

УДК 629.78

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА СНИМКОВ КА «РЕСУРС – ДК1», ПРИВЕДЕННЫХ К ЗАЧЁТНЫМ УСЛОВИЯМ СЪЁМКИ

© 2010 Р.Н. Ахметов, А.Ю. Богатов, И.Н. Лосев, В.Ф. Петрищев

ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-ПРОГРЕСС», г. Самара

Проведена статистическая обработка результатов инструментальной оценки линейного разрешения на местности снимков, полученных в процессе штатной эксплуатации КА «Ресурс – ДК1», путём приведения их к зачётным условиям съёмки. На обширном статистическом материале (более 900 измерений) подтверждается вывод о выполнении требований тактико-технического задания к КА в части требований к линейному разрешению на местности в панхроматическом диапазоне спектра. В качестве аппроксимирующего выражения линейного разрешения на местности выбрана экспоненциальная функция. Выявлены заметные перемещения плоскости наилучшего изображения телескопа «Геотон-Л1» в процессе штатной эксплуатации КА.

Линейное разрешение на местности, объектив телескопа, нейтральный светофильтр, фокусировка, оптико-электронный преобразователь, прибор с зарядовой связью, панхроматический диапазон, матрица, число строк накопления

15 июня 2010 года исполнилось четыре года работы на орбите КА «Ресурс – ДК1», созданного в Самарском ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс». Этот аппарат по основным своим параметрам, таким как производительность, ширина полосы захвата, линейное разрешение на местности, оперативность получения и доставки информации наземному потребителю, пропускная способность радиолинии, время существования и др., стоит в одном ряду с лучшими зарубежными аналогами (Ikonos, Quick Bird (США), Egos (Израиль) и др.). За время активной работы КА на орбите снято более 64 млн. кв. км поверхности Земли, получено более 14 терабайт информации с научной аппаратуры «АРИНА» и «ПАМЕЛА», которая в настоящее время продолжает обрабатываться.

Учитывая наличие на борту КА запасов рабочего тела, принято решение о продлении срока активного существования КА на орбите.

Настоящая статья подводит научный итог работы КА «Ресурс – ДК1» на орбите и посвящена статистическому анализу величины линейного разрешения на местности (ЛРМ), обеспечиваемой оптико-электронной аппаратурой

дистанционного зондирования Земли – космическим телескопом «Геотон – Л1» разработки ОАО НТЦ «Красногорский завод» (руководитель Крамаренко В.Н.) и системой приёма и преобразования информации «Сангур - 1» разработки НПП «ОПТЭКС» (руководитель Бакланов А.И.), а также обеспечивающими системами КА (управления движением, навигации и др.).

Сразу после запуска КА «Ресурс – ДК1», получения и опубликования первых снимков в средствах массовой информации началась оживлённая дискуссия по вопросу выполнения космическим аппаратом требований тактико-технического задания Федерального Космического Агентства на разработку и создание КА в части линейного разрешения на местности [1]. Эти требования состояли в следующем: КА с вероятностью 0,7 должен обеспечить получение снимков поверхности Земли в панхроматическом диапазоне спектра 0,58 – 0,80 мкм с линейным разрешением на местности 1,0 м в следующих нормированных условиях:

- съёма «в надир» с высоты 350 км;
- высота Солнца над местным горизонтом снимаемого объекта – 30°;

- контраст наземных объектов – 0,2 (с учётом потери контраста в атмосфере до 30%);

- минимальный коэффициент отражения ландшафта – 0,07.

В процессе лётно-конструкторских испытаний КА и в дальнейшем в ходе его штатной эксплуатации оценивание величины ЛРМ по полученным снимкам производилось инструментальным методом с использованием методического и программного обеспечения разработки ВНЦ «ГОИ им. С.И.Вавилова» (разработчик Батраков А.С.), разработанного по техническому заданию ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс». Даваемая этим методом на основе анализа распределения сигнала в изображениях скачков яркости (резких краёв) оценка величины ЛРМ подтвердила на этапе лётно-конструкторских испытаний КА факт выполнения требований ТТЗ приближённо: по условиям, достаточно близким к нормированным, в том числе с использованием приведения полученной величины разрешения к высоте 350км.

