

Определение условной береговой линии по снимкам беспилотного летательного аппарата

Determination of the conditional coastline as per the images of the unmanned aerial vehicle

Цветков / Tsvetkov V.

Виктор Яковлевич

(cvj2@mail.ru)

доктор технических наук, профессор.

АО «Научно-исследовательский

и проектно-конструкторский институт

информатизации, автоматизации и связи на

железнодорожном транспорте»,

заместитель руководителя.

г. Москва

Филатов / Filatov V.

Валерий Николаевич

(filatov@itain.ru)

доктор военных наук, профессор,

почетный геодезист,

действительный член Академии военных наук.

АО «Российские космические системы»,

главный конструктор по геодезическому обеспечению.

г. Москва

Ознамец / Oznamets V.

Владимир Владимирович

(voznam@bk.ru)

кандидат технических наук, профессор,

почетный работник высшего профессионального

образования РФ, эксперт РАН.

ФГБОУ ВО «Московский государственный

университет геодезии и картографии»,

заведующий кафедрой геодезии.

г. Москва

Ключевые слова: линейный объект – linear object; БПЛА – UAV; одиночные снимки – single images; трансформирование снимков – transformation of images; линейно-угловое трансформирование – linear-angular transformation.

Статья предлагает метод определения береговой линии по фотоснимкам, получаемым с борта беспилотного летательного аппарата. Используется одиночный снимок при произвольных углах крена и тангажа. Статья предлагает новый метод стыковки пространственной модели не по маршруту снимков, а по координатам местности. Статья предлагает новый метод трансформирования снимка. Это линейно-угловое трансформирование. Метод связывает линейные измерения на снимке и угловые измерения в пространстве с учетом известного центра проектирования, который определяют при помощи приемника GPS. При определении пространственных координат береговой линии используют дополнительное условие, что водная поверхность представляет собой горизонтальную поверхность на небольших участках, соответствующих снимку с беспилотного летательного аппарата. Метод не является универсальным, а применим только при наличии двух условий: известны координаты центров проектирования; известно расстояние до горизонтальной плоскости, в которой расположен линейный объект. В то же время метод позволяет при трансформировании снимка использовать точки местности, которые в плоскости не лежат.

The article offers a method for determining the coastline based on the photographs taken from an unmanned aerial vehicle. A single image is used at arbitrary roll and pitch angles. The article offers a new method of joining the spatial model not along the route of images, but as per the coordinates of the terrain. The article offers a new image transformation method. This is a linear-angular transformation. The method connects linear measurements in the photo and angular measurements in space, taking into account the known design center, which is determined by means of the GPS receiver. When determining the spatial coordinates of the coastline, an additional condition is used that the water surface is a horizontal surface on small areas corresponding to the picture from the UAV. The method is not universal, but is applicable only under two conditions: the coordinates of the design centers are known; the distance to the horizontal plane in which the linear object is located is known. At the same time, when transforming the image the method makes it possible to use points of detail that do not lie in the plane.

Введение

Определение контура береговой линии с помощью беспилотного летательного аппарата включает ряд проблем. Беспилотный летательный аппарат (БПЛА) имеет ограниченную грузоподъемность и небольшой вес. Это означает возможность переноса небольшой цифровой камеры и минимум аппаратуры. Небольшой вес приводит к тому, что в процессе полета БПЛА подвержен ветровому воздействию, в силу чего положение камеры нестабильно и съемка является перспективной. Стыковка последовательных во времени снимков, получаемых каждый раз с разными углами наклона, представляет собой сложную техническую задачу [1, 2]. Как альтернативу авторы статьи предлагают методику обработки одиночных снимков, на которых контур береговой линии перекрывается и по нему ведется стыковка маршрута. В традиционной маршрутной воздушной съемке первоначально стыкуют и связывают снимки на начало обработки [3, 4]. После этого по ним строят общую пространственную модель. Новизна предлагаемого метода состоит в том, что снимки обрабатывают независимо, а стыковку осуществляют по пространственной модели, то есть по фрагментам пространственных моделей с каждого снимка. Для получения такого результата используется трансформирование, но также новое. Традиционно в фотограмметрии и в аналитической геометрии трансформирование осуществляют по известным координатам четырех соответствующих некомпланарных точек, лежащих в двух плоскостях [4]. Одной плоскостью является снимок, другой плоскостью реального объекта на местности. В реальных условиях такое условие для местности невыполнимо или трудно выполнимо для большой территории или для всего маршрута съемки. При этом не используют

