

РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ КАЛИБРОВКИ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «КАНОПУС-В»

С. И. Терехов, О. А. Никонов, Н. О. Кобельков,
В. В. Некрасов, В. А. Ермаков

В сентябре 2019 г. введена в эксплуатацию космическая система «Канопус-В», включающая в свой состав орбитальную группировку КА «Канопус-В» № 1, № 3, № 4, № 5, № 6, «Канопус-В-ИК» (ОГ «Канопус-В»). Работы по выполнению геометрической и радиометрической калибровки панхроматической съёмочной системы и многозональной съёмочной системы на этапах летных испытаний и эксплуатации КА выполняются АО «Корпорация «ВНИИЭМ». В данной статье изложены результаты геометрической калибровки аппаратуры ПСС и МСС, а также анализ проблемных вопросов, возникших в процессе использования геометрических полигонов системы валидационных подспутниковых наблюдений СВПП-РК.

Ключевые слова: космическая система, орбитальная группировка, съёмочная система, целевая аппаратура, панхроматическая съёмочная система, многозональная съёмочная система, геометрическая калибровка, геометрический полигон, тестовый участок.

Введение

Геометрическая калибровка аппаратуры панхроматической съёмочной системы (ПСС) и многозональной съёмочной системы (МСС) проводится с целью оценки стабильности основных координатно-измерительных и радиометрических характеристик целевой информации (ЦИ), обеспечения их соответствия требованиям тактико-технического задания (ТТЗ), а также в случае необходимости уточнения калибровочных коэффициентов специального программного обеспечения (СПО) средств наземного комплекса планирования, приема, обработки и распространения информации (НКПОР-К).

В процессе калибровки аппаратуры ПСС и МСС решаются следующие основные задачи:

- геометрическая калибровка;
- относительная радиометрическая калибровка;
- абсолютная радиометрическая калибровка.

Комплекс работ по геометрической калибровке аппаратуры ПСС и МСС, выполняемый в ходе летных испытаний и эксплуатации КА «Канопус-В», заключается в уточнении фокусного расстояния, взаимного углового и линейного положений чувствительных элементов фокальной плоскости, коэффициентов дисторсии, конструктивных углов оптических осей.

Кроме этого, дополнительно оцениваются следующие показатели:

- полоса захвата;
- геометрическое разрешение;
- среднеквадратические погрешности калибровки взаимного углового положения чувствительных элементов фокальной плоскости.

По результатам геометрической калибровки выполняется корректировка калибровочных поправок СПО средств НКПОР-К.

Для выполнения геометрической калибровки используется программный комплекс анализа, оценки и обеспечения качества данных ДЗЗ КА серии «Канопус-В» (ПК КАОД-К) из состава НКПОР-К.

Основные расчетные соотношения для уточнения элементов внутреннего ориентирования и конструктивных углов аппаратуры МСС и ПСС изложены в документе «Методика геометрической калибровки аппаратуры МСС, ПСС и МСУ-ИК-СРМ КА «Канопус-В» № 1 и «Канопус-В-ИК» (распространено на КА «Канопус-В» № 3 ... 6)» [1].

Геометрическая калибровка аппаратуры ПСС и МСС проводится не реже двух раз в год или немедленно в случае ухудшения точности геодезической привязки.

1. Полигонное обеспечение геометрической калибровки

В процессе геометрической калибровки используются снимки геометрических полигонов – тестовых участков местности, – содержащие опорную информацию природного и искусственного происхождения с известными и стабильными координатно-измерительными характеристиками.

В качестве основных геометрических полигонов использовались тестовые участки из состава системы валидационных подспутниковых наблюдений (СВПП-РК), которая включает в свой состав четыре полигона (табл. 1).

Таблица 1

Полигоны СВПП-РК
для геометрической калибровки

№ п/п	Наименование полигона	Точность опорных данных, м
1	Московский	0,3
2	Пятигорский	0,5
3	Иркутский	0,3
4	Самарский	0,5

Созданные в СВПП-РК полигоны позволяют выполнять геометрическую калибровку круглогодично. Согласно упоминавшейся выше методике, для

проведения геометрической калибровки необходимы их снимки, полученные в следующих условиях:

– для корректного отождествления опорных объектов съемка должна проводиться при минимальной облачности, высота солнца должна быть не менее 30° и метеорологическая дальность видимости более 20 км;

– для проведения качественной геометрической калибровки необходимо не менее трех съемок геометрических полигонов с минимальным отклонением от надира (не более 5°).

