Преобразование серии снимков камеры БПЛА для совместной обработки со спутниковыми изображениями

А. Г. Ташлинский [1], А. А. Белов [1], Г. Л. Сафина [2]

[1] *Ульяновский государственный технический университет*
Ульяновск, 432027, Россия
E-mail: tag@ulstu.ru

[2] *Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, 129337, Россия*

Предложена методика совмещения в реальном времени изображений, получаемых с камеры, установленной на БПЛА, с одновременной компенсацией их проективных искажений и переводом в систему географических координат EPSG:3395. Методика позволяет получить передискретизированные пространственно-совмещённые изображения и направлена на их последующую обработку совместно со спутниковыми изображениями. Она основана на формировании по известным углам крена, тангажа и рыскания БПЛА из текущего кадра изображения нормализованного изображения, совмещении нескольких последовательно получаемых нормализованных изображений в единое изображение с использованием оригинальных псевдоградиентных алгоритмов и переводе его из локальной системы координат кадра в глобальные географические координаты. Методика показала высокую эффективность при относительно небольшой вычислительной сложности и может быть реализована как при наземной автоматизированной обработке изображений, так и на борту БПЛА. Приводятся экспериментальные результаты на реальных последовательностях изображений. Разработанные алгоритмы реализованы на языке C++ с использованием библиотеки OpenCV с открытым исходным кодом. Программная реализация перенесена также на одноплатные компьютеры Raspberry Pi 4B 8GB и Radxa Rock 5 model A 16GB. Скорость обработки на Raspberry составила 10 кадров в секунду, на Radxa — до 16 кадров в секунду.

Ключевые слова: обработка изображений, проективные искажения, модель подобия, компенсация, оценка деформаций, адаптация, стохастическое оценивание

Одобрена к печати: 20.11.2025
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-1-49-62

Введение

Применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в различных сферах человеческой деятельности постоянно растёт. Неотъемлемая составляющая БПЛА — камеры, формирующие изображения и видео различного назначения. Обработка изображений и видео с камер БПЛА для решения различных практических задач давно стала самостоятельным научным направлением. Приведём только несколько частных примеров таких задач: выделение и идентификация на изображениях с БПЛА объектов интереса (Ren et al., 2022); построение по аэроизображениям плана местности (Li et al., 2021) и пространственно-временной карты с дополнительным использованием наземных камер (Štroner et al., 2021); периодический мониторинг технических объектов, в частности, динамики изменения их дефектов (Суетин и др., 2024); ориентация и навигация БПЛА при отсутствии возможности использования сигналов глобальных навигационных систем только по данным инерциальной системы БПЛА и аэроизображениям (Qiu et al., 2024) или совместно со спутниковыми снимками (Cui et al., 2023). Одним из направлений стало также совмещение спутниковых и аэроизображений БПЛА для их дальнейшей совместной обработки (Wang et al., 2024; Zhuang et al., 2021).

Изображения, получаемые при съёмке с БПЛА, как правило, имеют проективные искажения (Hartley, Zisserman, 2003), которые представляют собой один из мешающих факторов при решении большинства перечисленных выше задач, в частности совместной обработке со спутниковыми изображениями. Проективные искажения возникают из-за отклонения

оптической оси камеры от нормализованного положения по отношению к земной поверхности (нулевые углы крена, тангажа и рыскания при отсутствии погрешности крепления камеры) (Агапов, 1996). Учёт или компенсация в реальном времени таких искажений представляется актуальной задачей в различных практических приложениях. Для её решения требуется оценка параметров искажений.

При наличии у камеры БПЛА гироподвеса для компенсации взаимных геометрических искажений кадров видеопоследовательности можно использовать привязку смежных кадров (Tashlinskii, 2008). Но это будет оценка не проективных искажений относительно нормального положения камеры к земной поверхности, а оценка параметров расхождения взаимных проективных искажений кадров. Такое оценивание оказывается вычислительно затратным, поскольку даже в самом простом случае проективного преобразования — плоскости в плоскость — модель деформаций содержит восемь искомых параметров (Платонов, 2007).

При отсутствии у камеры гироподвеса для компенсации проективных искажений можно использовать значения углов крена, тангажа и рыскания с инерциальной системы БПЛА, синхронизированные с кадрами видео. Один из таких подходов рассмотрен в настоящей работе. Кроме того, решены задачи совмещения нормализованных изображений заданных кадров, получаемых с камеры, и их представления в географических координатах. Такое представление аэроизображений может, например, повысить эффективность их последующей обработки совместно со спутниковыми изображениями.

Постановка задачи

Будем считать, что поверхность Земли, наблюдаемая камерой БПЛА, плоская. Заметим, что такое предположение для изображений, полученных с камер БПЛА самолётного типа, оказывается вполне допустимым при фокусном расстоянии камер порядка 50 мм и высоте полёта более 400 м. На практике же высота полёта БПЛА этого класса, как правило, значительно выше. Кроме того, в следующем разделе будет учтена также кривизна земной поверхности.

Рассмотрим подробнее механизм возникновения проективных искажений. На *рис. 1* координаты камеры БПЛА соответствуют точке O, а положение земной поверхности условно отмечено серым цветом. Формируемые камерой кадры изображения условно показаны в прямоугольнике A (см. *рис. 1а*), который приведён в увеличенном масштабе на *рис. 1б*. Прямоугольник $LPUV$ — это изображение участка $L'P'U'V'$ земной поверхности, которое камера БПЛА формировала бы в ситуации, когда её оптическая ось $O\text{-}O'\text{-}O''$ направлена нормально к поверхности Земли (далее — нормализованное изображение). При этом изображения областей $LPUV$ и $L'P'U'V'$ проективных искажений не имеют (отличаются только масштабом).