информацию о расположении центра проектирования, который задает трансформационные коэффициенты. Авторами разработан метод, позволяющий трансформировать по точкам, не лежащим в плоскости. Это становится возможным за счет использования информации о расположении центра проектирования. Однако само по себе трансформирование приобретает новое качество. Оно становится линейно угловым.

Понятие условная береговая линия

Метод и алгоритм создавались для исследования береговой линии и абразии береговой линии. Термин «условная береговая линия» вводится для того, чтобы отличить понятие, используемое в данной статье, от общепринятых определений береговой линии. По одному определению береговой линией называют границу между сушей и водой на момент отлива [5, 6]. По другим определениям береговой линией называют середину границы между приливом и отливом. Область между приливом и отливом называют литоралью (рис. 1).

Условной береговой линией в данной работе будем называть границу между водной поверхностью и сушей на момент фотосъемки. То есть это понятие является динамическим и может характеризовать границу на момент отлива, прилива или в любой момент времени между приливом и отливом (рис. 2).

Величина L на рис. 2 показывает расстояние для характерной точки до границы литорали.

Геодезическая засечка и псевдоснимок

Для того чтобы пояснить суть предлагаемого подхода, рассмотрим классические прямые геодезические изме-

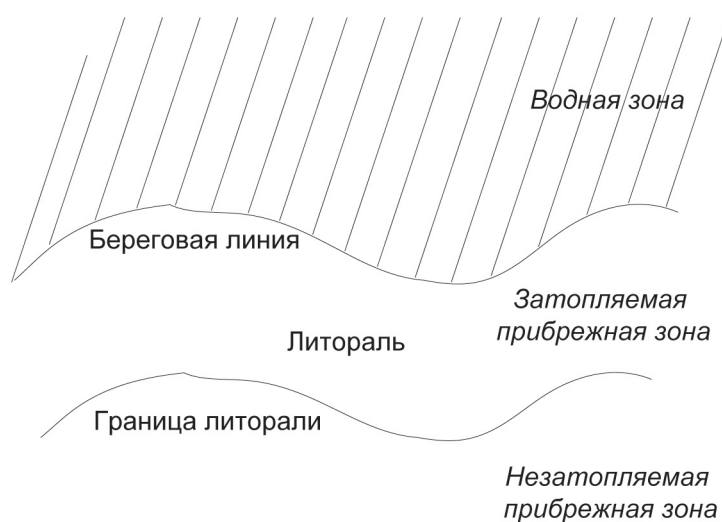


Рис. 1. Литораль и береговая линия

рения. На рис. 3 показана система координат XYZ . Такая система координат является фотограмметрической и выбрана для того, чтобы затем привязать ее к фотоснимку. В этой системе Y определяет расстояние (отстояние) до точки наблюдения, Z высотная координата или аппликата.

Из точки наблюдения S в заданной системе координат определяют горизонтальные α и вертикальные β углы на измеряемую точку M . Для определения пространственных координат точки M необходимо выполнить измерения с другой точки наблюдения, причем базис между точками измерений должен быть известен.

Однако задача может быть решена из одной точки наблюдения, если отстояние Y_M до точки M известно из дополнительных источников информации. Например, точка M находится в известной плоскости фасада здания $Y = Y_M$. В этом случае пространственные координаты X_M, Z_M точки M определяют следующим образом:

$$X_M = Y_M \operatorname{tg} \alpha \quad (1)$$

$$Z_M = Y_M \operatorname{tg} \beta \quad (2)$$

Теперь представим себе, что между точкой наблюдения S и измеряемой точкой M , помещена плоскость, ортогональная оси Y с условным отстоянием равным 1 (рис. 4).