Вместе с тем, как показано в табл. 2, все перечисленные полигоны системы СВПН-РК находятся на территориях, на которых погодные условия не способствуют получению безоблачных снимков [2].

Как видно из приведенных данных, для полигонов СВПН-РК максимальное количество солнечных дней зафиксировано на Пятигорском полигоне. Но и там оно составляет всего 44% от общего количества дней в году.

В табл. 3 приведены данные о съемках геометрических полигонов, выполненных в ходе летных испытаний КА «Канопус-В» № 5.

В табл. 4 приводятся оценки (по методу Монте-Карло) сроков получения необходимых для геометрической калибровки трех съемок в случае использования одного из полигонов СВПН-РК. При этом:

– длительность съемок – расчетная, и она учитывает погодные условия сезона;

– продолжительность съемок рассчитана из интервала повторного прохождения КА «Канопус-В» (15 суток) над полигоном при заданных углах отклонения.

Из табл. 4 видно, что если использовать данные только одного полигона, то наиболее предпочтительным является использование Пятигорского полигона. Но и в этом случае для геометрической калибровки даже в летний съемочный период необходимо примерно 90 суток. А для остальных полигонов время трех съемок существенно превышает длительность съемочных сезонов.

Для случая использования данных всех четырех полигонов СВПН-РК оценки для получения трех и четырех кондиционных съемок приведены в табл. 5.

Таблица 2

Погодные условия на полигонах СВПН-РК

№ п/п	Название полигона	Количество солнечных дней, %				
		За год	Зима	Весна	Лето	Осень
1	Иркутский	5	5	6	4	4
2	Самарский	13	8	15	16	9
3	Пятигорский	44	28	30	59	45
4	Московский	25	21	29	25	16

Таблица 3

Количество съемок геометрических полигонов СВПН-РК в первом полугодии 2019 г.

Месяц	Наименование полигона			
	Иркутский	Самарский	Пятигорский	Московский
Январь	0	0	1	1
Февраль	2	2	1	0
Март	0	1	0	0
Апрель	0	2	0	0
Май	0	1	1	1
Июнь	1	1	0	1

Таблица 4

Продолжительность получения трех съемок одного полигона

№ п/п	Название полигона	Продолжительность съемок, сутки			
		Зима	Весна	Лето	Осень
1	Иркутский	900	750	1125	1125
2	Самарский	570	300	285	510
3	Пятигорский	165	165	90	105
4	Московский	225	165	195	285

Таблица 5

Оценка времени выполнения трех съемок с использованием четырех полигонов СВПП-РК

№	Наименование	Съемочный сезон			
		Зима	Весна	Лето	Осень
1	Продолжительность трех съемок при четырех полигонах, сутки	90	75	60	75
2	Продолжительность четырех съемок при четырех полигонах, сутки	105	90	75	90

Продолжительность съемок рассчитана из возможности прохождения КА в течение одного интервала повторного прохождения КА «Канопус-В» (15 суток) над всеми полигонами при заданных углах отклонения.

Приведенные данные показывают, что в этом случае сроки получения, необходимых трех кондиционных снимков существенно сокращаются. Тем не менее, считать их приемлемыми для этапа эксплуатации КА не представляется возможным.

Актуальной задачей является обеспечение приемлемых сроков выполнения геометрической калибровки. Особую остроту данная задача приобретает на этапе эксплуатации КА в случае существенного ухудшения точности привязки, что может потребовать выполнения перекалибровки аппаратуры ПСС и МСС.

В этой связи по согласованию с Госкорпорацией «Роскосмос» допускается использование дополнительных геометрических полигонов, не входящих в систему СВПП-РК (в том числе и зарубежных). Основанием для использования является их удовлетворение следующим техническим требованиям:

- средняя квадратическая погрешность измерения координат опорных объектов в системе WGS не должна быть более 0,5 м;
- количество опорных объектов на полигоне должно обеспечивать наличие не менее трех изображений опорных объектов на каждом фотоприемнике целевой аппаратуры (ЦА);
- опорные объекты должны быть распределены равномерно и различимы на снимках ЦА;
- полигон должен обеспечивать равномерное распределение 20 – 30 опорных объектов по условному кадру.

