

## Применение методов фотограмметрии в вопросах точности обеспечения пространственного и углового положения снимков дистанционного зондирования Земли

В. М. Безменов

*Казанский федеральный университет, Казань, 420008, Россия  
E-mail: bvm-zenit@mail.ru*

Рассматривается подход по определению требований к точности пространственного и углового положения на орбите космического аппарата (КА), выполняющего съёмку с целью дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В основе подхода находится способ определения ошибок пространственных координат, получаемых решением прямой фотограмметрической засечки. Модель ошибок, соответствующая произвольному положению съёмочной системы в пространстве, позволяет использовать в качестве углов ориентации любую систему углов Эйлера. Предлагаемый подход даёт возможность рассчитывать вклад погрешностей не только в параметрах ориентации (в углах), но и в пространственном положении КА ДЗЗ, в параметрах, характеризующих оптическую съёмочную систему, а также вклад ошибок измерения координат точек на изображении. Выполнение такой оценки возможно для любой орбиты и при любом положении КА ДЗЗ на этой орбите. Это позволит с большей степенью надёжности установить требования к точности определения пространственного и углового положения (геопривязки) снимков дистанционного зондирования Земли, т.е. КА ДЗЗ. Приведены результаты численных экспериментов, моделирующих разнообразные орбиты и съёмочные системы с разными значениями элементов внутреннего и внешнего ориентирования.

**Ключевые слова:** геопривязка данных ДЗЗ, ориентация космического аппарата, оценка точности, пространственные координаты, средняя квадратическая ошибка, фотограмметрическая засечка, элементы внешнего ориентирования, элементы внутреннего ориентирования

Одобрена к печати: 02.10.2020  
DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-45-52

### Введение

В статье (Аванесов и др., 2019), касающейся вопросов обеспечения географической привязки снимков дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), в частности, отмечается следующее:

- одной из важнейших характеристик спутниковых данных ДЗЗ является точность их геопривязки;
- обеспечить геопривязку без использования опорных ориентиров (опорных точек) на местности можно только на основании показаний бортовых измерительных приборов.

Именно обеспечение геопривязки ДЗЗ высокого разрешения без использования опорных точек позволит повысить оперативность в получении пространственных данных, необходимых при построении и обновлении цифровых карт различного назначения и цифровых моделей рельефа.

Совершенно справедливо также замечание, что «основной вклад в совокупную ошибку геопривязки вносят погрешности в измерениях параметров ориентации» (Аванесов и др., 2018, 2019).

Теория и практика обработки аэрокосмических изображений позволяет утверждать, что совокупная ошибка определения пространственных координат точек исследуемого объекта из обработки его изображений определяется многими факторами: пространственным и угловым положением съёмочной системы (камеры), базисом съёмки, параметрами самой съёмочной камеры, положением измеряемой точки на снимке и т.д., а также погрешностями, соответствующими данным факторам (Безменов, Сафин, 2019б; Жарова, Чибуничев, 2017). Поэтому необходимо иметь возможность рассчитывать вклад погрешностей не только

в параметрах ориентации (в углах), но и в пространственном положении космического аппарата (КА), погрешностей параметров, характеризующих оптическую съёмочную систему и других параметров. Причём выполнение такой оценки должно быть возможным для любой орбиты и при любом положении КА ДЗЗ на этой орбите. Именно такой подход позволит с высокой степенью надёжности сформировать требования к точности определения пространственного и углового положения (геопривязки) снимков дистанционного зондирования Земли, т. е. КА ДЗЗ.

### Подход к решению задачи

Обработка снимков, полученных системами КА ДЗЗ, выполняется с использованием методов фотограмметрии. Именно такие методы могут предоставить надёжный инструмент для расчёта погрешностей в положении центра масс КА на орбите и в угловой ориентации КА, необходимых для достижения требуемой точности определения пространственных координат при обработке снимков, полученных системами КА ДЗЗ, без использования опорных точек.

