

УДК 629.78 (075)

Модели для оценки показателей интегральной производительности съёмки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли с учётом надёжности на этапе электрических испытаний

Лохматкин В.В.

Ракетно-космический центр «Прогресс», РКЦ «Прогресс»,

ул. Земеца, 18, Самара, 443009, Россия

e-mail: lohmatkin.vadim@yandex.ru

Аннотация

Разработано математическое и программное обеспечение для имитационного моделирования влияния отказов модификаций целевой аппаратуры космических аппаратов наблюдения на показатели интегральной производительности съёмки.

Ключевые слова: интегральная производительность съёмки, космический аппарат, отказ, электрические испытания.

Актуальность и постановка задачи исследования

Современный космический аппарат (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с различным типом целевой аппаратуры является элементом геоинформационной системы и входит в состав орбитальной группировки космических средств (КС) наблюдения [1,18]. Для повышения показателей производительности съёмки в площади в интересах решения задач

картографирования и мониторинга орбитальная группировка КА ДЗЗ должна быть построена таким образом, чтобы получать максимальную площадь зондирования за каждый виток. Кроме того, необходимо чтобы участки зондирования земной поверхности каждого КА, том числе и различным составом целевой аппаратуры, дополняли бы друг друга.

Рассматривая оценку отдельно взятых показателей производительности съёмки [1]-[4]: площадь маршрутов, площадок, можно перейти к прогнозированию интегральной производительности съёмки. Интегральную производительность съёмки в площади можно рассматривать для различных бортовых систем КА ДЗЗ, относящихся к оптико-электронной целевой аппаратуре. Такими бортовыми системами являются оптико – электронный телескопический комплекс (ОЭТК), гиперспектральная аппаратура (ГСА), комплексная широкозахватная аппаратура (КШМСА). Под интегральной производительностью съёмки понимается суммарная площадь районов зондирования, отснятая с помощью ОЭТК, ГСА, КШМСА.

Интегральная производительность съёмки в значительной степени определяется показателями надёжности бортовых систем, в том числе и, целевой аппаратуры. Отказы бортовой и целевой аппаратуры приводят к простоям по целевому функционированию и снижению отдельных показателей интегральной производительности. К последним относятся: производительность съёмки в режиме работы ОЭТК, ГСА, КШМСА.

Отказоустойчивость бортовых систем КА с одной стороны, определяется проектным уровнем надёжности приборов, а с другой стороны, уровнем надёжности по результатам наземных испытаний [13,14,15]. Проблема состоит в том, что в

настоящее время оценка показателей целевой эффективности в зависимости от показателей надёжности КА ДЗЗ, производится, по результатам эксплуатации уже созданных КА. Оценка надёжности бортовых систем при наземных испытаниях в настоящее время производится по результатам комплексной программы экспериментальной отработки (КПЭО) эксплуатирующихся КА. Для КА с дополнительными функциями целевой аппаратуры, новых типов КА, использовать имеющийся и обработанный статистический материал не удаётся в полной мере [21].

В работе [5] рассмотрен вопрос об оценке надёжности системы обеспечения теплового режима (СОТР) КА при электрических испытаниях. При этом не рассматриваются другие виды наземных испытаний бортовых систем, и остаётся открытым вопрос о контроле и оценке надёжности других систем КА [14, 17,19].

В работе [6] рассматриваются вопросы обеспечения надёжности и безотказности при проектировании пилотируемых ракет-носителей и орбитальных станций. Однако необходимо рассматривать вопросы обеспечения надёжности и безопасности полётов и для различных типов и модификаций целевой аппаратуры КА ДЗЗ. Кроме того, необходимо рассматривать вопросы оценки и подтверждения уровня надёжности не только при проектировании, но и при проведении наземных испытаний. В работе [7,20] рассматриваются вопросы обеспечения надёжности космических аппаратов на этапах проектирования, методы оценки надёжности систем КА при наземных испытаниях. Однако, разработанная логико-вероятностная модель экспериментальной отработки позволяет оценить только изменение надёжности в процессе отработки и не используется в процессе оценки показателей

целевой эффективности, и в частности, для оценки показателей интегральной производительности съёмки.

Влияние показателей надёжности КА ДЗЗ на показатели интегральной производительности съёмки ΣS можно представить в виде графиков, как на рис. 1. На данном рисунке $\Sigma S^I(P)$, $\Sigma S^{II}(P)$, $\Sigma S^{III}(P)$ - возможные формы зависимости показателей интегральной производительности съёмки в площади для различных видов оптико-электронной целевой аппаратуры КА ДЗЗ: ОЭТК, ОЭТК-ГСА, ОЭТК-ГСА-КШМСА; ΣS_0 - значение интегральной производительности съёмки при надёжности, равной единице; $\Sigma S_{дон}$ - допустимый уровень показателя производительности КА ДЗЗ; $\Delta \Sigma S$ - допустимые потери показателя целевой эффективности от снижения надёжности КА ДЗЗ; $\Delta \Sigma S^{I-II}$ - приращение интегральной производительности съёмки в площади для ОЭТК-ГСА (II) по отношению к ОЭТК (I); $\Delta \Sigma S^{II-III}$ - приращение интегральной производительности съёмки в площади для ОЭТК – ГСА - КШМСА (III) по отношению к (II), P_{1H} - нормированное значение уровня надёжности КА.