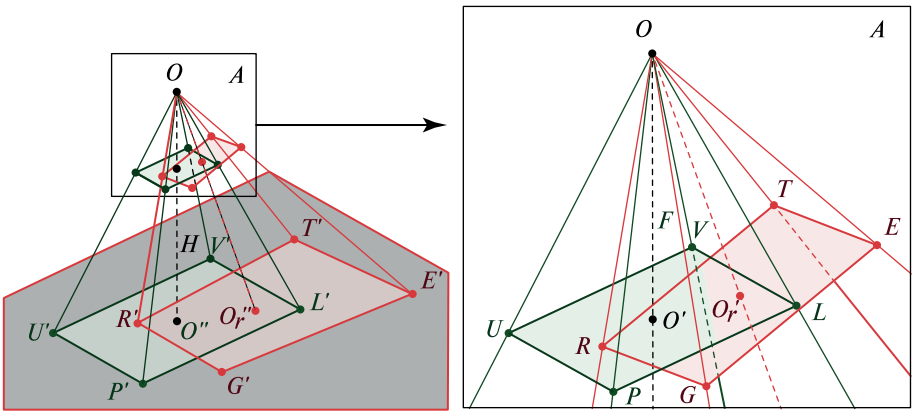
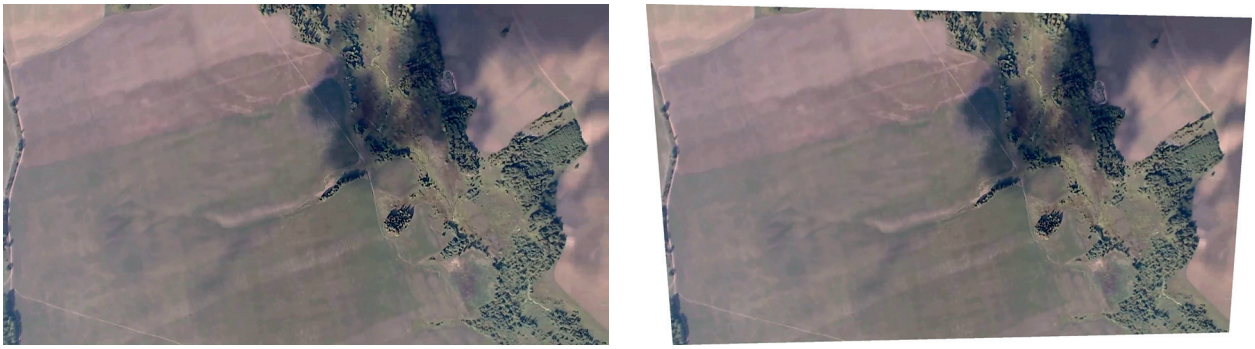


Рис. 1. Пояснение формирования нормализованного изображения

Если же направление оптической оси отличается от нормали (например, направление $O\text{-}O_r'\text{-}O_r''$), то камера сформирует изображение, периметру которого соответствует прямоугольник *EGRT*, отражающий четырёхугольник $E'G'R'T'$ на земной поверхности. Очевидно, что в этом случае изображение *EGRT* по отношению к $E'G'R'T'$ будет иметь проективные искажения.

Пример реального изображения с камеры БПЛА при углах тангажа, крена и рыскания 6,985, 14,958 и 1,854° соответственно приведён на *рис. 2а*, а на *рис. 2б* — передискретизированное нормализованное изображение с компенсированными проективными искажениями.



а *б*

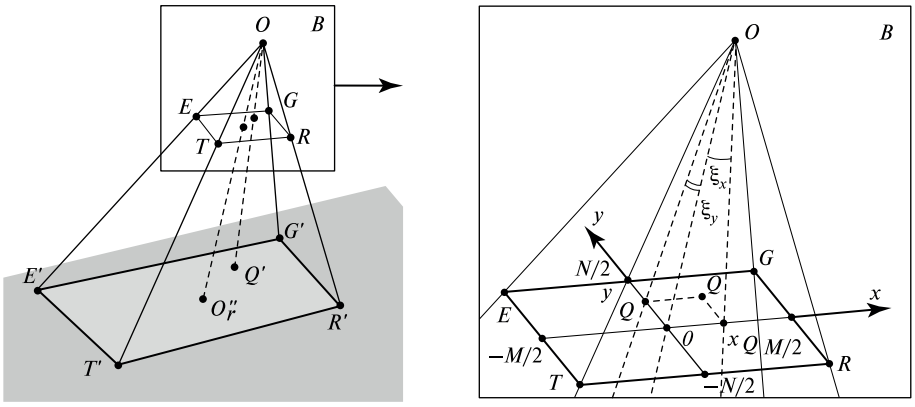
Рис. 2. Пример изображения с камеры БПЛА при α = 6,985°, ω = 14,958° и κ = 1,854° (*а*) и его нормализованный вид (*б*)

Задача исследования состоит в разработке методики получения по известным углам крена, тангажа и рыскания БПЛА из текущего кадра изображения нормализованного изображения, совмещении («сшивка») нескольких последовательно формируемых нормализованных изображений в единое и переводе его из локальной системы координат кадра в глобальные географические координаты. То есть перевод аэроизображения в формат, который может быть использован для совместной обработки со спутниковыми изображениями.

При этом отметим, что решение поставленных задач направлено на реализацию на борту БПЛА в реальном времени на одноплатных компьютерах без видеокарт, поэтому возможности применения нейронных сетей (Борисов и др., 2024; Kazanskiy et al., 2025) не рассматривались.

Компенсация проективных искажений кадров изображений

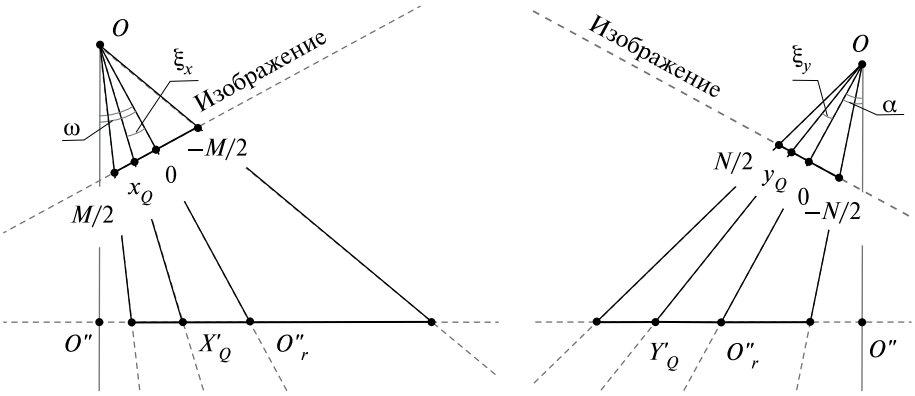
Координаты точек в трёхмерном пространстве будем обозначать прописными буквами (*X*, *Y*, *Z*), а координаты точек в плоскости изображения кадра, сформированного камерой БПЛА, — строчными буквами (*x*, *y*). Примем также начало координат трёхмерного пространства в точке (0, 0, *H*), где *H* — высота камеры БПЛА над поверхностью Земли. Так, точка Q' (*рис. 3а*, см. с. 52) на земной поверхности с трёхмерными координатами (X_Q, Y_Q, Z_Q) отображается на кадре *EGRT* точкой *Q* с координатами (x_Q, y_Q) (подробнее кадр *EGRT* показан на *рис. 3б*). Здесь, как и на *рис. 1*, луч $O\text{-}O_r'\text{-}O_r''$ показывает главную оптическую ось камеры БПЛА. Координаты точки пересечения этой оси с плоскостью кадра примем за начало координат (0, 0) изображения кадра. При этом получаем локальную систему координат текущего кадра. Размер этого кадра (см. *рис. 1б*) по оси 0–*x* принят равным *M*, а по оси 0–*y* — *N*. При этом базовая ось 0–*x* соответствует сечению изображения кадра плоскостью P_x, перпендикулярной вектору текущей скорости БПЛА и проходящей через точку (0, 0) (начало координат) локальной системы координат кадра. Сечение плоскостью P_y, параллельной плоскости, образуемой вектором скорости БПЛА и вектором нормали к поверхности Земли, образует базовую ось 0–*y* с положительным направлением, совпадающим с направлением вектора скорости.