В настоящей статье проведён статистический анализ результатов измерения ЛРМ, полученных инструментальным методом в ходе штатной эксплуатации КА по полугодиям 2007г., 2008г. и 2009г. (массивы данных «2007-1» объёмом 301, «2007-2» объёмом 212, «2008-1» объёмом 155, «2008-2» объёмом 112 и «2009-1» объёмом 139 измерений величины ЛРМ). Все данные предоставлены Научным Центром Оперативного Мониторинга Земли (руководитель Н.Н.Новикова).

Каждое измерение L величины ЛРМ сопровождается следующей информацией: высотой орбиты H в момент съёмки, углом отклонения КА по каналу крена γ , высотой Солнца h_o над местным горизонтом снимаемого участка, коэффициентом отражения снимаемого участка ρ , кодом арретира дискретного K_{APD} , числом строк накопления N матриц фотоприборов с

зарядовой связью (ФПЗС) и признаком S включения нейтрального светофильтра.

Параметр ρ характеризует степень диффузного отражения снимаемым участком поверхности Земли солнечных лучей. Значение параметра ρ в пределах заданного снимаемого участка изменяется в диапазоне от ρ_{\min} до ρ_{\max} . При планировании режима съёмки КА «Ресурс – ДК1» используется параметр ρ_{\max} для предотвращения достижения порогового значения насыщения аналоговыми сигналами с выходных регистров матриц ФПЗС.

Параметр K_{APD} определяет величину необходимого изменения на орбите фокусного расстояния объектива аппарата «Геотон – Л1» за счёт перемещения фокального узла с установленными на нём оптико – электронными преобразователями вдоль оптической оси объектива для совмещения плоскости чувствительности матриц ФПЗС с плоскостью наилучшего изображения (ПНИ) объектива. Отметим, что космический телескоп «Геотон – Л1» обеспечивает возможность задания K_{APD} в диапазоне от – 63 до +63 единиц. Единице кода соответствует перемещение на 23,8мм.

Логика работы матриц ФПЗС допускает дискретное задание числа строк накопления N матриц ФПЗС: 128, 64, 32, 16 и 8. Выбор числа строк накопления производится при планировании съёмки в зависимости от величины оптического сигнала также с целью предотвращения достижения порога насыщения.

При необходимости оптический сигнал ослабляется в 1,7 раза введением нейтрального светофильтра, при этом признак включения нейтрального светофильтра S принимается равным 0.

Обработка проведена отдельно по каждому из массивов данных.

Для проведения статистической обработки полученной информации необходимо иметь функциональную

зависимость величины линейного разрешения на местности L от параметров, определяющих условия наблюдения и режим работы оптико – электронной аппаратуры. Построение такой зависимости с использованием, как правило, достаточно сложных численных методов и соответствующих программных средств составляет содержание методик априорного оценивания достигаемой величины ЛРМ L , разрабатываемых на этапе проектирования оптико– электронной аппаратуры, воспользоваться которыми в данном случае не представляется возможным.

Для проведения статистической обработки полученной информации величина ЛРМ L аппроксимируется экспоненциальной функцией:

$$L=L_T \times e^{-(q_1 \times H + q_2 \times \gamma + q_3 \times K_{ЛРМ} + q_4 \times h_o + q_5 \times \rho_{max} + q_6 \times N + q_7 \times S)} \quad (1)$$

Здесь $L_T=1,0$ м – теоретическое значение величины ЛРМ КА «Ресурс – ДК1» в нормированных условиях съёмки.

Влияние условий наблюдения и режима работы оптико – электронной аппаратуры в (1) определяется семью неизвестными пока коэффициентами q_1, q_2, \dots, q_7 .