Суть моделирования

Производится имитация орбитального движения КА и его функционирования по целевому назначению [8,11,12,16]. Имитация отказов БС основывается на алгоритме, используемом для оценки производительности съёмки, выраженной в площади [2]-[3].

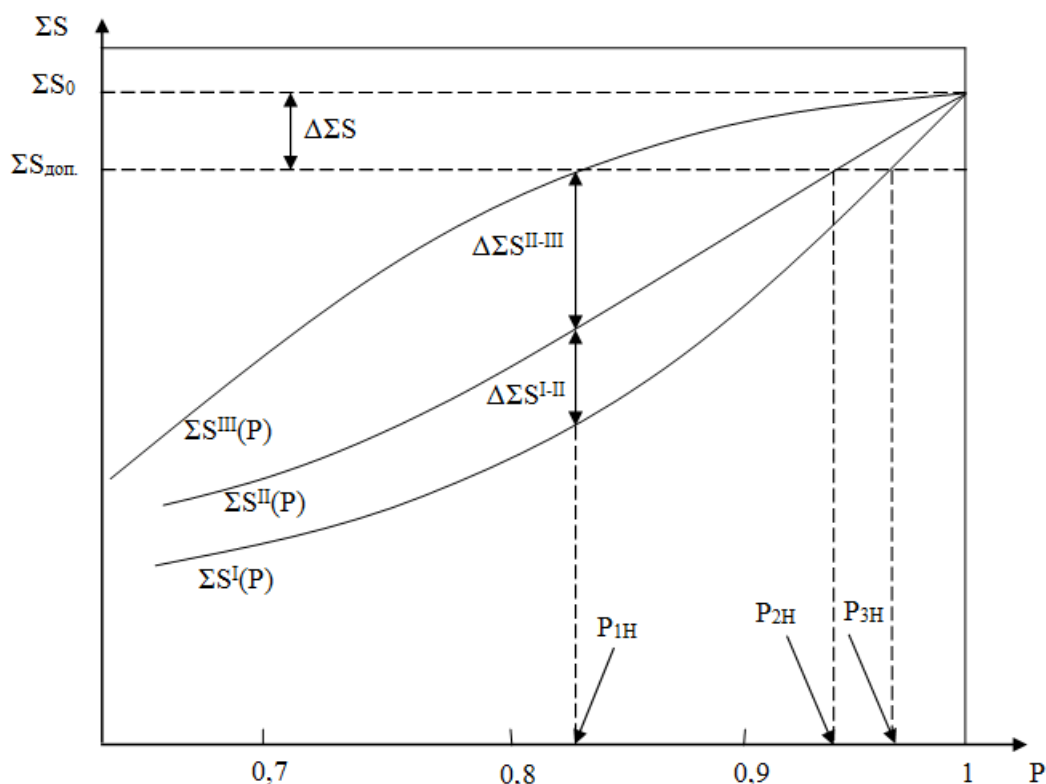


Рис. 1- Влияние показателя надёжности «P» КАН на показатели интегральной производительности съёмки

Доработка алгоритма заключается в введении блока анализа режимов съёмки и счётчика интегральной площади. Если случайное число с равномерным законом распределения на отрезке $[0,1]$ больше или равно значению наперёд заданного числа η , то производится объектовая съёмка и включается счётчик отснятых (ОН). В противном случае включается счётчик площади. В случае работоспособности КА подсчитываются число отснятых ОН и суммарная площадь нарастающим итогом. В случае возникновения частичных отказов БС происходит приостановка работы счётчиков в зависимости от режима работы целевой аппаратуры. Расчеты показателей производительности съёмки производятся для различных уровней надёжности КА с учётом проведённого количества статистических испытаний. Оценка показателей производительности съёмки основывается на методе имитационного моделирования.

Моделирование отказов и проверочных включений БС при электрических испытаниях

При имитации случайного времени отказов какого-либо элемента бортовых систем принят экспоненциальный закон распределения [2]-[3], который характерен для периода нормальной работы элементов сложных изделий.

При моделировании отказов на этапе электрических испытаний рассматривается 3 группы проверочных включений: приборов бортовых обеспечивающих систем, системы управления движением КА ДЗЗ, приборы целевой аппаратуры КА. Определение номера проверочных включений основывается на статистических данных по эксплуатирующимся КА. В таблице 1 в качестве примера рассматривается относительная частота включений групп приборов.

Таблица 1.