Если рассматривать такую плоскость как псевдоснимок с фокусным расстоянием $f=1$, то координатами x, z изображения m измеряемой точки M на этом снимке будут определены согласно выражениям

$$x = \operatorname{tg} \alpha \quad (3)$$

$$z = \operatorname{tg} \beta \quad (4)$$

Различие между (1–2) и (3–4) в том, что первая пара определяет пространственные координаты точки,

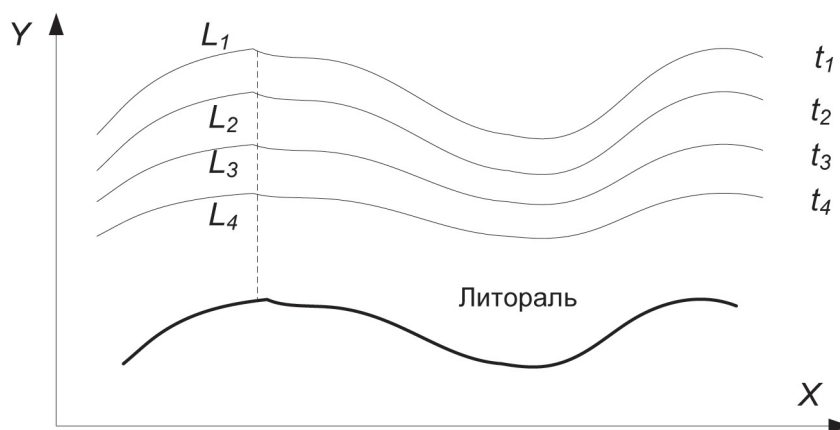


Рис. 2. Вид с условных береговых линий на разные моменты времени

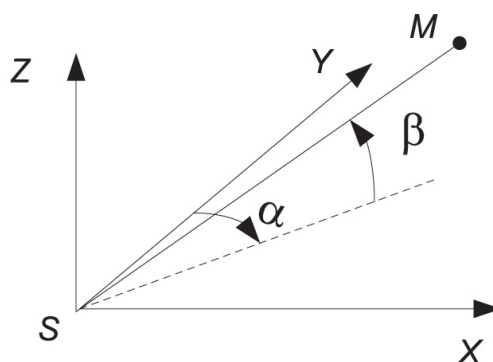


Рис. 3. Прямые геодезические измерения

а пара (3–4) задает тангенсы углов, которые можно рассматривать как координаты. По существу пара (3–4) задает углы и при наличии известного отстояния по этим формулам можно вычислить координаты в плоскости.

Таким образом, следует важный вывод, что по снимку можно измерять не только линейные характеристики, но угловые величины при известном фокусном расстоянии и известных координатах главной точки снимка.

Условия съемки с использованием БПЛА

В силу ограничений грузоподъемности БПЛА не могут нести полный комплект аэрофотосъемочного оборудования [7, 8]. В частности, в них отсутствуют гироскопические устройства и авиагоризонт, позволяющие выравнивать плоскость камеры и определять углы тангажа и крена. При съемке морской береговой линии характерны сильные ветровые нагрузки, которые создают крен (*Roll*), тангаж (*Pitch*), рыскание (*Yaw*), для летательного аппарата и для установленной на нем камеры. Это означает, что такие углы имеют место и надо учитывать их наличие. Соответственно, алгоритм обработки снимков должен допускать наличие таких углов. Удобным методом для обработки наклонных снимков является трансформирование [3, 4]. Однако оно требует наличия двух плоскостей и лежащих в них четверок не коллинеарных точек. В основном это требование касается точек на местности, поскольку на снимке точки всегда в одной плоскости.

Линейно-угловое трансформирование

Покажем, что использование угловых измерений позволяет трансформировать в некоторых случаях при расположении опорных точек на местности не в одной плоскости. Это становится возможным при известных координатах точки съемки. Такая задача в БПЛА решается путем установки на него приемника

GPS. Ситуация приведена на рис. 5. Опорные точки обозначены цифрами 1–4.

