

КОСМИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА. КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ. ИССЛЕДОВАНИЕ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

УДК 629.783

О СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ СИСТЕМЫ РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ КАЛИБРОВКИ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «КАНОПУС-В»

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

В сентябре 2019 г. введена в эксплуатацию космическая система «Канопус-В», включающая в настоящее время в свой состав орбитальную группировку космических аппаратов «Канопус-В» № 3, № 4, № 5, № 6 и «Канопус-В-ИК». Работы по выполнению радиометрической калибровки панхроматической и многозональной съемочных систем на этапах летных испытаний и эксплуатации космических аппаратов выполняются АО «Корпорация «ВНИИЭМ». В статье изложены результаты относительной и абсолютной радиометрической калибровки аппаратуры панхроматической и многозональной съемочных систем по состоянию на июнь 2020 г., формулируются предложения по ее улучшению.

Ключевые слова: орбитальная группировка, съемочная система, целевая аппаратура, панхроматическая съемочная система, многозональная съемочная система, радиометрическая калибровка, радиометрический полигон, тестовый участок.

1. Введение

Радиометрическая калибровка камер панхроматической съемочной системы (ПСС) и многозональной съемочной системы (МСС) целевой аппаратуры (ЦА) космических аппаратов (КА) «Канопус-В» № 3, № 4, № 5, № 6 и «Канопус-В-ИК» (ОГ «Канопус-В») проводится с целью оценки стабильности основных радиометрических характеристик целевой информации (ЦИ), обеспечения их соответствия требованиям технического задания, а также определения, и при необходимости, уточнения калибровочных коэффициентов специального программного обеспечения (СПО) средств наземного комплекса приема, обработки и распространения информации НКПОР-К.

Различают первичную и полетную радиометрические калибровки:

– первичная – проводится на заводе-изготовителе целевой аппаратуры на этапе наземной экспериментальной отработки с использованием поверенной фотометрической сферы. На этом этапе определяются калибровочные коэффициенты с учетом реальных радиометрических характеристик ЦА;

– полетная – заключается в проверке соответствия точности радиометрической калибровки требованиям тактико-технического задания (ТТЗ) на этапах летных испытаний и эксплуатации КА. Если ее точность не подтверждается, то выполняется полетная перекалибровка ЦА, в процессе которой производится уточнение калибровочных коэффициентов.

В статье анализируется опыт проведения полетной радиометрической калибровки, полученный в

ходе летных испытаний и выполнения соответствующих работ в рамках эксплуатационных контрактов КА, входящих в ОГ «Канопус-В», формулируются предложения по ее улучшению.

В процессе полетной радиометрической калибровки (далее радиометрической калибровки) решаются две задачи:

- относительная радиометрическая калибровка (ОРК) для выравнивания относительных яркостей пикселей матриц прибора с зарядовой связью (ПЗС) камер ПСС и МСС;
- абсолютная радиометрическая калибровка (АРК), которая позволяет вычислить коэффициенты перевода яркости пикселей ПЗС-матриц в значения физической величины – спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ).

2. Относительная радиометрическая калибровка

Организация работ. Относительная радиометрическая калибровка проводится с целью коррекции неравномерности яркости пикселей в пределах каждой ПЗС-матрицы.

Она выполняется по следующей методике [1]:

- производится съемка природных радиометрических полигонов;
- на наземном комплексе обработки уточняются коэффициенты относительной радиометрической калибровки;
- данные коэффициенты используются в комплексе обработки ЦИ;
- вся последующая ЦИ подвергается относительной радиометрической коррекции с использованием уточненных калибровочных коэффициентов.

Отметим следующие особенности проведения относительной радиометрической калибровки [2].

1. Для ее проведения необходимо, чтобы снимаемые полигоны были максимально однородными по яркости, то есть с однородной подстилающей поверхностью. Разработчик ЦА рекомендовал в качестве таковых использовать подстилающую поверхность следующих типов:

- открытый океан;
- снежную поверхность;
- тундру;
- пустыню.