Выбор аппроксимирующего выражения в форме экспоненты обусловлен соответствующим экспоненциальным изменением разрешения при изменении большинства параметров, определяющих условия наблюдения и режим работы аппаратуры, за исключением высоты орбиты, от которой дальность зависит линейно, и угла крена. От угла крена зависимость разрешения достаточно сложная и неаналитическая. Она определяется логикой суммирования величин ЛРМ по резким краям разных направлений в поле видеокadra, применяемой в инструментальном методе оценивания ЛРМ. Однако, учитывая малый фактический диапазон изменения этих параметров у КА «Ресурс – ДК1», можно

полагать, что их влияние подчиняется той же закономерности с допустимой погрешностью.

Обозначим через \bar{q} вектор неизвестных коэффициентов

$$q_1, q_2, \dots, q_7.$$

При использовании аппроксимирующего выражения (1) задача статистической обработки информации сводится к определению оптимального значения 7-мерного вектора \bar{q} по всей генеральной совокупности n инструментальных измерений L .

В качестве метода статистической обработки информации выбран метод наименьших квадратов. При этом в качестве критерия оптимальности выбран минимум среднего квадрата отклонения инструментального измерения L от его ожидаемого в соответствии с (1) значения при тех же условиях съёмки. Для реализации метода необходимо получить систему так называемых нормальных уравнений, из которых находится оптимальное значение оптимального вектора \bar{q} . Для их получения разложим L в (1), имеющей вид $L(\bar{q})$, в ряд Тейлора в малой окрестности $D\bar{q}$ некоторого опорного значения \bar{q}_o с удержанием лишь первого линейного члена:

$$L(\bar{q})=L(\bar{q}_o + D\bar{q})=L(\bar{q}_o) + \frac{\partial L}{\partial \bar{q}} \times D\bar{q} \quad (2)$$

Здесь вектор-строка частных производных от L по элементам вектора \bar{q} вычисляется при значении $\bar{q} = \bar{q}_o$.

В качестве опорного решения \bar{q}_o выберем нулевое, а именно: $\bar{q}_o = \bar{0}$, в котором все элементы вектора \bar{q}_o равны нулю. Тогда из равенства $\bar{q} = \bar{q}_o + D\bar{q}$ следует $D\bar{q} = \bar{q}$, из равенства (1) следует $L(\bar{q}_o = 0) = L_T = 1$, и после дифференцирования, подстановки

$L(\bar{q}_0)=1$ и взаимной перестановки левой и правой частей выражение (2) для произвольного i -ого обработанного снимка приобретает вид нормального уравнения:

$$\left[H; \gamma; K_{APD}; h_o; \rho_{max}; N; S \right]_i \times \bar{q} = 1 - L_i(\bar{q}), \quad 1 \leq i \leq n, \quad (3)$$

которое может быть записано для любого i , изменяющегося от 1 до n . При этом n может принимать значения 301, 212, 155, 112, 139 в зависимости от используемого массива данных.

Если записать нормальное уравнение (3) n раз для i от 1 до n одно под другим построчно в виде системы нормальных уравнений и далее ввести обозначения:

$$W = \begin{pmatrix} \hat{e} H_1; \gamma_1; K_{APD1}; h_{o1}; \rho_{max1}; N_1; S_1 \\ \hat{e} H_2; \gamma_2; K_{APD2}; h_{o2}; \rho_{max2}; N_2; S_2 \\ \hat{e} \times \times \times \times \times \times \times \times \times \times \times \times \times \times \times \\ \hat{e} H_n; \gamma_n; K_{APDn}; h_{on}; \rho_{maxn}; N; S_n \end{pmatrix} \hat{u}$$

$$D\bar{L} = \begin{pmatrix} \hat{e} 1 - L_1 \\ \hat{e} 1 - L_2 \\ \hat{e} \times \times \times \times \times \times \times \times \times \times \times \times \times \times \times \\ \hat{e} 1 - L_n \end{pmatrix} \hat{u}$$

то эту систему нормальных уравнений можно записать в матричном виде:

$$W \times \bar{q} = D\bar{L}. \quad (3)$$

Элементы матрицы W и вектора $D\bar{L}$ выбираются из массивов полученных экспериментальных данных.