В настоящее время для проведения геометрической калибровки аппаратуры ПСС и МСС КА «Канопус-В» используются дополнительные геометрические полигоны, указанные в табл. 6.

При этом:

- для проведения геометрической калибровки в полном объеме (перекалибровки) используются как основные (т. е. из состава СВПП-РК), так и дополнительные геометрические полигоны;
- для регулярной проверки и подтверждения качества геометрической калибровки используются только полигоны СВПП-РК.

Таблица 6

Дополнительные полигоны для геометрической калибровки

№ п/п	Наименование полигона	Обеспечиваемая точность привязки, м
1	Барселона	1
2	Лондон	1
3	Париж	1

Для сокращения сроков проведения геометрической калибровки целесообразно рассмотреть следующие направления совершенствования полигонного обеспечения:

- 1) увеличение числа отечественных сертифицированных геометрических полигонов;
- 2) создание сертифицированного эталонного геодезического покрытия на базе съемок отечественных и зарубежных КА.

2. Порядок проведения геометрической калибровки ОГ «Канопус-В»

Геометрическая калибровка аппаратуры МСС и ПСС ОГ «Канопус-В» проводится с целью обеспечения выполнения требований по точности геодезической привязки ее снимков к земной поверхности.

Работы по геометрической калибровке выполняет АО «Корпорация «ВНИИЭМ» и НЦ ОМЗ АО «Российские космические системы».

НЦ ОМЗ АО «Российские космические системы» проводит:

- оперативный контроль точности геодезической привязки каждого полетного задания (ПЗ) с применением комплекса нормализации данных NormSatBIK;
- съемку основных и дополнительных геометрических полигонов в необходимых режимах работы ЦА по заявкам АО «Корпорация «ВНИИЭМ»;
- передачу установленным порядком результатов контроля точности геодезической привязки и материалов съемки полигонов в АО «Корпорация «ВНИИЭМ».

АО «Корпорация «ВНИИЭМ» на основе переданных материалов съемок и с применением комплекса КАОД-К выполняет работы в рамках следующих этапов геометрической калибровки:

- первичная геометрическая калибровка;

- зачетная проверка качества геометрической калибровки;
- уточнение геометрических калибровочных поправок СПО средств НКПОР-К;
- контроль точности геодезической привязки с применением обновленных геометрических поправок;
- регулярный углубленный анализ результатов геометрической калибровки.

1. Первичная геометрическая калибровка аппаратуры ПСС и МСС проводится на этапах:

- летных испытаний (ЛИ) после вывода КА на орбиту;
- эксплуатации в случае возникновения необходимости полной перекалибровки аппаратуры ПСС и МСС (например, при уточнении ориентации КА).

По опыту проведения летных испытаний ОГ «Канопус-В» первичная геометрическая калибровка аппаратуры ПСС и МСС проводится в течение примерно двух месяцев после начала ЛИ.

2. Зачетная проверка качества геометрической калибровки проводится в основном на этапе эксплуатации КА с целью подтверждения оценок качества геометрической калибровки, выданных НЦ ОМЗ АО «Российские космические системы». Цель проверки – оценка точности геодезической привязки для подтверждения ее соответствия требованиям ТТЗ. В процессе оценки, как правило, используются материалы съемок сертифицированных геометрических полигонов системы СВПН-РК.

3. Уточнение геометрических калибровочных поправок СПО средств НКПОР-К проводится в случае отрицательного результата зачетной проверки качества геометрической калибровки. Цель – обеспечение соответствия точности геодезической привязки ЦИ аппаратуры ПСС и МСС требованиям ТТЗ. Работы выполняются на ПК КАОД-К с использованием съемок основных и дополнительных геометрических полигонов.

4. Контроль точности геодезической привязки с применением обновленных геометрических поправок проводится после проведения первичной геометрической калибровки и в случае уточнения геометрических калибровочных поправок. Цель – подтверждение обеспеченной точности геодезической привязки требованиям ТТЗ. В процессе оценки используются материалы контрольного массива (не менее 15) съемок аппаратуры ПСС и МСС, выполненных в зачетных условиях в различных регионах Земли.

5. Регулярный углубленный анализ результатов геометрической калибровки проводится на регулярной основе с целью оценки их стабильности за оцениваемый период (как правило 1 раз в квартал). При этом статистической оценке подвергаются

данные о точности геодезической привязки практически всех выполненных полетных заданий – в среднем 1000 ÷ 1200 ПЗ за квартал. Особенностью получаемой оценки является наличие методической погрешности, которая обусловлена тем, что к оценке привлекались ПЗ, в которых съемка выполнялась в условиях, не соответствующих зачетным (например, с большими углами крена).