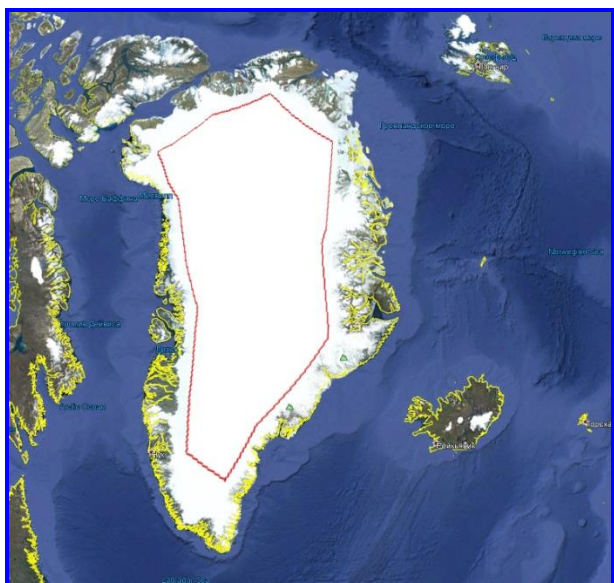


Рис. 1. Области Гренландии с максимальной однородной поверхностью

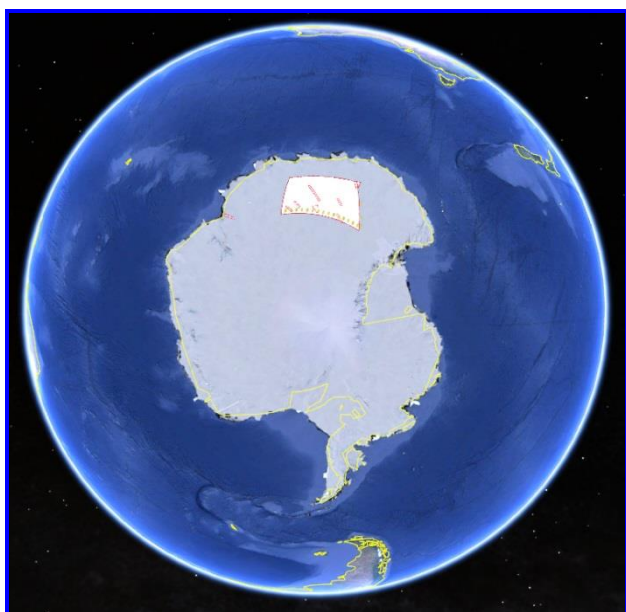


Рис. 2. Области Антарктиды с максимальной однородной поверхностью

Однако, в ходе летных испытаний КА «Канопус-В» было установлено, что наилучшие результаты получаются при использовании съемок всего двух районов Земли – Гренландии и Антарктиды [3]. В этих районах полигоны обладают максимальной однородной поверхностью – среднеквадратическая погрешность неравномерности не превышает 1%.

Области, наиболее пригодные для проведения радиометрической калибровки в указанных районах, показаны на рис. 1 и 2. При этом с учетом условий сезонной освещенности наиболее приемлемыми календарными сроками съемки являются:

- Антарктида – с октября по март;
- Гренландия – с апреля по сентябрь.

2. Требования к организации съемок:

- облачность должна быть минимальной;
- состояние атмосферы должно быть стабильным;
- высота Солнца – $30^\circ \dots 60^\circ$;
- углы наклона визирной оси ЦА относительно надира – не более 5° ;
- длительность маршрута – не менее 300 с;
- количество съемок – не менее четырех.

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

НЦ ОМЗ АО «Российские космические системы» проводит:

- оперативный контроль с использованием комплекса нормализации данных NormSatBIK неравномерности яркости целевой информации и наличия на ней артефактов яркости;
- съемку по заявкам АО «Корпорация «ВНИИЭМ» радиометрических полигонов (Антарктида или Гренландия в зависимости от сезона) в необходимых режимах работы ЦА;
- передачу в АО «Корпорация «ВНИИЭМ» установленным порядком результатов контроля точности относительной радиометрической калибровки и материалов съемки полигонов.

АО «Корпорация «ВНИИЭМ» в рамках проведения относительной радиометрической калибровки с применением комплекса КАОД-К проводит следующие работы.

На основе материалов съемки Антарктиды или Гренландии выполняется формирование эталонной поверхности, равномерной в радиометрическом отношении.

Далее, с использованием проверочных маршрутов, то есть съемок радиометрических полигонов, которые не использовались при формировании эталонной поверхности, проводится:

1) исходная оценка неравномерности изображения ПЗС-матриц камер ПСС и МСС. При этом для каждой ПЗС-матрицы вычисляется среднеквадратическая погрешность (СКП) неравномерности спектральной чувствительности;

2) выявление артефактов на изображении и их оценка. Здесь определяется:

– размер артефакта в пикселях. При этом артефактом считается область элементов фотоприемников, спектральная чувствительность которой отличается от средней спектральной чувствительности матрицы более чем на 2%;

– диапазон погрешности спектральной чувствительности в области артефакта;

3) сглаживание неравномерности яркости в пределах ПЗС-матрицы с использованием эталонной радиометрически ровной поверхности с одновременной корректировкой радиометрических коэффициентов;

4) повторная (итоговая) оценка неравномерности изображения каждой ПЗС-матрицы с использованием скорректированных радиометрических коэффициентов. Считается, что процедура относительной радиометрической калибровки прошла успешно, если при применении новых коэффициентов среднеквадратическая погрешность неравномерности яркостного сигнала каждой ПЗС-матрицы не превышает 2% (определено требованием технического задания (ТЗ) на разработку ЦА);

5) определение погрешности относительной радиометрической калибровки для камер ПСС и МСС. В качестве таковых принимается максимальная среднеквадратическая погрешность неравномерности спектральной чувствительности входящих в камеры ПЗС-матриц [4].

После завершения относительной радиометрической калибровки АО «Корпорация «ВНИИЭМ» передает скорректированные радиометрические коэффициенты в НЦ ОМЗ АО «Российские космические системы» для их валидации и обновления СПО комплекса NormSatBIK.

Обобщенные результаты. Обобщенные результаты относительной радиометрической калибровки ОГ «Канопус-В» по состоянию на июнь 2020 г. представлены в табл. 1 и на рис. 3. Приведенные результаты позволяют сделать вывод, что средняя погрешность относительной радиометрической калибровки аппаратуры ПСС и МСС ОГ «Канопус-В» не превышает 0,722%. Это соответствует требованиям, предъявленным в техническом задании на ЦА ОГ «Канопус-В».

Результаты оценки размеров остаточных артефактов камер ПСС и МСС, то есть количества пик-

селей со среднеквадратической погрешностью неравномерности спектральной чувствительности более 2%, представлены в табл. 2 и на рис. 4.

Результаты оценки показывают, что средний размер остаточных артефактов матриц камер ПСС и МСС не превышает 0,006% от общего количества пикселей ПЗС-матрицы (составляет 1 891 200 пикселей), что подтверждает высокое качество целевой информации ОГ «Канопус-В».

Таблица 1

Результаты относительной радиометрической калибровки матриц камер ПСС и МСС ЦА ОГ «Канопус-В» (июнь 2020 г.)