В соответствии с формализмом метода наименьших квадратов оптимальное значение \bar{q}_{opt} искомого вектора \bar{q} , для которого справедливо (3), определяется из выражения:

$$\bar{q}_{opt} = (W^T \times W)^{-1} \times W^T \times D\bar{L}, \quad (4)$$

где показатель (-1) обозначает операцию обращения произведения матриц, стоящих в круглых скобках, T - операцию транспонирования матрицы.

Результаты вычислений правой части этого выражения применительно к обрабатываемым массивам данных дали значения элементов оптимального вектора \bar{q}_{opt} (с точностью до пятого десятичного разряда после запятой), которые приведены в таблице 1.

Подстановка этих значений в выражение (1) для нормированных условий съёмки и рекомендуемых параметров режима работы оптико – электронной аппаратуры в этих условиях:

$$H=350\text{км}; \quad g=0; \quad K_{APD}=K_{APD \text{ ЗАД.}}; \\ h_o=30 \text{ град}; \quad r_{max}=0,105; \quad N=128; \quad S=1$$

даёт искомую величину математического ожидания линейного разрешения на местности $M[L]$, приведенную в таблице 1.

При этом принятое в расчёте значение $r_{max}=0,105$ обусловлено заданием в ТТЗ величин $r_{min}=0,07$ и контраста $k_t=0,2$, определяемого выражением:

$$k_t = \frac{r_{max} - r_{min}}{r_{max} + r_{min}}.$$

Из рассмотрения таблицы 1 следует, что элементы оптимального вектора \bar{q}_{opt} по абсолютной величине действительно малы, что подтверждает допустимость представления L в форме ряда Тейлора (2), ограниченного лишь линейным членом, относительно нулевого опорного значения $\bar{q}_0 = \bar{0}$.

Отрицательные знаки у элементов q_1 и q_2 оптимального вектора \bar{q}_{opt}

указывают на то, что с ростом высоты орбиты и угла крена КА при съёмке величина линейного разрешения ухудшается (L возрастает).

Для получения статистических характеристик распределения измеренных величин L_i также представляет интерес величина среднеквадратического отклонения (СКО) S от его ожидаемого значения.

Величина СКО S может быть получена с использованием известной формулы для дисперсии $D[2]$:

$$D = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (L_i - \hat{L}_i)^2, \sigma = \sqrt{\frac{D}{n}},$$

где L_i - i -е измеренное значение величины ЛРМ; \hat{L}_i - ожидаемое значение ЛРМ, соответствующее i -у измеренному значению, которое может быть получено из соотношения (1) после подстановки в него заданных параметров получения i -го снимка и параметров оптимального вектора \bar{Q}_{opt} .

Проведём анализ полученных результатов, приведенных в таблице 1. При этом необходимо учесть, что в 2007 году, и особенно интенсивно в его первом полугодии, проводилась принудительная дефокусировка объектива телескопа «Геотон – Л1» с целью выполнения требования директивных государственных органов РФ: при проведении съёмок территории России обеспечивать разрешение не лучше 2м. В дальнейшем это ограничение перешло из сферы получения снимка в сферу его трансформирования перед поставкой потребителю для некоторых ограниченных районов РФ. Дефокусировка объектива обеспечивалась заданием программного значения параметра K_{APD} . При этом

диапазон изменения задаваемого параметра K_{APD} в течение 2007 года находился в пределах от -10 до 8.

Это обстоятельство отразилось на величинах СКО инструментальной величины разрешения (в первом полугодии СКО равно 0,18253м, во втором 0,07897м) от её ожидаемого значения.

Из таблицы 1 следует, что близким к оптимальному значением параметра K_{APD} телескопа «Геотон – Л1» в течение первого полугодия 2007 года оставалась величина, равная 8, которая была определена инструментальным путём на этапе лётно-конструкторских испытаний КА в июне 2006г. При этом значении параметра K_{APD} математическое ожидание величины линейного разрешения на местности составляет 1,09832м в первом полугодии 2007г. и 1,25184м – во втором.