Статистические данные
по проверочным включениям

Номер ПВ _i	Относительная частота включений h_i
1	0,152
2	0,228
3	0,619

Учитывая, что сумма относительных частот равна единице, моделирование проверочных включений основано на моделировании дискретных случайных величин. Иллюстрация сути моделирования частоты отказов приведена на рис. 2, где за вероятности P_i приняты соответствующие частоты h_i .

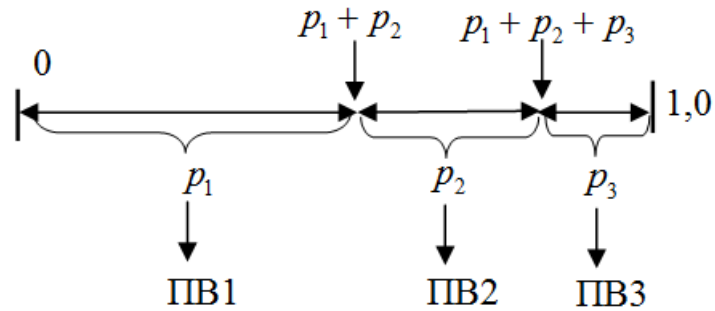


Рис. 2 - Графическая иллюстрация моделирования проверочных включений приборов БС

Алгоритм моделирования применительно к данным, приведённым в качестве примера в табл. 1, представлен ниже.

Вызывается случайное число ξ с равномерным законом распределения на отрезке $[0, 1]$.

Если случайное число оказалось в промежутке $0 \leq \xi < p_1$ (в примере $0 \leq \xi < 0,152$) то осуществляется включение приборов из ПВ1;

Если $p_1 \leq \xi < (p_1 + p_2)$ (в примере $0,152 \leq \xi < 0,38$), то осуществляется включение приборов из ПВ2;

Если $(p_1 + p_2) \leq \xi < (p_1 + p_2 + p_3)$ (т. е. $0,38 \leq \xi < 1,0$), то осуществляется включение приборов из ПВ3.

Моделирование режимов съёмки КА ДЗЗ

В процессе целевого функционирования КА ДЗЗ зондирование поверхности Земли может осуществляться: в режиме объектового наблюдения, съёмки площадок с помощью ОЭТК, ГСА. Моделирование режимов работы оптико-электронного телескопического комплекса основано на моделировании дискретных случайных

величин. Алгоритм моделирования применительно для рассматриваемых показателей производительности съёмки приведён ниже.

Вызывается случайное число ξ с равномерным законом распределения на отрезке $[0, 1]$.

Если случайное число оказалось в промежутке $0 \leq \xi < \eta$, то считается, что производится объективное зондирование.

Если случайное число оказалось в промежутке $\eta \leq \xi < \zeta + \eta$, то считается, что производится площадная съёмка ОЭТК (СППИ).

Если случайное число оказалось в промежутке $\eta^* \leq \xi < 1,0$, то считается, что производится площадная съёмка ГСА.

Иллюстрация сути моделирования режимов съёмки КА ДЗЗ приведена на рис.

3.

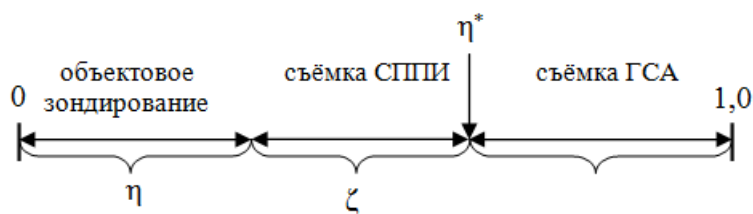


Рис. 3 - Графическая иллюстрация моделирования режимов съёмки

Модели частичных отказов ОЭТК, ГСА, КШМСА

Вопрос о влиянии частичных отказов приборов ОЭТК на показатели производительности в площади был рассмотрен в работе [1]-[3]. В данной работе учитываются частичные отказы групп зон компенсации ГСА, КШМСА при оценке интегральной производительности съёмки. Частичные отказы ОЭП, а именно, отказы источников питания чётных или нечётных матриц зон компенсации,

приводят к снижению показателей производительности в пахроматическом и мультиспектральном диапазонах. При этом снижается производительность комплексированного изображения, полученного при одновременной работе типов бортовых систем, относящихся к целевой аппаратуре (ОЭТК, ГСА, КШМСА). Влияние частичных отказов ОЭТК, ГСА, КШМСА на показатели интегральной производительности съёмки основывается на построении логических моделей и деревьев отказов.

Методология проведения электрических испытаний основывается на построении деревьев отказов бортовых систем, включающих в себя события, соответствующие отказам электрорадио изделий. Кроме того, дерево отказов позволяет рассмотреть порядок подключения приборов при их совместном функционировании. На основе анализа взаимного влияния отказов приборов строятся логические модели проверочных включений при электрических испытаниях, логические модели совместного функционирования приборов целевой аппаратуры. Упомянутые модели являются подфункциями логической функции отказов КА ДЗЗ.

