

УДК 621.396.41

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ОРТОФОТОПЛАНОВ МЕСТНОСТИ ПО ИСКАЖЁННЫМ СМАЗОМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ С БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

© А. С. Захлебин, М. И. Курячий, В. В. Капустин,  
А. В. Каменский, А. К. Мовчан

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР),  
634050, г. Томск, просп. Ленина, 40  
E-mail: aerosnimok@gmail.com*

В работе рассматривается методика восстановления изображений с беспилотного летательного аппарата (БПЛА), искажённых смазом. Восстановление изображений происходит с использованием функции рассеяния точки (ФРТ), вычисленной исходя из априорной информации об основных параметрах полёта и фотографирования, а также физических свойств используемой оптической системы. При обработке изображений используются известные методы, такие как восстановление по методу Винера, Люси — Ричардсона, Тихонова и слепой деконволюции.

*Ключевые слова:* БПЛА, изображение, смаз, восстановление, ортофотоплан, точность.

DOI: 10.15372/AUT20240111

EDN: IFHWYI

**Введение.** Изображения, искажённые смазом во время проведения авиационных работ, формируются в следующих случаях. Во-первых, при высокой скорости и низкой высоте полёта БПЛА над подстилающей поверхностью. Во-вторых, при недостаточно коротком времени экспозиции при съёмке в условиях малой освещённости. В результате при построении ортофотоплана местности по полученным видеоданным ошибка определения координат в контрольных точках значительно увеличивается. При этом ухудшается визуальное восприятие объектов интереса на ортофотоплане местности. Целью восстановления изображений является повышение точности географической привязки ортофотоплана местности, построенного по изображениям, искажённым смазом.

Цель представленной работы — разработка методики восстановления изображений, искажённых смазом во время выполнения авиационных работ, для повышения точности географической привязки ортофотоплана местности, создаваемого на основе этих изображений.

**Получение исходных данных.** Задача построения ортофотоплана состоит в том, чтобы по серии изображений с достаточным перекрытием сделать единую геопривязанную панораму подстилающей поверхности Земли и расположенных на ней объектов. Для получения исходных изображений с БПЛА и результатов спутниковых измерений был выбран участок местности с нанесённой дорожной разметкой, которая в дальнейшем использовалась в качестве фрагмента интереса для оценки величины смаза и ошибки определения координат в контрольных точках. Перед проведением авиационных работ были точно рассчитаны координаты краёв и углов разметки с помощью высокоточного геодезического прибора, имеющего действующую метрологическую поверку [1]. В работе используется местная система координат Томского района МСК 70 ЗОНА 4:  $x$  — северное указание (м),  $y$  — восточное указание (м),  $z$  — высотная отметка (м). Каждое изображение имеет центр фотографирования, координаты которого записываются в Exif-данные изображения

Таблица 1

## Параметры полётного задания

Параметр	Значение параметра
Высота полёта, м	100
Скорость полёта, м/с	9
Продольное перекрытие изображений	80%
Поперечное перекрытие изображений	70%
Экспозиция, с	1/640, 1/400, 1/320, 1/240, 1/160, 1/100, 1/80, 1/60, 1/50, 1/25, 1/10, 1/5, 1/2

Таблица 2

Ошибка определения координат в контрольных точках  
в зависимости от времени экспозиции

Значение экспозиции, с	Ошибка X, см	Ошибка Y, см	Ошибка Z, см
1/640	1,9	5,1	3,5
1/400	2,7	5,2	5,7
1/320	2,2	6,2	2,69
1/240	1,7	6,2	4,2
1/160	2	6,6	2,74
1/80	3,5	5,8	3,8
1/60	4,6	7,7	3,65
1/50	5,3	5,8	3,8
1/25	9,9	7,4	2,42
1/10	17,6	12,5	11,4
1/5	49	23	16,14
1/2	115	57	26,3

в момент срабатывания затвора камеры. Всего были определены координаты 8 контрольных точек. Далее было сформировано полётное задание, где такие параметры, как высота полёта, скорость и перекрытие снимков оставались неизменными, а изменялось лишь время экспозиции от 1/640 до 1/2 с. Основные параметры полётного задания приведены в табл. 1.