Прямая фотограмметрическая засечка, основанная на использовании условия компланарности и позволяющая определять пространственные координаты точек исследуемого объекта по измерениям перекрывающихся изображений, даёт возможность найти строгое решение упомянутой задачи. В статьях (Безменов, Сафин, 2019а, б) предлагается общий подход к решению задачи оценки точности прямой фотограмметрической засечки для произвольного случая съёмки, приводится модель ошибок (погрешностей), с которыми определяются пространственные координаты точки исследуемого объекта методом прямой фотограмметрической засечки. В этой модели учитываются средние квадратические ошибки (СКО) пространственного и углового положения, параметров съёмочной камеры, а также возможные СКО измерения координат точек на изображении.

Модель делает возможным применение любой системы углов ориентации. Данный подход позволяет легко выделить группу параметров и оценить их вклад в ошибки  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$  определения пространственных координат точки исследуемого объекта. Расчёты могут быть выполнены по одной паре снимков (для двух центров съёмки) и большему числу пар, сформированных с использованием изображений, центры съёмки которых расположены в разных точках орбиты на разных витках. Получаемые результаты будут соответствовать геоцентрической системе координат.

### Результаты численных экспериментов

В статье (Аванесов и др., 2019) отмечается, что положение КА ДЗЗ на орбите удаётся надёжно определять с СКО менее 1 м, требуемый уровень точности определения углового положения (ориентации) КА ДЗЗ высокого разрешения соответствует СКО менее 1".

На основе модели ошибок (Безменов, Сафин, 2019а, б) выполнены численные эксперименты по определению СКО  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$  и вклада в эти СКО погрешностей в параметрах ориентации. Результаты экспериментов соответствуют предположениям, указанным в *табл. 1*.

Таблица 1. Предположения, принятые в экспериментах

Высота съёмки $H$ , км	Фокусное расстояние $f$ , мм	СКО угловой ориентации $m_{\varphi}$ , угл. с	СКО положения $m_S$ , м	Размер пикселя, мкм	Угол конвергенции, град
800	13 300; 17 000	0,10	0,10	6,6	35
450	8800	0,10; 0,20			
475	4000	0,20; 1,0	0,50; 1,50	6,0	

Примечание: Ошибки элементов внутреннего ориентирования:  $m_f = 1$  пиксель;  $m_{x0} = m_{y0} = 0,5$  пикселя; ошибки измерения изображения:  $m_x = m_y = 0,5$  пикселя.

Указанные предположения применены для орбит с наклоном  $J$ :  $55^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $97,3^\circ$ . Для полярной орбиты ( $J = 90^\circ$ ) смоделированы два витка, условно обозначенные как: виток  $L = 0^\circ$ , виток  $L = 45^\circ$ , где цифры означают среднее значение долготы, к которой имеет отношение виток на момент съёмки.

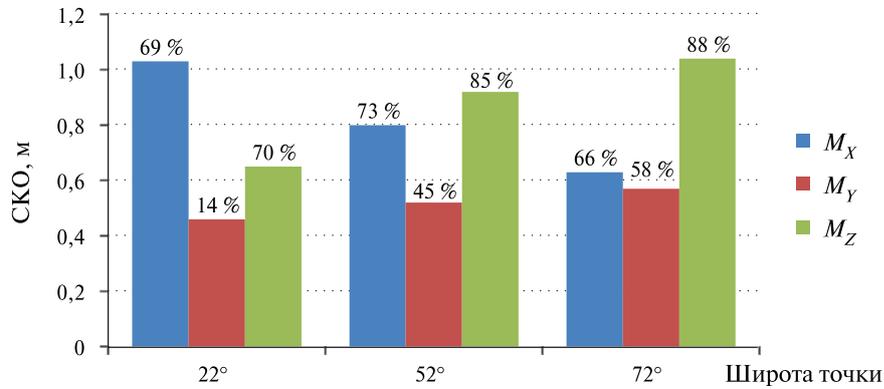


Рис. 1. СКО определения пространственных координат точки на земной поверхности: полярная орбита, виток  $L = 0^\circ$ ,  $H = 800$  км,  $f = 13\,300$  мм,  $m_U = 0,10''$