Логическая функция отказов КА ДЗЗ запишется в виде:

$$Y'_{КАДЗЗ} = A'_{СЭП} \vee A'_{СУД} \vee A'_{ОДУ} \vee A'_{СТР} \vee A'_{БСКВУ} \vee A'_{СПШИ} \vee (A'_{КШМСА} \wedge A'_{ГСА}) \vee A'_{ОЭТК} \vee A'_{ВРЛ}. \quad (1)$$

Литерами A со штрихами и индексами обозначены события отказов следующих бортовых систем КА: системы электропитания (СЭП), системы управления движением (СУД), объединённой двигательной установки (ОДУ), системы терморегулирования (СТР), бортового синхронизирующего координатно -

временного устройства (БСКВУ), системы приёма и преобразования информации (СППИ), КШМСА, ГСА, ОЭТК, высокоскоростной радиолинии (ВРЛ). Следует отметить, что СППИ функционально водит в ОЭТК, ГСА, КШМСА.

Алгоритм имитационного моделирования

Алгоритм для оценки влияния частичных отказов ОЭТК, ГСА, КШМСА на интегральную производительность съёмки КА ДЗЗ представлен ниже и основан на сопряжении частных алгоритмов для моделирования проверочных включений приборов при электрических испытаниях, а также включает в себя частные алгоритмы для расчёта производительности съёмки при работе ГСА, КШМСА. Блок-схема алгоритма приведена на рис. 4.

Алгоритм моделирования проверочных включений БС КАН необходимо для разработки подпрограммы расчёта надёжности (PR_N_EI). Этапы построения алгоритма следующие:

1. Ввод показателей надёжности приборов.
2. Задание и изменение статистических испытаний (время одного статистического испытания и их число).
3. Определение номера проверочного включения для БС КАН. Осуществляется по методике, изложенной выше.
4. Расчёт случайного времени отказа на основе экспоненциального закона распределения для k -ой системы, j -го номера проверочного включения. Расчёт случайного времени отказа производится для значений $[j, k]$ на рассматриваемом статистическом испытании. Для следующего статистического испытания значения $[j, k]$ определяются вновь.

5. Проверка условия окончания одного статистического испытания. Осуществляется сравнение текущего времени при моделировании со значением времени одного испытания (T). Если это условие не выполняется, то переходим к пункту 2.

6. Осуществляется приращение времени имитации на шаг расчёта:

$$t_{st_isp.} = t_{st_isp.} + \Delta t . \quad (2)$$

7. Проверка условия равенства текущего времени полёта КА случайному времени отказа групп приборов проверочных включений:

$$t \geq t_{cn.}[j, k]. \quad (3)$$

Если условие 13 не выполняется, то переходим к пункту 8.

8. Если условие 7 выполняется, то логической переменной, определяющей работоспособность прибора, присваивается значение «Ложь» (False), в БС считается отказ.

9. Включается счётчик числа отказов (производится увеличение на единицу к текущему значению отказов для каждого прибора). Счётчик срабатывает при наступлении отказа, при различных статистических испытаниях. Результаты записываются в массив.

10. Проверка условия равенства количества статистических испытаний заданному числу. Если это условие не выполняется, то переходим к пункту 2.

11. Расчёт надёжности приборов с учётом числа отказов при электрических испытаниях [7]. Уровень надёжности приборов, соответствующих окончанию i -го этапа электрических испытаний:

$$H_i[j, k] = (1 - q_{j,k})^{M - m_i}, \quad (4)$$

где M - число источников неисправностей, m_i - число устраняемых отказов на i -ом этапе обработки. В случае если отказов не возникает, а общее число источников неисправностей равно числу работоспособных приборов, то считается, что уровень надёжности рассматриваемого прибора подтверждается по результатам испытаний, а при моделировании отказов в процессе целевого функционирования КА используется вероятность отказов $q_{j,k}$.

Стоит подчеркнуть, что результаты расчётов, полученные в пункте 11, являются исходными данными для имитационного моделирования влияния отказов на показатели целевой эффективности КА ДЗЗ.