В результате выполнения полётного задания было получено 13 видеорядов исследуемой местности, состоящих из изображений с разным временем экспозиции.

**Камеральная обработка.** В результате камеральной обработки материалов [2] аэросъёмки построено 13 ортофотопланов местности. Была оценена ошибка определения координат в контрольных точках. Имеется в виду абсолютная ошибка определения координат, которая в представленной работе определяется как разность между координатой, полученной с помощью геодезического прибора, имеющего метрологическую поверку (является в данной работе эталонным средством измерения), и координатой, полученной на ортофотоплане местности [3]. Результаты приведены в табл. 2.

Из табл. 2 следует, что ошибка определения координат в контрольных точках достигает более 10 см, начиная со значения экспозиции 1/25 с. Ошибка определения координат более 10 см является критической при использовании ортофотопланов местности, соответствующих по точности и разрешению масштабу картографирования 1 : 500. Часто условия съёмки не позволяют использовать меньшее время экспозиции. Например, при выполнении авиационных работ в осенний период, когда световой день сокращается, время на выполнение авиационных работ существенно уменьшается из-за недостаточной освещённости в вечернее время. Тем более если производится съёмка сельской местности, где много тер-

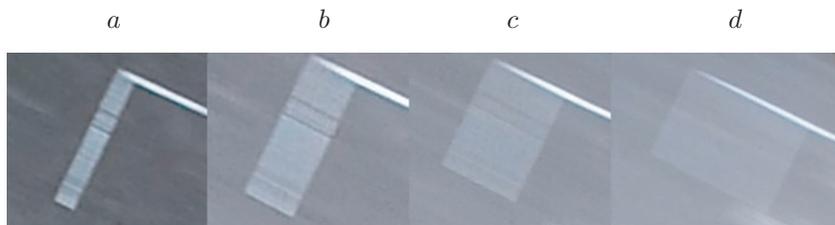


Рис. 1. Объекты интереса при различных параметрах экспозиции:  
 $a$  —  $1/25$  с,  $b$  —  $1/10$  с,  $c$  —  $1/5$  с,  $d$  —  $1/2$  с

Таблица 3

## Априорные данные для вычисления ФРТ

Параметр	Значение
Высота полёта, м	100
Скорость полёта, м/с	9
Размер кадра, пикс.	$3648 \times 5472$
Фокусное расстояние, мм	8,8 мм / 24 мм (эквивалент 35 мм)
Физический размер матрицы, мм	$13,2 \times 8,8$
Угол обзора, град.	$84^\circ$

риторий с открытым грунтом, имеющим тёмный оттенок. Таким образом, применяя более длинную выдержку при полёте БПЛА и постобработку полученного материала, достигается увеличение производительности авиационных работ. Также использование длинной выдержки может быть обусловлено необходимостью проведения разведывательных и иных задач в тёмное время суток.

На рис. 1 приведены объекты интереса на изображениях при различной экспозиции.

**Моделирование функции рассеяния точки (ФРТ).** Для устранения смаза на изображениях необходимо определить ФРТ. В настоящее время БПЛА имеет инерциальную систему на борту и совершает полёт по заранее спланированному маршруту. Его движение, как правило, прямолинейное и равномерное. В результате становится известной некоторая априорная информация (скорость движения БПЛА, высота полёта, перекрытие изображений, время экспозиции), которую можно использовать при определении ФРТ.

Исходя из этого, ФРТ должна представлять собой линию, которая является следом от малоразмерного объекта. Размер этой линии равен расстоянию, которое пролетает БПЛА за время экспонирования кадра, т. е. за время экспозиции, выраженной в элементах изображения (пикселях) [4, 5].