а *б*

Рис. 3. Связь трёхмерных координат с локальной системой двухмерных координат текущего кадра

Если фокусное расстояние камеры F (соответствует расстоянию OO' на *рис. 1*), то в трёхмерных координатах плоскость изображения кадра проходит через точку (0, 0, $-F$) перпендикулярно главной оси камеры. Тогда на *рис. 3б* $Z_Q = Z_{-M/2} = Z_{-N/2} = Z_{M/2} = Z_{N/2} = -F$. Обозначим на этом рисунке угол отклонения луча $O{-}x_Q$ от направления главной оси камеры через ξ_x, а отклонение луча $O{-}y_Q$ — через ξ_y, где (x_Q, y_Q) — координаты точки Q в локальной системе координат кадра. Сказанное поясняется также *рис. 4*, который отражает секущие плоскости P_x (см. *рис. 4а*) и P_y (см. *рис. 4б*). На рисунке обозначения соответствуют обозначениям *рис. 1* и *3*, дополнительно показаны угол тангажа α и угол крена ω БПЛА.



а *б*

Рис. 4. Секущие плоскости P_x (*а*) и P_y (*б*)

Из *рис. 4* следует, что

$$\xi_x = \arctan\left(\frac{x_Q}{F}\right), \quad \xi_y = \arctan\left(\frac{y_Q}{F}\right). \tag{1}$$

Используя выражения (1), выразим координаты точек x_Q, y_Q, $x_{N/2}$, $y_{N/2}$, $x_{M/2}$ и $y_{M/2}$ кадра через фокусное расстояние F:

$$x_Q = -F\tan\left(\xi_{x_Q}\right), \quad y_Q = -F\tan\left(\xi_{y_Q}\right),$$

$$x_{-M/2} = F\tan\left(\left|\xi_{x_{-M/2}}\right|\right), \quad x_{M/2} = -F\tan\left(\left|\xi_{x_{M/2}}\right|\right),$$

$$y_{-N/2} = F\tan\left(\left|\xi_{y_{-N/2}}\right|\right), \quad y_{N/2} = -F\tan\left(\left|\xi_{y_{N/2}}\right|\right).$$

Найдём соответствие координат точек изображения текущего кадра и его нормализованной версии через углы тангажа α, крена ω и рыскания κ БПЛА. При этом решение будем искать в трёхмерных координатах с последующим переходом в локальную систему координат изображения кадра.

Учитывая, что начало координат текущего кадра соответствует в трёхмерной системе координат координатам (0, 0, $-F$) и луч $O\text{-}O_r'\text{-}O_r''$ перпендикулярен плоскости изображения, соответствие локальной системе координат исходного кадра можно определить как:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ -F \end{pmatrix}.$$

Тогда матрица поворота изображений в трёхмерном пространстве относительно точки O, преобразующая исходное изображение в нормализованное, принимает вид:

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}(\alpha)\cdot\mathbf{M}(\omega)\cdot\mathbf{M}(\kappa) = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix}, \tag{2}$$

где $\mathbf{M}(\alpha)$, $\mathbf{M}(\omega)$ и $\mathbf{M}(\kappa)$ — матрицы поворота, задаваемые соответственно углами тангажа, крена и рыскания.

Несложно показать, что элементы комбинированной матрицы поворота $\mathbf{M}$ в трёхмерном пространстве определяются выражениями:

$$r_{11} = \cos(\omega)\cdot\cos(\kappa); \quad r_{12} = -\cos(\omega)\cdot\sin(\kappa);$$

$$r_{13} = \sin(\omega);$$

$$r_{21} = \cos(\alpha)\cdot\sin(\kappa) + \sin(\omega)\cdot\sin(\alpha)\cdot\cos(\kappa);$$

$$r_{22} = \cos(\alpha)\cdot\cos(\kappa) - \sin(\omega)\cdot\sin(\alpha)\cdot\sin(\kappa);$$

$$r_{23} = -\cos(\omega)\cdot\sin(\alpha);$$

$$r_{31} = \sin(\alpha)\cdot\sin(\kappa) - \cos(\alpha)\cdot\sin(\omega)\cdot\cos(\kappa);$$

$$r_{32} = \sin(\alpha)\cdot\cos(\kappa) + \cos(\alpha)\cdot\sin(\omega)\cdot\sin(\kappa);$$

$$r_{33} = \cos(\omega)\cdot\cos(\alpha).$$

Тогда точке на исходном изображении с координатами (X, Y, Z) на нормализованном изображении будут соответствовать координаты

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \mathbf{M}\cdot\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}.$$

При этом преобразование в локальную систему координат исходного изображения определяется простым выражением:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dfrac{-FX'}{Z'} \\ \dfrac{-FY'}{Z'} \end{pmatrix}. \tag{3}$$

Отметим также, что описанный подход применим и для преобразования системы координат следующего (или k-го) кадра в систему координат предыдущего, например, для их совмещения. Для этого в матрице $\mathbf{M}$ вместо углов крена, тангажа и рыскания текущего кадра нужно взять разность соответствующих углов текущего и предыдущего кадров.

Совмещение нормализованных изображений

Совмещение («сшивку») нормализованных изображений рассмотрим на примере совмещения с условно опорным изображением Z'_r одного совмещаемого Z'_c. При этом расширение на большее число совмещаемых изображений является очевидным. Используем процедуру псевдоградиентной адаптации (Цыпкин, 1995), предполагающую задание некоторой модели деформаций с вектором параметров $\vec{\alpha}$, а также целевой функции J качества совмещения, экстремум которой в пространстве параметров находится процедурой итерационно. В частности, безыдентификационную процедуру оценивания параметров взаимных геометрических деформаций $\mathbf{Z}'_r$ и $\mathbf{Z}'_c$ можно записать в виде (Tashlinskii et al., 2024):

$$\hat{\vec{\alpha}}_t = \hat{\vec{\alpha}}_{t-1} - \mathbf{\Lambda}_t \nabla_J \left(\hat{\vec{\alpha}}_{t-1}, \tilde{Z}'_{rt}, Z'_c\right), \tag{4}$$

где $\hat{\vec{\alpha}}_t$ — вектор оценок параметров деформаций, сформированный на t-й итерации (при этом задаётся некоторое начальное приближение параметров $\hat{\vec{\alpha}}_0$); $\mathbf{\Lambda}_t$ — матрица обучения, определяющая шаг изменения оценок; $\nabla_J(\cdot)$ — псевдоградиент функции качества $J\left(\hat{\vec{\alpha}}_{t-1}, \tilde{Z}'_{rt}, Z_c\right)$; $\tilde{\mathbf{Z}}'_{rt}$; — передискретизированное по текущим оценкам $\hat{\vec{\alpha}}_{t-1}$ опорное изображение $\mathbf{Z}'_r$; $\hat{\vec{\alpha}}_{t-1}$ — вектор оценок параметров деформаций, полученный на предыдущей (t–1)-й итерации; $t = \overline{1,T}$ — номер итерации.

