}} = \Delta Y = (h + \Delta Z)(X + \Delta X) / ((h + \Delta Z)\Delta Y / (X + \Delta X)). \quad (3)$$

Поскольку погрешность измерения расстояний ВЛС пренебрежимо мала по сравнению с погрешностью $\Delta_{\text{ГНСС}}$, то,

применив тригонометрические формулы, можно записать равенство (3) в виде

$$\Delta_{\text{ЛА}} = (h + \Delta_{\text{ГНСС}}) \operatorname{tg}(\omega + \varphi) \sin \theta. \quad (4)$$

После подстановки (4) в (2) погрешность измерения координат точек на местности Δ_{XYZ} определяется как

$$\Delta_{\text{XYZ}} = (h + \Delta_{\text{ГНСС}}) \operatorname{tg}(\omega + \varphi) \sin \theta + \Delta_{\text{ГНСС}}.$$

На рис. 4, 5 представлены полученные результаты имитационного моделирования процесса построения цифровой модели местности, отображающие распределение погрешности определения координат точек на местности.

Выполнено сравнение существующего и предложенного методов формирования цифровых моделей местности по аэрофотоснимкам и данным лазерного сканирования, полученным в процессе аэросъёмки. Для сравнительной оценки приведены гистограммы распределения погрешности, полученные до и после компьютерной обработки аэрофотоснимков и данных лазерного сканирования описанным выше методом (см. рис. 5). Стандартное отклонение по выборке результатов измерений до и после применения компьютерной обработки аэрофотоснимков составляло 7,9 и 3,5 мм соответственно. Таким образом, описанное техническое решение, основанное на цифровой обработке аэрофотоснимков и данных лазерного сканирования, позволило уменьшить до 50 % доверительный интервал распределения погрешности, возникающей при определении координат точек на местности с помощью ГНСС.

Заключение. В ходе настоящего исследования повышена точность построения цифровой модели местности вдоль железнодорожного пути за счёт уменьшения погрешности определения координат точки съёмки с борта ЛА. Для этого применён новый метод компьютерной обработки материалов аэрофотосъёмки и данных лазерного сканирования местности, с помощью которого вычислены поправки к координатам точек съёмки и скорректирована траектория полёта ЛА, что способствовало повышению точности определения координат точек на местности.

На небольших (до 100 м) высотах проведения плановой аэрофотосъёмки с применением современной АФК методическая погрешность определения координат ЛА предложенным способом не превысила 20 мм. Угловая погрешность определения вектора перемещения ЛА составила менее 1', что позволило уменьшить составляющую погрешности, обусловленную рысканием ЛА. В результате цифровые модели местности вдоль железнодорожного пути, выполненные посредством компьютерной обработки материалов аэрофотосъёмки и данных лазерного сканирования, не имели значительных искажений. При этом устранено влияние условий приёма сигналов ГНСС на точность определения координат точек и обеспечена возможность применения цифровых моделей местности, полученных с помощью ЛА, для оперативной диагностики протяжённых участков железнодорожного пути.

Список литературы

1. Васюкевич Е. Б. На путевой секции научно-технического совета // Путь и путевое хозяйство. 2011. № 3. С. 22–28.
2. Попов С. Н. Балластный слой железнодорожного пути. М.: Транспорт, 1965. 183 с.
3. Абрашито А. А. Механизм образования выплесков в балластной призме // Мир транспорта. 2015. № 3 (58). С. 210–217.
4. Непомнящий Н. В., Косенко С. А. Анализ работы балластного слоя железнодорожного пути при длительной эксплуатации // Тенденции развития науки и образования. 2018. № 43-8. С. 52–56. <https://doi.org/10.18411/lj-10-2018-194>
5. Шаповалов В. Л., Явна В. А., Ермолов К. М. и др. Инженерные решения по повышению устойчивости верхнего строения железнодорожного пути // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2017. № 4 (68). С. 119–135.
6. Михалкин И. К., Симаков О. Б., Седелкин Ю. А. Автоматизированные средства контроля балластной призмы и земляного полотна в системе комплексной диагностики инфраструктуры // Путь и путевое хозяйство. 2011. № 5. С. 16–18.
7. Бугаенко В. М. Мониторинг и диагностика инфраструктуры скоростными мобильными комплексами // Путь и путевое хозяйство. 2015. № 4. С. 12–16.
8. Михалкин И. К., Седелкин Ю. А. Диагностический комплекс СМДЛ-2ТЭ116 – новый подход к диагностике // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. 2016. № 1 (33). С. 64–67.
9. Idachaba F. E., *Oil and Gas Facilities*, 2016, vol. 5, no. 1, pp. 47–52. <https://doi.org/10.2118/172471-PA>
10. Ondracek J., Vanek O., Pechoucek M., *Advances in Practical Applications of Heterogeneous Multi-Agent Systems. The PAAMS Collection. 12th International Conference, Salamanca, Spain, June 4–6, 2014, Lecture Notes in Computer Science*, 2014, vol. 8473, pp. 219–230. https://doi.org/10.1007/978-3-319-07551-8_19
11. Кадничанский С. А., Курков М. В., Курков В. М., Чибунчиев А. Г. О сертификационных испытаниях программно-аппаратного комплекса на основе беспилотного воздушного судна «Геоскан 401» // Геодезия и картография. 2020. Т. 81. № 3. С. 32–38. <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2020-957-3-32-38>
12. Пат. № 2591875С1 РФ / Ревель-Муроз П. А., Чужин С. Н., Прохоров А. Н. и др. // Изобретения. Полезные модели. 2016. № 20.
13. Розенберг И. Н. Применение спутниковых и геоинформационных технологий в развитии путевого хозяйства // Бюллетень Объединённого учёного совета ОАО РЖД. 2012. № 5. С. 8–20.
14. Жидов В. М. Обоснование комплексирования спутниковых и инерциальных измерений для съёмки железнодорожных путей // Геодезия и картография. 2010. № 11. С. 10–12.
15. Павлов В. И. Фотограмметрия. Теория одиночного снимка и стереоскопической пары снимков. СПб.: Санкт-Петербургский горный институт им. Г. В. Плеханова, 2006. 175 с.