Матрица	Среднеквадратическая погрешность относительной радиометрической калибровки целевой аппаратуры, %				
	ИК	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6
ПСС1	0,218	0,156	0,338	0,167	0,145
ПСС2	0,187	0,302	0,167	0,143	0,243
ПСС3	0,204	0,229	0,293	0,215	0,206
ПСС4	0,197	0,193	0,17	0,264	0,178
ПСС5	0,188	0,295	0,186	0,158	0,134
ПСС6	0,146	0,135	0,132	0,158	0,347
Итого ПСС	0,218	0,302	0,338	0,264	0,347
МСС1	0,234	0,586	0,582	0,498	0,722
МСС2	0,3008	0,203	0,3389	0,244	0,26
МСС3	0,294	0,448	0,221	0,198	0,351
МСС4	0,242	0,314	0,3414	0,329	0,396
Итого МСС	0,3008	0,586	0,582	0,498	0,722

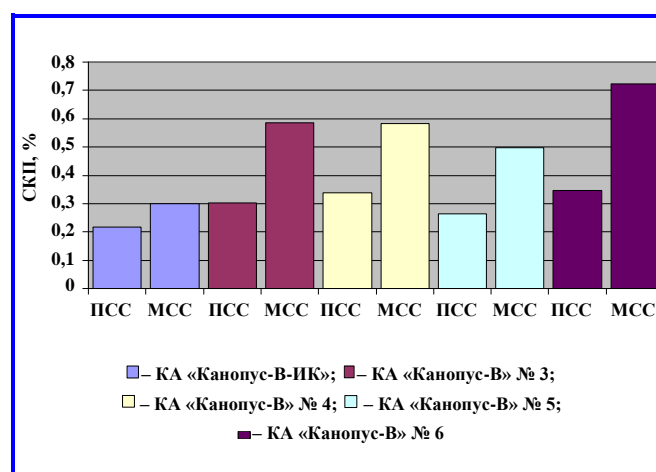


Рис. 3. Среднеквадратическая погрешность относительной радиометрической калибровки аппаратуры ПСС и МСС ОГ «Канопус-В» (по состоянию на июнь 2020 г.)

Таблица 2
Размеры артефактов (количество пикселей с СКП неравномерности спектральной чувствительности более 2%, июнь 2020 г.)

Матрица	Количество пикселей, % (от общего количества пикселей в матрице)				
	ИК (14.07.2017)	№ 3 (01.02.2018)	№ 4 (01.02.2018)	№ 5 (27.12.2018)	№ 6 (27.12.2018)
ПСС1	0,017237	0,000158	0	0,000105	0,001374
ПСС2	0,002167	0,000105	0	0,000846	0,000581
ПСС3	0,005604	0,000105	0	0,0000528	0
ПСС4	0,0014805	0	0	0,000264	0
ПСС5	0,002855	0,000158	0,000317	0	0
ПСС6	0,0049703	0,000423	0	0,000475	0,000211
ПСС (среднее)	0,005718 (108 пикселей)	0,000158 (3 пикселей)	0,0000528 (1 пикселей)	0,0002904 (6 пикселей)	0,000361 (7 пикселей)
МСС1	0,001533	0,001269	0,000687	0,000475	0,001956
МСС2	0,001797	0,000793	0,009835	0,0003701	0,001163
МСС3	0,001057	0,001427	0,001374	0,0000528	0,001216
МСС4	0,004706	0,000158	0,001533	0,000475	0,000634
МСС (среднее)	0,002273 42 (пикселей)	0,000911 (17 пикселей)	0,003357 (63 пикселей)	0,000343 (7 пикселей)	0,001242 (24 пикселей)

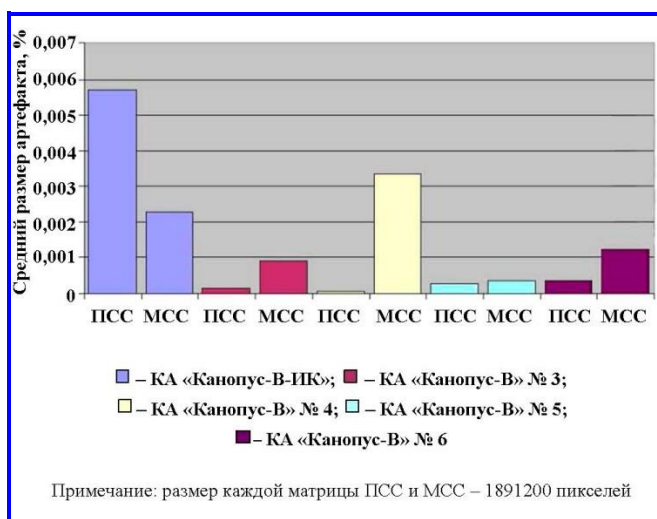


Рис. 4. Средний размер артефактов матриц камер ПСС и МСС (количество пикселей с СКП неравномерности спектральной чувствительности более 2%, по состоянию на июнь 2020 г.)

Улучшение процедуры относительной радиометрической калибровки. Наряду с проведением относительной радиометрической калибровки дополнительно на постоянной основе выполняется оценка ее текущей эффективности. Целью в данном случае является определение необходимости совершенствования реализованных алгоритмов радиометрической коррекции.

Указанная цель достигается выполнением ряда мероприятий, которые поясним на примере матрицы ПСС1 ЦА КА «Канопус-В-ИК» (рис. 5).

В процессе летной эксплуатации КА «Канопус-В-ИК» после завершения очередного этапа ОРК проводится сравнительная оценка размеров артефактов каждой матрицы без выполнения и после выполнения коррекции.

Так, для матрицы ПСС1, как видно из рис. 5, за период с мая 2019 г. по июнь 2020 г. размер артефактов матрицы ПСС1 возрос с 1,452 до 1,608%. Такой рост можно считать незначительным, что в целом подтверждает хорошую стабильность работы матрицы.