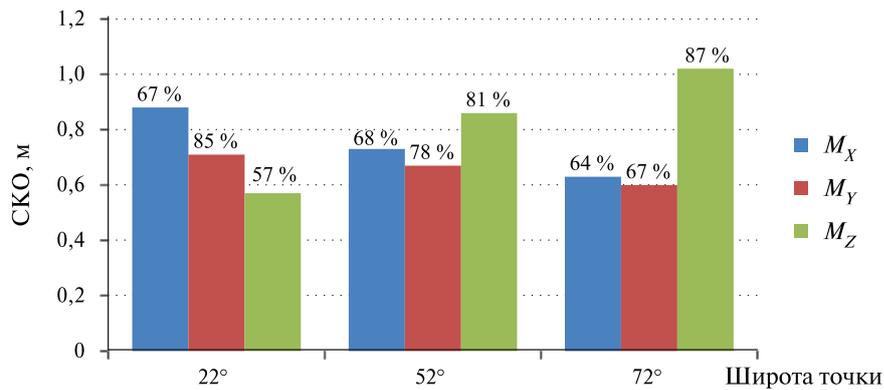


Рис. 2. СКО определения пространственных координат точки на земной поверхности: полярная орбита, виток  $L = 45^\circ$ ,  $H = 800$  км,  $f = 13\,300$  мм,  $m_U = 0,10''$



Рис. 3. СКО определения пространственных координат точки: наклонная орбита ( $J = 55^\circ$ ),  $H = 800$  км,  $f = 13\,300$  мм,  $m_U = 0,10''$

На диаграммах рис. 1–3, полученных для  $H = 800$  км,  $f = 13\,300$  мм,  $m_U = 0,10''$ , показаны значения СКО  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$  определения пространственных координат, рассчитанные для полярной (см. рис. 1, 2) и наклонной (см. рис. 3) орбит, а также указан вклад (в процентах)

погрешностей в параметрах ориентации в совокупные ошибки  $M_X, M_Y, M_Z$ . Во всех случаях точки, погрешности для которых отражены на диаграммах, принадлежат одному витку (как в случае полярной орбиты ( $J = 90^\circ$ ), так и в случае наклонной орбиты ( $J = 55^\circ$ )). При этом точка, для которой рассчитывались погрешности  $M_X, M_Y, M_Z$ , во всех случаях, независимо от широты этой точки и орбиты (полярная, наклонная), имела одинаковые значения координат на паре изображений (стереопаре) с учётом величины их перекрытия. Результаты этих экспериментов позволяют сделать следующие выводы:

- каждой из пространственных координат соответствует своя погрешность, при этом величина СКО зависит от расположения базиса космической съёмки относительно системы координат, в которой определяются координаты точек исследуемого объекта (поверхности);
- вклад СКО параметров ориентации в совокупную ошибку определения пространственных координат (т.е. геопривязки) в данных экспериментах оказывается основным и в среднем составляет 69 %;
- при СКО определения углового положения  $0,10''$  и размере пикселя на поверхности Земли  $0,4$  м ( $H = 800$  км,  $f = 13\,300$  мм) фактическая точность определения пространственных координат будет превосходить размер пикселя в 1,5–3 раза, среднее значение общей ошибки определения пространственных координат  $M = \sqrt{M_X^2 + M_Y^2 + M_Z^2}$  составит:  $M = 1,3$  м.

В результате исследований было выявлено, что при принятых предположениях увеличение значений ошибок в определении положения КА на орбите в 2,5–3 раза (до 0,25–0,30 м) ведёт к незначительному увеличению СКО  $M_X, M_Y, M_Z$ : не более чем на 10 %.

Использование съёмочной системы с более значительным фокусным расстоянием не позволит достичь существенного уменьшения значений ошибок  $M_X, M_Y, M_Z$  определения пространственных координат при той же точности ориентации ( $m_U = 0,10''$ ). В табл. 2 приведено сравнение значений СКО  $M_X, M_Y, M_Z$ , соответствующих фокусному расстоянию 13 300 и 17 000 мм.