С учётом анализа, проведённого в работах (Magdeev, Tashlinskii, 2014; Tashlinskii et al., 2012), был применён частный случай выражения (3) — релейная стохастическая процедура:

$$\hat{\vec{\alpha}}_t = \hat{\vec{\alpha}}_{t-1} - \Lambda \cdot \overrightarrow{\mathrm{sign}} \nabla_J \left(\hat{\vec{\alpha}}_{t-1}, Z_t\right),$$

где Z'_t — локальная выборка из μ пикселей $\tilde{z}'^{r}_{(x,y)_j} \in \tilde{\mathbf{Z}}'_{rt}$ и $z'^{c}_{(x,y)_j} \in \mathbf{Z}'_c$, $(x, y)_j \in \Omega_t$ — координаты j-го пикселя, $j = \overline{1, \mu}$.

При этом $z'^{c}_{(x,y)_j}$ на совмещаемом изображении $\mathbf{Z}'_c$ выбирались случайным образом, $\tilde{z}'^{r}_{(x,y)_j}$ брались из $\tilde{\mathbf{Z}}'_{rt}$ с теми же координатами, а их яркость находилась с использованием билинейной интерполяции.

Исследование показало, что применение знаковой функции способствует повышению устойчивости оценок $\hat{\vec{\alpha}}_t$ к яркостным помехам. Процедура (4) удовлетворяет требованиям простоты, быстрой сходимости оценок и работоспособности в условиях априорной неопределённости, обеспечивает субпиксельную точность совмещения. Отметим, что последнее качество для решаемой задачи особенно важно.

Целевые функции в зависимости от условий могут быть весьма разнообразны. В решаемой задаче изображения формируются в схожих условиях освещённости, поэтому использован средний квадрат разности яркости изображений (Tashlinskii, 2008) как требующий небольших вычислительных затрат.

Оценка целевой функции находится как:

$$\hat{J}_t = \frac{1}{\mu} \sum_{(x,\,y)_j} \left(z'^{c}_{(x,\,y)_j} - \tilde{z}'^{r}_{(x,\,y)_j}\right)^2,$$

а её псевдоградиент:

$$\nabla_J = \frac{1}{\mu} \sum_{(x,\,y)_j} 2\left(z'^{c}_{(x,\,y)_j} - \tilde{z}'^{r}_{(x,\,y)_j}\right) \cdot \frac{\partial \tilde{z}'^{r}_{(x,\,y)_j}}{\partial \vec{\alpha}}.$$

Анализ показал, что в качестве модели взаимных деформаций для нормализованных изображений достаточно модели (Gonzalez, Woods, 2017), имеющей вектор параметров $\vec{\alpha} = (k, \varphi, l_x, l_y)$, где k — коэффициент масштаба; φ — угол поворота; l_x, l_y — сдвиг.

Критерием выполнения процедуры совмещения служило превышение в скользящем окне в течение заданного числа итераций порога по коэффициенту корреляции совмещаемых изображений.

Перевод локальной системы координат кадра в географическую систему координат

Найдём соответствие между координатами точки нормализованного изображения в локальной системе координат кадра и географическими координатами на земной поверхности. При этом используем распространённую систему координат EPSG:3395, представляющую собой проекцию Меркатора (Snyder, 1987) на эллипсоид WGS-84 (Iliffe, 2008). Эта система применяется, в частности, в Яндекс Картах.

Область земной поверхности в искомой системе координат, соответствующую кадру изображения, сформированного камерой БПЛА, далее будем называть «картой». Будем также считать, что известны координаты GPS (*англ.* Global Positioning System) БПЛА в момент формирования изображения кадра, угол рыскания κ_0 и высота H_0 БПЛА.

Пусть положению БПЛА соответствуют географические координаты (λ_0, ψ_0), где λ — долгота, ψ — широта. При этом точке с координатами (λ_0, ψ_0) в локальной системе координат кадра (см. *рис. 1*) соответствует точка (0, 0).

Рассмотрим вначале соответствие координат $\left(x'_L, y'_L\right)$, $\left(x'_P, y'_P\right)$, $\left(x'_U, y'_U\right)$ и $\left(x'_V, y'_V\right)$ углов нормализованного кадра изображения (см. *рис. 1*) метрическим координатам на карте в локальной системе её координат.

Учитывая выражение (3), можно записать:

$$\begin{pmatrix} X'_S \\ Y'_S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_H\left(\cos(\kappa_0)\cdot x'_S - \sin(\kappa_0)\cdot y'_S\right) \\ k_H\left(\sin(\kappa_0)\cdot x'_S + \cos(\kappa_0)\cdot y'_S\right) \end{pmatrix}, \tag{5}$$

где $S = L, P, U, V$; $k_H = H_0 l_{px} \cdot q / F$; F — фокусное расстояние камеры; l_{px} — размер пикселя карты (в м); q — множитель, определяемый отношением размеров карты в пикселях (при заданном разрешении) к размерам используемого кадра (Wolf et al., 2013).

Поскольку в общем случае угол рыскания БПЛА отличен от нуля, при задании карты в виде прямоугольника со сторонами, параллельными меридианам и параллелям, нужно найти минимальную и максимальную координаты по горизонтальной и вертикальной оси карты:

$$\left.\begin{aligned} X'_{\min\,(\max)} &= \min\,(\max)\left(X'_L, X'_P, X'_U, X'_V\right), \\ Y'_{\min\,(\max)} &= \min\,(\max)\left(Y'_L, Y'_P, Y'_U, Y'_V\right), \end{aligned}\right\} \tag{6}$$

которые и определят размеры прямоугольника.