В табл. 3 представлены априорные данные о полёте и параметрах сенсора камеры и экспозиции, необходимые для вычисления размера и направления ФРТ. Исходя из параметров, приведённых в табл. 3, физический размер одного пикселя матрицы равен

$$n = (x/a)1000,$$

где  $n$  — размер пикселя в микрометрах;  $x$  — линейный размер матрицы одной из сторон, мм;  $a$  — количество пикселей по соответствующей стороне;  $n = (13,2/5472)1000 = 2,412$  мкм.

Размер пикселя на местности равен

$$GSD = (S_w H 100) / (F_r m W),$$

где  $GSD$  — размер пикселя на местности;  $S_w$  — ширина сенсора камеры, мм;  $F_r$  — фокусное расстояние, мм;  $H$  — высота съёмки, м;  $mW$  — ширина кадра съёмки, пикс.

Таблица 4

Расстояние, пройденное БПЛА за время экспозиции		
Время экспонирования, с	Размер смаза, см	Размер смаза, пикс.
1/640	1,12	0,41
1/400	2,25	0,83
1/320	2,78	1,02
1/240	3,69	1,36
1/160	5,62	2,08
1/100	9	3,33
1/80	11,25	4,16
1/60	14,4	5,33
1/50	18	6,66
1/25	36	13,33
1/10	90	33,33
1/5	180	66,67
1/2	450	166,67

При высоте полёта 100 м  $GSD$  равен 2,7 см на местности. Один пиксель на изображении соответствует 2,7 см на местности. Расстояние, которое пролетает БПЛА во время экспонирования матрицы, равно

$$S = vt, \quad (1)$$

где  $S$  — расстояние, пройденное БПЛА за время экспонирования матрицы, м;  $v$  — скорость полёта БПЛА, м/с;  $t$  — время экспозиции, с.

В этом случае расстояние, пройденное БПЛА в пикселях, равно

$$S_p = \frac{S}{GSD}, \quad (2)$$

где  $S_p$  — расстояние, пройденное БПЛА за время экспонирования матрицы, пикс.

Используя выражение (1) и (2), вычисляется расстояние, пройденное БПЛА за время экспозиции, которое характеризует размер смаза на изображении и ФРТ. Результаты расчётов представлены в табл. 4.

По результатам анализа табл. 3 и 4 можно сделать вывод, что существенная величина смаза (36 см) начинается со времени экспозиции 1/25 с и более.

Учитывая направление движения БПЛА, ФРТ можно представить в виде линии, совпадающей с направлением полёта. Пример такого вида ФРТ для экспозиции 1/25 с представлен на рис. 2.

**Устранение смаза на искусственно искажённых изображениях.** Используя полученную ФРТ, были искусственно искажены несмазанные изображения исследуемого полигона и по полученным изображениям построен ортофотоплан местности. Заданная ФРТ соответствует экспозиции 1/25 с. На рис. 3 приведён объект интереса на полученном ортофотоплане местности.

В табл. 5 даны сравнительные характеристики двух ортофотопланов, которые были получены по исходным изображениям со временем экспозиции 1/640 с и искусственно искажённым, соответствующим времени экспозиции 1/2 с.

Общая ошибка определения координат в плане в контрольных точках составила 10,4 см, что сопоставимо с ошибкой определения координат в контрольных точках, полученных по реальным изображениям при экспозиции 1/25 с.

Таблица 5

## Сравнительные характеристики ортофотопланов местности

Характеристика	Исходный ортофотоплан (1/640 с)	Искусственно искажённый ортофотоплан (1/2 с)
Ошибка координат в контрольных точках, см	5,3	10,4
Размер смаза, см	1,12	36
Размер смаза, пикс.	0,41	13,3

Для устранения смаза на искусственно искажённых изображениях и уменьшения ошибки определения координат в контрольных точках каждое исходное изображение обрабатывается известными классическими методами устранения смаза на изображениях.

**Винеровская фильтрация.** Винеровский фильтр [6] характеризуется тем, что при восстановлении изображение подвергается низкочастотной фильтрации. На рис. 4, *a* приведён объект интереса на ортофотоплане местности, построенном по изображениям, которые восстановлены фильтром Винера.