Следует отметить, что на начальном этапе эксплуатации КА «Канопус-В-ИК» наблюдалась тенденция к уменьшению размера области остаточного артефакта – с 0,0072 в мае 2019 г. до 0,00544% в ноябре этого же года. Данное обстоятельство объясняется накоплением количества съемок в процессе эксплуатации КА, используемых для формирования эталонной радиометрической поверхности.

Однако, по результатам выполнения очередной относительной радиометрической калибровки в июне 2020 г. установлено, что размер области остаточного артефакта возрос до 0,017%. С одной стороны, это свидетельствует о незначительном ухудшении качества ЦИ матрицы ПСС1. Но с другой стороны, данное обстоятельство обуславливает необходимость упреждающего совершенствования алгоритмов радиометрической коррекции.

В качестве возможных вариантов рассматриваются алгоритмы устранения остаточных артефактов на основе использования интерполяционных масок:

- 1) алгоритм однопроходной интерполяции с использованием вместо дефектных значений среднего среди окрестных недефектных значений;
- 2) алгоритм двухпроходной интерполяции:
 - на первом проходе вместо дефектного значения используется среднее среди двух соседних недефектных значений, если такие есть;
 - на втором проходе вместо оставшихся дефектных значений используются средние значения среди окрестных недефектных и восстановленных на предыдущем этапе значений.

Реализация данных алгоритмов в практике относительной радиометрической калибровки предполагается в случае превышения размера области остаточного артефакта 1,5 – 2 %.

3. Особенности проведения абсолютной радиометрической калибровки с использованием наземных полигонов СВПП-РК и RadCalNet

Абсолютная радиометрическая калибровка проводится с целью уточнения радиометрических калибровочных коэффициентов ПСС и МСС, используемых для перевода яркости пикселей ПЗС-матриц в значения СПЭЯ.

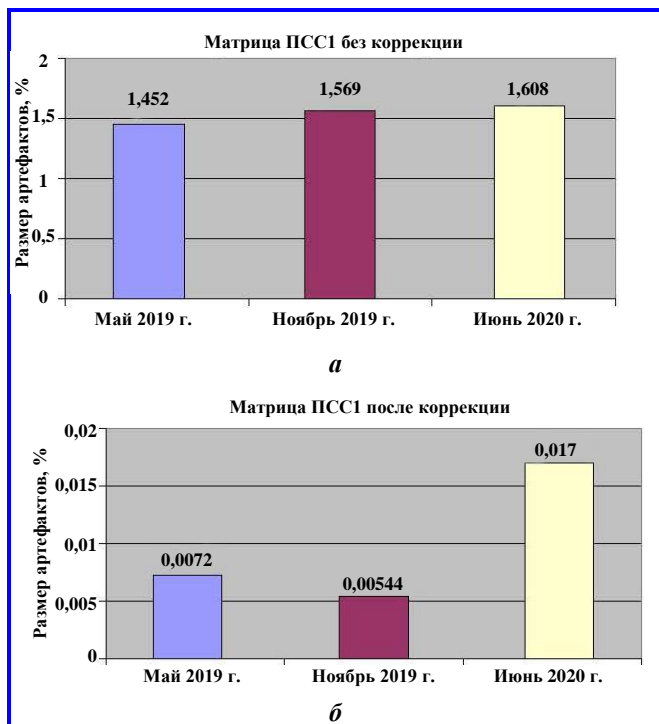


Рис. 5. Изменение размера области остаточных артефактов на примере матрицы ПСС1 ЦА КА «Канопус-В-ИК»: а – без коррекции; б – после коррекции

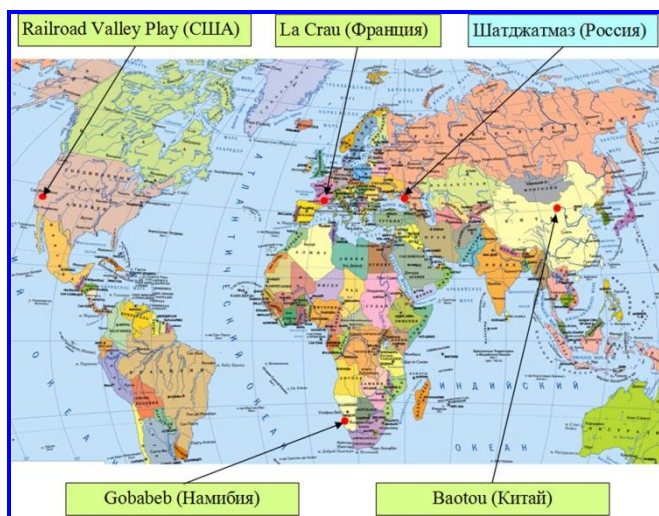


Рис. 6. Расположение полигонов, используемых для абсолютной радиометрической калибровки ОГ «Канопус-В»

Таблица 3

Наименование	Широта, град.	Долгота, град.	Количество солнечных дней на полигоне, %
1. Gobabeb (Намибия)	-23,6002°	15,11956°	100
2. Railroad Valley Play (США)	38,497°	-115,69°	65
3. Baotou (Китай)	40,8514°	109,6291°	50
4. La Crau (Франция)	43,5588°	4,864167°	50

В настоящее время для ОГ «Канопус-В» реализовано две схемы ее проведения:

- 1) с использованием наземных радиометрических полигонов;
- 2) радиометрическая кросс-калибровка с использованием «эталонных» КА.

Абсолютная радиометрическая калибровка с использованием наземных радиометрических полигонов имеет следующие особенности.