После завершения геометрической калибровки АО «Корпорация «ВНИИЭМ» передает скорректированные поправки в НЦ ОМЗ АО «Российские космические системы» для обновления СПО комплекса нормализации данных NormSatBIK.

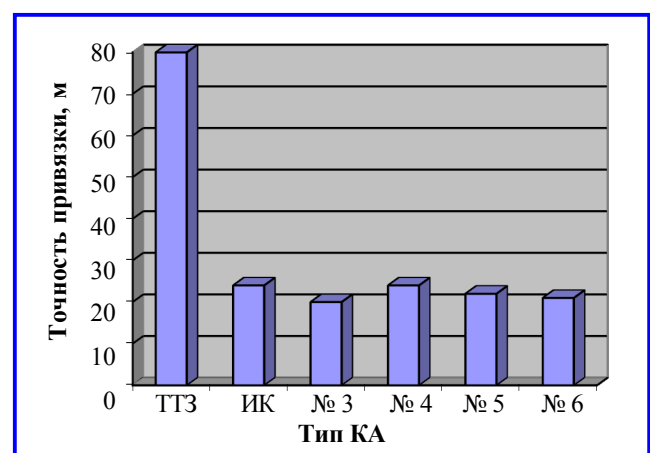
3. Результаты геометрической калибровки ОГ «Канопус-В»

Основные результаты углубленного анализа геометрической калибровки аппаратуры ПСС и МСС группировки «Канопус-В» за период 2017 ÷ 2019 гг. представлены в табл. 7, а за IV квартал 2019 г. – на рисунке.

Таблица 7

Оценки точности геометрической привязки ЦИ КА «Канопус-В» за период 2017 ÷ 2019 гг.

Период	«Канопус-В»				
	ИК	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6
2017 г. 3 кв.	3023 м	–	–	–	–
2017 г. 4 кв.	24 м	–	–	–	–
2018 г. 1 кв.	24 м	2443 м	4091 м	–	–
2018 г. 2 кв.	30 м	34 м	30 м	–	–
2018 г. 3 кв.	31 м	29 м	28 м	–	–
2018 г. 4 кв.	31 м	24 м	26 м	–	–
2019 г. 1 кв.	33 м	23 м	24 м	474 м	46 м
2019 г. 2 кв.	31 м	27 м	24 м	28 м	27 м
2019 г. 3 кв.	30 м	21 м	22 м	32 м	30 м
2019 г. 4 кв.	24 м	20 м	24 м	22 м	21 м



Точность геодезической привязки КА ОГ «Канопус-В» по результатам геометрической калибровки в IV квартале 2019 г.

В каждом столбце таблицы представлены данные ежеквартальной оценки всех полетных заданий, выполненных КА «Канопус-В-ИК», № 3 ... 6 на этапах летных испытаний и эксплуатации.

Первое значение каждого столбца характеризует исходное значение геодезической привязки ЦИ каждого КА, полученное в момент начала летных испытаний.

Приведенные в табл. 7 и на рис. 1 данные позволяют отметить, что точность геодезической привязки выполненных ПЗ за весь период нахождения космических аппаратов ОГ «Канопус-В» на орбите соответствовала требованиям ТТЗ.

При этом после завершения первичной геометрической калибровки оценки точности геодезической привязки всех КА ОГ за рассмотренный период стабильны и находятся в диапазоне 20 ... 35 м. Вариативность оценок по кварталам в данном диапазоне во многом объясняется различиями условий съемки, которые часто не соответствовали зачетным условиям.

Выводы

1. Анализ результатов геометрической калибровки КА ОГ «Канопус-В» за период нахождения на орбите более 2,5 лет показывает, что точность геодезической привязки ЦИ за весь рассмотренный период соответствует требованиям, предъявляемым к космическому комплексу в ТТЗ на ОКР.

2. Результаты углубленного анализа качества геометрической калибровки ОГ «Канопус-В» пока-

зывают высокую стабильность работы служебных систем КА и целевой аппаратуры. За рассмотренный период (2,5 года) значения оценок находятся в диапазоне 20 ... 35 м. При этом вариативность оценок во многом объясняется различиями условий съемки, которые часто не соответствовали зачетным условиям.