Таблица 2. Сравнение СКО определения пространственных координат, точность ориентации  $0,10''$  (полярная орбита, виток  $L = 45^\circ$ )

F, мм	Параметры	Широта 22°			Широта 52°			Широта 72°		
		$M_X$	$M_Y$	$M_Z$	$M_X$	$M_Y$	$M_Z$	$M_X$	$M_Y$	$M_Z$
13 300	СКО, мм	0,88	0,71	0,57	0,73	0,67	0,86	0,63	0,60	1,02
	Вклад углов, %	67	75	57	68	78	57	64	67	87
17 000	СКО, мм	0,78	0,68	0,49	0,66	0,62	0,80	0,56	0,54	0,97
	Вклад углов %	75	89	66	76	85	87	72	75	91

Очевидно, что снижение требований к точности ориентации при сохранении требований к точности определения пространственных координат может быть обеспечено уменьшением высоты съёмки и величины фокусного расстояния съёмочной системы. Результаты, подтверждающие это предположение, приведены в табл. 3.

Таблица 3. Сравнение СКО определения пространственных координат при разной точности ориентации (полярная орбита, виток  $L = 45^\circ$ )

f, мм	H, км	СКО ориентации	Широта 22°			Широта 52°			Широта 72°		
			$M_X$	$M_Y$	$M_Z$	$M_X$	$M_Y$	$M_Z$	$M_X$	$M_Y$	$M_Z$
13 300	800	$0,10''$	0,88	0,71	0,57	0,73	0,67	0,86	0,63	0,60	1,02
8 800	450	$0,20''$	0,87	0,76	0,54	0,73	0,70	0,90	0,62	0,60	1,10

При меньшем значении фокусного расстояния и высоты съёмки характер зависимости ошибок  $M_X$ ,  $M_Y$ ,  $M_Z$  от широты (рис. 4) будет аналогичен приведённому на рис. 2. При этом вклад от СКО в углах ориентации в итоговые значения  $M_X$ ,  $M_Y$ ,  $M_Z$  будет несколько больше.

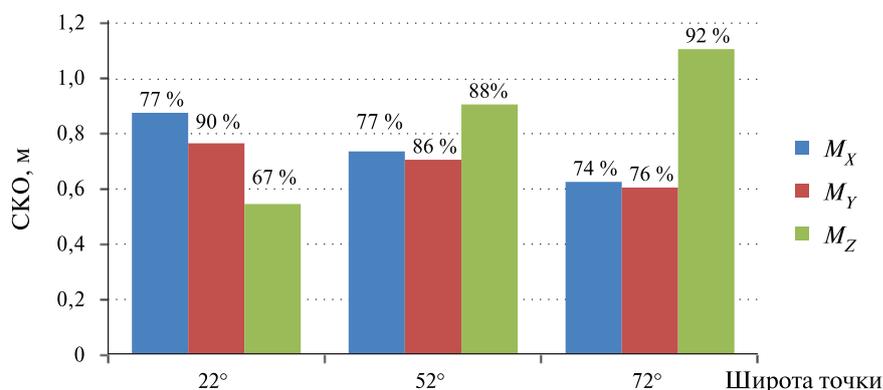


Рис. 4. СКО определения пространственных координат точки на земной поверхности: наклонная орбита, виток  $L = 45^\circ$ ,  $H = 450$  км,  $f = 8800$  мм,  $m_U = 0,20''$

Использование данных ДЗЗ, геопривязка которых выполнена с точностью, принятой в численных экспериментах:  $H = 800$  км,  $f = 13\,300$  мм,  $m_U = 0,10''$  (см. рис. 1–3), — с учётом картографической проекции фактически соответствует задаче создания топографических планов масштаба М 1:5000 с высотой сечения рельефа 5 м. СКО определения плановых координат для данного масштаба составляет 2,0–2,5 м. Точность определения пространственных координат в эксперименте:  $H = 450$  км,  $f = 8800$  мм,  $m_U = 0,10''$  (рис. 5) — фактически соответствует возможности создания контурной части топографических планов масштаба М 1:2000.