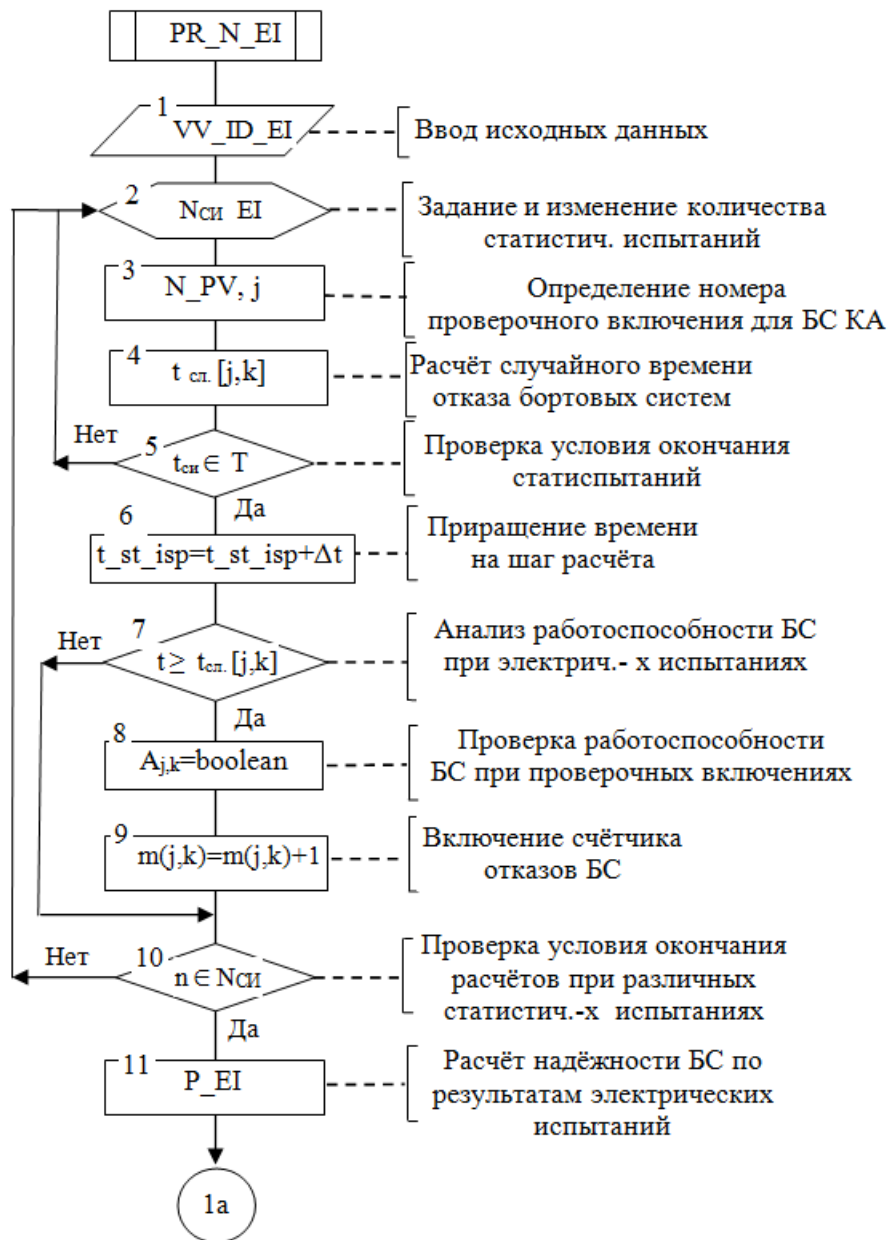


Рис. 4 - Блок алгоритма имитационного моделирования влияния отказов на этапах электрических испытаний на показатели надёжности бортовых систем КА

Блок – схема полученного алгоритма представлена на рис. 5. Пункты алгоритма 2-12, 18-23 подробно рассмотрены в работах [2] – [3] и основаны на моделировании целевого функционирования КА ДЗЗ [8].



Рис. 5 - Блок-схема имитационного моделирования

Рассмотрим основные этапы вновь введённых пунктов:

13. Проверка условия равенства текущего времени полёта КА случайному времени отказа групп зон компенсации ОЭП:

$$t \geq t_{сл.к}. \quad (5)$$

Здесь k - порядковые номера групп зон компенсации ОЭП. В данном пункте рассматриваются невозстановливаемые частичные отказы групп зон компенсации ОЭП. В зависимости от числа отказавших крайних групп зон компенсации определяется коэффициент \bar{s} .

14. Если условие 13 не выполняется или же время возникновения случайного времени отказов групп зон компенсации больше срока активного существования КА, то снижение производительности съёмки ОЭТК (СППИ), ГСА не наблюдается $\bar{s} = 1,0$.