Заметим, что для нахождения координат в глобальной метрической системе (в м) необходимо выражение (5) умножить на поправочный коэффициент k_ψ, определяемый формулой (Морозов, 1979):

$$k_\psi = \frac{\cos(\psi)}{\sqrt{1 - c^2 \cdot \sin^2(\psi)}},$$

где ψ — широта точки, для которой рассчитываются координаты (в м); c — эксцентриситет эллипсоида WGS-84.

За начало координат в проекции Меркатора принято пересечение нулевого меридиана и экватора нулевой широты (Strang, Borre, 1997). Тогда метрические координаты (X, Y), соответствующие географическим координатам (λ, ψ), на карте по долготе определяются соотношением:

$$Y = ak_\psi \cdot \ln\left(\tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\psi}{2}\right)\chi^c(\psi)\right),$$

а по широте:

$$X = ak_\psi \lambda,$$

где $\chi(\psi)=\dfrac{1-c\cdot\sin(\psi)}{1+c\cdot\sin(\psi)}$; a — большая полуось эллипсоида WGS-84. Отметим, что в эллипсоиде WGS-84 a = 6378137 м и c = 0,081819191 (Konecny, 2014).

Для перехода от метрических координат карты к её географическим координатам определим вначале на карте метрические координаты точки (в проекции Меркатора), соответствующей началу координат в локальной системе кадра (которая при принятых ограничениях соответствует географическим координатам (λ_0, ψ_0)):

$$\begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} ak_\psi \lambda_0 \\ ak_\psi \cdot \ln\left(\tan\left(\dfrac{\pi}{4}+\dfrac{\psi_0}{2}\right)\chi^{c/2}(\psi_0)\right) \end{pmatrix}.$$

Поскольку в проекции Меркатора на эллипс долгота линейно зависит от расстояния от начала координат (Hill, 2006), то при размере кадра $M\times N$ долготу произвольной точки (x', y') нормализированного изображения можно найти как:

$$\lambda^* = \frac{X_0 + \dfrac{x'}{M}\left(X'_{\max Y} - X'_{\min Y}\right)\cdot\cos(\kappa_0) + \dfrac{y'}{N}\left(Y'_{\max X} - Y'_{\min X}\right)\cdot\sin(\kappa_0)}{ak_\psi}, \tag{7}$$

где $(X'_{\min Y}, X'_{\max Y})$ и $(Y'_{\min X}, Y'_{\max X})$ — минимальные и максимальные метрические координаты области карты по базовым осям, соответствующие угловым точкам одной стороны кадра и рассчитанные в соответствии с выражением (5).

Для широты аналогичная линейность не соблюдается, поэтому для её определения используем известный итерационный алгоритм (Zhao et al., 2013), который позволяет найти нелинейное изменение географической координаты относительно её положения в регулярной метрической сетке отсчётов с небольшими вычислительными затратами.

В качестве начального приближения широты для искомой точки в алгоритме используется сферическая проекция Меркатора:

$$\psi_0 = \frac{\pi}{2} - 2\arctan\left(\exp\left(\frac{\tilde{Y}}{ak_\psi}\right)\right), \tag{8}$$

где $\tilde{Y} = -\left(Y_0 - \dfrac{x'}{M}\left(X'_{\max Y} - X'_{\min Y}\right)\cdot\sin(\kappa_0) + \dfrac{y'}{N}\left(Y'_{\max X} - Y'_{\min X}\right)\cos(\kappa_0)\right)$.

Затем широта рекуррентно уточняется по формуле

$$\psi_i = \frac{\pi}{2} - 2\arctan\left(\exp\left(\frac{\tilde{Y}}{a\cdot k_\psi}\right)\chi^{c/2}(\psi_{i-1})\right), \quad i = 1, 2, \ldots$$

до тех пор, пока разница между её текущим ψ_i и предыдущим ψ_{i-1} значением не будет меньше определённой константы (в град) — в работе принято

$$\psi^* = \left|\psi_i - \psi_{i-1}\right| \leqslant 6\cdot 10^{-9}. \tag{9}$$

Таким образом, точке с координатами (x', y') нормализованного изображения кадра с учётом компенсации искажений, вызванных кривизной поверхности Земли, на карте соответствуют географические координаты (λ^*, ψ^*), где λ^* и ψ^* определяются выражениями (7) и (9) соответственно.

Соответствие географических координат локальным координатам $\left(x'_r, y'_r\right)$ точек нормализованного совмещаемого изображения(й) $\mathbf{Z}'_c$ ищется аналогично, с той разницей, что координаты $\left(x'_r, y'_r\right)$ определяются через оценки параметров деформаций совмещаемого кадра относительно опорного. В частности, при использовании для оценивания деформаций модели подобия:

$$\begin{pmatrix} x'_r \\ y'_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{k} \cdot \cos\hat{\varphi} + \kappa\left(x'_d\right) - \sin\hat{\varphi} + \kappa\left(y'_d\right) + \hat{l}_x \\ \hat{k} \cdot \sin\hat{\varphi} + \kappa\left(x'_d\right) + \cos\hat{\varphi} + \kappa\left(y'_d\right) + \hat{l}_y \end{pmatrix},$$

где $\left(x'_d, y'_d\right)$ — координаты точек нормализованного деформированного кадра; $\hat{k}$, $\hat{\varphi}$, $\hat{l}_x$ и $\hat{l}_y$ — оценки параметров модели подобия, полученные в результате псевдоградиентного оценивания. При этом если высота БПЛА в момент получения совмещаемого кадра изменилась, то это нужно учесть в формуле (5).

Отметим, что при небольших высотах БПЛА составляющей погрешностью, вызванной кривизной поверхности Земли, можно пренебречь (Rizaldy, Firdaus, 2012) и для вычисления широты использовать сферическую проекцию Меркатора (формула (8)).

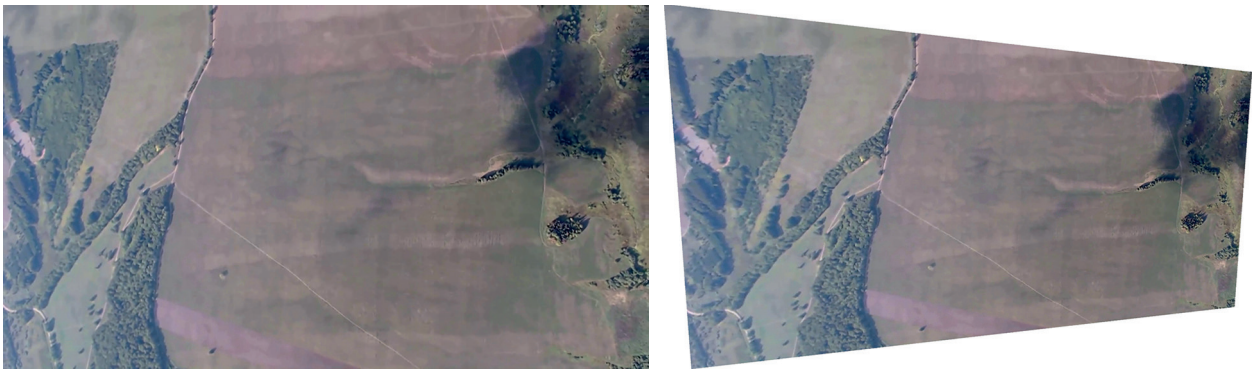
Подчеркнём также, что при псевдоградиентном оценивании параметров деформаций совмещаемого кадра использование соответствующих ему координат GPS в качестве начальных приближений нецелесообразно. Это связано с тем, что частота выдачи параметров GPS, как правило, ниже частоты кадров камеры БПЛА.