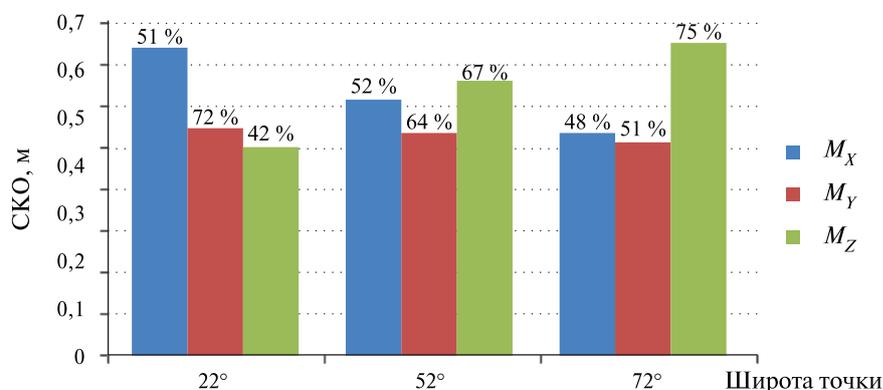


Рис. 5. Погрешности определения пространственных координат точки: наклонная орбита, виток  $L = 45^\circ$ ,  $H = 450$  км,  $f = 8800$  мм,  $m_U = 0,10''$

СКО определения плановых координат для данного масштаба составляет 0,8–1,0 м. Возможная высота сечения рельефа при этом будет равна 2,5 м для территории, близкой к экватору (широта не более  $25^\circ$ ), и 3 м — в остальных случаях. При этом создание такого топографического материала будет возможно только на основании бортовых измерительных приборов, т. е. без использования опорных точек (ориентиров) на поверхности Земли.

В статьях (Аванесов и др., 2018; Ахметов и др., 2017) рассмотрен широкий комплекс вопросов, решение которых направлено на повышение точности измерения ориентации и геопривязки данных ДЗЗ КА «Ресурс-П». В работе (Аванесов и др., 2018) отмечается, что снижение СКО ориентации до  $1\text{--}1,5''$  позволяет улучшить СКО геопривязки снимков ДЗЗ до уровня 3–4 м.

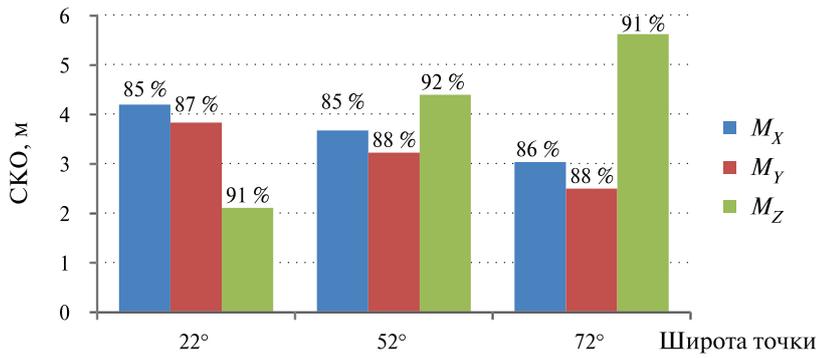


Рис. 6. СКО определения пространственных координат, рассчитанные для КА «Ресурс-П» (СКО ориентации  $m_{\gamma} = 1,0''$ ; СКО положения КА  $m_{\sigma} = 1,5$  м)