Использование радиометрического полигона Шатджатмаз. В настоящее время Госкорпорацией «Роскосмос» создана система валидации подспутниковых наблюдений СВПП-РК, в составе которой имеется полигон Шатджатмаз (рис. 6), предназначенный для целей абсолютной радиометрической калибровки КА дистанционного зондирования Земли.

Опыт использования данного полигона позволил отметить следующие недостатки:

- проведение работ на полигоне Шатджатмаз в зимний период невозможно – по статистике съемочный период полигона проходит с мая по октябрь включительно;
- орбита КА ОГ «Канопус-В» позволяет выполнять за 1 месяц только 2 – 3 съемки этого полигона. При этом по статистике из-за неблагоприятной метеорологической обстановки из 5 – 6 съемок полигона Шатджатмаз как правило пригодна только одна.

Следовательно, обеспечить регулярную ежеквартальную абсолютную радиометрическую калибровку, как этого требует положение по целевому использованию КА «Канопус-В», только на основе полигона Шатджатмаз невозможно. В частности, в ходе летних испытаний (ЛИ) КА «Канопус-В» № 5 и № 6 за шесть месяцев (с января по июнь 2019 г.) не удалось получить ни одной кондиционной съемки полигона.

Использование международной сети RadCalNet. Для увеличения числа радиометрических полигонов НЦ ОМЗ АО «Российские космические системы» и АО «Корпорация «ВНИИЭМ» предложили использовать международную радиометрическую сеть RadCalNet (рис. 6), которая включает в себя 4 полигона, расположенные в Намибии, США, Китае и Франции (табл. 3).

Сеть предоставляет данные подспутникового наблюдения на входящих в нее полигонах (параметры атмосферы, значения спектральных коэффициентов яркости на уровне Земли и на верхней границе атмосферы и др.), что позволяет их использовать для проведения абсолютной радиометрической калибровки ОГ «Канопус-В».

Доступом к этим данным обладает НЦ ОМЗ АО «Российские космические системы» как член соответствующей международной рабочей группы.

Положительный опыт использования данных полигонов получен в ходе ЛИ КА «Канопус-В» № 3 и № 4,

когда была показана достаточно высокая корреляция результатов калибровки по полигонам сети RadCalNet и Шатджатмаз, позволившая рекомендовать их совместное использование для радиометрической калибровки целевой аппаратуры КА ОГ «Канопус-В» на этапах летных испытаний и эксплуатации.

Радиометрическая калибровка с использованием полигонов проводится следующим образом.

НЦ ОМЗ АО «Российские космические системы» осуществляет планирование съемок радиометрических полигонов и получает данные подспутникового наблюдения на них. Полученные данные передаются в АО «Корпорация «ВНИИЭМ» установленным порядком.

Требования к объекту съемок. Параметры объектов съемки на полигоне должны быть измерены наземными средствами квазисинхронно с выполнением дистанционной съемки ЦА.

Измерениям подлежат:

- значения спектральных коэффициентов яркости: среднее значение, система коррекции орбиты, максимальное и минимальное значения – в спектральном диапазоне 0,4 ... 1 мкм с шагом 5 – 10 нм и разрешением 2 – 5 нм по каждому тест-объекту;
- размер мгновенно измеряемой площадки и число измеренных участков, размер измеряемых тест-объектов и количество точек, полученных на каждом из тест-объектов;
- размер выбранных тест-объектов должен составлять примерно 12×12 пикселей ПСС и МСС в плоскости изображения.

Требования к условиям съемок:

- облачность должна быть минимальной;
- состояние атмосферы должно быть стабильным.

Квазисинхронно со съемкой ЦА выполняются измерения (оценки) условий съемки:

- высота Солнца;
- процент облачности.

Одновременно с наземными измерениями параметров объекта съемки должны быть выполнены измерения и расчет:

- СПЭЯ на верхней границе атмосферы;
- погрешности определения СПЭЯ на верхней границе атмосферы;
- углов визирования на объект съемки;
- общего содержания озона (O_3);
- приземной концентрации озона;
- общего содержания водяного пара;
- атмосферного давления;
- температуры;
- аэрозольной оптической толщины с указанием длины волны, на которой она измерена.

Исходные данные магнитного поля Земли:

- углы наклона визирной оси ЦА относительно надира не должны быть более $\pm 5^\circ$;

- при проверке радиометрических калибровочных коэффициентов рекомендованное количество съемок каждого объекта не менее 10;

- при перекалибровке ЦА в части уточнения радиометрических калибровочных коэффициентов рекомендованное количество съемок каждого объекта не менее 15.

Однако, опыт использования полигона Шатджатмаз и сети RadCalNet позволяет отметить один существенный недостаток – выдача данных подспутникового наблюдения носит нестабильный характер:

- регулярно наблюдаются случаи длительного (до нескольких месяцев) отключения оборудования полигонов на профилактические и другие мероприятия. В частности в ходе ЛИ КА «Канопус-В» № 5 и № 6 данные с полигонов Railroad Valley Play (США) и Baotou (Китай) были недоступны;

- задержка появления данных подспутникового наблюдения на сайте сети с момента проведения съемки может достигать нескольких недель.

Указанные обстоятельства позволили констатировать, что гарантированное проведение регулярной ежеквартальной абсолютной радиометрической калибровки с использованием наземных радиометрических полигонов в настоящее время обеспечить невозможно. Поэтому, по нашему мнению, данный вариант абсолютной радиометрической калибровки целесообразно использовать для ежегодного (по мере накопления достаточного количества материалов съемки) подтверждения результатов АРК, проводимой по второй схеме – радиометрическая кросс-калибровка с использованием «эталонных» КА.