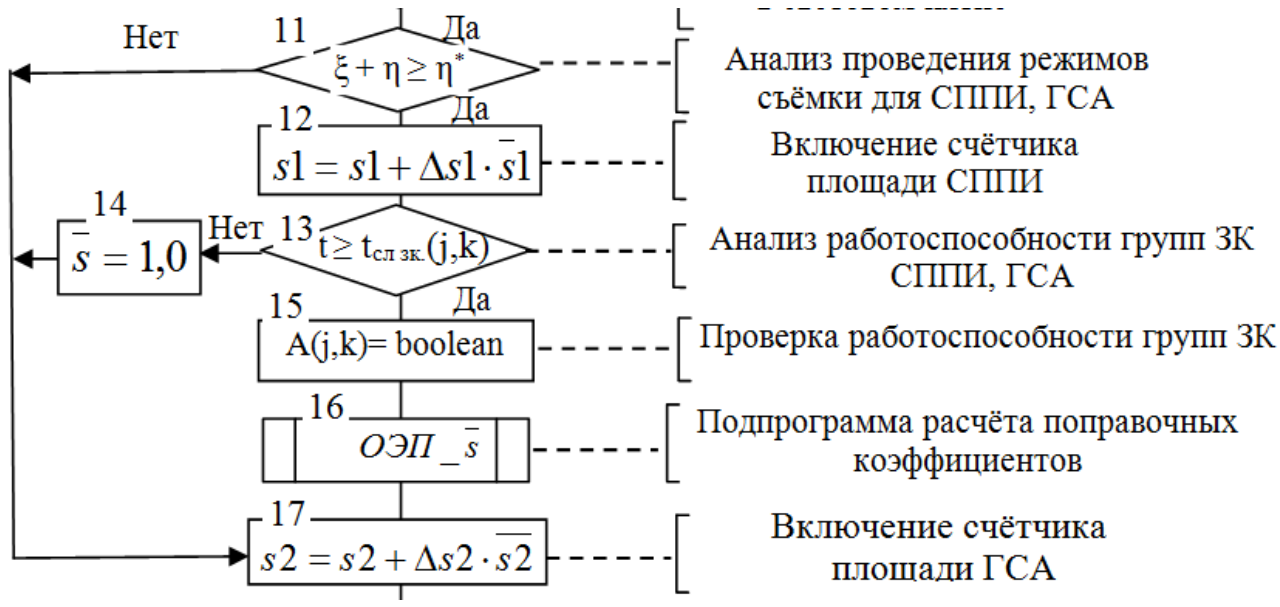


Рис. 6- Блок схема имитационного моделирования влияния отказов целевой аппаратуры на производительность интегральной съёмки

15. Если условие 13 выполняется, то логической переменной, определяющей работоспособность группы зон компенсации присваивается значение «Ложь» (False), КА считается работоспособным.

16. В зависимости от числа отказавших групп зон компенсации соответствующей подпрограммой определяется значение расчетного коэффициента \bar{s} . В данной подпрограмме рассматривается отказ одной из шести групп ЗК, двух из шести групп ЗК и трёх из шести групп ЗК. В программном коде рассматриваемой подпрограммы используются статистические данные, в том числе и по времени простоя по целевому функционированию, используемые в работах [2]-[3].

17. Осуществляется подключение счётчика площади зондирования поверхности Земли с учётом частичных отказов ОЭП СППИ. Если выполняется условие 13, то происходит уменьшение ширины полосы захвата целевой аппаратуры и соответственно снижение производительности съёмки, выраженной в площади с учётом частичных отказов ОЭП.

В приведенном алгоритме на рис. 6 аналогично заменяя статистические данные по отказам можно произвести расчёт площади зондирования для КШМСА.

Программное обеспечение

На основе представленных алгоритмов разработано программное обеспечение, с помощью которого можно на этапе проектирования КА ДЗЗ прогнозировать интегральную производительность съёмки с учётом отказов ОЭТК, ГСА, КШМСА, перерывов в работе элементов до восстановления работоспособного состояния и с учётом характеристик оптико-электронной съёмочной аппаратуры. В качестве базового использовано программное обеспечение для моделирования орбитального полета КА и оценки целевых показателей эффективности с учётом отказов бортовых систем [2]. Доработка программного кода связана с введением процедуры моделирования отказов и проверочных включений на этапе

электрических испытаний, подпрограмм для расчёта производительности съёмки для ГСА, КШМСА с учётом их одновременной работы при расчёте интегральной производительности съёмки. Программа реализована в среде программирования Delphi 7, операционная систем Windows. Перед запуском программы вводятся исходные данные для оценки показателей производительности съёмки с учётом выбранных условий функционирования КА ДЗЗ.

Результаты моделирования

Моделирование интегральной производительности съёмки проводилось при следующих параметрах: орбита круговая с высотой 475 км и наклоном 97,3 градуса, ширина полосы захвата 38 км, долгота восходящего узла 30 градусов, угол Солнца над горизонтом, выше которого возможна съёмка 40 градусов, время перенацеливания 40 с, угол отклонения оптической оси КА от надира до 45 градусов, расчётный срок активного существования КА 5 лет, число групп зон компенсации в линейки ОЭП СППИ принималась равной трём.

На рис. 7 представлена зависимость интегральной производительности съёмки ОЭТК-ГСА от уровня показателей надежности КА. Точки на графике соответствуют математическим ожиданиям показателей интегральной производительности, а вертикальными отрезками – доверительные интервалы, соответствующие 90 процентной доверительной вероятности. Сплошная кривая на графике соответствует сглаженным результатам, а тонкая линия – аппроксимации линейной зависимостью (линия тренда), уравнение которой представлено на поле рисунка. Горизонтальная пунктирная прямая линия соответствует значению интегральной производительности ОЭТК-ГСА без учёта влияния отказов. Числа в поле рисунка

рядом с расчётными точками соответствуют числу проведённых статистических испытаний.