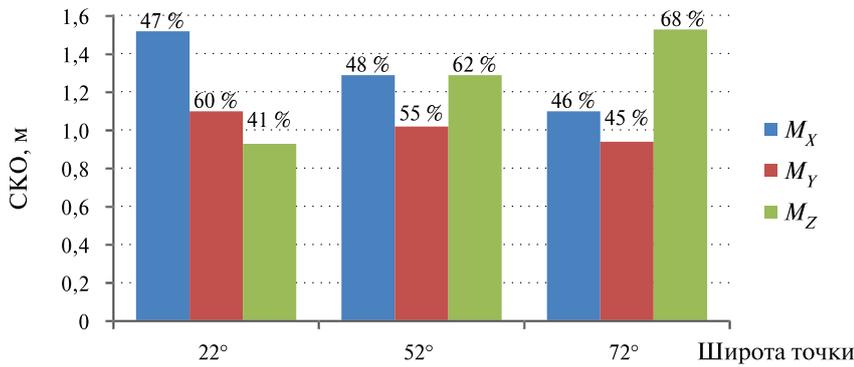


Рис. 7. СКО определения пространственных координат, рассчитанные для КА «Ресурс-П» (СКО ориентации  $m_{\gamma} = 0,2''$ ; СКО положения КА  $m_{\sigma} = 0,5$  м)

На диаграмме рис. 6 приведены значения СКО  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$  определения пространственных координат и вклад (в процентах) погрешностей в параметрах ориентации в совокупные ошибки  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$ . Полученные результаты соответствуют предположениям, указанным в табл. 1:  $H = 475$  км, наклон орбиты  $J = 97,3^\circ$ . В данном эксперименте усреднённое значение СКО по всем координатам и точкам составляет  $M_{xyz} = 3,8$  м. Увеличение ошибки в положении КА до 3 м приведёт к ухудшению геопривязки в среднем на 20 %, а вклад углов при этом уменьшится на 14 %.

Отмечается, что измерение ориентации КА возможно с СКО на уровне  $0,2''$  (Аванесов и др., 2019). На рис. 7 приведена диаграмма, отражающая значения СКО  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$  и вклад угловой погрешности при точности ориентации  $0,2''$  и пространственного положения  $0,50$  м. В данном случае вклад углов в среднем составляет 52 % и фактически сопоставим с вкладом всех остальных параметров. Расчёты показывают, что повышение точности в определении положения КА до  $0,25$  и  $0,10$  м, т. е. в 2 и 5 раз, позволит уменьшить СКО  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$  определения пространственных координат соответственно в среднем на 6 и 8 %.

Уменьшение СКО ориентации КА до уровня  $0,1''$  при погрешности пространственного положения  $0,5$  м приведёт к уменьшению СКО  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$  определения пространственных координат в среднем на 11 %. Вклад углов в  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$  при этом будет составлять 25–42 %.

### Заключение

Результаты численных экспериментов, приведённые в статье, показывают, что способ определения ошибок пространственных координат, получаемых решением прямой фотограмметрической засечки (Безменов, Сафин, 2019а, б), в принципе может быть применён в проектировании моделей геопривязки целевой информации, получаемой КА ДЗЗ.

## Литература

1. Аванесов Г. А., Бессонов Р. В., Куркина А. Н., Сметанин П. С. Технология наземной обработки данных о координатах звёзд в целях повышения точности геопривязки снимков Земли из космоса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 6. С. 31–38. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-31-38.
2. Аванесов Г. А., Бессонов Р. В., Куркина А. Н., Никитин А. А., Фориш А. А. Вопросы обеспечения географической привязки снимков дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 59–64. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-59-64.
3. Ахметов Р. Н., Еремеев В. В., Кузнецов А. Е., Мятлов Г. Н., Пошехонов В. И., Стратилатов Н. Р. Высокоточная геодезическая привязка изображений земной поверхности от КА «Ресурс-П» // Исслед. Земли из космоса. 2017. № 1. С. 44–53.
4. Безменов В. М., Сафин К. И. (2019а) Фотограмметрическая засечка. Оценка точности для произвольного случая съёмки // Изв. высш. учеб. заведений. Геодезия и аэрофотосъёмка. 2019. Т. 63. № 4. С. 400–406. DOI: 10.30533/0536-101X-2019-63-4-400-406.
5. Безменов В. М., Сафин К. И. (2019б) Оценка точности фотограмметрической засечки для произвольного случая съёмки. Общий подход к решению задачи // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 283–289. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-283-289.
6. Жарова Н. Э., Чибуничев А. Г. Анализ точности определения координат точек местности при использовании «случайных» стереопар космических снимков // Изв. высш. учеб. заведений. Геодезия и аэрофотосъёмка. 2017. Т. 61. № 5. С. 79–86.