Экспериментальные результаты

Проверка адекватности полученных аналитических результатов проводилась на реальных последовательностях изображений, сформированных камерами БПЛА. Апробация алгоритмов, разработанных на основе полученных результатов, показала их работоспособность на тестовой выборке кадров с соответствующей телеметрией.

Разработанные алгоритмы реализованы на языке C++ с использованием библиотеки OpenCV с открытым исходным кодом. Программная реализация перенесена также на одноплатные компьютеры Raspberry Pi 4B 8GB и Radxa Rock 5 model A 16GB. Скорость обработки на Raspberry составила 10 кадров в секунду (через 2 кадра при частоте кадров камеры 30 кадров в секунду), на Radxa — до 16 кадров в секунду. Многоядерная структура процессоров одноплатных компьютеров (архитектура ARM (*англ.* Advanced RISC Machine)) даёт возможность вычислять проективные искажения в отдельном потоке одновременно с псевдоградиентным оцениванием параметров взаимных геометрических деформаций опорного и совмещаемого кадров, что позволяет существенно выиграть во времени относительно последовательного расчёта.

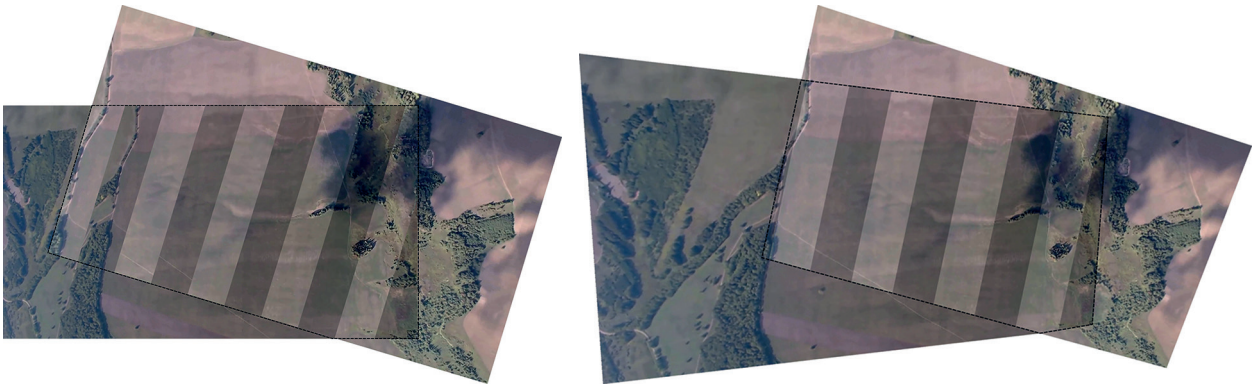
Пример исходного кадра изображения и его нормализованного вида с компенсированными в соответствии с формулами (2) и (3) проективными искажениями приведён на *рис. 2.* Пример другого кадра изображения из той же видеопоследовательности, полученного при $\alpha = 8{,}671°$, $\omega = 17{,}179°$ и $\kappa = -28{,}284°$, представлен на *рис. 5.* Там же показан его нормализованный вид.



а *б*

Рис. 5. Пример изображения с камеры БПЛА при $\alpha = 8{,}671°$, $\omega = 17{,}179°$ и $\kappa = -28{,}284°$ (*а*) и его нормализованный вид (*б*)

Результат совмещения исходных (без устранения проективных искажений) изображений, приведённых на *рис. 2* и *5*, в системе координат кадра *рис. 2* с применением псевдоградиентной процедуры (4) представлен на *рис. 6а*. При этом для удобства сравнения изображения показаны чередующимися полосками, а также у одного из изображений немного изменён контраст. Видно, что хорошее качество совмещения наблюдается только в центре общей области изображений. Ближе к краям из-за существенно различающихся проективных искажений кадров изображений совмещение явно неудовлетворительное. Совмещение нормализованных изображений *рис. 2* и *5* приведено на *рис. 6б*, который показывает хорошее качество совмещения по всей общей области изображений.



а *б*

Рис. 6. Совмещение изображений без компенсаций (*а*) проективных искажений и с ними (*б*)

Совмещённые изображения *рис. 6* переведены в географические координаты с использованием формул (7) и (9). Фрагмент Яндекс Карты, иллюстрирующий корректность перевода в географические координаты и сформированный с применением формул (3), (6), (7) и (9), приведён на *рис. 7*. Видно хорошее соответствие нормализованных изображений с камеры БПЛА, переведённых в географические координаты, и сформированного изображения Яндекс Карты.

Рис. 7. Фрагмент Яндекс Карты, соответствующий рассматриваемым изображениям

Заключение

Разработанная методика совмещения изображений, формируемых камерой БПЛА, с компенсацией проективных искажений и переводом совмещённых изображений в географические координаты показала высокую эффективность при относительно небольшой вычислительной сложности. Продемонстрировано, что методика может быть реализована как при наземной автоматизированной обработке изображений, так и на борту БПЛА. Она может быть применена в картографии, оценке траектории движения объектов интереса, построении траектории движения БПЛА при отсутствии корректных сигналов глобальных навигационных систем и при решении других прикладных задач.