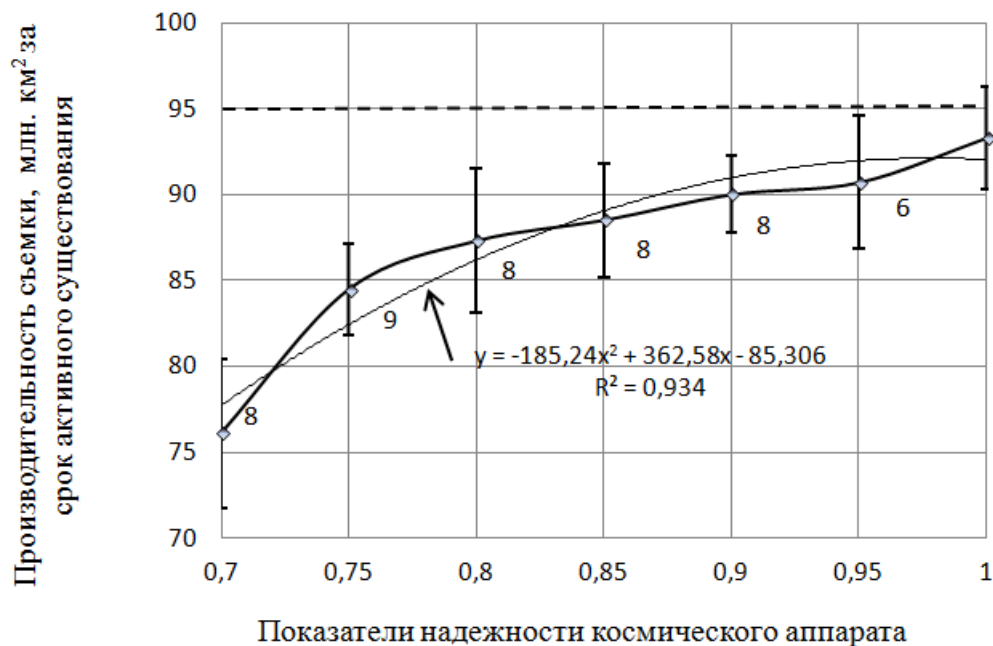


Рис. 7- Зависимость интегральной производительности съёмки от уровня надёжности КА ДЗЗ

Адекватность математических моделей отказов и непротиворечивость результатов подтверждается тем, что при уровнях надёжности эксплуатирующихся КА ДЗЗ среднесуточная производительность равна 49315 км². Это значение среднесуточной производительности меньше аналогичного значения для КА ДЗЗ «Ресурс-П» (80000-100000 км²) – для ширины полосы захвата (38 км) и больше соответствующего значения производительности в площади для КА ДЗЗ «Ресурс-ДК» (33789 км²) – для ширины полосы захвата (28,3 км). Последнее значение рассчитывалось из условия, что за 3 года КА ДЗЗ «Ресурс-ДК» отснял 37 млн. км². Теоретическое значение интегральной производительности съёмки при абсолютной

надежности КА равно $90,7 \text{ млн. км}^2$ за расчётный срок активного существования 5 лет. Доверительные границы оценивались с доверительной вероятностью $\gamma = 0,90$.

Верификация моделей и анализ результатов

Производительность интегральной съёмки СППИ-ГСА рассчитывалась исходя из учета реальной длины оптико-электронного преобразователя, их числа и числа зон компенсации. Тестирование программного обеспечения осуществлялось для ширины полосы захвата для ОЭТК – 38 км, для ГСА – 25 км, для КШМСА (ШМА-СР) – 97 км. Пересчитанное значение показателя производительности КА за срок активного существования КА, равным 5 лет при абсолютной надежности КА составляет, $90,7 \text{ млн. км}^2$.

Полученные результаты моделирования для производительности интегральной съёмки ОЭТК-ГСА, рассчитанные с помощью данного программного обеспечения, примерно соответствуют показателям производительности КА, разработанным в АО «РКЦ «Прогресс» для соответствующих параметров орбит и уровней надёжности.

Из анализа приведенных расчетов следует, что значения математических ожиданий интегральной производительности съёмки увеличиваются с увеличением показателя надежности космического аппарата наблюдения. Это объясняется тем, что при высоких значениях вероятности безотказной работы космического аппарата наблюдения уменьшается частота появления частичных отказов ОЭП СППИ. Уменьшение частоты появления отказов ОЭП СППИ приводит к более высоким значениям эмпирического коэффициента \bar{s} . При уменьшении уровня надежности

космического аппарата наблюдения, порядка $P_{vbr} = 0,7$ снижение производительности объясняется появлением частичных отказов с неработоспособными двумя оптико-электронными преобразователями и их сочетаниями. При этом возникновение отказов оптико-электронных преобразователей рассматривается с одинаковой вероятностью.