Восстановление смазанных изображений по Винеру с использованием априорной информации о ФРТ уменьшает ошибку определения координат на контрольных точках в 2 раза с 10,4 до 5,2 см.

**Восстановление по методу Люси — Ричардсона.** Фильтр Люси — Ричардсона является итеративным [7]. По этой причине следует выяснить не только априорную информацию о ФРТ, но и определить оптимальное количество итераций.

В ходе моделирования были восстановлены одиночные изображения, в которых использовалось разное количество итераций (от 1 до 44). В результате анализа полученных изображений выяснилось, что оптимальным количеством итераций для фильтра Люси — Ричардсона является значение 20. Если применять большее количество итераций, смаз на изображении остаётся неизменным, а вместо этого начинают преобладать артефакты на изображении.

На рис. 4, *b* приведён объект интереса на ортофотоплане местности, построенном по изображениям, восстановленным фильтром Люси — Ричардсона с априорной информацией о ФРТ при 20 итерациях. Восстановление изображения фильтром Люси — Ричардсона уменьшило ошибку определения координат на контрольных точках в 1,76 раз с 10,4 см до 5,9 см.

**Фильтрация по методу Тихонова.** Фильтрация по Тихонову [8] характеризуется резким увеличением артефактов на изображении. На рис. 4, *c* приведён объект интереса

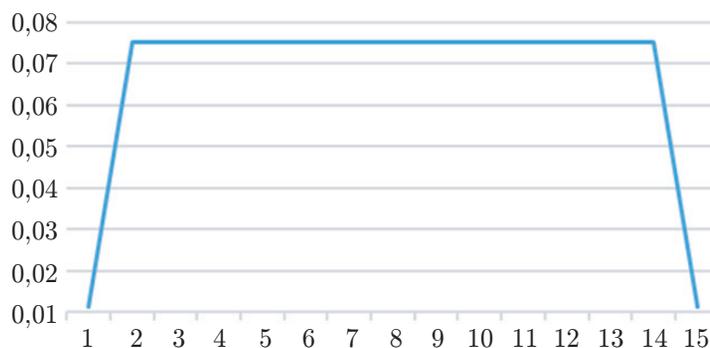


Рис. 2. Пример ФРТ для экспозиции 1/25 с



Рис. 3. Объект интереса с искусственным смазом, соответствующим экспозиции  $1/25$  с

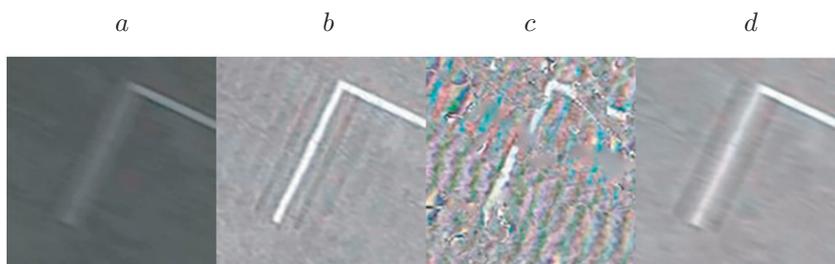


Рис. 4. Объект интереса на восстановленных изображениях ортофотопланов местности: *a* — винеровская фильтрация, *b* — фильтрация Люси — Ричардсона, *c* — фильтрация Тихонова, *d* — слепая деконволюция

на ортофотоплане местности, построенном по изображениям, восстановленным фильтром Тихонова с априорной информацией о ФРТ.

Из рис. 4, *c* следует, что артефакты на изображении достигают критических значений, что делает процесс дешифровки точек интереса затруднительным.

Применение фильтрации Тихонова для каждого смазанного изображения видеоряда привело к уменьшению ошибки координат на контрольных точках в 1,83 раза с 10,4 до 5,7 см. Однако наблюдается большое количество артефактов на восстановленном изображении.