Из таблицы 1 следует, что при задании в первом полугодии 2007г. кода АРД, равного 10, величина ЛРМ составляет 0,95706м и при задании во втором полугодии кода АРД, равного 11, величина ЛРМ составляет 0,95733м. С учётом величины σ (при вероятности 0,7) эти значения неоспоримо подтверждают факт выполнения космическим аппаратом «Ресурс-ДК1» требования технического задания в части линейного разрешения на местности.

В отличие от 2007 года, в течение которого плоскость наилучшего изображения телескопа оставалась практически неподвижной, в 2008 году возникли заметные перемещения этой плоскости, отразившиеся на результатах инструментальных измерений разрешения.

Выявление причины и характера этого перемещения не является предметом настоящей статьи, однако, можно отметить, что одной из наиболее

Таблица. Результаты статистической обработки инструментальных измерений линейного разращения на местности

№№ п/п	Индекс массива данных	Кол. измер ений n	Зад. код АРД	Оптимальные значения элементов вектора \vec{q}							Маг. ожд. М[Л], м	СКО, σ м
				q_1 1/км	q_2 1/град.	q_3	q_4 1/град.	q_5	q_6	q_7		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	2007-1	301	10	-0,00387	-0,01192	0,06883	0,00496	0,43573	0,00391	0,01686	0,95706	0,18253
2	2007-2	212	11	-0,00331	-0,01292	0,08941	0,00420	0,08234	0,00038	0,03701	0,95733	0,07897
3	2008-1	155	53	-0,00270	-0,01396	0,00861	0,00592	0,25621	0,00229	-0,00488	0,99704	0,04922
4	2008-2	112	24	-0,00336	-0,00804	0,01471	0,01007	0,07563	0,00361	0,06483	0,98599	0,03506
5	2009-1	139	44	-0,00212	-0,00383	0,01153	0,00068	0,13650	0,00053	-0,01152	0,98584	0,04071

вероятных причин перемещения является изменение температурного режима телескопа.

Из таблицы 1 следует, что среднее за первое полугодие 2008 года вынужденное смещение положения ПНИ от исходного положения ($K_{АРД}=11$) составило -42 кода АРД (в направлении приближения к объективу), так что для получения качественного снимка необходимо было вернуть ПНИ в исходное положение, задав перемещение из положения $K_{АРД}=11$ в положение $K_{АРД}=53$.

Аналогичный факт имел место и во втором полугодии 2008 года, за исключением изменения знака вынужденного смещения положения ПНИ, а именно: из предыдущего исходного положения ($K_{АРД}=53$) ПНИ совершила вынужденное перемещение в среднем на +29 кодов АРД (в сторону удаления от объектива), так что для получения качественного снимка необходимо было вернуть её в исходное положение, задав перемещение из положения $K_{АРД}=53$ в положение $K_{АРД}=24$.

Наконец, в первом полугодии 2009г. ПНИ в среднем переместилась ещё на -20 кодов АРД (в сторону приближения к объективу). Для компенсации этого вынужденного перемещения необходимо было задавать при планировании съёмки код АРД, примерно равный +44. При задании кода АРД, отличного от указанного, могли возникнуть случаи ухудшения качества снимков.

Необходимо подчеркнуть, что приведённые значения вынужденных перемещений ПНИ являются приближёнными, поскольку они определены «в среднем» за каждое полугодие. Сузить временной интервал с целью выявления динамики перемещений ПНИ не представляется возможным в связи с неизбежным уменьшением в этом случае объёма обрабатываемых данных, необходимых для качественного

оценивания достаточно большого числа параметров (7 элементов вектора \bar{Q}_{opt}).

Подводя итоги проведённому анализу, можно сделать следующие выводы.