Если мы знаем координаты опознаков (или опорных точек) на местности, то при известном центре проектирования S (рис. 5) можно определить следующие величины

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = (X_1 - X_S) / (Z_S - Z_1) ; \operatorname{tg} \beta_1 = (Y_1 - Y_S) / (Z_S - Z_1) \quad (5)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = (X_2 - X_S) / (Z_S - Z_2) ; \operatorname{tg} \beta_2 = (Y_2 - Y_S) / (Z_S - Z_2) \quad (6)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_{13} = (X_{13} - X_S) / (Z_S - Z_3) ; \operatorname{tg} \beta_3 = (Y_3 - Y_S) / (Z_S - Z_3) \quad (7)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_{14} = (X_4 - X_S) / (Z_S - Z_4) ; \operatorname{tg} \beta_4 = (Y_4 - Y_S) / (Z_S - Z_4) \quad (8)$$

Эти тангенсы углов можно рассматривать как координаты, хотя фактически они задают только углы. Для простоты анализа $\operatorname{tg} \alpha$ можно заменить на v , $\operatorname{tg} \beta$ заменить на u . В этом случае можно использовать известные в проективной геометрии [9, 10] формулы трансформирования.

$$v = \frac{x \times a1 + y \times a2 + a3}{x \times a7 + y \times a8 + 1} \quad (9)$$

$$u = \frac{x \times a4 + y \times a5 + a6}{x \times a7 + y \times a8 + 1} \quad (10)$$

В выражениях (9–10) постоянные коэффициенты $a1, a2, a3, a4, a5, a6, a7, a8$ – определяют при наличии не менее четырех опорных точек. Использование координат центра проектирования позволяет перейти от линейных величин к угловым (5–8) и использовать опорные точки, которые не лежат в одной плоскости. В силу этого данный метод трансформирования следует назвать линейно-угловым, чтобы отличить его от применяемых методов трансформирования в которых с обеих сторон используют координаты точек в плоскости.

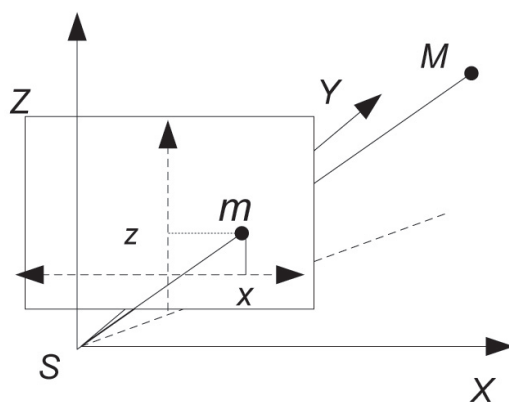


Рис. 4. Псевдоснимок, моделирующий условия геодезических измерений

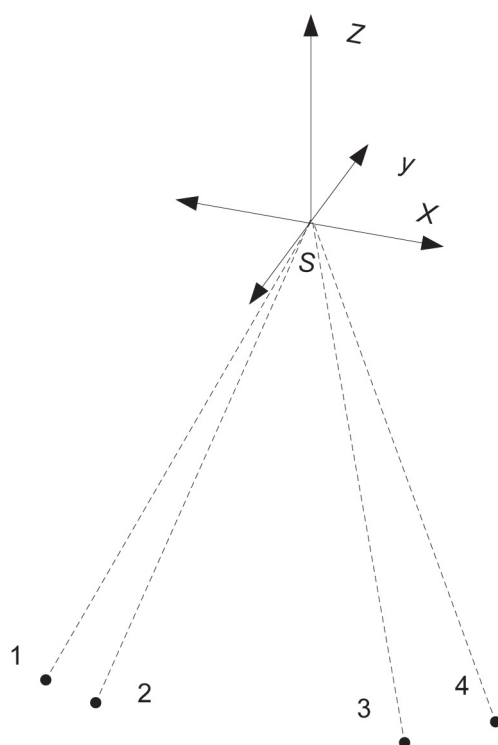


Рис. 5. Схема для преобразования линейных координат в угловые величины

Определение береговой линии

Формулы (9–10) не позволяют определять координаты. Они задают только направления на точки. Для определения координат необходимо определять расстояние до определяемой поверхности по вертикали, то есть задавать для определяемой точки M величину $(Z_S - Z_M)$.