Литература

1. *Агапов С. В.* Фотограмметрия сканерных снимков. М.: Картгеоцентр — Геодезиздат, 1996. 176 с.
2. *Борисов А. Н.*, *Мясников В. В.*, *Сергеев В. В.* Метод автоматического совмещения разнородных цифровых изображений дистанционного зондирования Земли // Компьютер. оптика. 2024. Т. 48. № 6. С. 932–943. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1604.
3. *Морозов В. П.* Курс сфероидической геодезии. М.: Недра, 1979. 297 с.
4. *Платонов А. К.* Определение параметров проективного отображения в зрительном канале робота: препринт. Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша, 2007. № 39. 33 с.
5. *Суетин М. Н.*, *Дементьев В. Е.*, *Ташлинский А. Г.*, *Магдеев Р. Г.* Методика обнаружения и оценивания динамики дефектов инженерных сооружений на основе обработки изображений с беспилотного летательного аппарата // Компьютер. оптика. 2024. Т. 48. № 5. С. 762–771. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1438.
6. *Цыпкин Я. З.* Информационная теория идентификации. М.: Наука, Физматлит, 1995. 336 с.
7. *Cui Z.*, *Zhou P.*, *Wang X. et al.* A novel geo-localization method for UAV and satellite images using cross-view consistent attention // Remote Sensing. 2023. V. 15. Iss. 19. Article 4667. DOI: 10.3390/rs15194667.
8. *Gonzalez R. C.*, *Woods R. E.* Digital image processing. 4th ed. N. Y.: Pearson Publisher, 2017. 1192 p.
9. *Hartley R.*, *Zisserman A.* Multiple view geometry in computer vision. N. Y.: Cambridge University Press, 2003. 655 p.
10. *Hill L. L.* Georeferencing: The geographic associations of information. Cambridge, MA: MIT Press, 2006. 260 p. DOI: 10.7551/mitpress/3260.001.0001.
11. *Iliffe J.* Datums and map projections. For remote sensing, GIS and surveying. 2nd ed. L.: Whittles Publishing, 2008. 224 p.
12. *Kazanskiy N.*, *Khabibullin R.*, *Nikonorov A.*, *Khonina S.*, A comprehensive review of remote sensing and artificial intelligence integration: Advances, applications, and challenges // Sensors. 2025. V. 25. Iss. 19. Article 5965. DOI: 10.3390/s25195965.
13. *Konecny G.* Geoinformation: Remote sensing, photogrammetry and geographic information systems. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2014. 472 p.
14. *Li J.*, *Xie Y.*, *Li C. et al.* UAV-assisted wide-area multi-camera space alignment based on spatiotemporal feature map // Remote Sensing. 2021. V. 13. Iss. 6. Article 1117. DOI: 10.3390/rs13061117.
15. *Magdeev R. G.*, *Tashlinskii A. G.* A comparative analysis of the efficiency of the stochastic gradient approach to the identification of objects in binary images // Pattern Recognition and Image Analysis. 2014. V. 24. Iss. 4. P. 535–541. DOI: 10.1134/S1054661814040130.
16. *Qiu X.*, *Yang D.*, *Liao S. et al.* Image moment extraction based aerial photo selection for UAV high-precision geolocation without GPS // Measurement. 2024. V. 226. Article 114141. DOI: 10.1016/j.measurement.2024.114141.
17. *Ren K.*, *Ding L.*, *Wan M. et al.* Target localization based on cross-view matching between UAV and satellite // Chinese J. Aeronautics. 2022. V. 35. Iss. 9. P. 333–341. DOI: 10.1016/j.cja.2022.04.002.
18. *Rizaldy A.*, *Firdaus W.* Direct georeferencing: A new standard in photogrammetry for high accuracy mapping // The Intern. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2012. V. XXXIX-B1. P. 5–9. DOI: 10.5194/isprsarchives-XXXIX-B1-5-2012.
19. *Snyder J. P.* Map projections: A working manual. Washington: U. S. Government Printing Office, 1987. 383 p.
20. *Strang G.*, *Borre K.* Linear algebra, geodesy, and GPS. Wellesley, MA: Wellesley-Cambridge Press, 1997. 624 p.
21. *Štroner M.*, *Urban R.*, *Seidl J. et al.* Photogrammetry using UAV-mounted GNSS RTK: Georeferencing strategies without GCPs // Remote Sensing. 2021. V. 13. Iss. 7. Article 1336. DOI: 10.3390/rs13071336.

22. *Tashlinskii A. G.* Optimization of goal function pseudogradient in the problem of interframe geometrical deformations estimation // Pattern Recognition Techniques, Technology and Applications. L., UK: IntechOpen, 2008. P. 249–280. DOI: 10.5772/6244.
23. *Tashlinskii A. G.*, *Safina G. L.*, *Voronov S. V.* Pseudogradient optimization of objective function in estimation of geometric interframe image deformations // Pattern Recognition and Image Analysis. 2012. V. 22. Iss. 2. P. 386–392. DOI: 10.1134/S1054661812020174.
24. *Tashlinskii A. G.*, *Safina G. L.*, *Ibragimov R. M.* Synthesis of stochastic algorithm for image registration by the criterion of maximum mutual information // Computer Optics. 2024. V. 48. No. 1. P. 109–117. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1332.
25. *Wang H.*, *Shen Q.*, *Deng Z. et al.* Absolute pose estimation of UAV based on large-scale satellite image // Chinese J. Aeronautics. 2024. V. 37. Iss. 6. P. 219–231. DOI: 10.1016/j.cja.2023.12.028.
26. *Wolf P. R.*, *DeWitt B. A.*, *Wilkinson B. E.* Elements of photogrammetry with applications in GIS. 4th ed. McGraw Hill Professional, 2013. 640 p.
27. *Zhao H.*, *Zhang B.*, *Wu C. et al.* Development of a Coordinate Transformation method for direct georeferencing in map projection frames // ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing. 2013. V. 77. P. 94–103. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2012.12.004.
28. *Zhuang J.*, *Dai M.*, *Chen X.*, *Zheng E.* A faster and more effective cross-view matching method of UAV and satellite images for UAV geolocalization // Remote Sensing. 2021. V. 13. Iss. 19. Article 3979. DOI: 10.3390/rs13193979.

Conversion of a series of UAV camera images for joint processing with satellite images

A. G. Tashlinskii [1], A. A. Belov [1], G. L. Safina [2]

[1] *Ulyanovsk State Technical University*, *Ulyanovsk 432027*, *Russia*
E-mail: tag@ulstu.ru
[2] *Moscow State University of Civil Engineering*, *Moscow 129337*, *Russia*

The technique for real-time combination of images obtained from a camera mounted on a UAV with simultaneous compensation for their projective distortions and translation into the EPSG:3395 geographic coordinate system is proposed. The technique allows obtaining oversampled spatially combined images and is aimed at their subsequent processing together with satellite images. It is based on the formation of a normalized image from the current image frame based on known roll, pitch and yaw angles of the UAV, alignment of several sequentially obtained normalized images into a single image using original stochastic gradient algorithms and its translation from the local frame coordinate system into global geographic coordinates. The technique has shown high efficiency with relatively low computational complexity and can be implemented both in ground-based automated image processing and on board a UAV. Experimental results are presented on real image sequences. The developed algorithms are implemented in C++ using the open source OpenCV library. The software implementation has also been ported to single-board computers Raspberry Pi 4B 8GB and Radxa Rock 5 model A 16GB. The processing speed on Raspberry is 10 frames per second, on Radxa — up to 16 frames per second.