1. Требования тактико-технического задания Федерального Космического Агентства на разработку и создание КА «Ресурс-ДК1» в части линейного разрешения на местности в панхроматическом диапазоне спектра выполнены.

2. В результате анализа полученной информации выявлены вынужденные средние перемещения плоскости наилучшего изображения телескопа «Геотон – Л1» в течение 2008г. и первого полугодия 2009г., причём в первом полугодии 2008г. в среднем на -42 кода АРД, во втором – на +29 кодов и в первом полугодии 2009г. – ещё на -20 кодов.

При этом качество снимков в целом соответствовало предъявленным требованиям.

3. Разработанный в настоящей статье алгоритм статистической обработки результатов инструментальной оценки линейного разрешения на местности может быть использован для контроля положения плоскости наилучшего изображения телескопа «Геотон-Л1» и планирования кодов АРД в процессе штатной эксплуатации КА «Ресурс-ДК1».

Библиографический список

1. Тактико-техническое задание на разработку и создание оперативного космического комплекса детального оптико-электронного наблюдения земной поверхности «Ресурс-ДК». 1998. – 27 С.

2. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей. [Текст] / Е.С. Вентцель // - М.: Физматгиз. 1969. - 576 С.

References

1. Performance characteristics for “Resurs-DK” space system engineering and production for detailed optoelectronic Earth observation. 1998 – p.27.

2. “Probability theory”. [text] / E.S. Venttsel //M.: Phismatgiz. 1969/- p.576.

STATISTICAL ESTIMATION OF RESURS-DK1 SC IMAGE QUALITY MODIFIED TO ACCEPTABLE SURVEY CONDITIONS

© 2010 R.N. Akhmetov, A.Y. Bogatov, I.N. Losev, V.F. Petrishchev

FSUI SRPSRC “TsSKB-Progress”, Samara

Instrumental assessment results of linear ground resolution of images, acquired during normal operation of RESURS-DK1 SC were statistically handled by modifying them to acceptable survey conditions. Conclusion about fulfilling the SC performance task requirements, particularly requirements to linear ground resolution within panchromatic spectrum range, was proved on the basis of voluminous statistical data (more than 900 scanings). Exponential function was chosen as approximating expression of linear ground resolution. Appreciable best image plane travels were detected during normal SC operation.

Linear ground resolution, telescope lens, gray filter, focusing, optronic converter, charge-coupled device, panchromatic range, matrix, fineness of scanning

Информация об авторах

Ахметов Равиль Нургалиевич, Генеральный конструктор ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», кандидат технических наук, e-mail: csdb@samtel.ru. Область научных интересов - проектирование изделий ракетно-космической техники.

Богатов Алексей Юрьевич, инженер-конструктор, ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», e-mail: csdb@samtel.ru. Область научных интересов - получение и обработка информации.

Лосев Игорь Николаевич, заместитель начальника отдела ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», e-mail: csdb@samtel.ru. Область научных интересов - проектирование оптико-электронной аппаратуры дистанционного зондирования Земли.

Петрищев Владимир Фёдорович, начальник сектора, ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», доктор технических наук, e-mail: csdb@samtel.ru. Область научных интересов - получение и обработка информации.

Akhmetov Ravil Nurgalievich, General designer, Samara Space Rocket Centre “TsSKB-Progress”, Candidate of Engineering, e-mail: csdb@samtel.ru. Field of scientific interest – space vehicles engineering.

Bogatov Alexey Yurevich, Design engineer, Samara Space Rocket Centre “TsSKB-Progress”, e-mail: csdb@samtel.ru. Field of scientific interest – data acquisition and processing.

Losev Igor Nikolaevich, Deputy Head of division, Samara Space Rocket Centre “TsSKB-Progress”, e-mail: csdb@samtel.ru. Field of scientific interest – Earth remote sensing optical equipment design.

Petrishchev Vladimir Fyodorovich, Team leader Samara Space Rocket Centre “TsSKB-Progress”, Doctor of Engineering, e-mail: csdb@samtel.ru. Field of scientific interest – data acquisition and processing.