**Метод слепой деконволюции.** Метод слепой деконволюции, как и метод Люси — Ричардсона, является итеративным, поэтому сначала нужно подобрать оптимальное количество итераций. После восстановления одиночного изображения по известной ФРТ с количеством итераций от 1 до 14 выяснилось, что наиболее оптимальный результат получается при количестве итераций, равном 6. На рис. 4, *d* приведён объект интереса на ортофотоплане местности, построенном по изображениям, восстановленным методом слепой деконволюции с априорной информацией о ФРТ и количеством итераций, равным 7.

Результат восстановления по методу слепой деконволюции аналогичен результату по винеровской фильтрации. При этом объекты интереса имеют более выраженный контраст по отношению к фону.

Применение метода слепой деконволюции для видеоряда изображений, искажённых смазом, привело к уменьшению ошибки координат в контрольных точках в 2,26 раза с 10,4 до 4,6 см. По своим характеристикам данный результат соответствует фильтрации Винера.

Из вышесказанного следует, что наибольшее приближение к ошибке координат в контрольных точках неискажённого смазом ортофотоплана местности (5,3 см) имеют орто-



Рис. 5. Объект интереса на ортофотоплане местности по реальным снимкам

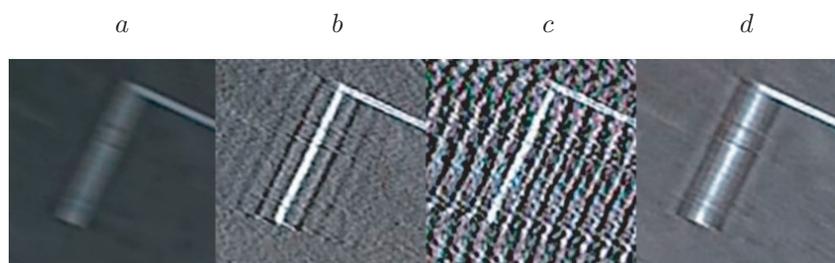


Рис. 6. Объект интереса на восстановленных реальных изображениях ортофотопланов местности: *a* — винеровская фильтрация, *b* — фильтрация Люси — Ричардсона, *c* — фильтрация Тихонова, *d* — слепая деконволюция

Таблица 6

Сравнение ортофотопланов местности, построенных по восстановленным различными методами изображениям

Характеристика	Ошибка координат в контрольных точках, см
Исходные изображения	12,38
Винер	7,18
Люси — Ричардсон	5,11
Тихонов	9,1
Слепая деконволюция	5,99

фотопланы, построенные по изображениям, которые восстановлены методами винеровской фильтрации (5,2 см) и слепой деконволюции (4,6 см).

**Обработка реальных изображений со смазом.** Для обработки реальных изображений со смазом выбраны изображения, полученные при значении экспозиции  $1/25$  с. Такой выбор обусловлен тем, что ранее использовались искусственно искажённые изображения с ФРТ, которая соответствует смазу  $1/25$  с. Соответственно, сравнение полученных результатов будет более наглядным.

На рис. 5 представлен объект интереса из ортофотоплана местности, который построен по реальным изображениям, искажённым смазом.

Каждое исходное искажённое изображение восстанавливалось четырьмя различными методами. На рис. 6 представлены объекты интереса из ортофотопланов местности, которые построены по изображениям, восстановленным различными методами.

В табл. 6 представлены сравнительные характеристики полученных ортофотопланов местности и объектов интереса, из которой следует, что наименьшая ошибка измерения координат в контрольных точках наблюдается при фильтрации алгоритмом Люси — Ричардсона и равняется 5,11 см вместо 12,38 см на исходном изображении.

**Заключение.** В представленной работе проведены исследования, направленные на увеличение точности построения ортофотопланов местности по изображениям, полученным с БПЛА. Достигнуты следующие результаты:

1. Ошибка измерения координат в контрольных точках не превышает 10 см до того момента, пока значение экспозиции не станет больше либо равным  $1/25$  с. Максимальная ошибка определения координат наблюдается при значении экспозиции  $1/2$  с и достигает 129,2 см в плане.