16. Пат. № 2726256С1 РФ / Рощин Д. А. // Изобретения. Полезные модели. 2020. № 19.

17. Рощин Д. А. Способ применения компьютерного зрения для повышения точности проведения аэрофототопографической съёмки местности // Прикладная информатика. 2017. № 6. С. 58–70.

18. Рощин Д. А. Повышение точности формирования трёхмерной модели местности // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2019. Т. 17, № 2. С. 46–52. <https://doi.org/10.18127/j20700814-201902-04>

References

1. Vasyukevich E. B., *Put' i putevye khozyaistvo*, 2011, no. 3, pp. 22–28 (in Russian).

2. Popov S. N., *Ballastnyi sloi zheleznodorozhnogo puti*, Moscow, Transport Publ., 1965, 183 p. (in Russian).

3. Abrashitov A. A., *World of Transport and Transportation*, 2015, vol. 13, no. 3 (58), pp. 210–217 (in Russian).

4. Nepomnyashchii N. V., Kosenko S. A., *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya*, 2018, no. 43-8, pp. 52–56. <https://doi.org/10.18411/lj-10-2018-194>

5. Shapovalov V. L., Yavna V. A., Ermolov K. M., et al., *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya*, 2017, no. 4 (68), pp. 119–135 (in Russian).

6. Mikhalkin I. K., Simakov O. B., Sedelkin Yu. A., *Put' i putevye khozyaistvo*, 2011, no. 5, pp. 16–18 (in Russian).

7. Bugaenko V. M., *Put' i putevye khozyaistvo*, 2015, no. 4, pp. 12–16 (in Russian).

8. Mikhalkin I. K., Sedelkin Yu. A., *Vestnik Instituta problem estestvennykh monopolii: Tekhnika zheleznykh dorog*, 2016, no. 1 (33), pp. 64–67 (in Russian).

9. Idachaba F. E., *Oil and Gas Facilities*, 2016, vol. 5, no. 1, pp. 47–52. <https://doi.org/10.2118/172471-PA>

10. Ondracek J., Vanek O., Pechoucek M., *Advances in Practical Applications of Heterogeneous Multi-Agent Systems. The PAAMS Collection. 12th International Conference*, Salamanca, Spain, June 4-6, 2014, *Lecture Notes in Computer Science*, 2014, vol. 8473, pp. 219–230. https://doi.org/10.1007/978-3-319-07551-8_19

11. Kadnichansky S. A., Kurkov M. V. et al., *Geodesy and cartography*, 2020, no. 3 (81), pp. 32–38. <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2020-957-3-32-38>

12. RF Patent no. 2591875, Revel-Muroz P. A., Chudinov S. N., Prokhorov A. N. et al., *Byull. Izobret.*, no. 20 (2016).

13. Rozenberg I. N., *Byulleten' Ob"edinennogo uchenogo soveta OAO RZHD*, 2012, no. 5, pp. 8–20 (in Russian).

14. Zhidov V. M., *Geodesy and Cartography*, 2010, no. 11, pp. 10–12 (in Russian).

15. Pavlov V. I., *Fotogrammetriya. Teoriya odinochnogo snimka i stereoskopicheskoy pary snimkov*, St. Petersburg, Sankt-Peterburgskij gornyj institut im. G. V. Plekhanova Publ., 2006, 175 p. (in Russian).

16. RF Patent no. 2726256, Roshchin D. A., *Byull. Izobret.*, no. 19 (2020).

17. Roshchin D. A., *Journal of Applied Informatics*, 2017, vol. 12, no. 6(72), pp. 58–70 (in Russian).

18. Roshchin D. A., *Information-measuring and Control Systems*, 2019, vol. 17, no. 2, pp. 46–52 (in Russian). <https://doi.org/10.18127/j20700814-201902-04>

Статья поступила в редакцию 03.06.2020; принята к публикации 24.07.2020.