4. Абсолютная радиометрическая кросс-калибровка с использованием спутников Landsat-8 и Sentinel-2A(2B) в качестве эталонных КА

Обоснование выбора «эталонных» КА

Чтобы обеспечить максимально возможное соответствие радиометрических характеристик ЦИ ОГ «Канопус-В» современному мировому уровню, необходимо выполнять регулярную кросс-калибровку целевой аппаратуры по «эталонным» зарубежным КА. В качестве таковых могут использоваться КА Sentinel-2A, Sentinel-2B и Landsat-8 (табл. 4), что обусловлено следующими факторами.

1. На КА Sentinel-2A и Sentinel-2B установлена аппаратура Multispectral Imager (MSI) с идентичными тактико-техническими характеристиками, а на КА Landsat-8 – Operational Land Imager (OLI) [5]. Высокий общепризнанный уровень радиометрической калибровки данных КА (погрешность радиометрической калибровки не превышает 5%) позво-

ляет их использовать в мировой практике в качестве «эталонных» космических аппаратов.

2. Целевая информация КА Sentinel-2A, Sentinel-2B и Landsat-8 распространяется свободно и поэтому является доступной для проведения кросс-калибровки.

3. Как известно, поглощение и рассеяние в слоях атмосферы выше 100 км практически не влияют на величину яркости излучения, поступающего на входную апертуру ЦА. Поэтому разностью орбит КА Sentinel-2A, Sentinel-2B, Landsat-8 и ОГ «Канопус-В» можно пренебречь.

4. В аппаратуре MSI и OLI имеются мультиспектральные каналы со спектральными диапазонами, аналогичными аппаратуре МСС КА «Канопус-В» (табл. 4, рис. 7 – 10).

5. Спектральные каналы аппаратуры МСС, MSI и OLI имеют сопоставимое, с точки зрения удовлетворения требований к проведению радиометрической калибровки, геометрическое разрешение – 10,5, 10 и 30 м соответственно.

6. Полоса захвата аппаратуры MSI и OLI существенно превосходит по аналогичному параметру аппаратуру МСС – 290, 185 и 20 км соответственно, что позволяет использовать в процессе кросс-калибровки полигоны с удовлетворяющими аппаратуру МСС размерами.

7. КА Sentinel-2A, Sentinel-2B и Landsat-8 в основном работают в мониторинговом режиме практически без перенацеливания. Поэтому зоны их съемки рассчитать достаточно легко.

Таблица 4

Тип КА		Канопус-В-ИК	Sentinel-2A(B)	Landsat-8
Солнечно-синхронная орбита, км		510	786	710
Тип ЦА		МСС	MSI	OLI
Полоса захвата, км		20	290	185
Канал Blue	Диапазон, нм	470 – 530	457 – 522	450 – 515
	Проекция пикселя, м	20	10	30
Канал Green	Диапазон, нм	520 – 600	542 – 577	525 – 600
	Проекция пикселя, м	20	10	30
Канал Red	Диапазон, нм	640 – 690	650 – 680	630 – 680
	Проекция пикселя, м	20	10	30
Канал NIR	Диапазон, нм	760 – 840	784,5 – 899,5	845 – 885
	Проекция пикселя, м	20	10	30

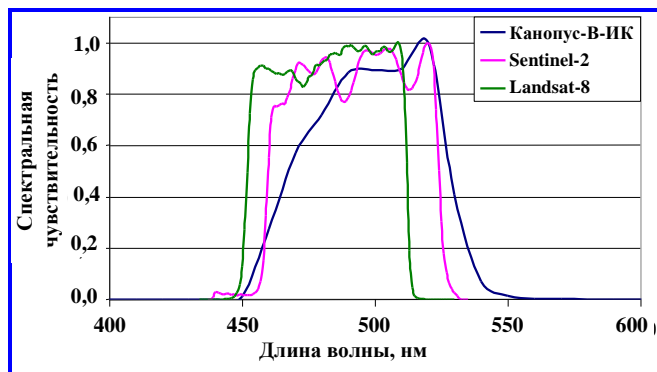


Рис. 7. Функция спектральной чувствительности канала Blue (синий)

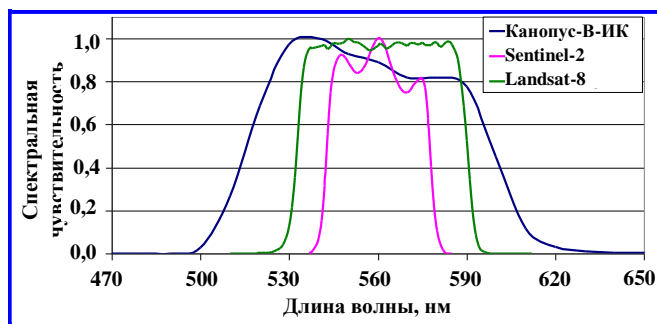


Рис. 8. Функция спектральной чувствительности канала Green (зеленый)

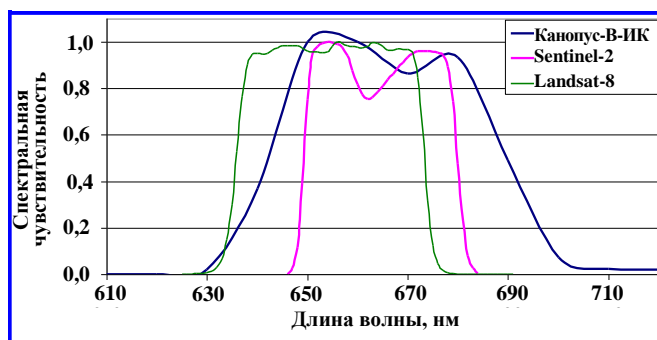


Рис. 9. Функция спектральной чувствительности канала Red (красный)