2. Исходя из априорной информации о полёте и параметрах фотографирования (скорость полёта, высота полёта, разрешение одного пикселя на местности, параметры экспозиции, курс полёта), была вычислена ФРТ, позволяющая восстанавливать смазанные изображения, которые получены в результате недостаточно короткого времени экспозиции в силу неблагоприятных условий съёмки. Вычислена ФРТ, максимально приближённая к смазу, который возникает на изображениях при прямолинейном равномерном движении БПЛА со скоростью 9 м/с на высоте 100 м и со значением экспозиции  $1/25$  с.

3. По итогам моделирования определено, что наибольший эффект по уменьшению ошибки измерения координат в контрольных точках показали винеровская фильтрация (в 2 раза) и фильтрация методом слепой деконволюции (в 2,26 раза), а также выяснилось, что фильтрация по методу Тихонова оказывает негативное влияние на шумы в восстановленных изображениях, т. е. появляются артефакты обработки изображений.

4. В результате восстановления исходных изображений, значение экспозиции которых при съёмке территории было равно  $1/25$  с, определено, что ошибка измерения координат в контрольных точках максимально уменьшилась при восстановлении изображений по методу Люси — Ричардсона с 12,38 см на исходном ортофотоплане местности до 5,11 см на восстановленном. По методу слепой деконволюции ошибка измерения координат в контрольных точках уменьшилась с 12,38 до 5,99 см.

Обобщая вышесказанное, можно сделать вывод, что разработанная методика определения ФРТ по априорной информации о параметрах полёта, характеристиках видеокамеры и параметрах экспозиции может быть использована для восстановления изображений, искажённых смазом. В результате восстановления изображений по методу Люси — Ричардсона ошибку измерения координат в контрольных точках ортофотоплана местности удалось уменьшить в 2,42 раза (с 12,38 до 5,11 см). Дальнейшие исследования в данной области будут направлены на доработку существующих методов устранения смаза на изображениях.

**Финансирование.** Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 21-79-10200 в ТУСУРе.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Захлебин А. С.** Построение ортофотоплана местности с использованием БПЛА вертолётного типа DJI PHANTOM 4 // Матер. докл. Междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления». 2018. № 1–2. С. 159–161.
2. **Захлебин А. С.** Метод обработки материалов аэрофотосъёмки для построения геопривязанного ортофотоплана местности с телевизионной камеры беспилотного летательного аппарата DJI Phantom 4 PRO // ДАН высш. шк. РФ. 2021. 4, № 53. С. 26–35.
3. **Kapustin V., Movchan A., Kuryachiy M., Chaldina E.** Active-pulse television measuring systems images space-time filtration by range // Journ. Phys.: Conf. Ser. 2020. **1488**. 012032.
4. **Гуркина Е. Д., Белов Ю. С.** Коррекция размытых изображений // Международный студенческий науч. вестн. 2017. **2017**, № 5. С. 30.

5. **Браславская О. Б., Гендрина И. Ю., Квач А. С.** Сравнение двух методов расчёта функции размытия точки и оптической передаточной функции // Изв. высш. уч. заведений. Физика. 2013. **56**, № 9/2. С. 215–216.
6. **Медведков Н. В., Трубаков А. О.** Исследование метрик качества результатов инверсной фильтрации Винера для размытых и прямолинейно смазанных изображений // Сб. матер. 31-й Всерос. науч.-практ. конф. по графическим информационным технологиям и системам (КОГРАФ-2021). Н. Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, 2021. С. 51–58.
7. **Брейкина К. В., Умняшкин С. В.** Оценка качества изображения при компенсации смаза по методу Люси — Ричардсона // Изв. высш. уч. заведений. Электроника. 2020. **25**, № 2. С. 167–174.
8. **Данилина Е. А., Елфимов В. Т.** Оптимизация решения задачи восстановления изображения методом Тихонова // Молодёжный научно-технический вестн. 2016. Вып. 2. С. 34.

*Поступила в редакцию 04.06.2023*

*После доработки 06.07.2023*

*Принята к публикации 06.09.2023*

---