## Application of photogrammetry methods to ensure accuracy of spatial and angular position of Earth remote sensing images

V. M. Bezmenov

*Kazan Federal University, Kazan 420008, Russia  
E-mail: bvm-zenit@mail.ru*

An approach is considered to determine the accuracy requirements for the spatial and angular position in the orbit of spacecraft performing remote sensing surveys. The approach is based on a method for determining errors in spatial coordinates obtained by solving a direct photogrammetric mark. The error model corresponding to an arbitrary position of the survey system in space allows using any Euler angle system as orientation angles. The proposed approach allows calculating the contribution not only of errors in the orientation parameters (in angles), but also the contribution of errors in the spatial position of the remote sensing spacecraft, in the parameters that characterize the optical shooting system, as well as the contribution of image measurement errors. This estimation is possible for any orbit and for any position of the remote sensing spacecraft in this orbit. This raises reliability in establishing the requirements to the accuracy of determining the spatial and angular position (reference) of remote sensing images of the Earth, i.e. the remote sensing spacecraft. The results of numerical experiments simulating different orbits and survey systems with different values of internal and external orientation elements are presented.

**Keywords:** geo-referencing of Earth remote sensing data, spacecraft orientation, accuracy estimation, spatial coordinates, mean square error, photogrammetric intersection, elements of external orientation, elements of interior orientation

Accepted: 02.10.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-45-52

## References

1. Avanesov G. A., Bessonov R. V., Kurkina A. N., Smetanin P. S., Tekhnologiya nazemnoi obrabotki dannykh o koordinatakh zvezd v tselyakh povysheniya tochnosti geopriv'yazki snimkov Zemli iz kosmosa (Technology for ground processing of data on the stars' coordinates in order to improve the accuracy of georeferencing Earth images from space), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 6, pp. 31–38, DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-31-38.
2. Avanesov G. A., Bessonov R. V., Kurkina A. N., Nikitin A. V., Forsh A. A., Voprosi obespecheniya geograficheskoi priv'yazki snimkov distantsionnogo zondirovaniya Zemli (Issues of providing geographic referencing of Earth remote sensing images), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 5, pp. 59–64, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-59-64.
3. Akhmetov R. N., Ereemeev V. V., Kuznetsov A. E., Myatov G. N., Poshekhonov V. I., Stratilatov N. R., Vysokotochnaya geodezicheskaya priv'yazka izobrazhenii zemnoi poverkhnosti ot KA "Resurs-P" (Organization of high-precision geolocation of earth surface images from the spacecraft "Resurs-P"), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2017, No. 1, pp. 44–53, DOI: 10.7868/S0205961417010018.
4. Bezmenov V. M., Safin K. I. (2019a), Fotogrammerticheskaya zasechka. Otsenka tochnosti dlya proizvol'nogo sluchaya s'emki (Photogrammetric intersection. Accuracy estimation for an arbitrary case of aerial survey), *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geodeziya i aerofotos'emka*, 2019, Vol. 63, No. 4, pp. 400–406, DOI: 10.30533/0536-101X-2019-63-4-400-406.
5. Bezmenov V. M., Safin K. I. (2019b), Otsenka tochnosti fotogrammerticheskoi zasechki dlya proizvol'nogo sluchaya s'emki (Accuracy assessment of photogrammetric intersection for random shooting case. The general approach to solving the problem), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 4, pp. 283–289, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-283-289.
6. Zharova N. E., Chibunichev A. G., Analiz tochnosti opredeleniya koordinat toчек mestnosti pri ispol'zovanii "sluchainykh" stereopar kosmicheskikh snimkov (Analysis of the accuracy of determining the coordinates of terrain points using "random" stereo pairs of satellite images), *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geodeziya i aerofotos'emka*, 2017, Vol. 61, No. 5, pp. 79–86.