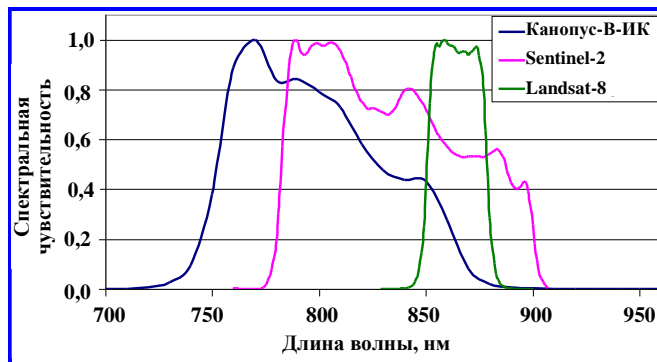


Рис. 10. Функция спектральной чувствительности канала NIR (ближний инфракрасный канал)

Организация работ

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

АО «Корпорация «ВНИИЭМ» не реже 1 раза в 3 дня выполняет необходимые баллистические расчеты и определяет время и координаты возможной синхронной съемки эталонных КА с калибруемым КА. Полученные данные передаются в НЦ ОМЗ АО «Российские космические системы» для планирования синхронных съемок.

Материалы съемок НЦ ОМЗ АО «Российские космические системы» передает в АО «Корпорация «ВНИИЭМ» установленным порядком.

АО «Корпорация «ВНИИЭМ» получает данные с эталонных зарубежных КА и выполняет необходимую обработку и сопоставление с данными ЦА ОГ «Канопус-В».

После завершения радиометрической кросс-калибровки АО «Корпорация «ВНИИЭМ» передает скорректированные радиометрические коэффициенты в НЦ ОМЗ АО «Российские космические системы» для их валидации и обновления СПО комплекса NormSatВІК.

Требования к объекту съемки:

– снимаемый район должен содержать квазигомогенные участки размером не менее $300 \times 300 \text{ м}^2$. Рекомендуется выполнять съемку районов с квазигомогенными объектами с высоким альбедо (пески, снежные поверхности Гренландии и Антарктиды), полигоны радиометрической сети RadCalNet;

– объекты съемок должны обладать отражением, близким к ламбертовскому.

Требования к условиям съемок:

– отсутствие облачности;
– стабильное состояние атмосферы;
– высота Солнца над горизонтом более 30° ;
– углы крена при съемке не более 15° ;
– интервал между съемками одного и того же объекта тестируемым и эталонным КА не более 30 минут;

– рекомендуемое количество синхронных съемок не менее 10;

– при перекалибровке радиометрических калибровочных коэффициентов рекомендовано выполнить не менее 15 съемок.

Считается, что проверка измерения абсолютной энергетической яркости в каждой спектральной зоне МСС прошла успешно, если отклонение полученных значений СПЭЯ отличается от значений СПЭЯ, полученных эталонными КА, менее чем на 15%.

Таблица 5

Типы КА ОГ «Канопус-В»	Погрешность абсолютной радиометрической кросс-калибровки, %					Итого КА
	Матрицы					
	МСС1	МСС2	МСС3	МСС4	ПСС	
ИК	06,771	02,877	00,094	04,003	03,365	06,771
№ 3	02,438	01,552	07,913	02,836	06,230	07,913
№ 4	02,202	06,006	03,095	05,910	00,235	06,006
№ 5	01,312	08,026	07,442	01,798	09,345	09,345
№ 6	03,397	01,641	10,374	05,017	09,114	10,374
Требование ТЗ						15

Обобщенные результаты

Обобщенные результаты абсолютной радиометрической кросс-калибровки ОГ «Канопус-В» по состоянию на июнь 2020 г. представлены в табл. 5.

Приведенные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Погрешность абсолютной радиометрической кросс-калибровки космических аппаратов, входящих в ОГ «Канопус-В», на протяжении их летных испытаний и в ходе эксплуатации не превысило значения, заданного в ТЗ на ЦА – 15%.

2. Погрешность абсолютной радиометрической кросс-калибровки ЦА ОГ «Канопус-В» по состоянию на июнь 2020 г. составляет:

– КА «Канопус-В-ИК» – 06,771%, определяется матрицей МСС1;

– КА «Канопус-В» № 3 – 07,913%, определяется матрицей МСС3;

– КА «Канопус-В» № 4 – 06,006%, определяется матрицей МСС2;

– КА «Канопус-В» № 5 – 09,345%, определяется матрицей ПСС;

– КА «Канопус-В» № 6 – 10,374%, определяется матрицей МСС3.

3. Погрешность абсолютной радиометрической кросс-калибровки большинства матриц ЦА ОГ «Канопус-В» не превышает 5%, что соответствует уровню зарубежных спутников, используемых в качестве «эталонов» (КА Sentinel-2A, Sentinel-2B и Landsat-8). Для достижения погрешности АРК в 5% для ЦА в целом при проведении дальнейших работ необходимо уделить дополнительное внимание следующим матрицам:

– КА «Канопус-В-ИК» – МСС1;

– КА «Канопус-В» № 3 – МСС3, ПСС;

– КА «Канопус-В» № 4 – МСС2, МСС4;

– КА «Канопус-В» № 5 – МСС2, МСС3, ПСС;

– КА «Канопус-В» № 6 – МСС3, ПСС.

5. Заключение

1. Средняя погрешность относительной радиометрической калибровки аппаратуры ПСС и МСС ОГ «Канопус-В» по состоянию на июнь 2020 г. не превышает 0,722%. Это соответствует требованиям, предъявленным в техническом задании на ЦА ОГ «Канопус-В». При этом средний размер остаточных артефактов матриц камер ПСС и МСС не превышает 0,006% от общего количества пикселей ПЗС-матрицы (составляет 1 891 200 пикселей), что подтверждает высокое качество целевой информации ОГ «Канопус-В».