Keywords: image processing, projective distortion, similarity model, compensation, deformation estimation, adaptation, stochastic estimation

Accepted: 20.11.2025
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-1-49-62

References

1. Agapov S. V., *Fotogrammetriya skanernykh snimkov* (Photogrammetry of scanner images), Moscow, Kartgeotsentr — Geodesizdat, 1996, 176 p. (in Russian).

2. Borisov A. N., Myasnikov V. V., Sergeev V. V., Method of automatic coregistration of digital remote sensing images from different sources, *Computer Optics*, 2024, V. 48, No. 6, pp. 932–943 (in Russian), DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1604.
3. Morozov V. P., *Kurs sferoidicheskoi geodezii* (The course of spheroidal geodesy), Moscow: Nedra, 1979, 297 p. (in Russian).
4. Platonov A. K., *Opredelenie parametrov proektivnogo otobrazheniya v zritel'nom kanale robota: preprint* (Projective mapping determination for robot vision: Preprint), Keldysh preprints, 2007, No. 39, 33 p. (in Russian).
5. Suetin M. N., Dementiev V. E., Tashlinskii A. G., Magdeev R. G., Methodology for detecting and assessing the dynamics of defects in engineering structures by processing images from an unmanned aerial vehicle, *Computer Optics*, 2024, V. 48, No. 5, pp. 762–771 (in Russian), DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1438.
6. Tsypkin Ya. Z., *Informatsionnaya teoriya identifikatsii* (Information identity theory), Moscow: Nauka, Fizmatlit, 1995, 336 p. (in Russian).
7. Cui Z., Zhou P., Wang X. et al., A novel geo-localization method for UAV and satellite images using cross-view consistent attention, *Remote Sensing*, 2023, V. 15, Iss. 19, Article 4667, DOI: 10.3390/rs15194667.
8. Gonzalez R. C., Woods R. E., *Digital image processing*, 4th ed., New York: Pearson Publisher, 2017, 1192 p.
9. Hartley R., Zisserman A., *Multiple view geometry in computer vision*. New York: Cambridge University Press, 2003, 655 p.
10. Hill L. L., *Georeferencing: The geographic associations of information*, Cambridge, MA: MIT Press, 2006, 260 p., DOI: 10.7551/mitpress/3260.001.0001.
11. Iliffe J., *Datums and map projections. For remote sensing*, *GIS and surveying*, 2nd ed., London: Whittles Publishing, 2008, 224 p.
12. Kazanskiy N., Khabibullin R., Nikonorov A., Khonina S., A comprehensive review of remote sensing and artificial intelligence integration: Advances, applications, and challenges, *Sensors*, 2025, V. 25, Iss. 19, Article 5965, DOI: 10.3390/s25195965.
13. Konecny G., *Geoinformation: Remote sensing*, *photogrammetry and geographic information systems*, 2nd ed., Boca Raton: CRC Press, 2014, 472 p.
14. Li J., Xie Y., Li C. et al., UAV-assisted wide-area multi-camera space alignment based on spatiotemporal feature map, *Remote Sensing*, 2021, V. 13, Iss. 6, Article 1117, DOI: 10.3390/rs13061117.
15. Magdeev R. G., Tashlinskii A. G., A comparative analysis of the efficiency of the stochastic gradient approach to the identification of objects in binary images, *Pattern Recognition and Image Analysis*, 2014, V. 24, Iss. 4, pp. 535–541, DOI: 10.1134/S1054661814040130.
16. Qiu X., Yang D., Liao S. et al., Image moment extraction based aerial photo selection for UAV high-precision geolocation without GPS, *Measurement*, 2024, V. 226, Article 114141, DOI: 10.1016/j.measurement.2024.114141.
17. Ren K., Ding L., Wan M. et al., Target localization based on cross-view matching between UAV and satellite, *Chinese J. Aeronautics*, 2022, V. 35, Iss. 9, pp. 333–341, DOI: 10.1016/j.cja.2022.04.002.
18. Rizaldy A., Firdaus W., Direct georeferencing: A new standard in photogrammetry for high accuracy mapping, *The Intern. Archives of Photogrammetry*, *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2012, V. XXXIX-B1, pp. 5–9, DOI: 10.5194/isprsarchives-XXXIX-B1-5-2012.
19. Snyder J. P., *Map projections: A working manual*, Washington: U. S. Government Printing Office, 1987, 383 p.
20. Strang G., Borre K., *Linear algebra*, *geodesy*, *and GPS*, Wellesley, MA: Wellesley-Cambridge Press, 1997, 624 p.
21. Štroner M., Urban R., Seidl J. et al., Photogrammetry using UAV-mounted GNSS RTK: Georeferencing strategies without GCPs, *Remote Sensing*, 2021, V. 13, Iss. 7, Article 1336, DOI: 10.3390/rs13071336.
22. Tashlinskii A. G., Optimization of goal function pseudogradient in the problem of interframe geometrical deformations estimation, In: *Pattern Recognition Techniques*, *Technology and Applications*, London, United Kingdom: IntechOpen, 2008, pp. 249–280, DOI: 10.5772/6244.
23. Tashlinskii A. G., Safina G. L., Voronov S. V., Pseudogradient optimization of objective function in estimation of geometric interframe image deformations, *Pattern Recognition and Image Analysis*, 2012, V. 22, Iss. 2, pp. 386–392, DOI: 10.1134/S1054661812020174.
24. Tashlinskii A. G., Safina G. L., Ibragimov R. M., Synthesis of stochastic algorithm for image registration by the criterion of maximum mutual information, *Computer Optics*, 2024, V. 48, No. 1, pp. 109–117, DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1332.
25. Wang H., Shen Q., Deng Z. et al., Absolute pose estimation of UAV based on large-scale satellite image, *Chinese J. Aeronautics*, 2024, V. 37, Iss. 6, pp. 219–231, DOI: 10.1016/j.cja.2023.12.028.
26. Wolf P. R., DeWitt B. A., Wilkinson B. E., *Elements of photogrammetry with applications in GIS*, 4th ed. McGraw Hill Professional, 2013, 640 p.

27. Zhao H., Zhang B., Wu C. et al., Development of a Coordinate Transformation method for direct georeferencing in map projection frames, *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 2013, V. 77, pp. 94–103, DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2012.12.004.
28. Zhuang J., Dai M., Chen X., Zheng E., A faster and more effective cross-view matching method of UAV and satellite images for UAV geolocalization, *Remote Sensing*, 2021, V. 13, Iss. 19, Article 3979, DOI: 10.3390/rs13193979.