Выводы

Разработаны модели, алгоритм и программное обеспечение для имитационного моделирования влияния частичных отказов ОЭП СПИИ, бортовых систем КА ДЗЗ на производительность интегральной съёмки за срок активного существования. С помощью данного программного обеспечения можно более точно прогнозировать производительность съёмки на этапе проектирования, электрических испытаниях КА и оценивать допустимые потери интегральной производительности при отказах КА ДЗЗ. Кроме того, разработанные алгоритмы и модели могут использоваться для оценки интегральной производительности для вариантов работы целевой аппаратуры ОЭТК-КШМСА, ОЭТК-ГСА-КШМСА с учётом надёжности КА ДЗЗ.

Библиографический список

1. Сидельников В.П. Использование орбитальных группировок КА ДЗЗ в интересах картографирования территории России // Геоинформатика. 2013. Т. 19. № 2. С. 66 - 70.

2. Лохматкин В.В. Оценка производительности космического аппарата, выраженной в площади отснятой Земной поверхности с учётом надёжности // Труды МАИ. 2013. № 65. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35935>
3. Лохматкин В.В. Модели для оценки показателей целевой эффективности космических аппаратов дистанционного зондирования Земли с учётом надёжности бортовых систем // Труды МАИ. 2014. № 74. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=49228>
4. Лохматкин В.В. Модель для оценки производительности моноскопической стереосъёмки космическими аппаратами дистанционного зондирования Земли с учётом надёжности бортовых систем // Труды МАИ. 2015. № 81. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=57787>
5. Белова В.В., Фомин В.М. Количественная оценка показателя надёжности системы обеспечения теплового режима космического аппарата при электрических испытаниях // Вестник НПО им. Лавочкина. 2013. Т. 19. № 3. С. 51 - 56.
6. Золотов А.А., Нуруллаев Э.Д. Методика обеспечения надёжности и безопасности при реализации космических программ КА ДЗЗ // Полет. 2014. № 3. С. 40 - 48.
7. Золотов А.А. Обеспечение надёжности транспортных аппаратов космических систем - М.: Машиностроение, 1988. - 216 с.
8. Попович П.Р., Скребышевский Б.С. Баллистическое проектирование космических систем. - М.: Машиностроение, 1987. - 240 с.
9. Малышев В.В., Старков А.В., Фёдоров А.В. Методика разработки программно-моделирующего комплекса для отработки средств проведения динамических

операций космических аппаратов // Труды МАИ. 2012. № 57. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=30798>

10. Емельянов А.А., Малышев В.В., Смольянинов Ю.А., Старков А.В. Формализация задачи оперативного планирования целевого функционирования разнотипных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Труды МАИ. 2017. № 96. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=85921>

11. Дарнопых В.В. Автоматизация параметрического анализа целевого функционирования космических систем дистанционного зондирования Земли // Труды МАИ. 2011. № 47. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=26960>

12. Усовик И.В., Дарнопых В.В. Автоматизированный программный комплекс для параметрического анализа и оптимизации планирования целевого функционирования космических систем ДЗЗ // Труды МАИ. 2013. № 65. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35957>

13. Yong Z, Xiao-Qian, W. Zhen-Guo. Development in multidisciplinary design optimization of the spacecraft // Journal Astronaut, 2006, no. 27, pp. 227 - 232.

14. Hengeveld D.W. Review of modern spacecraft thermal control technologies // HVAC&R Research, 2010, vol. 16, no. 2, pp. 189 - 220.

15. Corpino S., Stesina F. Verification of a CubeSat via Hardware-in-the-Loop Simulation // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2014, vol. 50, no.4, pp. 2807 - 2818.

16. Markley F.L. Attitude Determination using Vector Observations and the Singular Value Decomposition // Journal of the Astronautical Sciences, 1988, vol. 38, pp. 245 - 258.

17. Birur G.C., O`Donnell T.P. Advanced thermal control technologies for space science missions at Jet Propulsion Laboratory // Space Technology and Applications International Forum-2001, AIP Publishing, 2001, vol. 552, no. 1, pp. 263 - 270.
18. Shaw G. Spectral Imaging for Remote Sensing // Lincoln Laboratory Journal, 2003, vol.14, no.1, pp. 3 - 28.
19. Wertz J.R., Everett D.F., Puschell J.J. (ed.). Space mission engineering: the new SMAD. Microcosm Press, 2011, pp. 685 - 700.
20. Фурманова Е.А., Бойко О.Г. О точности определения надёжности систем статистическими методами // Вестник СибГАУ. 2013. Т. 48. № 2. С. 134 - 143.
21. Лохматкин В.В., Куренков В.И. Прогнозирование производительности съёмки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли с учетом надежности бортовых систем // Известия Самарского центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. № 4(2). С. 465 – 472.