3. С целью сокращения сроков проведения работ предложены следующие меры по совершенствованию полигонного обеспечения:

- увеличение числа отечественных сертифицированных геометрических полигонов;

- создание сертифицированного эталонного геодезического покрытия на базе съемок отечественных и зарубежных КА.

4. Созданные в рамках ОКР «Канопус-В» программный комплекс анализа, оценки и обеспечения качества данных ДЗЗ КА и технология проведения геометрической калибровки обеспечивают поддержание требуемой точности геодезической привязки данных ОГ «Канопус-В».

Литература

1. Методика геометрической калибровки аппаратуры МСС, ПСС и МСУ-ИК-СРМ КА «Канопус-В» № 1 и «Канопус-В-ИК» (распространено на КА «Канопус-В» № 3 ... 6). – Рязань : РГРТУ, 2016. – 26 с.
2. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2018 год. – Москва, 2019. – 79 с.

Поступила в редакцию 18.02.2020

Сергей Иванович Терехов, заместитель генерального директора, т. (495) 624-80-77, e-mail: cio@mcc.vniiem.ru.

Олег Анатольевич Никонов, начальник научно-технического комплекса, т. (495) 625-45-16, e-mail: nikonova@hq.vniiem.ru.

Николай Олегович Кобельков, доктор военных наук, старший научный сотрудник, заместитель начальника отдела, т. (495) 623-16-08 e-mail: nokobelkov@mcc.vniiem.ru.

Виктор Владимирович Некрасов, кандидат технических наук, начальник лаборатории, т. (495) 623-52-13, e-mail: v.nekrasov@mcc.vniiem.ru.

Вячеслав Арсеньевич Ермаков, начальник отдела, т. (495) 625-45-16, e-mail: vaermakov@mcc.vniiem.ru. (АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

RESULTS OF GEOMETRIC CALIBRATION OF THE ORBITAL CONSTELLATION OF «CANOPUS-V» SPACE SYSTEM

S. I. Terekhov, O. A. Nikonov, N. O. Kobelkov, V. V. Nekrasov, V. A. Ermakov

«Canopus-V» space system, comprising orbital constellation of «Canopus-V» № 1, № 3, № 4, № 5, № 6 SC and «Canopus-V-IK» SC (orbital constellation «Canopus-V»), has been put into operation in September 2019. The operations regarding geometric and radiometric calibration of panchromatic imaging system and multispectral imaging system at the stages of flight tests and operation of SC are performed

by JC «VNIEM Corporation». The present article provides the results of geometric calibration of MSS (Multispectral Imaging System) and PSS (Panchromatic Imaging System) equipment, as well as the analysis of problem areas revealed in the course of the use of geometric test site of the system of validation ground-truth observations (SVPN-RK).

Key words: space system, orbital constellation, imaging system, mission hardware, panchromatic imaging system, multispectral imaging system, geometric calibration, geometric test site, testing area.

References

1. Methods of geometric calibration of the equipment of MSS (Multispectral Imaging System), PSS (Panchromatic Imaging System) and MSU-IR-SRM of «Canopus-V» № 1 SC and «Canopus-V-IK» (Valid for Canopus-V № 3 ... 6). – Ryazan: RSREU, 2016 – 26 p.
2. Report on specifics of climate on the territory of Russian Federation in 2018. – Moscow, 2019. – 79 p.

Sergei Ivanovich Terekhov, Deputy Director General,
tel.: +7 (495) 624-80-77, e-mail: cio@mcc.vniem.ru.

Oleg Anatolevich Nikonov, Head of Research and Technical Center,
tel.: +7 (495) 625-45-16, e-mail: nikonova@hq.vniem.ru.

Nikolai Olegovich Kobelkov, Doctor of Military Sciences (D. Sc.), Senior Researcher,
Deputy Head of Department, tel.: +7 (495) 623-16-08 e-mail: nokobelkov@mcc.vniem.ru.

Viktor Vladimirovich Nekrasov, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Head of Laboratory,
tel.: +7 (495) 623-52-13, e-mail: v.nekrasov@mcc.vniem.ru.

Viacheslav Arsenevich Ermakov, Head of Department,
tel.: +7(495) 625-45-16, e-mail: vaermakov@mcc.vniem.ru.

(JC «VNIEM Corporation»).