2. Для обеспечения максимально возможного соответствия радиометрических характеристик ЦИ ОГ «Канопус-В» современному мировому уровню, регулярно выполняется кросс-калибровка целевой аппаратуры по «эталонным» зарубежным КА Sentinel-2A, Sentinel-2B и Landsat-8. По состоянию на июнь 2020 г. погрешность абсолютной радиометрической кросс-калибровки КА «Канопус-В-ИК» – 06,771%; КА «Канопус-В» № 3 – 07,913%; КА «Канопус-В» № 4 – 06,006%; КА «Канопус-В» № 5 – 09,345%; КА «Канопус-В» № 6 – 10,374%. Это в полной мере соответствует требованиям ТТЗ на опытно-конструкторские работы.

3. Опыт использования для абсолютной радиометрической калибровки полигона Шатджатмаз и международной полигонной сети RadCalNet позволяет отметить один существенный недостаток – выдача данных подспутникового наблюдения с них носит нестабильный характер. Следовательно, гарантированное проведение регулярной ежеквартальной абсолютной радиометрической калибровки с использованием наземных радиометрических

полигонов в настоящее время обеспечить невозможно. Поэтому ТТЗ данный вариант абсолютной радиометрической калибровки целесообразно использовать для ежегодного (по мере накопления достаточного количества материалов съемки) подтверждения результатов АРК, проводимой по второй схеме – радиометрическая кросс-калибровка с использованием «эталонных» КА.

Литература

1. Algorithms for relative radiometric correction in earth observing systems Resource-p and Canopus-v / V. A. Zenin, V. V. Eremeev, A. E. Kuznetsov // In XXIII Proceedings of the ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – Prague, 2016. – Vol. XLI-B6. – P. 189 – 191. – DOI: 10.5194/isprs-archives-XLI-B6-189-2016.
2. Relative radiometric correction methods for remote sensing images and their applicability analysis / Y. Duan, L. Zhang, L. Yan [et al.] // Journal of Remote Sensing. – 2014. – Vol. 18(3). – P. 597 – 617. – DOI: 10.11834/jrs.20143204.
3. Worldview-1 pre and post-launch radiometric calibration and early on-orbit characterization / K. S. Krause // In Proceedings of the Optical Engineering + Applications. – San Diego, 2008. – Vol. 7081. – P. 708116 – 708116-11. – DOI: 10.1117/12.794340.
4. Relative radiometric calibration method based on linear CCD imaging the same region of non-uniform scene / H. Li, Y.-Y. Man // In Proceedings of the International Symposium on Optoelectronic Technology and Application 2014. – Beijing, 2014. – P. 929906 – 929909.
5. Radiometric non-uniformity characterization and correction of Landsat 8 oli using earth imagery-based techniques / F. Pesta, S. Bhatta, D. Helder [et al.] // Remote Sensing. – 2015. – Vol. 7 (1). – P. 430 – 446. – DOI: 10.3390/rs70100430.

Поступила в редакцию 19.10.2020

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.

Вячеслав Арсеньевич Ермаков, начальник отдела, т. (495) 625-45-16, e-mail: vaermakov@mcc.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.

(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

DEVELOPMENT OF RADIOMETRIC CALIBRATION SYSTEM OF «CANOPUS-V» SPACE SYSTEM

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

The «Canopus-V» space system was put into operation in September 2019 and at the present time comprises «Canopus-V» № 3, № 4, № 5, № 6 and «Canopus-V-ИК». Radiometric calibration of the panchromatic and multispectral imaging systems during flight tests and operation of the spacecraft is performed by JC «VNIIEМ Corporation». The article contains the results of the relative and absolute radiometric calibration of the panchromatic and multispectral imaging systems equipment as of June 2020, and suggestions on its improvement are formulated.

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

References

1. Algorithms for relative radiometric correction in earth observing systems Resource-P and Canopus-V / V. A. Zenin, V. V. Ere-meev, A. E. Kuznetsov // In XXIII Proceedings of the ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – Prague, 2016. – Vol. XLI-B6. – Pp. 189 – 191. – DOI: 10.5194/isprs-archives-XLI-B6-189-2016.
2. Relative radiometric correction methods for remote sensing images and their applicability analysis / Y. Duan, L. Zhang, L. Yan [et al.] // Journal of Remote Sensing. – 2014. – Vol. 18(3). – P. 597 – 617. – DOI: 10.11834/jrs.20143204.
3. Worldview-1 pre and post-launch radiometric calibration and early on-orbit characterization / K. S. Krause // In Proceedings of the Optical Engineering + Applications. – San Diego, 2008. – Vol. 7081. – Pp. 708116 – 708116-11. – DOI: 10.1117/12.794340.
4. Relative radiometric calibration method based on linear CCD imaging the same region of non-uniform scene / H. Li, Y.-Y. Man // In Proceedings of the International Symposium on Optoelectronic Technology and Application 2014. – Beijing, 2014. – Pp. 929906 – 929909.
5. Radiometric non-uniformity characterization and correction of Landsat 8 oli using earth imagery-based techniques / F. Pesta, S. Bhatta, D. Helder [et al.] // Remote Sensing. – 2015. – Vol. 7 (1). – Pp. 430 – 446. – DOI: 10.3390/rs70100430.

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

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

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

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

*Viktor Vladimirovich Nekrasov, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), tel.: +7 (495) 623-52-13,
e-mail: v.nekrasov@mcc.vniiem.ru.
(JC «VNIEM Corporation»).*