Здесь следует вспомнить о том, что водная поверхность в принципе является горизонтальной плоскостью, на чем построены принципы гидростатических нивелиров. В силу этого уровень поверхности может быть определен заранее. Как правило, известны высота отлива и высота прилива. Известно время отлива и прилива. Поскольку время съемки с БПЛА фиксируется, то можно составить таблицу уровней моря для разных временных интервалов между приливом и отливом (рис. 2). Таким образом, зная время съемки t и связывая его с временем прилива и отлива, мы можем задавать $(Z_S - Z_M(t))$. По этой величине можем определять координаты контура условной береговой линии на основе выражений.

$$X_{\text{бл}} = v(Z_S - Z_M) \quad (11)$$

$$Y_{\text{бл}} = u(Z_S - Z_M) \quad (12)$$

Здесь $X_{\text{бл}}, Y_{\text{бл}}$ – координаты контура условной береговой линии. Для каждого снимка определяют участок

береговой линии, который стыкуется по крайним координатам $X_{\text{бл}}, Y_{\text{бл}}$ с координатам другого участка, полученного с последующего снимка. Таким образом строится цепочка контура береговой линии для всего маршрута. Экспериментальные работы проводились на определение границ канала им. Москвы.

Заключение

Предлагаемый метод не является универсальным, а имеет ограничения. Первое условие состоит в том, что должны быть известны координаты точки фотографирования для каждого снимка. Эта задача решается технически за счет применения спутниковых приемников, установленных на БПЛА. Второе условие, ограничивающее применение метода, состоит в том, что должно быть известно расстояние от точки фотографирования до горизонтальной плоскости, в которой находится контур объекта. Для водной поверхности такое условие выполняется. Однако метод имеет важное преимущество перед другими методами трансформирования. Он применим при наличии опорных или трансформационных точек, которые не лежат в одной плоскости. Это является существенной новизной метода. Объекты, на которые распространяется применение метода: водная поверхность и горизонтальные линии инженерных сооружений, например большие стадионы, высотные здания. В отдельных случаях его

можно применять для измерения координат горизонтальных участков полотна железной дороги по снимкам с БПЛА.

Литература

1. Цветков, В. Ю. Геометрические модели многоракурсных изображений и проективная компенсация движения камеры / В.Ю. Цветков // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. – 2014. – № 8 (86). – С. 41–47.
2. Нечаусов, А. С. Методика создания мозаики изображений на основе данных беспилотного летательного аппарата / А.С. Нечаусов, О.О. Замирец // Системи обробки інформації. – 2015. – № 8. – С. 51–56.
3. Краснопевцев, Б. В. Фотограмметрия / Б.В. Краснопевцев. – М.: УПП "Репрография" МИИГАиК, 2008. – 160 с.
4. Геодезия, Картография, Геоинформатика, Кадастр. Энциклопедия. В 2 томах / Под редакцией А.В. Бородко, В.П. Савиных. – Москва, 2008. Том I. А–М.
5. Морской энциклопедический справочник / Под редакцией академика Н.Н. Исанина. – Л.: Судостроение, 1986. – 1029 с.
6. Леонтьев, О. К. Основы геоморфологии морских берегов / О.К. Леонтьев. – М.: Наука, 1961. – 418 с.
7. Гергель, И. А. Анализ полета малых беспилотных летательных аппаратов для выполнения аэрофотосъемки площадных объектов / И.А. Гергель, В.И. Картунов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2015. – № 4. – С. 38–42.
8. Ознамец, В. В. Геомониторинг на транспорте с использованием БПЛА / В.В. Ознамец // Наука и технологии железных дорог. – 2018. – № 1(5). – С. 43–53.
9. Цветков, В. Я. Составление обмерных чертежей архитектурных памятников с использованием архивных фотоснимков / В.Я. Цветков, Е.А. Ходорович. – М.: МК РСФСР, Реставрация, 1986. – 52 с.
10. Прикладная геоинформатика / А.Д. Иванников [и др.]. – М.: МАКС Пресс, 2005. – 360 с.